



DISSERTATION

## **Prädiktion von GNSS-Satellitenuhren**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der technischen Wissenschaften

unter der Leitung von

**a.o. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Weber**

Institut für Geodäsie und Geophysik, Höhere Geodäsie, TU Wien

Zweitbegutachter:

**Univ.-Prof. Dr.phil.nat. Urs Hugentobler**

Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie,  
Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG), TU München

eingereicht an der Technischen Universität Wien,  
Fakultät für Mathematik und Geoinformation

von

**Veronika Bröderbauer**

E9325992

Alauntalstraße 77/13

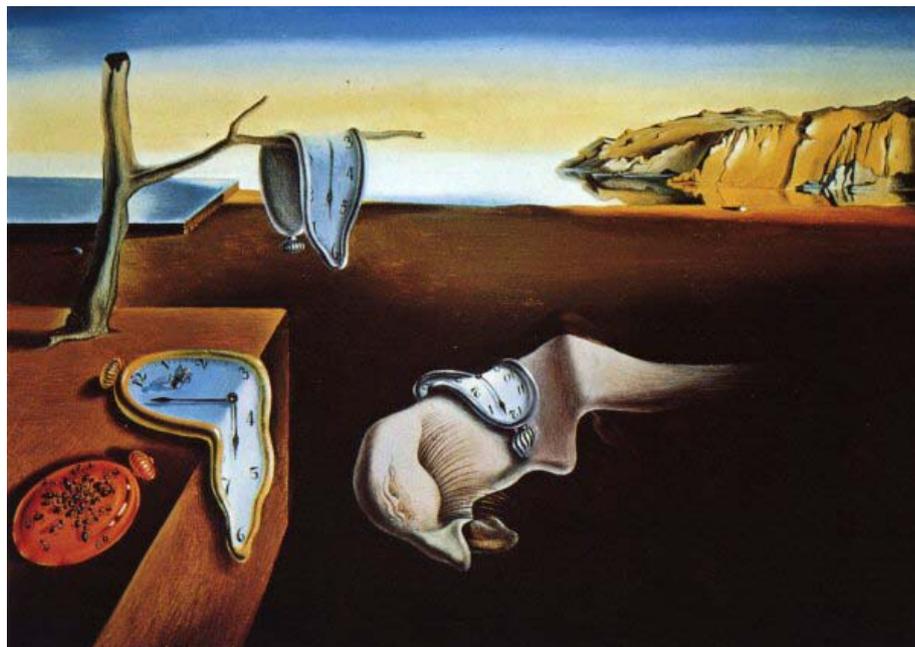
3500 Krems/Donau

Wien, im November 2010

## Was ist Zeit?

Zur Einstimmung zum Thema „Zeit“ folgen zu Beginn drei Deutungen aus Literatur und Kunst:

- “Es gibt ein großes und doch ganz alltägliches Geheimnis. Alle Menschen haben daran teil, jeder kennt es, aber die wenigsten denken je darüber nach. Die meisten Leute nehmen es einfach so hin und wundern sich kein bisschen darüber. Dieses Geheimnis ist die Zeit. Es gibt Kalender und Uhren, um sie zu messen, aber das will wenig besagen, denn jeder weiß, dass einem eine einzige Stunde wie eine Ewigkeit vorkommen kann, mitunter kann sie aber auch wie ein Augenblick vergehen - je nachdem, was man in dieser Stunde erlebt. Denn Zeit ist Leben. Und Leben wohnt im Herzen.” [M. Ende, 1973: Momo. Thienemann-Verlag, Stuttgart]
- “Das interessante am Zeitproblem ist: Je mehr man über die Zeit nachdenkt, desto deutlicher merkt man, dass sie überhaupt nicht existiert. Die Zeit besteht aus Vergangenheit, die nicht mehr existiert, und aus Zukunft, die noch nicht existiert - und der Schnittpunkt dieser beiden Irrealitäten ergibt eine vermeintliche Realität, den Augenblick. In dem Moment aber, in dem Sie sich überlegen: Was ist der Augenblick?, schwindet er Ihnen unter den Händen weg, weil er immer kleiner wird, zuletzt zu einer Nanosekunde schrumpft. Was ist Zeit? Es gibt sie eigentlich nicht, und doch ist sie ein Erfahrungsinhalt.” [F. Kreuzer im Gespräch mit M. Ende und B. Kanitschneider, 1984: Zeit-Zauber. Unser Jahrhundert denkt über das Geheimnis der Uhren nach.]
- 1931 schuf der Maler Salvador Dali eines seiner bekanntesten Werke: „Die Beständigkeit der Erinnerung“ bzw. „Die weichen Uhren“. Auch unter dem Titel „Die zerrinnende Zeit“ ist das Ölbild bekannt. Das Bild ist eine surrealistische Abbildung zum Thema Zeit. Inspiriert wurde Dali dabei allerdings von einem Camembert, einem französischen Weichkäse. Wie dieser „zerfließt“ die Zeit für jeden anders, während sie für den einen schnell vergeht, scheint sie für einen anderen nahezu stillzustehen. Dennoch hat niemand Einfluss auf den Lauf der Zeit. Erst in der Erinnerung ist es möglich, vergangene Erlebnisse zu dehnen, zu verkürzen oder anzuhalten (= Beständigkeit). Das Bild Dalis soll das individuelle Zeitempfinden des Einzelnen symbolisieren.



# INHALTSVERZEICHNIS

## Zusammenfassung / Abstract

<b>0 Einleitung</b>	<b>1</b>
<hr/>	
<b>1 Zeit &amp; Frequenz</b>	<b>4</b>
1.1 Was ist Zeit? - Definition .....	4
1.2 Die Zeitmessung in der Physik .....	5
1.2.1 Chronologie .....	5
1.2.2 Zeitdefinition, Frequenz und Perioden .....	6
1.2.3 Zeitskalen .....	8
1.3 Das Zeitnormal .....	9
1.3.1 Verschiedene Zeitnormale .....	9
1.4 Frequenzanalyse .....	12
1.5 Stabilität der Frequenz- und Zeitmessung .....	13
1.6 Die Allan Varianz .....	15
<hr/>	
<b>2 Zeitsysteme</b>	<b>20</b>
2.1 Zeitsysteme basierend auf dem Umlauf der Erde um die Sonne .....	20
2.2 Zeitsysteme basierend auf der Erdrotation - Sternzeit und Weltzeit .....	22
2.3 Zeitsysteme basierend auf atomaren Schwingungen .....	23
2.4 Zeitkoordinaten .....	25
<hr/>	
<b>3 Uhren</b>	<b>26</b>
3.1 Funktionsweise einer Uhr .....	26
3.2 Unterschiedliche Uhrentypen .....	28
3.2.1 Kalender .....	28
3.2.2 Elementare Uhren (Analoguhren) .....	28
3.2.3 Mechanische Uhren .....	29
3.2.4 Moderne Entwicklungen in der Zeitmessung .....	30
3.2.5 Optische Uhr .....	34
<hr/>	
<b>4 Satellitennavigationssysteme</b>	<b>35</b>
4.1 GPS .....	35
4.2 GLONASS .....	47
4.3 Galileo .....	51
<hr/>	
<b>5 Zeitübertragung</b>	<b>55</b>
5.1 Ein-Weg-Zeitübertragung .....	55
5.2 Zwei-Weg-Zeitübertragung .....	56
5.3 Zeitübertragung bei gleichzeitiger Beobachtung eines Satelliten von zwei Bodenstationen (Common View GPS Time Transfer) .....	59
5.4 Zeit- und Frequenzübertragung mittels GPS-Trägerwellen .....	60
<hr/>	
<b>6 IGS - International GNSS Service</b>	<b>61</b>
5.1 Informationen über das IGS .....	61
5.2 Die Produkte des IGS .....	63

<b>7</b>	<b>Statistische Untersuchung von Ultra-Rapid-Satellitenuhrkorrekturdaten</b>	<b>66</b>
7.1	Ausgangsdaten .....	66
7.2	Abweichungen der Uhrkorrekturen von der Referenz .....	66
7.3	Untersuchung der trendreduzierten Differenzen .....	70
<b>8</b>	<b>Prädiktion von GPS-Satellitenuhren</b>	<b>74</b>
8.1	A priori Genauigkeitsabschätzung .....	74
8.2	Uhrcharakteristiken .....	75
8.3	Beschreibung des Prädiktionsverfahrens .....	79
8.3.1	Vorbereitung der Daten .....	79
8.3.2	Prädiktionsmodell .....	80
8.3.3	Ergebnisse .....	83
8.4	Periodisches Uhrenverhalten .....	90
8.5	Approximation und Interpolation von Uhrkorrekturen .....	93
<b>9</b>	<b>GLONASS - Testscenario einer Uhrenprädiktion</b>	<b>102</b>
9.1	Prädiktion von GLONASS-Satellitenuhren .....	102
9.2	Typ und Verhalten der GLONASS-Satellitenuhren .....	102
9.3	Sprung an der Tagesgrenze .....	107
9.4	Prädiktion - Praktischer Test .....	108
<b>10</b>	<b>Prädiktion von GPS-Satellitenuhren mittels Kalman-Filter</b>	<b>112</b>
10.1	Zur Theorie des Kalman-Filters .....	112
10.2	Grundlagen des Kalman-Filters .....	113
10.3	Praktische Umsetzung des Kalman-Filters bei der Uhrenprädiktion .....	114
10.3.1	Berechnungsalgorithmus und Filterparameter .....	114
10.3.2	Start des Kalman-Filters und Parameterverlauf .....	116
10.3.3	Genauigkeitsbetrachtungen .....	119
10.3.4	Handhabung von Datenlücken .....	126
10.3.5	Datenarchivierung .....	127
<b>11</b>	<b>Anwendungsmöglichkeiten und Ausblick</b>	<b>128</b>

Abkürzungsverzeichnis	
Quellenangaben von Abbildungen und Tabellen	
Literaturverzeichnis	
Weblinks	

---

## Lebenslauf

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Charakterisierung und Prädiktion von GNSS-Satellitenuhren.

Für die Entwicklung eines Algorithmus zur Vorausberechnung von Uhrkorrekturdaten ist das Studium des Verhaltens der unterschiedlichen Uhrentypen der GNSS-Satelliten notwendig. Dies wird auf Basis der vom IGS und dessen ACs bereitgestellten Ultra-Rapid-Uhrkorrekturdaten durchgeführt. Als Referenz dienen dabei die IGS-Rapid-Daten. Für ein dreistündiges Prädiktionsintervall erreichen alle ACs annähernd dieselbe Genauigkeit mit einem mittleren Fehler im Bereich von 0,1 bis 0,4 ns. Für längere Prädiktionszeiträume beginnen die Ergebnisse leicht von einander abzuweichen. Für ein 12-stündiges Intervall erreichen die Differenzen einen Bereich von knapp unter 10 ns (GFZ, CODE) bis zu einigen 10er ns.

Es zeigt sich, dass der Verlauf der Abweichungen der Rubidium-Satellitenuhren von GPS-Zeit mit einem einfachen quadratischen Polynom beschreibbar ist. Cäsiumuhren jedoch zeigen eine 12-stündige Periode mit einer Amplitude von bis zu 6 ns. Ein Vergleich des von der Satellitenbahnebene und dem Ortsvektor zur Sonne aufgespannten Raumwinkels mit den Amplituden zeigt, dass hier eine eindeutige Korrelation vorliegt. Es wird daraus geschlossen, dass die vorliegenden Schwankungen der Cäsiumuhren auf Temperaturänderungen zurückzuführen sind.

Aufgrund der 12-stündigen Periode der Cäsiumuhrkorrekturdaten wird als Prädiktionsmodell ein quadratisches Polynom mit einer zusätzlichen Sinusschwingung angesetzt. Die drei Parameter des Polynoms sowie die Amplitude und Phasenverschiebung des periodischen Terms werden in einem Ausgleich mit geschätzt. Als Eingangsdaten dient dem Prädiktionsprogramm GNSS-VC/static eine zweitägige Zeitreihe der vom IGS öffentlich verfügbaren Ultra-Rapid-Produkte. Dabei werden jeweils die ersten 24 Stunden dieser Daten verwendet. Mit den ermittelten Parametern werden Uhrkorrekturen für unterschiedlich lange Intervalle prädiziert. Die Ergebnisse zeigen, dass der mittlere Fehler der prädizierten Korrekturen für Satelliten mit aktiven Rubidiumuhren bis zu einem Prädiktionsintervall von 6 Stunden unter 1-1,5 ns liegt. Für das 12-stündige Intervall steigt er auf ca. 2-3 ns an. Das entspricht einem Distanzfehler von ca. 60-90 cm. Weiters wird gezeigt, dass bei der Erweiterung des quadratischen Polynoms um den periodischen Term auch die Rubidiumuhren eine geringfügig höhere Genauigkeit aufweisen als ohne selbigen. Ein Vergleich mit den Ultra-Rapid-Uhrkorrekturdaten der einzelnen ACs des IGS zeigt, dass die mit dem Programm GNSS-VC/static berechneten Uhrkorrekturen eine sehr gute Qualität aufweisen.

Der Einsatz von GNSS-VC/static für GLONASS-Satellitenuhren erweist sich dagegen als problematisch. Die einzelnen Uhren zeigen ein sehr unterschiedliches Verhalten und es finden sich Sprünge und Datenlücken in den Zeitserien über den Verlauf von nur wenigen Stunden. Eine Prädiktion von GLONASS-Uhren ist deshalb zum Zeitpunkt der Arbeit nicht Ziel führend.

Abhängig vom um drei Stunden verzögerten Erscheinen der Ultra-Rapid-Uhrkorrekturen weisen die Ergebnisse der Parameterbestimmung aus GNSS-VC/static die gleiche Verspätung auf. Ihr "Prädiktionsnullzeitpunkt" ist beim Erscheinen also bereits drei Stunden alt. Die Entwicklung des Programms GNSS-VC/kalman zielt darauf ab, die Parameter des Prädiktionsmodells in Quasi-Echtzeit zu bestimmen. Da der Prädiktionszeitraum auf sechs Stunden reduziert wird, wird als Modell nur noch ein rein quadratisches Polynom ohne zusätzlichen periodischen Term verwendet. Als Eingangsdaten dienen Uhrkorrekturdaten aus dem Programm RTR-Control, welches ebenfalls an der TU Wien entwickelt wurde [Opitz, 2010]. Diese Daten werden im Minutentakt berechnet und an einem Server des

Instituts zur Verfügung gestellt. Nach der "Einschwingzeit" des Kalman-Filter-Algorithmus (ca. 30 Minuten) liegt der mittlere Fehler der mit dem Kalman-Filter prädizierten Uhrkorrekturen für einen großen Teil der Satellitenuhren unter 2 ns.

## **Abstract**

This thesis deals with the characterisation and prediction of GNSS-satellite-clocks.

A prerequisite to develop powerful algorithms for the prediction of clock-corrections is the thorough study of the behaviour of the different clock-types of the satellites. In this context the predicted part of the IGU-clock-corrections provided by the Analysis Centers (ACs) of the IGS was compared to the IGS-Rapid-clock solutions to determine reasonable estimates of the quality of already existing well performing predictions. For the shortest investigated interval (three hours) all ACs obtain almost the same accuracy of 0,1 to 0,4 ns. For longer intervals the individual predictions results start to diverge. Thus, for a 12-hours- interval the differences range from nearly 10 ns (GFZ, CODE) until up to some "tens of ns".

Based on the estimated clock corrections provided via the IGS Rapid products a simple quadratic polynomial turns out to be sufficient to describe the time series of Rubidium-clocks. On the other hand Cesium-clocks show a periodical behaviour (revolution period) with an amplitude of up to 6 ns. A clear correlation between these amplitudes and the Sun elevation angle above the orbital planes can be demonstrated. The variability of the amplitudes is supposed to be caused by temperature-variations affecting the oscillator.

To account for this periodical behaviour a quadratic polynomial with an additional sinus-term was finally chosen as prediction model both for the Cesium as well as for the Rubidium clocks. The three polynomial-parameters as well as amplitude and phase shift of the periodic term are estimated within a least-square-adjustment by means of program GNSS-VC/static.

Input-data are time series of the observed part of the IGU clock corrections. With the estimated parameters clock-corrections are predicted for various durations. The mean error of the prediction of Rubidium-clock-corrections for an interval of six hours reaches up to 1,5 ns. For the 12-hours interval 2-3 ns are obtained. This represents a distance-error of 60-90 cm. A comparison of the results from GNSS-VC/static to the predicted Ultra-Rapid-clocks of the ACs of the IGS confirms the very good quality of our clock solution which is at the level of the best AC solutions.

The use of GNSS-VC/static for GLONASS-satellite-clocks is problematic. The GLONASS satellite clocks show a hard to characterize behaviour covering a number of jumps and breaks in the time-series within just a few hours. Therefore the prediction of GLONASS-satellite-clocks seems not reasonable at this time. In view of more stable clocks upcoming with the new GLONASS satellite generation K a similar model as used to characterize the GPS Rubidium clock might be applicable.

The results of GNSS-VC/static are affected by a three-hours-delay. Thus an almost real-time solution to obtain high quality clock predictions has been established in parallel. The programme GNSS-VC/kalman enables to evaluate the parameters of the prediction-model by a Kalman-filter approach. Because of the short prediction-interval of just six hours the model is reduced to a simple quadratic polynomial. Input-data are RT-clock-corrections evaluated with the programme RTR-Control [Opitz, 2010] based on the observation data provided by the IGS-RT project. The clock correction polynomial coefficients are estimated every minute. After an initialization period of the filter (about 30 minutes) the mean error of the polynomial parameters as well as the evaluated clock corrections is below 2 ns for most of the satellite clocks.

## Einleitung

Für Positionierungs- und Zeitübertragungsaufgaben mittels GNSS benötigt der Nutzer Informationen über die Satellitenbahn- und -uhren. Die Analysis Centers des IGS (International GNSS Service) stellen die Bahnkoordinaten sowie die Abweichungen der GPS- und GLONASS-Satellitenuhren zu GPS-Zeit zur Verfügung. Diese Daten sind jeweils am folgenden Tag über einen freien ftp-Server erhältlich. Die Bahn- und Uhrinformationen sind das Ergebnis einer Parameterschätzung (vermittelnder Ausgleich nach der Methode der kleinsten Quadrate) auf Basis der Beobachtungsdaten des IGS-Stationsnetzes.

Schwieriger wird es, wenn die Empfängerkoordinaten in Echtzeit zur Verfügung stehen sollen. Hierbei kann nun nicht mehr auf aus Beobachtungen berechneten Satellitenbahn- und -uhrendaten zurückgegriffen werden. Deshalb ist es notwendig, selbige Informationen für einen begrenzten Zeitraum vorzurechnen, also in die Zukunft zu präzisieren. Während die Bahnen der Satelliten mit Hilfe eines sehr gut bekannten Kräfte Modells berechnet werden können, müssen die Uhrkorrekturen in Bezug zu GPS-Zeit mittels eines auf Erfahrungswerten basierenden mathematischen Prädiktionsmodells extrapoliert werden. Die Analysis Centers des IGS verwenden für die Prädiktion dieser Uhrendaten verschiedene mathematische Modelle, die sich sowohl im Grad des Basispolynoms als auch im Umfang der verwendeten Eingangsdaten beträchtlich unterscheiden. Je nach der Genauigkeitsanforderung seiner Aufgabenstellung kann der Nutzer zurzeit zwischen zwei qualitativ unterschiedlichen Produkten wählen. Die Broadcastsatellitenbahnen und -uhren weisen eine Genauigkeit von  $\approx 100$  cm bzw.  $\approx 5$  ns auf. Sie sind ein wesentlicher Bestandteil der von den Satelliten gesendeten Daten. Die IGS-Ultra-Rapid-Produkte stehen dem Nutzer ebenfalls in Echtzeit über das Internet zur Verfügung. Die Genauigkeit beträgt hier  $\approx 5$  cm für die Satellitenbahnen und  $\approx 3$  ns für die Uhrkorrekturen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde an der TU Wien das Programm GNSS-VC/static (GNSS-Vienna Clocks /static) entwickelt, welches seit Oktober 2006 mittels eines eigenen Prädiktionsmodells Satellitenuhrkorrekturdaten über einen Zeitraum von bis zu 12 Stunden prädiziert. Dabei wurden zwei verschiedene Prädiktionsfunktionen untersucht. Das Ziel war eine Vorhersagegenauigkeit der Uhren von  $< 2$  ns für einen Prädiktionszeitraum von ca. neun Stunden. Die Parameter des endgültigen Modells sind die Koeffizienten eines quadratischen Polynoms sowie die Amplitude und die Phasenverschiebung einer zusätzlichen Sinusschwingung mit der Periodendauer eines Satellitenumlaufs. Als Eingangsgrößen dienen die Ultra-Rapid-Produkte des IGS, welche dem Nutzer mit einer Verzögerung von ca. drei Stunden über die Homepage des IGS zur Verfügung stehen. Die mittels GNSS-VC/static prädizierten Uhrkorrekturen unterliegen deshalb ebenfalls einer entsprechenden Verspätung. Die Ergebnisse wurden sowohl mit einer Soll-Lösung (den IGS-Rapid-Uhrkorrekturdaten) als auch mit den Ultra-Rapid-Produkten der einzelnen Analysis Centers verglichen. In weiterer Folge wurde auch eine Genauigkeitsabschätzung für Satellitenuhren des russischen Satellitennavigationssystems GLONASS versucht. Die Problematiken und Ergebnisse für beide Systeme sind in den Kapiteln 8 und 9 dieser Arbeit beschrieben.

Um die Uhrkorrekturdaten auch in Quasi-Echtzeit, also ohne die oben beschriebene Verzögerung, vorhersagen zu können, wurde im Anschluss ein Prädiktionsalgorithmus auf Basis eines Kalman-Filters entwickelt. Dies ist insofern wichtig, als prädizierte Uhrkorrekturen mit fortschreitender Zeit deutlich an Genauigkeit verlieren. Da der geplante Prädiktionszeitraum mit sechs Stunden sehr kurz ist, wird als Prädiktionsmodell ein quadratisches Polynom ohne zusätzlichen periodischen Term verwendet. Nach der Bestimmung von Startwerten für die Modellparameter (Koeffizienten des quadratischen Polynoms) werden diese mit Hilfe des Kalman-Filters in regelmäßigen Intervallen

aktualisiert. Als Eingangsgrößen werden dafür Echtzeit-Uhrkorrekturen des Programms RTR-Control herangezogen. Dieses errechnet Uhrkorrekturdaten im Minutentakt, basierend auf einer Lösung des globalen RT-IGS-Stationsnetzes, welches zurzeit ca. 70 Stationen umfasst. Die im 15-Minuten-Takt mit den jeweils aktuellen Modellparametern berechneten Uhrkorrekturen weisen eine Genauigkeit von etwa 2 ns für einen Prädiktionszeitraum von etwa sechs Stunden auf, was einem radialen Distanzfehler von ca. 60 cm entspricht.

Beide Programme, sowohl GNSS-VC/static als auch GNSS-VC/Kalman, sind aller Voraussicht nach auch für das geplante europäische Satellitensystem Galileo einsetzbar, so die entsprechenden Eingangsdaten vorhanden sind.

Die vorliegende Dissertation besteht aus 14 Kapiteln. Dabei behandeln die Kapitel 1 bis 5 die dieser Arbeit zugrunde liegende Theorie. Die Kapitel 6 bis 10 beschäftigen sich mit den praktischen Aspekten sowie der Charakterisierung und Beobachtung von GNSS-Satellitenuhren. Kapitel 11 gibt schließlich einen Ausblick. In der Folge sei ein Überblick über die einzelnen Kapitel gegeben:

Zu Beginn der Arbeit steht eine Beschreibung über die beiden physikalischen Größen Zeit und Frequenz. Diese werden hier zunächst definiert, danach wird genauer auf mit ihnen verbundene Begriffe wie die Zeitmessung und das Zeitnormal eingegangen. Das Kapitel schließt mit einer Darstellung der Genauigkeitsbestimmung bei Frequenz- und Zeitmessungen und der Frequenzanalyse. Für die Allan-Varianz werden hier auch zwei praktische Beispiele selbiger, nämlich für die GPS-Satelliten- und -Stationsuhren, gezeigt. (Kapitel 1)

Seit jeher wurden von der Menschheit Anstrengungen unternommen, um die Zeit, genauer gesagt Zeitabschnitte, bestimmen zu können. So entstanden im Laufe der Geschichte unterschiedliche Zeitsysteme, denen unterschiedliche Zeitnormale zugrunde liegen. So gibt es Zeitsysteme, die auf dem Umlauf der Erde um die Sonne basieren, andere beziehen sich auf die Erdrotation. Die jüngsten unter ihnen beziehen sich auf die Messung atomarer Schwingungen und sind aus dem heutigen Alltag nicht mehr wegzudenken. (Kapitel 2)

Um die Zeit nun tatsächlich bestimmen zu können, mussten spezielle Messinstrumente dafür geschaffen werden - die Uhren. Zuerst wird ein Einblick in die Funktionsweise von Uhren gegeben, danach werden, dem Lauf der Entstehungsgeschichte folgenden, unterschiedliche Uhrentypen vorgestellt. (Kapitel 3)

Da die praktischen Studien dieser Arbeit hauptsächlich auf den Uhrdaten der GNSS-Satellitenavigationssysteme basieren, sollen die bekanntesten und seit nunmehr vielen Jahren nutzbaren Satellitenavigationssysteme, nämlich das amerikanische GPS und das russische GLONASS, vorgestellt werden. Weitere Systeme befinden sich im Aufbau, allen voran das europäische Galileo, dessen Vollausbau bis zum Jahr 2013 geplant ist. Auch über Galileo wird ein kurzer Überblick gegeben. (Kapitel 4)

Der Vollständigkeit halber wird der theoretische Teil der Arbeit mit einem Kapitel über Zeitübertragung beendet. Mit Hilfe von Satelliten können Zeitsignale über große Strecken übertragen werden. Die wichtigsten Methoden werden kurz dargestellt. (Kapitel 5)

Das IGS stellt seit dem Jahr 1994 den GPS-Nutzern sowohl Beobachtungsdaten der GNSS-Bodenstationen und -Satelliten als auch aus diesen berechnete Produkte (wie z. B. hochgenaue Satellitenbahnen, Erdrotationsparameter, etc.) zur Verfügung. Diese können für zahlreiche wissenschaftliche Aktivitäten (z. B. die Verbesserung des ITRF oder die Beobachtung der Erdrotation) kostenlos via Internet bezogen werden. Der Großteil der im praktischen Teil dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen basiert auf den Uhrprodukten des IGS und seiner Analysis Centers (Kapitel 6).

Vor der Aufstellung eines Modells zur Prädiktion von GNSS-Satellitenuhrkorrekturen wurden die Ultra-Rapid-Produkte der Analysis Centers des IGS untersucht. Deren Genauigkeit und die ihrer Abweichung mit der Zeit wurden durch Referenzierung zu einer Soll-Lösung (den IGS-Rapid-Uhrdaten) dargestellt. Dabei wird speziell auf das Verhalten und die Stabilität der einzelnen Uhren eingegangen. Die für die Positionierung wesentliche Erhaltung der Relation der Satellitenuhrkorrekturen bezogen auf eine bestimmte Referenzuhr stand dagegen nicht im Vordergrund. (Kapitel 7)

Die Prädiktion von GPS-Satellitenuhren, der hauptsächliche Gegenstand der vorliegenden Arbeit, gliedert sich in zwei Teile. Die Entwicklung des Programms GNSS-VC/static wird an dieser Stelle beschrieben. Es wird ein Prädiktionsmodell erarbeitet, welches in der Folge für die Uhrkorrekturprädiktionen verwendet wird. Dazu ist es zuvor noch notwendig, das spezielle periodische Verhalten der Uhren, insbesondere jenes der Cäsium-Uhren, zu untersuchen. Auf seine möglichen Ursachen wird am Ende des Kapitels genauer eingegangen. Zu diesen zählt in erster Linie eine Korrelation des Oszillators mit Temperaturschwankungen. Dies zeigte sich bei der Untersuchung der Lage der Satellitenbahn im Raum in Bezug zur Position der Sonne. GNSS-VC/static ist mit dem gefundenen Prädiktionsmodell in der Lage, Quasi-Echtzeit-Uhrkorrekturen für die GPS-Satelliten zu erzeugen, allerdings mit einer Verzögerung von drei Stunden. Dies rührt daher, dass als Eingangsdaten die IGS-Ultra-Rapid-Produkte verwendet werden. Das Kapitel schließt mit einer Untersuchung der Genauigkeit von Uhrkorrekturdaten im 5-Minuten-Takt, die durch eine Interpolation mittels eines quadratischen Polynoms zu Daten in 30-Sekunden-Intervallen verdichtet werden, im Vergleich zu „originalen“ 30-Sekunden-Daten, wie sie z. B. in den Clock-RINEX-Dateien des JPL vorzufinden sind. (Kapitel 8)

Nach der Fertigstellung und Automatisierung von GNSS-VC/static lag es nahe, auch einen Versuch der Prädiktion der GLONASS-Satellitenuhrkorrekturdaten zu starten. Hier konnte leider keine erfolgreiche Berechnung durchgeführt werden. Nach einer genaueren Untersuchung der Eingangsdaten erwies sich deren Unstetigkeit (Phasen- und Frequenzsprünge) als Haupthindernis für die Prädiktion. (Kapitel 9)

Im zweiten praktischen Teil der Arbeiten zum Thema „Prädiktion von GPS-Satellitenuhren“ wird versucht, die Uhrkorrekturen mittels eines Kalman-Filters zu bestimmen. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass das hier entwickelte Programm GNSS-VC/kalman in der Lage ist, die Uhrkorrekturen in Echtzeit zu bestimmen. Die Eingangsdaten für GNSS-VC/kalman sind auf den Bodenstationen des RT-IGS-Stationsnetzes basierende Uhrkorrekturen, die im Minutentakt aktualisiert werden. (Kapitel 10)

Am Ende der Arbeit sollen noch verschiedene Einsatzbereiche für die erarbeiteten Ergebnisse vorgestellt werden. (Kapitel 11)

[Hinweis: Englischer Text in manchen Abbildungen wurde nicht übersetzt. Die Quellen für Abbildungen und Tabellen finden sich vor dem Literaturverzeichnis.]

# Zeit und Frequenz

(Kapitel 1)

## 1.1 Was ist Zeit? - Definition

In der Wissenschaft wird die Zeit meist als unabhängiger Parameter betrachtet. Es stellt sich die Frage, ob dieser Parameter für sich allein aber überhaupt bestehen kann. Bei genauer Überlegung kann der Schluss gezogen werden, dass die parametrisierte eindimensionale Zeit nur für sich alleine weder in ihrer Umgebung wirken noch mit ihr wechselwirken kann [Linzbauer, 2000].

Auf einen beliebigen Körper wirkt nicht die Zeit, sondern Energie in verschiedenster Form. Als Beispiel können zwei idente Stücke Eisenblech betrachtet werden. Ein Blechstück bleibt eine bestimmte Anzahl von Jahren im Freien liegen, wogegen das andere für die gleiche Zeitspanne an einem geschützten Ort gelagert wird. Während das in der Natur liegende Eisenteil zu rosten beginnt, bleibt das andere unverändert. Durch die Zeit selbst bleibt der Zustand eines Körpers also erhalten. Ein Gegenstand wird nur durch Energie in Kombination mit der Wechselwirkung des Körpers mit anderen Systemen bzw. Stoffen (z. B. Eisen und Wasser) verändert.

Durch die Wechselwirkung von Energie und Materie erzeugt jedes System eine Eigenschwingung, welche für die Messung der Zeit genutzt werden kann. Die Bandbreite variiert von kleinsten atomaren Wechselbeziehungen, wie sie seit einigen Jahrzehnten für den Bau von Atomuhren genutzt werden, bis hin zu den großen kosmischen Systemen, z. B. die Bewegung der Erde um die Sonne als Grundlage für verschiedenste Kalender. Gottlieb Herder (1799) bringt den Sachverhalt auf den Punkt: „Eigentlich hat jedes veränderliche Ding der Welt das Maß seiner Zeit in sich ... Keine zwei Dinge der Welt haben dasselbe Maß der Zeit. ... Es gibt also im Universum zu einer Zeit unzählbar viele Zeiten.“

Dazu kommt die Problematik, dass die verschiedenen Eigenschwingungen der unzähligen Systeme einander überlappen. Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Systemen können die Eigenschwingungsdauer verändern. Je nach der Änderung der wirkenden Energie werden sie verlangsamt oder beschleunigt. Eine mehr oder weniger intensive Koppelung zweier oder mehrerer System kann aufgrund der neuen Energiebilanz zu einer neuen Eigenschwingung dieses „neuen“ Systems führen. Ein Beispiel für ein kombiniertes System seien zwei Pendel mit unterschiedlichen Schwingzeiten, die miteinander verbunden werden. Aus den beiden verschiedenen Perioden bildet sich nach der Koppelung eine neue Schwingzeit. In Abhängigkeit von den Bedingungen ist, vor allem über längere Zeiträume gesehen, sogar eine chaotische Entwicklung des Systems möglich.

Im täglichen Leben wirkt auf das menschliche Bewusstsein eine Unzahl von gekoppelten Systemschwingungen. Auch dadurch erklärt sich das sehr subjektive Zeitempfinden einzelner Menschen.

Je nach Anwendungsbereich können für eine chronologische Ordnung von Ereignissen verschiedene Zeitskalen (siehe Kapitel 1.2.3) verwendet werden. So eignet sich beispielsweise für geschichtliche Begebenheiten vor langer Zeit eine grobe, der Allgemeinheit bekannte Maßeinteilung mit Angaben wie „seit dem Bau der Pyramiden“, „seit dem Vulkanausbruch“, usw. Für die Reihung von Geschehnissen im Leben eines Menschen in chronologisch richtiger Folge kann eine individuelle Zeitskala zum Einsatz kommen: „seit meiner Firmung“, „seit der Hochzeit meines Onkels“, usw.

Die einzelnen Zeitskalen besitzen unterschiedliche Nullpunkte und können der Wichtigkeit nach hierarchisch geordnet werden. Die persönliche Skala steht dabei auf einer unteren Stufe. Für übergeordnete Zeitangaben werden die heute in der Metrologie der Zeit üblichen Einheiten verwendet: Jahre, Monate, Wochen, Tage, Stunden, Minuten, Sekunden sowie deren Vielfache und Bruchteile. Sollen hochgenaue Aussagen über Zeitpunkte und -spannen angestellt werden, wird die Bewegung atomarer Prozesse zum Vergleich herangezogen. Aufgrund der Vielfältigkeit der Anwendungen sind im Laufe der Menschheitsgeschichte eine große Anzahl verschiedenster Kalender entstanden. Darauf soll hier allerdings nicht näher eingegangen werden, da es den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

## 1.2 Die Zeitmessung

### 1.2.1 Chronologie

Seit jeher ist der Mensch daran interessiert, seine Lebensumgebung zu erkunden. Aus wissenschaftlicher Sichtweise führt dies zur Notwendigkeit des Messens. So fordert z. B. Galileo Galilei (1564-1642): „Alles, was messbar ist, soll man messen. Was nicht messbar ist, muss man messbar machen.“ Die Metrologie ist die Lehre von den Maßen und Gewichten. Sie ist ein Teilgebiet der Physik. Die Aufgabe der Metrologie ist die Erarbeitung wissenschaftlicher Grundlagen des Messens. Um eine Messung durchführen zu können, bedarf es eines Maßstabs, dem sogenannten „Normal“. Ein solches ist z. B. das Urmeter, das bis 1960 als Meterprototyp gedient hat. Die Messung selbst ist nichts anderes, als ein Vergleich der zu messenden Größe (Istwert) mit dem möglichst eindeutig definierten Normal (Sollwert). Das Messnormal darf, um seine Konstanz zu bewahren, mit der Umgebung, d. h. auch mit dem zu vergleichenden Objekt, keine Wechselwirkung eingehen. Jeglicher Einfluss von außen der zu einer Veränderung des Energieniveaus des Maßstabs führt, muss vermieden werden, also z. B. Variationen von Druck, Temperatur, usw. Früher entstanden Messnormale aus dem Alltagsleben. So gab es z. B. für die Längenmessung Vergleichsgrößen wie „Elle“ und „Daumen“. Für die Zeitmessung wurden periodische Vorgänge aus der Natur verwendet. Dabei handelte es sich um immer wiederkehrende Zyklen wie die Mondphasen, den Wechsel der Jahreszeiten, die Tageslänge und vieles mehr.

Die Chronologie, auch Zeitkunde genannt, beschäftigt sich mit der Zeitmessung und Zeitrechnung. Dabei wird untersucht, wie seit Menschheitsbeginn bis in die Gegenwart Zeit gemessen und eingeteilt wurde und wird. Vom technischen Standpunkt ist das Verfahren der Zeitmessung klar. Energetisch bekannte periodische Bewegungen, die als Zeitnormal verwendet werden können (siehe Kapitel 1.3), werden mit Vorgängen in der Natur, deren Zeitdauer bestimmt werden soll, verglichen. Als Beispiel können hier, beginnend mit der Sonnenuhr, über Sand- und Wasseruhren sowie die in den vergangenen Jahrhunderten entwickelten mechanischen Uhren, bis hin zu den heute für höchst präzise Messungen verwendeten Atomuhren genannt werden (siehe Kapitel 3).

Die Anforderungen an ein Messnormal sind hoch: Es muss sich durch immerwährende Unveränderlichkeit auszeichnen. Dieser Anspruch wird auch an das Zeitnormal gestellt. Je größer und komplexer ein System ist, desto ungeeigneter wird es aufgrund der Wechselwirkung mit seiner Umgebung und der daraus folgenden Änderung seiner Eigenschwingung als Maßstab für die Zeitmessung. So wurde lange Zeit die Rotationsdauer der Erde als konstant angenommen und für die Definition der Zeit verwendet. In Folge der Anfertigung von hochgenauen technischen Instrumenten in diversen wissenschaftlichen Bereichen und der Entwicklung von immer präziseren Beobachtungsverfahren und Algorithmen zur Auswertung der Messungen wurden Unregelmäßigkeiten in der Erdrotation im Millisekundenbereich sichtbar. Abb.1.1 zeigt dies sehr deutlich anhand von

Aufzeichnungen über den Erdrotationsparameter LOD (Length of Day, siehe Kapitel 2.2.2). Dabei können auch ungewöhnliche Naturereignisse, wie z. B. das Wetterphänomen El Niño, aufgezeigt werden.

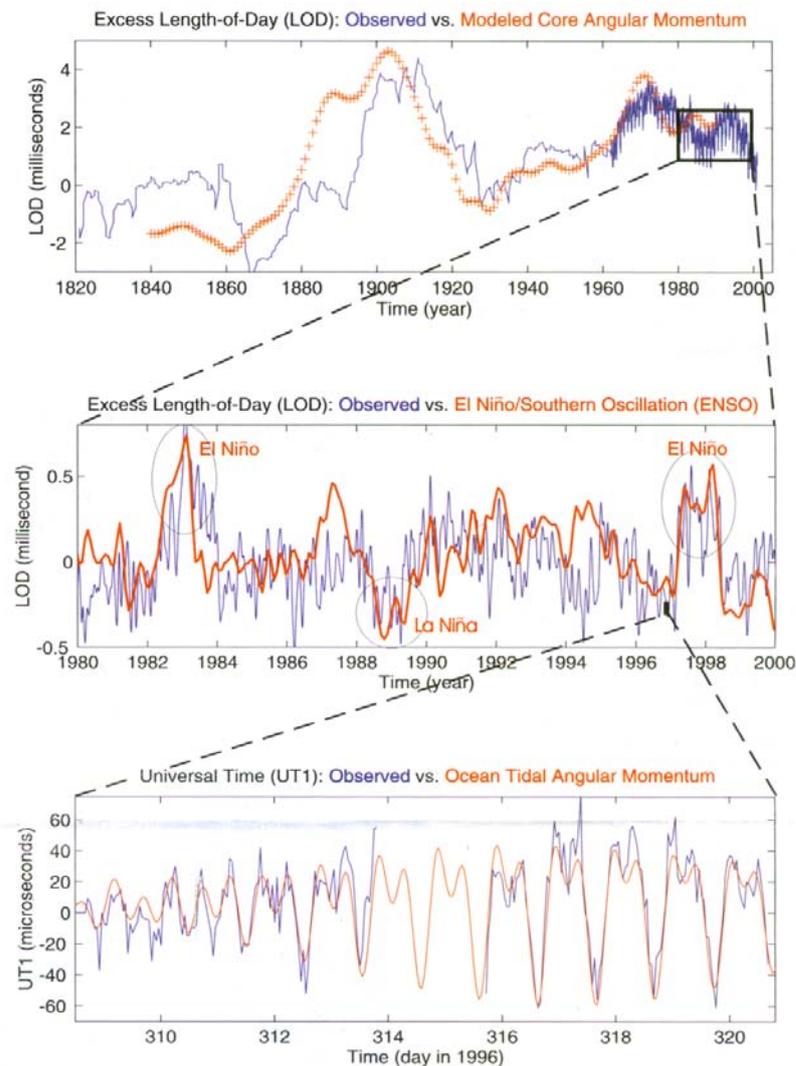


Abb.1.1: Unregelmäßigkeit der Tageslänge über einen Zeitraum von 180 Jahren

Aus der oben angeführten Beschreibung kann gefolgert werden, dass ein System eine umso gleichmäßigere Eigenschwingung aufweist, je einfacher es strukturiert ist. Die größte Stabilität wird zurzeit im Bereich der atomaren Schwingungen gefunden. Nur hier können für den momentanen Stand der Wissenschaft exakte Parameter definiert und auch wieder reproduziert werden. Die atomaren Schwingungen können als Sollwerte für das Zeitnormal herangezogen werden. Bei allen komplizierteren Systemen ist die Eigenschwingung von mehr als einem Parameter abhängig. Damit ist erklärbar, dass mechanische und andere Uhren mehr oder weniger große Ungenauigkeiten aufweisen, Atomuhren aber in Millionen von Jahren nur um eine Sekunde von einem theoretischen Zeitsystem abweichen (siehe Kapitel 2), die durch die schwingenden Systeme realisiert wird.

### 1.2.2 Zeitdefinition, Frequenz und Perioden

Die Zeit ist eine fundamentale Größe der Physik. Die physikalische Zeitmessung basiert auf der Beobachtung eines sich exakt wiederholenden, streng periodischen Vorgangs. Dieser wird

als Maßstab herangezogen. Um also die Zeit zwischen zwei Ereignissen, die exakt am gleichen Ort stattfinden, zu messen, zählt man parallel dazu die Zyklen des Messnormal (siehe Kapitel 1.3).

Die astronomische Definition der Zeit ist darauf begründet, dass die inertialen Referenzsysteme so gewählt werden, dass die Gleichungen der Mechanik so einfach wie möglich ausfallen. Zu Folge der Newtonschen Mechanik ist die Zeit der unabhängige Parameter in der Bewegungsgleichung.

Eine andere, viel genauere Möglichkeit, die Zeit zu beschreiben, bieten kurzperiodische Vorgänge, z. B. atomare Schwingungen. Durch das Zählen der Perioden können so Zeitspannen gemessen werden, vorausgesetzt, die Dauer der Periode ist bekannt.

### • Frequenz

Zeit und Frequenz sind untrennbar miteinander verbunden: Die Periodendauer  $T$  ergibt sich mit:

$$T = \frac{t}{N} = \text{const.} \quad (1.1)$$

mit:  $t$  ..... Zeit  
 $N$  .... Anzahl der Perioden

Die Periodendauer ist also abhängig von der Anzahl der in einem bestimmten Zeitabschnitt ausgeführten Schwingungen. Die Frequenz  $f$  beschreibt die zeitliche Periodizität der Schwingung und ist definiert durch:

$$f = \frac{N}{t} \quad (1.2)$$

Durch eine Kombination der Gleichungen (1.1) und (1.2) werden folgende Zusammenhänge gefunden:

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{bzw.} \quad T = \frac{1}{f} \quad (1.3)$$

Die Einheit der Frequenz ist 1 Hertz [Hz] = [1/s]. Eine Frequenz von einem Hertz entspricht einer Periodendauer von genau einer Sekunde.

Breitet sich eine Welle mit einer bestimmten Wellenlänge  $\lambda$  in einem Medium aus, so folgt [Seeber, 2003]:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{c}{n\lambda}, \quad \text{mit} \quad n = \frac{c}{v} \quad (1.4)$$

mit:  $v$  .... Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle im jeweiligen Medium  
 $c$  ... Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle im Vakuum,  
(Lichtgeschwindigkeit,  $\approx 299792,458$  km/s)  
 $n$  .. Brechzahl

Bewegt sich die Welle im Vakuum, so tritt anstelle der vom Medium abhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeit die Lichtgeschwindigkeit, da die Brechzahl in diesem Fall gleich Eins wird.

- **Kreisfrequenz**

Der Schwingungsvorgang entspricht in der Regel einer Sinusschwingung, es besteht also ein Zusammenhang zwischen der Schwingungsbewegung und einer Kreisbewegung. Bewegt sich der Radiusvektor mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ , so berechnet sich der in der Zeiteinheit überstrichene Winkel  $\alpha$  zu:

$$\alpha = \omega t \quad (1.5)$$

Für eine Projektion  $s$  auf die  $x$ -Achse folgt:

$$s = r \cdot \cos(\omega t) \quad (1.6)$$

mit:  $r$  ..... Radius

Ist die Periodendauer der Schwingungsbewegung bekannt, so kann damit die Winkelgeschwindigkeit errechnet werden. Gleichzeitig findet sich ein Zusammenhang mit der Frequenz der Schwingung:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (1.7)$$

$\omega$  wird auch die Kreisfrequenz genannt. Es folgt aus Gleichung (1.7), dass die Kreisfrequenz das  $2\pi$ -fache der normalen Frequenz ist. Weiters kann eine Phasenverschiebung auftreten. Der Phasenwinkel  $\varphi$  liegt zwischen 0 und  $2\pi$  und muss im Cosinusterm berücksichtigt werden:

$$s = r \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.8)$$

### 1.2.3 Zeitskalen

Durch eine stetige Zählung der Perioden entsteht eine Zeitskala. Für eine Uhr des täglichen Gebrauchs (z. B. eine Quarz-Armbanduhr) wird ein Vielfaches der Grundschiwingung (des Zeitnormals) aufsummiert (siehe Kapitel 1.3). Dieses Vielfache wird so gewählt, dass die kleinste ablesbare Einheit z. B. eine Sekunde ergibt. Die daraus folgende Zeitskala besteht aus einer ununterbrochenen Aneinanderreihung von Sekunden, man nennt dies eine integrierte Zeitskala („integrated time scale“). In der Realität stehen keine vollkommen identen Sekunden zur Verfügung. Deshalb vergrößert sich die Differenz zwischen einer idealen theoretischen und einer praktischen Zeitskala stetig. Im Laufe der Jahre kann die Abweichung der beiden Skalen so groß werden, dass sie für bestimmte Anwendungen berücksichtigt werden muss. Je nach Verwendung kann eine Zeitskala aus „kleinen“ oder „großen“ Einheiten aufgebaut werden. Beispielsweise müssen für hochpräzise technische Anwendungen wie Navigationsaufgaben Genauigkeiten bis in den ns-Bereich und genauer abgedeckt werden. Für frühe geschichtliche Angaben hingegen sind oft Jahre, Jahrhunderte oder sogar noch größere Einheiten ausreichend.

### 1.3 Das Zeitnormal

Um einen periodischen Vorgang zu messen, werden so genannte Frequenz- bzw. Zeitnormale verwendet. Diese werden mit Hilfe von Schwingungsgebern, also Oszillatoren erzeugt. Dabei wird zwischen dem Primärnormal und den Sekundärnormalen unterschieden. Ein Primärnormal zeichnet sich durch höchste metrologische (messtechnische) Qualität aus, sein Wert gilt ohne Referenz zu Standards der gleichen Quantität. Einem Sekundärnormal wird sein Wert durch Vergleich mit einem Primärnormal der gleichen Quantität zugewiesen. Beim Erzeugen eines Frequenzstandards wird generell versucht, eine der Sinusschwingung sehr ähnliche Welle möglichst analog dem Nominalwert (Nennwert) zu generieren, mit dem zusätzlichen Ziel, spektrale Reinheit zu garantieren.

Die Genauigkeit eines Zeitnormals ist von der Anzahl und der Konstanz der im System wirkenden Parameter abhängig. Je größer die beteiligten Massen und Energien, desto länger werden die Periodizitäten, die Frequenzen entsprechend niedriger. Variieren die Parameter, ergeben sich analog dazu veränderliche Schwingungsperioden, wie z. B. beim Beobachten der Erdrotation. Folglich ist die Zeitgrundeinheit eines Systems umso stabiler, je höher die Frequenz gewählt wird.

Die systematische Abweichung eines Sekundärnormals vom Primärnormal wird der „Gang“ eines Systems genannt. Dieser kann auch aktiv durch Zufuhr oder Entnahme von Energie verändert werden. Bei kleinen Uhren kann für eine gleichmäßige Energiebilanz gesorgt werden, z. B. kann der durch Reibung im System entstehende Energieverlust mit Hilfe einer Batterie ausgeglichen werden. Für kosmische Ereignisse wie die Rotation der Erde um ihre Achse ist dies nicht möglich. Hier kann eine Abweichung von einer konstanten Periodizität nur beobachtet, nicht aber beeinflusst oder korrigiert werden.

#### 1.3.1 Verschiedene Zeitnormale

Abhängig von der geschichtlichen Entwicklung der Zeitmessung, von der Länge des zu vergleichenden Vorganges sowie von der für die Messung angestrebten Genauigkeit wurden und werden verschiedene Zeitnormale verwendet.

- **Astronomische Zeitnormale**

In früheren Zeiten wurde der Tag als übliches Zeitnormal eingesetzt. Das tägliche Leben richtet sich schon seit jeher nach dem Wechsel von Tag und Nacht. Dieser kann annähernd als periodischer Vorgang betrachtet werden. Da die Sonnentage im Laufe eines Jahres verschieden lang dauern, definierte man einen "mittleren Sonnentag" (siehe Kapitel 2.2.2). Dieser entspricht dem Mittelwert der Sonnentage eines Jahres. Der Tag ist für viele Zeitmessungen im Alltag allerdings ein zu langes Zeitnormal. Aus diesem Grund wird er bereits seit alters her in Stunden, Minuten und Sekunden geteilt.

$$1 \text{ d} = 24 \text{ h} = 1440 \text{ min} = 86400 \text{ s} \Rightarrow 1 \text{ h} = 60 \text{ min} \Rightarrow 1 \text{ min} = 60 \text{ s} \quad (1.9)$$

### • Kurzperiodische Zeitnormale

Die Basis eines periodischen Zeitnormals bildet ein möglichst gleichmäßig zyklisch laufender Prozess. Dazu ist anzumerken, dass die Erzeugung eines streng periodischen Vorganges bis heute nicht realisierbar ist. Die heutigen atomaren Zeitnormale können aber als annähernd exakt zyklisch betrachtet werden. Für die Erzeugung eines gleichmäßigen Intervalls werden Oszillatoren verwendet. Die Beobachtungsgröße  $w(t)$  des Oszillators, die der Schwingungsgeber liefert, muss als Funktion der Zeit folgende Forderung erfüllen:

$$w(t) = w(t + T) = w(t + 2T) = \dots = w(t + NT) = \dots \quad (1.10)$$

mit:  $t$  ..... Zeit  
 $T$  ..... vom Oszillator erzeugte Periode  
 $N$  ..... fortlaufende natürliche Zahl

Aus Gleichung (1.10) ist zu erkennen, dass die Beobachtungsgröße  $w(t)$  jeweils nach dem Verstreichen einer Periode  $T$  den gleichen Wert annimmt. In vielen Fällen werden für ihre Generierung harmonische Schwingungsgeber verwendet. Ihr Verlauf ist somit durch eine harmonische Funktion der Zeit beschreibbar:

$$w(t) = w(t + T) = w_0 \cos\left(2\pi \frac{t}{T} + \varphi\right) = w_0 \cos(2\pi f t + \varphi) = w_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.11)$$

mit:  $w_0$  ..... Amplitude  
 $f = \frac{1}{T}$  ..... Frequenz (siehe Kapitel 1.2.2)  
 $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$  ... Kreisfrequenz  
 $\varphi$  ..... Phasenlage

Ein auf diesem Prinzip bestehendes Zeitnormal ist umso genauer, je kürzer die Periode bzw. je höher die Frequenz ist.

### • Normale für lange Zeiträumen

Für das Messen sehr großer Zeitspannen ist es praktisch, ein „längeres“ Zeitnormal zur Verfügung zu haben. Um kosmische Vorkommnisse (z. B. die Entstehung unseres Sonnensystems), die bis zu  $5 \cdot 10^9$  Jahre zurückliegen, zu datieren, eignet sich der radioaktive Zerfall von instabilen Atomkernen. Dieser erfolgt sehr langsam. Das entsprechende Gesetz lautet: Die mittlere beobachtete Zerfallsrate von instabilen Kernen zu einer bestimmten Zeit ist proportional zur momentanen Anzahl dieser Kerne.

$$-\frac{dN(t, X)}{dt} = \frac{1}{\tau} N(t, X) \quad (1.12)$$

mit:  $X$  ..... Anzahl der instabilen Kerne  
 $t$  ..... Zeit  
 $\tau$  ..... mittlere Lebensdauer der Kerne  
 $N(t, X)$  .... momentane Anzahl der Kerne

Anstelle von  $\tau$  wird gerne die sogenannte Halbwertszeit  $T_{1/2}$  verwendet. Sie ist proportional zu  $\tau$  und wird wie folgt definiert:

$$T_{1/2} = (\ln 2) \cdot \tau \quad (1.13)$$

Die bekanntesten Verfahren sind die C-14- und die U-238-Methode. Erstere wird für die Bestimmung des Alters von kohlenstoffhaltigen Substanzen verwendet. Zweitere basiert auf dem radioaktiven Zerfall des Hauptisotops  $^{238}\text{U}$  von Uran und eignet sich für die Untersuchung des Alters von Gesteinen und Meteoriten.

- **Messung von extrem kurzen Zeitspannen**

Die Bestimmung von sehr kurzen Zeitspannen erfolgt mit Hilfe von Längenmessungen. Als Beispiel sei die Elementarteilchenphysik angeführt. Hier werden Atome auf annähernd Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Ihre Flugbahn wird mit Photoplatten und Nebelkammern festgehalten. Die Bahnlängen bewegen sich in einer Größenordnung von  $10^{-6}$  m. Diese kann gemessen werden. Mit der fundamentalen Beziehung

$$s = v \cdot t \quad (1.14)$$

mit: s ..... Weg  
v ..... Geschwindigkeit  
t ..... Zeit

können danach Flugzeiten bis hinab zu  $\approx 3 \cdot 10^{-15}$  s gemessen werden.

In Tab.1.1 sind typische physikalische Zeitbereiche, die für wissenschaftliche Untersuchungen interessant sind, aufgelistet. Den kleinsten Zeitabschnitt, für den die Gesetze unserer Physik noch gültig sind, markiert die Planck-Zeit mit einer Größenordnung von  $10^{-43}$  s. Hier stoßen wir auch an die durch die Unschärferelation (Heisenberg, 1901-1976) gegebene Grenze, nach der Ort und Geschwindigkeit eines Elementarteilchens nicht gleichzeitig mit unbeschränkter Genauigkeit festgelegt werden können. Als Gegenstück dazu erstrecken sich die kosmologischen Zeitskalen in einen Bereich bis  $10^{17}$  s.

	[s]	[a]
Alter des Universums	$3 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{10}$
Alter der Erde	$1.3 \cdot 10^{17}$	$4.5 \cdot 10^9$
Zeit seit Peking-Mensch	$3 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^5$
Menschenalter	$2.1 \cdot 10^9$	$7 \cdot 10^1$
Jahr	$3 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^0$
Tag	$8.6 \cdot 10^4$	
Periode eines Uhrpendels	$1 \cdot 10^0$	
Periode der Schallwelle	$1 \cdot 10^{-3}$	
Periode der Molekülrotation	$1 \cdot 10^{-12}$	
Periode der Lichtwelle	$1 \cdot 10^{-15}$	
Licht durchquert Atom	$1 \cdot 10^{-19}$	
Periode der Atomkernschwingung	$1 \cdot 10^{-21}$	
Licht durchquert Kern	$1 \cdot 10^{-24}$	
Planck-Zeit	$1 \cdot 10^{-43}$	

Tab.1.1: Typische Zeiten in Sekunden [s] und Jahren [a]

### • Internationales Zeitnormal

Die Sekunde wurde bis 1967 als bestimmter Bruchteil des tropischen Jahres 1900 festgelegt. Ein tropisches Jahr ist der Zeitraum zwischen zwei aufeinander folgenden Durchgängen der mittleren Sonne durch den Frühlingspunkt (siehe Kapitel 2.1). Seit 1968 wird die Sekunde mittels Atomnormalen definiert. Das international verwendete Zeitnormal ist die SI-Sekunde. Die Begriffsbestimmung erfolgt mittels des Nuklids von  $^{133}\text{Cs}$ : „Die Sekunde ist das 9.192.631.770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids  $^{133}\text{Cs}$  entsprechenden Strahlung“ [PTB, 21.9.2004]. Derart festgelegt kann die Sekunde mittels ihrer jetzigen Definition jederzeit lokal realisiert werden. [Anmerkung: Ebenso die anderen SI-Einheiten mit Ausnahme von Kilogramm und Kelvin.]

## 1.4 Frequenzanalyse

Für die Approximation diskreter Messwerte eines Signals mit periodischem Charakter mittels einer funktionalen Darstellung eignet sich dessen Entwicklung in eine Fourier-Reihe. Diese baut auf der folgenden Beziehung auf:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (1.15)$$

$$\text{mit: } a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega t) dt, \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega t) dt$$

$a_0$  ist eine Konstante, bzw. der Anteil der Frequenz  $f_0 = 0$ . Die Kreisfrequenz  $\omega$  bewirkt eine Skalierung der Periode  $2\pi$  der Sinus- und Kosinusfunktionen auf die entsprechende Periode  $T$  der jeweiligen Messreihe. Mit Hilfe von Gleichung (1.15) kann jede beliebige zyklische Funktion durch eine Fourier-Reihe approximiert werden. Die Koeffizienten  $a_n$  und  $b_n$  sind dabei vorerst unbekannt und werden durch einen vermittelnden Ausgleich gefunden. Abhängig von den Anforderungen an die Genauigkeit wird die Entwicklung nach einer bestimmten Anzahl an Termen abgebrochen.

Anstatt der Summenbildung von Sinus- und Kosinustermen kann eine Messreihe mit periodischen Eigenschaften auch als phasenverschobene Kosinusschwingung dargestellt werden. Die Beschreibung der Beobachtungen erfolgt dann mittels Amplituden- und Phasenspektrum:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(n\omega t + \varphi_n)], \quad (1.16)$$

$$\text{wobei} \quad A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{und} \quad \varphi_n = \arctan\left(\frac{a_n}{b_n}\right) + k\pi \quad (1.17)$$

mit:  $A_n$  .... Amplitude

$\varphi_n$  .... Phasenwinkel

$k$  ..... Konstante, die so gewählt wird, dass  $\varphi_0$  in jenen Quadranten zeigt, in dem der dazugehörige Punkt  $(a_n, b_n)$  liegt.

Jedes Paar aus Amplitude und Verschiebung kann auch als komplexe Zahl in Polarkoordinatendarstellung interpretiert werden. Die beiden Spektren werden dabei vereint. Für die praktische Anwendung ist diese Darstellung oft einfacher. Zum einen ist die Exponentialfunktion leicht zu integrieren, zum anderen muss nur noch ein Koeffizient (mit einer reellen und einer komplexen Komponente) berechnet werden:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{in\omega t} \quad (1.18)$$

$$\text{mit: } c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-in\omega t} dt$$

In der Anwendung kann es nun vorkommen, dass die Bestimmung der Parameter der Fourier-Reihe sehr schwierig oder auch gar nicht möglich ist. Beispielsweise sind die Beobachtungen so stark verrauscht, dass die Dauer eines Zyklus nicht festgestellt werden kann. Es kann auch eine Überlagerung mehrerer unterschiedlicher Perioden vorliegen, bzw. eine Kombination aus einigen verschiedenen Zyklen und Messrauschen. Um nun trotzdem Informationen über das Signal (die in den Messwerten vorliegenden Perioden) zu erhalten, wird eine Fourier-Transformation durchgeführt. Dabei erfolgt ein Übergang vom Zeit- in den Frequenzbereich. Die Definition der kontinuierlichen Fourier-Transformation lautet folgendermaßen:

$$F_{\omega}(f(t)) = F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (1.19)$$

[Anmerkung: Bis auf einen Skalierungsfaktor entsprechen die Koeffizienten der Fourier-Transformation jenen der Fourier-Reihe. Näheres ist in [Brigham, 1987] nachzulesen.]

Mit Hilfe der Fourier-Transformierten kann die spektrale Dichte der Ausgangsfunktion berechnet werden. Im Allgemeinen ist sie das reelle Quadrat des Betrags der Gleichung (1.19):

$$P(\omega) = |F(\omega)|^2 \quad (1.20)$$

Das Amplitudenquadrat einer Messreihe oder eines Signals, beispielsweise einer elektromagnetischen Welle, und dessen Energie ist bei linearen Systemen proportional. Deshalb wird (1.20) die „Energieverteilung des Signals“, die „spektrale Leistungsdichte“ oder auch das „Powerspektrum“ genannt und häufig mit „PSD“ (Power Spectral Density) abgekürzt. Ein Vorteil der PSD ist, dass sie eine reelle Größe ist. Damit ist sie leichter interpretierbar als eine komplexe Funktion. Mit ihrer Hilfe können signifikante Perioden im Frequenzspektrum leichter aufgespürt und deren Intensität abgeschätzt werden als mit der Fourier-Transformation, da durch das Quadrieren die intensitätsärmeren Rauschanteile noch stärker in den Hintergrund treten.

### 1.5 Stabilität der Frequenz- und Zeitmessung

In der Realität weicht die von einem Oszillator erzeugte Schwingungszahl meist geringfügig von der erwünschten Nominalfrequenz ab. Als Ursache für diese Instabilitäten von Frequenzen können mehrere Faktoren angeführt werden: thermische Einflüsse auf elektronische Komponenten der Geräte, spezifisches Rauschen des Resonators, die Alterung

der Instrumente oder Einflüsse durch eine Veränderung der Umgebung. Zudem kommt es zu Ungenauigkeiten beim Messvorgang, der vom sogenannten Messrauschen begleitet wird (siehe Abb.1.2). Als Folge davon kommt es zu Schwankungen in der erzeugten Zeitskala. Je kleiner diese sind, desto größer ist die Stabilität der entsprechenden Skalen. In Kapitel 1.1 wurde bereits beschrieben, dass die beiden Messgrößen Frequenz und Zeit sowohl von zufälligen als auch von systematischen Effekten beeinflusst werden. A priori ist für gewöhnlich nicht bekannt, welcher mathematischen Funktion diese Effekte folgen. Wird aber durch kontinuierliche Beobachtung eine solche gefunden, so können die systematischen Fehler der mit diesem Messinstrument erhaltenen Beobachtungen im Nachhinein korrigiert werden. Im Gegensatz dazu bewirken zufällige Einflüsse Instabilitäten, die ein durch mathematische Beziehungen nicht beschreibbares Messrauschen verursachen.

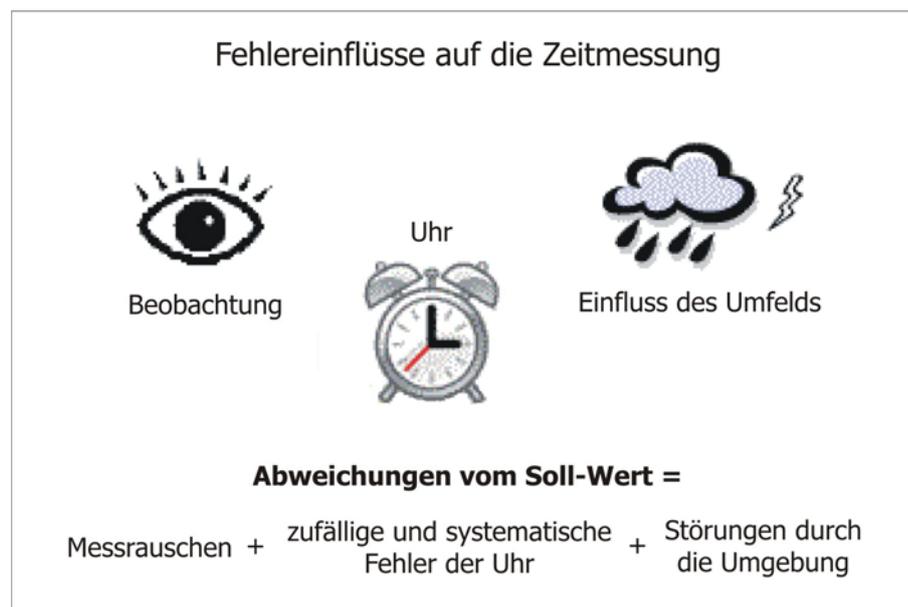


Abb.1.2: Äußere Einflüsse auf eine Uhr

Für die mathematische Beschreibung von Reihen von Zeitlesungen und deren Genauigkeiten eignen sich im Allgemeinen die Größen Mittelwert, Varianz und Standardabweichung. Der Mittelwert  $\bar{x}$  einer (endlichen) Beobachtungsserie folgt aus:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1.21)$$

mit:  $n$  ..... Anzahl der Messwerte  
 $x_i$  ... Messwerte

Ist der Mittelwert bekannt, kann die Varianz  $\sigma^2$  berechnet werden:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1.22)$$

Die Standardabweichung  $\sigma$  ist definiert als die positive Quadratwurzel der Varianz  $\sigma^2$ .

Die Varianz eines zufälligen Vorgangs  $y$  ist in folgender Weise mit seiner spektralen Leistungsdichte  $S_y$  (siehe Kapitel 1.5) verknüpft:

$$E\{y^2(t)\} = \int_0^{\infty} S_y(f) df \quad (1.23)$$

mit:  $E\{ \}$  ..... Erwartungswert

Für manche Messreihen, wie z. B. Zeitreihen von Oszillatoren in der Frequenz- und Zeitmessung, konvergiert die Varianz nicht gegen einen endlichen Grenzwert, sondern strebt gegen  $+\infty$ . Näheres ist in [Audoin, Guinot, 2001] nachzulesen. Um dennoch eine gut quantifizierbare Aussage über die Stabilität des Oszillators zu erlauben, sind mehrere Methoden zur Berechnung der Varianz bei der Frequenz- und Zeitanalyse entwickelt worden. Die am häufigsten verwendete, ein von D.W. Allan [Allan's Time, 25.02.2004] erarbeitetes Verfahren, wird im folgenden Kapitel näher beschrieben.

### 1.6 Die Allan-Varianz

Die Allan-Varianz ist eine spezielle Art der Varianz, welche sich für statistische Betrachtungen im Zeit- und Frequenzbereich eignet. Der Vorteil gegenüber einer herkömmlichen Varianzberechnung ist, dass die Allan-Varianz für die meisten der hier auftretenden Arten von Messrauschen (Funkelrauschen (= flicker noise), weißes Rauschen) sicher gegen einen endlichen Wert konvergiert.

Die Allan-Varianz ist auch bekannt unter der Bezeichnung „Zwei-Stichproben-Varianz“ (two-sample variance). Für ihre Definition wird eine unendlich große Menge an Stichproben  $\bar{y}_k^\tau$  vorausgesetzt, wobei diese ohne Unterbrechung kontinuierlich aufeinander folgen müssen. Die Allan-Varianz  $\sigma_\tau^2$  ergibt sich dann aus:

$$\sigma_\tau^2(\tau) = \frac{1}{2} E\{[\bar{y}_{k+1}^\tau - \bar{y}_k^\tau]^2\} \quad (1.24)$$

wobei 
$$\bar{y}_k^\tau = \frac{1}{\tau} [x_{k+1} - x_k] \quad (1.25)$$

mit:  $E\{ \}$  ..... Erwartungswert

$\bar{y}_k^\tau$  ..... Stichproben (Differenzen der Messwerte)

$x_k$  ..... Messwerte

$\tau$  ..... Zeitspanne

$k$  ..... Laufindex

(1.25) eingesetzt in (1.24) liefert:

$$\sigma_\tau^2(\tau) = \frac{1}{2\tau^2} E\{[x_{k+2} - 2x_{k+1} + x_k]^2\} \quad (1.26)$$

(1.24) bzw. (1.26) können nun herangezogen werden, um Frequenzinstabilitäten im Zeitbereich zu beschreiben. Ergänzt werden soll erwähnt werden, dass die Allan-Varianz

auch mit Hilfe der spektralen Leistungsdichte ausgedrückt werden kann. Darauf wird hier allerdings nicht eingegangen.

Für die praktische Berechnung wurde in der vorliegenden Arbeit ein Algorithmus aus [Audoin, Guinot, 2001] herangezogen. In der Praxis bestehen die zu untersuchenden Zeitreihen immer aus einer endlichen Anzahl von Messwerten  $x_k$ . Aus diesem Grund kann für die Allan-Varianz stets nur ein Schätzwert bestimmt werden. Ausgangsbasis für die Berechnung ist eine Zeitreihe mit  $M+1$  Messwerten  $x_k$ , die jeweils in Intervallen einer Basiszeitspanne  $\tau_0$  beobachtet wurden. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Messwerte ohne Lücken kontinuierlich aufeinander folgen.

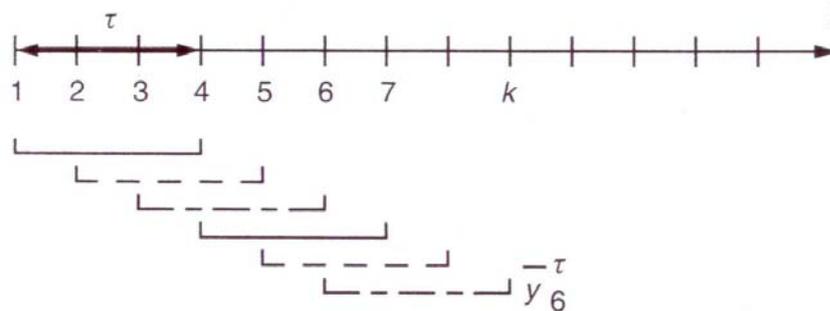


Abb.1.3: praktische Berechnung der Allan-Varianz mit  $n=3$

Die Beobachtungen werden nach

$$\tau = n\tau_0 \quad \text{mit } n \in \mathbb{N}^+ \quad (1.27)$$

in Gruppen zusammengefasst. Aus den Messwerten  $x_k$  können nun die Stichproben  $\bar{y}_k^\tau$  berechnet werden:

$$\bar{y}_k^\tau = \frac{1}{n\tau_0} (x_{k+n} - x_k) \quad (1.28)$$

Die so für die einzelnen Intervalle erhaltenen Stichproben überlappen einander. Zur Bestimmung des Schätzwertes werden jeweils aufeinanderfolgende Intervalle verwendet. Es ist möglich, aus den Stichproben  $\bar{y}_k^\tau$

$$p = M - 2n + 1 \quad (1.29)$$

mit:  $M+1$  .... Anzahl der Messwerte

Paare zu bilden. Damit kann die Allan-Varianz über die fortschreitende Dauer  $\tau$  wie folgt errechnet werden:

$$\hat{\sigma}_\tau^2(\tau) = \frac{1}{2p} \sum_{k=1}^p [\bar{y}_{k+n}^\tau - \bar{y}_k^\tau]^2 \quad (1.30)$$

Falls die Messreihe systematischen Effekten unterliegt und diese durch eine Funktion beschreibbar sind, so kann dies bei der Berechnung der Allan-Varianz zusätzlich berücksichtigt werden (siehe [Audoin, Guinot, 2001]).

Trägt man die errechnete Allan-Deviation (berechnet aus der Wurzel der Allan-Varianz) in einem Diagramm auf, so kann man daraus auf die Eigenschaften des Signals schließen. In Abb.1.4 wurde hierfür auf beiden Achsen eine logarithmische Skala gewählt [Senior, 2007]. Die Steigung der Kurve gibt nun Auskunft über das dem Signal überlagerte Rauschverhalten in Abhängigkeit des betrachteten Zeitabschnitts: So weist eine Steigung von  $\tau = -3/2$  auf weißes Phasenrauschen hin,  $-1$  auf Funkelrauschen ("flicker-phase-noise"), ein "frequency-(independent)-white-noises" (auch "random-phase-walk") drückt sich über  $k = -1/2$  aus. Ein dem "flicker-frequency-noise" entsprechender Signalanteil zeigt eine Steigung von  $k = 0$ , für den "random-frequency-walk" beträgt sie  $k = 1/2$ .

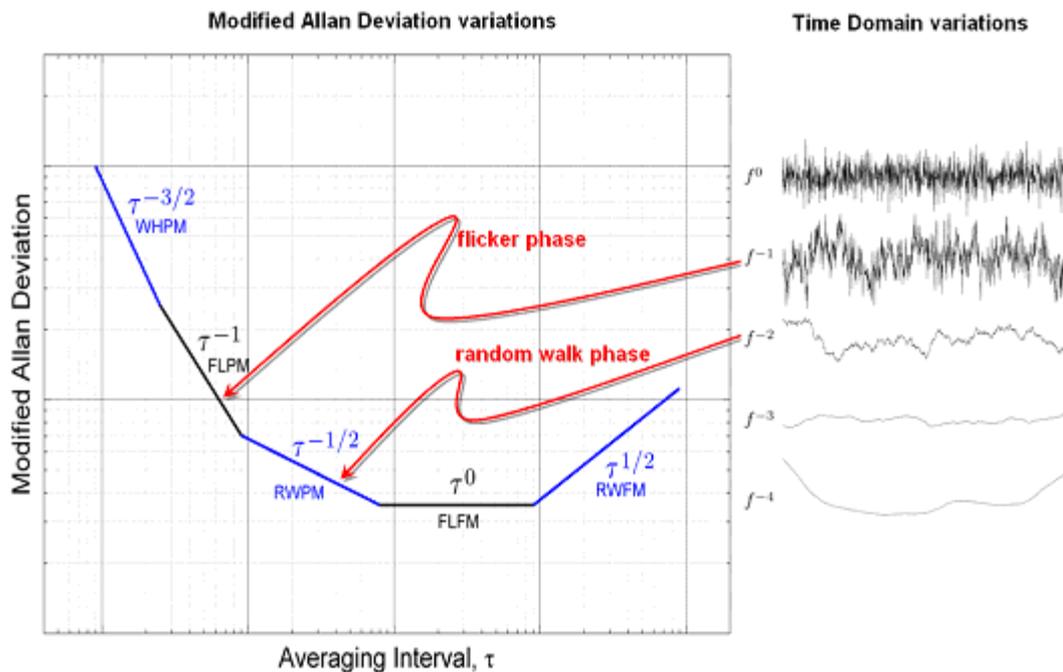


Abb.1.4: Interpretation der Allan-Deviation

Die Uhrlesungen einer fehlerfrei laufenden Uhr (ohne überlagertem weißem Rauschen) können durch eine lineare Funktion simuliert werden. Für ein Beispiel wurde eine Gerade mit einer Steigung von  $1/2$  ausgewählt. Das Ergebnis ist in Abb.1.5a dargestellt. Die Allan-Varianz (bzw. die Allan-Deviation) kann per Definition nur positive Werte annehmen. Im Spezialfall, wie hier für die Simulation einer absolut fehlerfrei laufenden Uhr, ergibt sie sich über den gesamten Beobachtungszeitraum zu Null. Für Abb.1.5b wurde die lineare Funktion mit einem frequenzunabhängigen weißem Rauschen überlagert. Wie in Abb.1.4 wurde zum einfachen Vergleich für beide Achsen ebenfalls eine logarithmische Skala gewählt.

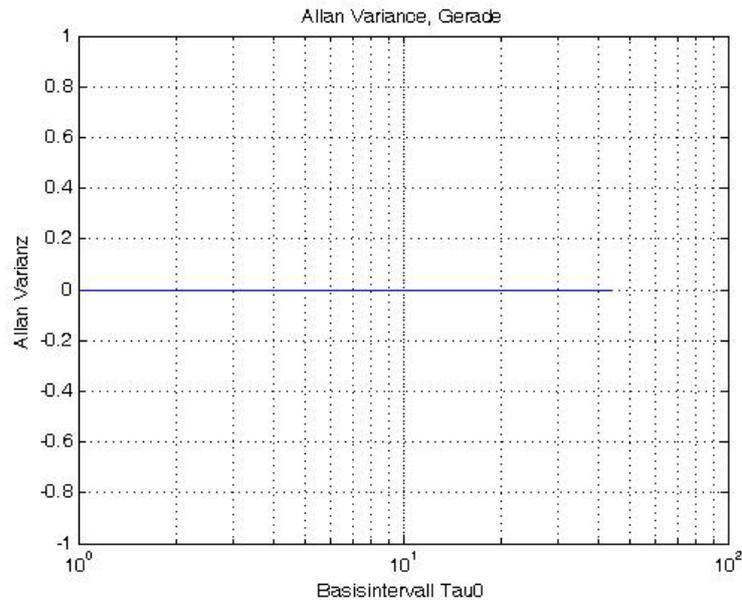


Abb.1.5a: Allan-Varianz und Allen-Deviation einer Geraden

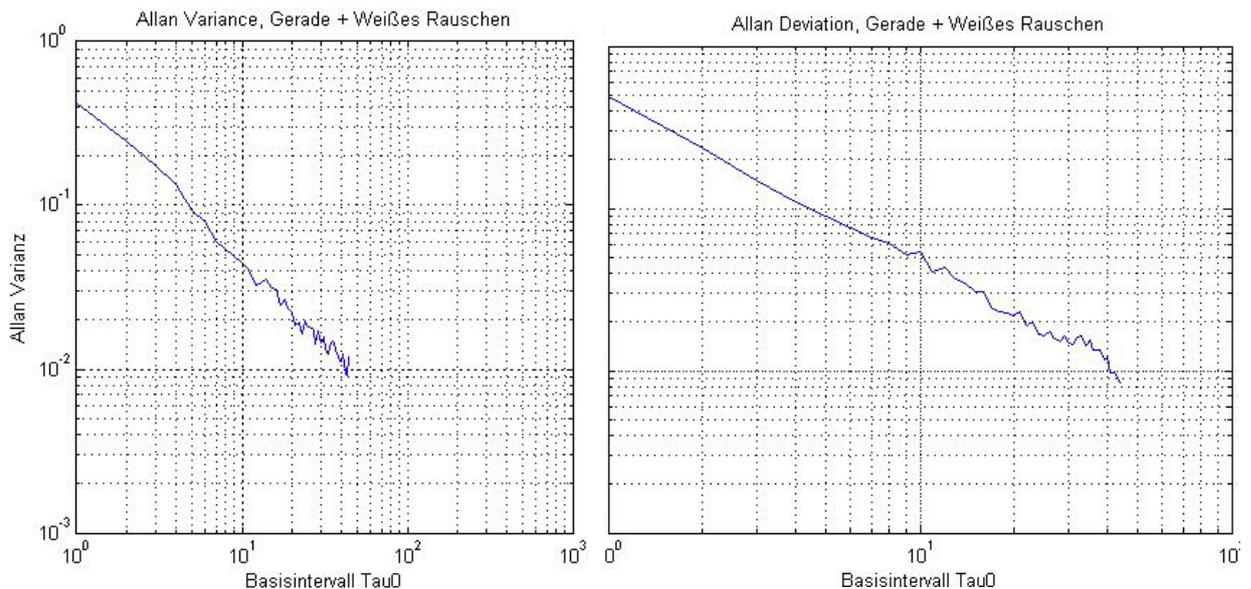


Abb.1.5b: Allan-Varianz und Allen-Deviation einer Geraden mit überlagertem weißem Rauschen

In der Folge wurde die Allan-Varianz für die GPS-Satelliten- und -Stationsuhren ermittelt. Dafür wurden die vom IGS bereitgestellten Uhrkorrekturdaten im Clock-RINEX-Format verwendet. Diese überdecken jeweils einen Tag. Abb.1.6a zeigt die Stabilität von drei ausgewählten Satellitenuhren (Cs, Rb-IIA, Rb-IIR) am Tag 4 der GPS-Woche 1283. Die Cäsiumuhr weist eine Stabilität von  $10^{-13}$  über einen Tag auf, während die Rubidiumuhren eine Stabilität von  $10^{-13}$ - $10^{-14}$  zeigen. Da die Eingangsdaten nur genau einen Tag umfassen ( $T = 86400$  s) kann das Uhrenverhalten nur bis höchstens 12 Stunden dargestellt werden. Die Abtastrate (sampling rate) der Clock-RINEX-Daten beträgt  $t = 300$  s (5-Minuten-Takt, siehe Kapitel 6.2). Die gesamte für Abb.1.6a verwendete Zeitserie umfasst für jeden Satelliten also nur 288 Werte.

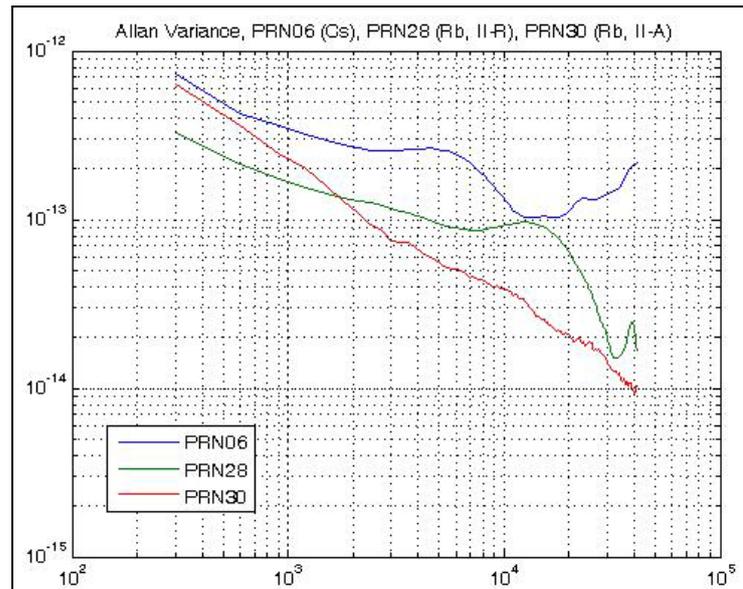


Abb.1.6a: Allan-Varianzen berechnet aus Daten im clk-Format für verschiedene Satellitenuhrtypen

Die GPS Empfänger an den Referenzstationen verfügen normalerweise, nicht zuletzt aus Kostengründen, über weniger genaue interne Oszillatoren als die Satelliten. Ein großer Anteil von ihnen ist mit Quarzuhren ausgestattet. Allerdings werden jene Uhren, die für hochgenaue Anwendungen verwendet werden (z. B. für Zeitübertragungsaufgaben) gegebenenfalls mit Hilfe eines hochwertigen Frequenzgenerators (z. B. mit einem H-Maser) diszipliniert.

Wie bei den Satellitenuhren wurde die Stabilität der verschiedenen Uhrentypen anhand von Uhrkorrekturdaten des IGS im Clock-RINEX-Format (5-Minuten-Takt) mittels der Allan-Varianz untersucht. Dafür wurden je ein bis zwei Stationen für jeden Uhrentyp (Quarz, Cäsium, Rubidium, H-Maser) ausgewählt.

In Abb.1.6b sind deutlich die unterschiedlichen, für die jeweiligen Uhrentypen charakteristischen Stabilitäten für einen Zeitraum über einem Tag (Tag 5 der GPS-Woche 1283) zu sehen. Cäsium- und Rubidiumuhren erreichen den für sie erwarteten Bereich von  $10^{-12}$  und  $10^{-13}$ . Die Stabilität der Quarzuhr ist um ca. eine Zehnerpotenz geringer ( $10^{-11}$ ), während die mit H-Maser gesteuerten Stationsuhren mit  $10^{-15}$  erwartungsgemäß eine wesentlich höhere Frequenzstabilität aufweisen.

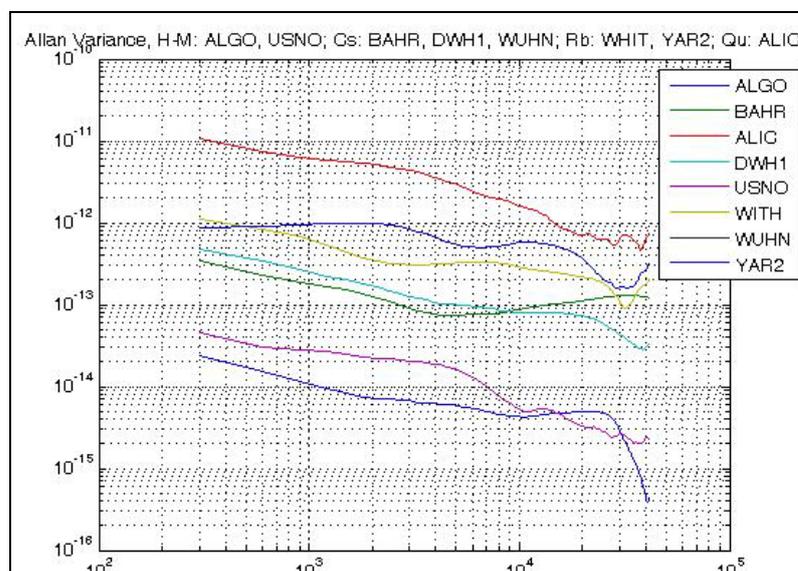


Abb.1.6b: Allan-Varianzen berechnet aus 24 h Daten für verschiedene Stationsuhrtypen

## Zeitsysteme

(Kapitel 2)

Seit vielen Jahrtausenden versuchen die Menschen, vergangene und zukünftige Geschehnisse zu datieren sowie die Zeitdauer von Ereignissen zu bestimmen. Mittels im Laufe der Zeit verschieden definierten Einheiten zur Zeitmessung entwickelten sich aus diesen Bemühungen unterschiedliche Kalender und Zeitskalen. Die wichtigsten sollen in diesem Kapitel beschrieben werden.

[Anmerkung: Viele Kurzbezeichnungen in der Metrologie stammen ursprünglich aus dem Französischen, z. B. TAI = Temps Atomique International.]

Als großmaßstäblicher Zeitstandard zur Beschreibung von Ereignissen von langer Dauer (einige Jahre bis Jahrtausende) eignet sich der Umlauf der Erde um die Sonne. Für die Beschreibung der Zeitspannen von Begebenheiten des täglichen Lebens wird zwischen zwei Zeitnormalen (siehe Kapitel 1.3) unterschieden: der Erdrotation und der Frequenz von atomaren Schwingungen.

Bis in die 60er-Jahre wurde als Zeitnormal die Erdrotation benutzt. Diese stellte sich allerdings als eine ungleichförmige Zeitskala heraus, die sowohl periodische Schwankungen als auch längerfristige Driften (die eine Größenordnung von 1 s/yr erreichen können) gegenüber der gleichförmigen Atomzeit aufweist.

Im Jahr 1955 begann die Phase des Überganges von einem auf der Erdrotation basierenden Zeitsystem auf den Gebrauch der Atomzeit als primären Standard. 1984 wurde die Ephemeridenzeit (siehe Kapitel 2.1) von der Atomzeit abgelöst.

Atomare Maßstäbe liefern in der heutigen Zeit die genauesten Annäherungen an eine gleichförmige Zeitskala. Sie erreichen Genauigkeiten von besser als 1  $\mu$ s/yr. Damit konnte auch die oben beschriebene Ungleichmäßigkeit der Erdrotation bewiesen werden.

Nichtsdestotrotz sind auch heute immer noch Zeitskalen in Verwendung, die der Erdrotation folgen. Allerdings werden diese meist durch eine Kombination aus der Theorie der Rotation der Erde, aktuellen astronomischen Messungen von Erdrotation und -orientierung sowie atomaren Zeitskalen abgeleitet. Tab.2.1 gibt eine Übersicht über verschiedene Zeitsysteme.

periodischer Prozess	Zeitsystem
Erdumlauf um die Sonne	terrestrische Zeit (TT)
	baryzentrische dynamische Zeit (TDB)
Erdrotation und -umlauf	Weltzeit (UT) <-> Sternzeit (ST)
atomare Schwingungen	Atomzeit (TAI)
	koordinierte Weltzeit (UTC)
	GPS Zeit (GPST)

Tab.2.1: Verschiedene Zeitsysteme

### 2.1 Zeitsysteme basierend auf dem Umlauf der Erde um die Sonne

- **Tropisches Jahr, Julianisches Jahr**

Der Zeitraum der Änderung der mittleren ekliptikalen Länge der Sonne um 360° wird ein tropisches Jahr genannt. Dies ist nichts anderes, als die Zeitspanne zwischen zwei Durchgängen der fiktiven mittleren Sonne durch den mittleren Frühlingspunkt. Die Länge des tropischen Jahres ist leicht veränderlich. Es weist eine Dauer von rund 365,2422 mittleren

Tagen auf, was ca. 366,2422 Sterntagen entspricht. Die Länge des Julianischen Jahres, benannt nach dem römischen Kaiser Julius Gaius Caesar, beträgt dagegen 365,25 mittlere Tage. Da im zivilen Leben ein Jahr eine ganzzahlige Anzahl von Tagen aufweisen muss, wird das Jahr in 365 Tage geteilt, jedes vierte Jahr aber enthält 366 Tage und wird ein Schaltjahr genannt. Aufgrund der Tatsache, dass das Julianische Jahr länger ist als das tropische, laufen die beiden Zeitskalen auseinander. Um dem entgegenzuwirken werden nur jene Jahrhunderte zu Schaltjahren gemacht, die durch 400 teilbar sind. Die mittlere Jahreslänge weist damit eine Länge von 365,2425 Tagen auf. Der verbleibende Fehler gegenüber dem tropischen Jahr beträgt damit erst nach über 3000 Jahren einen vollen Tag (siehe auch Kapitel 3.2.1).

- **JD (Julianisches Datum), MJD (Modifiziertes Julianisches Datum)**

Das Julianische Datum ist jenes Zeitintervall in mittleren Tagen, das seit dem fiktiven Datum 01.01.4713 v. Chr., 12 h Greenwich, vergangen ist. Die Tage werden vom genannten Zeitpunkt aus fortlaufend gezählt. Eben diese kontinuierliche Zählung der Tage ohne Lücken ist der eigentliche Vorteil des JD. Das oben genannte Startdatum wurde gewählt, da davor keine bedeutenden geschichtlichen Ereignisse bekannt sind. Die Bestimmung des JD kann über Tabellen oder folgende Formel erfolgen:

$$JD = INT(365,25 \cdot y) + INT[30,6001 \cdot (m + 1)] + B + 1720996,5 + D + (UT1 / 24) \quad (2.1)$$

mit: Y = Jahr, M = Monat, D = Tag

y = Y - 1 und m = M + 12 wenn M ≤ 2

y = Y und m = M wenn M > 2

B = -2 bis einschließlich 04.10.1582

B = INT(y / 400) - INT[y / 100] ab einschließlich 15.10.1582

Um die Datumsangabe zu vereinfachen, wurde das MJD eingeführt. Es errechnet sich wie folgt aus dem JD:

$$MJD = JD - 2400000,5 \quad (2.2)$$

- **ET - Ephemeridenzeit (Ephemeris Time)**

Die ET ist ein 1952 von der IAU (International Astronomical Union) definiertes gleichförmiges Zeitmaß. Die wesentliche Eigenschaft der ET ist, dass beobachtete dynamische Prozesse, wie z. B. die Planetenbewegungen, mit den zugehörigen dynamischen Theorien übereinstimmen. Die Sekunde der ET ist definiert als ein bestimmter Bruchteil des tropischen Jahres 1900. Vor der Erfindung der Atomuhren war die ET jene Zeitskala, welche die genaueste Approximation einer gleichförmigen Zeit für Berechnungen von planetaren Bewegungsabläufen lieferte.

- **TT - terrestrische Zeit (Terrestrial Time)**

1984 wurde die ET in DT (Dynamic Time) umbenannt, wobei seitdem zwischen einer terrestrischen dynamischen Zeit TDT (Terrestrial Dynamic Time) und einer baryzentrischen dynamischen Zeit TDB unterschieden wird. Die TDT ist dabei die Fortsetzung der ET und wurde später in TT (Terrestrial Time) umbenannt [Schödlbauer, 2000].

- **TDB - baryzentrische dynamische Zeit (Barycentric Dynamic Time)**

Der Bezugspunkt der TDB liegt im Baryzentrum unseres Sonnensystems. Aus diesem Grund wird diese Zeitskala für Berechnungen von Planetenbewegungen verwendet. Der Übergang

TT (bzw. TCG, siehe Kapitel 2.4) auf TDB kann mit einer 4-dimensionalen Raum-Zeit-Transformation beschrieben werden, wobei die linearen Terme weggelassen werden.

## 2.2 Zeitsysteme basierend auf der Erdrotation - Sternzeit und Weltzeit

Für die Bestimmung der Weltzeit ist ein Zeitsystem notwendig, welches mit der täglichen Rotation der Erde um ihre Achse in Übereinstimmung steht. Unter Sternzeit versteht man die Beobachtung des Phasenwinkels des Frühlingspunktes.

Aus astronomischen Überlegungen ergibt sich, dass ein Sterntag um ca. 3 min 56 s kürzer ist als ein Sonnentag. Im Laufe eines Jahres summiert sich dieser Unterschied zu einem vollen Tag auf. Daraus kann abgeleitet werden, dass 1 s in Sternzeit dem 365,25/366,25ten Teil einer Sekunde in Weltzeit entspricht.

- **GST - Sternzeit in Greenwich (Greenwich Siderial Time), GMST - mittlere Sternzeit in Greenwich (Greenwich Mean Siderial Time)**

Die Referenzen für GST sind per Definition der Nullmeridian durch Greenwich und der Frühlingspunkt. Dieser ist der Schnittpunkt der Äquatorebene mit der Ekliptik. Der Sterntag in Greenwich beginnt also zu jenem Zeitpunkt, an dem der Frühlingspunkt den Nullmeridian passiert. Der Stundenwinkel des mittleren Frühlingspunktes wird als GMST bezeichnet. Dabei werden dessen durch die Nutation (= durch gravitative Kräfte hervorgerufene Richtungsänderungen der Rotationsachse der Erde im Raum) hervorgerufenen kurzperiodischen Bewegungen vernachlässigt. Die Präzession ist in GMST bereits berücksichtigt.

- **GAST - scheinbare Sternzeit in Greenwich (Greenwich Apparent Siderial Time)**

GAST entsteht, wenn GMST bezüglich der Positionsverschiebung des Frühlingspunktes aufgrund der Nutation in Länge korrigiert wird.

- **LMST - lokale mittlere Sternzeit (Local Mean Siderial Time)**

LMST ist GMST bezogen auf den Längengrad des Beobachters. Dieser wird von Greenwich ostwärts positiv gezählt:

$$\text{LMST} = \text{GMST} + \lambda_{\text{east}} \quad (2.3)$$

- **ERA - Erdrotationswinkel (Earth Rotation Angle)**

In den IERS Conventions 2003 (International Earth Rotation and Reference Systems Service) wird der Übergang auf das kinematische Modell des „Non Rotating Oigin“ (NRO) befürwortet [IERS Conventions 2003, 04.03.2010]. Der in diesem Modell auftretende Erdrotationswinkel ERA bezieht sich hierbei auf die im raum- und erdfesten System definierten NROs und ist eine lineare Funktion von UT1. Dieser fiktive Punkt verlagert sich in der Äquatorebene durch die kontinuierliche Bewegung der Erdrotationsachse im Raum.]

- **UT0 - Weltzeit 0 (Universal Time 0 (Null))**

UT0 ist ein momentanes, vom Beobachtungspunkt abhängiges Maß für die Rotation der Erde. Eine fiktive Sonne kreist mit konstanter Geschwindigkeit in der Ekliptik und kreuzt mit der wahren Sonne zeitgleich die Apsidenlinie (große Achse der Bahnellipse der Erde um die Sonne). Eine zweite fiktive Sonne, auch "mittlere Sonne" genannt, bewegt sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit entlang des Äquators und passiert Frühlings- und

Herbstpunkt gleichzeitig mit der ersten fiktiven Sonne. Aus der Beobachtung der Erdrotation in Bezug auf die zweite fiktive Sonne entsteht UT0.

- **UT1 - Weltzeit 1 (Universal Time 1)**

UT1 wird aus UT0 gewonnen, indem diese bezüglich der Polbewegung wie folgt korrigiert wird:

$$UT0 = UT1 + \tan \varphi \cdot (x \cdot \sin \lambda + y \cdot \cos \lambda) \quad (2.4)$$

mit:  $\lambda, \varphi$  ..... Längen- und Breitengrad des Observatoriums  
 $x, y$  ..... Polkoordinaten

UT1 ist ein momentanes, vom Beobachtungspunkt unabhängiges Maß für die Rotation der Erde und auf den Nullmeridian von Greenwich bezogen.

Aufgrund ihrer Herleitung ist UT1 nicht gleichförmig. Ihr Offset zur Atomzeit variiert ständig, wobei die Änderungen nicht vollständig vorherbestimmt werden können. Gegenwärtig wird UT1 aus Beobachtungen vieler Observatorien mittels moderner Raumtechniken berechnet. So kann sie z. B. aus VLBI-Messungen (Very Long Baseline Interferometrie) direkt abgeleitet werden. Mittels geodätischen Raumverfahren wie u. a. GPS (Global Positioning System) kann die LOD (Length of Day) gewonnen werden. Diese entspricht der negativen Ableitung von UT1.

- **UT2 - Weltzeit 2 (Universal Time 2)**

UT2 wird gewonnen, wenn UT1 bezüglich jährlicher und halbjährlicher jahreszeitlicher Schwankungen der Erdrotation korrigiert wird. Bis 1972 wurden die Signale von Rundfunk (Broadcast) Services innerhalb 0,1 s auf UT2 abgestimmt. Heute ist UT2 faktisch nur noch von historischer Bedeutung.

### 2.3 Zeitsysteme basierend auf atomaren Schwingungen

Eine Zeitskala, die für den praktischen Gebrauch geeignet ist, muss zwei wichtige Eigenschaften aufweisen: Zum einen muss sie die über das SI-System (le Système International d'unités) definierte Sekunde realisieren, zum anderen ein kontinuierlich mit der Zeit fortschreitendes Referenzsystem darstellen. Die heute offiziell verwendete Zeit ist die "Atomzeit" [BIPM, 02.09.2004].

- **TAI - Atomzeit (International Atomie Time)**

Seit 1972 wird am BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) in der Nähe von Paris die TAI unter Verwendung der Beobachtungen von ca. 250 Atomuhren, welche in über 50 Forschungsanstalten weltweit stationiert sind, berechnet. Um eine Stabilität dieser Zeitskala über längere Zeit (bis zu zwei Monaten) hinweg zu gewährleisten, erfolgt eine Gewichtung der Daten der beteiligten Uhren. Dabei wird versucht, so genau wie möglich den definierten Wert der SI-Sekunde zu erreichen. Der Maßstab entspricht damit jenem der dynamischen Zeit. Die TT unterscheidet sich von der TAI nur durch einen konstanten Offset von 32,184 s [Dordrecht, Reidel, 1977]:

$$TT = TAI + 32,184 \quad (2.5)$$

- **UTC - koordinierte Weltzeit (Coordinated Universal Time)**

In der Praxis wird für zivile und militärische Anwendungen eine Zeit benötigt, die einerseits gleichförmig abläuft, andererseits jedoch mit der unregelmäßigen UT1 in Verbindung steht, um einen Zusammenhang mit der Erdrotation zu gewährleisten. Aus diesem Grund wurde im Jahr 1968 die UTC eingeführt. Diese ist eine sogenannte gemischte Zeitskala [Kaplan, Hegarty, 2006]. Die Sekunde der UTC ist die SI-Sekunde. An die UT1 wird die UTC in der Art angeglichen, dass immer dann, wenn die Differenz zwischen den beiden Zeitskalen einen betragsmäßig größeren Wert als 0,9 s erreicht, eine Schaltsekunde addiert oder subtrahiert wird:

$$DUT1 = |UTC - UT1| \leq 0,9 \text{ s} \quad (2.6)$$

Die Differenz DUT1 (differential Universal Time 1) wird vom IERS wöchentlich im IERS Bulletin A veröffentlicht. Dabei werden auch prädizierte Werte für einen Zeitraum über einige Monate im Voraus angegeben.

Eine Schaltsekunde kann prinzipiell positiv oder negativ sein. In der Vergangenheit sind bisher aber nur positive Schaltsekunden aufgetreten. Normalerweise erfolgt die Einführung einer Schaltsekunde am 1. Jänner oder 1. Juli des betreffenden Jahres. Seit 1972 ist sie immer ganzzahlig (siehe Tab.2.2). Seit einigen Jahren wird die Abschaffung bzw. eine nur langfristige Anpassung der UTC an UT1 diskutiert.

Anzahl der Schaltsekunden ↓		Anzahl der Schaltsekunden ↓	
1972 Jan. 1 - 1972 Jul. 1	10	1983 Jul. 1 - 1985 Jul. 1	22
1972 Jul. 1 - 1973 Jan. 1	11	1985 Jul. 1 - 1988 Jan. 1	23
1973 Jan. 1 - 1974 Jan. 1	12	1988 Jan. 1 - 1990 Jan. 1	24
1974 Jan. 1 - 1975 Jan. 1	13	1990 Jan. 1 - 1991 Jan. 1	25
1975 Jan. 1 - 1976 Jan. 1	14	1991 Jan. 1 - 1992 Jul. 1	26
1976 Jan. 1 - 1977 Jan. 1	15	1992 Jul. 1 - 1993 Jul. 1	27
1977 Jan. 1 - 1978 Jan. 1	16	1993 Jul. 1 - 1994 Jul. 1	28
1978 Jan. 1 - 1979 Jan. 1	17	1994 Jul. 1 - 1996 Jan. 1	29
1979 Jan. 1 - 1980 Jan. 1	18	1996 Jan. 1 - 1997 Jul. 1	30
1980 Jan. 1 - 1981 Jul. 1	19	1997 Jul. 1 - 1999 Jan. 1	31
1981 Jul. 1 - 1982 Jul. 1	20	1999 Jan. 1 - 2006 Jan. 1	32
1982 Jul. 1 - 1983 Jul. 1	21	2006 Jan. 1 - 2009 Jan. 1	33

Tab.2.2: Schaltsekunden seit 1972 [Anmerkung: Die Schaltsekunden werden jeweils am 30. Juni oder 31. Dezember nach 23:59:59 UTC eingefügt.]

Zwischen den oben beschriebenen Zeitskalen ergeben sich damit folgende Zusammenhänge:

$$TT = TAI + 32,184 = UTC + (\text{Anzahl der Schaltsekunden}) + 32,184 \quad (2.7)$$

Jedes Weltzeitrechenzentrum berechnet auch seine eigene lokale UTC. Diese wird bezüglich der global gültigen UTC (BIH (Bureau International de l'Heuure)) in regelmäßigen Abständen korrigiert.

- **GPST - GPS-Zeit (GPS-Time)**

Mit dem Start von GPS wurde für selbiges eine eigene Systemzeit geschaffen. Per Definition stimmt GPST mit UTC am 6. Jänner 1980 um 00:00 überein. Ihre Sekunde ist die SI-Sekunde. Dadurch ergibt sich ein konstanter Offset zu TAI mit 19 s [Hofmann-Wellenhof, 2001]. Die Uhren der GPS-Satelliten werden auf wenige Nanosekunden genau mit

GPST synchronisiert. Diese wiederum wird im Bereich von ca. 100 ns in Übereinstimmung mit (TAI + 19 s) gehalten. Die GPS-Empfänger besitzen qualitativ nicht so hochwertige Uhren wie die Satelliten. Bei der Messung muss deshalb ihr Offset zu GPST bestimmt und entsprechend berücksichtigt werden.

## 2.4 Zeitkoordinaten

In der IAU (International Astronomical Union) Resolution A4 aus dem Jahre 1991 wurde das Bezugssystem festgesetzt, welches derzeit in Verwendung ist, um das BRS (Barycentric Reference System) und das GRS (Geocentric Reference System) zu definieren. Darin werden auch die Begriffsbestimmungen der TCB (Barycentric Coordinate Time) und der TCG (Geocentric Coordinate Time) als Zeitkoordinaten für das BRS und das GRS sowie als weitere Zeitkoordinate TT für das GRS festgelegt. Zusätzlich wird die Transformation zwischen den hier angeführten Zeitsystemen angegeben.

TT und TCG unterscheiden sich um einen konstanten Maßstabsfaktor  $L_G$  :

$$\frac{dT_T}{dT_{CG}} = 1 - L_G \quad (2.8)$$

$L_G$  definiert den Gang von TCG. Die Realisierung der Kontinuität der TCG mit ET wurde über eine definierte Epoche, zu welcher die alte und die neue Zeitskala übereinstimmen, realisiert. Die Differenz zwischen TT und TCG kann wie folgt beschrieben werden:

$$TCG - TT = L_G \cdot (MJD - 43144,0) \cdot 86400 \quad (2.9)$$

TAI ist also die Realisierung von TT, wobei sich die beiden Zeitskalen um einen konstanten Offset, nämlich um 32,184 s (siehe Gleichung (2.5)), unterscheiden.

Vor dem Jahr 1991 setzten die Definitionen der Zeitkoordinaten in den baryzentrischen und geozentrischen Referenzrahmen ausschließlich periodische Differenzen zwischen TDB und TDT voraus. Als Folge mussten beim Übergang vom einen Koordinatenrahmen zum anderen die räumlichen Koordinaten des baryzentrischen Bezugsrahmens skaliert werden, um die Unveränderlichkeit der Lichtgeschwindigkeit zu gewährleisten. Beim Gebrauch der TCB- und TCG-Zeitskalen ist dies nicht erforderlich. Der Zusammenhang zwischen TCB und TDB ist linear:

$$TCB - TDB = L_B \cdot (MJD - 43144,0) \cdot 86400 + P_0, \quad P_0 \approx 6,55 \cdot 10^{-5} \text{ s} \quad (2.10)$$

Da es für die TDB keine exakte Definition gibt, existiert für  $L_B$  kein endgültiger Wert. Ein sehr vorsichtiger Umgang mit Gleichung (2.10) ist deshalb empfehlenswert. Um allerdings von TDT bzw. TCG auf TCB umzurechnen, bedarf es, wie für die Transformation von TT (TDT) auf TCB, einer 4-dimensionalen Raum-Zeit-Transformation [IERS Conventions 2003, 04.03.2010].

## Uhren

(Kapitel 3)

### 3.1 Funktionsweise einer Uhr

Eine Uhr ist ein Instrument zur Messung von Zeitdifferenzen. Sie besteht grundsätzlich aus zwei Komponenten. Zum einen besitzt jede Uhr einen Oszillator, der einen möglichst konstanten periodischen Vorgang erzeugt. Dieser Schwingungsgeber kann sehr unterschiedlicher Natur sein, z. B. der Lauf der Erde um die Sonne, ein mechanisches Pendel, die Frequenz von Strahlungsübergängen der Elektronen freier Atome oder vieles mehr. Der periodische Vorgang selbst wird dann als „Zeitnormal“ bezeichnet (siehe Kapitel 1.3). Ist die erzeugte Schwingung (theoretisch) absolut gleichmäßig, so kann mit einer Uhr ein beliebig langer Zeitabschnitt gemessen werden. Zum anderen verfügt die Uhr über eine Einrichtung, welche die so erzeugten Schwingungen identifiziert, zählt und nach außen hin sichtbar macht. Abb.3.1 zeigt zwei Beispiele der Funktionsweise einer Uhr.

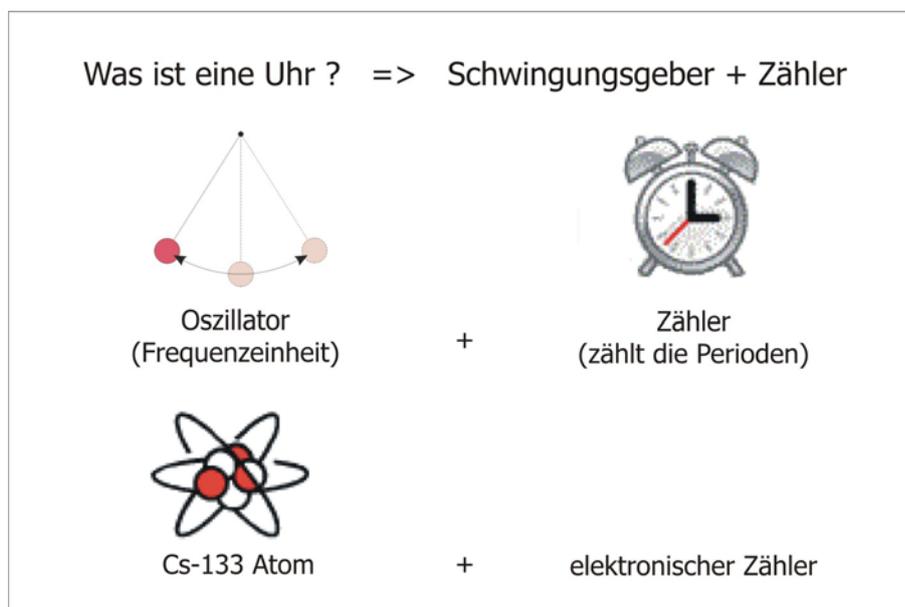


Abb.3.1: Beispiele zur Funktionsweise einer Uhr

Normalerweise schwingt der Taktgeber jeder Uhr in seiner Eigenfrequenz und erzeugt so seine Eigenzeit. Durch geeignete Multiplikation der Periode wird eine Schwingungsdauer von 1 Hz (= 1 Schwingung / s) erreicht. Ebenso impliziert die Bezeichnung „Uhr“ eine kontinuierliche Zählung dieser Frequenzintervalle über einen längeren Zeitraum. Folglich erzeugt jede Uhr ihre individuelle Zeitskala.

Bis ca. 3500 Jahre v. Chr. zurück belegen archäologische Funde die Anstrengungen der Menschen in Bezug auf die Messung der Zeit. Die Sonnenuhr gehört zu den Pionieren der metrologischen Messinstrumente, den Anfang machten Bauten aus Stein (Stonehenge, Obelisken). Es folgten Sand- und Wasseruhren, Feueruhren, Pendeluhren, Räderuhren, Quarzuhren, etc., kurz, eine große Anzahl verschiedener Bauarten dieser Messinstrumente. Eine treibende Kraft für die Entwicklung der Uhren war die Schifffahrt, da hier genaue Zeitmesser für die Navigation gebraucht wurden. Die Erfindung der Unruh ermöglichte den Bau von Uhren, die nicht mehr notwendigerweise aufrecht stehen mussten. Ihrem Einsatz als Armbanduhren stand somit nichts mehr im Wege. Heute wird das Primärnormal (siehe

Kapitel 1.3) mittels atomarer Schwingungen (Cäsium, Rubidium, H-Maser) definiert. Abb.3.2 gibt einen graphischen Überblick über die geschichtliche Entwicklung der Zeitmessung.

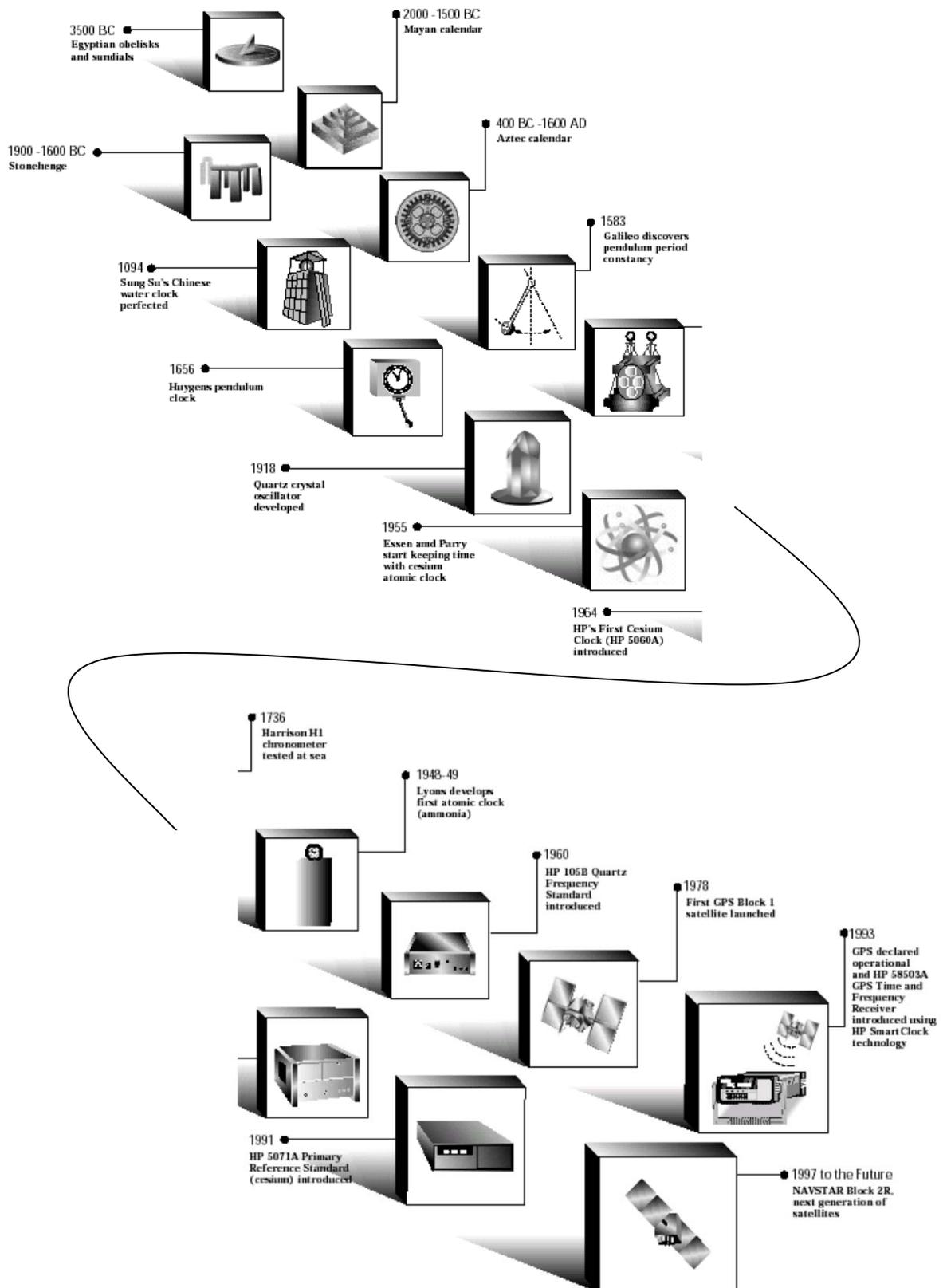


Abb.3.2: geschichtliche Entwicklung der Uhr

## 3.2 Unterschiedliche Uhrentypen

### 3.2.1 Kalender

Im weitesten Sinne kann ein Kalender als „Uhr“ verstanden werden. Der Kalender überdeckt zumeist ein Jahr als Periode des Erdumlaufs um die Sonne. Ein Monat beschreibt die Periode des Umlaufs des Mondes um die Erde und ein Tag eine Umdrehung der Erde um ihre Rotationsachse. Da in früheren Zeiten gewöhnlich davon ausgegangen wurde, dass die durch die Himmelskörper bestimmten Zeitabläufe göttliche Bedeutung hatten, tragen in vielen Sprachen die Monate und Wochentage die Namen von Gottheiten [Horvat, 1984].

Bei der Teilung eines Jahres in zwölf Monate kann kein ganzzahliger Zusammenhang gefunden werden. Verschiedene Kulturen lösten dieses Problem auf unterschiedliche Arten und Weisen. Die Aufteilung des Jahres für unseren Kalender geht auf die alten Ägypter zurück. Wie schon bei den Sumerern gab es hier zwölf Monate zu je 30 Tagen sowie zusätzliche fünf Tage zu Ehren der Gottheit Sothis, am Himmel repräsentiert durch den hellsten Fixstern, Sirius. Hieraus entstand während der ersten großen Kalenderreform unter Gaius Julius Cäsar (100-44 v. Chr.) der Julianische Kalender. 47 v. Chr. wurde das römische Jahr, welches aus zehn Mondmonaten bestand, durch ein 365-Tage-Jahr ersetzt. Jedes vierte Jahr wurde zu einem Schaltjahr erklärt. Die bislang letzte Kalenderreform wurde von Papst Gregor XIII. (1502-1585) im Jahre 1582 durchgeführt. Bei dieser wurde dem Problem, dass ein Jahr nach dem Julianischen Kalender zwölf Minuten länger dauerte als der Sonnenzyklus, Abhilfe geschaffen. Seitdem sind volle Jahrhunderte nur noch dann Schaltjahre, wenn sie durch 400 teilbar sind. Um den Fehler, der bis zum Jahr 1582 entstanden war, zu beheben, wurden die Tage von 05.-14.10.1582 ausgelassen.

Die Zeiträume Jahr, Monat und Tag sind also naturbestimmte Größen, wogegen die weitere Unterteilung in Wochen, Stunden, Minuten und Sekunden vom Menschen erfunden wurde. Die 7-Tage-Woche ist eine Erbschaft aus der jüdischen Kultur. Dass die Woche ausgerechnet in sieben Tage geteilt wurde, hat seinen Ursprung darin, dass der Zahl sieben hier mystische Eigenschaften zugeschrieben wurden. Im Gegensatz dazu lebten die alten Griechen und Römer nach einer 10-Tage-Woche.

Zum Thema "Kalender" existiert ein äußerst umfangreiches Literaturangebot. Näher Interessierte werden darauf verwiesen, z. B. [Kalender, 29.08.2007], [Lenz, 2005], [Müller, 1999], [Horvat, 1984].

### 3.2.2 Elementare Uhren (Analoguhren)

Bei dieser Art von Uhren wird der Verlauf der Zeit kontinuierlich erfasst und analog dargestellt.

- **Sonnenuhren**

In vielen Kulturen wurde schon vor einigen Jahrtausenden die Zeit mit Hilfe von Sonnenuhren gemessen. So ist z. B. der Gebrauch dieser Zeitmesser in Ägypten schon seit 5000 v. Chr., oder in China seit 3000 v. Chr. bekannt. Eine der ersten Formen ist der Gnomon (Schattenwerfer). Dieser ist eine einfache vertikale Steinsäule und bereits aus der Kultur der Babylonier bekannt. In Ägypten findet man als Pendant dazu den Obelisken. Ihrer Bauart nach können Sonnenuhren in drei verschiedene Typen unterteilt werden: Äquatorialsonnenuhr (Ziffernblatt liegt parallel zum Äquator), Horizontalsonnenuhr (Ziffernblatt liegt in der Ebene des Horizonts) und Vertikalsonnenuhr (Ziffernblatt liegt in einer vertikalen Ebene, z. B. auf einer Hausmauer).

- **Wasseruhren**

Der griechische Name der Wasseruhr ist „Klepsydra“, was soviel heißt wie „Wasserdiebin“. Bei dieser Art von Uhr fließt Wasser mit einer bestimmten Geschwindigkeit von einem Gefäß in ein zweites, welches mit Marken versehen ist. So kann am jeweiligen Wasserstand die „verflossene“ Zeit abgelesen werden. Die ersten derartigen Uhren tauchten ca. 3000 v. Chr. in Ägypten auf, in weiterer Folge wurden sie durch einen verbesserten Bau immer genauer. Tycho de Brahe (1546-1601) verwendete für astronomische Beobachtungen eine Wasseruhr.

- **Feueruhren**

Die Basis einer Feueruhr ist ein brennbarer Stoff (Wachs, Öl, ...), der entzündet und von der Flamme aufgebraucht wird. Die vergangene Zeit wird von der schrumpfenden Länge der Kerze oder vom sinkenden Ölstand abgeleitet.

- **Sanduhren**

Die Sanduhr ist eine der jüngsten Bauarten der Analoguhr. Aus dem Altertum gibt es keine Hinweise für eine mögliche Verwendung. Die ersten Sanduhren stammen aus dem 14. Jahrhundert. Das Gefäß der Sanduhr besteht aus zwei konischen Teilen, die an den Spitzen miteinander verbunden sind. Der Sand rieselt so vom oberen in den unteren Behälter, an welchem die Marken für die Zeitablesung angebracht sind. Vor allem für die Schifffahrt wurden Sanduhren in vier Größen miteinander kombiniert. Diese messen die Zeitspannen von einer viertel, einer halben, einer dreiviertel und einer ganzen Stunde.

- **C<sup>14</sup>-Methode**

Diese Zeitbestimmungsmethode basiert auf dem radioaktiven Zerfall des Kohlenstoff-Isotops C<sup>14</sup> und eignet sich zum Messen sehr großer Zeiträume (1.000-40.000 Jahre) [C<sup>14</sup>-Methode, 18.08.2005].

### 3.2.3 Mechanische Uhren

Mechanische Uhren zählen die Anzahl der Schwingungen eines mit Hilfe der Mechanik erzeugten periodischen Vorgangs.

- **Räderuhren**

Die erste Räderuhr wurde ca. 1300 n. Chr. gebaut. Sie besteht im Wesentlichen aus drei Teilen: Antrieb (Gewicht), Zeitnormal mit Hemmung (hin- und herschwingender Waagebalken mit Hemmung), Räder- und Zeigerwerk. Auf dem Prinzip der Räderuhr wurden Turm- und Kirchenguhren gebaut, die sogenannten Monumentaluhren. Eine der berühmtesten ihrer Art ist die Uhr im Straßburger Münster, die von Jean Baptist Schwilgué (1776-1856) errichtet wurde.

- **Federuhren**

Im Unterschied zu einer Räderuhr besteht der Antrieb einer Federuhr nicht aus einem Gewicht, sondern aus einer gespannten Feder. Diese hatte im Vergleich zu ihren Vorgängern einen großen Vorteil: Die Uhren konnten nun sehr klein gebaut werden - die Geburtsstunde von Tisch- und Taschenuhren hatte geschlagen. Allein die Genauigkeit ließ zu wünschen übrig: Abweichungen von bis zu einer Stunde pro Tag waren üblich. Die Hauptursache der großen Schwankungen lag darin begründet, dass eine aufgezoogene Feder eine andere Zugkraft aufweist als eine Feder in fast abgelaufenem Zustand. Mit der Erfindung der „Schnecke“

konnte dieses Problem gelöst werden. Diese ist ein Konus, der zwischen Feder und Räderwerk montiert ist und um den sich eine mit der Feder verbundene Schnur wickelt, um den beschriebenen Effekt auszugleichen.

- **Pendeluhr**

Kein Geringerer als Galileo Galilei (1564-1642) entwickelte als erster die Idee einer Pendeluhr. Bei dieser wird das Räderwerk durch die Kraft einer Feder oder eines Gewichtes bewegt. Das Pendel selbst sorgt für den gleichmäßigen Gang der Uhr. Die rückstellende Kraft des Pendels ist die Gravitation. Wenige Jahre später entdeckte Christian Huygens (1629-1695), dass ein Pendel dann die Gesetze des Isochronismus (= von der Amplitude unabhängige konstante Schwingungsdauer) erfüllt, wenn sein Massenschwerpunkt die Bahn einer Zykloide beschreibt. Da das Pendel bei den frühen Pendeluhrn aus Eisen oder Messing angefertigt wurde, war seine Länge nicht konstant, sondern veränderlich in Abhängigkeit von der Temperatur. So ergab sich z. B. für ein Messingpendel bei einem Temperaturanstieg von 10°C eine Ungenauigkeit von ca. 9 s pro Tag. Georg Graham (1675-1751) entwickelte Pendel, die aus unterschiedlichen Metallen mit verschiedener Wärmeausdehnung bestehen. Dadurch kann die Länge des Pendels konstant gehalten werden. Ein Nachteil der Pendeluhrn ist, dass sie auf einem erschütterungsfreien Ort platziert werden müssen. Je ruhiger der Standort ist, desto genauer funktioniert die Zeitmessung. Aus diesem Grund waren die Pendeluhrn z. B. für die Schifffahrt zu fehlerhaft. Eine verspielte Bauart der Pendeluhr ist die Kuckucksuhr.

- **Uhren mit Unruhsystem**

Die Aufgabe der Erhaltung des gleichmäßigen Gangs der Uhr erfüllt hier eine Kombination aus Unruh und Spiralfeder. Als rückstellende Kraft dient bei diesem System, welches ebenfalls auf Christian Huygens zurückgeht, die elastische Deformationsenergie der Feder. Im Gegensatz zur kleinen Amplitude bei der Pendeluhr liegt jene der Unruh im Bereich von 270°-300°. Der große Vorteil des Unruhschwingsystems besteht darin, dass es in jeder Lage funktionsfähig ist. Uhren dieser Bauart konnten nun auch in der Seefahrt eingesetzt werden. Die berühmteste dieser Uhren ist das Harrison-Chronometer von John Harrison (1693-1776). Dieser griff bei seinen Versuchen, eine hochgenaue Uhr für die Schifffahrt zu bauen, auf das Unruhsystem von Huygens zurück und schaltete Ungenauigkeiten aufgrund von Temperaturschwankungen durch eine bestimmte Kombination verschiedener Baumaterialien aus. Auf einer Testfahrt (in 128 Tagen von England nach Jamaika und zurück) betrug die Gangabweichung dieser Uhr nur zwei Minuten.

### 3.2.4 Moderne Entwicklungen in der Zeitmessung

- **elektrische Uhren**

Die elektrische Uhr entstand in den 70er-Jahren. Sowohl der Antrieb als auch das Schwingsystem besteht hier aus elektrischen Bauteilen. Als Schwingungsgeber wird dabei ein Quarzkristall verwendet, dessen Schwingungsdauer sich durch eine hohe Konstanz auszeichnet. Das Anzeigen der Zeit erfolgt entweder mit Zeigern über ein Räderwerk oder digital. Die Ungenauigkeit einer solchen Uhr liegt bei etwa 0,2 ms pro Tag. Oszillatoren aus Quarz spielen eine Schlüsselrolle in der Metrologie. Deshalb sollen sie hier näher beschrieben werden.

### Quarzoszillatoren:

Quarzoszillatoren sind mit ca.  $2 \cdot 10^9$  Stück pro Jahr die am meisten erzeugten Chronometer [NIST, 19.10.2005]. Sie werden in Armbanduhren, in elektrischen Stromkreisläufen, in Messinstrumenten wie Zählwerken, als Signalgeneratoren, zur Steuerung von Atomuhren etc. verwendet. Das Herzstück dieses Oszillators ist ein Quarzkristall. Dieser verformt sich (dehnt sich aus oder zieht sich zusammen), wenn eine elektrische Spannung angelegt wird. Wird die Spannung umgekehrt, so ändert sich auch die Art der Deformation des Kristalls. Eine solche Reaktion wird piezoelektrischer Effekt genannt. Die Oszillation wird aufrecht erhalten, indem das Signal des Resonators abgegriffen, verstärkt und danach dem Resonator wieder zugeführt wird. Das so entstehende Wechselspiel zwischen Expansion und Kontraktion ist die Resonanzfrequenz des Oszillators. Sie ist abhängig von der Größe und dem Schliff des Quarzkristalls. Das Ausgangssignal des Schwingungsgebers kann entweder diese Resonanzfrequenz sein oder eine beliebiges Vielfaches selbiger, was als Oberwelle (overtone frequency) bezeichnet wird. Die Resonanzfrequenz eines Quarzoszillators variiert mit instabilen Umweltbedingungen, wie z. B. Temperaturschwankungen, Änderungen von Feuchtigkeit und Druck, usw. Durch spezielle Bauweisen wird versucht, diese äußeren Einflüsse möglichst gering zu halten.

### • Molekül- und Atomuhren

Diese Art von Uhren ermöglicht die derzeit stabilste Messung der Zeit. Die besten unter ihnen erreichen eine Genauigkeit von nur einer Sekunde in Millionen von Jahren. Als Frequenznormale werden für diese Uhren Atome und Moleküle verwendet. In der Folge werden die wichtigsten derzeit im Einsatz befindlichen Atomuhren beschrieben. Oft werden sie als „Maser“ bezeichnet, was für „Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ steht.

### Cäsium-Atomuhr

Bei einer Cäsium-Atomuhr wird mittels des  $^{133}\text{Cs}$ -Atoms die Resonanzfrequenz erzeugt. Diese beträgt 9 192 631 770 Hz. Funktioniert ein Cäsiumoszillator zuverlässig, so sollte seine Frequenz auch ohne Nachjustierung immer in der Nähe dieser Resonanzfrequenz bleiben. Ebenso sollte sich seine Frequenz nicht aufgrund von Alterungsprozessen verändern. Nichtsdestotrotz kommt es in der Praxis durch äußere Einflüsse wie Bewegungen, Vibrationen, Magnetfelder, Thermik, usw. zu kleinen Frequenzverschiebungen. Die Stabilität eines Cäsiumoszillators liegt bei  $1 \cdot 10^{-14}$  /d. Für eine Cäsiumuhr gibt es zwei Bauweisen:

#### a. Cäsium-Strahl-Oszillator

Bei dieser Bauweise der Cäsiumuhr werden  $^{133}\text{Cs}$ -Atome bis zum Erreichen des gasförmigen Zustands erhitzt. Mit hoher Geschwindigkeit verlassen einzelne Atome den „Ofen“ und durchqueren einen Behälter, in welchem sie einer Bestrahlung mit Mikrowellen ausgesetzt werden. Damit nur Atome mit einem bestimmten magnetischen Zustand dort ankommen, müssen sie zuvor ein Magnetpaar passieren. Die Mikrowellen im Inneren des Behälters werden von einem Quarzoszillator erzeugt. Stimmen die Frequenzen von Mikrowellen und  $^{133}\text{Cs}$ -Atomen überein, so ändern diese ihren magnetischen Zustand. Beim Verlassen des Behälters passieren die Atome abermals ein Magnetpaar. Jene Atome, die ihren magnetischen Zustand gewechselt haben, werden zu einem Detektor hinter den Magneten gelenkt. Dieser erzeugt nun ein Rückkopplungssignal. Mit Hilfe dessen wird der Quarzoszillator angeregt, in jener Frequenz zu schwingen, bei welcher eine maximale Anzahl an  $^{133}\text{Cs}$ -Atomen den Detektor erreicht. Der gesamte Vorgang (siehe auch Abb.3.3) findet in einer Vakuumröhre statt.

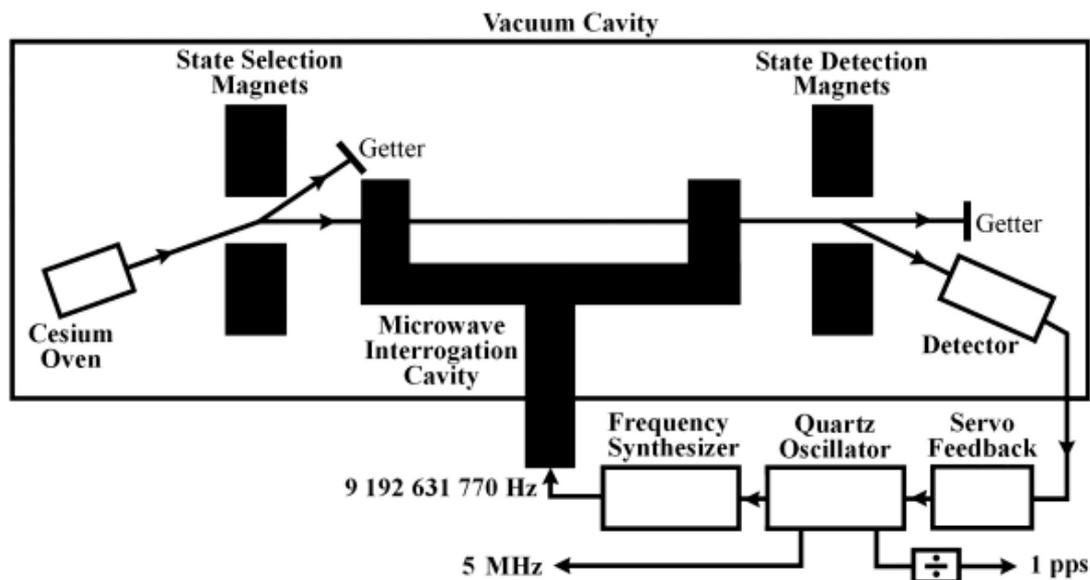


Abb.3.3: Prinzip einer Cäsiumstrahl-Atomuhr

### b. Cäsium-Fontänen-Oszillator

Der Cäsium-Fontänen-Oszillator ist die derzeit modernste Bauart eines Cäsium-Oszillators. Der berühmteste trägt den Namen NIST-F1 (Abb.3.4) und wurde am NIST (National Institute of Standard and Technology) [NIST, 19.10.2005] mit seinem Sitz in Boulder, Colorado (USA), entwickelt. NIST wurde 1901 als erstes föderalistisches Labor für physikalisch-naturwissenschaftliche Untersuchungen in den USA gegründet. Der NIST-F1 wird für die Erzeugung des Primärnormals für Zeit und Frequenz in den USA verwendet. Das Prinzip eines Cäsium-Fontänen-Oszillator ist in Abb.3.5 ersichtlich. Bei diesem Atomuhr wird ein Gas, bestehend aus  $^{133}\text{Cs}$ -Atomen, einer Vakuumkammer übergeben. Ins Zentrum der Kammer zeigen vier Infrarotlaserstrahlen, welche im rechten Winkel aufeinander stehen. Sie formen aus den Atomen eine Kugel. Dieser wird danach senkrecht von unten ca. 1 m in die Höhe befördert, von wo aus er wieder zurückfällt. Am Weg nach oben und wieder nach unten durchquert er einen Behälter, in welchem er einer Mikrowellenstrahlung ausgesetzt ist. Dadurch ändern einige der  $^{133}\text{Cs}$ -Atome ihren Energiezustand. Wieder zurück werden die Atome abermals mit einem Laser angestrahlt, und jene, welche nun ein höheres Energieniveau besitzen, senden Photonen aus, die von einem Detektor gezählt werden. Die Mikrowellenfrequenz wird nun so lange variiert, bis eine maximale Anzahl an Photonen abgegeben wird. Die so gefundene Frequenz ist die Resonanzfrequenz des Cäsium-Fontänen-Oszillators.



Abb.3.4: NIST-F1

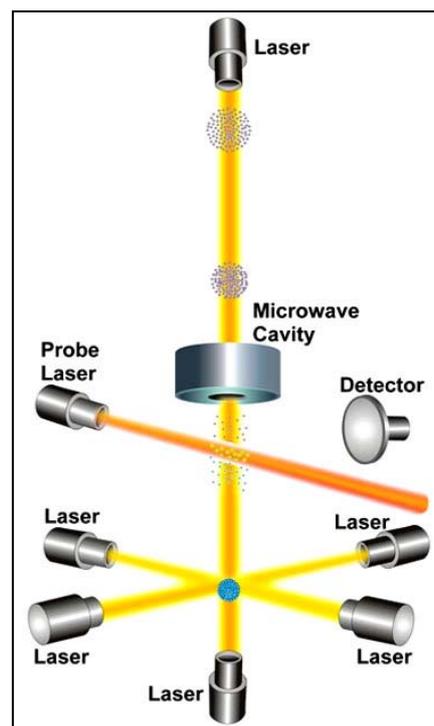


Abb.3.5: Prinzip eines Cäsium-Fontänen-Oszillators

Bei diesem Atomuhr wird ein Gas, bestehend aus  $^{133}\text{Cs}$ -Atomen, einer Vakuumkammer übergeben. Ins Zentrum der Kammer zeigen vier Infrarotlaserstrahlen, welche im rechten Winkel aufeinander stehen. Sie formen aus den Atomen eine Kugel. Dieser wird danach senkrecht von unten ca. 1 m in die Höhe befördert, von wo aus er wieder zurückfällt. Am Weg nach oben und wieder nach unten durchquert er einen Behälter, in welchem er einer Mikrowellenstrahlung ausgesetzt ist. Dadurch ändern einige der  $^{133}\text{Cs}$ -Atome ihren Energiezustand. Wieder zurück werden die Atome abermals mit einem Laser angestrahlt, und jene, welche nun ein höheres Energieniveau besitzen, senden Photonen aus, die von einem Detektor gezählt werden. Die Mikrowellenfrequenz wird nun so lange variiert, bis eine maximale Anzahl an Photonen abgegeben wird. Die so gefundene Frequenz ist die Resonanzfrequenz des Cäsium-Fontänen-Oszillators.

## Rubidium-Atomuhr

Durch den Strahl einer Rubidiumlampe werden  $^{87}\text{Rb}$ -Atome eines Puffergases in einen erhöhten Energiezustand gebracht. In der Folge werden sie in einen benachbarten Behälter befördert, in welchem sie einer Mikrowellenstrahlung ausgesetzt werden. Der Energiezustand der Atome ändert sich dadurch. Das bewirkt, dass der optische Strahl der Rubidiumlampe mehr oder weniger gut absorbiert wird. Auf der anderen Seite des Behälters wird von einem Photozellendetektor die Intensität des durchdringenden Strahls der Lampe gemessen. Durch eine Rückkopplungseinrichtung wird nun die Frequenz der Mikrowellen mit Hilfe eines Quarzoszillators so eingestellt, dass die Absorption maximal wird. Die Resonanzfrequenz eines Rubidiumoszillators liegt bei 6 834 682 608 Hz. Wirtschaftlich gesehen ist die Rubidiumuhr der kostengünstigste Oszillator in seiner Genauigkeitsklasse (Stand Juni 2007). Abb.3.6 zeigt eine für das Satellitennavigationssystem Galileo (siehe Kapitel 4.3) geplante Rubidiumuhr. Das Prinzip des Rubidiumatomuhr ist in Abb.3.7 zu sehen. Seine Stabilität liegt bei  $1 \cdot 10^{-12}$  /d. Über eine kurze Zeitspanne von nur drei Stunden erreicht die Stabilität eines Rubidium-Oszillators sogar einen Wert von  $5 \cdot 10^{-14}$ .



Abb.3.6:  
Rubidiumuhr  
eines Galileo  
Satelliten

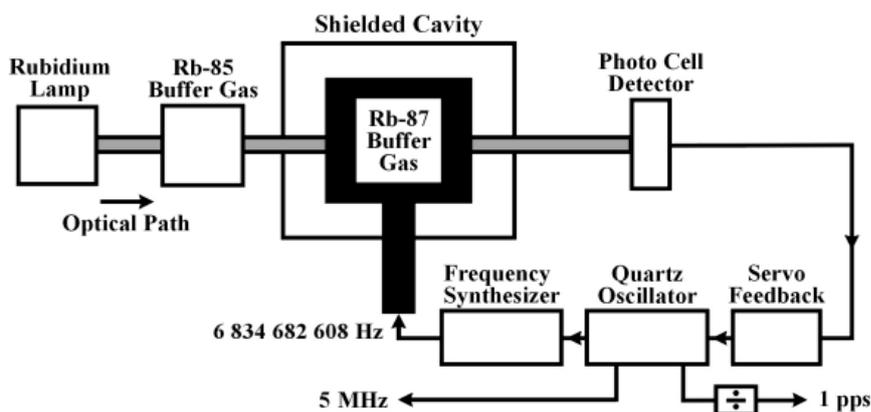


Abb.3.7: Prinzip eines Rubidium-Atomuhr

## Wasserstoff-Maser (H-Maser)

Der Einsatz von Wasserstoffoszillatoren ist zurzeit kostspielig, sie weisen aber die höchste Kurzzeitstabilität von bis zu  $1 \cdot 10^{-15}$  /d auf. Bei einem H-Maser werden Wasserstoffatome durch Radiostrahlung zu starker Schwingung angeregt und anschließend in einen sich in einem abgeschirmten Behälter befindlichen birnenförmigen Raum (eine teflonbeschichtete Quarzkammer) befördert. Auf dem Weg dahin müssen sie eine magnetische Schranke passieren, die nur Atome mit einem bestimmten Energieniveau hindurch lässt. In der Quarzkammer fallen die Wasserstoffatome in einen niedrigeren Energiezustand zurück, wobei sie Photonen mit einer Frequenz im Mikrowellenbereich aussenden. Diese wiederum veranlassen andere Atome, ihr Energieniveau zu senken und dabei ebenfalls Photonen abzugeben. So baut sich im Aufbewahrungsbehälter (bulb) der Atome ein sich selbst erhaltendes Mikrowellenfeld auf. Die Resonanzfrequenz, die daraus resultiert, beträgt 1 420 405 752 Hz. Diese wird kontinuierlich abgestrahlt, solange dem System neue Atome zugeführt werden. In Abb.3.8 ist eine Prinzipskizze eines H-Masers dargestellt. Es sei an dieser Stelle auf das Projekt ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) verwiesen, im Zuge dessen die Kombination eines Cäsium- und eines Wasserstoff-Masers im Weltraum getestet wird [ACES, 09.09.2009].

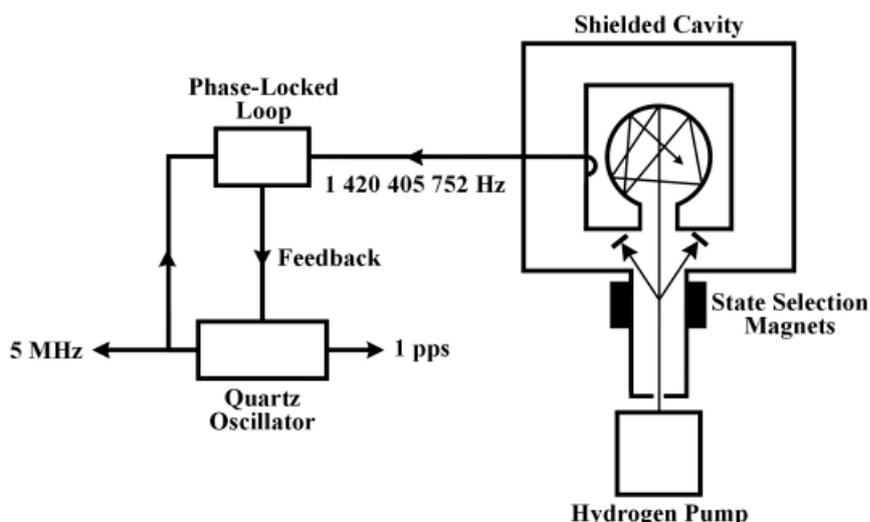


Abb.3.8: Prinzipskizze eines H-Masers

### Optische Uhr

Zuletzt soll noch die in den letzten Jahren vorangeschrittene Entwicklung der optischen Uhren erwähnt werden. Der Vergleich unterschiedlicher Uhrentypen zeigt, dass eine Uhr umso stabiler läuft, je schneller ihr "Pendel" schwingt. Da nun (grünes) Licht eine Frequenz von etwa 600 THz aufweist, bedeutet eine Uhr basierend auf dieser Wiederholungsrate einen weiteren Schritt hin zu noch höherer Genauigkeit [MPQ, 03.09.2009]. Die Stabilität von optischen Uhren liegt im Bereich von  $10^{-17}$ . Derzeit ist nicht angedacht, optische Uhren in Navigationssatelliten einzusetzen. In Studien wurde bereits der potentielle Einsatz von optischen Uhren in Navigationssatelliten untersucht. Mit einer praktischen Umsetzung ist allerdings erst in den nächsten 10-20 Jahren zu rechnen.

Zum Abschluss dieses Kapitels sind hier die wichtigsten Resonanzfrequenzen in Tab.3.1 zusammengefasst.

Oszillatortyp	Resonanzfrequenz [Hz]
Pendel	1
Quarzuhr	32 768
Wasserstoff-Maser	1 420 405 752
Rubidium-Maser	6 834 682 608
Cäsium-Maser	9 192 631 770
(grünes) Licht	≈600 000 000 000 000

Tab.3.1: Resonanzfrequenzen

# Satellitennavigationssysteme

(Kapitel 4)

In den folgenden Kapiteln sollen die aktiven Satellitennavigationssysteme (GPS, GLONASS) sowie das im Entstehen begriffene europäische System Galileo kurz beschrieben werden. Für detailliertere Informationen wird auf zahlreiche Literatur verwiesen, z. B. [Seeber, 2003], [Kaplan, Hegarty, 2006], [Hofmann-Wellenhof, 2008]. Genauer wird in dieser Arbeit nur auf die Bedeutung der GPS Satelliten- und -Stationsuhren eingegangen.

Signale sowie Koordinaten- und Zeitsysteme werden getrennt behandelt. Fehlereinflüsse, Positionierung, etc. werden nur anhand von GPS erläutert.

## 4.1 GPS (Global Positioning System)

### Entstehung

Die Entwicklung des NAVSTAR-GPS (Navigation System with Timing and Ranging - Global Positioning System) begann bereits im Jahr 1973 [Seeber, 2003]. In erster Linie war GPS dafür gedacht, das TRANSIT System abzulösen [Hofmann-Wellenhof, 2001]. Dieses, entwickelt vom U.S. Militär, basierte auf der Messung von Frequenzverschiebungen (Dopplereffekt) der von in sechs polnahen Bahnen kreisenden Satelliten ausgesendeten Signale und war im Wesentlichen dafür konzipiert, die Positionen von Schiffen und Flugzeugen zu bestimmen. Aufgrund der eingeschränkten Positionsgenauigkeit und Abdeckung von TRANSIT musste ein Folgesystem entwickelt werden. Die ersten GPS-Satelliten vom Typ Block I wurden in den Jahren 1978-1985 in ihre Umlaufbahn gebracht [USNO, 11.05.2005]. Seit 1983 wird GPS auch für geodätische Aufgaben verwendet.

### Systemaufbau

#### • Raumsegment

Das Raumsegment des GPS umfasst nominell 24 (maximal 32) Satelliten. Ihre Anordnung in den Bahnebenen erfolgt so, dass zu jeder Zeit an jedem Ort der Erde immer mindestens vier oder mehr Satelliten in mehr als  $15^\circ$  Elevation über dem Horizont stehen. Aus den von ihnen ausgesendeten Signalen können Position und Geschwindigkeit der Empfängerantenne berechnet werden. Zusätzlich können die Beobachtungsdaten z. B. für die Untersuchung der Atmosphäre sowie für Zeitübertragungsaufgaben (siehe Kapitel 5) genutzt

werden. Derzeit sind 30 Satelliten aktiv (Stand 15.09.2009) [NavCen, 16.09.2009]. Die Satelliten befinden sich in einer Höhe von ca. 20200 km in sechs Bahnebenen, welche eine Inklination von  $55^\circ$  aufweisen. Ihre Umlaufzeit beträgt 12 h Sternzeit. Bis heute wurden fünf Typen von GPS-Satelliten gestartet: Block I, Block II, Block IIA (Advanced), Block IIR (Replenishment) und Block IIR-M



Abb.4.1a: GPS Satellit vom Typ Block IIR



Abb.4.1b: GPS Satellit vom Typ Block IIF

(Modernized). Auf die für diese Arbeit relevanten Unterschiede wird in Kapitel 8.2 näher eingegangen. Als nächste Generation folgen die Block IIF-Satelliten (Follow on), von denen sich einer bereits im Orbit befindet (Stand Herbst 2010). Weiters geplant ist der Bau von Satelliten der Generation Block III. Mit ihrer Inbetriebnahme ist frühestens Mitte 2013 zu rechnen. Abb.4.1a zeigt das Bild eines Block IIR-, Abb.4.1b jenes eines Block IIF-Satelliten.

Die Satelliten senden ihre Bahninformationen in der Navigationsnachricht in Form von sechs Größen, den so genannten Kepler-Bahnelementen, sowie zusätzliche Störparameter (zeitliche Änderung der Keplerelemente aufgrund der Abplattung der Erde) aus. Der Übergang vom raumfesten zum erdfesten Koordinatenrahmen (siehe Abschnitt „Koordinatensysteme“) wird durch Korrekturen der Knotenlänge um die Erdrotation (Sternzeit) bewerkstelligt. Damit stehen dem Nutzer alle Satellitenpositionen im erdfesten Koordinatenrahmen zu Verfügung.

- Lage der Bahn im Raum:
  - $\Omega$  .... Rektaszension des Knotens
  - $i$  ..... Inklination (Bahnneigung) = Winkel zwischen Bahn- und Äquatorebene
- Form der Bahn:
  - $a$  ..... große Halbachse
  - $e$  ..... Exzentrizität
- Stellung des Satelliten in der Bahn:
  - $\omega$  .... Argument des Perigäums
  - $v$  ..... wahre Anomalie (Zeit des Perigäumsdurchgangs  $t_0$ )

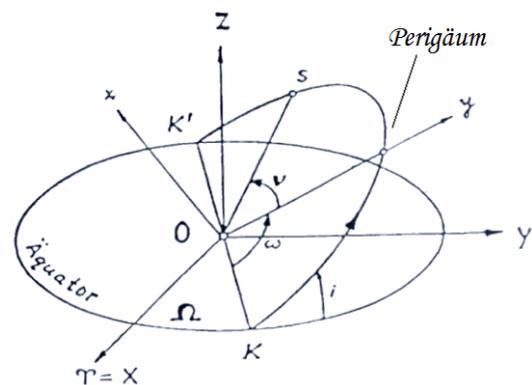


Abb.4.2: Satellitenbahnparameter

### • Kontrollsegment

Das Kontrollsegment (siehe Abb.4.3) des GPS besteht aus einer Master-Kontrollstation (Falcon AFB (Air Force Base), Colorado Springs, Colorado), fünf Monitorstationen (Hawaii, Colorado Springs, Ascension, Diego Garcia, Kwajalein) und drei Bodenkontrollstationen (Ascension, Diego Garcia, Kwajalein) [USNO, 16.06.2009]. Im Rahmen des Kontroll-Upgrade-Programms wurde das Kontrollsegment in der neuesten Zeit um sechs neue global verteilte Stationen erweitert.

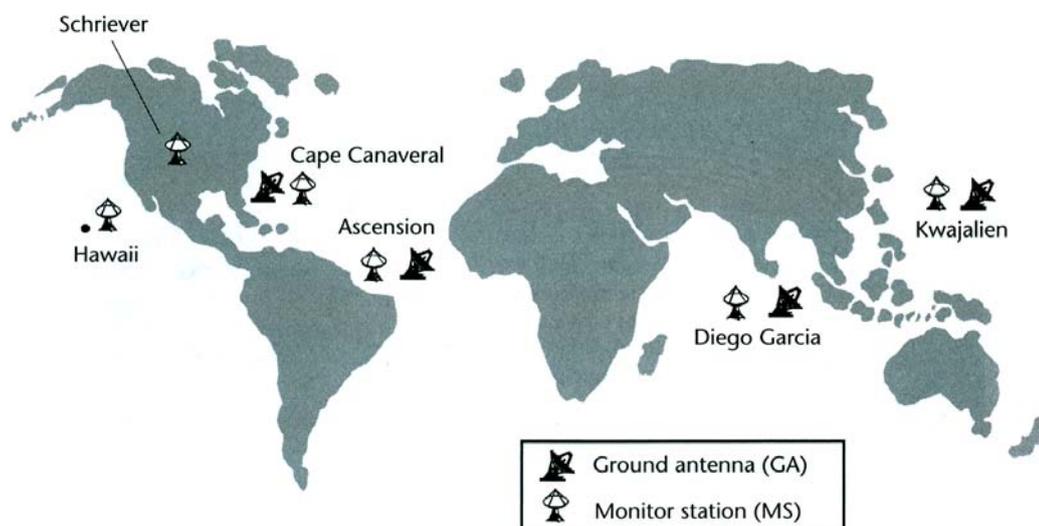


Abb.4.3 Stationen des Kontrollsegments

Die Aufgaben des Kontrollsegments sind:

- kontinuierliche Überwachung des Systems
- Berechnung der GPS-Systemzeit GPST
- Prädiktion der Satellitenbahnen und des Uhrenverhaltens
- regelmäßiges Hochladen der Navigationsnachrichten zu den einzelnen Satelliten
- Anweisungen für kleine Manöver für einzelne Satelliten zur Erhaltung der Bahnhöhe sowie die Verschiebung von Satelliten in ihrer Bahnebene und das Ersetzen schadhafter Satelliten (Kontrollupgradeprogramm).

- **Nutzersegment**

Die GPS-Antennen empfangen die von den Satelliten ausgestrahlten elektromagnetischen Wellen und verwandeln sie in elektrische Signale. Diese werden an die Elektronik des Empfängers übergeben. Die Antenne muss im Normalfall in der Lage sein, die Signale der Satelliten von allen Richtungen oberhalb einer Elevation von  $0^\circ$  zu verarbeiten. Empfänger für Präzisionsmessungen besitzen ein hochstabiles Phasenzentrum sowie eine Schutzeinrichtung gegen unerwünschte Mehrwegeeffekte (Choke Ring). Die Empfänger können je nach ihrer Bauweise nur eine oder beide Trägerwellen und die aufmodulierten Codes verarbeiten (siehe Abschnitt "Signalstruktur"). Sie verfügen über bis zu 216 Kanäle, die entweder in Serie oder parallel geschaltet sind. Früher waren auch Messinstrumente mit so genannten Multiplex Kanälen im Einsatz. Diese empfangen über einen Kanal die Signale mehrerer Satelliten, zwischen denen schnell hin- und hergeschaltet wurde.

Die vom Systembetreiber versprochene Genauigkeit (mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95 %) für ein Raumsegment mit 24 Satelliten liegt für das SPS (Standard Positioning Service) bei 13 m in der Lage, 22 m in der Höhe sowie 40 ns für die Zeit [Kaplan, Hegarty, 2006]. Die angegebenen Werte gelten bei deaktivierter SA.

### **Koordinatensysteme**

Um die Satellitenbahnen sowie die Koordinaten und Geschwindigkeiten der GPS-Empfänger über die Beobachtungen (Distanzen) geeignet miteinander in Verbindung zu setzen, bedarf es der Verwendung unterschiedlicher Koordinatensysteme und -rahmen. Dabei wird unter „System“ die theoretische Definition verstanden, während der „Rahmen“ die konkrete Umsetzung des „Systems“ in der Natur ist.

Grundsätzlich muss zwischen himmels- und erdfesten Systemen unterschieden werden:

- **CIS (Conventional Inertial System)**

Der Ursprung des himmelfesten Koordinatensystems liegt im Schwerpunkt der Erde. Die z-Achse ist die Drehimpulsachse der Erde und weist zum CEP (Celestial Ephemeris Pole). Die x-Achse zeigt zum Frühlingspunkt, dem Schnittpunkt von Äquator und Ekliptik. Die y-Achse steht normal auf die beiden anderen Achsen und bildet mit diesen ein Rechtssystem. Die Definition der Achsenrichtungen bezieht sich auf die Standarddepoche 2000,0 (12:00 UTC, 01.01.2000). Das CIS kann als quasi-inertiales System angesehen werden. Somit besitzen die Newtonschen Gesetze Gültigkeit. Dieses Koordinatensystem eignet sich deshalb gut für die Beschreibung der Satellitenbahnen. Der himmelfeste Koordinatenrahmen ICRF (International Celestial Reference Frame) als bestmögliche Realisierung des CIS wird durch die Koordinaten bestimmter Quasare festgelegt. Das CIS wird auch ECI (Earth-Centered Inertial) genannt.

- **CTS (Conventional Terrestrial System)**

Wie beim CIS liegt auch der Ursprung des erdfesten Koordinatensystems im Schwerpunkt der Erde. Die z-Achse weist zum CIO (Conventional International Origin). Die x-Achse dieses Systems liegt in der Äquatorebene in Richtung des Meridians von Greenwich. Die y-Achse, die ebenfalls in der Äquatorebene liegt, bildet mit den beiden anderen Achsen ein Rechtssystem (in Richtung Osten). Durch die feste Verbindung der x-Achse mit dem Meridian von Greenwich ist dieses CTS ein mit der Erde mitrotierendes Koordinatensystem. Zur besseren Anschaulichkeit werden die kartesischen Koordinaten sehr häufig in Länge, Breite und Höhe umgerechnet. Es ist daher auch besser geeignet für die Beschreibung der Empfängerkoordinaten und -geschwindigkeiten. Die Definition des erdfesten Koordinatenrahmens, des so genannten TRF (Terrestrial Reference Frame), erfolgt durch fixe Beobachtungsstationen auf der Erdoberfläche (z. B. ITRF 2005). Ein CTS wird auch ECEF (Earth-Centered Earth-Fixed) genannt.

GPS verwendet als physikalisches Standardmodell das so genannte WGS-84 (World Geodetic System-84). Mit diesem ist ein geozentrisch gelagertes Rotationsellipsoid verknüpft. Es ist definiert durch: Halbachse  $a = 6378137$  m (= Erdradius in der Äquatorebene) sowie der Abplattung  $f = 1/298,2572236$ . Das WGS-84 stellt weiters ein detailliertes Modell für die Beschreibung des Gravitationspotentials der Erde zur Verfügung. 1996 wurde auf das EGM96 (Earth Gravity Model 1996), welches auf einer Kugelfunktionsentwicklung von Grad und Ordnung 360 basiert, übergegangen.

Der Übergang von CIS ins CTS und umgekehrt erfolgt über eine Koordinatentransformation. Deren Parameter berücksichtigen den Phasenwinkel der Erddrehung (Sternzeit), die Polbewegung sowie Präzession und Nutation der Rotationsachse.

- **GPS Systemzeit**

Das Navigationssystem GPS definiert und realisiert ein eigenes Zeitsystem. Dieses wird in Kapitel 2.3 näher beschrieben.

- **Signalstruktur**

GPS ist ein „one-way ranging system“. Das heißt, die Signalübertragung erfolgt, abgesehen von den „Uplinks“ der Kontrollstationen, nur in eine Richtung: von den Satelliten zu den Empfängern. Die GPS-Satelliten sind je nach ihrer Bauart mit Cäsium- und/oder Rubidiumoszillatoren ausgestattet. Diese erzeugen eine nominelle Grundfrequenz von 10,23 MHz. Die tatsächliche Grundfrequenz unterscheidet sich von dieser allerdings um einen kleinen Betrag, um relativistische Effekte zu korrigieren (siehe Abschnitt „Relativistische Uhrkorrekturen“). Die abgeleiteten Trägerfrequenzen im L-Band erhält man durch Multiplikation mit den Faktoren 154 und 120:

$$\begin{aligned} L_1 &= 154 \cdot 10,23 = 1575,42 \text{ MHz} \Rightarrow \lambda_1 = 19,0 \text{ cm} \\ L_2 &= 120 \cdot 10,23 = 1227,60 \text{ MHz} \Rightarrow \lambda_2 = 24,4 \text{ cm} \end{aligned}$$

mit:  $\lambda_i$  .... Wellenlänge der jeweiligen Trägerwelle

Den Trägerwellen sind PRN-Codes (Pseudo Random Noise) durch Modulation mit binären Werten aufgeprägt: der P-Code (Precision oder Protected) mit einer Frequenz von 10,23 MHz ( $\lambda = 30$  m) und der C/A-Code (Clear/Aquisition oder Coarse/Aquisition) mit einer Frequenz von 1,023 MHz ( $\lambda = 300$  m). Anhand der für jeden Satelliten charakteristischen Codes können sie identifiziert werden. Jeder GPS-Satellit hat einen eigenen PRN-Code. Für die Übertragung werden die Codes in „chips“ unterteilt. Der P-Code wiederholt sich theoretisch

alle 266 Tage und wird beiden Trägerwellen aufgeprägt. Eine Sequenz des C/A-Codes dauert nur 1 ms. Er wird nur auf der Trägerwelle  $L_1$  gesendet.

Weiters senden die Satelliten noch eine Navigationsnachricht [Bauer, 1994]. Der gesamte Datenübertragungsblock („Frame“) umfasst 1500 Bit. Eine vollständige Übertragung dauert 30 s. Jeder Block der Navigationsnachricht wird in fünf weitere Untergruppen („Subframes“) unterteilt. Subframe 1 beinhaltet dabei in erster Linie Informationen über die Satellitenuhr. Die Größe AODC (Age of Data - Clock) vermittelt das Alter der Uhrdaten. Danach folgen Parameter zur Berechnung der Satellitenuhrkorrektur zu GPST. Die den Oszillatoren anhaftenden charakteristischen Drifteigenschaften können durch ein Polynom zweiten Grades beschrieben werden. Die Koeffizienten  $a_0$ ,  $a_1$  und  $a_2$  dieser Funktion sowie deren Referenzzeit werden übermittelt.

### • Sicherheitspolitik

Da GPS ein militärisch geleitetes Satellitennavigationssystem ist, behält sich das U.S. DoD (U.S. Department of Defense) die Möglichkeit offen, die Signale und Codes für die zivile Nutzung zu verfälschen bzw. zu sperren. Im Wesentlichen gibt es hierfür zwei Methoden:

#### 1. AS (Anti-Spoofing)

AS steht für die Verschlüsselung des P-Codes. Dabei wird dieser mit einem dem zivilen Nutzer nicht bekannten W-Code überlagert. Der daraus resultierende Code wird Y-Code genannt. Dieser kann nur mit speziellen Decodern, die ausschließlich militärischen Anwendern zur Verfügung stehen, entschlüsselt werden. Da der W-Code aber eine ca. um den Faktor 20 kleinere Frequenz aufweist als der P-Code, kann er mit Hilfe von Korrelations-techniken in Kombination mit Tiefpassfiltern entfernt werden. Das Signal / Rausch-Verhältnis verschlechtert sich bei diesem Verfahren allerdings merklich.

#### 2. SA (Selective-Availability)

SA ist die Bezeichnung für eine gezielte Verminderung der Güte der von den GPS-Satelliten gesendeten Signale. Dazu standen zwei Optionen zur Verfügung. Bei der Epsilon-Technik ( $\epsilon$ -Prozess) wurde die Bahninformation der Satelliten künstlich verschlechtert, während die Dither-Technik ( $\delta$ -Prozess) ihr Zeitsignal verfälschte. Bei beiden Methoden wurde also die Qualität der Beobachtungen herabgesetzt. Bei der Echtzeitpositionsbestimmungen waren Schwankungen von 50 m und mehr innerhalb weniger Minuten möglich. Am 02.05.2000 wurde SA auf unbestimmte Zeit deaktiviert.

### Beobachtungsgrößen

Hier soll nochmals angemerkt werden, dass alle GNSS-Systeme (Global Navigation Satellite System) in etwa der gleichen Funktionsweise folgen. Eine genauere Beschreibung wird deshalb nur für GPS gegeben. Prinzipiell können aus den Code- und Phasenmessungen auf beiden Trägerfrequenzen sowie aus Dopplerverschiebungen die Position und Geschwindigkeit eines Empfängers sowie die Zeitkomponente bestimmt werden.

### • Code- und Phasenmessungen

Durch eine Korrelation des Codesignals mit einem im Empfänger erzeugten Signal ist es möglich, die Signallaufzeit zu bestimmen. Aus der Zeitspanne zwischen Aussendung des Signals beim Satelliten und seiner Ankunft beim Empfänger kann so mit Hilfe der bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit der Trägerwelle (Lichtgeschwindigkeit) die Distanz zwischen den beiden Antennen berechnet werden:

$$\overline{PR}_c = c \cdot (t_j - t_i) \quad (4.1)$$

mit:  $\overline{PR}_c$  ..... Pseudoentfernung  
 $t_i$  ..... Sendezeit des Signals beim Satelliten  
 $t_j$  ..... Ankunftszeit des Signals beim Empfänger  
 $c$  ..... Lichtgeschwindigkeit

Aufgrund der Tatsache, dass sowohl die Satellitenuhr als auch die Empfängeruhr fehlerbehaftet sind, entspricht  $\overline{PR}_c$  noch nicht der korrekten geometrischen Strecke. Deshalb wird sie auch „Pseudodistanz“ genannt. Um die richtigen Empfängerkoordinaten zu erhalten, sind also drei Beobachtungen zu drei Satelliten nicht ausreichend. Da auch der Uhrenfehler bestimmt werden muss, wird zumindest noch ein vierter Satellit in die Messung miteinbezogen. Weiters müssen die zum Sendezeitpunkt des Signals gehörigen Koordinaten des Satelliten bekannt sein.

Die detaillierten Beobachtungsgleichungen für Code- und Phasenmessungen haben folgende Gestalt:

$$\overline{PR}_c = \rho + c \cdot \delta t_i + c \cdot \delta t_j + c \cdot \delta t_T + c \cdot \delta t_I + m_c + \varepsilon_R \quad (4.2)$$

$$\overline{PR}_p = \rho + c \cdot \delta t_i + c \cdot \delta t_j + c \cdot \delta t_T - c \cdot \delta t_I + c \cdot \frac{N_{ij}}{f_{CR}} + m_p + \varepsilon_R \quad (4.3)$$

mit:  $\overline{PR}_c, \overline{PR}_p$  ... Pseudoentfernungen für Code- und Phasenmessung  
 $\rho$  ..... geometrische Entfernung  
 $\delta t_i$  ..... Abweichung der Satellitenuhr gegenüber GPST  
 $\delta t_j$  ..... Synchronisationsfehler der Empfängeruhr  
 $\delta t_T$  ..... troposphärische Laufzeitverzögerung  
 $\delta t_I$  ..... ionosphärische Laufzeitverzögerung  
 $N_{ij}$  ..... Mehrdeutigkeit (Ambiguity)  
 $f_{CR}$  ..... Frequenz der Trägerwelle  
 $m_c, m_p$  ..... Code- und Phasen-Multipath  
 $\varepsilon_R$  ..... Messrauschen

Das Vorzeichen des Korrekturterms aufgrund der ionosphärischen Laufzeitverzögerung besitzt bei Codebeobachtungen das umgekehrte Vorzeichen wie bei Phasenbeobachtungen. Der Grund hierfür ist, dass die Ionosphäre für die Trägerwellen ein dispersives Medium darstellt. In der Code-Gleichung ist also der Gruppenbrechungsindex anzusetzen, wogegen in der Phasen-Gleichung der Phasenbrechungsindex verwendet werden muss. Nur in der

Beobachtungsgleichung für die Phasenmessung tritt der so genannte Mehrdeutigkeitsterm auf. Die Mehrdeutigkeit (Ambiguity) ist die unbekannte Anzahl ganzer Wellenlängen des Signals zwischen Satellit und Empfänger. Bei der Phasen-Beobachtungsgleichung muss hierfür eine zusätzliche Unbekannte  $N_{ij}$  in die Berechnung eingeführt werden. Im Differenzverfahren sind diese Mehrdeutigkeiten ganzzahlig.

Im Normalfall liegt bei GPS-Messungen eine hohe Überbestimmung vor. Das Gleichungssystem wird deshalb mittels eines Ausgleichs nach der Methode der kleinsten Quadrate nach den unbekanntenen Empfängerkoordinaten und der Zeit gelöst.

- **Messung integrierter Dopplerverschiebungen (Doppler counts)**

Es wird hierbei die Tatsache genutzt, dass es bei der Beobachtung eines bewegten Senders zu einer Frequenzverschiebung des Signals kommt. Diese wird als „Dopplerverschiebung“ bezeichnet. Nähert sich der Sender dem Empfänger, so ist die ankommende Frequenz höher als die ausgesandte. Entfernt sich der Sender vom Empfänger, so ist sie niedriger. Die empfangene Frequenz  $f'$  kann mittels der folgenden Formel berechnet werden:

$$f' = \frac{f}{1 - \frac{v}{c}} \quad (4.4)$$

Wird die Geschwindigkeit des Satelliten mit rund  $v \approx 4$  km/s angenommen (im Extremfall in der Sichtlinie Satellit-Beobachter), so ergibt sich der Frequenzunterschied  $\Delta f$  über

$$\Delta f = |f - f'| \quad (4.5)$$

für die Trägerwelle  $L_1$  mit 0,021 MHz, für  $L_2$  mit 0,016 MHz. Im Regelfall wird die Frequenzänderung des Satellitensignals aufgrund des Dopplereffekts bereits im Empfänger berücksichtigt.

## Fehlerquellen

Die Streckenmessung mittels GPS wird durch mehrere Fehlerquellen beeinflusst (UERE, siehe Ende des Abschnitts). Sie sollen in der Folge aufgezählt und kurz beschrieben werden.

- **Satellitenbahn**

Satellitenbahnfehler resultieren aus unzureichender Modellierung der auf die Satelliten wirkenden Störkräfte (gravitative Kräfte, Strahlungsdruck der Sonne, ...). Ihr radialer Anteil wird zu über 90 % als scheinbarer Uhrfehler des betreffenden Satelliten kompensiert. Durch die Ausbreitung der Trägerwellen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit entspricht ein radialer Bahnfehler von 30 cm einem Fehler in der Zeitmessung von  $\approx 1$  ns, bzw. umgekehrt (siehe Fehlerquelle „Satellitenuhr“).

Die Genauigkeit der von den Satelliten mitgesendeten Broadcast-Ephemeriden beträgt derzeit rund 100 cm [IGS, 16.09.2009 (International GNSS Service)]. Für eine Punktbestimmung über lange Basislinien mit höchsten Genauigkeitsanforderungen ist es daher notwendig, präzise Ephemeriden (Genauigkeit  $< 5$  cm) für die Auswertung zu verwenden.

- **Satellitenuhr**

Die GPS-Satellitenuhren sind, abhängig von der Bauserie des Satelliten, Cäsium- und / oder Rubidiumoszillatoren. Diese Uhren weisen eine sehr hohe Frequenzstabilität auf (siehe Kapitel 3.2.4). Trotzdem kommt es zu Abweichungen von bis zu 1 ms von der GPS-Systemzeit. In der Master-Kontrollstation werden deshalb laufend Korrekturparameter berechnet. Diese sind die Koeffizienten eines quadratischen Polynoms. Sie werden dem Empfänger im Rahmen der Navigationsnachricht mitgeteilt. Die Polynomparameter werden für einen kurzen Zeitabschnitt (im Allgemeinen bis zu 24 Stunden) im Voraus berechnet. Da sich die Uhrkorrektur aufgrund von überlagerten Rauscheffekten nicht exakt durch ein Polynom beschreiben lässt, verbleibt ein Restfehler. Dieser beeinflusst die beobachtete Weglänge des Signals und muss epochenweise geschätzt werden (präzise Ephemeriden). Werden bei der Auswertung der Beobachtungen Differenzverfahren angewandt, muss dieser Fehler nicht weiter berücksichtigt werden, da er eliminiert wird. Bei Berechnungen auf dem Niveau von „Zero-Differenzen“ geht er allerdings direkt in das Ergebnis ein.

- **relativistische Effekte**

Durch die Relativbewegung der Satelliten gegenüber den Empfängerantennen auf der Erde, dem schwächeren Gravitationsfeld beim Satelliten sowie der Elliptizität der Satellitenbahnen kommen relativistische Effekte zum Tragen. Diese werden ausführlicher im Abschnitt "Relativistische Uhrkorrekturen" beschrieben.

- **Ionosphäre**

Auf dem Weg durch die Ionosphäre (50-1000 km über der Erdoberfläche) erfährt das GPS-Signal eine Verzögerung (bei Codebeobachtungen) oder Beschleunigung (bei Phasenbeobachtungen) seiner Laufzeit. Diese ist abhängig vom so genannten TEC-Wert (Total Electron Content). Dieser ist als der Gesamtelektronengehalt in einem Zylinder mit einer Grundfläche von  $1 \text{ m}^2$  zu verstehen, dessen Achse entlang des Ausbreitungsweges des Signals verläuft. Der TEC wird in TECU (TEC Units) gemessen. Der TEC ist hauptsächlich von

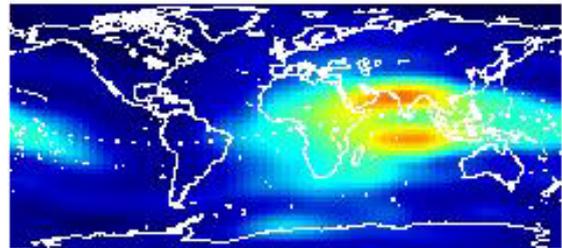


Abb.4.4: Ausschnitt aus einer Ionosphärenkarte von CODE (Center for Orbit Determination in Europe), 27.10.04, 10:00 UT (dunkel-blau: niedriger VTEC, rot: hoher VTEC (bis zu 90 TECU))

der Sonnenaktivität und dem geomagnetischen Feld der Erde abhängig. Die geographische Lage der Empfängerstation sowie der Beobachtungszeitpunkt sind daher für die Berechnung des TEC von großer Bedeutung. Am frühen Nachmittag und in der Nähe des geomagnetischen Äquators erreicht er ein Maximum, um Mitternacht und an den Polen ein Minimum. Die Ionosphäre ist für Mikrowellen ein dispersives Medium. Unterschiedliche Frequenzen erfahren in ihr verschiedene Laufzeitverzögerungen. Wird, wie bei GPS, mit verschiedenen Frequenzen gearbeitet, so kann der Zustand der Ionosphäre, also der VTEC (Vertical Total Electron Content), mit der so genannten geometriefreien Linearkombination geschätzt werden. Das Resultat sind so genannte VTEC-Karten (siehe Abb.4.4). Diese können danach wiederum für weitere Berechnungen verwendet oder anderen Nutzern zur Verfügung gestellt werden. Der TEC spielt bei der Zeitübertragung eine wesentliche Rolle. Gemeinsam mit Kalibrierungsfehlern bei Satelliten und Empfängern, wie z. B. dem DCB (Differential Code Bias), wirkt sich eine ungenaue Kenntnis dieser Größen auf die Genauigkeit der Zeitübertragung aus.

- **Troposphäre**

Wie in der Ionosphäre wird die Laufzeit des GPS-Signals in der Troposphäre verzögert. Üblicherweise wird der troposphärische Einfluss in eine trockene ( $\approx 90\%$ ) und eine feuchte ( $\approx 10\%$ ) Komponente aufgeteilt. Der trockene Anteil ist abhängig von Temperatur und Druck und kann sehr genau modelliert werden. In die feuchte Komponente gehen Temperatur und Wasserdampfdruck ein. Da die Verteilung des Wasserdampfes in der Troposphäre räumlich und zeitlich sehr variabel ist, ist die feuchte Komponente schwierig zu modellieren. Je nach Wetterlage kann die Wirkung der Troposphäre auf das Signal zeitlich sehr rasch variieren. Für einen im Zenit stehenden Satelliten macht sich der Einfluss der Troposphäre für eine Station in Meereshöhe mit  $\approx 2,3$  m bemerkbar.

- **Mehrwegausbreitung (Multipath)**

Je nach der Umgebung der Bodenstation kann es vorkommen, dass sich das GPS-Signal nicht auf dem direkten, geradlinigen Weg vom Satelliten zur Empfangsantenne ausbreitet, sondern zuerst auf dem Boden oder auf in der Nähe befindlichen Bauwerken auftrifft und von dort zur Antenne hin reflektiert wird. Der Signalweg verlängert sich dadurch, was zu einer fehlerhaften Positionsbestimmung führt. Code-Multipath kann die Streckenmessung um mehrere Meter bis 10er-Meter verfälschen, Phasen-Multipath nur im cm-Bereich.

- **Diffraction und Interferenz**

Diffraction eines GPS-Signals bedeutet, dass durch ein Sichthindernis das direkte Signal den Empfänger nicht erreichen kann, jedoch ein gebeugtes bei diesem eintrifft. Dies kann z. B. dann der Fall sein, wenn die Antenne sich im Abschattungsbereich eines Hauses befindet. Interferenzen können auftreten, wenn sich Sendeanlagen (z. B. Amateurfunkanlagen) in der Nähe des Empfängers befinden, die Frequenzen in der Nähe der GPS- $L_2$ -Trägerwelle benutzen. Dies kann von einem schwachen Signal-Rausch-Verhältnis bis hin zu einem gänzlichen Signalverlust führen.

- **Antennenphasenzentrumsexzentrizitäten**

GPS-Antennen besitzen ein elektrisches Phasenzentrum. Dieses kann nicht als eindeutig definierter Punkt angegeben werden, sondern variiert mit der Frequenz und der Richtung des einfallenden Signals. Für eine präzise Punktbestimmung ist die Kenntnis des genauen Phasenzentrums allerdings von großer Bedeutung. Für die meisten Antennentypen kann hierfür auf von den Herstellern bereitgestellte Tabellen zurückgegriffen werden. In diesen sind die 3D-Koordinaten des jeweils gültigen elektrischen Phasenzentrums mit Bezug auf den ARP (Antenna Reference Point), der mechanisch exakt definiert ist, angegeben. Besonders wichtig ist die Beachtung der verschiedenen Antennenphasenzentrumsexzentrizitäten, wenn verschiedene Antennentypen bei einer gemeinsamen Messung verwendet werden.

- **Messrauschen**

Das Messrauschen resultiert aus der Tatsache, dass sowohl die Phasen- als auch die Codebeobachtungen zufälligen Schwankungen unterliegen. Diese können von den Antennen, den Frequenzverstärkern, den Kabeln und den Empfängern selbst herrühren. Als Daumenregel gilt, dass für klassische Empfänger das Messrauschen in etwa 1 % der Wellenlänge des Signals beträgt. Damit erhält man ein Rauschen für den C/A-Code von  $\leq 3$  m, für den P-Code von  $\approx 0,3$  m und für die Trägerphasen von  $\approx 0,002$  m. Das C/A-Coderauschen moderner Empfänger liegt aber bereits im Bereich einiger Dezimeter.

- **Empfängeruhr**

Die Empfängeruhr ist im Allgemeinen von weit geringerer Qualität als die Satellitenuhr. Im Normalfall arbeitet ein GPS-Empfänger mit einer Quarzuhr (siehe Kapitel 3.2.4). Der

Empfängeruhrfehler wird als zusätzliche Unbekannte zu den Standpunktskoordinaten bei der Auswertung der Beobachtungen mitgeschätzt.

Die folgende Tab.4.1 zeigt die Größenordnung der Fehlereinflüsse. In der letzten Zeile wird der UERE (User-Equivalent Range Error) angegeben. Dieser ist per Definition eine Projektion des Fehlerbetrags auf die Verbindungslinie vom Beobachter zum Satelliten.

Segment	Fehlerquelle	$1\sigma$ Fehler [m]
Raumsegment	Satellitenuhr (Broadcast)	1,1
	L1 P(Y)-L1 C/A (DCB)	0,3
	Gruppenlaufzeitverzögerung	
	Satellitenbahn (Broadcast)	0,8
Nutzersegment	Einfluss der Ionosphäre	7,0
	Einfluss der Troposphäre	0,2
	Empfängerrauschen	0,1
	Mehrwegausbreitung	0,2
SYSTEM UERE		7,1

Tab.4.1: geschätzter SPS C/A-Code Pseudoentfernungshaushalt

Für hochgenaue geodätische Anwendungen werden Differenzverfahren oder Linearkombinationen der Signale verwendet, um diese Fehler zu minimieren bzw. zu eliminieren.

### Mess- und Auswerteverfahren

Generell können GPS-Beobachtungsdaten entweder im post-processing oder in Echtzeit ausgewertet werden. Für erstere Verfahren können z. B. vom IGS die hochgenauen Final- oder Rapid-Produkte (siehe Kapitel 5.2) verwendet werden. Diese garantieren eine Genauigkeit von  $\approx 0,1$  ns für die Uhrkorrekturdaten sowie von  $< 5$  cm für die Satellitenbahnen. Da sie aber mit einer Verzögerung von 13 Tagen (Finals) bzw. 17 Stunden (Rapids) veröffentlicht werden, sind sie für Echtzeitauswertungen nicht verwendbar. Hierfür müssen sowohl die Satellitenbahnen als auch die Uhrdaten mit Hilfe eines Prädiktionsmodells vorausberechnet werden. Über die Satelliten selbst werden prädizierte Broadcastdaten mit einer Genauigkeit von  $\approx 5$  ns für die Uhren sowie  $\approx 160$  cm für die Bahnen übermittelt. Wird eine höhere Genauigkeit benötigt, können z. B. die Ultra-Rapid-Produkte des IGS verwendet werden, die eine Uhrgenauigkeit von  $\approx 3-4$  ns bzw. eine Bahngenauigkeit von  $\approx 5$  cm aufweisen.

Vor allem für nicht-differentiell arbeitende Verfahren, wie z. B. PPP (Precise Point Positioning), geht der Fehler der Satellitenuhr direkt in die Koordinaten der Empfängerposition ein. Aus diesem Grund ist es wünschenswert, die Satellitenuhren so genau wie möglich vorherzusagen.

Da Mess- und Auswerteverfahren in dieser Arbeit selbst nicht von Bedeutung sind, wird auf sie auch nicht näher eingegangen.

### Relativistische Uhrkorrekturen

Die Uhren der GPS-Satelliten werden durch relativistische Effekte beeinflusst. Zum einen bewirkt die Abnahme des Gravitationseinflusses (Potentialdifferenz) der Erde mit zunehmender Entfernung von dieser, dass die Satellitenuhren pro Tag um etwa 40  $\mu$ s schneller laufen als Uhren auf der Erde. Überdies laufen relativ zu einem Empfänger auf der Erdoberfläche bewegte Uhren (im Satelliten) langsamer als unbewegte. Für den Frequenzunterschied bedeutet dies nach [Rothacher, 2003]:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f - f_0}{f_0} = \frac{v^2}{2c^2} + \frac{\Delta U}{c^2} \quad (4.6)$$

- mit:  $f$  ..... vom Satelliten ausgesendete Frequenz  
 $f_0$  ..... beim Empfänger eintreffende Frequenz  
 $v$  ..... Geschwindigkeit des Satelliten ( $\approx 4$  km/s)  
 $\Delta U$  .... Potentialdifferenz zwischen Satellit und Empfänger

Näherungsweise wird nun angenommen, dass sich der GPS-Satellit auf einer kreisförmigen Bahn bewegt und die Erde die Gestalt einer Kugel besitzt. Dies führt zu:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{v^2}{2c^2} + \frac{GM_E}{c^2} \left( \frac{1}{r_S} - \frac{1}{r_E} \right) \quad (4.7)$$

- mit:  $GM_E$  .... geozentrische Gravitationskonstante der Erde  
 $c$  ..... Lichtgeschwindigkeit  
 $r_S$  ..... mittlerer Radius der Satellitenbahn  
 $r_E$  ..... Erdradius (große Halbachse des WGS-84)

Durch das Einsetzen der bekannten numerischen Werte von  $v \approx 3870$  m/s,  $c = 299.792.458$  m/s<sup>1</sup>,  $GM_E = 3.986.005 \cdot 10^{14}$  m<sup>3</sup>/s<sup>2</sup>,  $r_S \approx 26.578.000$  m und  $r_E \approx 6.378.000$  m erhält man in der Folge:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -4,464 \cdot 10^{-10} \quad (4.8)$$

Ein GPS-Empfänger auf der Erdoberfläche soll aber die nominale Frequenz von 10,23 MHz empfangen. Um dies zu erreichen, wurde die Nominalfrequenz der GPS-Satelliten um  $\Delta f = -4,464 \cdot 10^{-10} \cdot f_0 = -4,57 \cdot 10^{-3}$  Hz auf 10,22999999543 MHz korrigiert.

Aufgrund der Annahme einer kreisförmigen Satellitenbahn wird so ein konstanter Uhrengang erreicht. In der Praxis kommt es allerdings wegen der Abweichung von einer exakten Kreisbahn zu weiteren periodischen Schwankungen in den Satellitenuhrlesungen. Da die Uhrenbeobachtung in direktem Zusammenhang mit der Distanz zwischen Satellit und Empfänger steht, lassen sich die Uhrschränkungen mittels einer Distanzkorrektur von

$$\delta\rho_{\text{rel},1} = \frac{2}{c} \sqrt{GM_E} a \cdot e \sin(E) \quad (4.9)$$

mit: a ..... große Halbachse der ellipsenförmigen Satellitenbahn  
 e ..... numerische Exzentrizität  
 E ..... exzentrische Anomalie der Satellitenbahn

beheben. Die Differenz zwischen der unkorrigierten und der tatsächlichen Strecke zwischen Satellit und GPS-Antenne kann trotz der geringen Bahnexzentrizität der GPS-Satellitenbahnen über 10 m ausmachen. Dies entspricht einer Uhrkorrektur von  $\approx 35$  ns. Eine graphische Darstellung ist in Kapitel 8.4 zu sehen.

Durch den Einfluss des Potentialfeldes der Erde auf das Satellitensignal erhält man einen zweiten Korrekturterm:

$$\delta\rho_{\text{rel},2} = \frac{2GM_E}{c^2} \ln\left(\frac{r_S + r_E + \delta_E^S}{r_S + r_E - \delta_E^S}\right) \quad (4.10)$$

mit:  $\delta_E^S$  .... Distanz zwischen Empfänger und Satellit

Für die dadurch eintretende Streckenänderung gibt es eine obere Grenze mit 18,7 mm. In der Beobachtungsgleichung muss nun die Summe

$$\delta\rho_{\text{rel}} = \delta\rho_{\text{rel},1} + \delta\rho_{\text{rel},2} \quad (4.11)$$

der beiden Ausdrücke zur Berücksichtigung des relativistischen Effekts angebracht werden.

Schlussendlich sei noch der Uhreneffekt durch den  $J_2$ -Potentialkoeffizienten (Abplattung der Erde) erwähnt. Dieser bewirkt einen Korrekturterm mit einer 6-stündigen Periode und einer Amplitude im Bereich von etwa 50 ps (siehe Abb.8.4).

## 4.2 GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema / Global Navigation Satellite System)

Wie im Kapitel 4.1 für GPS sollen für das russische Satellitennavigationssystem GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema / Global Navigation Satellite System) ebenso kurz dessen wesentliche Eigenschaften angeführt werden. Für detailliertere Informationen wird auch hier auf die zahlreich vorhandene Literatur verwiesen, z. B. [Kaplan, Hegarty, 2006], [Seeber, 2003].

### Entstehung

Das Satellitennavigationssystem GLONASS ist das russische Gegenstück zum amerikanischen GPS. Von der prinzipiellen Funktionsweise her gesehen sind sich die beiden Systeme sehr ähnlich. Der Wunsch nach dem neuen SRNS (Satellite Radio Navigation System) Positionierungssystem entstand in den späten 60er-Jahren. Das damals verwendete „Tsilkon satellite navigation system“ benötigte mehrere Minuten an Beobachtungszeit, um die Position eines Empfängers berechnen zu können. Für Navigationsaufgaben war dies nicht brauchbar. In den Jahren 1968-1969 schlossen sich das Forschungsinstitut des Ministeriums für Verteidigung, die Akademie der Wissenschaften und die sowjetische Marine zusammen, um eine gemeinsame Lösung des Problems zu erarbeiten. Das neue System sollte sowohl an Land, als auch auf der See, sowie im Luftraum verwendet werden können. Das Ergebnis war ein 1970 verfasstes Dokument, das die Forderung nach einem diesen Ansprüchen genügenden System beinhaltete. 1976 wurde von der sowjetischen Regierung per Verordnung die Entwicklung des globalen Satellitensystems GLONASS festgelegt. Nach seiner Entstehung wurde GLONASS für die Regierung der früheren Sowjetunion von den russischen Weltraumstreitkräften geleitet. Heute wird das System von der russischen Föderation unterhalten und verwaltet. Betrieben wird GLONASS vom KNITs („Defense of the Russian Federation Coordination Scientific Information Center“) des Ministeriums für Verteidigung der russischen Föderation [GLONASS-1, 30.07.2009], [Russian Space Agency, 28.06.2007], [Space and Tech, 27.9.2004].

### Systemaufbau

#### • Raumsegment

Das Konzept des Raumsegments von GLONASS sieht 24 Satelliten vor. Diese befinden sich in drei Bahnebenen, welche jeweils um  $120^\circ$  gegeneinander versetzt sind. Die Inklination ihrer Bahnen beträgt  $64,8^\circ$ . Die einzelnen Satelliten fliegen mit einem Winkelabstand von ca.  $45^\circ$  in der Bahnebene auf nahezu kreisförmigen Bahnen in einer Höhe von ca. 19.000 km. Ein Umlauf dauert in etwa 11 h 15 min. Vom Standpunkt des Nutzers sind bei Vollausbau des Systems weltweit immer mindestens fünf Satelliten in einer für eine Messung geeigneten Geometrie zu sehen, freie Sicht zu den Satelliten vorausgesetzt. Die gleiche Konstellation der Satelliten wiederholt sich alle acht Sterntage [GLONASS-2, 13.06.2007].

Der Start der ersten GLONASS-Satelliten erfolgte am 12. Oktober 1982. Laut Plan sollte das System 1991 in Betrieb gehen, der tatsächliche offizielle Start verschob sich aber auf den 24. September 1993. Die vollständige Satellitenkonstellation (FOC, Full Operational Capability) wurde Anfang 1996 erreicht. Nachdem 1999 allerdings aufgrund des kurzen Lebenszyklus der Satelliten (nominell 3,5 Jahre) nur mehr sechs Satelliten aktiv waren, wurde im Jahr 2001 ein Programm zur Vervollständigung der Konstellation gestartet. Derzeit befinden sich 18 aktiv geschaltete Satelliten in ihren Bahnebenen (Stand 09.2009). Dabei soll das System gleichzeitig modernisiert werden. Abb.4.5 zeigt GLONASS-Satelliten aus verschiedenen Generationen.

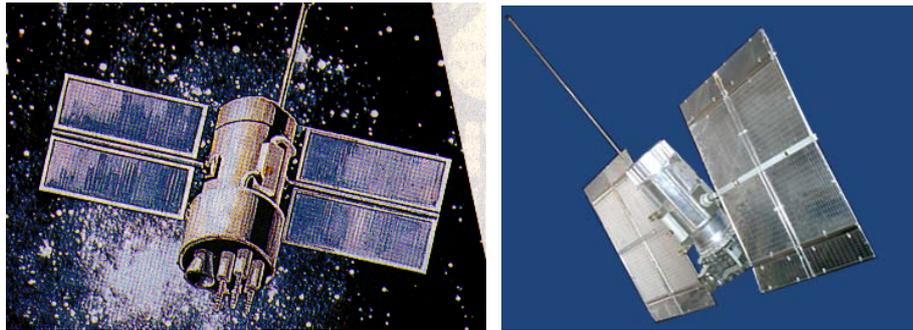


Abb.4.5: GLONASS-Satelliten der ersten Generation und der Generation M

Die neuen GLONASS-M-Satelliten weisen bessere Signaleigenschaften auf. Der Öffnungswinkel der Sendeantenne wurde erweitert, sodass das Signal nicht nur von Stationen auf der Erde, sondern auch im Weltraum von anderen Satelliten gut empfangen werden kann [Wasle, 2007]. Zusätzlich nimmt die Stärke des ausgesandten Signals mit größer werdendem Nadirwinkel zu, um die Verluste entlang der unterschiedlich langen Übertragungswege zu kompensieren. Die Signalstärke bei der Empfangsantenne soll so für alle Satelliten nahezu konstant gehalten werden. Ebenso wird ihre geplante Lebensdauer mit 7-8 Jahren deutlich höher sein als die der Satelliten der ersten Generation mit ca. drei Jahren. Die sich schon in Planung befindliche dritte Generation, die GLONASS-K- (ab 2010) und GLONASS-KM-Satelliten, sollen eine geringere Masse besitzen und sogar für ca. 10-12 Jahre im Einsatz sein. Sie werden ebenso wie die neuen GPS Block III-Satelliten eine zusätzliche dritte Trägerfrequenz aussenden. Tab.4.2 gibt einen Überblick über den Systemstatus im Frühjahr des Jahres 2008 von GLONASS [Russian Space Agency, 29.05.2008].

Bahn-ebene	Slot	Frequenz-Kanal	GLONASS-Nummer	Betriebs-start
I	1	07	796	06-02-05
	4	06	795	29-01-04
	6	01	701	08-12-04
	7	05	712	07-10-05
	8	06	797	06-02-05
II	9	-2	722	25-01-08
	10	04	717	03-04-07
	11	00	723	22-01-08
	13	-2	721	08-02-08
	14	04	715	03-04-07
	15	00	716	12-10-07
III	17	-1	718	04-12-07
	19	03	720	25-11-07
	20	02	719	27-11-07
	23	03	714	31-08-06
	24	02	713	31-08-06

Tab.4.2: Systemstatus GLONASS (Stand Frühjahr 2008)

[Anmerkung: GLONASS-Satelliten könnten die gleiche Frequenz abstrahlen, wenn sie sich an gegenüberliegenden Positionen derselben Bahnebene befinden (siehe Abschnitt „Signalstruktur“).]

#### • Kontrollsegment

Das Kontrollsegment von GLONASS befindet sich zur Gänze innerhalb des Staatsgebietes der früheren UdSSR. Hier soll kurz angemerkt werden, dass aufgrund der nicht global verteilten Bodenstationen die Qualität der Broadcast-Satellitenbahnberechnung eingeschränkt wird. GLONASS wird von einem GCS (Ground-based Control Complex) betrieben. Dieser

setzt sich aus mehreren Teilen zusammen: einem Systemkontrollzentrum, welches in Krasnoznamensk in der Nähe von Moskau angesiedelt ist, mehreren CTS (Command Tracking Stations), die über das gesamte russische Staatsgebiet verstreut liegen (St. Petersburg, Ternopol, Eniseisk und Komsomolsk-na-Amure), Lasermessstationen und dem GLONASS CSIC (Coordinating Scientific Information Center). Die CTS beobachten kontinuierlich alle für sie sichtbaren GLONASS-Satelliten. Aus den gesammelten Daten werden die aktuellen Satellitenuhrkorrekturparameter und Bahnkoordinaten berechnet, die in der Folge im Rahmen der Navigationsnachricht wieder zu den Satelliten übertragen wird. Mit Hilfe der Lasermessungen wird das System in regelmäßigen Abständen kalibriert.

- **Nutzersegment**

GLONASS steht auf der einen Seite den russischen Weltraumstreitkräften, welche das System betreiben, und auf der anderen Seite zivilen Nutzern zur Verfügung. Das System dient im Wesentlichen den gleichen Zwecken wie das amerikanische GPS, unter anderem der Navigation von Fahrzeugen, der Geodäsie und Kartographie und Zeitsynchronisationsaufgaben. Für zivile Anwender gibt es Dienste für eine Positions- und Zeitbestimmung, die rund um die Uhr und weltweit zugänglich sind. Sie nutzen ein Navigationssignal mit Standardgenauigkeit (siehe Abschnitt "Signalstruktur"). Mit ihnen kann eine Positionierung mit einer Genauigkeit von besser als  $\pm 100$  m in der Lage mit einer Wahrscheinlichkeit von 98,2 % ( $2\sigma$ ) und von besser als  $\pm 150$  m in der Höhe mit einer Wahrscheinlichkeit von 95,4 % ( $2\sigma$ ) erreicht werden. Die Komponenten des Geschwindigkeitsvektors sind auf  $\pm 15$  cm/s bestimmbar, die Zeitbestimmung (GLONASS-TIME = UTC (SU) (= UTC in Moskau)) (GLONASS time) beträgt  $\pm 1$   $\mu$ s (garantierte Genauigkeiten des Systembetreibers). Analog zu GPS ist zur Berechnung von 3D-Koordinaten, Geschwindigkeit und präzisen Zeitangaben der gleichzeitige Empfang des Signals von mindestens vier Satelliten notwendig. Wird bei der Auswertung der Messungen ein Differenzverfahren angewandt oder mit der Trägerphase selbst gearbeitet, können diese Genauigkeiten noch deutlich verbessert werden.

## Referenzsysteme und Bezugsrahmen

- **ECEF (Earth-centered Earth-fixed) Koordinatensystem**

Die Koordinaten der Satellitenbahnen sind auf das PZ-90 (PZ = Parameter der Erde) bezogen. Dieses ist im Schwerpunkt der Erde gelagert und rotiert mit der Erde mit, ist also ein ECEF-Koordinatensystem (siehe Kapitel 4.1, Abschnitt "Koordinatensysteme"). Die Parameter des verwendeten Ellipsoids sind:  $a = 6\,378\,136$  m,  $f = 1:298,257839303$  m. Das PZ-90 wird ebenso wie das WGS dem ITRF angeglichen [Russian Space Agency, 29.05.2008]. Seit dem 20.09.2007 wird eine verbesserte Version, das PZ-90.02, verwendet. Sie ist mit dem ITRF2000 gekoppelt und weist zu diesem lediglich Verschiebungen in der Größenordnung von wenigen Dezimetern auf.

- **GLONASS Systemzeit**

Wie GPS hat auch GLONASS seine eigene Systemzeit, GLONASS-TIME. Diese wird auf Basis der Zeit eines zentralen Frequenzsynchronisators errechnet [Synchronizer, 14.06.2005]. Seine Frequenzgeneratoren sind hochgenaue Wasserstoff-Maser mit einer Stabilität von  $\approx 1 \cdot 10^{-14}$ . Die Satelliten führen Cäsiumuhren mit an Bord, deren Stabilität im Bereich von maximal  $5 \cdot 10^{-13}$  pro Tag generell und unter  $1 \cdot 10^{-13}$  für die GLONASS-M-Satelliten liegt. Ihre Abweichungen zu GLONASS-TIME betragen maximal 15 ns. Zweimal täglich werden Uhrkorrekturdaten zu den Satelliten gesendet. Die Differenz zwischen GLONASS-TIME und UTC (SU) sollte höchstens 1 ms erreichen, die Genauigkeit der Abweichung maximal  $\pm 1$   $\mu$ s. UTC (SU) wird vom VNIIFTRI (Main Metrological Center of Russian Time and Frequency Service) in Mendeleevo in der Nähe von Moskau erzeugt. Im Gegensatz zu GPST wird

GLONASST so wie UTC der TAI mittels Schaltsekunden nachgeführt. Die Differenz zwischen GLONASST und UTC (SU / CIS) ist also konstant:

$$\text{GLONASST} = \text{UTC} + 3\text{h} - \tau_c \quad (4.12)$$

[Anmerkung: Die Differenz von 3 h zwischen GLONASST und UTC (SU / CIS) entspricht dem Zeitunterschied zwischen Moskau und Greenwich [GLONASS-2, 14.06.2005]. Eine aufgrund von unterschiedlichen Uhrenensembles basierende Abweichung  $\tau_c$  kann mehrere  $\mu\text{s}$  erreichen und wird dem Nutzer mit der Navigationsnachricht mitgeteilt [Seeber, 2003].]

### Signalstruktur

Die GLONASS Satelliten senden auf zwei Frequenzen im L-Band:

$$\begin{aligned} L_1 &= 1602 \text{ MHz} + k \cdot 0,5625 \text{ MHz} \\ L_2 &= 1246 \text{ MHz} + k \cdot 0,4375 \text{ MHz} \end{aligned}$$

mit:  $k = -7, \dots, +6 \dots$  Nummer des Frequenzkanals des Satelliten (ab 2005)

Die beiden Frequenzen  $L_1$  und  $L_2$  sind über einen Proportionalitätsfaktor miteinander verbunden:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{9}{7} \quad (4.13)$$

Bei GLONASS senden jeweils zwei Satelliten auf derselben Frequenz. Diese sind dann in den Bahnebenen antipodisch angeordnet. Somit ist garantiert, dass sie sich nicht gleichzeitig im Sichtbereich des Nutzers befinden können. Der Trägerwelle  $L_1$  sind zwei codierte Signaltypen aufgeprägt: das SP (Standard Precision) Codesignal (der C/A-Code mit einer Wellenlänge von  $\approx 600$  m) und das HP (High Precision) Codesignal (der P-Code mit einer Wellenlänge von  $\approx 60$  m). Über die Frequenz  $L_2$  kann nur der HP-Code empfangen werden. Weiters sendet jeder Satellit eine Navigationsnachricht. Diese besteht aus den Broadcastephemeriden, der Zeitverschiebung gegenüber GLONASST und UTC (SU / CIS), Zeitmarken und dem GLONASS-Almanach. Alle Signale können, ebenso wie bei GPS, an jedem Ort der Erde empfangen werden. Die Identifizierung der einzelnen Satelliten geschieht über ihre Frequenzen (FDMA, Frequency Division Multiple Access). Zusätzlich können die Nummer der Bahnebene sowie der „Standort“ des Satelliten innerhalb der Bahn zu seiner Identifikation herangezogen werden. So besitzen die Satelliten der ersten Bahnebene die Nummern 1-8, die der zweiten die Nummern 9-16 und die der dritten die Nummern 17-24. Für die Zukunft ist aber aus Gründen der Kompatibilität mit GPS auch ein Übergang auf das CDMA-Verfahren (Code Division Multiple Access) angedacht.

Im Gegensatz zu GPS verfügt GLONASS über zwei Navigationsnachrichten, jeweils eine für den C/A- und eine für den P-Code. Der wichtigste Inhalt dieser Mitteilungen besteht in den Satellitenephemeriden und der Frequenzzuordnung. Weiters enthalten sind Informationen über den Zustand der Satelliten, das Alter der Daten und anderes mehr.

In Kapitel 9 wird speziell auf den Stand der GLONASS-Uhrenprädiktion eingegangen.

### 4.3 Galileo - Das Europäische Satellitennavigationssystem

Die Entwicklung von Galileo resultiert aus dem Wunsch, für Europa ein eigenes, globales und ziviles Satellitennavigationssystem aufzubauen. Der für den Nutzer wesentliche Unterschied zu GPS oder GLONASS besteht darin, dass Galileo nicht der Kontrolle des Militärs unterliegt, sondern von einer „zivilen“, von der EC (European Commission) eingesetzten Behörde und der Kommission selbst geleitet wird. Zudem soll Galileo dem Nutzer durch das Aussenden einer Integritätsmeldung die Zuverlässigkeit des Systems garantieren.

Ein weiterer Vorteil von Galileo liegt in der Förderung der europäischen Wirtschaft. Diese kann durch das europäische Satellitennavigationssystem auf eine große Steigerung an technischem Fachkenntnis und damit auch auf die Erschließung zusätzlicher Märkte hoffen.

Detailliertere Informationen finden sich auf den Webseiten des „Galileo Contact Point Austria“ [Galileo Contact Point Austria, 13.06.2007], der ESA [Galileo (ESA), 13.06.2007] und anderen mehr.

#### Systemaufbau

##### • Raumsegment

Das Raumsegment von Galileo wird aus 30 Satelliten (27 + 3 Ersatzsatelliten) bestehen, die sich in drei Bahnebenen mit einer Inklination von  $56^\circ$  befinden. Die mittlere Höhe der Umlaufbahnen beträgt ca. 23.222 km, die Umlaufzeit demnach ca. 14 h 04 min. Daraus ergibt sich aus der Sicht eines Beobachters eine Wiederholung der Satellitengeometrie nach jeweils 17 Umläufen (in zehn Sterntagen). Es sind während der geplanten Funktionsdauer der Galileo Satelliten von rund 15 Jahren keine zusätzlichen Bahnmanöver für die Beibehaltung der Position der Satelliten in ihrer Bahn notwendig. Wie bei GPS und GLONASS werden sich auch bei Galileo bei freier Sichtverbindung jeweils mindestens vier Satelliten im Beobachtungsbereich des Nutzers befinden, wobei die Anforderungen an das System in zwei Gruppen wie folgt (Tab.4.3) eingeteilt werden:

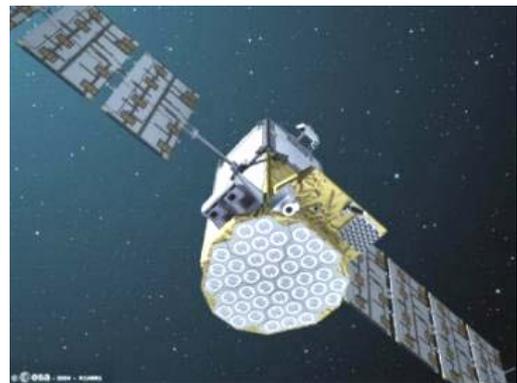


Abb.4.6: Galileo Test-Satellit (GIOVE-B)

Parameter	Massenmarkt	Sicherheitskritisch
Maskenwinkel	$25^\circ$	$5^\circ$
Genauigkeit (95 %)	10 m horizontal	4 m vertikal
Überdeckung	weltweit	weltweit
Verfügbarkeit	> 70 %	> 99 %
Integrität	nicht gefordert	zwingend (6 s, $10^{-7}$ )

Tab.4.3: Anforderungen an das Satellitennavigationssystem Galileo

##### • Kontrollsegment

Das Kontrollsegment wird durch zwei sich in Europa befindliche Kontrollstationen (Oberpfaffenhofen, Deutschland; Fucino, Italien) und durch ca. 30 global verteilte Bodenstationen realisiert. Der Datentransfer (Bahn- und Uhrinformationen, etc.) von der Erde zu den Satelliten erfolgt über mehrere Uplinkstationen. Für den gesamten Datenaustausch wird ein Galileo Kommunikationsnetzwerk eingerichtet.

## • Leistungen des Systems / Nutzersegment

Generell basieren die Galileo-Empfänger auf dem gleichen Prinzip wie jene für GPS (siehe Kapitel 4.1). Um allerdings der Vielfalt an Diensten gerecht zu werden, ist eine Erweiterung des Signal- und Frequenzangebots notwendig (siehe Abschnitt „Signalstruktur“).

Der Systembetreiber garantiert dem Nutzer eine Genauigkeit von 15 m in der Lage und 35 m in der Höhe (mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 %) für einen Einfrequenzempfänger. Bei Empfang von zwei Frequenzen (E5a, L1) erhöht sich die Genauigkeit auf 4 m in der Lage und 8 m in der Höhe (ebenfalls mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 %) [Dinwiddy, 2003].

## Koordinaten- und Zeitsystem

Das Galileo-TRF wird durch ca. 30 eigene Referenzstationen realisiert, die so genannten GSS (Galileo Sensor Stations). Der Koordinatenrahmen von Galileo wird GTRF (Galileo Terrestrial Reference Frame) genannt. Dieses ist das Gegenstück zum WGS-84 von GPS. Das GTRF wird dem ITRF (International Terrestrial Reference Frame) mit einer Genauigkeit von  $\pm 3$  cm ( $2\sigma$ ) angeglichen. Hierfür wird ein gut-definierter geodätischer Algorithmus mit einem Minimum an Zwangsbedingungen verwendet, um die innere Konsistenz des GTRF zu gewährleisten [GTRF, 01.02.2007]. Zu diesem Zweck werden für die Berechnung des GTRF auch Daten von ITRF-Stationen herangezogen. Um eine höchstmögliche Genauigkeit zu erreichen wird das Stationsnetz immer weiter verdichtet. Das GTRF ist somit auch eine sehr präzise Realisierung des ITRS.

Galileo wird auch über ein eigenes Zeitsystem verfügen: GST (Galileo System Time). Sowohl die Differenz von GST zu TAI als auch jene zu UTC (siehe Kapitel 2.3) wird den Nutzern aller Galileo-Dienste (siehe Abschnitt "Galileo-Dienste") zur Verfügung stehen. Die Abweichung von GST zu TAI soll über den Zeitraum eines Jahres mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % 50 ns nicht überschreiten. Die Synchronisation der Atomuhren der Satelliten erfolgt in den beiden Kontrollstationen.

Für die Generierung der Grundfrequenzen im L-Band werden die Galileo Satelliten jeweils zwei Rubidiumuhren sowie zwei Wasserstoff-Maser (siehe Abb.4.7) an Bord haben. Zweitere zeichnen sich durch eine besonders hohe Frequenzstabilität aus (siehe Kapitel 3.2.4).

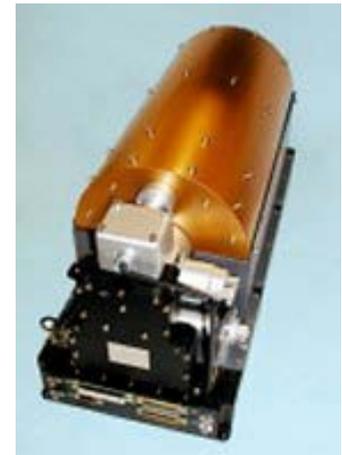


Abb.4.7: Wasserstoff Maser eines Galileo Satelliten

## Signalstruktur

Mit diesen Oszillatoren werden die Galileo-Frequenzen

$$E_1 / L_1 / E_2 = 1575,42 \text{ MHz}$$

$$E_{5A} = 1176,45 \text{ MHz}$$

$$E_{5B} = 1207,14 \text{ MHz} \quad (E_{5A}/E_{5B} \text{ symmetrisch zu } 1191,80 \text{ MHz})$$

$$E_6 = 1278,75 \text{ MHz}$$

erzeugt. Im Unterschied zu einem System mit nur zwei Trägerfrequenzen ermöglicht die Verfügbarkeit von drei Trägerfrequenzen das Bilden einer größeren Anzahl an Signallinearkombinationen. Mit diesen können diverse Fehlerquellen, wie z. B. der ionosphärische Einfluss auf das Satellitensignal, reduziert bzw. vollständig eliminiert, bzw. die Mehrdeutigkeitslösung über lange Basislinien beschleunigt werden. Die Berechnung von

zuverlässigen Standpunktskoordinaten wird somit beschleunigt. Den Trägerwellen werden Codes aufmoduliert, die für jeden Satelliten eine andere Struktur aufweisen. Damit kann der Empfänger die einzelnen Satelliten eindeutig identifizieren. Jeder Galileo-Satellit wird zehn verschiedene Navigationssignale aussenden. Die Trägerfrequenzen und deren aufmodulierte Zusatzdaten ermöglicht das Angebot der unterschiedlichen Galileo-Dienste (siehe unten). Abb.4.8 zeigt eine Darstellung der Signalstruktur von Galileo (in Kombination mit den Galileo-Diensten).

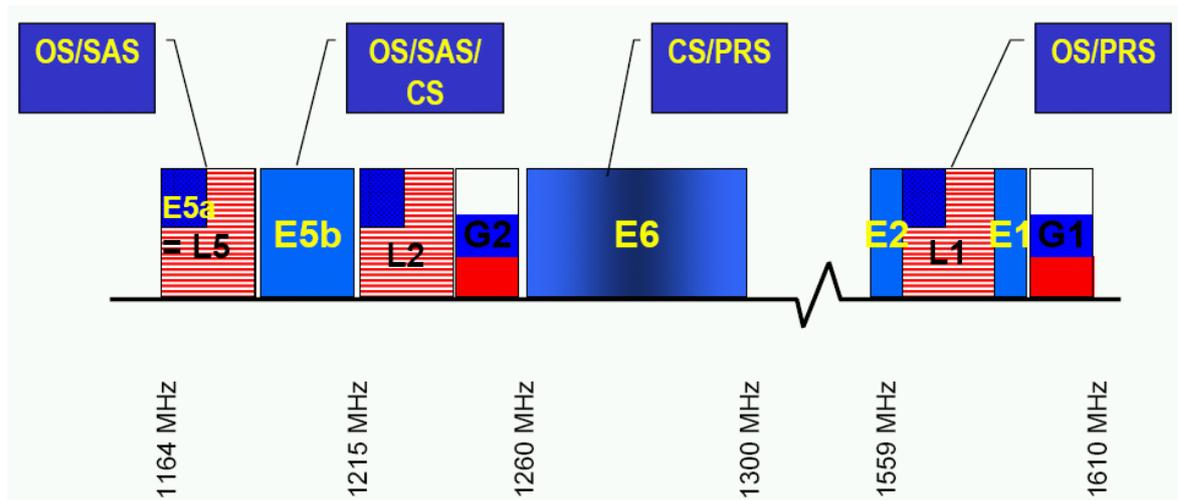


Abb.4.8: Übersicht über die Signalstruktur von Galileo

(in Kombination mit den Galileo-Diensten), GPS und GLONASS

### Galileo-Dienste

Da die Dienste von Galileo für diese Arbeit nicht relevant sind, sollen sie nur der Vollständigkeit halber aufgelistet werden:

- OS - Open Service
- SoL - Safety-of-Life Service
- CS - Commercial Service
- PRS - Public Regulated Service
- SAR - Search and Rescue Service

### Zeitplan / Ausbaustufen

Der Zeitplan zum Aufbau von Galileo ist in drei Phasen unterteilt:

- **Entwicklung und Validierung**

Die erste Aufbauphase (2002-2008) gliederte sich in das GSTB-V1 (Galileo System Testbed - Version 1) und das GSTB-V2.

GSTB-V1 diente zur Entwicklung von Algorithmen zur Satellitenbahn- und Zeitberechnung aufgrund von Simulationsdaten in Anlehnung an GPS. Ebenso erfolgte eine Planung für die Datenverwaltung. Am 22.12.2004 wurde das GSTB-V1 planmäßig beendet. Es wurde sichergestellt, Satellitenbahnberechnungen und die Zeitsynchronisation mit einer Genauigkeit von < 60 cm sowie mit einer dafür erforderlichen Uplink-Rate (zwei Stunden) durchzuführen.

GSTB-V2 dient in erster Linie der Entwicklung von Testsatelliten, von denen einer, GIOVE-A (Galileo In-Orbital Validation Element-A), am 28.12.2005 in seine Umlaufbahn gebracht wurde, um dem System seine Frequenz zu sichern. Am 26.04.2008 erfolgte der Start des

zweiten Testsatelliten, GIOVE-B. Dieser hat einen hochgenauen passiven Wasserstoff-Maser an Bord. Ebenfalls verfügt er über Retroreflektoren für Laserdistanzmessungen, mit Hilfe derer eine exakte Bahnberechnung erfolgen soll.

Während des gesamten Zeitraumes wird die Bodeninfrastruktur für Galileo aufgebaut.

- **Errichtung**

Die zweite Phase (2009-2012) beinhaltet die IOV (In-Orbit Validation) des Systems, also den Transport der Satelliten in ihre Umlaufbahnen, sowie die Entwicklung und das Testen von verschiedenen Empfängern. Die Bodeninfrastruktur wird fertiggestellt.

- **Betrieb und Wartung**

Die Inbetriebnahme von ca. 16 Galileo-Satelliten ist ab dem Jahr 2014 geplant, der Vollausbau in den Folgejahren. Dem Nutzer soll ab diesem Zeitpunkt das gesamte System mit all seinen Services zur Verfügung stehen. Für das Raumsegment sind ab diesem Zeitpunkt nur noch Routineoperationen vorgesehen, z. B. die rasche Wiederherstellung der Konstellation nach einem eventuellen Ausfall eines Satelliten.

Die Finanzierung des Aufbaus von Galileo erfolgt aus öffentlichen Geldern (EU). In der Folge soll das europäische Satellitennavigationssystem im Rahmen einer PPP (Public Private Partnership) an einen privaten Betreiber übergeben werden.

## Zeitübertragung

(Kapitel 5)

Der Vergleich präziser Frequenznormale über große Distanzen ist von höchster Wichtigkeit für die Bereitstellung und Kontrolle der Stabilität von Zeitskalen. Wurden vor Jahren noch Atomuhren mit dem Flugzeug von Kontinent zu Kontinent geflogen, bedient man sich heute der Satelliten zum Austausch von Zeitsignalen.

Für die Übertragung von Zeitsignalen gibt es mehrere Methoden. Die wichtigsten davon werden in diesem Kapitel beschrieben.

Die primäre Methode für die Zeitübertragung sowie für die Generierung von UTC/TAI ist die CV-Technik (Common View, siehe Kapitel 5.3) [Petit, Jiang, 2008]. Sie wird seit 1980 verwendet. Als gemeinsamer Satellit kann hier natürlich auch ein GPS-Satellit eingesetzt werden.

Eine weitere Methode, die für Zeitübertragungsaufgaben und die Generierung von UTC/TAI eingesetzt wird ist der TWSTFT (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer, siehe Kapitel 5.2) [Jiang, Petit, 2009], [Defraigne, 2008].

In den vergangenen Jahren wurde damit begonnen, die beiden "Standardverfahren" (CV und TW) mit GPS-Signalen zu kombinieren. Möglich ist dies aufgrund der mittlerweile hohen Qualität der IGS-Final-Produkte (International GNSS Service, siehe Kapitel 6.2). Für die Zusammenführung der Techniken gibt es unterschiedliche Ansätze: So können z. B. die TW-Daten im postprocessing in einen PPP-Algorithmus einfließen [Defraigne, 2008]. Dadurch können die Vorteile beider Methoden genutzt werden. Im genannten Fall profitiert die Kombination beispielsweise unter anderem an der guten Kurzzeitstabilität von GPS und der besseren Langzeitstabilität der TW-Technik.

Generell ist hier anzumerken, dass die Genauigkeit der GPS-Satellitenuhren bei Zeitübertragungsaufgaben eine bedeutende Rolle spielt. In Hinblick auf mögliche Echtzeitalgorithmen in der Zukunft ist somit auch die Qualität bei der Prädiktion von Satellitenuhren von Interesse.

### 5.1 Ein-Weg-Zeitübertragung (One-Way-Time-Transfer)

Die Ein-Weg-Zeitübertragung ist die am meisten benutzte Methode, um Zeitsignale zu übertragen. Sie ist methodisch einfach, vom Genauigkeitspotenzial aber begrenzt. Im Normalfall wird eine elektromagnetische (Radio-) Welle verwendet, um von einem Sender A ein Zeitsignal zu einem Nutzer B zu schicken (Abb.5.1). Um eine Genauigkeit von wenigen Nanosekunden oder besser zu erreichen, müssen die Stationskoordinaten der beiden Uhren bekannt sein. Bei der Ausbreitung des Signals durch das Medium (Atmosphäre) erfährt es im Allgemeinen eine Verzögerung, die bei der Auswertung der Messungen berücksichtigt werden muss.

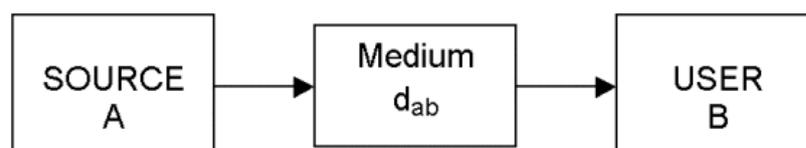


Abb.5.1: Prinzip Ein-Weg-Zeitübertragung

Am häufigsten wird das Ein-Weg-Zeitübertragungsverfahren derzeit mittels GPS durchgeführt. In diesem Fall sind die Hauptfehlerquellen die Einflüsse von Troposphäre und Ionosphäre, Mehrwegeeffekte und durch die Hardware bedingte Fehler. Die Satelliten senden ein codiertes Zeitsignal aus, das der Trägerwelle aufmoduliert ist. Der Aussendezeitpunkt der Zeitmarke kann von der Empfängersoftware rekonstruiert werden. Mittels eines Zeitintervallzählers (TIC (Time Interval Counter)) und unter Berücksichtigung der Signallaufzeit wird die Beobachtung danach mit der lokalen Uhr verglichen. Das Verfahren kann entweder mit Bezug auf GPST oder auf UTC(USNO) durchgeführt werden. Mit einem qualitativ guten Empfänger kann damit die Zeitdifferenz innerhalb weniger Minuten auf  $< 50$  ns erhalten werden. Bei langen Beobachtungszeiten liegt die Genauigkeit bei  $\pm 10$  ns, sofern eine gute lokale Uhr zur Verfügung steht. Die Voraussetzung für Beobachtungen im ns-Bereich ist, dass die Position des Empfängers auf wenige cm genau bekannt ist und die Mehrdeutigkeiten der Phasemessungen der Trägerwelle gelöst werden. In Echtzeit kann diese Genauigkeit allerdings nicht erreicht werden.

Erfolgt der Uhrenvergleich im erdfesten System, muss zusätzlich zu den schon in Kapitel 4.1 beschriebenen relativistischen Korrekturen noch der Sagnac-Effekt [Sagnac-Effekt, 10.10.2005] berücksichtigt werden. Dieser kann bis zu 200 ns betragen. Er rührt daher, dass sich ein im erdfesten System statischer Empfänger während der Übertragung des Signals in Abhängigkeit der geographischen Breite mit einer bestimmten Geschwindigkeit im inertialen System bewegt. Am Äquator erreicht diese ihr Maximum von ca. 500 m/s. Mit wachsender Breite beiderseits des Äquators nimmt die Geschwindigkeit der Bewegung der Erdoberfläche stetig ab, bis sie an den Polen zu Null schrumpft. Die Folge ist eine Änderung der Weglänge des Signals im Vergleich zu einer nicht rotierenden Erde. Diese kann durch den Term  $2\omega A/c^2$  ausgedrückt werden [Hanson, 1989]. Hierin ist  $\omega$  die Winkelgeschwindigkeit der Erde,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit.  $A$  beschreibt jene zur Äquatorebene parallele Fläche, welche der Empfänger aufgrund seines Normalabstandes zur Rotationsachse der Erde innerhalb einer vollen Umdrehung umschreibt.

## 5.2 Zwei-Weg-Zeitübertragung (Two-Way-Time-Transfer)

Bei der Zwei-Weg-Zeitübertragung wird der Weg zwischen den beiden an der Messung beteiligten Oszillatoren in beide Richtungen durchlaufen (siehe Abb.5.2).

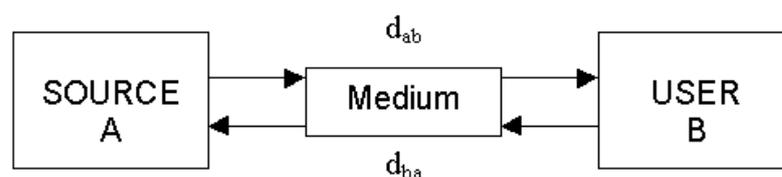


Abb.5.2: Prinzip der Zwei-Weg-Zeitübertragung

Grundsätzlich gibt es für diese Art der Zeitübertragung zwei Verfahren.

Die halbduplex-Methode ist eine Ein-Weg-Zeitübertragung, die nach der Ankunft des Signals ein zweites Mal in umgekehrter Richtung wiederholt wird. Die Laufzeitverzögerung zwischen Sender und Empfänger kann als die Hälfte der gesamten Verzögerung geschätzt werden. Die berechnete Korrektur kann entweder dem Nutzer zugesendet oder so an das Signal angebracht werden, dass dieses scheinbar ohne Verzögerung an der Nutzerseite ankommt. Beide Stationen müssen bei der halbduplex-Methode jeweils über eine Sende- und Empfangseinrichtung verfügen. An einer Station muss das Signal allerdings „nur“ reflektiert

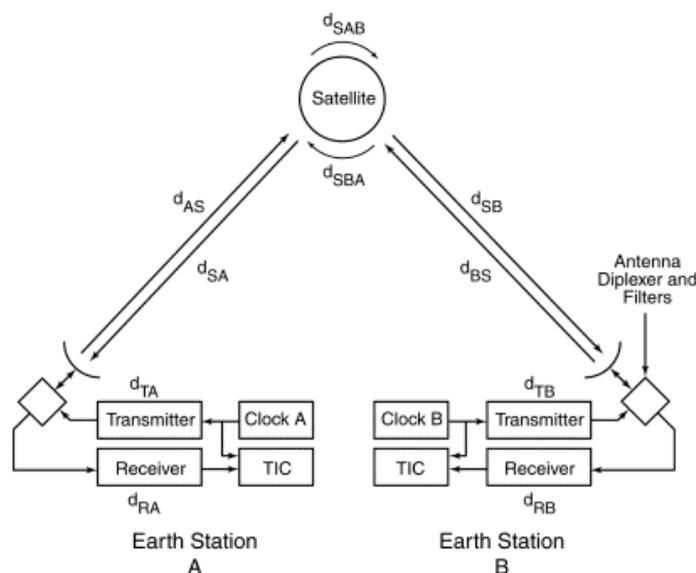
werden. Nachteilig ist, dass die Laufzeitverzögerung Schwankungen unterliegt, vor allem, wenn deren Perioden vergleichbar mit der gesamten Verzögerung des Signals sind.

Das zweite Verfahren ist das voll duplex-System. Hierbei werden Ein-Weg-Zeitsignale in beide Richtungen gleichzeitig übertragen. Im einfachsten Fall sind die beiden Sende- und Empfangsinstrumente durch ein Übertragungskabel verbunden. Für den Zeitvergleich müssen die Beobachtungen danach zur jeweils anderen Station zurückgesendet werden. Die Subtraktion der beiden Messwerte ergibt den Zeitunterschied der beiden Uhren. Der zweite Term der Gleichung (5.1) entfällt, wenn die durch das Kabel verursachte Verzögerung bei der Übertragung in beide Richtungen gleich groß ist.

$$A - B = \frac{1}{2} [R(A) - R(B)] + \frac{1}{2} (d_{AB} - d_{BA}) \quad (5.1)$$

mit:  $A - B$  ..... Zeitunterschied  
 $R(A), R(B)$  .... gemessener Uhrenstand  
 $d_{AB}, d_{BA}$  ..... Verzögerung im Kabel

Dieses System ist nicht anfällig für Fluktuationen, dafür ist an jeder Station sowohl eine Sende- als auch eine Empfangsanlage notwendig. Setzt man gleiche Eingangs- und Ausgangsverzögerungen voraus, ist diese Methode unabhängig von der Weglänge. In der Praxis ist dies allerdings nicht immer möglich, da die beteiligten Stationen nicht zwangsweise die gleiche Hardware verwenden. Ist das Übertragungsmedium dispersiv und die zwei Stationen senden auf unterschiedlichen Frequenzen, so kann es zu weiteren Asymmetrien kommen. Bei größeren Entfernungen zwischen den Uhren kann die Übermittlung des Signals auch via Satellit erfolgen. Ein voll duplex-System, welches mit geostationären Satelliten arbeitet, wird TWSTFT (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer) genannt (siehe Abb.5.3).



Two-way time and frequency transfer using a geostationary communications satellite

Abb.5.3: Prinzip des TWSTFT

Da die Geometrie bei dieser Methode symmetrisch ist, entfällt bei einer Differenzierung der Beobachtungen der Großteil der Fehlereinflüsse. Deshalb ist die Zeitübertragung bei dieser Technik sehr stabil und genau. Sie wird auch vom BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) angewendet.

Beim TWSTFT wird die Messung in der Station A durch einen Impuls der lokalen Uhr gestartet, und dieser wird an die Station B gesendet. Auch an dieser beginnt die Beobachtung durch ein Zeitsignal der lokalen Uhr, und dieses wird an die Station A geschickt. Die beiden Messvorgänge werden jeweils durch das eintreffende Signal der anderen Station gestoppt. Die dazwischen liegenden Zeitintervalle werden wiederum von einem Zeitintervallzähler gezählt. Im Normalfall wird ein Zeitsignal mit 1 Pulse/s verwendet. Nach Beendigung der Messung werden die Daten der beiden Stationen ausgetauscht und voneinander subtrahiert. Das Ergebnis sind die folgenden beiden Gleichungen:

$$\text{TIC}(A) = A - B + d_{\text{TB}} + d_{\text{BS}} + d_{\text{SBA}} + d_{\text{SA}} + d_{\text{RA}} + S_{\text{B}} \quad (5.2)$$

$$\text{TIC}(B) = B - A + d_{\text{TA}} + d_{\text{AS}} + d_{\text{SAB}} + d_{\text{SB}} + d_{\text{RB}} + S_{\text{A}} \quad (5.3)$$

mit: TIC(A), TIC(B) ..... Messwerte des Zeitintervallzählers  
 A, B ..... jeweiliger Uhrenstand  
 $d_{\text{TA}}, d_{\text{AS}}, d_{\text{SAB}}, d_{\text{SB}}, d_{\text{RB}}$  ..... einzelne Wegzeiten von A nach B  
 $d_{\text{TB}}, d_{\text{BS}}, d_{\text{SBA}}, d_{\text{SA}}, d_{\text{RA}}$  ..... einzelne Wegzeiten von B nach A  
 $S_{\text{A}}, S_{\text{B}}$  ..... Korrekturterme wegen des Sagnac-Effekts

Die Zeitdifferenz der beiden Uhren A und B kann nun durch eine einfache Subtraktion der beiden Gleichungen (5.2) und (5.3) berechnet werden. Es verbleiben im Normalfall Abweichungen aufgrund von unterschiedlicher Hardware an den beiden Stationen und verschiedene Laufzeitverzögerungen, wenn nicht in beide Richtungen auf der gleichen Frequenz gesendet wird.

Der Nachteil des TWSTFT ist, dass an beiden Stationen sowohl Sende- als auch Empfangshardware vorhanden sein müssen. Außerdem muss bei der Verwendung eines kommerziellen geostationären Satelliten eine Gebühr bezahlt werden, was zusätzliche Kosten verursacht. Abb.5.4 zeigt ein Bild einer Antenne, die für Zwei-Weg-Zeitübertragungsaufgaben im Einsatz ist.



Abb.5.4: Zwei-Weg-Antenne

### 5.3 Zeitübertragung bei gleichzeitiger Beobachtung eines Satelliten von zwei Bodenstationen (Common View GPS Time Transfer)

Beim diesem Zeitübertragungssystem, das auf der Methode der Ein-Weg-Zeitübertragung basiert, wird ein vom Satelliten ausgesandtes Zeitsignal von zwei Empfängern beobachtet (Abb.5.5). Die aufgezeichneten Beobachtungen werden nach der Messung zwischen den Stationen ausgetauscht und können so direkt verglichen werden (siehe Abb.5.6). Die beiden Uhren können aufgrund der erhaltenen Differenz synchronisiert werden. Befinden sich die beiden Uhren an unterschiedlichen Orten, bleiben fehlerhafte Anteile infolge unterschiedlicher Laufzeitverzögerungen durch die Atmosphäre im Ergebnis enthalten. Deshalb liefert diese Methode der Zeitübertragung umso genauere Zeitdifferenzen, je kürzer die Basislinie ist.

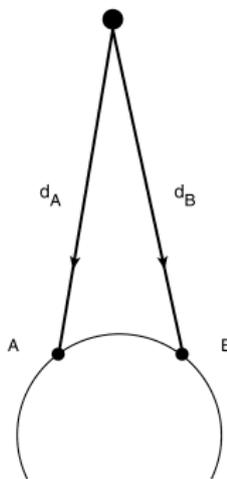


Abb.5.5: Common View mit GPS

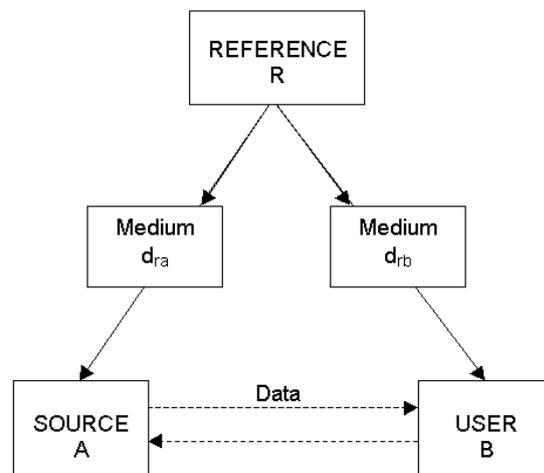


Abb.5.6: Methode der Common View-Zeitübertragung

Am NIST (National Institute of Standard and Technology) wurde das Common View Verfahren mit GPS entwickelt [NIST, 04.03.2010]. Hierbei ist der Sender der Oszillator eines GPS-Satelliten. Die von den beiden GPS-Empfängern beobachteten Signale (vom selben Satelliten) werden an die jeweiligen Partnerstationen geschickt. Nach Subtraktion der Messungen entfällt der Term der Satellitenuhrkorrektur, es verbleibt die reine Zeitdifferenz zwischen den beteiligten Empfängern als:

$$A - B - (d_A - d_B) = (A - t_{\text{GPS}} - d_A) - (B - t_{\text{GPS}} - d_B) \quad (5.4)$$

mit: A, B ..... Messwerte des Zeitintervallzählers  
 $d_A, d_B$  ..... Signallaufzeit vom Satellit zum jeweiligen Empfänger  
 $t_{\text{GPS}}$  ..... Zeitpunkt der Aussendung des Signals im Satelliten

Die Genauigkeit des hier beschriebenen Systems liegt im Bereich von  $\pm 1$  ns bis  $\pm 10$  ns und ist damit besser als die normale Ein-Weg-Zeitübertragung. Eine relative Kalibrierung der beiden beteiligten Stationen kann mit Hilfe eines dritten transportablen Empfängers erfolgen. Eine absolute Abstimmung der beiden GPS-Empfänger ist nicht erforderlich.

Die Common View Methode mit GPS wurde über viele Jahre auch vom BIPM für internationale Zeitübertragungen verwendet. Da TWSTFT allerdings bessere Ergebnisse

liefert, wird sie für einige europäische sowie transatlantische Basislinien heute nicht mehr verwendet.

#### **5.4 Zeit- und Frequenzübertragung mittels GPS-Trägerwellen**

Für die Positions- und Zeitbestimmung mit GPS werden Code- und Phasenmessungen herangezogen. Von den Phasenbeobachtungen können nur die Änderungen der Uhrparameter abgeleitet werden, diese dafür aber mit einer sehr hoher Genauigkeit, die beispielsweise für eine interkontinentale Test-Basislinie (USNB-PTBA) mit 6274,7 km Länge bis zu einer Größenordnung von  $\approx 0,1$  ns erreichen kann [Dach et al., 2003]. Um den "absoluten" Uhrstand zu erhalten, müssen auch die Codebeobachtungen zur Berechnung herangezogen werden, die allerdings ein höheres Signalrauschen aufweisen. Eine Änderung des täglichen Rauschens führt zu Sprüngen im Bereich von  $\approx 1$  ns an den Tagesgrenzen, wenn die Beobachtungen tageweise ausgewertet werden. Derartige Sprünge müssen bei einer Verwendung der Daten entsprechend berücksichtigt werden (siehe z. B. Kapitel 8.3.1). Je nachdem, ob die Auswertungen auf den IGS Finals oder den IGS Rapid Produkten basieren (siehe Kapitel 6.2), erscheinen sie mit der entsprechenden Verzögerung. Bei der Methode mit GPS muss beachtet werden, dass die Zeitkomponente sowohl mit der Stationshöhe als auch mit den troposphärischen Parametern hoch korreliert ist. Auch Ungenauigkeiten der Satellitenbahn beeinflussen das Ergebnis der Zeitübertragung. Werden alle auf die Zeitkomponente Einfluss nehmenden Größen korrekt modelliert, erreichen die Ergebnisse vergleichbare Genauigkeiten zur anderen Zeitübertragungsverfahren. So weisen z. B. die Differenzen der Ergebnisse mit jenen des TWSTFT eine Standardabweichung von  $\approx \pm 0,2$  ns auf.

## IGS - International GNSS Service

(Kapitel 6)

### 6.1 Informationen über das IGS

Der IGS (International GNSS Service) lieferte erstmals im Rahmen eines Testbetriebs im Juni 1992 präzise Bahndaten und ERPs (Earth Rotation Parameters). Offiziell startete der Dienst am 01.01.1994 [Zumberge, Liu, Neilan, 1995]. Das vorrangige Ziel des IGS ist die Bereitstellung von qualitativ hochwertigen Daten und Produkten für die Unterstützung von geowissenschaftlichen Forschungsarbeiten, disziplinübergreifende Anwendungen und Bildungsarbeit. Das IGS ist ein Dienst der IAG (International Association of Geodesy) und steht somit auch in enger Verbindung mit dem IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service). Die Dienste und Produkte des IGS stehen allen GPS-Nutzern kostenlos zur Verfügung. Es können folgende Daten aus dem Internet bezogen werden:

- Bahndaten der GPS-Satelliten
- Bahndaten der GLONASS-Satelliten
- Satelliten- und Empfängeruhrkorrekturen
- Erdrotationsparameter (Polkoordinaten, LOD)
- Koordinaten und Geschwindigkeiten der IGS Beobachtungsstationen
- troposphärische und ionosphärische Laufzeitverzögerungen
- Phasen- und Pseudostreckenbeobachtungen im RINEX Format
- DCB-Tabellen

Durch die Berechnung von Stationskoordinaten mit mm-Genauigkeit wird vom IGS ein bedeutender Beitrag zum ITRF (International Terrestrial Reference Frame) geleistet. Derzeit besteht das globale Beobachtungsnetz des IGS aus ca. 350 aktiven Stationen (siehe Abb.6.1). Eine Stationsliste und die unten gezeigte Weltkarte (sowie detaillierte Kartenausschnitte für das dichter mit Stationen besetzte Nordamerika, Europa und Japan) sind auf der Homepage des IGS zu finden [IGS, 28.04.2008].

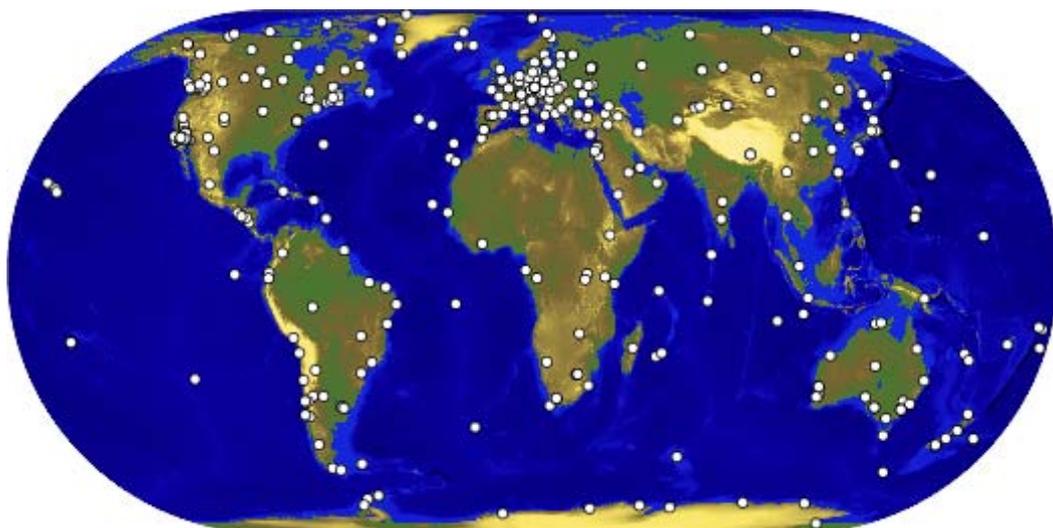


Abb.6.1: permanente Beobachtungsstationen des IGS

Die Bearbeitung und Archivierung der Daten und Produkte des IGS erfolgt in fünf globalen und drei regionalen Datenzentren (z. B. dem CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System) [CDDIS, 13.06.2007]), sowie weiteren sieben Berechnungszentren. Diese Zentren stellen ihre Produkte und Aufnahmedaten den Nutzern via Internet zur Verfügung.

Die für die vorliegende Arbeit wichtigsten Daten sind die Uhrprodukte des IGS. Zur Auswahl stehen hierfür die IGS-Final-, die IGS-Rapid- und, seit November 2000, die IGS-Ultra-Rapid-Produkte. Diese beinhalten die Bahn- und Uhrdaten der Satelliten für jeweils den Zeitraum eines Tages (Final- und Rapid-Daten) oder für 24 Stunden (Ultra-Rapid-Daten). Für die Verwendung der Final- bzw. Rapid-Lösungen muss der Nutzer eine Verzögerung von ca. 13 Tagen bzw. 17 Stunden in Kauf nehmen. Die Ultra-Rapid-Produkte können hingegen auch für Echtzeitanwendungen herangezogen werden, da sie präzidierte Bahn- und Uhrdaten für den jeweiligen Tag enthalten. Eine genaue Beschreibung dieser Daten erfolgt im Kapitel 6.2.

Da die Daten des IGS verlässlich, stabil und von hoher Genauigkeit sind, sind sie dazu geeignet, wichtige wissenschaftliche Aktivitäten zu unterstützen. Einige sollen in der Folge genannt werden:

- Verbesserung und Verdichtung des ITRF
- Ableitung von Bewegungsfeldern (Plattentektonik)
- Beobachtung der Deformationen der festen Erde
- Beobachtung der Erdrotation
- Beobachtung der Veränderungen der Hydrosphäre (z. B. Meeresoberfläche)
- Berechnungen der Bahnen von LEO-Satelliten (Low Earth Orbit)
- Beobachtung der Atmosphäre
- Klimauntersuchungen (mit eventueller Wettervorhersage)

Zwei weitere in der Gegenwart sehr große Nutzergruppen sollen hier erwähnt werden:

- Zum Einen wurde in den letzten Jahren vom IGS die IGS RT WG (IGS Real Time Working Group) eingerichtet, um den wachsenden Nachfragen nach Echtzeitprodukten gerecht werden zu können. Das globale RT-Stationsnetz umfasst zurzeit ca. 70 Stationen. Detailliertere Informationen können auf der Homepage des IGS RT WG nachgelesen werden [IGS RT WG, 04.03.2010].
- Zum Anderen sind die Raumfahrtsbehörden intensive Nutzer der Produkte des IGS. Diese sind somit auch ein wichtiger Beitrag für die Entwicklung und den Auf- und Ausbau neuer bzw. bestehender Satellitennavigationssysteme wie z. B. Galileo, GLONASS, SBAS (Satellite Based Augmentation System), etc.

## 6.2 Die Produkte des IGS

Bevor in den anschließenden Kapiteln der praktische Teil dieser Arbeit behandelt wird, sollen hier die dafür verwendeten Daten beschrieben werden.

Sämtliche der unten beschriebenen Standardformate setzen sich aus einem „Header“ und dem eigentlichen Datenteil zusammen. Der Dateikopf enthält allgemeine Informationen, wie z. B. das Datum, den Koordinatenrahmen, das verantwortliche Rechenzentrum, die Liste der im Datenteil enthaltenen Satelliten, usw. Dem Kopfteil folgen die Bahn- bzw. Stationskoordinaten (in einem erdfesten geozentrischen Koordinatensystem) sowie die zugehörigen Uhrkorrekturen (als Differenzen in Bezug auf GPST) in den im Header angegebenen Intervallen.

### Vom IGS beziehbare Uhrkorrekturdaten:

Der IGS veröffentlicht die Kombination aus Satellitenbahnkoordinaten und -uhrkorrekturen im sp3-Format (Standard Product). Die Uhrkorrekturen (in Bezug auf GPST, Differenz in  $\mu\text{s}$ ) werden darin in Intervallen von je 15 Minuten tabuliert. Für die im Header angeführten Satelliten werden in jeder Epoche die entsprechenden Werte angegeben. Das neueste sp3-Format (\*.sp3c, seit Februar 2007) beinhaltet optional auch die Genauigkeit dieser Werte, ferner die Geschwindigkeit der Satelliten in Richtung der Koordinatenachsen sowie die Uhrdrift. Die Grundlage für die Berechnung der IGS-Produkte bilden die Bahn- und Uhrkorrekturberechnungen der dafür zuständigen IGS-ACs (Analysis Centers). Diese fließen in ein gemeinsames gewichtetes Mittel ein. Weiters veröffentlicht der IGS Uhrkorrekturen von Satelliten und Stationen sowie deren Genauigkeit im clockRINEX-Format (Receiver Independent Exchange) in 5-Minuten- sowie 30-Sekunden-Intervallen. Die genauen Definitionen der Datenformate können auf der Webpage [IGS Formate, 10.03.2008; IGS Produkte, 11.02.2010] eingesehen werden.

- **IGS-Final-Produkte (IGS-Lösung, sp3-Format)**

Die IGS-Final-Produkte weisen die höchste Konsistenz mit dem zugrunde liegenden ITRF-Koordinatenrahmen auf. Für die Berechnung AC-spezifischer Transformationsparameter (vom Koordinatenrahmen der einzelnen ACs zum ITRF) werden alle Daten der gesamten betreffenden GPS-Woche herangezogen. Aus diesem Grund erscheinen die IGS-Final-Produkte mit einer Verzögerung von 13 Tagen (ab dem letzten Tag der GPS-Woche). Sie bilden die Basis des IGS-Bezugsrahmens. Die Genauigkeit der IGS-Final-Bahnen liegt bei  $\pm 2,5$  cm, die der Satellitenuhrkorrekturen bei  $\pm 75$  ps [IGS, 23.09.2009].

- **IGS-Rapid-Produkte, (IGR-Lösung, sp3-Format)**

Die IGS-Rapid-Produkte werden auf einer täglichen Basis berechnet und stehen den Nutzern jeweils ab ca. 17:00 UTC des Folgetages zur Verfügung. Ihre Genauigkeit liegt ebenso wie jene der IGS-Final-Produkte bei  $\pm 2,5$  cm für die Satellitenpositionen und bei  $\pm 75$  ps für die Uhrkorrekturen. Aufgrund dieser hohen Qualität können sie für die meisten praktischen Anwendungen verwendet werden.

- **IGS-Ultra-Rapid-Produkte, (IGU-Lösung, sp3-Format)**

Die IGS-Ultra-Rapid-Produkte wurden aufgrund der Notwendigkeit von Bahn- und Uhrvorhersagen für Echtzeitanwendungen eingeführt. Jeder Datensatz hat eine Länge von 48 Stunden und setzt sich aus zwei Teilen zusammen: Die ersten 24 Stunden bestehen aus sogenannten „beobachteten“ (aus Beobachtungen berechneten) Bahn- und Uhrdaten (mit einer Genauigkeit von  $\pm 3$  cm bzw.  $\pm 150$  ps), die zweiten 24 Stunden aus den für das betreffende Datum prädierten Werten (mit einer Genauigkeit von  $\pm 5$  cm bzw.  $\pm 3$  ns). [Anmerkung: Von manchen ACs werden für den Vorhersageteil die Uhrkorrekturen nicht mit Hilfe eines

eigenen Modells prädiziert, sondern die Broadcast-Uhrwerte ausgegeben (z. B. von CODE).] Die IGS-Ultra-Rapid-Produkte werden vier Mal täglich im Abstand von jeweils sechs Stunden zur Verfügung gestellt, nämlich um 03:00, 09:00, 15:00 und 21:00 UTC.

In der folgenden Tabelle ist die Genauigkeit der GPS-Satellitenuhrkorrekturdaten in Abhängigkeit der verwendeten Produktlinie (IGS, IGR, IGU) zusammengefasst (Stand 23.09.2009):

Produkt		Verzögerung	Genauigkeit [ns]
IGU (Ultra-Rapids)	beobachtet	3 h	≈ 0,15
	prädiziert	Echtzeit	≈ 3
IGR (Rapids)		17 h	≈ 0,075
IGS (Finals)		13 d	≈ 0,075

Tab.6.1: Publikation und Genauigkeit der IGS-Uhrprodukte

- **sp3-Uhrkorrekturen, GLONASS**

GLONASS-Bahnen und -Uhrkorrekturen im sp3-Format wurden erstmals im Rahmen des IGLOS-Projekts (International GLONASS Service Pilot Project) den Nutzern unter der Bezeichnung „IGL“ ab der GPS-Woche 1278 zur Verfügung gestellt. Zuvor (ab GPS-Woche 980) waren bereits GLONASS-Bahnkoordinaten und -satellitenuhren unter der Benennung "IGX" erhältlich. Für die Uhrkorrekturen wurden dabei bis zur Woche 1299 die Broadcast-Uhren aus der BKG-Lösung (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) übernommen. Im Anschluss wurde für einige wenige Wochen (GPS-Wochen 1300-1308) versucht, die Lösungen des BKG und der ESA zu kombinieren. Danach wurde wieder auf die Broadcast-Lösung des BKG zurückgegangen. Eine genauere Beschreibung dieser Daten kann in Kapitel 9.1 nachgelesen werden. GLONASS-Bahnen und -Uhrkorrekturen können außerdem ebenfalls von einzelnen ACs des IGS bezogen werden.

- **clock RINEX Daten, GPS**

Clock RINEX-Files werden üblicherweise im clk-Format gespeichert. Dieses enthält, nach einem Header mit der Datenbeschreibung, die Uhrkorrekturdaten von GPS-Satelliten und IGS-Bodenstationen in 5-Minuten-Intervallen bezogen auf GPST in Sekunden. Im Gegensatz zum sp3-Format müssen dabei sowohl die Satelliten als auch die Stationen nicht zu jedem Zeitpunkt aufscheinen.

### Zusätzlich genutzte Uhrkorrekturdaten:

- **sp3-Uhrkorrekturen, GPS / ACs des IGS**

Für statistische Untersuchungen (siehe Kapitel 7) standen speziell für diese Arbeit die ansonsten nicht öffentlich zugänglichen Ultra-Rapid-Produkte der einzelnen ACs des IGS zur Verfügung. Konkret waren dies CODE, ESA, GFZ, JPL, NRCan und USNO.

- **clock RINEX Daten, GPS / ACs**

Verschiedene ACs (z. B. CODE oder JPL) veröffentlichen Uhrkorrekturdaten von Satelliten und Empfängern im clk-Format mit einer größeren Datendichte als der clock RINEX-Daten des IGS. In diesen Dateien werden die Stationsuhren im 5-Minuten-Takt ausgewiesen, die Satellitenuhren sogar in Intervallen von 30 Sekunden.

[Anmerkung: Sämtliche hier angeführten Daten (mit Ausnahme der Ultra-Rapid-Files der ACs des IGS), inklusive detaillierte Formatbeschreibungen, stehen jedermann unentgeltlich via Internet auf den Servern der entsprechenden Institutionen zur Verfügung.]

- **SCCm.txt - minütliche Uhrkorrekturdaten aus RTR-Control**

Für die auf einem Kalman-Filter basierende Echtzeitvorhersage (siehe Kapitel 10) wurden die Daten des Programms RTR-Control verwendet. Das Programm RTR-Control wurde im Rahmen der Dissertation [Opitz, 2010] an der TU Wien entwickelt. RTR-Control nutzt als Eingangsdaten Beobachtungen aus dem globalen RT-IGS Stationsnetz (Real Time-IGS) (siehe Abb.6.2). Dieses umfasst zurzeit ca. 70 Stationen. Im 15-Sekunden-Takt werden für jeden einzelnen Satelliten und für die beteiligten Stationen aktuelle Uhrkorrekturen berechnet. Die resultierenden vier Werte einer Minute werden danach jeweils zu einer geglätteten Lösung kombiniert. Diese wird auf der RT-IGS-Homepage [RT-HG, 26.02.2008] den Nutzern zur Verfügung gestellt. Ebenso dienen sie als Eingangswerte für GNSS-VC/kalman. Da das RT-IGS-Stationsnetz mit ca. 70 Stationen noch eher spärlich besetzt ist, kommt es derzeit immer wieder zu Lücken in den Ausgangsdaten. Für eine detailliertere Beschreibung von RTR-Control wird auf [Opitz, 2008] verwiesen.

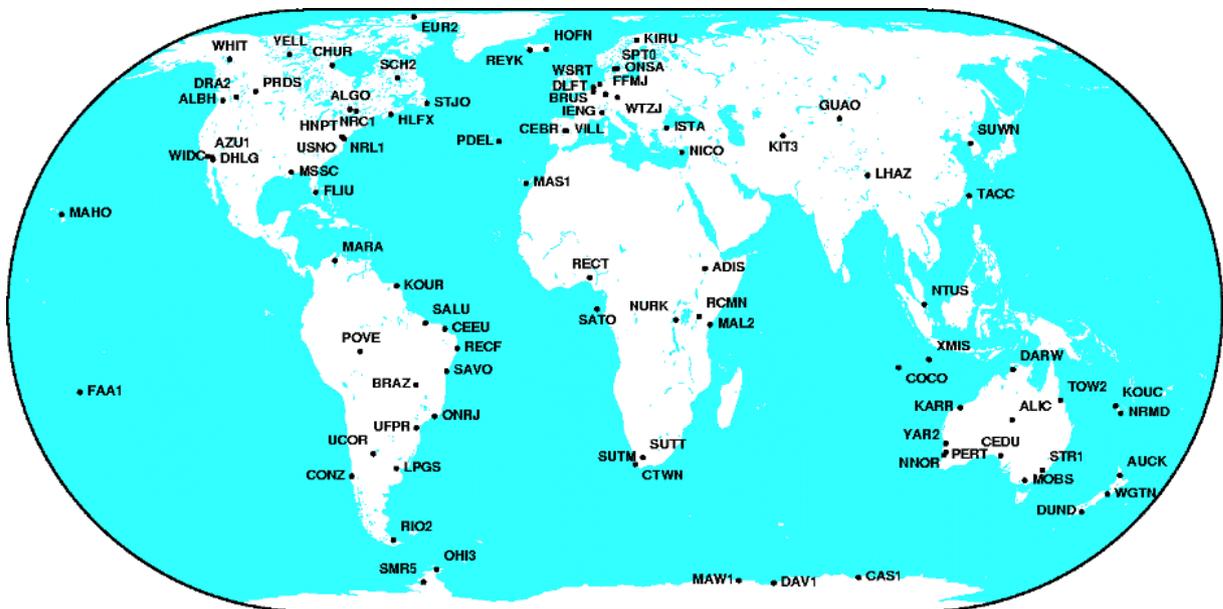


Abb.6.2: IGS-RT Beobachtungsnetz, Oktober 2009

## Untersuchung der Ultra-Rapid-Satellitenuhrkorrekturdaten

(Kapitel 7)

### 7.1 Ausgangsdaten

Als Grundlage für die Entwicklung eines eigenen Prädiktionsmodells für GPS-Satellitenuhren wurden die Ultra-Rapid-Uhrkorrekturlösungen (im sp3-Format) der einzelnen ACs des IGS untersucht. Dazu wurden die Differenzen zu einer Referenzlösung (die IGS-Rapid-Uhrkorrekturen) und deren mittlere Fehler berechnet. Seit Februar 2002 (GPS-Woche 1152) werden auf der Homepage der Abteilung Höhere Geodäsie (HG) der TU Wien [HG, 26.02.2008] diese statistischen Abweichungen der Ultra-Rapid-Satellitenuhrkorrekturdaten der einzelnen ACs (Analysis Centers) veröffentlicht. Die betreffenden ACs sind:

- CODE (Center for Orbit Determination in Europe, Bern)
- ESOC (European Space Operations Center der ESA (European Space Agency), Darmstadt)
- GFZ (GeoForschungsZentrum, Potsdam)
- NRCan (Natural Resources Canada, Ottawa), ehemals EMR (Energy, Mines and Resources)
- USNO (U. S. Naval Observatory, Washington)

sowie bis Jänner 2003:

- JPL (Jet Propulsion Laboratory, Pasadena)

[Anmerkung: Unter "Uhr" bzw. "Uhrdaten" wird in der Folge jeweils jener Wert verstanden, der aus der Kombination der tatsächlichen Uhrlesung mit dem Messsystem und dem Auswertalgorithmus resultiert.]

### 7.2 Abweichungen der Uhrkorrekturen von der Referenz

In diesem Arbeitsschritt wurden sowohl die im post-processing berechneten ersten 24 Stunden (die "beobachteten" Uhrkorrekturen) als auch die prädizierten zweiten 24 Stunden der Ultra-Rapid-Uhrkorrekturen der einzelnen ACs mit der IGR-Lösung (siehe Kapitel 6.2) verglichen. Ohne vorab-Korrektur der Werte bezüglich eines gemeinsamen Offsets und einer Drift zwischen den ACs und der IGR-Lösung wurden die Abweichungen zwischen den beiden Zeitserien, separat für jeden Satelliten, berechnet:

$$\Delta IGR_i = IGR_i - AC_i \quad (7.1)$$

mit:  $AC_i$  ..... Ultra-Rapid-Uhrkorrekturdaten der einzelnen ACs  
 $IGR_i$  ..... IGS-Rapid-Uhrkorrekturdaten  
 $i$  ..... Satellit

Es wird also auf die Charakteristik der einzelnen Uhren selbst eingegangen. Typische Resultate sind in den Abb.7.1 dargestellt, wobei sich der mittlere Offset und Drift auf die IGR-Lösung bezieht, die ihrerseits wieder auf GPST abgestimmt ist. Aufgrund der Tabulierung der Uhrwerte in den sp3-Dateien in 15-Minuten-Intervallen beträgt die Zeiteinheit der Abszisse 15 min (E1-E96 = 96 Epochen pro Tag). Überlagert wird dieser

Trend durch die individuelle Herangehensweise der ACs bei der Berechnung der Satellitenuhrwerte (die in der Folge auch immer wieder als "Uhrverhalten" bezeichnet wird) und nicht zuletzt auch durch radiale Bahnfehler der zum jeweiligen Satelliten gehörenden Ephemeriden. Die von den ACs gewählten Referenzuhren sind im Allgemeinen sehr genaue H-Maser spezieller Bodenstationen oder auch das gewichteten Mittel einer Gruppe von H-Masern.

Für die ersten 24 Stunden der Ultra-Rapid-Lösungen der ACs (also die beobachteten Uhrkorrekturen) variieren die satellitenspezifischen Differenzen bis auf vereinzelte Ausreißer im Bereich von bis zu maximal 10 ns, was in Abb.7.1b gut zu erkennen ist. Die Unterschiede der Uhrkorrekturen zwischen EMR und IGR in Abb.7.1a zeigen eine starke gemeinsame Drift gegen die IGR-Lösung, die individuellen Differenzen im Nanosekundenbereich sind deshalb in diesem Diagramm nicht so deutlich erkennbar.

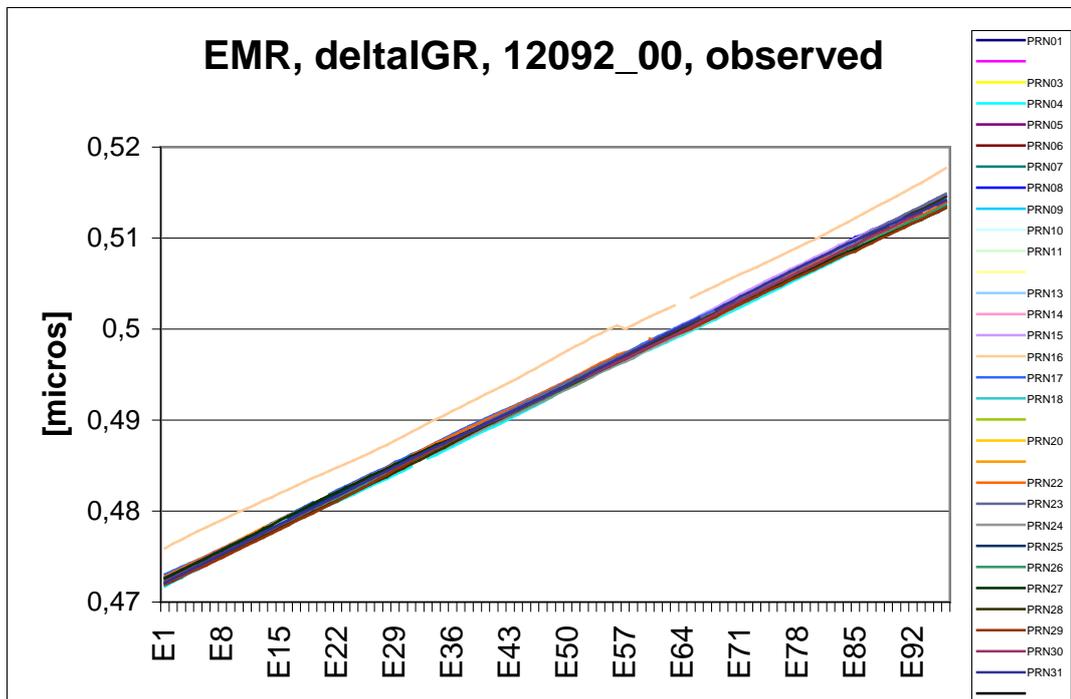


Abb.7.1a: Differenzen IGR-EMR beobachtet, GPS-Woche 1209, Tag 2

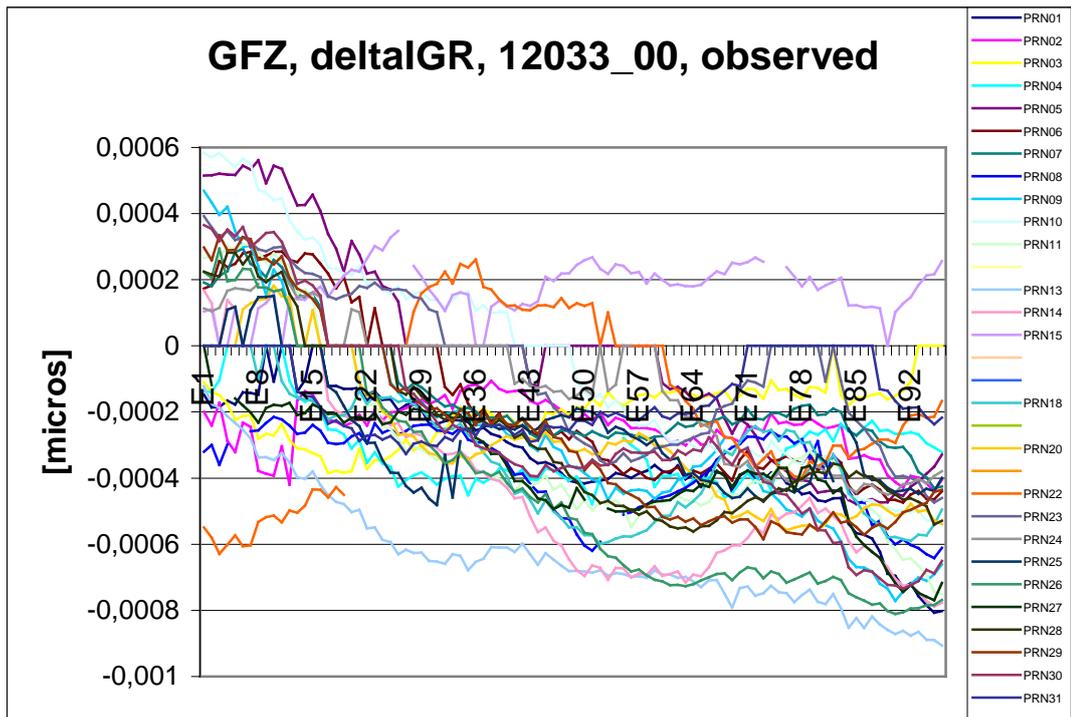


Abb.7.1b: Differenzen IGR-GFZ beobachtet, GPS-Woche 1203, Tag 3

In Abb.7.1c ist bei Epoche 30 ein gemeinsamer Sprung aller Satellitenuhren von ca. 1 ns zu sehen. Dies weist auf einen Phasensprung der verwendeten Referenzuhr hin. Die Größenordnung solcher Sprünge kann bis zu einigen  $\mu\text{s}$  betragen. Im Gegensatz dazu kann auch eine einzelne Satellitenuhr einen Phasensprung aufweisen, der sich für eben diese eine Uhr auf die gleiche Weise abbildet (siehe Abb.9.5).

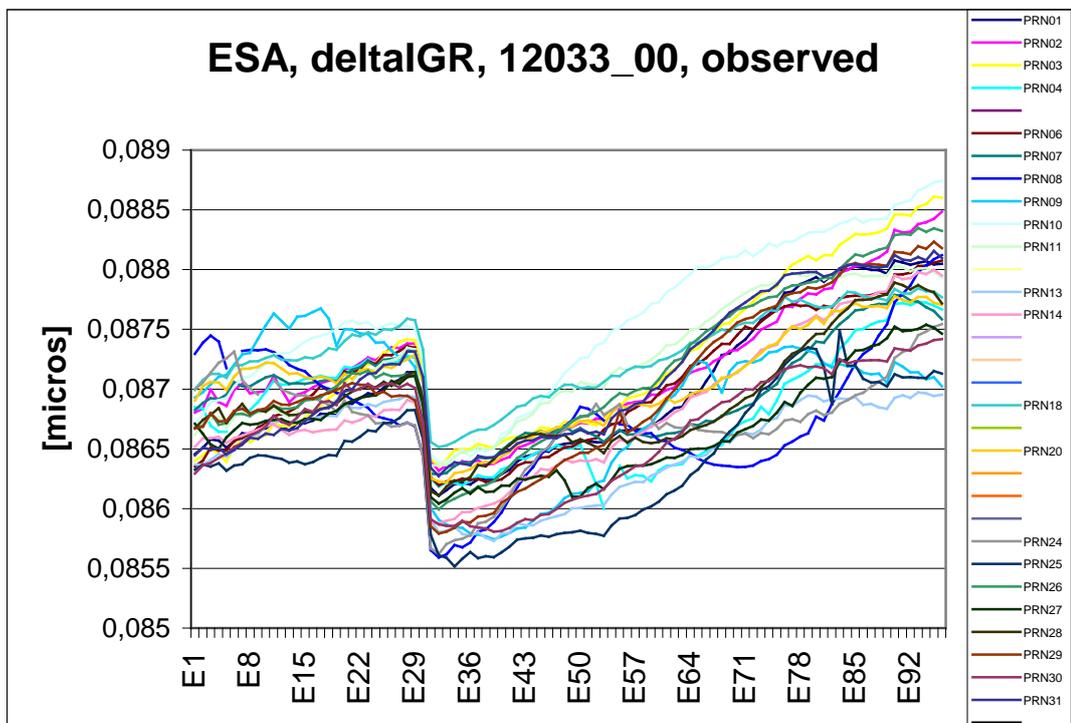


Abb.7.1c: Differenzen IGR-ESA beobachtet, GPS-Woche 1203, Tag 3

Beim Ausfall der Referenzuhr kann ein AC auf jede verfügbare andere Uhr mit vergleichbarer Genauigkeit umschalten. Mit Stand Juni 2005 waren ungefähr 55 Bodenstationen des IGS Netzwerkes mit Wasserstoff-Masern ausgestattet [IGS Mail, 28.04.2008]. Einige dieser Uhren weisen eine Frequenzstabilität von besser als  $2 \cdot 10^{-15}$  über einen Tag auf. Ein interessantes Faktum ist, dass ein gemeinsamer Zeitsprung aller Satellitenuhrkorrekturen auf Positionierungsaufgaben keinen Einfluss hat. Allerdings müssen jeweils für jede einzelne Epoche alle Satellitenuhrkorrekturen derselben Referenzuhr zugehörig sein.

Für die 24 Stunden der prädizierten Ultra-Rapid-Uhrkorrekturwerte zeigt sich ein etwas anderes Bild. Auch diese werden mit den IGS-Rapid-Uhrkorrekturdaten des entsprechenden Zeitraumes verglichen. Die berechneten Differenzen divergieren hier mit fortschreitender Zeitdauer immer stärker. Normalerweise beträgt die Streuung nach 12 Stunden ca.  $\pm 3$ -5 ns. Für einzelne Satellitenuhren kann die Abweichung bis zu ca. 10 ns erreichen, abhängig vom Prädiktionsmodell, welches vom jeweiligen AC zur Beschreibung des Uhrverhaltens verwendet wird. Am Ende der 24 Stunden liegen die Differenzen im Bereich von einigen 10er ns. Die beiden Abb.7.2 überdecken ein gleiches Zeitfenster in der GPS-Woche 1204. Die Resultate der Vorhersage der Satellitenuhrkorrekturdaten unterscheiden sich für die einzelnen ACs aufgrund der verschiedenen Prädiktionsmodelle. In den Abbildungen erreicht die Divergenz der Vorhersagen bei USNO ca. 70 ns, für ESA nur ca. 60 ns.

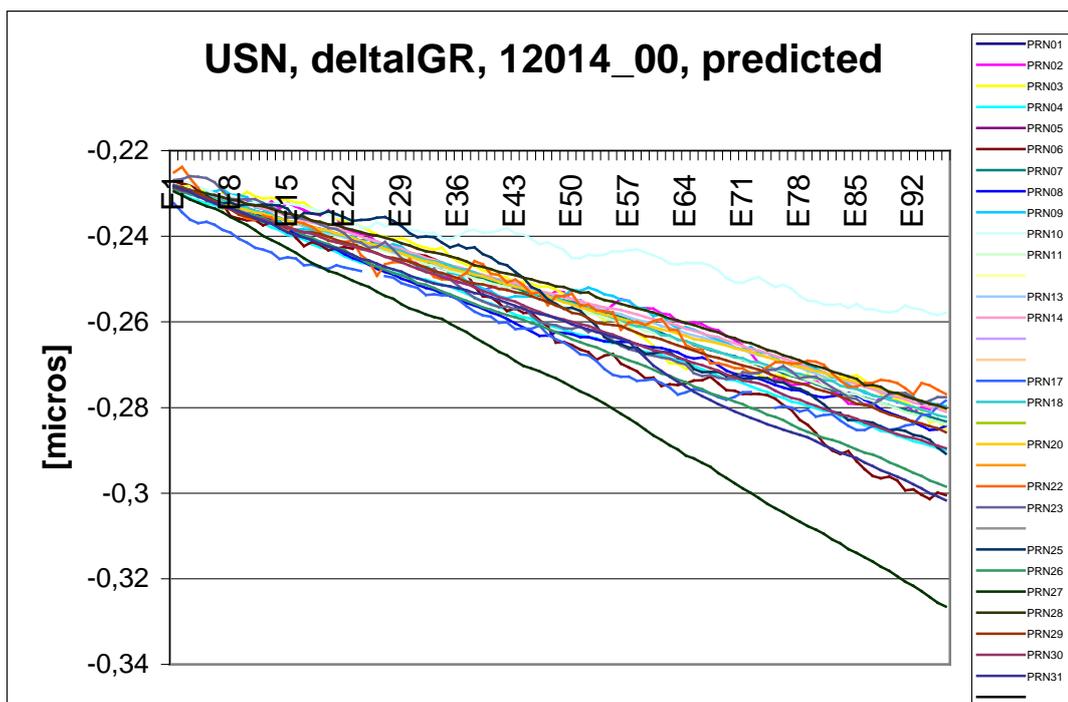


Abb.7.2a: Differenzen IGR-USN prädiziert, GPS-Woche 1201, Tag 4

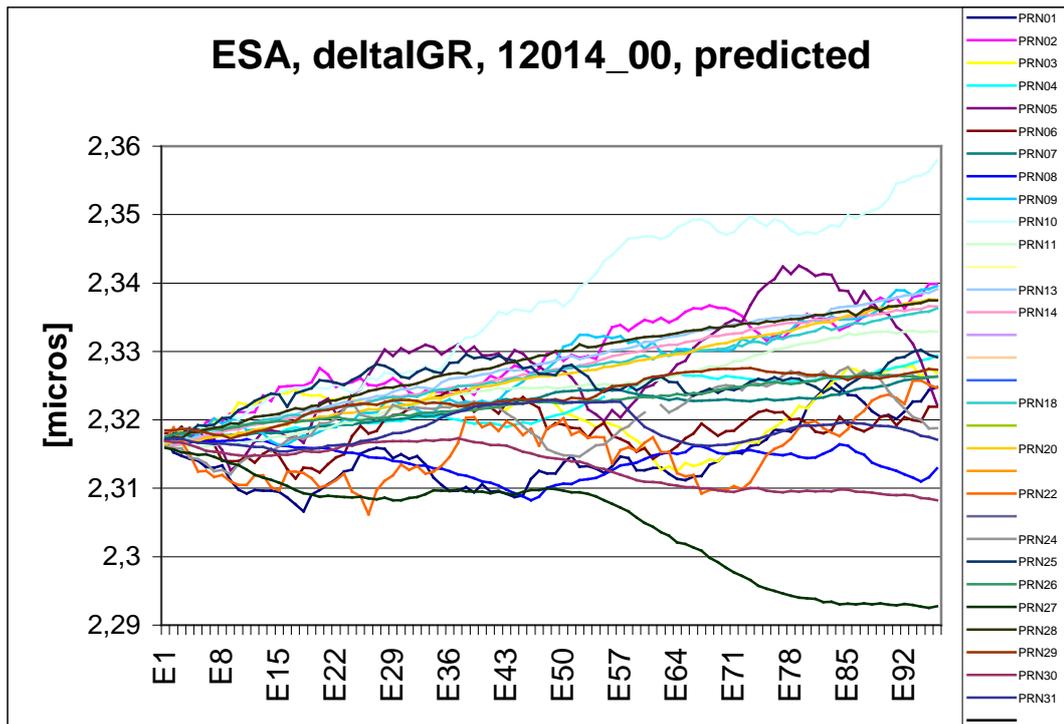


Abb.7.2b: Differenzen IGR-ESA prädiziert, GPS-Woche 1201, Tag 4

### 7.3 Untersuchung der trendreduzierten Differenzen

In einem weiteren Schritt werden die in Gleichung (7.1) gebildeten Differenzen bezüglich IGR für jeden einzelnen Satelliten individuell trendreduziert und der mittlere Fehler berechnet:

$$\text{rms}_i = \sqrt{\frac{\sum (\Delta\text{IGR}_i)^2}{n}} \quad (7.2)$$

- mit:  $\Delta\text{IGR}_i$  ..... Differenz zwischen den IGS-Rapid-Produkten und den trendreduzierten Ultra-Rapid-Uhrkorrekturdaten der einzelnen ACs  
*i* ..... Satellit  
*n* ..... Anzahl der Epochen

Die Trendreduktion der Daten um einen Offset und eine Drift erfolgt individuell für jeden Satelliten. Zur Korrektur der Drift wird eine Regressionsgerade durch die zu untersuchenden Daten und die Referenzdatensätze gelegt. Im Anschluss können nun der zeitliche Abstand (Offset) der beiden Lösungen im ersten Datenpunkt sowie die Steigung der beiden Regressionsgeraden (Drift) bestimmt werden. Die zu untersuchenden Uhrkorrektur-Zeitreihen der ACs werden nun vorab um den Zeit-Offset im ersten Datenpunkt und bezüglich der zur Referenzlösung unterschiedlichen Uhrdrift korrigiert.

Wird der mittlere Fehler wie eben beschrieben berechnet, führt das zu einer sehr optimistischen Fehlerabschätzung. In Hinblick auf ihre praktische Anwendung (Navigation) wäre es für die Bewertung der Genauigkeit der Uhren auch möglich, nur den Trend der verwendeten Referenzuhren anzugleichen. Sich auf die Positionierung auswirkende Unterschiede in den einzelnen Satellitenuhren würden dadurch erhalten bleiben. Da in dieser Arbeit aber speziell die Charakteristik der einzelnen Uhrkorrekturlösungen untersucht werden sollte, wurde die oben beschriebene Herangehensweise gewählt.

Es wird zwischen den beobachteten und den prädizierten Uhrkorrekturdaten unterschieden. Für die ersteren wird nur ein mittlerer Fehler (in den Graphiken als „rms“ (root mean square) bezeichnet) für den ganzen Datenbereich über die gesamten 24 Stunden errechnet (Abb.7.3). Die Größenordnung des mittleren Fehlers aller Satellitenuhrkorrekturen liegt für die beobachteten 24 Stunden im Bereich von ca. 0,1-0,4 ns. Diese Werte sind charakteristisch für alle ACs.

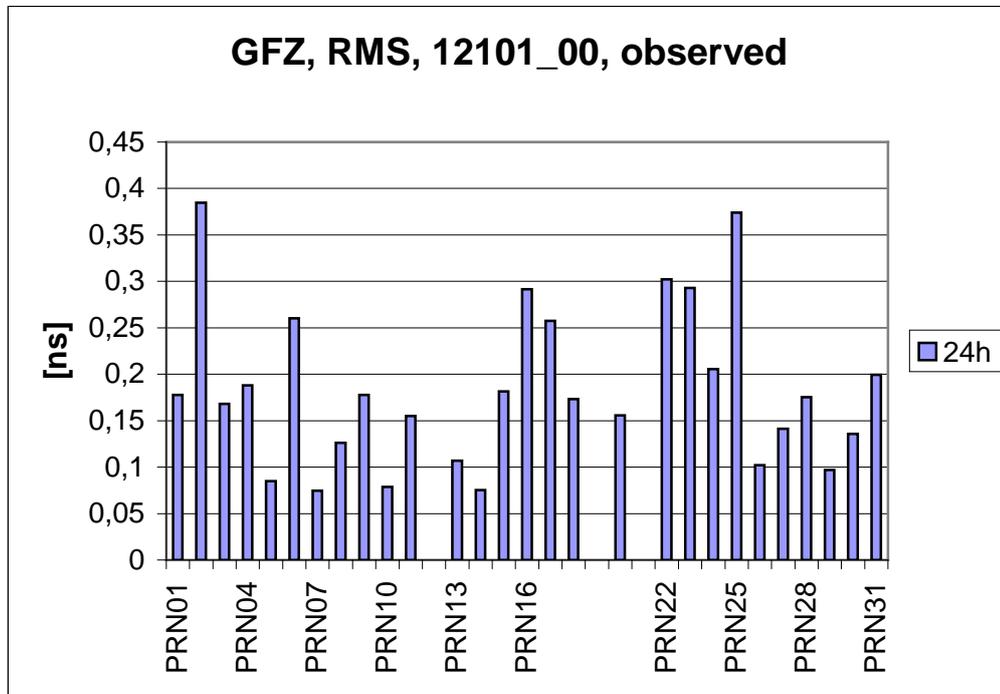


Abb.7.3: mittlerer Fehler der Uhrkorrekturen des GFZ, beobachtet, GPS-Woche 1210, Tag 1.

[Anmerkung: Der mittlere Fehler wird für die beobachteten Uhrkorrekturen immer nur über den Zeitraum eines Tages gebildet. Die Untersuchung des rms über einen längeren Zeitraum (ein Jahr) erfolgt nur für die prädizierten Uhrdaten zu einem späteren Zeitpunkt (siehe Kapitel 8.3.3).]

Für die prädizierten Daten wird der mittlere Fehler für mehrere Intervalle gebildet (Abb.7.4). Alle Intervalle beginnen um 0:00:00 GPS-Zeit. [Anmerkung: Zu diesem Zeitpunkt der Arbeit werden nur jene Uhrdaten untersucht, für die der Präktionszeitraum in den Eingangsdaten mit Tagesbeginn startet.] Das kürzeste Intervall reicht über drei Stunden, danach wird der Zeitraum um jeweils drei Stunden verlängert, bis eine Intervalllänge von 12 Stunden erreicht wird. Die Zeitfenster sind somit 3, 6, 9 und 12 Stunden lang. Dass der mittlere Fehler mit steigender Länge der Intervalle zunimmt, ist aus den Diagrammen klar ersichtlich. Der Anstieg erfolgt für die Mehrzahl der Satelliten nach einer annähernd quadratischen Funktion. Der mittlere Fehler der prädizierten Daten für das Zeitfenster von drei Stunden liegt für den Großteil der Satelliten deutlich unter 1 ns. Er ist somit nur wenig schlechter als jener der beobachteten Uhrkorrekturdaten über das oben beschriebene 24 Stunden-Intervall. Er ist in den Abb.7.4 in blau dargestellt. Danach steigt der mittlere Fehler der Prädiktion stetig an und erreicht für das 12-Stunden-Intervall, abhängig von der Güte des Prädiktionsmodells und der individuellen Satellitenuhr, eine Größenordnung von einigen 10er-Nanosekunden. Da die prädizierten IGU-Werte mit einer Verzögerung von drei Stunden veröffentlicht werden, ist noch zu bedenken, dass die ACs innerhalb dieses Intervalls die Möglichkeit haben, Uhrkorrekturdaten aus den aktuellen Beobachtungen zu rechnen und diese im Abschnitt der prädizierten Uhrwerte in der Datei anzuführen. Diese Vorgangsweise würde begründen, dass der Fehler des 3-Stunden-Intervalls der prädizierten Uhrkorrekturen nahezu keinen

Qualitätsverlust im Vergleich zum mittleren Fehler des Vortages der beobachteten Werte zeigt.

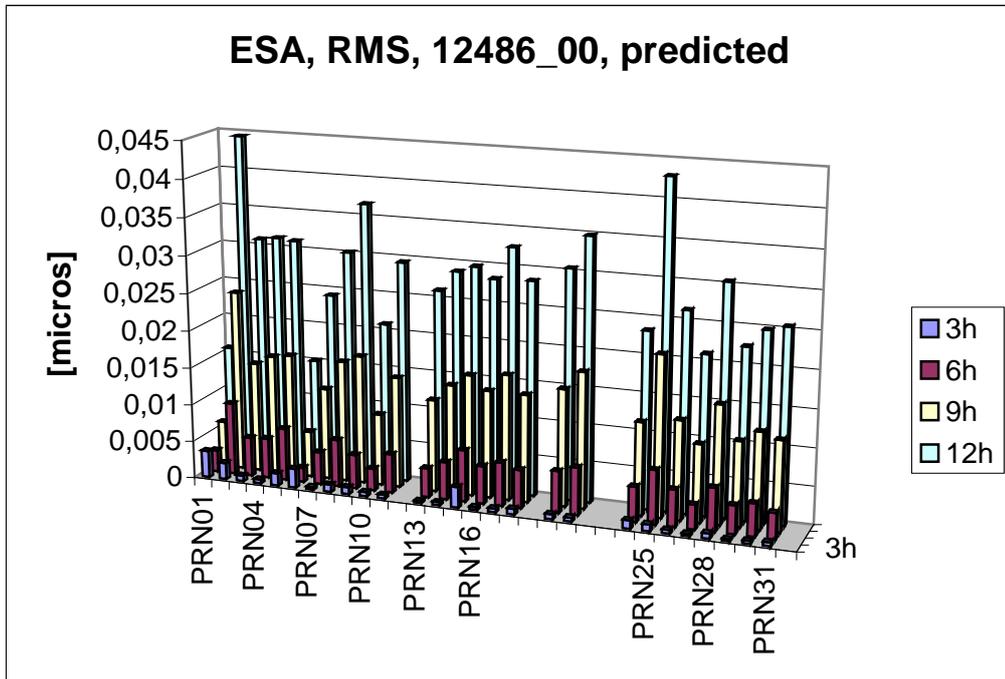


Abb.7.4a: mittlerer Fehler der Uhrkorrekturen der ESA, prädiziert, GPS-Woche 1248, Tag 6

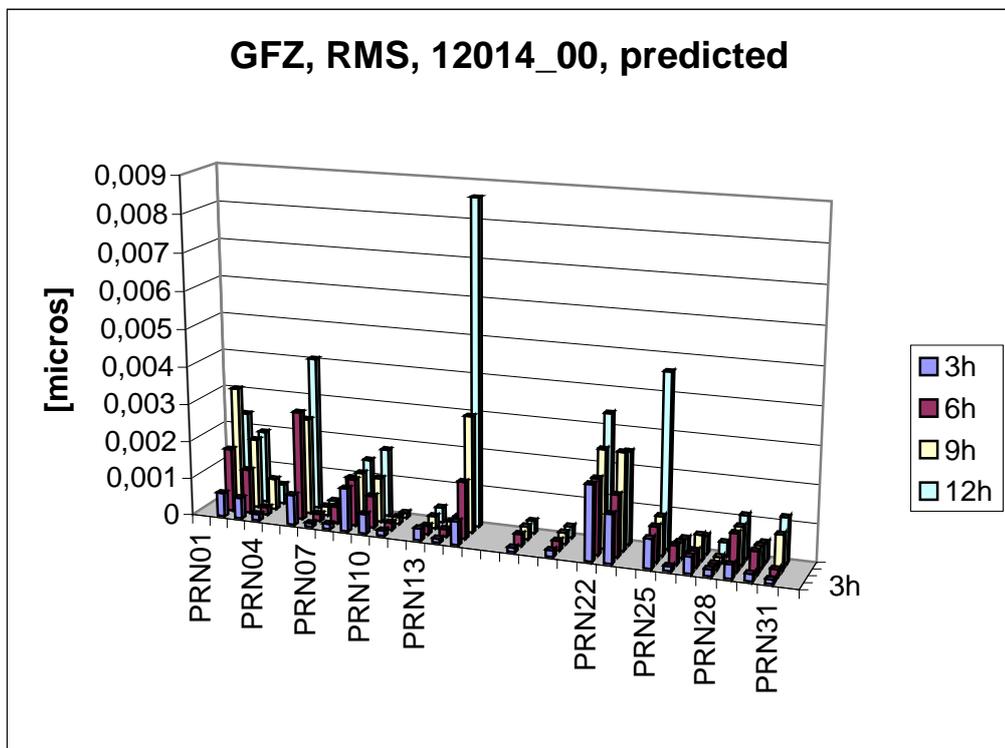


Abb.7.4b: mittlerer Fehler der Uhrkorrekturen des GFZ, prädiziert, GPS-Woche 1201, Tag 4

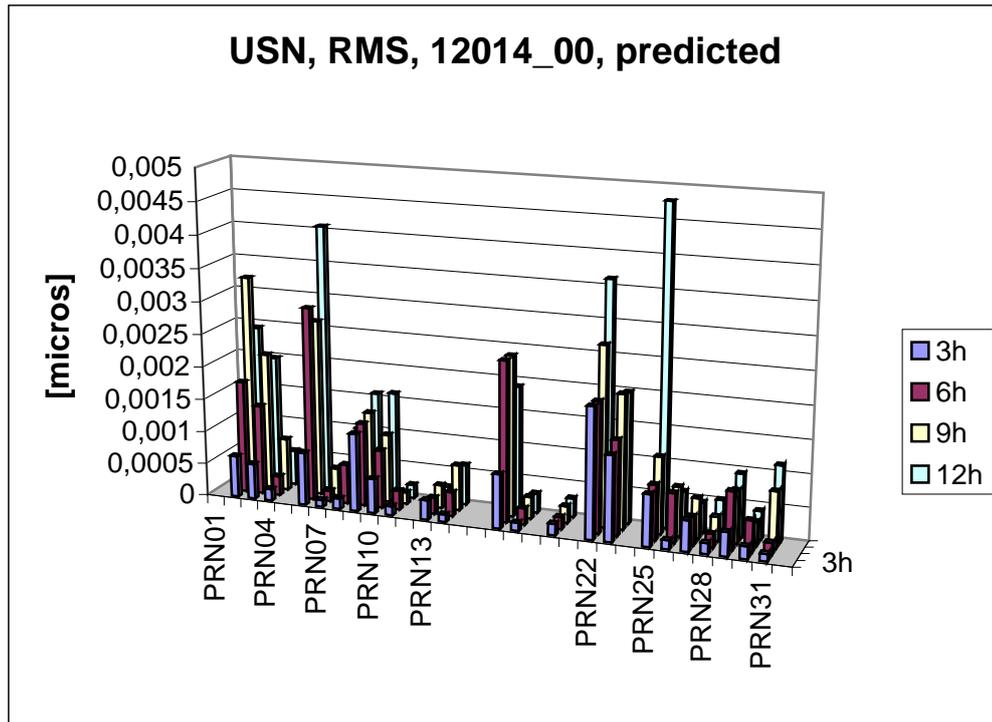


Abb.7.4c: mittlerer Fehler der Uhrkorrekturen des USNO, prädiziert, GPS-Woche 1201, Tag 4

Die Abb.7.4 zeigen charakteristische Beispiele für den gesamten Untersuchungszeitraum. Dieser beginnt mit der GPS-Woche 1151 (27.01.2002) und endet mit der Woche 1478 (10.05.2008). Wie schon weiter oben erwähnt, erreichen für das 3-Stunden-Intervall mit vereinzelt Ausnahmen alle ACs annähernd dieselbe Genauigkeit mit einem mittleren Fehler im Bereich von 0,1 bis 0,4 ns. Für die längeren Prädiktionszeiträume beginnen die Ergebnisse leicht von einander abzuweichen, wobei die Unterschiede umso größer werden, je länger der Prädiktionszeitraum ist. Für das 12-Stunden-Intervall beläuft sich die Differenz im Extremfall auf einige 10er ns, wobei hier GFZ und CODE im Mittel mit unter 7 ns an der Spitze liegen. [Anmerkung: Manche ACs verwenden an Stelle eines eigenen Prädiktionsmodells Broadcast-Uhrkorrekturen (siehe Kapitel 6.2).] Die restlichen ACs, v.a. die ESA, erreichen Werte mit bis zu 50 ns, für einzelne Satelliten können in Ausnahmefällen noch höhere Werte auftreten.

Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass in Kapitel 8.3.3 die Wochenmittel der mittleren Fehler der Ultra-Rapid-Uhrkorrekturdaten der ACs über den Verlauf etwa eines Jahres (GPS-Wochen 1250-1310, 21.12.2003-19.02.2005) berechnet und mit den an der TU Wien prädizierten Uhrkorrekturdaten verglichen werden.

Für die eigene Prädiktion der Satellitenuhren kann aus den Abb.7.4 resümiert werden, dass eine Genauigkeit von  $< \pm 1,5$  ns über einen Vorhersagezeitraum von ca. sechs Stunden für alle Satelliten plausibel ist. Weiters ist aus den Abb.7.4b und c ersichtlich, dass sich die mittleren Fehler der Ergebnisse grob in zwei Gruppen unterteilen lassen: Jeweils abhängig vom Typ der Satellitenuhr wird die angegebene Genauigkeitsschranke nur knapp erreicht (hauptsächlich von den älteren Cäsiumuhren) oder deutlich unterschritten (neuere Cäsiumuhren bzw. Rubidiumuhren). Aus diesem Grund wurde das Uhrverhalten zu Beginn der eigenen Prädiktion der Uhrkorrekturen genau untersucht. Eine ausführliche Beschreibung dieser Thematik folgt in Kapitel 8.2.

## Prädiktion von GPS-Satellitenuhren

(Kapitel 8)

Für die Bestimmung von Position und Geschwindigkeit eines GPS-Empfängers im Einzelpunktmodus (SPP (Single Point Positioning), PPP) ist die Kenntnis genauer Satellitenbahnen und Uhrkorrekturen unverzichtbar. Für hochgenaue Anwendungen stellt das IGS (siehe Kapitel 6) dafür dem GPS-Nutzer verschiedene Produkte zur Verfügung. Erlaubt die Datenauswertung eine Verzögerung von einem Tag bis ca. zwei Wochen, können qualitativ sehr hochwertige Satellitenbahnen und -uhren via Internet bezogen werden. Bei deren Berechnung aus Beobachtungsdaten des globalen Referenzstationsnetzes des IGS werden die drei kartesischen Koordinaten  $x$ ,  $y$  und  $z$  im jeweils aktuellen ITRF sowie die Abweichungen der Satellitenuhren zu GPST in regelmäßigen Intervallen gemeinsam ermittelt. Ist die Auswertung von GPS-Messungen in Echtzeit oder beinahe Echtzeit erwünscht, müssen Satellitenbahnen und -uhren vorausberechnet werden. Während die Ephemeriden aufgrund der sehr genau bekannten auf die Satelliten wirkenden Störkräfte (z. B. das Schwerfeld der Erde) mit hoher Genauigkeit (wenige Dezimeter über 24 Stunden) modellierbar sind, gestaltet sich die Prädiktion der Uhren mit vergleichbarer Genauigkeit komplizierter. Für diese muss ein Modell entwickelt werden, welches den Uhrengang mit größtmöglicher Übereinstimmung approximiert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde am Institut für Geodäsie und Geophysik an der TU Wien (TUW) ein eigenes deterministisches Prädiktionsmodell entwickelt und verfeinert. Da die als Ausgangsdaten notwendigen Satellitenuhrkorrekturen nicht selbst berechnet werden, wurden die beobachteten Uhrabweichungen der IGS-Ultra-Rapid-Produkte (jeweils die ersten 24 Stunden eines IGU-Files, siehe Kapitel 6.2) zweier aufeinander folgender Tage verwendet. Mittels dieser Rohdaten und dem eigenen Vorhersagemodell werden mit dem Programm GNSS-VC/static (GNSS - Vienna Clocks /static) die Uhrkorrekturdaten für den nächsten Tag bestimmt. Im Anschluss erfolgt eine Beurteilung der Qualität der prädizierten Werte mit Hilfe der im Kapitel 7 vorgestellten statistischen Untersuchungen. Obwohl das Vorhersagemodell ursprünglich nur für GPS-Satellitenuhren entwickelt wurde, konnte später auch die Prädiktion von GLONASS-Satellitenuhrkorrekturen getestet werden (siehe Kapitel 9).

### 8.1 A priori Genauigkeitsabschätzung

In den folgenden Kapiteln wird die Entwicklung eines analytischen Prädiktionsmodells zur Vorausberechnung der Satellitenuhrkorrekturen beschrieben. Zu Beginn der Arbeit stellt sich die Frage, welche Genauigkeit über definierte Zeiträume mit einem solchen Modell erreicht werden kann. Für eine Abschätzung könnte z. B. die Allan Varianz (siehe Kapitel 1.7) herangezogen werden. Ein von K. Senior (Naval Center for Space Technology) [Senior, Ray, 2007] zur Verfügung gestelltes Diagramm, abgeleitet aus dem Rausch-Verhalten der aktiven Satellitenuhren, zeigt sehr übersichtlich die erwartbaren Prädiktions- und Interpolationsfehler von GNSS-Satellitenuhren (siehe Abb.8.1). Klar ist der Qualitätsunterschied zwischen den verschiedenen Uhren-Typen zu sehen. Der Prädiktionsfehler der Cäsiumuhr erreicht nach ca. 30 Minuten bereits eine Nanosekunde. Die Rubidiumuhren der Satelliten vom Typ Block IIA und Block IIR liegen nach dem gleichen Zeitintervall noch deutlich unter diesem Wert, nämlich im Bereich von etwa 0,2 bis 0,3 ns. Bei einer annähernd linearen Extrapolation des Diagramms über längere Intervalle zeigt sich, dass bei der Prädiktion der Rubidiumuhren nach zwei Stunden immer noch ein Fehler von deutlich unter einer Nanosekunde zu erwarten ist. Wird die Abschätzung noch bis zu drei

Stunden erweitert, so liegt der Prädiktionsfehler von Rubidiumuhren vom Typ Block IIR weiterhin unter einer Nanosekunde, während jener der Rubidiumuhren vom Typ Block IIA nach dieser Zeitspanne ca. bei einer Nanosekunde liegt. Der geringste Prädiktionsfehler ist für einen simulierten Wasserstoff-Maser eines zukünftigen Galileo-Satelliten zu erwarten, die nach ebenfalls ca. drei Stunden erst annähernd den 0,5-Nanosekunden-Level erreicht. Für noch längere Zeiträume kann nun gefolgert werden, dass unter optimalen Bedingungen für eine Prädiktion der Rubidiumuhren über ein Zeitintervall von ca. sechs Stunden ein voraussichtlicher mittlerer Fehler im Größenbereich  $\approx 1,5$  ns vorliegt. Für die Cäsiumuhren ist jener mit etwa 3,5 ns zu erwarten.

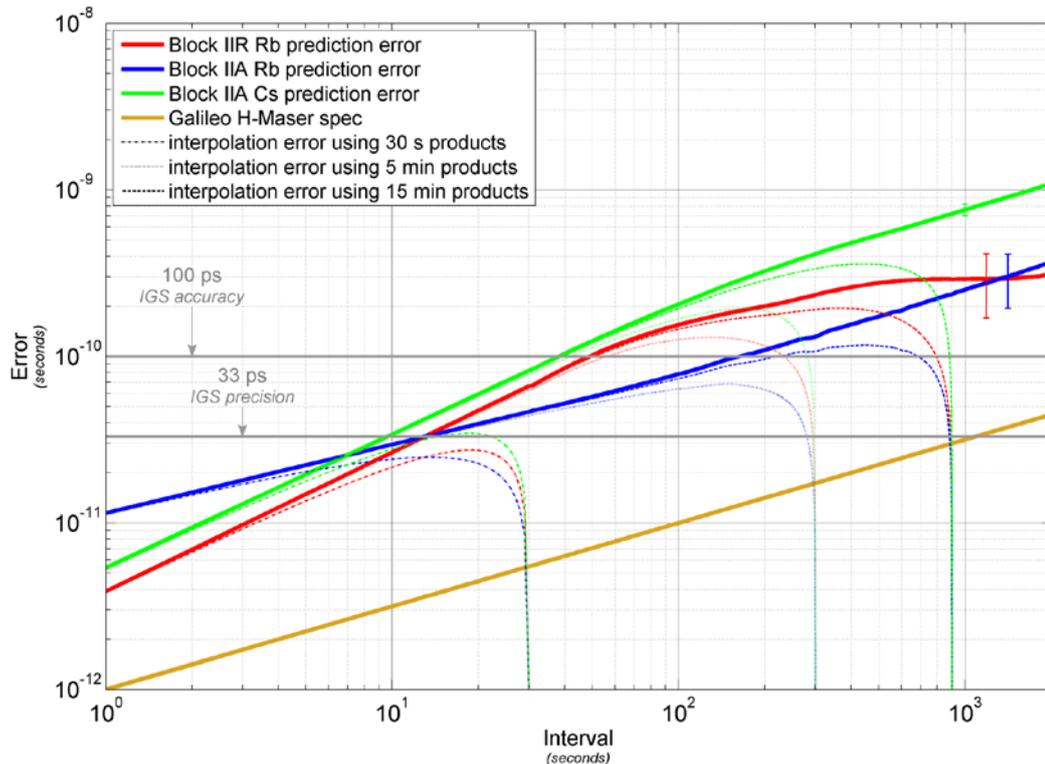


Abb.8.1: Prädiktions- und Interpolationsfehler von GNSS-Satellitenuhren

Für die Interpolation von Satellitenuhren aus Stützwerten mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung (Uhrlösungen im Abstand von 30 Sekunden, 5 Minuten sowie 15 Minuten, siehe Abb.8.1) ergeben sich daraus folgende Aussagen:

Aus den Kurven ist ersichtlich, dass der Interpolationsfehler jeweils zu Beginn eines Intervalls stetig ansteigt und den höchsten Wert in der Hälfte des Intervalls erreicht. Zu Beginn der einzelnen Intervalle schmiegen sich die Kurven der Interpolationsfehler an jene der dem gleichen Uhrentyp zugehörigen Kurve der Prädiktionsfehler an, wobei jene des Interpolationsfehlers immer unter der des "frei laufenden" Prädiktionsfehlers bleibt. An den Stützstellen fällt die Kurve auf Null, da hier der Wert des Interpolationspolynoms die Größe des Stützwertes annimmt. Dieses Verhalten ist für alle Kurven gleich, also unabhängig vom Typ der Satellitenuhr.

## 8.2 Uhrcharakteristiken

Um ein zuverlässiges Modell für die Prädiktion der Satellitenuhrkorrekturen zu erarbeiten, wurde vorerst das Verhalten der einzelnen Uhrentypen studiert.

GPS-Satelliten verfügen, abhängig von der Bauserie, über drei bis vier Oszillatoren an Bord (Cäsium und / oder Rubidium), von denen jeweils einer aktiv geschaltet ist. Dabei sind einerseits Qualitätsunterschiede zwischen den Cäsium- und Rubidiumfrequenzgeneratoren festzustellen (siehe Kapitel 1.7), andererseits auch zwischen den Generatoren gleichen Typs aber unterschiedlichem Entwicklungsstand (z. B. Serien GPS Block II / IIA / IIR).

Trägt man die Uhrkorrekturwerte über einige Tage hinweg auf, so kann man schon auf den ersten Blick einen deutlichen Unterschied feststellen: Während die Abweichungen der Rubidiumuhren im Wesentlichen der Integration einer stabilen Frequenzdrift entspricht (einem Polynom zweiten Grades im Zeitbereich), zeigen jene der Cäsiumuhren eine typische Periode von ca. 12 Stunden, übereinstimmend mit der Umlaufzeit der Satelliten. Dabei ist anzumerken, dass die Größe der Amplituden, über einen längeren Zeitraum (mehrere Monate) hinweg gesehen, variiert (siehe Kapitel 8.4). In den Abb.8.2 ist diese Charakteristik anhand von zwei ausgewählten Satelliten für die Tage 5 und 6 der GPS-Woche 1202 dargestellt.

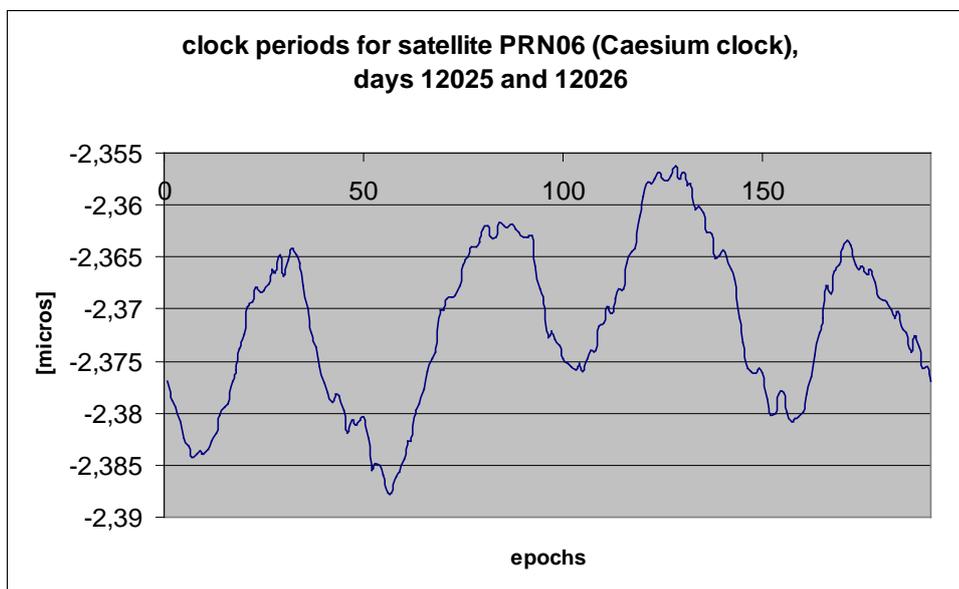


Abb.8.2a: typisches Verhalten einer Cäsiumuhr (Block IIA)

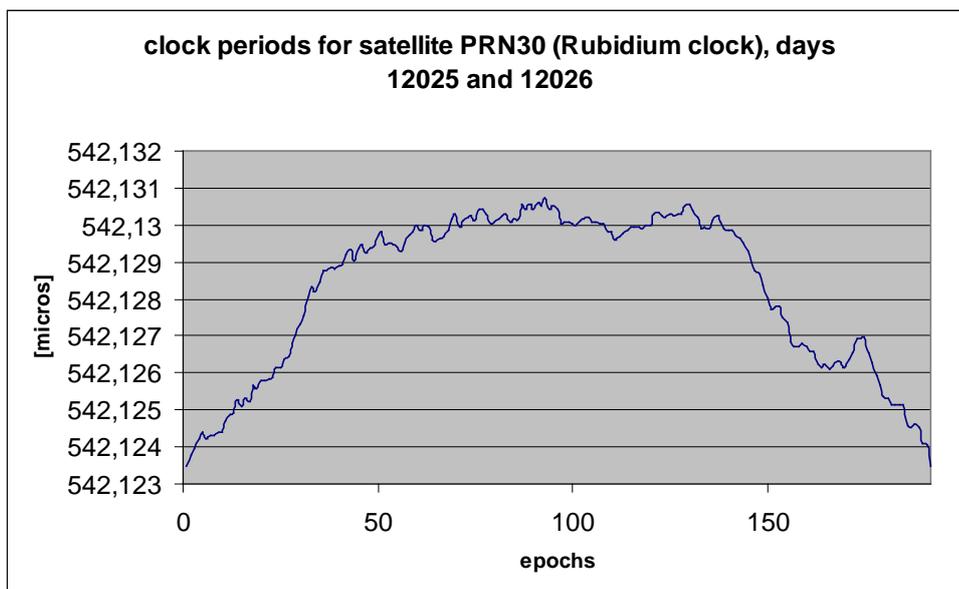


Abb.8.2b: typisches Verhalten einer Rubidiumuhr (Block IIA)

Es stellt sich in weiterer Folge die Frage, ob die Satellitenuhren neben der dominanten ca. 12-stündigen Periode noch weitere zyklische Anteile aufweisen. Um dies genauer zu untersuchen, wurde für jede im Beobachtungszeitraum aktivierte Satellitenuhr ein Amplitudenspektrum berechnet. Dafür wurde auf die 30-Sekunden-Daten des JPL zurückgegriffen. Diese Uhrkorrekturwerte wurden über einen Zeitraum von fünf Wochen (GPS-Wochen 1367-1371) zu einer kontinuierlichen Zeitserie verbunden (siehe Abb.8.3). Es wurden Korrekturen der Offsets an den Tagesgrenzen vorgenommen und kleine Datenlücken mittels Interpolation überbrückt. Schlussendlich wurde ein linearer Trend subtrahiert. Abb.8.3a zeigt einen typischen Verlauf der für die Berechnung des Amplitudenspektrums verwendeten reduzierten Uhrendaten. In Abb.8.3b ist wieder sehr gut die 12-stündige Periode (2 cycles / day) zu erkennen. Speziell der Satellit PRN01 zeigt aber auch eine große Amplitude von ca. 3 ns für ein 6-stündiges Intervall (4 cycles/day), die bei den anderen Satelliten allerdings deutlich kleiner ausfällt. Die Größenordnung der Amplitude der 12-Stunden-Periode liegt, abhängig von der betrachteten Satellitenuhr, im Bereich von einigen wenigen Nanosekunden.

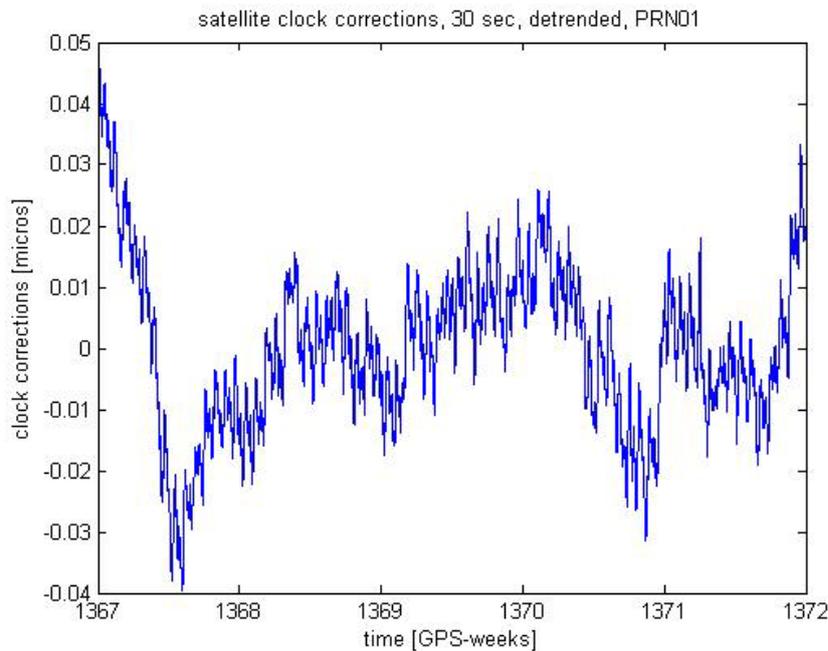


Abb.8.3a: trendreduzierte Uhrkorrekturdaten im 30-Sekunden-Takt, PRN01

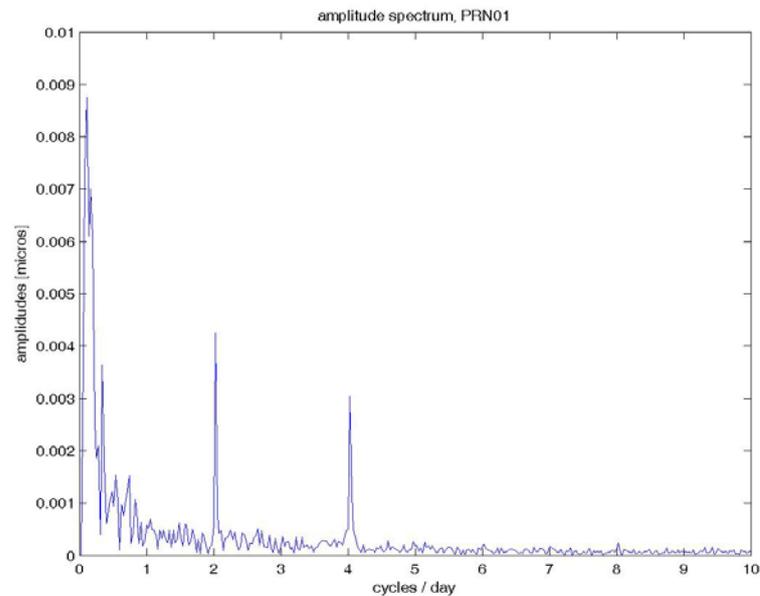


Abb.8.3b: Amplitudenspektrum, PRN01

In einer ähnlichen Untersuchung erstellte K. Senior ein für die gesamte GPS-Satellitenkonstellation gültiges Amplitudenspektrum (siehe Abb.8.4) [Senior, Ray, 2007]. Als Eingangsdaten wurden IGS-Final-Daten (im 5-Minuten-Takt) von 150 aufeinander folgenden Tagen verwendet. In der Folge wurden die Periodogramme der einzelnen Satelliten aufaddiert. Zusätzlich zu der 12-stündigen Periode finden sich in der Graphik weitere Spitzen bei ganzzahligen Vielfachen der Umlauffrequenz, nämlich bei sechs, vier und drei Stunden. Die Ursachen der 6-stündigen Periode sind dabei bekannt: Ein Teil (ca. 50 ps) stammt aus relativistischen Effekten aufgrund der Abplattung der Erde, der Rest aus Störungen der Satellitenbahn [Kouba, 2004].

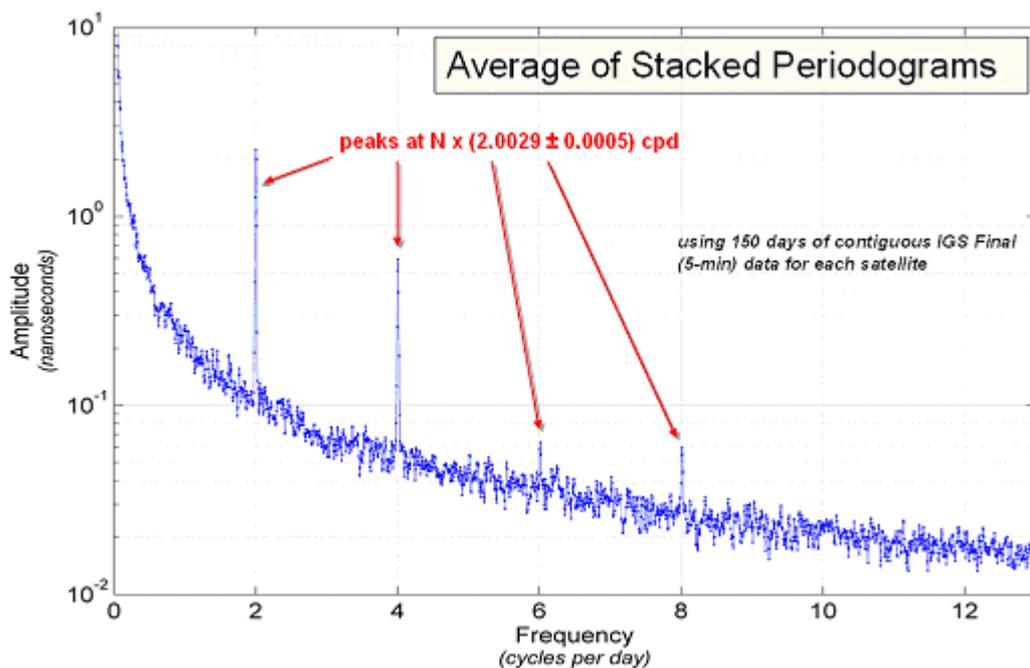


Abb.8.4: Amplitudenspektrum, gemittelt für alle Satelliten über 150 Tage

Es ist nun zu diskutieren, wie das periodische Verhalten der Satellitenuhren in das Prädiktionsmodell (Kapitel 8.3.2) zu integrieren ist. Da die Rubidium-Uhren im Normalfall in

ihrem Verlauf keine Besonderheiten zeigen, kann für sie ein quadratisches Polynom angesetzt werden. Die Koeffizienten drücken dabei den Offset zu einer Vergleichsuhr ( $t^0$ ), den Uhrengang ( $t^1$ ), sowie die Änderung der Drift mit der Zeit ( $t^2$ ) aus. Für die Cäsium-Uhren scheint eine Berücksichtigung ihres zyklischen Verhaltens sinnvoll. Vor allem die 12-stündige Hauptperiode liegt mit 0,6 ns in einem Größenbereich, der für das Prädiktionsergebnis nicht vernachlässigt werden darf. Für sie wird dem quadratischen Polynom ein periodischer Term hinzugefügt. Die kurzperiodischen Frequenzen werden in das Prädiktionsmodell nicht integriert, da ihre Amplituden normalerweise in einer Größenordnung von deutlich unter einer Nanosekunde liegen.

### 8.3 Beschreibung des Prädiktionsverfahrens

Als Eingangsdaten für die Prädiktion der GPS-Satellitenuhren dienen die IGS-Ultra-Rapid-Produkte (siehe Kapitel 6.2). Von diesen werden jeweils die ersten 24 Stunden (also die aus Beobachtungen berechneten) Uhrdaten von zwei aufeinander folgenden Tagen zu einer 48-stündigen Zeitreihe verknüpft. Danach werden mittels des in Kapitel 8.3.2 beschriebenen Prädiktionsmodells (8.2) dessen Parameter bestimmt und die Uhrkorrekturen über einen Zeitraum von 24 Stunden vorausgerechnet. Für die Genauigkeitsabschätzung der prädizierten Uhrdaten wird wie in Kapitel 7 vorgegangen.

#### 8.3.1 Vorbereitung der Daten

Bevor die IGU-Uhrkorrekturdaten nun für die Bestimmung der Parameter des Vorhersagemodells verwendet werden können, muss noch deren Konsistenz gesichert werden. Die Uhrkorrekturen basieren jeweils auf den Beobachtungsdaten eines Tages und sind auf GPST abgestimmt. Aus diesem Grund weisen Daten verschiedener Tage eine unterschiedliche Drift und einen Offset an den Tagesgrenzen auf. Wie schon in Kapitel 7.2 und 7.3 beschrieben, wird auch hier die Charakteristik der einzelnen Uhren selbst untersucht. Aus diesem Grund werden die im Folgenden beschriebenen Berechnungsschritte unabhängig für jeden einzelnen Satelliten durchgeführt.

Im Programm GNSS-VC/static wird als erstes durch die Datensätze der beiden dem Prädiktionstag vorausgehenden Tage je eine Regressionsgerade gelegt. Danach wird die Steigung der Uhrkorrekturdaten des ersten Tages an jene des zweiten angeglichen. Zur Berücksichtigung des Offsets an den Tagesgrenzen wird satellitenindividuell die Differenz aus dem ersten prädizierten Wert des Datenfiles des zweiten Tages und dem ersten beobachteten Wert der Datendatei des zweiten Tages gebildet und angebracht. Mit diesen Konstanten werden nun alle Daten der ersten 24 Stunden an die der zweiten 24 Stunden angeglichen. Eine andere Option wäre die Anpassung der satellitenspezifischen Uhrdaten jedes einzelnen Tages an die Zeitskala UTC.

### 8.3.2 Prädiktionsmodell

- **Startmodelle**

Für einen ersten Prädiktionsversuch wurden die Satelliten in zwei Gruppen geteilt [Bröderbauer, Weber, 2003]. Für jene Satelliten mit aktiver Rubidiumuhr wurde als Vorhersagemodell ein rein quadratisches Polynom der Form

$$p(t) = a \cdot t^2 + b \cdot t + c \quad (8.1)$$

mit:  $a, b, c$  .... Polynomkoeffizienten

angesetzt. Um den oben beschriebenen Perioden gerecht zu werden, wurde der Funktion (8.1) für die Satelliten mit aktivierten Cäsiumuhren ein periodischer Term in Form einer Sinusschwingung hinzugefügt:

$$p(t) = a \cdot t^2 + b \cdot t + c + A_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (8.2)$$

mit:  $a, b, c$  .... Polynomkoeffizienten

$A_0$  ..... Amplitude

$\omega$  ..... Frequenz

$\varphi$  ..... Phasenverschiebung

Im Zuge eines vermittelnden Ausgleichs zur Bestimmung der Parameter der Prädiktionsfunktionen wurde nach den Polynomkoeffizienten  $a$ ,  $b$  und  $c$  sowie nach der Amplitude  $A_0$  und der Phasenverschiebung  $\varphi$  gelöst. Die Frequenz wurde übereinstimmend mit der Hauptperiode des Signals mit 11 h 58 min (Umlaufzeit der Satelliten) als bekannt vorausgesetzt. Das Argument der Funktion läuft dabei für den Zeitraum von 48 Stunden über 192 Epochen zu je 15 Minuten. Es wurden nun für jeden einzelnen Satelliten eigene Modellparameter geschätzt und abhängig vom Typ der Satellitenuhr die Modelle (8.1) bzw. (8.2) verwendet.

- **Endgültiges Modell**

Für einen Zeitraum von etwa einem Jahr (GPS-Wochen 1250-1310, 21.12.2003 - 19.02.2005) wurde die Prädiktion der Rubidiumuhren sowohl mit Modell (8.1) als auch mit Modell (8.2) durchgeführt. Danach wurde über die Beziehung (7.2) der mittlere Fehler für die mittels der beiden Modelle prädierten Uhrkorrekturen bestimmt. Die Vorgangsweise entspricht der in Kapitel 7.3 beschriebenen (Einteilung in vier Intervalle zu 3, 6, 9 und 12 Stunden mit jeweils gleichem Beginnzeitpunkt). Als Referenzdaten werden die Uhrkorrekturwerte der IGS-Rapid-Produkte verwendet (siehe Kapitel 6.2). Die Berechnung erfolgt wiederum für jeden Satelliten individuell.

Unerwarteter Weise ergab sich auch für die Rubidiumuhren eine erkennbare Verbesserung der Genauigkeit bei der Verwendung des um den periodischen Term erweiterten Polynoms zweiten Grades. Für die Abb.8.5 wurde der mittlere Fehler der prädierten Uhrdaten für den gesamten Untersuchungszeitraum für jeden einzelnen Tag nach Beziehung (7.2) berechnet. Im Anschluss daran wurde aus den sieben mittleren Fehlern von jeweils einer Woche der Mittelwert gebildet. An dieser Stelle soll auf Abb.8.8 in Kapitel 8.3.3 verwiesen werden, welche eben diese Wochenmittel zeigt. Aus den so erhaltenen Mittelwerten für die einzelnen Wochen wurde nun der Mittelwert des gesamten Untersuchungszeitraumes bestimmt. Wie

schon in Kapitel 7.3 wurde der Prädiktionszeitraum auch hier in verschiedenen lange Intervalle geteilt. Deren Definition kann dort nachgelesen werden. Die Abb.8.5 zeigen den Unterschied des mittleren Fehlers beider Modelle am Beispiel der Satelliten PRN07 und PRN19. Bei beiden Satelliten ist beim Ergebnis für TUV, v. a. für das 12-Stunden-Intervall, gut erkennbar, dass der mittlere Fehler basierend auf Modell (8.1) größer ist als jener, dem das Modell (8.2) zugrunde liegt. Bei beiden gezeigten Satelliten ist jeweils die Rubidiumuhr aktiviert. Die aus den beiden Prädiktionsmodellen erhaltenen mittleren Fehler sind für alle Satelliten in Tab.8.1 zusammengestellt. Tab.8.1a zeigt dabei die Rubidiumsattelitenuhren und zum Vergleich werden in Tab.8.1b auch die Cäsiumuhren angeführt. Für alle Cäsiumuhren ist der mittlere Fehler basierend auf Modell (8.2) kleiner als der dem Modell (8.1) zugehörige. Bei den Rubidiumuhren sind die mittleren Fehler aus den beiden Modellen nahezu gleich (bis auf wenige Ausnahmen, in Tab.8.1a violett markiert). Zur besseren Übersicht wurden für die beiden Modelle (8.1) und (8.2) verschiedene Farben verwendet, nämlich grün für das quadratische Polynom und blau für das Modell mit zusätzlicher Sinusschwingung.

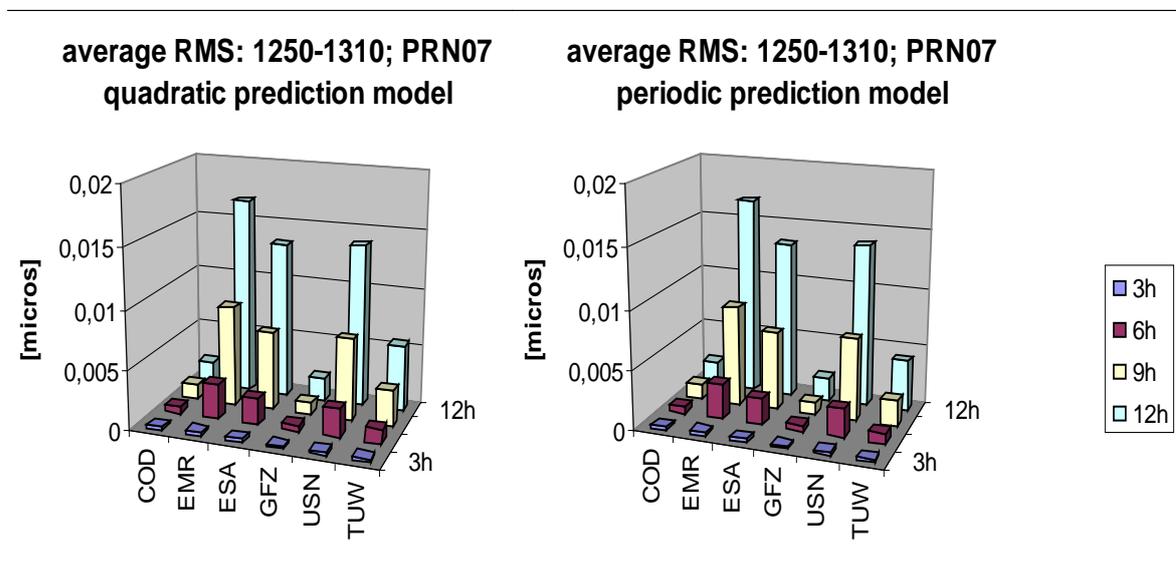


Abb.8.5a: Vergleich des mittleren Fehlers der Rubidiumuhr von PNR07 für TUV, ermittelt aus beiden Prädiktionsmodellen; Werte der ACs in beiden Diagrammen gleich

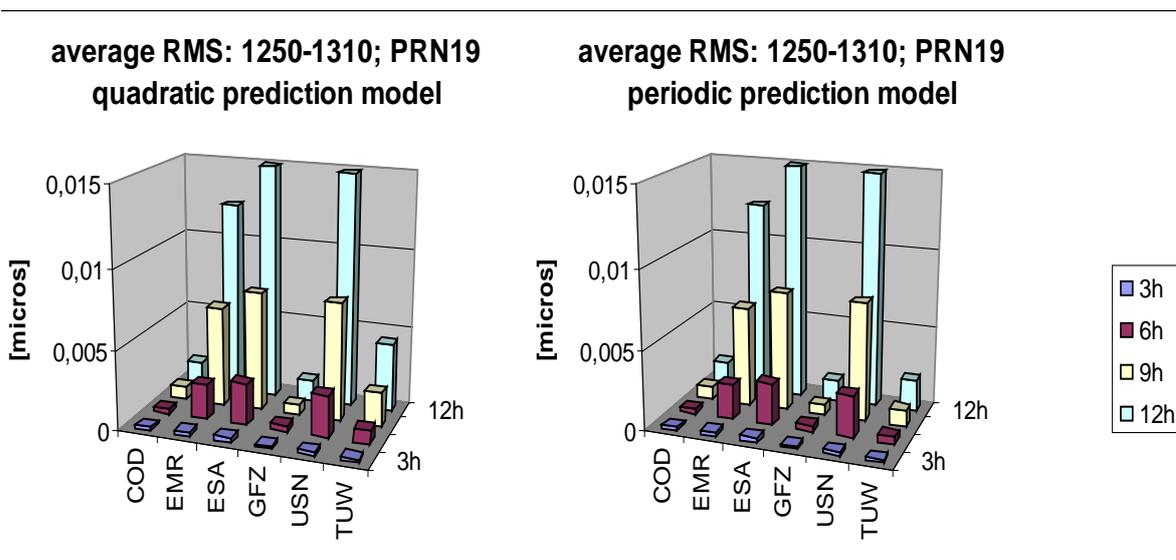


Abb.8.5b: Vergleich des mittleren Fehlers der Cäsiumuhr von PNR19 für TUV, ermittelt aus beiden Prädiktionsmodellen; Werte der ACs in beiden Diagrammen gleich

PRN	04		06		07		11		13	
Modell	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)
3 h	0,35	0,33	0,72	0,69	0,27	0,23	0,20	0,18	0,35	0,34
6 h	1,32	1,04	2,58	2,65	1,20	0,90	0,88	0,68	0,95	0,76
9 h	3,18	2,43	6,76	6,53	3,04	2,24	2,23	1,69	2,32	1,76
12 h	5,83	4,56	12,95	12,44	5,68	4,34	4,19	3,19	4,44	3,35

PRN	14		16		17		18		19	
Modell	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)
3 h	0,19	0,17	0,21	0,90	0,38	0,37	0,33	0,31	0,21	0,19
6 h	0,76	0,58	0,87	0,68	1,76	1,42	0,96	0,75	0,87	0,47
9 h	1,99	1,44	2,25	1,70	4,55	3,63	2,23	1,66	2,22	1,08
12 h	3,87	2,80	4,31	2,76	8,74	7,05	4,15	3,06	4,32	2,04

PRN	20		21		22		23		26	
Modell	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)
3 h	0,20	0,18	0,32	0,32	0,24	0,25	0,22	0,25	0,28	0,31
6 h	0,81	0,64	1,03	0,84	1,00	0,86	0,86	0,95	1,05	0,93
9 h	2,11	1,61	2,32	2,05	2,71	2,30	2,30	2,44	2,52	2,21
12 h	4,12	3,13	5,01	3,99	5,40	4,54	5,02	5,04	4,70	4,24

PRN	27		28		29		30		31	
Modell	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)
3 h	0,30	0,28	0,22	0,21	0,34	0,32	0,28	0,27	0,57	1,56
6 h	1,39	1,12	1,16	0,96	1,12	0,96	1,15	1,06	1,63	16,03
9 h	3,96	3,24	3,21	2,64	2,59	2,13	2,81	2,61	4,15	30,35
12 h	7,30	6,05	6,35	5,26	4,73	3,93	5,30	4,98	7,88	36,55

Tab.8.1a: Vergleich des mittleren Uhrfehlers für die Rubidiumuhren, ermittelt aus beiden Prädiktionsmodellen, GPS-Wochen 1250-1310

[Anmerkung: Die violette Farbe kennzeichnet jene wenigen Intervalle, bei denen der RMS basierend auf Modell (8.2) jenen des rein quadratischen Modells überschreitet. Der Grund für das auffällig abweichende Verhalten von PRN31 konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht herausgefunden werden.]

PRN	01		03		05		08		09	
Modell	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)
3 h	1,76	1,75	0,97	0,94	0,99	0,98	0,95	0,91	1,05	1,01
6 h	4,14	3,48	2,39	2,15	2,46	2,11	2,59	2,04	2,40	2,18
9 h	8,37	6,30	5,03	4,41	5,31	4,28	5,49	4,19	4,86	4,31
12 h	13,32	10,49	8,85	7,78	9,12	7,48	9,26	7,42	8,47	7,53

PRN	10		15		24		25	
Modell	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)	(8.1)	(8.2)
3 h	0,95	0,93	1,34	1,28	0,99	0,96	1,02	1,02
6 h	2,55	2,15	3,19	2,73	2,68	2,27	2,25	2,17
9 h	5,31	3,73	6,64	5,37	5,59	4,40	4,84	6,07
12 h	9,00	7,46	11,40	9,25	8,77	7,53	8,63	8,06

Tab.8.1b: Vergleich des mittleren Uhrfehlers für die Cäsiumuhren, ermittelt aus beiden Prädiktionsmodellen, GPS-Wochen 1250-1310

In Tab.8.2 sind zum Vergleich die aktivierten Uhrtypen der GPS-Satelliten für eine Woche im August des Testjahres der oben beschriebenen Untersuchung angeführt.

Uhrentypen in der GPS-Woche 1283											
PRN	Uhr	PRN	Uhr	PRN	Uhr	PRN	Uhr	PRN	Uhr	PRN	Uhr
01	Cs	07	Rb	13	Rb	18	Rb	23	Rb	28	Rb
03	Cs	08	Cs	14	Rb	19	Rb	24	Cs	29	Rb
04	Rb	09	Cs	15	Cs	20	Rb	25	Cs	30	Rb
05	Cs	10	Cs	16	Rb	21	Rb	26	Rb	31	Rb
06	Rb	11	Rb	17	Rb	22	Rb	27	Rb		

Tab.8.2: aktivierte Uhrtypen der GPS-Satelliten für die GPS-Woche 1283

[Anmerkung: Bei Satelliten PRN06 und PRN08 war in den ersten Wochen des Untersuchungszeitraumes eine Uhr vom jeweils anderen Typ aktiviert.]

Als Konsequenz dieser Ergebnisse wurde ab April 2005 für alle Satelliten das Prädiktionsmodell der Form (8.2) verwendet.

### 8.3.3 Ergebnisse

Mit dem neuen Modell werden die Parameter  $a$ ,  $b$  und  $c$  sowie die Amplitude  $A_0$  und die Phasenverschiebung  $\varphi$  der Prädiktionsfunktion (8.2) bestimmt. Im Anschluss können diese zur Berechnung der prädizierten Uhrkorrekturdaten für den Prädiktionstag herangezogen werden. Die Ergebnisse werden danach mit den in Kapitel 7 beschriebenen Methoden untersucht. Die Referenz bilden wie schon dort die IGR-Satellitenuhren. Als erstes werden die Differenzen zu den IGR-Lösungen des entsprechenden Tages gebildet. Wie aus den Abb.8.6 ersichtlich, liegen die Differenzen annähernd in der gleichen Größenordnung wie jene der ACs des IGS (siehe Kapitel 7.2). Nach 24 Stunden beträgt der Streubereich ca. 60 ns. Einzelne Satelliten sind im betrachteten Zeitraum schwieriger zu modellieren, z. B. PRN06 oder PRN17. Diese entfernen sich gegen Ende der 24 Stunden Vorhersagezeit deutlicher von der gewünschten Null-Differenz zur IGR-Lösung als die Mehrheit der Satelliten. Der Unterschied der TUW-Ergebnisse zu den IGR-Vergleichsdaten in der ersten Prädiktionsepoche ergibt sich nicht zu Null, sondern es tritt teilweise ein deutlicher Offset auf (siehe auch Kapitel 7.2). Dieser repräsentiert den Offset an der Tagesgrenze zwischen den Tageslösungen der Eingangsdaten (IGS-Ultra-Rapid-Produkte) und der Vergleichsdaten (IGS-Rapid-Produkte). Die unterschiedliche Drift der beiden Datenserien bleibt ebenfalls in den Differenzen erhalten. Die den in Abb.8.6 und Abb.8.7 gezeigten Zeitserien zugrundeliegenden Uhrentypen können obiger Tab.8.2 entnommen werden.

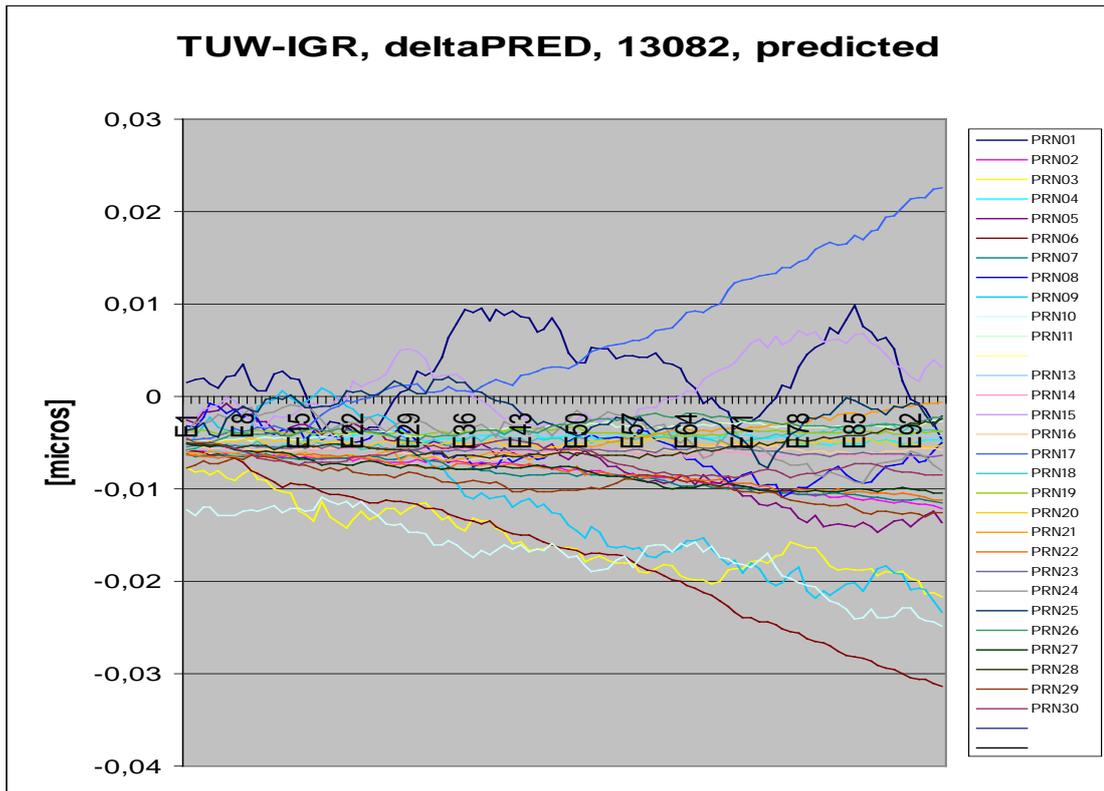


Abb.8.6a: Differenzen TUW-IGR (TU Wien), prädiziert, GPS-Woche 1308, Tag 2

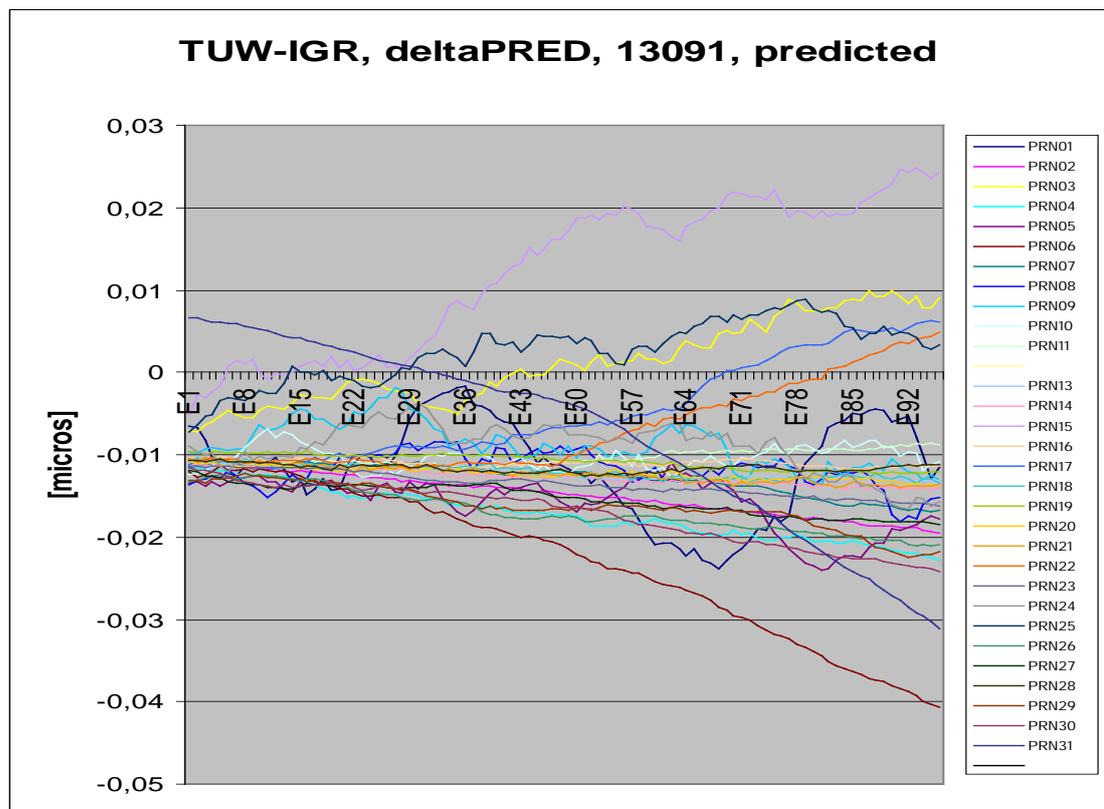


Abb.8.6b: Differenzen TUW-IGR, beobachtet, GPS-Woche 1309, Tag 1

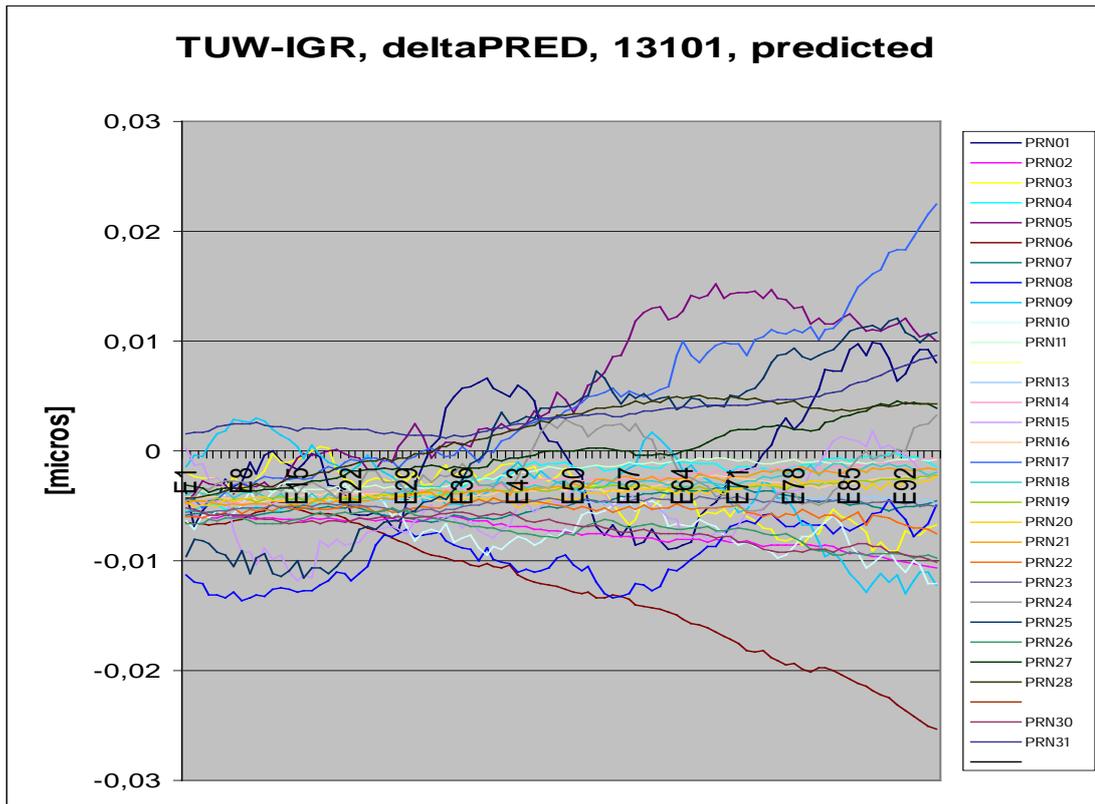


Abb.8.6c: Differenzen TUW-IGR, beobachtet, GPS-Woche 1310, Tag 1

Des Weiteren wird der mittlere Fehler der Prädiktion in Bezug auf die IGR-Lösung für verschiedene Zeitintervalle (siehe Kapitel 7.3) berechnet. Die den Prädiktionstagen der Abb.8.6 entsprechenden Ergebnisse werden in den Abb.8.7 als Beispiele gezeigt. Generell liegt der mittlere Fehler für die Satelliten mit aktiven Rubidiumuhren bis zu einer Intervalldauer von 6 Stunden unter 1-1,5 ns, für das 12 Stunden Intervall steigt er auf ca. 2-3 ns an. Das entspricht einem Distanzfehler von ca. 60-90 cm. Der mittlere Fehler der Prädiktion der Cäsiumuhren übersteigt diese Werte leicht.

[Anmerkung: Eine Untersuchung der Entwicklung der Genauigkeit der prädizierten Uhrkorrekturen durch Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes wurde für die mit dem Programm GNSS-VC/static berechneten Parameter des Prädiktionsmodells nicht durchgeführt. Es sei an dieser Stelle aber auf die diesbezüglichen Berechnungen der mittels Kalman-Filter geschätzten Modellparameter verwiesen (siehe Kapitel 10.3.3).]

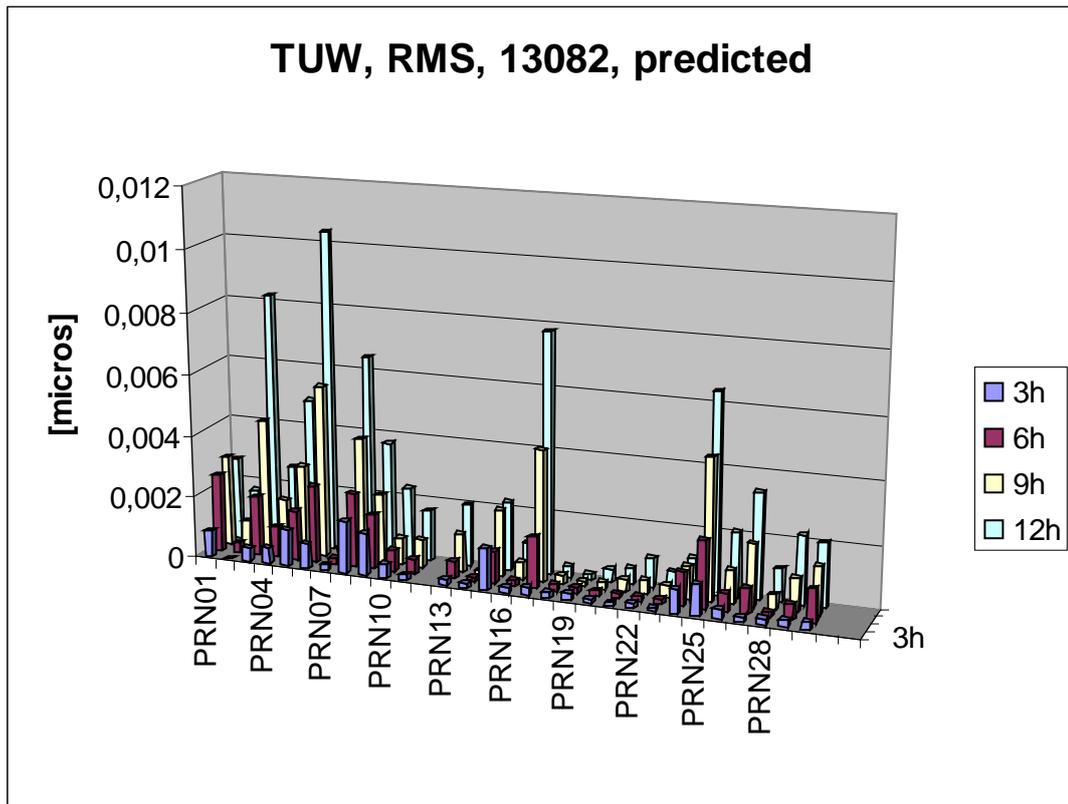


Abb.8.7a: mittlerer Fehler der Uhrkorrekturen der TUV, prädiziert, GPS-Woche 1308, Tag 2

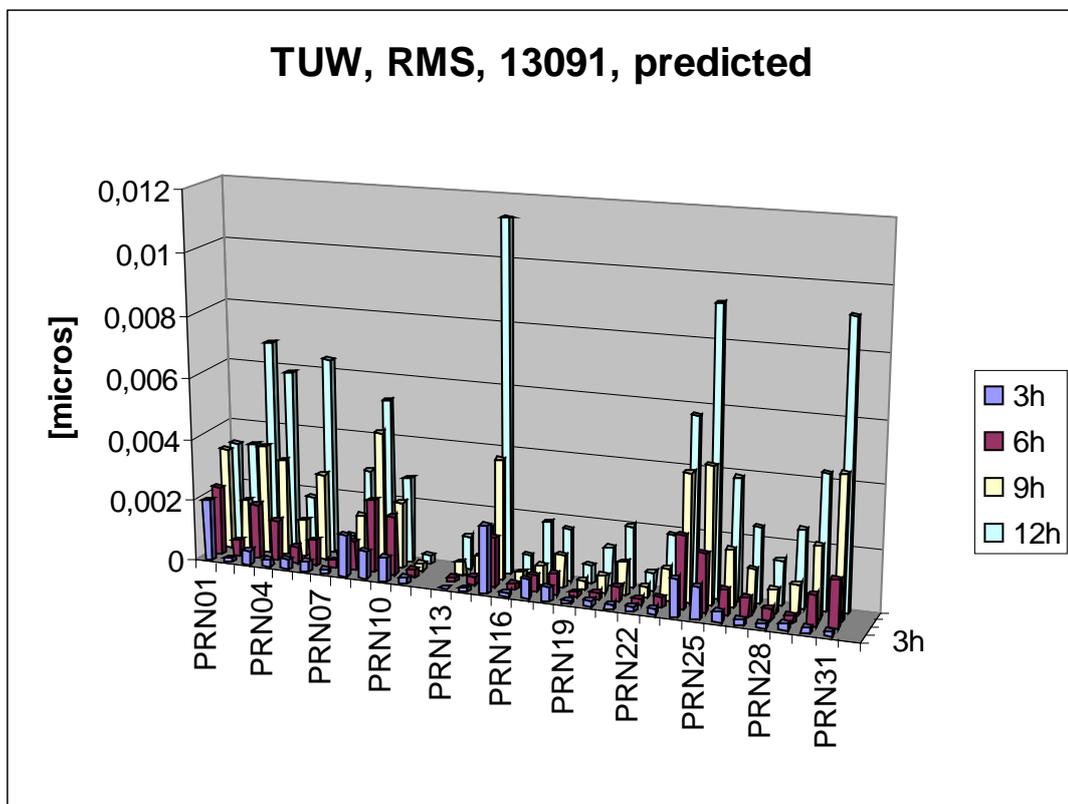


Abb.8.7b: mittlerer Fehler der Uhrkorrekturen der TUV, prädiziert, GPS-Woche 1309, Tag 1

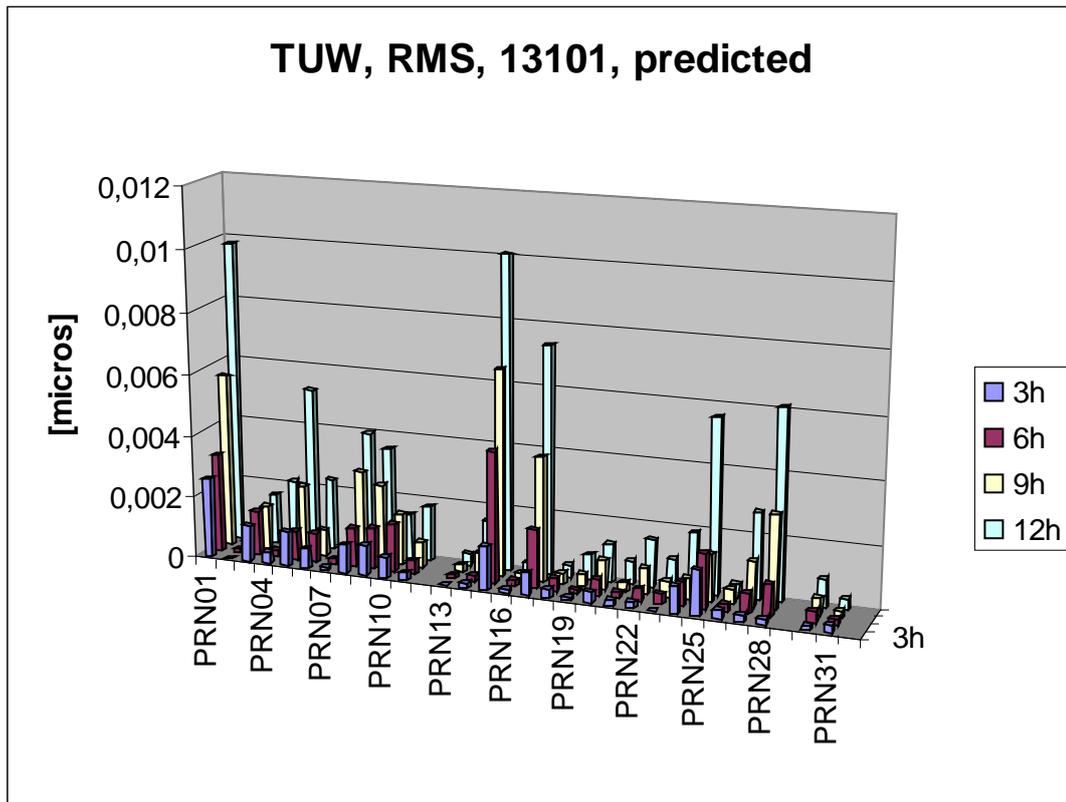


Abb.8.7c: mittlerer Fehler der Uhrkorrekturen der TUW, prädiziert, GPS-Woche 1310, Tag 1

Weiters interessant ist ein Vergleich der mit dem TU Wien-Modell prädizierten Uhrkorrekturdaten mit jenen der ACs des IGS. Über den Verlauf eines Jahres (GPS-Wochen 1250-1310, 21.12.2003-19.02.2005) wurde jeweils das Wochenmittel des mittleren Fehlers bestimmt und in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen. Die für die Berechnungen benötigten täglichen Werte (pro Satellit, AC und Prädiktionsintervall) wurden wie bei der Untersuchung der Ultra-Rapid-Satellitenuhrkorrekturdaten aus Formel (7.2) errechnet (siehe auch Kapitel 8.3.2). Die Berechnungen erfolgten für jeden einzelnen Satelliten für die Prädiktionsintervalle von 3 Stunden bis 12 Stunden.

Während für das 3-Stunden-Intervall alle Institutionen im gleichen Genauigkeitsbereich liegen, teilt sich dieser ab dem 6-Stunden-Intervall in zwei Gruppen. Die Ergebnisse der TU Wien befinden sich z. B. für das 12-Stunden-Intervall mit CODE und GFZ ca. auf dem 5-7 ns Niveau. ESA, NRCan und USNO schneiden eine Spur schlechter ab, die höchsten Werte liegen im Bereich von bis zu 50 ns. In Einzelfällen können für einzelne Satelliten noch höhere Werte erreicht werden.

In den Abb.8.8 sind drei für den Untersuchungszeitraum repräsentative Beispiele dargestellt. Zuerst werden die Ergebnisse der TU Wien mit jene der ACs CODE und GFZ verglichen. Für das 3-stündige Prädiktionsintervall ist das Ergebnis für die beiden Uhrentypen nahezu gleich. Für Abb.8.8a wurde ein Satellit mit aktiver Cäsiumuhr ausgewählt, nämlich PRN01. Die mittleren Fehler pendeln hier für die Gesamtheit der Satelliten um den 1,5 ns-Bereich, was auch im ausgewählten Beispiel gut zu sehen ist. Mit fortschreitender Länge des Prädiktionsintervalls wird der mittlere Fehler der Rubidiumuhren gegenüber den Cäsiumuhren deutlich geringer. Zur Demonstration wurden für das 12-stündige Intervall PRN03 (Cäsiumuhr, Abb.8.8b) und PRN20 (Rubidiumuhr, Abb.8.8c) ausgewählt. Diese repräsentieren sehr gut das Verhalten des jeweiligen Satellitenuhrtyps (mit ca. 5 ns für die Cäsiumuhren und ca. 2 ns für die Rubidiumuhren).

Die Prädiktionsfehler der Uhrkorrekturen von ESA, NRCan (EMR) und USNO liegen für das 3-stündige Intervall in der gleichen Größenordnung wie für die obigen Institutionen. Mit fortschreitender Länge der Prädiktion weichen sie dagegen immer stärker von jenen von TU Wien, CODE und GFZ ab (Abb.8.8a,b). Das GFZ verwendet für die Satellitenuhrenprädiktion einen ähnlichen Ansatz wie TU Wien: Es wird zu einem Grundpolynom ein periodischer Term addiert. Es liegt nun die Vermutung nahe, dass ESA, NRCan und USNO mit einem einfacheren Prädiktionsmodell (linear bzw. ohne periodischen Term) arbeiten.

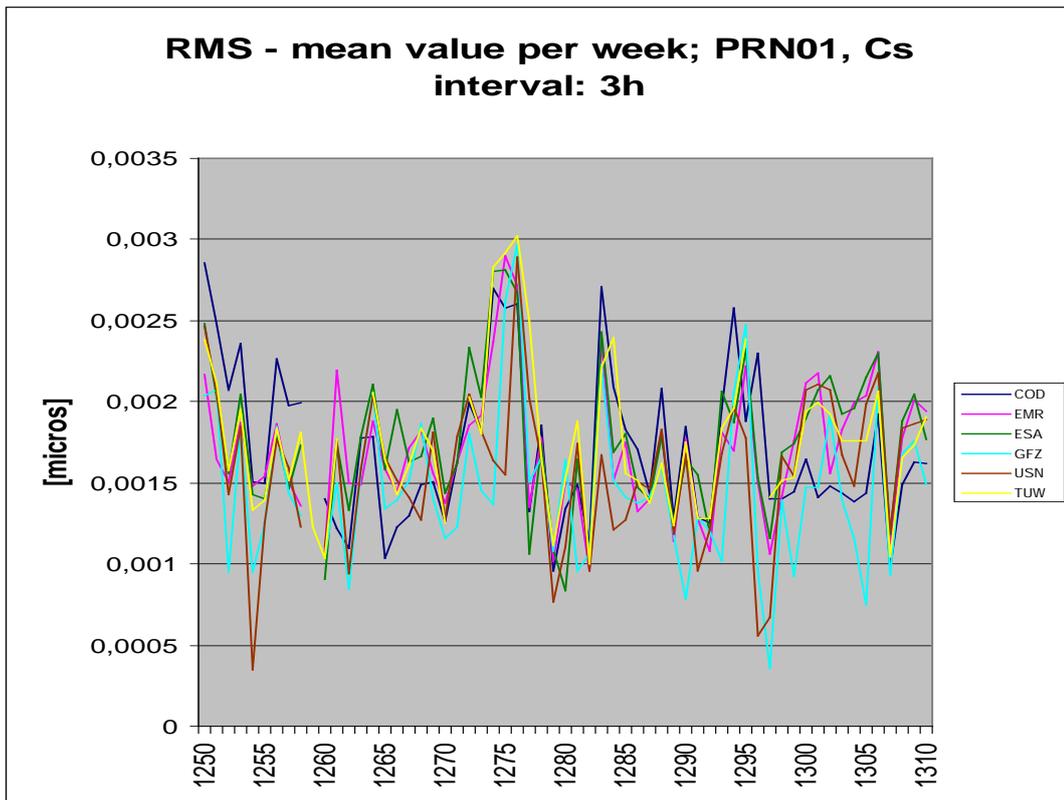


Abb.8.8a: Vergleich der Wochenmittel des mittleren Fehlers des TUV-Modells mit den ACs des IGS, Satellit PRN01, Cs, 3-stündiges Intervall, GPS-Wochen 1250-1310

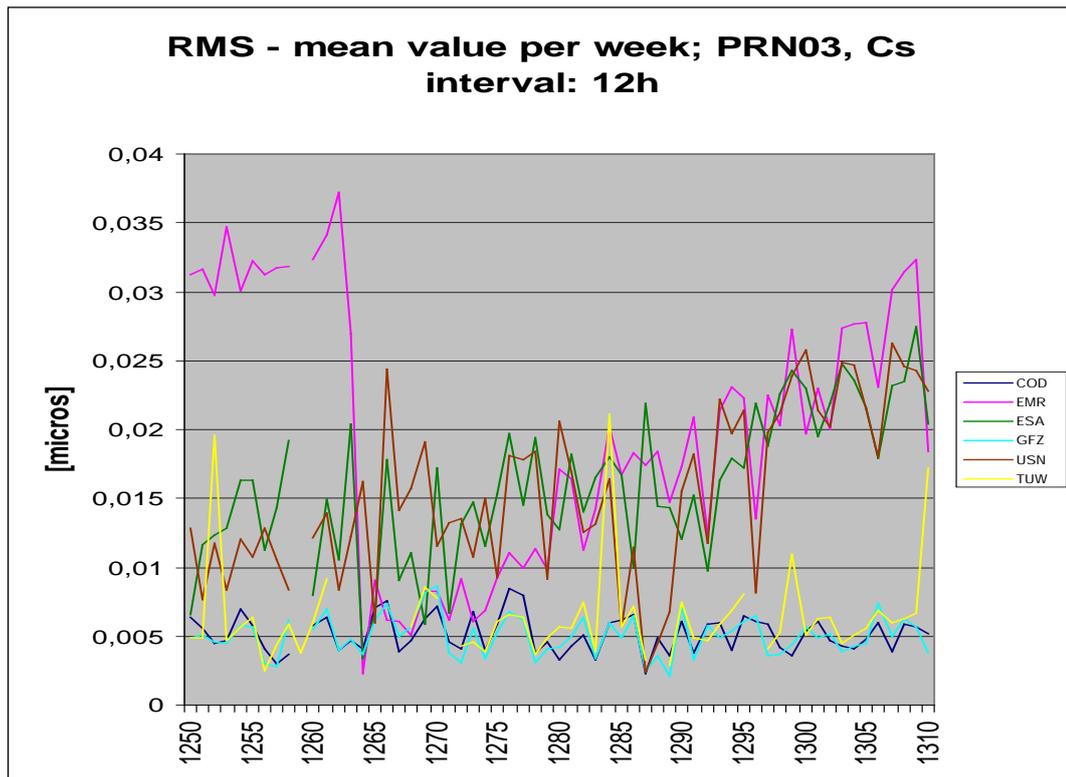


Abb.8.8b: Vergleich der Wochenmittel des mittleren Fehlers des TUV-Modells mit den ACs des IGS, Satellit PRN03, Cs, 12-stündiges Intervall, GPS-Wochen 1250-1310

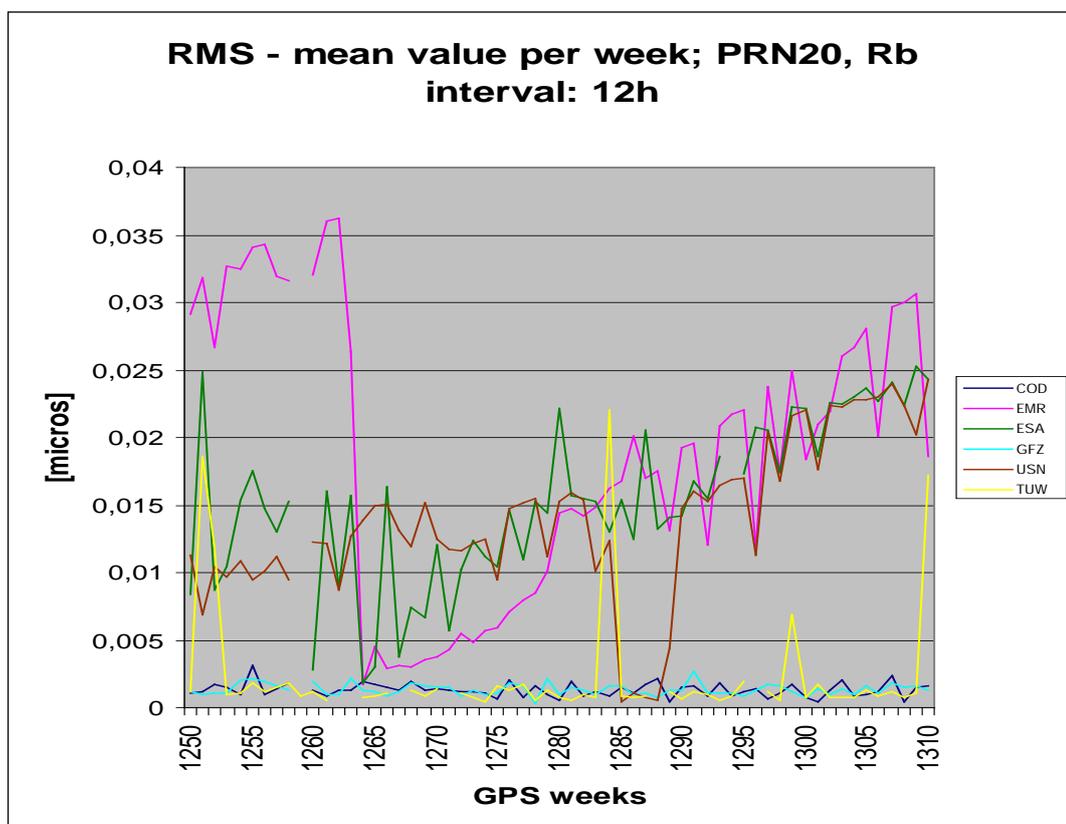


Abb.8.8c: Vergleich der Wochenmittel des mittleren Fehlers des TUV-Modells mit den ACs des IGS, Satellit PRN20, Rb, 12-stündiges Intervall, GPS-Wochen 1250-1310

## 8.4 Periodisches Uhrenverhalten

Im Anschluss an die Ergebnisse der Prädiktionen der GPS-Satellitenuhren soll noch einmal auf das in Kapitel 8.2 gezeigte periodische Verhalten der Cäsiumuhren eingegangen werden.

Zur Erklärung des periodischen Verhaltens der Satellitenuhren und der beobachteten Amplituden drängt sich als erstes ein Zusammenhang mit relativistischen Einflüssen auf. Ein potentieller Kandidat wäre der Einfluss der Ellipsenform der Satellitenbahn auf die Uhrlesung. Dies wurde von im Rahmen der Dissertation [Opitz, 2010] untersucht. Die Abb.8.9 zeigt am Beispiel des Satelliten PRN09 die Auswirkung dieses Effekts für den 13. September 2006.

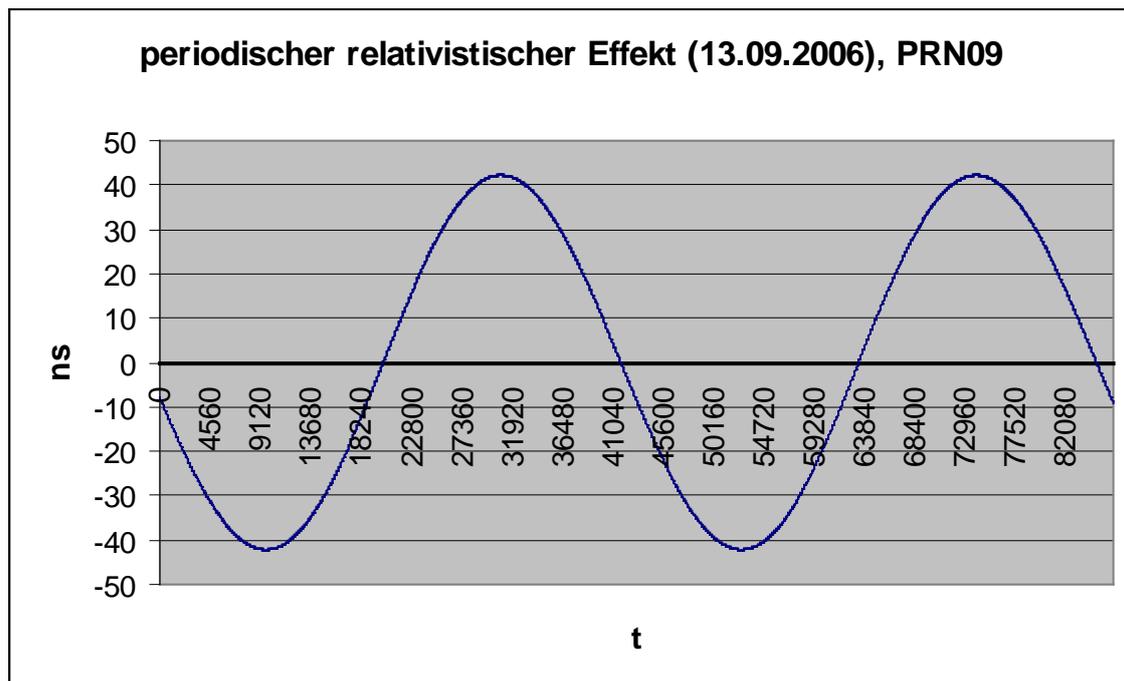


Abb.8.9: periodischer relativistischer Effekt aufgrund der Satellitenbahnexzentrizität

Als Ergebnis dieser Studie kann ein relativistischer Effekt aufgrund der Bahnexzentrizität als Ursache der gefundenen Amplituden als Erklärungsmodell ausgeschlossen werden, denn die Größenordnung der von M. Opitz berechneten Amplituden übersteigen die in Kapitel 8.2 beschriebenen etwa um das Zwanzigfache. Überdies müsste sich ein solcher Effekt auch bei den Rubidiumuhren zeigen, die jedoch keine signifikanten Perioden aufweisen. Auch per Definition sollte der elliptische Effekt nicht in den Uhrzeitserien aufscheinen, sondern ist erst als Korrektur durch den Nutzer zu berücksichtigen.

Interessanterweise verändern sich die Amplituden des 12-stündigen Zyklus der Cäsiumuhren im Laufe eines Jahres. Werden sie als Zeitserie über ein Jahr hinweg aufgetragen, so ist augenfällig eine halbjährliche Periode zu erkennen (siehe Abb.8.10). Auch diese Tatsache schließt einen relativistischen Zusammenhang aus.

Eine Möglichkeit für die Erklärung des unterschiedlichen Verhaltens der beiden Uhrentypen ist aber eine Korrelation des Ganges alter Cäsiumuhren mit der Temperatur. Die auf den Frequenzgenerator wirkenden Temperaturschwankungen sind abhängig von der Lage der Satellitenbahn im Raum in Relation zur Sonne. Um festzustellen, ob die Sonneneinstrahlung wirklich eine periodische Frequenzänderung hervorruft, wurde über den Zeitraum des Jahres 2006 für jeden Tagesbeginn der Winkel  $\kappa$  zwischen der Satellitenbahn und der Verbindungslinie Erde-Sonne berechnet.

Bei der praktischen Berechnung wird zunächst der Winkel  $\bar{\kappa}$  zwischen dem Ortsvektor zur Sonne und der Normalen auf die Satellitenbahn genähert bestimmt.

Der Vektor vom Geozentrum der Erde zur Sonne ergibt sich am Frühlingsbeginn zu

$$\bar{\mathbf{v}}_{ES} = \begin{pmatrix} x_S \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (8.3)$$

Für jeden folgenden Tag wird dieser Vektor nun in der Äquatorebene gedreht, entsprechend der Ellipsenbewegung. Eine weitere Drehung um die x-Achse erfolgt aufgrund der Neigung der Ekliptik zur Äquatorebene, die einen Winkel von  $\varepsilon = 23^\circ 26'$  miteinander einschließen.

Für den Normalenvektor auf die Satellitenbahn wurden zuerst die Ortsvektoren der Satellitenbahn aus zwei zeitlich nicht zu weit auseinander liegende Epochen bestimmt. Da die Koordinaten der Ephemeriden im sp3-Format im ITRF gegeben sind, für diese Berechnungen aber inertial benötigt werden, müssen sie vorab in das ICRF transformiert werden. Dies wird genähert durch eine weitere Drehung um die Rotationsachse der Erde erreicht. Der Drehwinkel ist dabei die Sternzeit in Greenwich. Aus den beiden transformierten, zeitlich benachbarten Ortsvektoren kann die Richtung der Bahnnormalen aus einem Vektorprodukt berechnet werden.

Um den gesuchten Winkel  $\kappa$  zwischen der Satellitenbahnebene und dem Richtungsvektor von der Erde zur Sonne zu bestimmen, wird nun zuerst der Hilfwinkel  $\bar{\kappa}$  zwischen Zweiterem und dem Richtungsvektor der Bahnnormalen berechnet. Der Winkel  $\kappa$  ergibt sich danach aus der Ergänzung des berechneten Winkels  $\bar{\kappa}$  auf  $90^\circ$ :

$$\kappa = 90 - \bar{\kappa} \quad (8.4)$$

Für das Testjahr 2006 kann tatsächlich für einige der Cäsiumuhren eine, wenn auch meist schwache, Korrelation beobachtet werden. Am deutlichsten zeigt sich dieser Effekt bei den Satelliten PRN01, PRN09 und PRN10. Die Abb.8.10 zeigen sowohl die täglich mittels GNSS\_VC/static (siehe Kapitel 8.2.2) geschätzten Amplitude (in grün) als auch den oben beschriebenen Winkel  $\kappa$  (in blau) für die beiden Satelliten PRN01 und PRN10. Befindet sich die Sonne in oder nahe der Satellitenbahnebene ( $\kappa \approx 0$ ), so erreicht der Wert der Amplitude ein Minimum. Steuert der Absolutwert von  $\kappa$  aber auf sein Maximum zu (die Sonne steht hoch über oder unter der Bahnebene), so wachsen auch die Amplituden bis hin zu ihren größten Beträgen an. Beides erfolgt mit einer leichten Phasenverzögerung von etwa zwei bis drei Wochen.

Der Gang alter Cäsiumuhren zeigt also tatsächlich eine Korrelation mit der Temperatur. Möglicherweise ist die Temperaturabschirmung der betreffenden Satelliten nicht optimal. Die Größenordnung der Schwankungen der Amplituden liegt im Bereich von bis zu 6 ns.

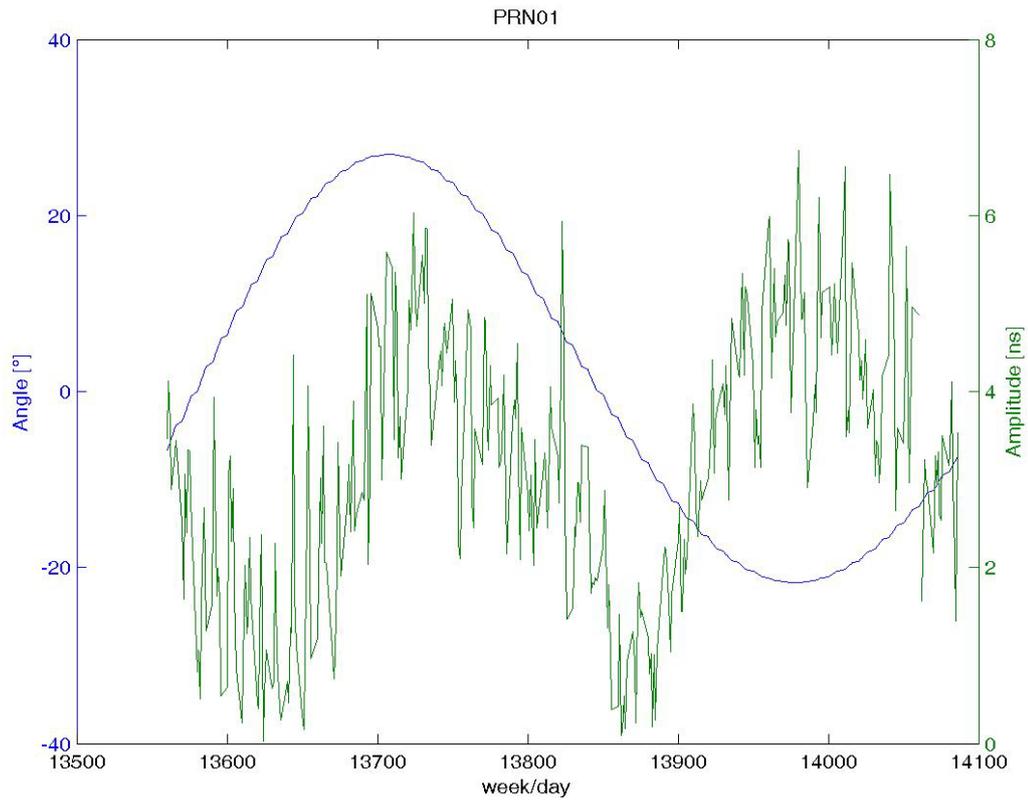


Abb.8.10a: Korrelation Amplitude -  $\kappa$  für PRN01

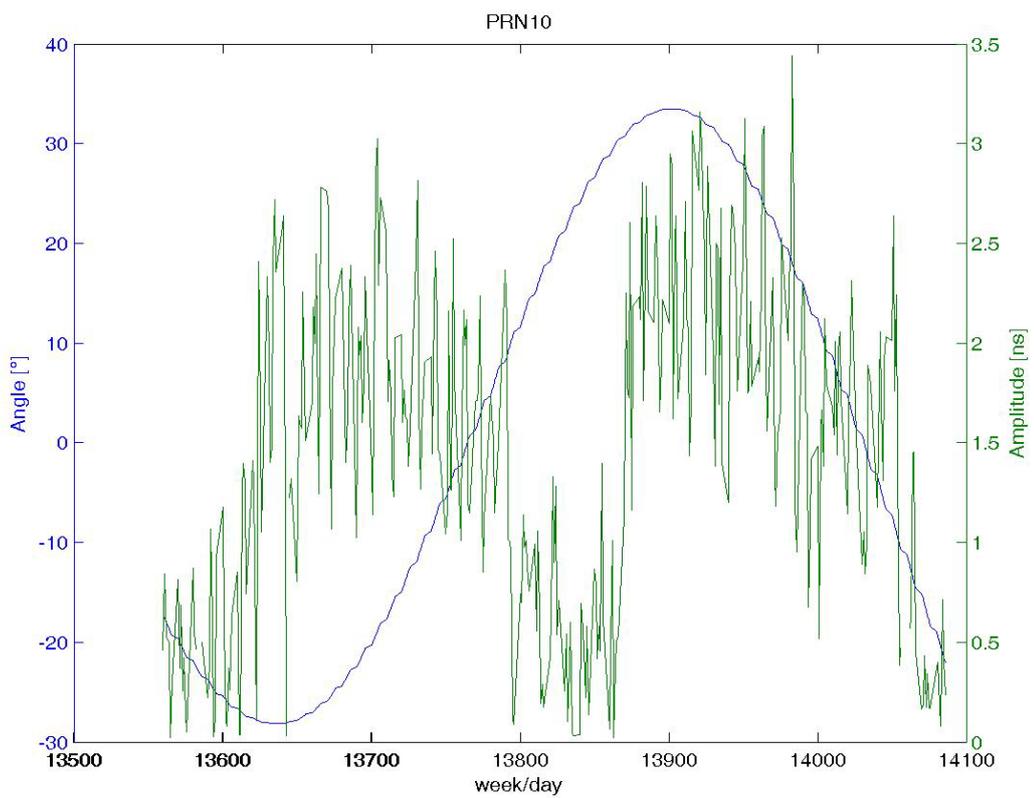


Abb.8.10b: Korrelation Amplitude -  $\kappa$  für PRN10

## 8.5 Approximation und Interpolation von Uhrkorrekturdaten

An dieser Stelle der Arbeit sei noch kurz auf das Thema Approximation bzw. Interpolation von GNSS-Satellitenuhren eingegangen.

Vom IGS werden im 5-Minuten-Takt präzise Satellitenuhrkorrekturen im Clock-RINEX-Format veröffentlicht (Rapid- und Final-Lösungen). Unabhängig davon stellen mehrere ACs Uhrendaten im 30-Sekunden-Takt bereit (z. B. CODE und JPL). Dabei stellt sich die Frage nach der Notwendigkeit einer solchen Datendichte. Will man bei der Punktbestimmung (z. B. PPP) eine Genauigkeit im Bereich von wenigen Zentimetern erzielen, so ist ein Satellitenuhrenfehler von maximal  $\pm 0,1$  ns anzustreben (entsprechend einem Streckenfehler von 3 cm). Mit Hilfe der Daten des JPL wurde die Genauigkeit einer Approximation sowie einer Interpolation von 30-Sekunden-Daten mit den 5-Minuten-Werten des gleichen Datenfiles als Ausgangsbasis untersucht. Als Testwoche wurde die GPS-Woche 1283 ausgewählt.

Für beide Methoden wurden die einzelnen Tage des Testzeitraums in kleine Abschnitte aufgeteilt, die jeweils vier Stützstellen, also eine Zeitspanne von 15 Minuten, umfassen. Aufgrund des aus den vorangegangenen Arbeiten bekannten Uhrenverhaltens sowie der Kürze der einzelnen Teilintervalle wurde als mathematisches Modell ein quadratisches Polynom verwendet. Nach der Ermittlung der Polynomkoeffizienten wurden mit selbigen Uhrkorrekturdaten im 30-Sekunden-Takt berechnet. Im Anschluss erfolgte durch eine einfache Differenzbildung ein Vergleich der neuen Werte mit den vom JPL bereitgestellten Uhrendaten im 30-Sekunden-Takt.

### • Approximation

Die Koeffizienten des quadratischen Polynoms wurden durch einen vermittelnden Ausgleich über jeweils vier aufeinander folgende 5-Minuten-Werte als Stützstellen bestimmt. Jeweils zwischen der zweiten und dritten Stützstelle wurden danach die Uhrkorrekturwerte im 30-Sekunden-Takt berechnet.

Bei einer graphischen Gegenüberstellung wurden jeweils eine Cäsium- und eine Rubidiumuhr als charakteristisches Beispiel ausgewählt. Beim Vergleichen der beiden Datenreihen über 24 h eines Testtages (Tag 0 in der GPS-Woche 1283) fällt für die Cäsiumuhr auf den ersten Blick eine abschnittsweise deutliche Differenz zwischen den approximierten und den JPL-Daten auf (Abb.8.11a), während bei der Rubidiumuhr die Übereinstimmung sehr gut ist (Abb.8.11b). Zur besseren Anschaulichkeit wurde ein vergrößerter Ausschnitt des betreffenden Tages über 25 Minuten gewählt, also fünf approximierende Polynome über einen Zeitraum von 50 Epochen zu je 30 Sekunden (für beide Uhren die gleichen Epochen von Minute 25 bis 75). Die 30-Sekunden-Daten des JPL sind dabei in den Graphiken in blau dargestellt, die approximierten Werte in rosa. Zu den Graphiken ist anzumerken, dass sie auf der y-Achse einen unterschiedlichen Maßstab aufweisen. Um einen objektiven Überblick über das Abweichen der approximierten Uhrkorrekturdaten zu den JPL-Werten zu bekommen, wurden für beide Abbildungen jeweils die Differenzen für den gesamten Tag 12830 entlang der Zeitachse aufgetragen. Hier ist nun deutlich zu erkennen, dass die Abweichungen für die Cäsiumuhr um etwa einen Faktor 3,5 größer sind als jene für die Rubidiumuhr. In den Zeitserien beider Uhren sind auch ein paar wenige Ausreißer zu sehen, die den 0,5 ns-Bereich der Cäsiumuhr sowie den 0,15 ns-Bereich der Rubidiumuhr übersteigen.

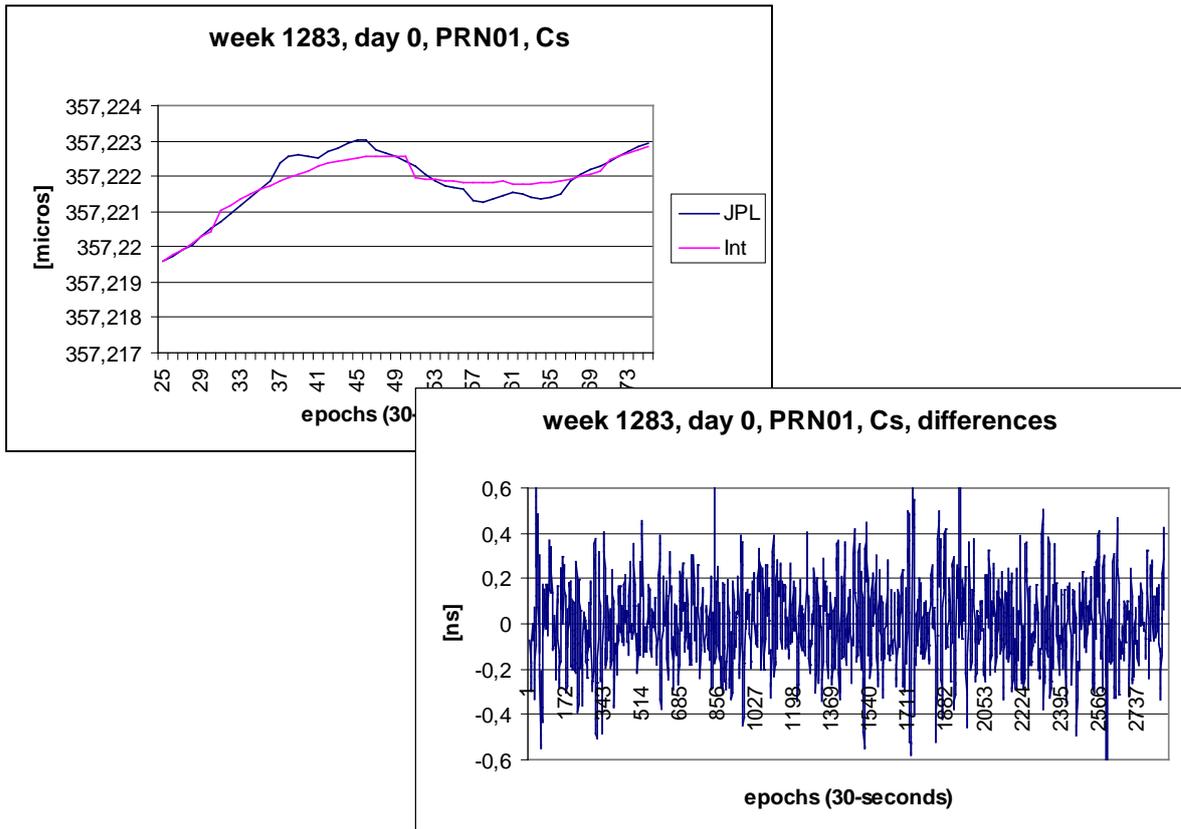


Abb.8.11a: Vergleich JPL - Approximation, PRN01, Cs Datenreihen und Differenzen

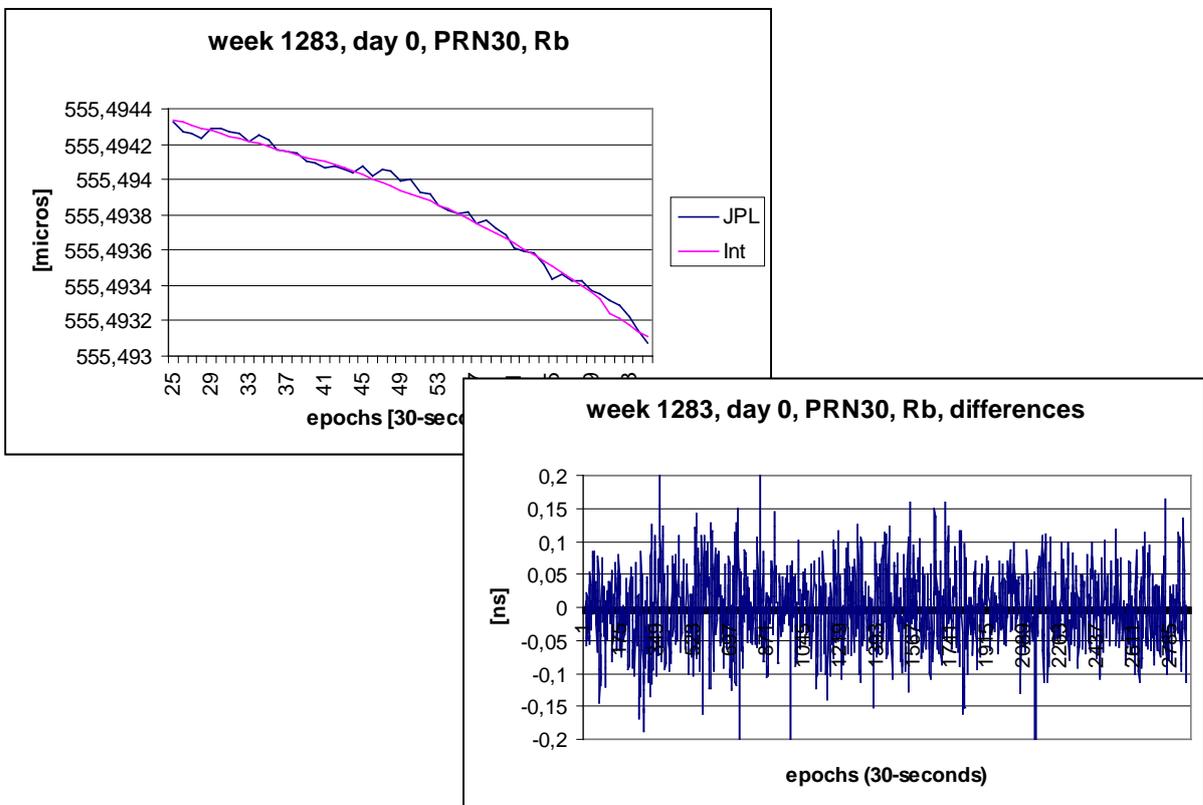


Abb.8.11b: Vergleich JPL - Approximation, PRN30, Rb Datenreihen und Differenzen

Für die approximierten Uhrkorrekturen wird mittels

$$t = \pm \frac{\lceil \varepsilon \rceil}{n}, \quad (8.5)$$

mit:  $\varepsilon$  ..... Differenzen zwischen JPL und approximierten Werten  
 $n$  .... Anzahl der Differenzen

der durchschnittliche Fehler der reinen Differenzen der Zeitserien des JPL und der approximierten Werte über einen Tag berechnet. Da allerdings keine strenge Normalverteilung der Werte vorliegt, kann hier nicht vom durchschnittlichen Fehler auf die Standardabweichung geschlossen werden ( $s \approx 5 \cdot t/4$ ) [Reißmann, 1976]. Der Mittelwert für das Ensemble der Cäsiumuhren liegt bei ca.  $\pm 0,15$  ns, jener der Rubidiumuhren bei ca.  $\pm 0,07$  ns (GPS-Woche 1383, Tag 0). Aufgrund der Kenntnisse über das Verhalten der verschiedenen Uhrentypen war dies zu erwarten.

In weiterer Folge wurde auch der mittlere Fehler der berechneten Differenzen mit Hilfe der Beziehung (7.2) ermittelt, wobei hier statt der IGR-Referenzuhren die 30-Sekunden-Uhrwerte des JPL in die Formel eingehen. Naturgemäß ist auch dieser bei jenen Satelliten, die mit Cäsiumuhren ausgestattet sind, deutlich höher als bei solchen mit Rubidiumuhren. Bei Ersteren erreichen die mittleren Fehler eine Größenordnung von ca.  $\pm 0,19$  ns, während sie sich bei den Rubidiumuhren im Bereich von  $\pm 0,09$  ns und darunter bewegen. Eine Ausnahme bildet Satellit PRN18: Dieser hat zwar im Untersuchungszeitraum eine Rubidiumuhr aktiviert, der mittlere Fehler der Approximation erreicht allerdings dennoch die Größenordnung von 0,2 ns. Die angegebenen Werte sind jeweils die Mittelwerte der einzelnen Satellitenuhren über die gesamte Testwoche. Der mittlere Fehler selbst wurde dabei immer für jeden einzelnen Tag berechnet. In Abb.8.12 wird das Ergebnis graphisch gezeigt und in Tab.8.3 numerisch zusammengefasst. Satelliten mit Cäsiumuhren wurden dabei in blau dargestellt, jene mit aktiven Rubidiumuhren in grün.

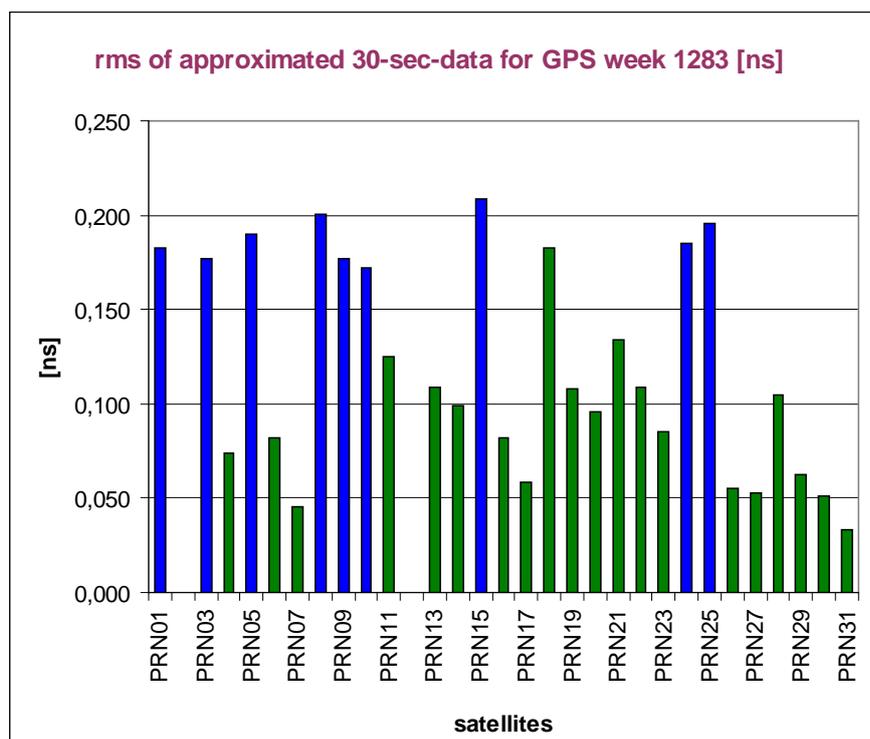


Abb.8.12: rms der approximierten Uhrkorrekturdaten für die GPS-Woche 1283

rms of approximated 30-sec-data for GPS week 1283 [ns]										
week 1283	PRN01	PRN03	PRN04	PRN05	PRN06	PRN07	PRN08	PRN09	PRN10	PRN11
mean value	0,183	0,177	0,074	0,190	0,082	0,046	0,200	0,177	0,172	0,125
clock	CS	CS	RB	CS	RB	RB	CS	CS	CS	RB
week 1283	PRN13	PRN14	PRN15	PRN16	PRN17	PRN18	PRN19	PRN20	PRN21	PRN22
mean value	0,109	0,099	0,208	0,082	0,058	0,182	0,108	0,096	0,134	0,109
clock	RB	RB	CS	RB						
week 1283	PRN23	PRN24	PRN25	PRN26	PRN27	PRN28	PRN29	PRN30	PRN31	
mean value	0,085	0,185	0,196	0,055	0,053	0,104	0,062	0,051	0,033	
clock	RB	CS	CS	RB	RB	RB	RB	RB	RB	

Tab.8.3: rms der approximierten Uhrkorrekturdaten für die GPS-Woche 1283

- **Interpolation**

Die Interpolation der Uhrkorrekturen wurde für unterschiedliche Polynomgrade berechnet, nämlich für eine Funktion ersten und eine Funktion zweiten Grades. Für die lineare Interpolation wurden jeweils zwei im 5-Minuten-Abstand aufeinander folgende Uhrwerte durch eine Gerade verbunden. Das quadratische Interpolationspolynom basiert auf einer Abfolge von jeweils drei 5-Minuten-Werten. Die Interpolation der neuen Werte erfolgt jeweils für das Intervall zwischen der ersten und der zweiten Stützstelle. Die Polynomkoeffizienten wurden für alle Versionen mittels des Interpolationsverfahrens nach Newton ermittelt. Wie bei allen Interpolationsverfahren nehmen die berechneten Polynome in den Stützstellen den jeweiligen Stützwert an. Dadurch ergeben sich beim Vergleichen der berechneten 30-Sekunden-Lösungen mit den Uhrkorrekturdaten des JPL die entsprechenden Differenzen in den Stützstellen zu Null.

In den Abb.8.13 werden die mittleren Fehler der beiden Interpolationsversionen gezeigt. Aus den Graphiken ist zu erkennen, dass die Interpolationsfehler der linearen und der quadratischen Funktion nahezu gleich sind. Dies war aufgrund der Kürze des untersuchten Intervalls von nur fünf Minuten zu erwarten.

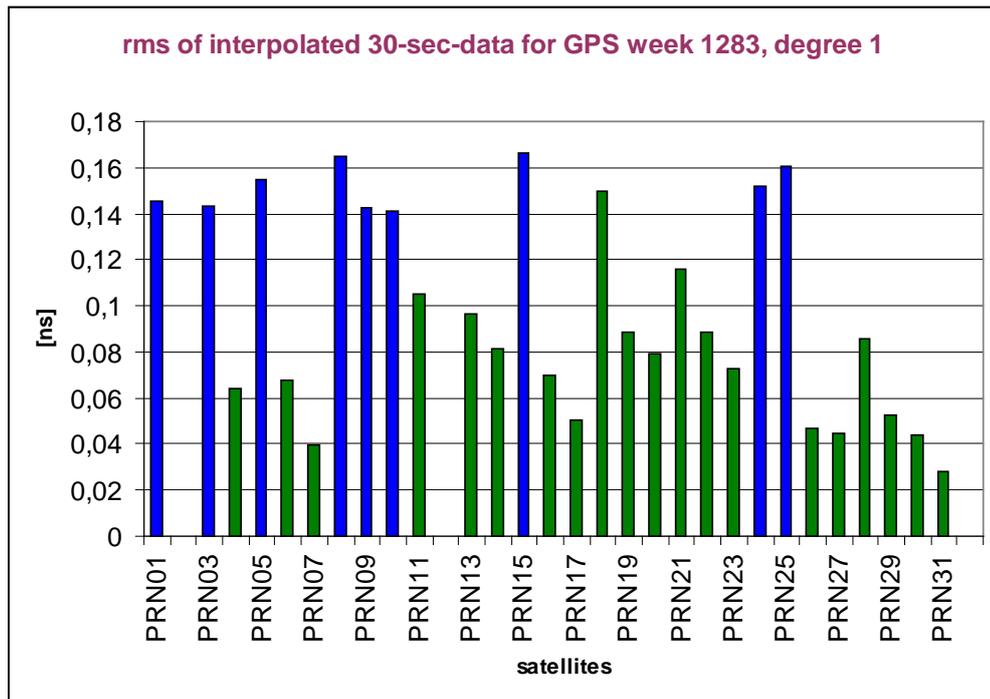


Abb.8.13a: rms der interpolierten Uhrkorrekturdaten für die GPS-Woche 1283 (Polynom: Grad 1)

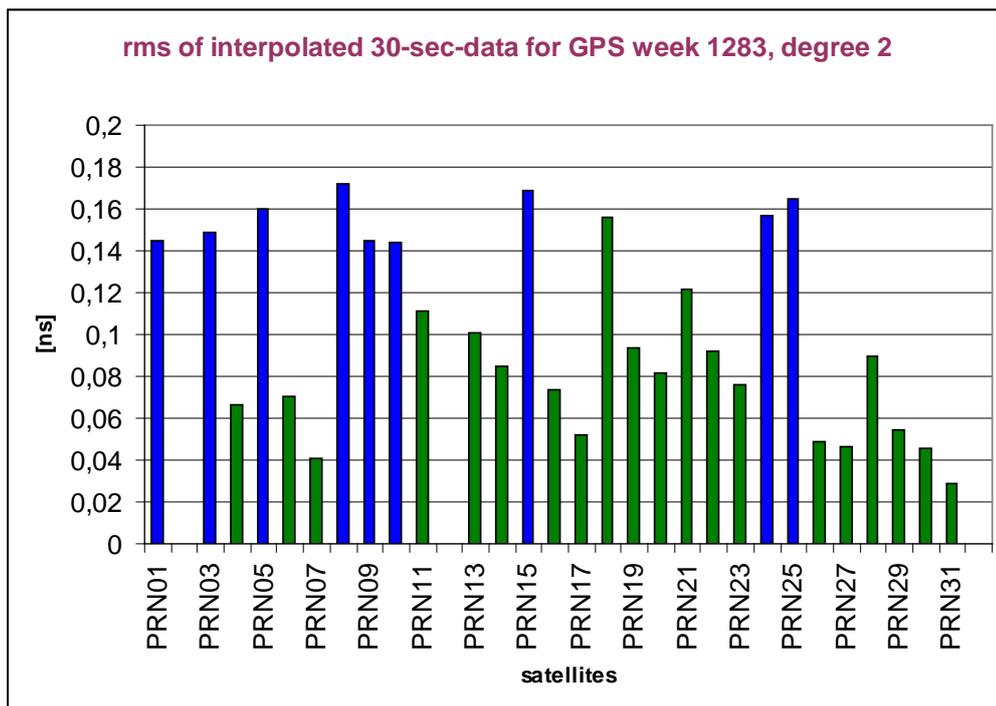


Abb.8.13b: rms der interpolierten Uhrkorrekturdaten für die GPS-Woche 1283 (Polynom: Grad 2)

Die Differenz der mittleren Fehler der beiden Modelle liegt im Mittel bei 3,5 ps. Die größte Abweichung erreicht einen Wert von 7 ps, was einem Streckenfehler von ca. 2 mm entspricht. Daraus folgt, dass für die meisten Anwendungen die beiden Interpolationspolynome als gleichwertig betrachtet werden können. Es werden deshalb für die weiteren Betrachtungen die mit der linearen Interpolationsfunktion ermittelten Ergebnisse herangezogen.

Berechnet man, wie im Abschnitt über die Approximation, den Mittelwert des mittleren Fehlers für die Cäsiumsatellitenuhren, so beträgt dieser  $\pm 0,15$  ns, jener für die Rubidiumuhren liegt bei  $\pm 0,07$  ns. In Tab.8.4 werden die mittleren Fehler für jeden einzelnen Satelliten ausgewiesen.

rms of interpolated 30-sec-data for GPS week 1283 [ns]										
week 1283	PRN01	PRN03	PRN04	PRN05	PRN06	PRN07	PRN08	PRN09	PRN10	PRN11
mean value	0,145	0,143	0,064	0,155	0,067	0,040	0,165	0,143	0,141	0,105
clock	CS	CS	RB	CS	RB	RB	CS	CS	CS	RB
week 1283	PRN13	PRN14	PRN15	PRN16	PRN17	PRN18	PRN19	PRN20	PRN21	PRN22
mean value	0,096	0,081	0,166	0,070	0,050	0,150	0,089	0,079	0,116	0,089
clock	RB	RB	CS	RB						
week 1283	PRN23	PRN24	PRN25	PRN26	PRN27	PRN28	PRN29	PRN30	PRN31	
mean value	0,072	0,152	0,161	0,047	0,045	0,086	0,053	0,044	0,028	
clock	RB	CS	CS	RB	RB	RB	RB	RB	RB	

Tab.8.4: rms der interpolierten Uhrkorrekturdaten für die GPS-Woche 1283

An dieser Stelle soll nun auch ein Vergleich zwischen den mittleren Fehlern aus dem Approximationsverfahren und jenen aus der Interpolation gezeigt werden. Abb.8.14a zeigt diese Gegenüberstellung für die Cäsiumuhren, Abb.8.14b für die Rubidiumuhren.

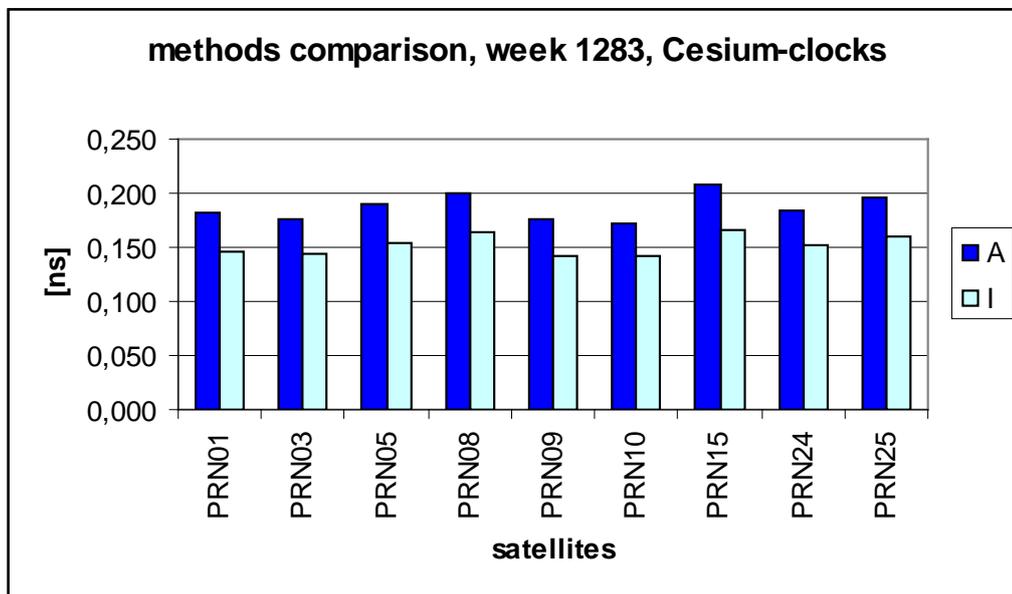


Abb.8.14a: Vergleich des rms der Cäsiumuhrkorrekturen aus Approximation und Interpolation für die GPS-Woche 1283

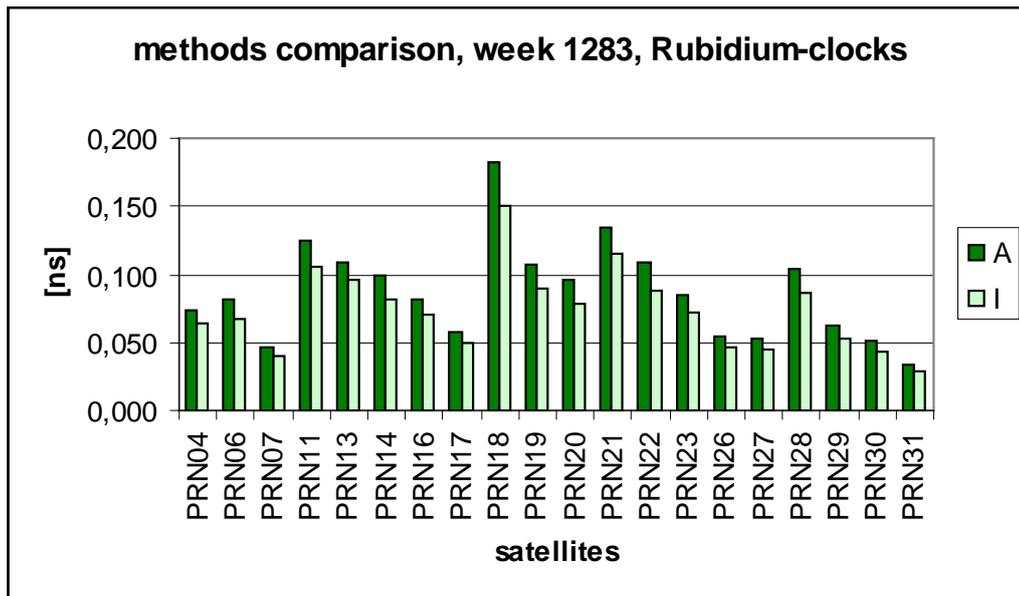


Abb.8.14b: Vergleich des rms der Rubidiumuhrkorrekturen aus Approximation und Interpolation für die GPS-Woche 1283

Es ist aus den beiden Graphiken klar ersichtlich, dass das Interpolationsverfahren für alle Satelliten eine etwas größere Genauigkeit liefert als das Approximationsverfahren. Die aus den beiden Algorithmen errechneten mittleren Fehler werden nun miteinander verglichen. Für die Cäsiumuhren liegt der Mittelwert der Abweichungen bei  $\pm 0,04$  ns, für die Rubidiumuhren bei  $\pm 0,01$  ns. Für alle Satelliten liegt die Genauigkeitssteigerung des Interpolationsverfahren damit im Bereich von 1 cm und darunter.

Der Vollständigkeit halber werden wie bei der Beschreibung der Ergebnisse der Approximation in den Abb.8.15 die Differenzen der Zeitserie einer Cäsiumuhr sowie einer Rubidiumuhr über den gesamten Tag gezeigt. Es wurden dafür wieder der Testtag 0 in der GPS-Woche 1283 und die Satelliten PRN01 (Cäsiumuhr, Abb.8.15a) und PRN30 (Rubidiumuhr, Abb.8.15b) ausgewählt (vgl. Abb.8.11).

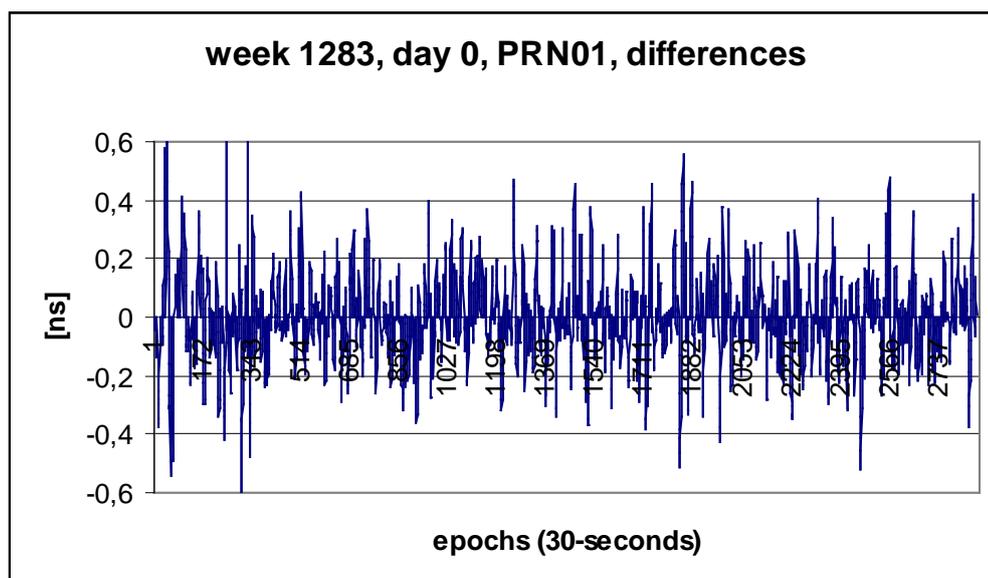


Abb.8.15a: Vergleich JPL - lineare Interpolation, PRN01, Cs Datenreihen und Differenzen

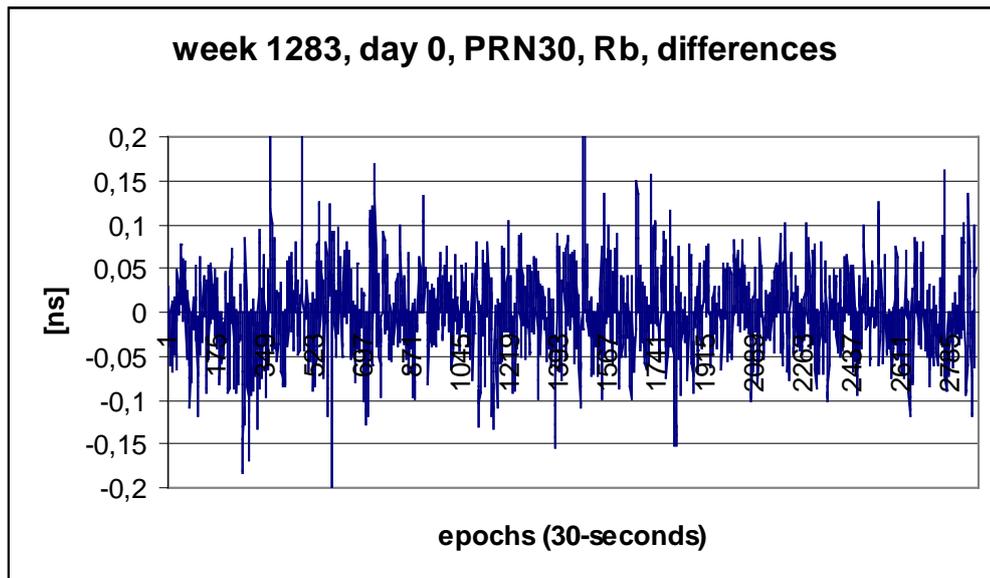


Abb.8.15b: Vergleich JPL - lineare Interpolation, PRN01, Rb  
Datenreihen und Differenzen

Für die lineare Interpolation liegen die Abweichungen der Zeitreihen im Bereich von  $<0,6$  ns für die Cäsiumuhren und von  $<0,2$  ns für die Rubidiumuhren. Das Interpolationsverfahren liefert also etwas genauere Ergebnisse als die Approximation.

Für den Testtag 0 in der GPS-Woche 1283 ergibt sich der durchschnittlichen Fehler der mit dem lineare Modell bestimmten Werte für das Ensemble der Cäsiumuhren zu  $0,11$  ns, für die Rubidiumuhren zu  $0,05$  ns.

Aus den Tab.8.3 und 8.4 folgt, dass der durch die neu berechneten Uhrkorrekturdaten induzierte Streckenfehler jedenfalls unter  $6$  cm ( $\leq 0,2$  ns) liegt. Aus den weiteren Untersuchungen ist zu entnehmen, dass eine Interpolation der 5-Minuten-Daten für beide Uhrentypen zu einem kleineren sowohl mittleren als auch durchschnittlichen Fehler führt als das Approximationsverfahren. Dabei ist ein lineares Interpolationspolynom ausreichend. Die Erhöhung des Grades der Interpolationsfunktion führt nicht nur zu einem größeren Rechenaufwand und damit zu längeren Berechnungszeiten, sondern verschlechtert auch die Ergebnisse. Für praktische Anwendungen ist daher ein lineares Interpolieren der Uhrkorrekturen empfehlenswert.

Zum Schluss wird ein Vergleich mit den Abschätzungen von K. Senior (Abb.8.1) angestellt. In Abb.8.16 werden die Abweichungen der interpolierten Uhrkorrekturen von den Originaldaten des JPL über einen Zeitraum von fünf Minuten aufgetragen. Dafür wurden die entsprechenden Epochen der 288 5-Minuten-Intervalle des Testtages 0 in der GPS-Woche 1283 gemittelt. Die einzelnen Satelliten wurden in Abb.8.16 nicht gekennzeichnet, sondern gemäß ihres Uhrentyps in blau (für die Cäsiumuhren) und in grün (für die Rubidiumuhren) dargestellt. [Anmerkung: Während in Abb.8.1 eine logarithmische Skala verwendet wird, ist dies in Abb.8.16 nicht der Fall.] Die größten Abweichungen erreichen die interpolierten Uhrkorrekturen der einzelnen Satelliten unabhängig vom Uhrentyp etwa in der Mitte des 5-Minuten-Intervalls. Für die Cäsiumuhren liegt das Maximum bei Senior bei  $\pm 0,2$  ns. In Abb.8.16 fällt es etwas geringer aus, der höchste Wert erreicht hier  $\pm 0,18$  ns, der Durchschnitt liegt etwa bei  $\pm 0,15$  ns. Bei den Rubidiumuhren sind diese Werte etwas geringer. Die durchschnittliche Abweichung der interpolierten Uhrkorrekturen der TU Wien-Interpolationslösung von den 30-Sekunden-Daten des JPL beträgt hier etwa  $\pm 0,06$  ns. Etwa denselben Wert erreichen die Rubidiumuhren der Satelliten vom Block IIA auch bei Senior.

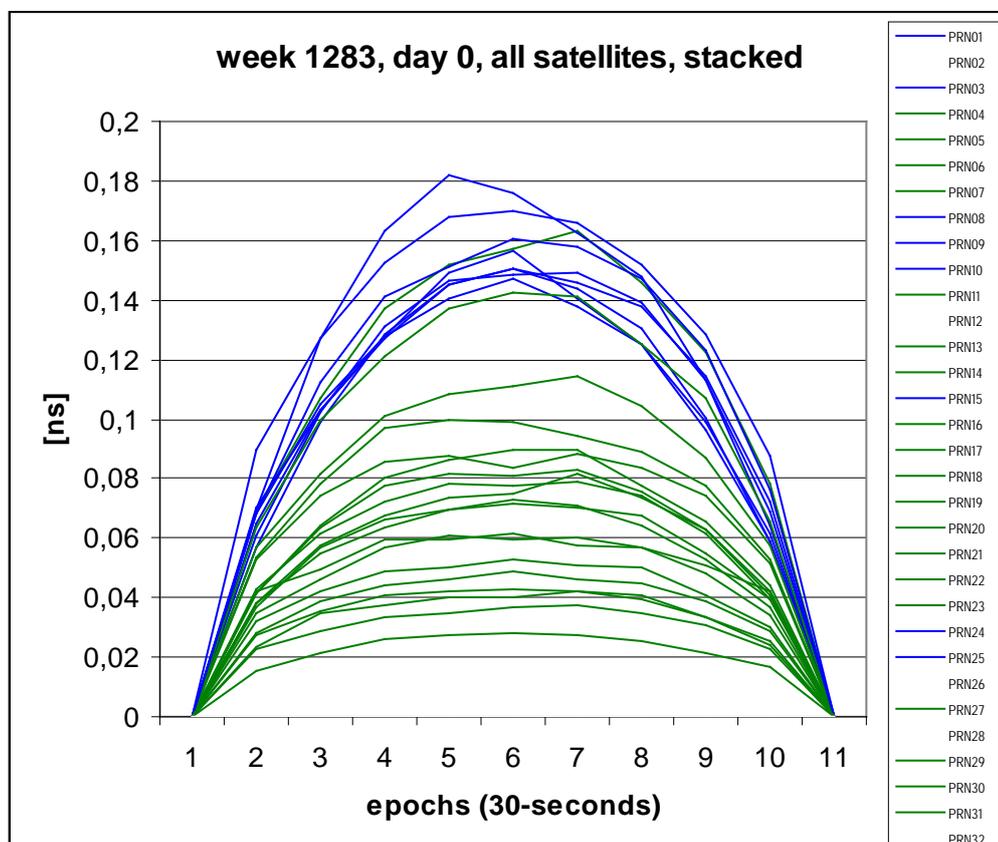


Abb.8.16: Abweichungen Interpolation - JPL, gestapelte 10-Minuten-Abschnitte

## GLONASS - Testscenario einer Uhrenprädiktion

(Kapitel 9)

Nach der Entwicklung eines Prädiktionsmodells für GPS-Uhren wurde in der Folge ein Versuch gestartet, das Modell auch für die Satellitenuhren des russischen Navigationssystems GLONASS (siehe Kapitel 4.2) einzusetzen. Die Ergebnisse sowie eine Diskussion über die speziell bei GLONASS auftretenden Probleme sind in diesem Kapitel dargestellt.

### 9.1 Ausgangsbasis für die Prädiktion von GLONASS-Satellitenuhren

Der Untersuchungszeitraum für die GLONASS-Uhrprädiktion erstreckt sich von der GPS-Woche 1285 (22.08.2004) bis zur Woche 1332 (23.07.2005). Als Eingangsdaten wurde auf Lösungen des IGS (IGL, siehe Kapitel 6) und des Satellitenkontrollzentrums der ESA in Darmstadt, ESOC (European Space Operations Center, ESX-Lösung), zurückgegriffen. Diese konnten mit einer Verspätung von ca. einer Woche vom Server des CDDIS bezogen werden.

In der IGL-Lösung wurden Großteils die Broadcast-Uhrkorrekturen ausgewiesen. Für die Satellitenbahnen wurde bis zur GPS-Woche 1299 (bis 04.12.2004) die BKG-Lösung übernommen, ebenso wieder ab der GPS-Woche 1309 (ab 06.02.2005) [IGL-Summary-Files, 04.03.2010]. Im Zeitraum dazwischen wurde kurzfristig versucht, die BKG- mit den ESA-Bahnlösungen zu kombinieren. Im Falle von zu großen Koordinatendifferenzen der beiden Lösungen für einzelne Satelliten wurden keine Bahnkoordinaten publiziert. Für diese Epochen wurden auch keine Uhren angegeben. Daher kommt es in diesem Zeitraum immer wieder zu Datenunterbrechungen. Die ESX-Uhren wurden hingegen, sofern möglich, aus den Beobachtungen geschätzt. [Anmerkung: Dies kann auch in den Abb.9.2 (glatte Kurvenverläufe bei IGL, Epochenlösungen bei ESX) beobachtet werden.]

Aufgrund der oben erwähnten Verzögerung war die Nutzung der Satellitenuhrkorrekturen für Echtzeitanwendungen nicht möglich, die Prädiktion konnte aber simuliert werden. Wegen der nicht zufriedenstellenden Ergebnisse (siehe Kapitel 9.4) wurde die Prädiktion von GLONASS-Uhren nicht weiter verfolgt. GNSS-VC/static wurde aber trotzdem für eine mögliche zukünftige Verwendung von GLONASS-Satellitenuhren erweitert. Der implementierte Berechnungsalgorithmus entspricht derzeit allerdings grundsätzlich dem für GPS-Uhren und wurde bereits in Kapitel 8.3 beschrieben.

Für diverse Korrekturen (v.a. relativistische Effekte und DCBs) gelten für die GLONASS-Satelliten dieselben Grundlagen wie für die GPS-Satelliten. Es sei auf Kapitel 4.1 verwiesen.

### 10.2 Typ und Verhalten der GLONASS-Satellitenuhren

Die GLONASS-Satelliten waren im Sommer 2004 ausnahmslos mit Cäsiumuhren ausgestattet. In Anlehnung an die Ergebnisse aus der Untersuchung des Verhaltens der Uhren der GPS-Satelliten liegt die Vermutung nahe, dass auch die Satellitenuhren von GLONASS ihren Umlaufzeiten entsprechende Perioden aufweisen. Als Prädiktionsmodell wurde daher ebenfalls ein quadratisches Polynom mit einem zusätzlichen periodischen Term in Form einer Sinusschwingung angesetzt (siehe Gleichung (8.2)). Für eine erste Untersuchung des Verhaltens der GLONASS-Satellitenuhren wurden die ESX-Lösungen herangezogen, da diese, sofern möglich, aus Beobachtungen geschätzt werden. Anhand der Test-GPS-Woche 1286 stellte sich heraus, dass auch die GLONASS-Uhren in zwei Gruppen eingeteilt werden können: Eine zeigt dabei ein periodisches Verhalten, die andere nicht (siehe Tab.9.1). Als „langperiodisch“ wird dabei eine Zyklusdauer von der Umlaufzeit eines Satelliten

definiert, als „kurzperiodisch“ wesentlich kürzere Zyklen (wenige Stunden) mit teilweise sehr kleinen Amplituden. Aus Tab.9.1 ist ebenso ersichtlich, dass kein offensichtlicher Zusammenhang zwischen der Periode und dem Alter der Uhr besteht. Als Beispiele sind in den Abb.9.1 die Uhrkorrekturdaten der Satelliten Slot02 und Slot03 grafisch dargestellt. Satellit Slot02 zeigt dabei das hier als "langperiodisch" definierte Uhrverhalten, während Satellit Slot03 einen klaren Trend zeigt, der von hochfrequentem Rauschen überlagert wird.

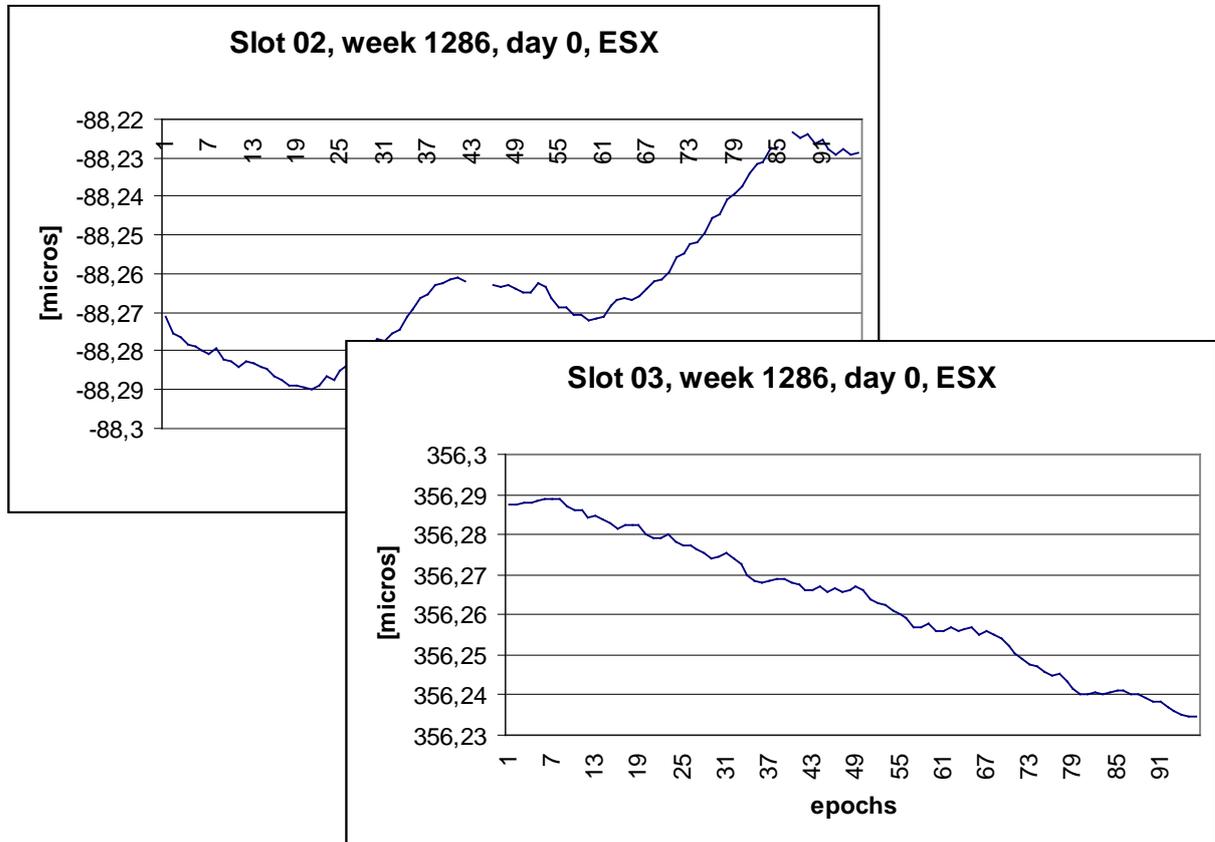


Abb.9.1b: Uhrkorrekturdaten der Satelliten Slot02 ("langperiodisch") und Slot03 ("von hochfrequenten Rauschanteilen überlagerter Trend"), GPS-Woche 1286, Tag 0

Slot	Periode	Launch
02	langperiodisch	02.02.2004
03	Trend mit Rauschen	04.01.2002
04	keine Periode	30.01.2004
05	Trend mit Rauschen	15.04.2003
17	keine Periode	04.11.2000
18	langperiodisch	05.01.2001
21	Trend mit Rauschen	31.01.2003
22	Trend mit Rauschen	10.02.2003
23	keine Periode	31.01.2003
24	keine Periode	21.11.2000

Tab.9.1: Ergebnis der vorab-Untersuchung des Uhrenverhaltens, GPS-Woche 1286

In einer detaillierteren Untersuchung der für die Prädiktion verwendeten Rohdaten für die GPS-Wochen 1305-1313 zeigte sich, dass diese für manche Satelliten ein höchst kompliziertes Verhalten an den Tag legen. Die Daten der IGL- als auch der ESX-Lösung zeigten sich zum Großteil als Eingangsdaten für eine Prädiktion der Satellitenuhrkorrekturen ungeeignet. Jeweils beim Upload neuer Broadcast-Uhrpolynomparameter zeigen die Daten

der IGL-Lösung zumeist einen deutlichen Offset zu den vorhergehenden Epochen. Ebenso ändert sich der quadratische Trend des Uhrenverhaltens. Die meisten Daten beinhalteten zumindest einen Sprung an der Tageshälfte, einige weisen mehrere unregelmäßig über den gesamten Tag verteilte Sprünge auf. Etwa die Hälfte der Satelliten zeigte periodisches Verhalten (ESX-Lösung) oder wurde bei der Broadcast-Lösung (IGL) durch ein quadratisches Polynom beschrieben, welches für kurze Zeitspannen (wenige Stunden) ein periodisches Verhalten (Sinusschwingung) annähert. Die Frequenz schien allerdings nicht immer in unmittelbarem Zusammenhang mit der Umlaufzeit der GLONASS-Satelliten zu stehen. Vereinzelt variierte sogar das Broadcast-Modell innerhalb eines Tages, z. B. von einem nahezu linearen zu einem deutlich quadratischen Verlauf. Einige Beispiele sind in den Abb.9.2 zu sehen, die farbliche Umrahmung entspricht dabei der Farbtafel in Tab.9.2.

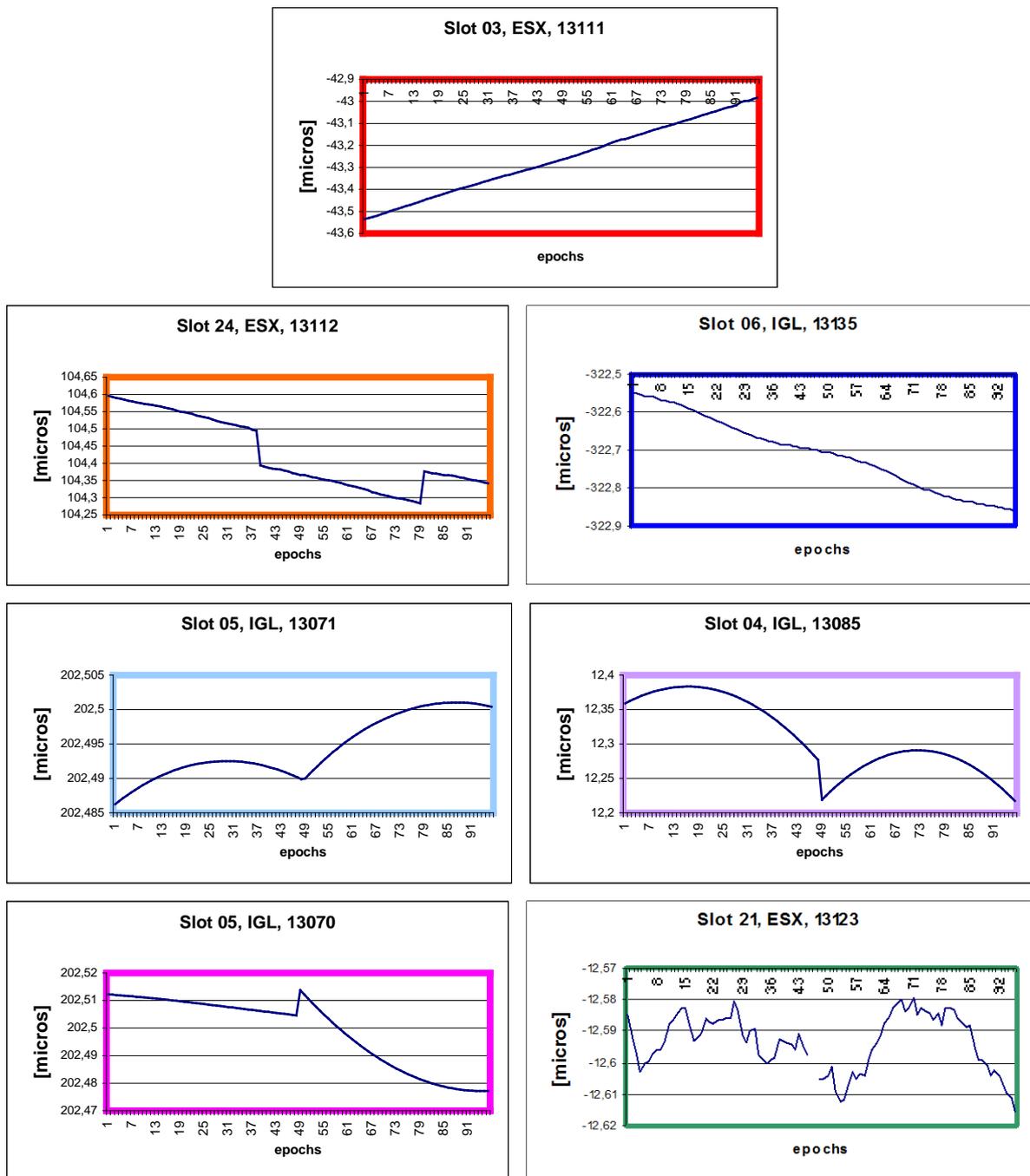
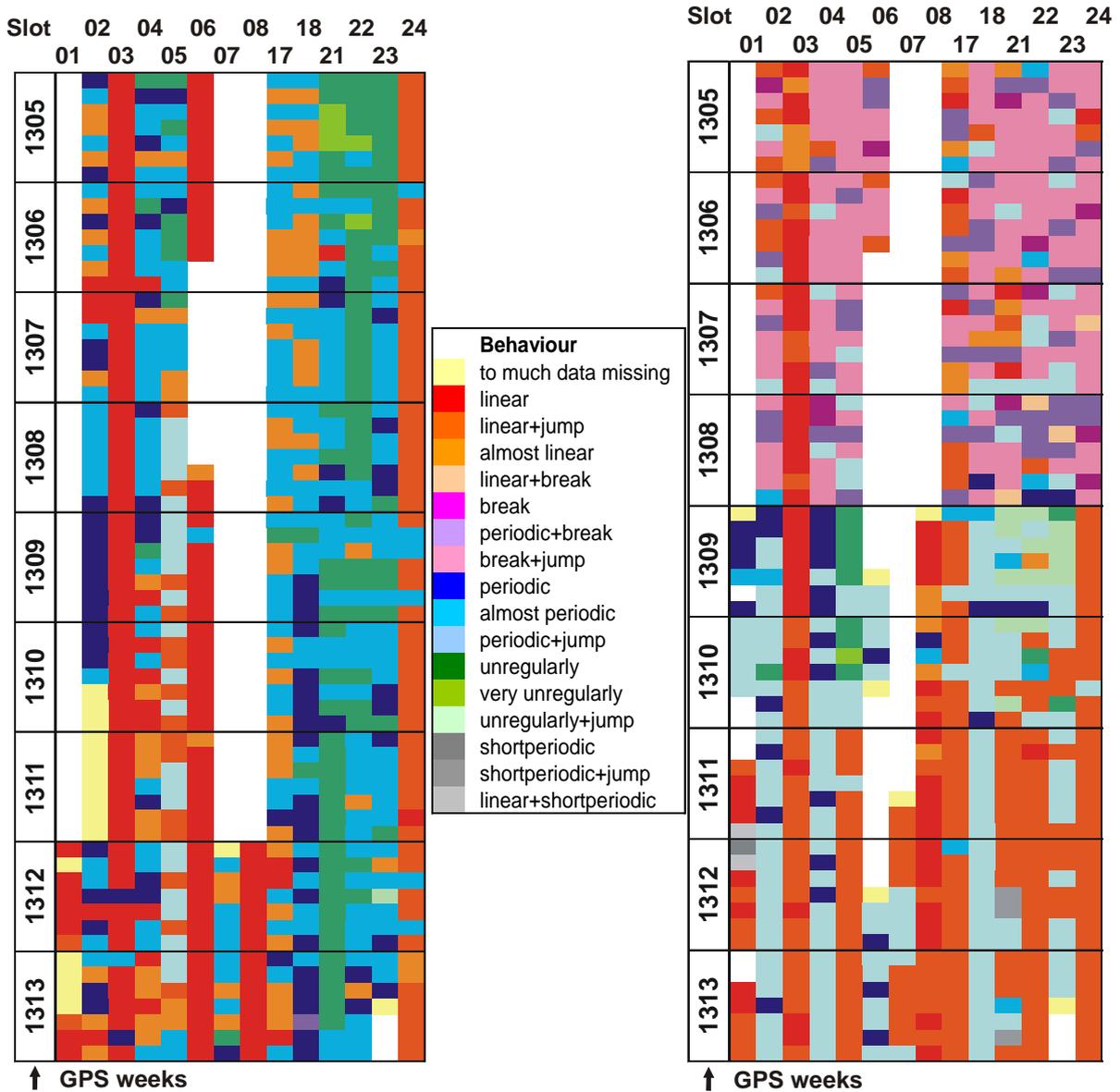


Abb.9.2: Beispiele des Uhrenverhaltens von GLONASS-Satelliten, GPS-Wochen 1305-1313

In Tab.9.2 ist das tägliche Verhalten der einzelnen Satellitenuhren in den GPS-Wochen 1305 bis 1313 graphisch dargestellt. Um Tab.9.2 zu erzeugen wurden für die betroffenen Wochen für jeden Tag und jeden Satelliten Diagramme der Art Abb.9.2 erzeugt. Um einen groben Überblick über das Verhalten der GLONASS-Uhren zu bekommen, wurde auf eine Spektralanalyse mit automatischer Zuordnung einer "Uhreneigenschaft" verzichtet. Die Kurven wurden visuell analysiert.



Tab.9.2: Uhrenverhalten aller Satelliten für jeden Tag von Woche 1305 bis 1313; links: ESX; rechts: IGL

[Zum besseren Verständnis der Tabelle soll die Legende hier detailliert erläutert werden: Ein Überblick über das Verhalten der GLONASS-Uhrkorrekturdaten wird durch die "Farbgruppen" vermittelt. Die Farben sind dabei mit Abb.9.2 abgestimmt. Rot/Orange: die Zeitserien weisen einen linearen Trend auf; blau: quadratisches Polynom (weist auf ein periodisches Uhrverhalten hin, welche die Umlaufzeit des Satelliten widerspiegelt); rosa/lila: viele kurze Abschnitte; grün: epochenweise Lösungen, bei welchen keine funktionaler Trend erkennbar ist; grau: Perioden unter einer Umlaufzeit; gelb: zu wenig Daten für eine Charakterisierung vorhanden, weiß: keine Daten vorhanden; "jump" bedeutet einen Offset beim Übergang auf ein neues Uhrverhalten, "break" einen Abschnitt, an dem keine Daten vorliegen. Mit "periodic" ist jeweils eine Periode von der Dauer der Umlaufzeit eines Satelliten gemeint, während "shortperiodic" alle kürzeren Perioden mit einschließt.]

Betrachtet man in Tab.9.2 die Darstellung der IGL-Daten (rechts), so ist die Farbänderung des Musters in der Mitte der Graphik auffällig. Dies resultiert aus der Änderung der Berechnungsweise der Satellitenuhren von Woche 1308 auf 1309, wie schon in Kapitel 9.1 beschrieben.

Interessant ist auch das unterschiedliche Verhalten der von IGL und ESX ausgewiesenen Uhrkorrekturen. Hierzu soll nochmals zu erwähnt werden, dass in den ESX-Lösungen versucht wurde, epochenweise Korrekturen zu berechnen, sofern ausreichend Daten vorlagen. In den Wochen 1305 bis 1308 zeigen die meisten Satelliten in der IGL-Lösung ein durch ein quadratisches Polynom der Broadcastinformation angenähertes periodisches Verhalten, wobei es hier sehr oft zu kurzen Datenausfällen und Sprüngen kommt. Dadurch ergibt sich auch die auffällige rosa Färbung dieses Bereiches. Die einzige Übereinstimmung in den ersten vier Wochen findet sich für die Uhr von Satellit Slot03, welche sowohl bei ESX also auch bei IGL ein lineares Verhalten zeigt. In den ESX-Lösungen gibt es in diesen Wochen drei Satellitenuhren, die mit einem linearen Modell beschrieben werden. Es handelt sich um Slot03, Slot06 und Slot24. Bei Slot24 kommt es allerdings immer wieder zu Sprüngen in den Daten (jeweils beim Upload eines neuen Uhralmanachs), was sie als Basis für eine längerfristige Prädiktion ungeeignet macht.

Die restlichen Satellitenuhren verhalten sich sehr unregelmäßig. Zwei "Haupttrends" sind hierbei erkennbar: Manche Satelliten, wie z. B. Slot02, Slot17 oder Slot18 wechseln zwischen einer als "linear" und einer als "als periodisch" interpretierbaren Charakteristik ab. Für die restlichen Satelliten (in Tab.9.2 grün dargestellt) kann keine einfache funktionale Beschreibung der Datenreihe gefunden werden.

Betrachtet man die gesamte Tabelle von GPS-Woche 1305 bis 1313 so fällt auf, dass sich nur die Datenserie für den Satellit Slot03 auf beiden Seiten gleicht. Dessen Uhr zeigt sowohl bei IGL, als auch bei ESX nicht nur für die ersten vier Wochen (siehe oben), sondern sogar über den gesamten Untersuchungszeitraum ein lineares Verhalten. Für etwa die Hälfte der Zeit trifft dies auch für Satellit Slot17 zu, wobei hier ab Woche 1309 speziell für IGL ein lineares Modell in den Vordergrund rückt. Bei ESX wechselt das Modell für die Uhr von Slot17 zwischen periodisch und "fast linear".

Obwohl sich ab der GPS-Woche 1309 das Modell der IGL-Lösungen ändert (siehe Kapitel 9.1), findet sich außer den beiden oben erwähnten Satelliten Slot03 und Slot17 wenig Übereinstimmung mit der ESX-Lösung. Lediglich Satellit Slot18 zeigt nun bei beiden Datenreihen Perioden, wenn auch bei den IGL-Daten vermehrt Offsets auftreten. Für die Satelliten Slot02, Slot04, Slot06, Slot21, Slot22 und Slot23 zeigen die funktionalen Modelle keine Ähnlichkeit. Lediglich für Satellit Slot05 kommt es zu einer tageweisen Gleichartigkeit. Die Satelliten Slot01, Slot07 und Slot08 können hier für einen Vergleich nicht herangezogen werden, da für sie in den GPS-Wochen 1305 bis 1308 keine Uhrkorrekturdaten vorliegen. Danach zeigen aber, so Daten vorhanden sind, die Satelliten Slot01 und Slot08 das gleiche (lineare) Verhalten, mit dem einzigen Unterschied vom vermehrten Auftreten von Offsets in den IGL-Lösungen aufgrund von Broadcast-Uploads.

Im Sommer 2005 konnte bei einer neuerlichen Untersuchung der IGL-Lösungen mit Hilfe einer Fast-Fourier-Transformation für fast alle Uhren eine Periode von 11 h 15 min gefunden werden, was der Umlaufzeit der GLONASS-Satelliten entspricht. Schwierigkeiten für die Bestimmung der Prädiktionsparameter bereitete aber weiterhin der Verbleib kleiner Zeitsprünge in der Größenordnung bis zu einigen 10er-Nanosekunden, die bei einzelnen Satelliten sehr häufig auftreten können (siehe Abb.9.3).

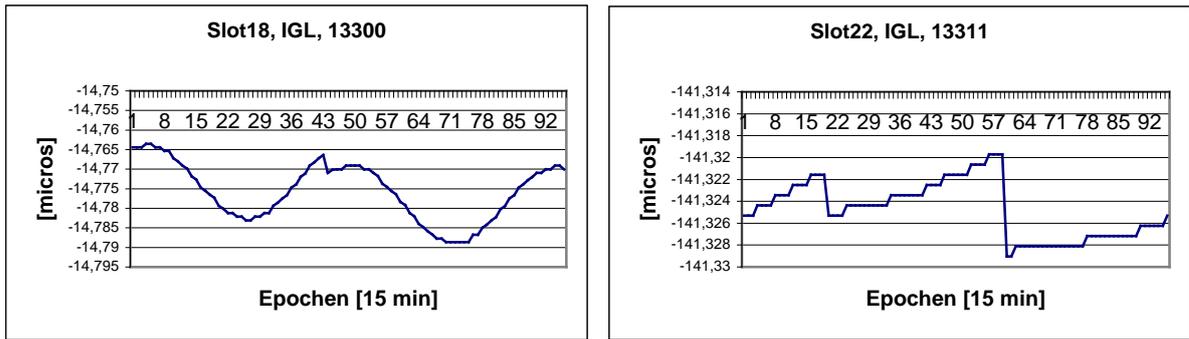


Abb.9.3: IGL-Uhrkorrekturdaten in den Wochen 1330 und 1331 für Slot18 und Slot22

### 9.3 Sprung an der Tagesgrenze

Ebenso wie die Uhrkorrekturwerte der GPS-Satellitenuhren werden die GLONASS-Uhrkorrekturdaten bei ESOC jeweils in Tagesabschnitten bestimmt. Aus diesem Grund weisen auch sie an den Tagesgrenzen eine unterschiedliche Drift sowie einen Sprung auf. Dieser Offset erreicht bei GLONASS wesentlich größere Beträge (einige  $\mu\text{s}$ ) als bei GPS. Abb.9.4 zeigt als Beispiel die Uhrkorrekturen vom Satellit Slot02 in dem GPS-Wochen 1286 und 1287. Um kontinuierliche Zeitserien als Eingangsdaten für die Prädiktion zu erhalten, werden die Sprünge an den Tagesgrenzen sowie das unterschiedliche Driftverhalten in der gleichen Weise behandelt, wie für die GPS-Satellitenuhren (siehe Kapitel 8.3.1.).

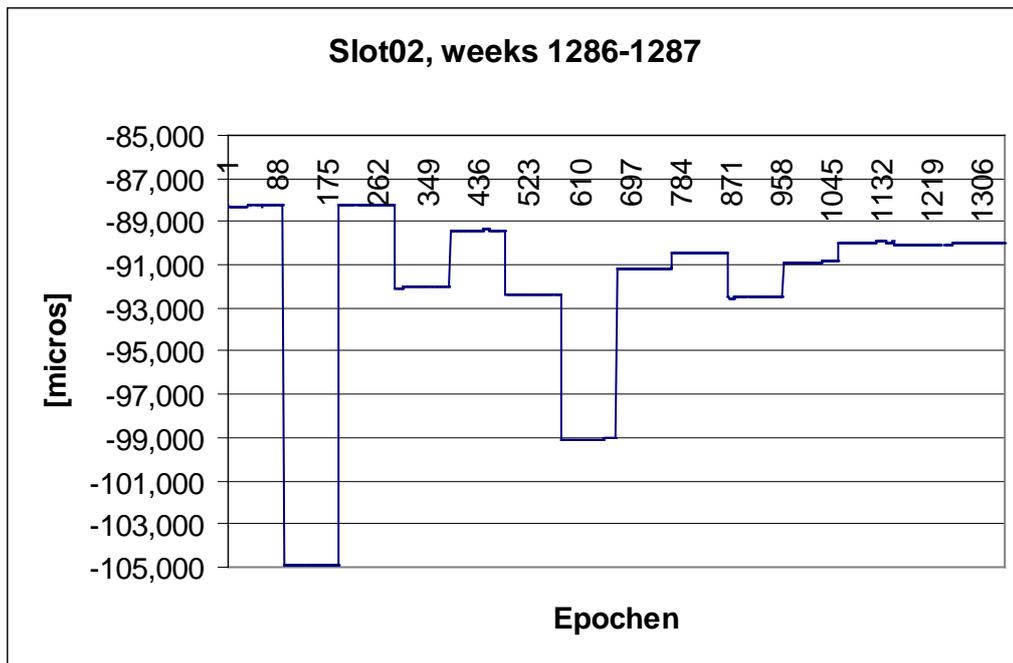


Abb.9.4: ESOC-Uhrkorrekturdaten für Slot 02, GPS-Woche 1285, eine Epoche entspricht 15 min

## 9.4 Prädiktion - Praktischer Test

Als Eingangsdaten für die Prädiktion der GLONASS-Satellenuhren wurden die ESOC-Uhrkorrekturen herangezogen. Der Grund dafür ist, dass selbige als epochenweise Lösung berechnet werden, während das BKG für die IGL-Dateien auf die Broadcast-Lösungen zurückgreift. Die Verwendung der IGL-Uhren als Basisdaten würde somit zu einer Prädiktion aus bereits prädizierten Daten führen. Auch als Referenzdaten für die anschließenden Vergleiche wurden die ESOC-Lösungen verwendet.

Wie bereits im Kapitel über die Prädiktion von GPS-Satellenuhren (Kapitel 8.3.1) beschrieben, wurde auch für die GLONASS-Uhrprädiktion durch die Datensätze von zwei aufeinander folgenden Tagen je eine Regressionsgerade gelegt. Danach wurde die Drift der Uhren des ersten an jene des zweiten Tages angeglichen. Wie für GPS müssen auch für die GLONASS-Satelliten die Offsets an der Tagesgrenze im Prädiktionsalgorithmus berücksichtigt werden. Zusätzlich sind noch die unregelmäßig auftretenden Sprünge innerhalb der einzelnen Tage zu eliminieren. Hierbei wird nach dem gleichen Schema vorgegangen: Aus dem jeweils letzten Wert vor dem Sprung und dem ersten Wert nach dem Sprung wird die Differenz gebildet. Diese wird danach an jeden Wert der Daten vor dem Sprung so angebracht, dass der Offset an der Grenze verschwindet.

Die Abb.9.5 zeigen zwei Beispiele von typischen Prädiktionsergebnissen für GLONASS. Mit fortschreitender Prädiktionsdauer vergrößern sich die Abweichungen der extrapolierten Uhrkorrekturen zu den Vergleichsdaten (ESOC). Da die prädizierten Daten der TUW (TU Wien) freilich einen glatten Verlauf aufweisen, kann man in den beiden Abbildungen wiederum die Sprünge der Referenzdaten erkennen. Ebenso wie aus Tab.9.2 ist auch hier schnell zu erkennen, dass der Großteil dieser Zeitserien mindestens eine Sprungstelle aufweist, für einige Satelliten erfolgen sogar mehrere Sprünge in kurzen Abständen hintereinander. Bei GLONASS handelt es sich im Untersuchungszeitraum fast ausschließlich um Sprünge der einzelnen Satellenuhren und nicht um einen Offset der Referenzuhr, der an einem gemeinsamen Sprung der Uhrwerte aller Satelliten zum gleichen Zeitpunkt erkennbar wäre. Deshalb ist es nicht sinnvoll, solche Uhrwerte für eine Prädiktion einzusetzen. Die Daten könnten jeweils vom Zeitpunkt ihrer Verfügbarkeit immer nur über wenige Epochen hinweg verwendet werden. Eine Nutzung wäre nur unter der Voraussetzung umsetzbar, dass die Berechnung in Echtzeit und mit einem relativ kurzen Update-Intervall von wenigen Minuten erfolgen würde.

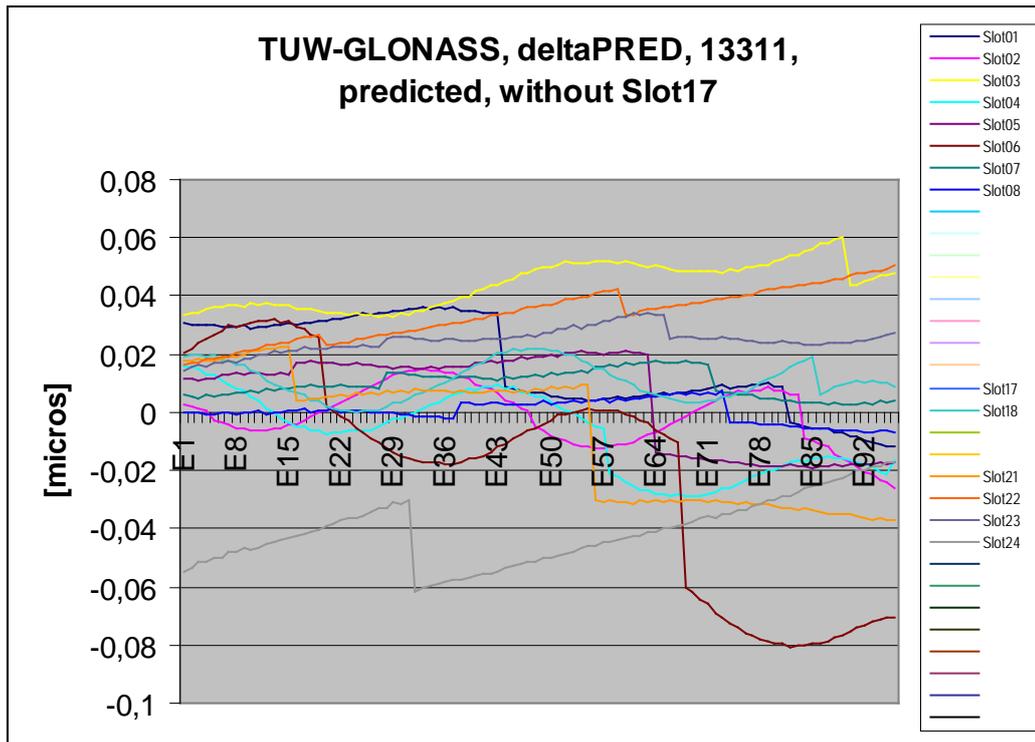


Abb.9.5a: DifferenzenTUW-GLONASS (ESX), prädiziert, GPS-Woche 1331, Tag 1

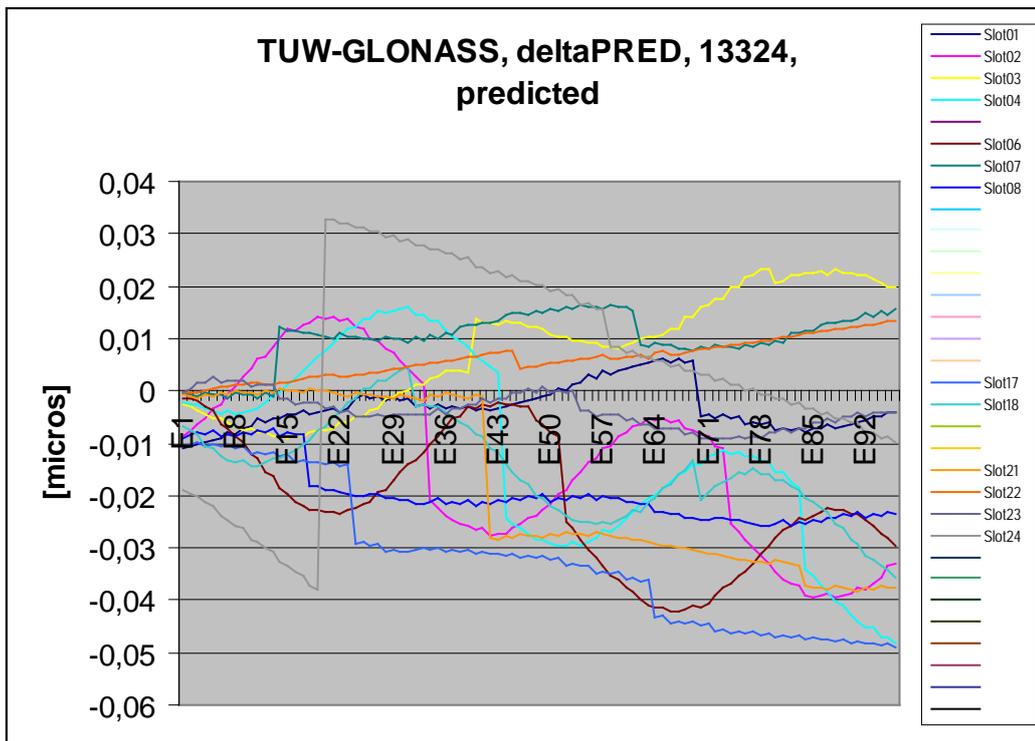


Abb.9.5b: DifferenzenTUW-GLONASS (ESX), prädiziert, GPS-Woche 1332, Tag 4

Der Offset aufgrund der Tagessprünge führt dazu, dass sich die zu den Vergleichsdaten in der ersten Epoche gebildeten Differenzen nicht zu Null ergeben. Um optisch einen besseren Eindruck vom Auseinanderdriften der prädizierten Uhrkorrekturdaten mit der Zeit zu bekommen, können auch hier die individuellen Sprünge berechnet und an die Ergebnisse angebracht werden. In Abb.9.6 ist ein Beispiel einer derartigen „Korrektur“ im kleinen

Diagramm zu sehen, das große Bild zeigt die gleiche Prädiktion ohne zusätzliche Differenzbildung.

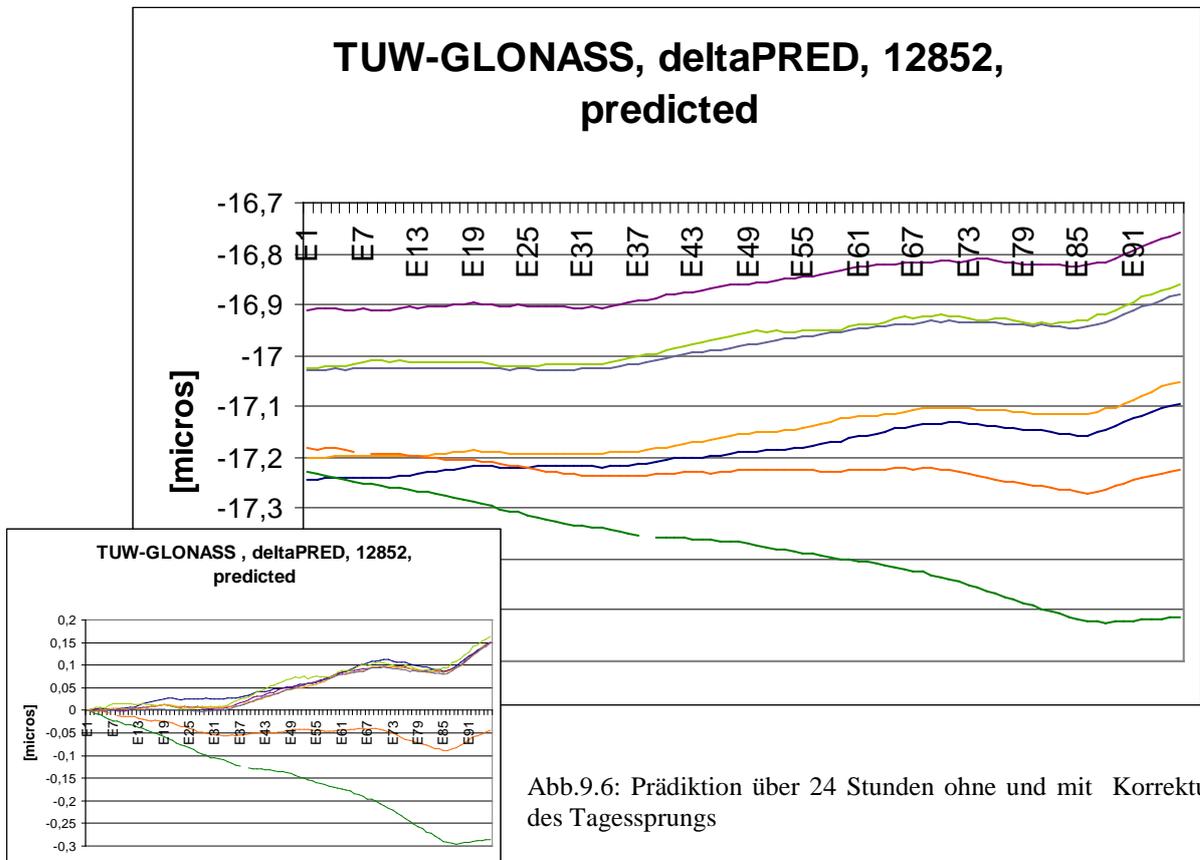


Abb.9.6: Prädiktion über 24 Stunden ohne und mit Korrektur des Tagessprungs

Gleichsam wie für GPS wurde auch für die prädizierten GLONASS-Uhrkorrekturdaten für unterschiedlich lange Vorhersageintervalle ein mittlerer Fehler mittels Beziehung (7.2) berechnet. Als Referenz wird die ESX-Lösung verwendet. Die Intervalle starten jeweils um 00:00 UTC, beginnend mit einer Dauer von drei Stunden. Die restlichen Intervalle verlängern sich zum vorhergehenden Intervall jeweils um drei Stunden, bis eine Prädiktionszeitspanne von 12 Stunden erreicht ist. Beispiele sind in Abb.9.7 zu sehen. Der mittlere Fehler weist für die meisten Satelliten einen höheren Wert auf als jener der GPS-Satelliten, was auf die schlechtere Qualität der Ausgangsdaten zurückzuführen ist. Für das 6-Stunden-Intervall liegt der mittlere Fehler der prädizierten Uhrkorrekturen in etwa bei  $\pm 6$  ns.

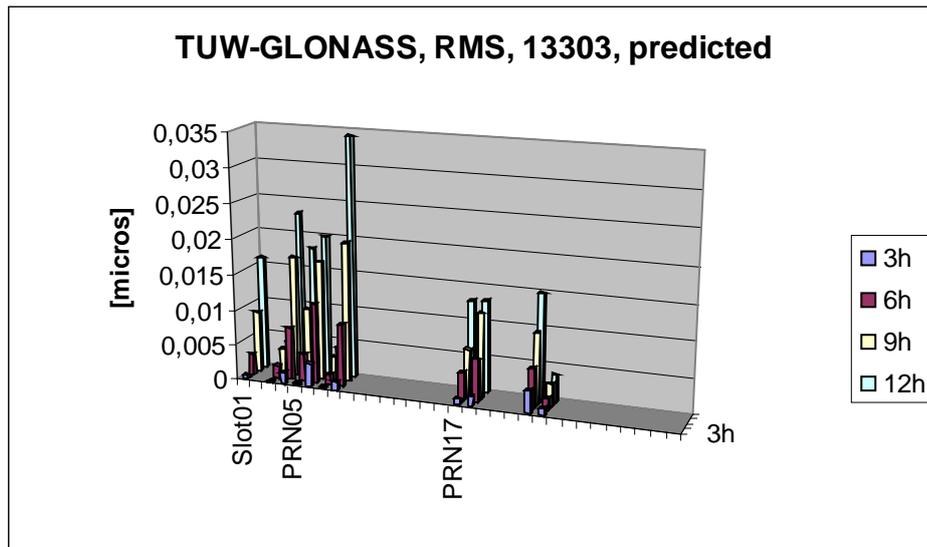


Abb.9.7a: mittlerer Fehler der Uhrkorrekturen der TUW (ESX), GPS-Woche 1330, Tag 3

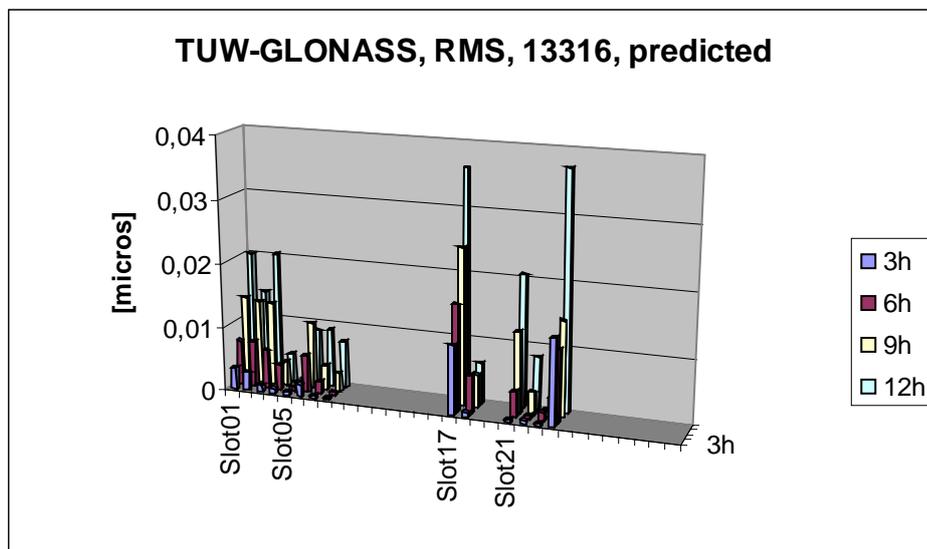


Abb.9.7b: mittlerer Fehler der Uhrkorrekturen der TUW (ESX), GPS-Woche 1331, Tag 6

Aus den beiden Abbildungsbeispielen ist ersichtlich, dass die Qualität der Prädiktionsergebnisse für die individuellen GLONASS-Satellitenuhren sehr variabel ist. [Anmerkung: Bei den GPS-Satellitenuhren ist die Güte der Uhrkorrekturdaten nur von der jeweils aktiv geschalteten Satellitenuhr (Cs oder Rb) abhängig, über die Zeit hinweg jedoch für jeden einzelnen Satelliten sehr stabil.] Gut zu erkennen ist dies z. B. für den Satelliten Slot17. Wird das Prädiktionsintervall von 12 h für den Vergleich herangezogen, so erreicht der mittlere Fehler der prädizierten Uhrwerte für den Tag 6 der GPS-Woche 1331 mit  $\pm 36,1$  ns in etwa die dreifache Größe des Wertes von  $\pm 12,8$  ns für den Tag 3 in der GPS-Woche 1330. Die Abb.9.7 verdeutlichen, dass diese Unstetigkeit des Uhrenverhaltens bei GLONASS auf faktisch alle Satelliten zutrifft.

## Prädiktion von GPS-Satellitenuhren mittels Kalman-Filter

(Kapitel 10)

In den Kapiteln 8 und 9 wurde ausführlich auf die Prädiktion von Uhrkorrekturdaten mittels GNSS-VC/static eingegangen. Die zum Ziel gesetzte Schranke von zwei Nanosekunden für den Prädiktionsfehler wurde für ein Intervall von ca. 9 Stunden unterschritten. Dennoch stellt sich die Frage nach einer weiteren Verbesserung des Ergebnisses. Da die IGS-Ultra-Rapid-Produkte mit einer Verzögerungszeit von drei Stunden zur Verfügung stehen und deren durch Beobachtungen abgedeckter Abschnitt (24 Stunden) als Eingangsparameter für GNSS-VC/static dienen, unterliegen auch die Ergebnisse dieses Programms der gleichen zeitlichen Verschiebung, erweitert um die Zeit für die zusätzlichen Arbeitsschritte des Prädiktionsprogrammes. Zum Zeitpunkt der Freigabe der TUW-Uhrkorrekturdaten beginnt deren Prädiktion also bereits um ca. drei Stunden früher. Um die folgenden sechs Stunden abzudecken, muss die Berechnung daher etwas mehr als neun Stunden, vom Startzeitpunkt der Prädiktion weg gesehen, umfassen. Im Normalfall verschlechtern sich vorausberechnete Daten aber umso mehr, je weiter der prädierte Zeitpunkt vom Startzeitpunkt der Prädiktion entfernt ist. Speziell bei Uhrkorrekturdaten vergrößert sich die Differenz zwischen Ist und Soll rapide mit fortschreitender Zeit. Aus diesem Grund ist es wünschenswert, ohne die oben beschriebene Verzögerung von ca. drei Stunden auszukommen.

Mittels des an der TU Wien erstellten Programms RTR-Control können, basierend auf den Beobachtungsdaten des globalen RT-IGS-Stationsnetzes, Uhrkorrekturdaten in Echtzeit (im Minutentakt) berechnet werden (siehe Kapitel 6.2) [Opitz, 2010]. Verfügt der Nutzer über eine bestehende Internetverbindung, können sie für Echtzeitanwendungen herangezogen werden. Zu Problemen kann es hierbei kommen, wenn der Datenstrom nicht in ausreichender Qualität verfügbar ist. Gründe hierfür sind, unter anderen, etwa keine oder eine zu langsame Internetverbindung. Ebenso kommt es immer wieder zu Unterbrechungen bei der Berechnung von Uhrkorrekturen durch RTR-Control aufgrund schlechter Satellitengeometrie (siehe Kapitel 6.2). Zur Vermeidung solcher Probleme bietet sich als Lösungsweg ein Algorithmus basierend auf einem Kalman-Filter (KF) an. Als Eingangsdaten für das Programm GNSS-VC/kalman werden hierfür die eben erwähnten Uhrkorrekturen aus RTR-Control verwendet.

### 10.1 Zur Theorie des Kalman-Filter

Da der Algorithmus des Kalman-Filters in der Geodäsie weitgehend bekannt ist, wird nur ein sehr kurzer Überblick gegeben. Für mehr Information wird auf die zahlreich vorhandene Literatur verwiesen, z. B. [Welch, Bishop, 2006] oder [Grewal, Andrews, 1993]. Eine bekannte Methode zur Bestimmung eines Systemzustands für einen vorgegebenen Zeitpunkt ist das LQG-Schätzverfahren (Linear Quadratic Gaussian). Vorausgesetzt wird dabei, dass ein lineares dynamisches System vorliegt. Ist das System nicht linear, muss es vor der Berechnung linearisiert werden.

Generell wird unter „Filterung“ der Schluss auf gegenwärtige Schätzwerte von in der Gegenwart gemessenen Werten verstanden [Weinmann, 1986]. Der Zustandsvektor des interessierenden Systems muss bekannt sein. Zustandsvariable, die durch die Beobachtungen nicht direkt erfassbar sind, werden geschätzt. Zusätzlich muss beachtet werden, dass sowohl dem System selbst als auch den Messungen ein Rauschen überlagert ist.

Die Basis des Kalman-Filters bilden das Modell des Prozesses sowie die stochastischen Kenngrößen der auftretenden Rauschsignale. Neben den Schätzwerten der Zustandsgrößen

ergibt sich deren Fehlervarianz. Mit dem Kalman-Filter kann damit auch sofort die Zuverlässigkeit des Schätzergebnisses bewertet werden.

## 10.2 Grundlagen des Kalman-Filters

Um den Zustandsvektor  $x(t)$  eines Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t$  zu schätzen, kann die folgende linearisierte Beobachtungsgleichung angegeben werden:

$$l(t) = A(t) \cdot x(t) + v(t) \quad (10.1)$$

mit:  $l(t)$  ..... Beobachtungen  
 $A(t)$  ..... Beobachtungs-/ Formmatrix  
 $x(t)$  ..... Zustandsvektor  
 $v(t)$  ..... Beobachtungs-/ Messrauschen

Mit Hilfe der Beobachtungsmatrix  $A(t)$  wird der lineare Zusammenhang zwischen den Beobachtungen und dem Zustandsvektor beschrieben. Unter Verwendung von Gleichung (10.1) wäre es nun möglich, die das System beschreibenden Parameter für jeden beliebigen Zeitpunkt zu bestimmen. Dabei würde allerdings das dynamische Verhalten des Zustandsvektors außer Acht gelassen werden. Da der Prozess im Lauf der Zeit Schwankungen unterliegt, gilt es, ein dynamisches Modell zu definieren, welches diese Veränderlichkeit beschreibt. Dieses Modell gibt sodann die zeitliche Änderung des Zustandsvektors zum Zeitpunkt  $t$  wieder und wird durch ein System von Differentialgleichungen beschrieben:

$$\dot{x}(t) = F(t) \cdot x(t) + S(t) \cdot w(t) \quad (10.2)$$

mit:  $\dot{x}(t)$  ..... erste Ableitung des Zustandsvektors nach der Zeit  
 $F(t)$  ..... Matrix, welche die Dynamik des Systems beschreibt  
 $S(t)$  ..... Störeingangsmatrix  
 $w(t)$  ..... Systemrauschen

Die Lösung der Differentialgleichung (10.2) führt zu:

$$x(t_j) = B(t_i, t_j) \cdot x(t_i) + \int_{t_i}^{t_j} B(t_j, \tau) \cdot S(\tau) \cdot w(\tau) d\tau \quad (10.3)$$

mit:  $B(t_i, t_j)$  ... Transitionsmatrix

In der Praxis liegen allerdings nur Messungen zu diskreten Zeitpunkten  $t$  vor. Die Beziehung (10.3) muss deshalb auf eine diskrete Darstellung umgewandelt werden. Vereinfacht kann sie wie folgt angeschrieben werden:

$$x(t+1) = B(t, t+1) \cdot x(t) + H(t+1, t) \cdot w(t) \quad (10.4)$$

mit: 
$$H(t+1, t) = \int_t^{t+1} B(t+1, \tau) G(\tau) d\tau$$

mit:  $G(\tau)$  ..... Kalman'sche Verstärkungsmatrix (Gainmatrix), siehe Kapitel 10.3.1

Der Zustandsvektor des Systems verändert sich kontinuierlich mit der Zeit. Die Transitionsmatrix  $B(t+1, t)$  beschreibt diese Änderung, indem sie sich die physikalischen Eigenschaften des Systems zunutze macht. Sind sowohl der Anfangszustand als auch das mathematische Modell  $B(t+1, t)$  gegeben, kann der Zustandsvektor des Modellsystems für jeden Zeitpunkt berechnet werden. Je nach der Art des Systemrauschens (starkes oder schwaches Rauschen) bleibt die Genauigkeit der Parameter des Zustandsvektors für unterschiedliche Zeitspannen innerhalb eines anwendungsspezifisch vorgegebenen Bereichs.

Mit den beiden Gleichungen (10.1) und (10.4) gelingt die vollständige mathematische Beschreibung eines beliebigen Systems für jeden Zeitpunkt. Im Weiteren müssen nun die stochastischen Eigenschaften dieser beiden funktionalen Modelle mit dem System in Bezug gebracht werden. Dies geschieht durch das Beobachtungsrauschen  $v(t)$  und das Systemrauschen  $w(t)$ . Ersteres besteht aus den zufälligen Messfehlern, die den Beobachtungen anhaften. Zweiteres kompensiert eine unzureichend präzise physikalische Beschreibung des Systems durch das verwendete Modell. Mit Hilfe des Systemrauschens kann also die Genauigkeit des Modells im Filterprozess berücksichtigt werden.

### 10.3 Praktische Umsetzung des Kalman-Filters bei der Uhrenprädiktion

#### 10.3.1 Berechnungsalgorithmus und Filterparameter

Der Formelapparat des Kalman-Filters kann in zwei Gruppen von Gleichungen aufgeteilt werden:

- Prädiktionsgleichungen: (10.5a)

$$\begin{aligned} \tilde{x}(t) &= B(t, t-1) \cdot \hat{x}(t-1) \\ \tilde{Q}_{xx}(t) &= B(t, t-1) \cdot \hat{Q}_{xx}(t-1) \cdot B^T(t, t-1) + Q_{nn}(t-1) \end{aligned}$$

- mit:  $Q_{nn}$  ... Kovarianzmatrix des Störgrößenvektors  
 $Q_{xx}$  ... Kovarianzmatrix des Zustandsvektors  
 $\sim$  ..... prädizierter Wert  
 $\wedge$  ..... durch Beobachtungen verbesserter Wert

- Korrektorgleichungen: (10.5b)

$$\begin{aligned} G(t) &= \tilde{Q}_{xx}(t) \cdot A^T(t) \cdot [A(t) \cdot \tilde{Q}_{xx}(t) \cdot A^T(t) + Q_{ll}(t)]^{-1} \\ \hat{x}(t) &= \tilde{x}(t) + G(t) \cdot [l(t) - A(t) \cdot \tilde{x}(t)] \\ \hat{Q}_{xx}(t) &= [I - G(t) \cdot A(t)] \cdot \tilde{Q}_{xx}(t) \end{aligned}$$

mit:  $Q_{ll}$  ... Kovarianzmatrix der Beobachtungen

Es ist sofort ersichtlich, dass bei der Anwendung der Formeln (10.5) ein rekursiv arbeitender Algorithmus entsteht. Liegen keine Beobachtungen vor, wird nur die Formelgruppe (10.5a) angewendet. Sobald für einen bestimmten Zeitpunkt Messwerte eintreffen, wird die Formelgruppe (10.5b) herangezogen, um den zuvor prädizierten Zustandsvektor zu verbessern. Prinzipiell kann ein Kalman-Filter also als Folgeregelkreis gedeutet werden, da neben dem Modell des Systems auch eine Rückkopplung mit dem Ausgangssignal vorliegt.

Der mittels der Gleichungen (10.5) angegebene Algorithmus soll in seiner Vorgangsweise kurz erläutert werden. Zuerst wird der geschätzte Zustandsvektor  $\tilde{x}(t)$  berechnet. Dieser folgt aus dem korrigierten Zustandsvektor des vorangegangenen Berechnungsschritts. In Kombination mit dem mathematischen Prädiktionsmodell des Systems, welches in der Transitionsmatrix enthalten ist, wird ein neuer Zustandsvektor für den momentanen Zeitpunkt geschätzt. Gleichzeitig wird seine Kovarianzmatrix  $\tilde{Q}_{xx}$  berechnet. Diese setzt sich aus der Kovarianzmatrix des korrigierten Zustandsvektors des vorangegangenen Schritts und dem Systemrauschen zusammen. Als nächstes müssen der geschätzte Zustandsvektor und seine zugehörige Kovarianzmatrix korrigiert werden. Dafür wird vorab die Kalman'sche Verstärkungsmatrix  $G(t)$ , auch „Gainmatrix“ genannt, berechnet. In diese fließen sowohl die geschätzten Kovarianzen als auch das Messrauschen mit ein. Durch die Gainmatrix wird die Gewichtung der Messwerte gesteuert. Ist das Messrauschen kleiner als das Systemrauschen, so ergibt sich für die Messungen eine starke Gewichtung und umgekehrt. In der Folge wird die Kalman'sche Verstärkungsmatrix benutzt, um den prädizierten Zustandsvektor und seine Kovarianzen zu verbessern. Die Gleichung zur Berechnung des korrigierten Zustandsvektors  $\hat{x}(t)$  enthält als wesentliche Größe die Differenz  $l(t) - A(t) \cdot \tilde{x}(t)$  (siehe Gleichung (10.5b)), also den Unterschied zwischen dem aktuellen und dem vorhergesagten Beobachtungsvektor. Diese Abweichung wird auch Innovation genannt. Schlussendlich sei noch angemerkt, dass die Kalman'sche Verstärkungsmatrix sowohl auf die Berechnung des korrigierten Zustandsvektors als auch auf die der korrigierten Kovarianzen Einfluss nimmt. Durch diese Gewichtung kann der momentane Zustandsvektor optimal geschätzt werden. Vorteilhaft ist, dass hierauf indirekt alle vorangehenden Messwerte einwirken. Alle notwendigen Informationen aus früheren Messungen bleiben im Zustandsvektor enthalten, obwohl die Messwerte selbst nicht gespeichert werden müssen.

Der messtechnisch nicht zugängliche Zustandsvektor  $x(t)$  besteht in der vorliegenden Anwendung aus den drei Polynomparametern Offset, Steigung und quadratischem Koeffizienten. Da der geplante Prädiktionszeitraum kurz ist (maximal sechs Stunden), wird auf die periodische Erweiterung des Modells verzichtet (siehe Kapitel 8.3.2).

Die Eingangswerte in den Kalman-Filter, also die Beobachtungen, sind korrigierte IGU-Uhrkorrekturwerte, die vom Programm RTR-Control von [Opitz, 2010] im Minutentakt ausgegeben werden. Die Kovarianzen der Beobachtungen werden ebenfalls von selbigem Programm berechnet.

Die Formmatrix  $A$  ergibt sich aus der Ableitung der Beobachtungen nach den einzelnen Polynomparametern. Da pro Satellit immer nur eine einzelne Beobachtung pro Epoche vorliegt, besteht sie nur aus drei Elementen. Die Zeitabschnitte  $\Delta t$  entsprechen dabei jenem Zeitabschnitt, in dem die neuen Beobachtungsdaten eintreffen (üblicherweise eine Minute).

$$A = \begin{pmatrix} 1 & \Delta t & (\Delta t)^2 \end{pmatrix} \quad (10.6)$$

Die Komponenten der Kovarianzmatrix der Störgrößen wurden zu Beginn der Untersuchungen aus Testserien ermittelt. Sie ergibt sich als Diagonalmatrix wie folgt:

$$Q_{\text{nn}} = \begin{pmatrix} 0,5^2 \text{ ns}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1^2 \text{ ns}^2 / \text{min}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0,01 \text{ ns}^2 / \text{min}^4 \end{pmatrix} \quad (10.7)$$

Werden größere als die angegebenen Werte verwendet, äußert sich dies in einem immer schlechter werdenden Konvergenzverhalten der geschätzten Parameter. Außerdem würde dies zu einer starken Gewichtung der Beobachtungen führen und somit die Filterwirkung reduzieren.

Die Transitionsmatrix ergibt sich aus der Entwicklung des Prädiktionsmodells (Beziehung (8.1)) vom Zeitpunkt  $t$  hin zum Zeitpunkt  $(t+1)$ :

$$B(t+1, t) = \begin{pmatrix} 1 & 1 \cdot \Delta t & 1 \cdot \Delta t^2 \\ 0 & 1 & 2 \cdot \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (10.8)$$

### 10.3.2 Start des Kalman-Filters und Parameterverlauf

Der Untersuchungszeitraum zum Testen des Programms GNSS-VC/kalman erstreckt sich über ein halbes Jahr von GPS-Woche 1400 (05.11.2010) bis GPS-Woche 1428 (26.05.2007). Vor dem Start des eigentlichen Kalman-Filter-Algorithmus in GNSS-VC/kalman ist es von Vorteil, geeignete Startparameter zu bestimmen. Mit guten Näherungswerten konvergieren die Parameter deutlich schneller als mit willkürlich festgelegten Werten. Um nun eine gute Approximation der Startparameter zu erreichen, werden vorab zehn aufeinander folgende Datensätze aus dem Programm RTR-Control eingelesen. Das entspricht einem Zeitraum von zehn Minuten. Aus diesen Werten werden sowohl ein Offset als auch ein linearer Trend bestimmt. Dabei wird für den Offset einfach der zuletzt eingelesene Uhrkorrekturwert herangezogen. Der Startwert für den Trend ist die Steigung einer Gerade durch den ersten und den letzten Datenpunkt. Der Näherungswert für den quadratischen Koeffizienten des Prädiktionspolynoms wird mit  $0,01 \text{ ns}/\text{min}^2$  sehr klein angesetzt, da aufgrund der kurzen Startphase ein annähernd lineares Verhalten der Uhrkorrekturen erwartet wird. Aus den zehn eingelesenen Werten kann für diesen Parameter kein Näherungswert ermittelt werden, da die Satellitenuhren während dieser sehr kurzen Zeitspannen ein lineares Verhalten zeigen. Im Anschluss daran beginnt der eigentliche Kalman-Filter-Prozess - es wird also nach den festgesetzten zehn Minuten der Zustandsvektor erstmals berechnet.

Nach dem oben beschriebenen Startprozess wird der Parametervektor jede Minute aktualisiert. Die auf diese Art und Weise bestimmten Koeffizienten des quadratischen Polynoms werden so, im Falle von genügend vorliegenden Daten, im Minutentakt neu

berechnet und alle 15 Minuten für eine Prädiktion von Uhrkorrekturdaten eines sechs Stunden langen Intervalls herangezogen.

Aufgrund der guten Startwerte ist die Einschwingphase des Kalman-Filters sehr kurz. Als Beispiel wird in Abb.10.1 der Verlauf der Parameter von zwei ausgewählten Satelliten (PRN03 und PRN05) für den Testtag 0 in der GPS-Woche 1400 gezeigt. In Abb.10.1a ist der Verlauf des jeweiligen Offsets (Parameter c in Gleichung (8.1)) zu sehen. Da der Startwert für den Offset mit dem letzten Uhrkorrekturwert des "Start-Einleseblocks" eine ausgezeichnete Näherung abgibt, ist hier keine auffälliges Einschwingen zu sehen. Beim Parameter für die Steigung (Parameter b) ist bei Satellit PRN03 eine Einschwingphase von etwa 30 Minuten zu erkennen (Abb.10.1b). Der Parameters a konvergiert, wie erwartet, im Verlauf der Zeit gegen Null oder pendelt mit geringfügigen Abweichungen um die Nulllinie. Als Näherungswert beim Start des Filters wäre es deshalb auch möglich, diesen von vornherein mit Null festzusetzen.

[Anmerkung: Für etwa ein Drittel der Satelliten liegen im Regelfall von RTR-Control keine Uhrkorrekturen vor, wobei die Satelliten abwechseln von diesen Ausfällen betroffen sind. Aber selbst bei den vorhandenen Uhrdaten kommt es immer wieder zu Sprüngen oder kleinen Lücken in den Zeitserien. Die gezeigten Abbildungen repräsentieren exemplarisch stets die Ergebnisse der am besten modellierbaren Satellitenuhren.]

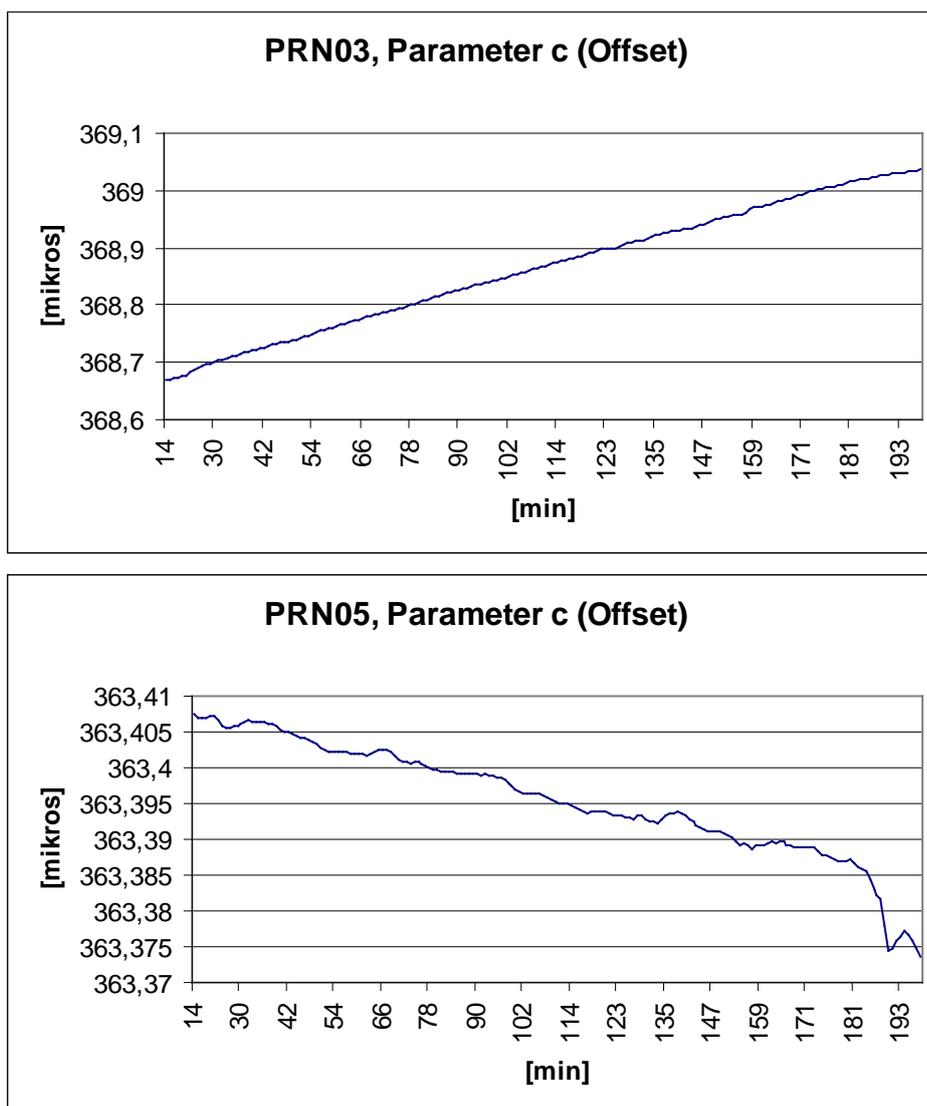


Abb.10.1a: Verlauf des Parameters c (Offset) aus Gleichung (8.1) nach Start des Kalman-Filters

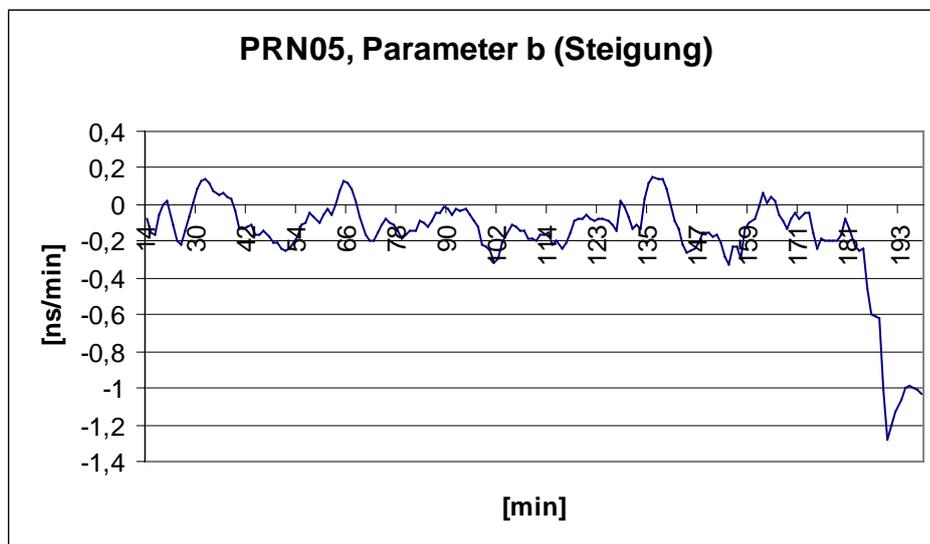
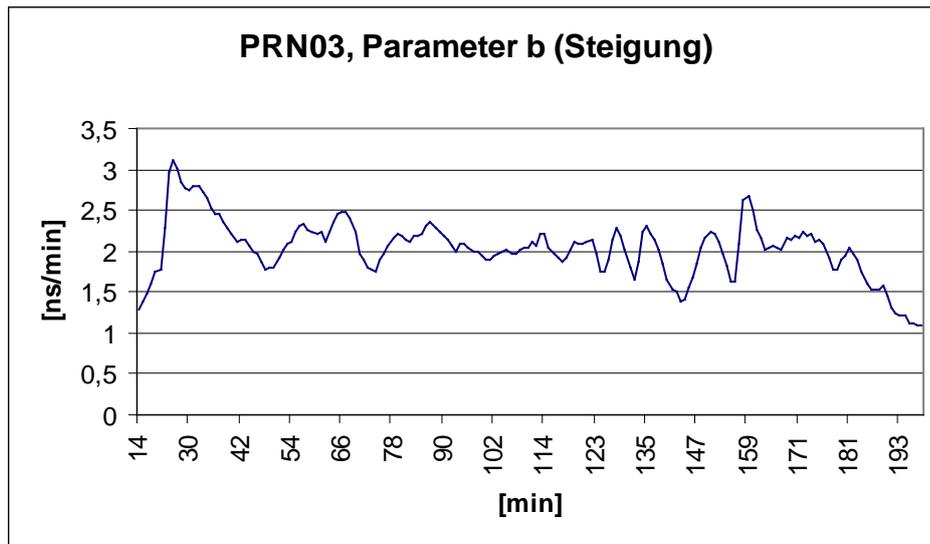


Abb.10.1b: Verlauf des Parameters b (Steigung) aus Gleichung (8.1) nach Start des Kalman-Filters

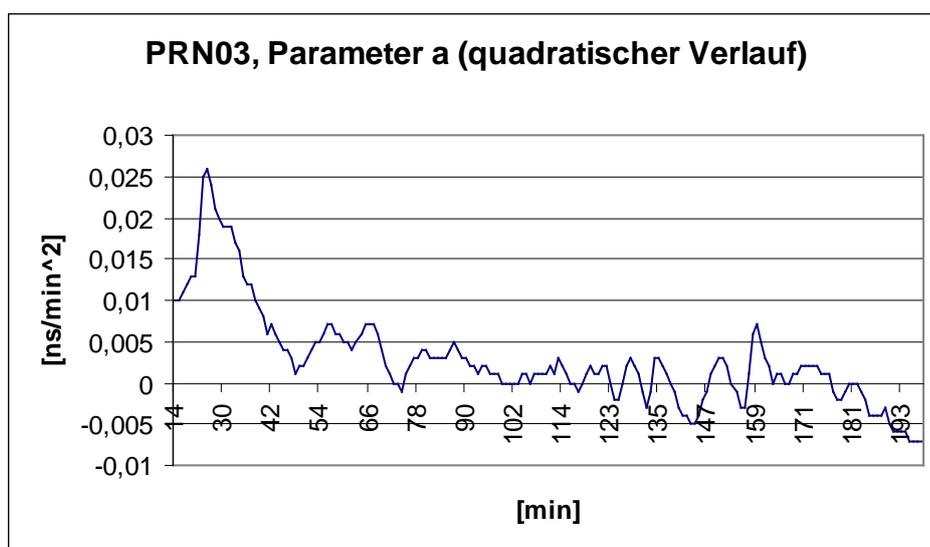


Abb.10.1c: Verlauf des Parameters a (quadratischer Verlauf) aus Gleichung (8.1) nach Start des Kalman-Filters

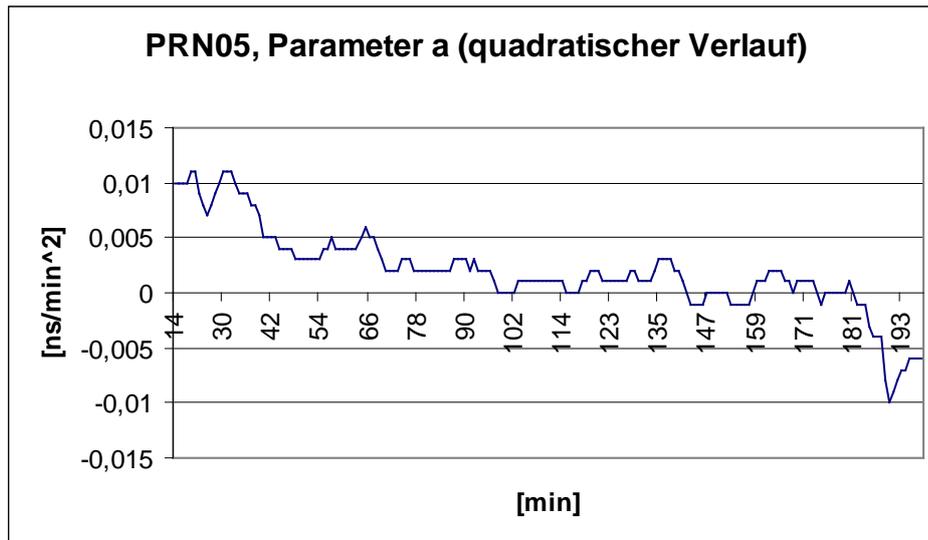


Abb.10.1c: Verlauf des Parameters a (quadratischer Verlauf) aus Gleichung (8.1) nach Start des Kalman-Filters

### 10.3.3 Genauigkeitsbetrachtungen

Die mittleren Fehler der berechneten Polynomparameter werden in der Folge (Abb.10.2) ebenfalls für die Satelliten PRN03 und PRN05 gezeigt.

Abb.10.2a zeigt den Verlauf des mittleren Fehlers für den Parameter c (Offset). Hier ist gut zu erkennen, dass keine Einschwingphase auftritt (vgl. Abb.10.1a). Der Grund hierfür sind wiederum die guten Startwerte sowie die Übernahme von realistischen mittleren Fehlern der beobachteten Uhrkorrekturdaten vom Programm RTR-Control. Die mittleren Fehler der Offsets erreichen eine Größenordnung von  $\pm 0,4$ - $0,6$  ns. Für einzelne Satelliten können sie für den Verlauf einiger Epochen auch Werte knapp außerhalb dieses Wertebereichs annehmen. Etwaige Schwankungen resultieren aus kleinen Sprüngen in den Eingangsdaten (aktuelle Geometrie der verfügbaren Beobachtungen).

Abb.10.2b zeigt die Entwicklung des mittleren Fehlers des Parameters b (Steigung). Da hier der Startwert nicht ganz in der Größenordnung der jeweiligen tatsächlichen Steigung liegt, ist hier eine kurze Einschwingphase von etwas 30 Minuten zu beobachten. Danach pendelt der mittlere Fehler um seinen jeweils erreichten "Endwert". Generell liegt er in einer Größenordnung von ca.  $\pm 0,25$  ns/min.

Der mittlere Fehler des Parameters a (quadratischer Verlauf) erreicht im Verlauf der Filterung sehr rasch eine Größenordnung von  $10^{-3}$  ns/min<sup>2</sup>.

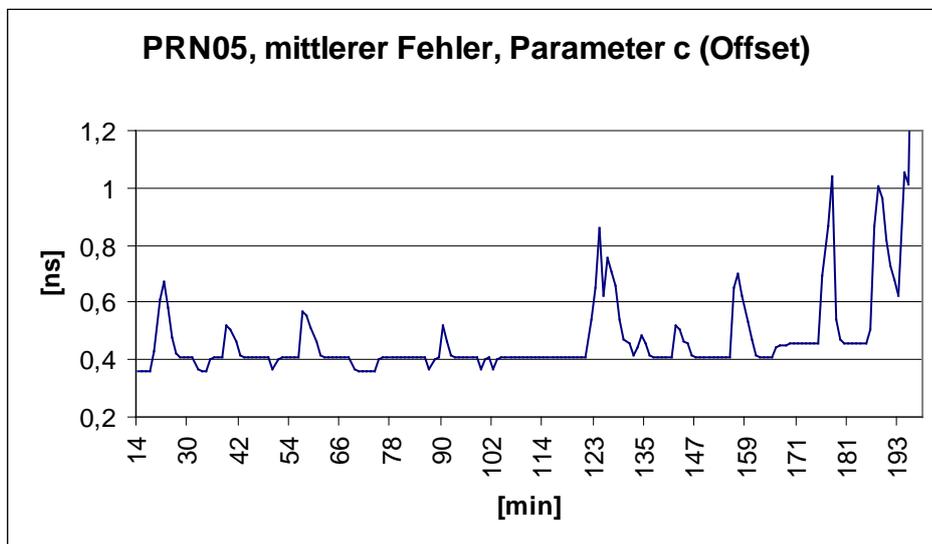
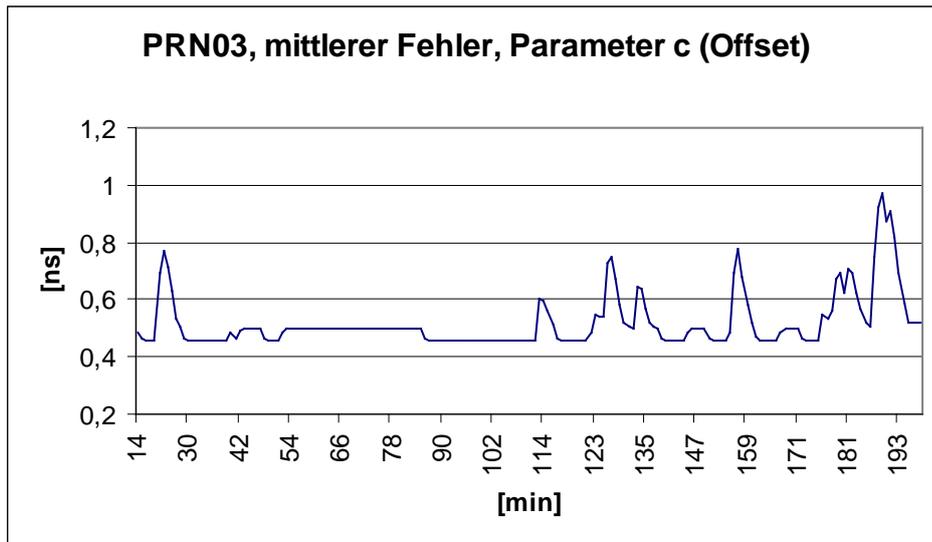


Abb.10.2a: mittlerer Fehler des Parameters c (Offset) aus Gleichung (8.1) nach Start des Kalman-Filters

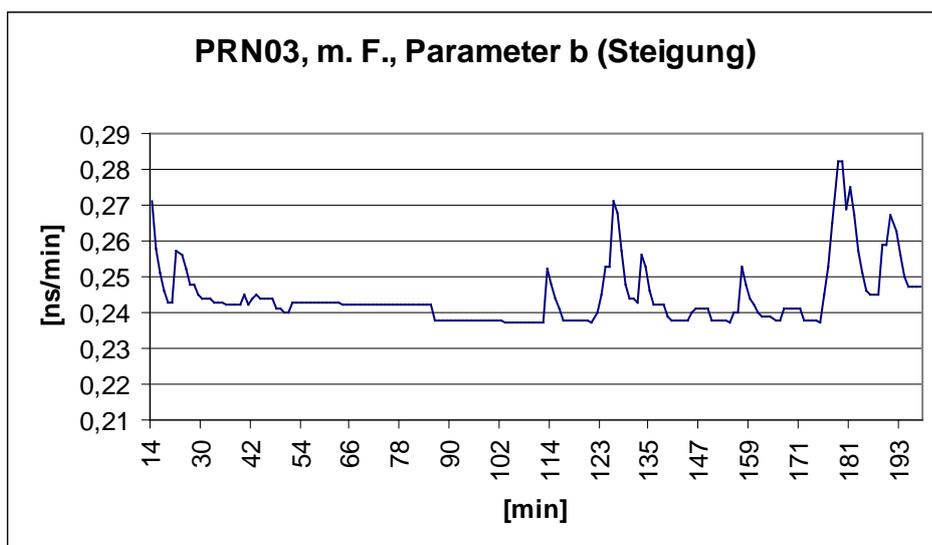


Abb.10.2b: mittlerer Fehler des Parameters b (Steigung) aus Gleichung (8.1) nach Start des Kalman-Filters

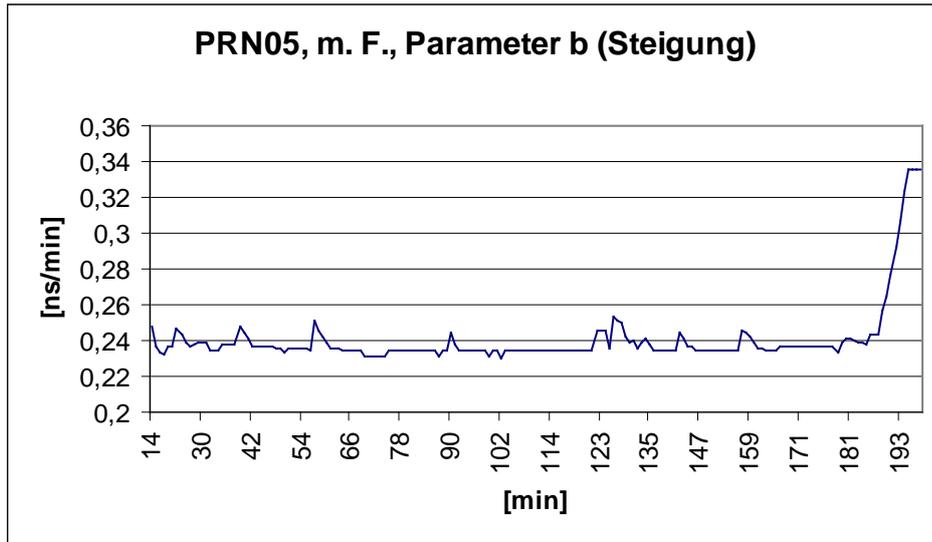


Abb.10.2b: mittlerer Fehler des Parameters b (Steigung) aus Gleichung (8.1) nach Start des Kalman-Filters

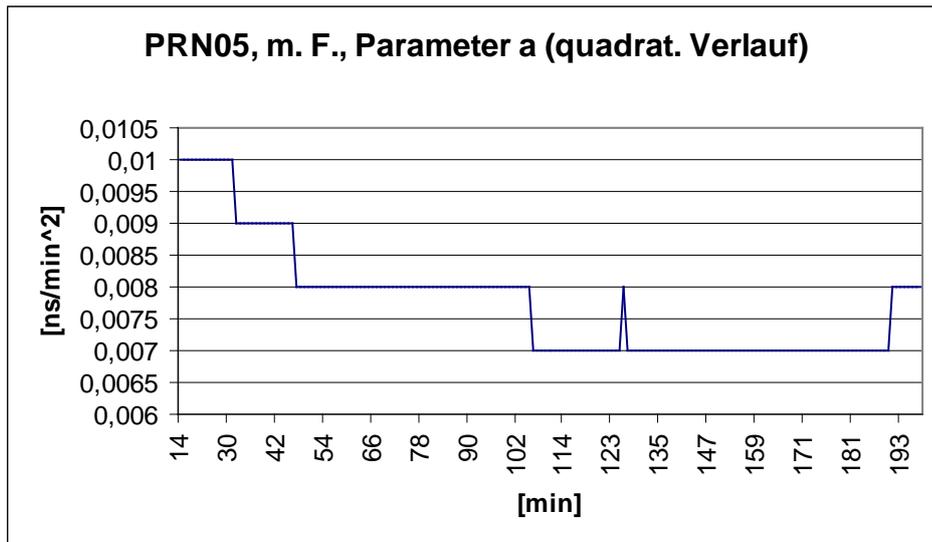
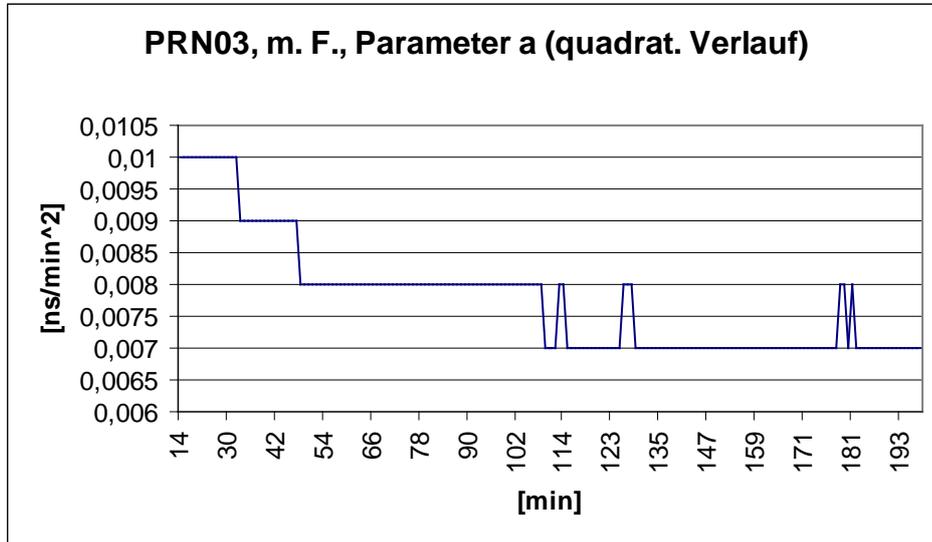


Abb.10.2c: mittlerer Fehler des Parameters a (quadratischer Verlauf) aus Gleichung (8.1) nach Start des Kalman-Filters

Die Genauigkeiten der Uhrpolynomparameter in den Abb.10.2 gelten jeweils für jene Epoche, in der sie geschätzt werden. Mittels Fehlerfortpflanzungsgesetz kann nun der Fehler des aus

den Parametern berechneten Uhrwertes der darauffolgenden Epochen bestimmt werden. Interessant ist die Genauigkeit der Uhrkorrektur zur ersten Prädiktionsepoche, da diese über die Qualität der Satellitenuhr zu Beginn des Prädiktionsintervalls Auskunft gibt. Es ist die erste Epoche nach dem letzten eingelesenen Uhrkorrekturwert aus RTR-Control. Abb.10.3 zeigt diesen Fehler für einen Zeitabschnitt von drei Stunden für alle im Minutentakt errechneten Parametersätze. Demzufolge liegt er, vergleichbar mit Parameter c, in einem Bereich von  $\pm 0,4$ - $0,6$  ns. Für kurze Zeitspannen wird der angegebene Bereich immer wieder überschritten. Dies ist auf die in Kapitel 10.3.2 erwähnten Sprünge und Lücken in den Eingangsdaten zurückzuführen.

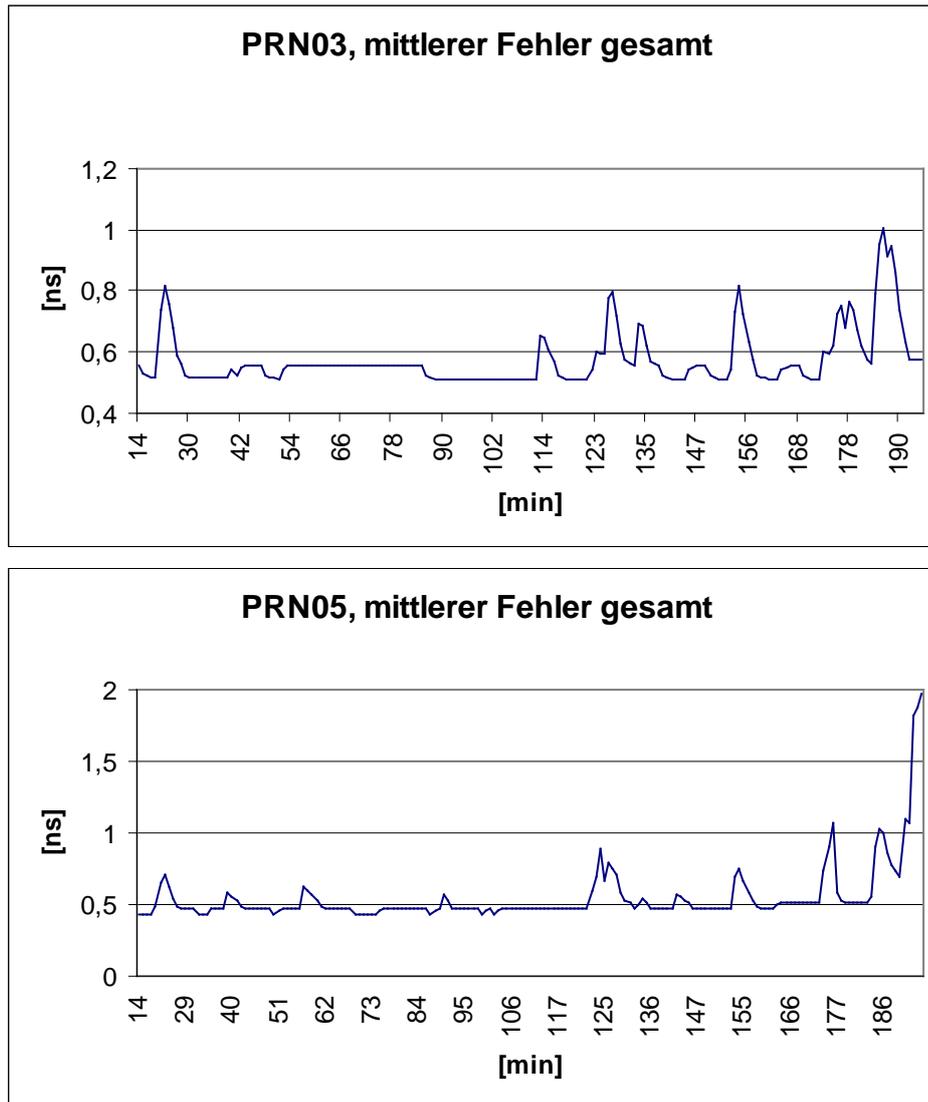


Abb.10.3: Fehler des prädizierten Uhrwertes

Betrachtet man die Entwicklung des mittleren Fehlers der prädizierten Uhrkorrekturen für einen bestimmten Parametersatz, so ist zu erkennen, dass sich selbiger mit fortschreitender Zeit rasch vergrößert. Abb.10.4 zeigt, exemplarisch für den Satelliten PRN05, den Verlauf des mittleren Fehlers des Parametersatzes 2040, welcher 34 Minuten nach dem Start des Kalman-Filters ausgegeben wurde.

Da der Parameter a des Prädiktionspolynoms (quadratischer Verlauf) im Verlauf der Filterung annähernd Null erreicht, wird er bei der Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes für die

Abb.10.4 vernachlässigt. Es bleibt zu überlegen, ob die Uhrkorrekturen für kurze Zeiträume in Zukunft deshalb mit einem rein linearen Prädiktionsmodell geschätzt werden sollen.

In Abb.10.4a wird die Entwicklung des mittleren Fehlers über die dem Ausgabezeitpunkt des Parametersatzes 2040 folgenden drei Stunden dargestellt. Abb.10.4b zeigt einen Ausschnitt derselben Ergebnisse über einen Zeitraum von 30 Minuten. Je nach gewünschter Genauigkeit kann der Nutzer nun aus den beiden Abb.10.4 ablesen, zu welchem Zeitpunkt es notwendig ist, für die Berechnung der neuen Uhrkorrekturen auf einen neuen Parametersatz überzugehen. Je höher die geforderte Genauigkeit der jeweiligen Anwendung ist, desto öfter muss der Parametersatz gewechselt werden. Der mittlere Fehler erreicht nach ca. 25 Minuten die Größenordnung von 1 ns, nach ca. 50 Minuten liegt er bereits im 2 ns-Bereich, wobei PRN05 für diesen Datensatz einen der schlechter prädizierbaren Satelliten repräsentiert.

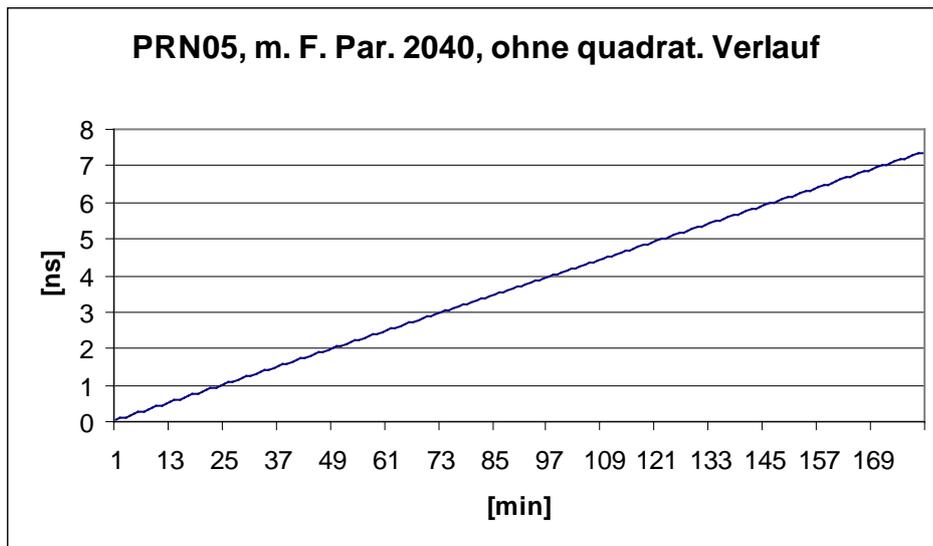


Abb.10.4a: Verlauf des mittleren Fehlers des Parametersatzes 2040 für die folgenden drei Stunden

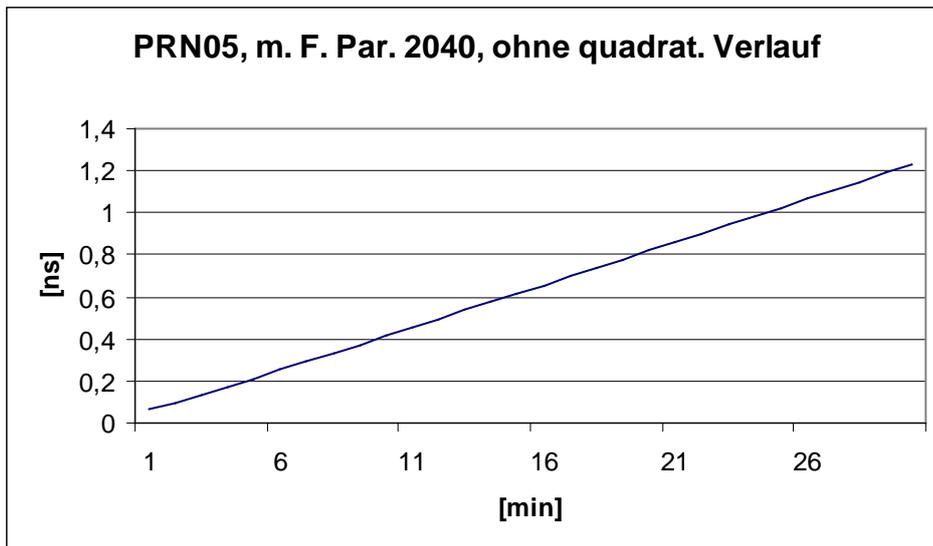


Abb.10.4b: Verlauf des mittleren Fehlers des Parametersatzes 2040 für die folgenden 30 Minuten

Wie schon in den Kapiteln 8 und 9 werden nun noch die mit dem Kalman-Filter prädizierten Uhrkorrekturen mit den IGR-Produkten verglichen. Dazu werden die mittels des Kalman-Filters berechneten Modellparameter im 15-Minuten-Takt zur Prädiktion von Uhrkorrekturen über einen Zeitraum von sechs Stunden herangezogen (siehe Kapitel 10.3.2). Danach wird abermals Beziehung (7.2) zur Berechnung des mittleren Fehlers herangezogen. Das Intervall

ist dabei der gesamte Prädiktionszeitraum von sechs Stunden. Wie schon in Kapitel 7.3 beschrieben, wird auch hier ein Offset zwischen den beiden Datensätzen sowie eine unterschiedliche Drift berücksichtigt.

[Anmerkung: Es wird also abermals, wie schon in den Kapiteln 7.2 und 7.3 beschrieben, auf die Charakteristik der einzelnen Uhren eingegangen. Dies führt in der Folge auch hier zu einer sehr optimistischen Fehlerabschätzung.]

Die Abb.10.5 zeigen die mittleren Fehler der prädizierten Uhrkorrekturen mit fortschreitender Bestimmung des Parametervektors ab dem Start des Kalman-Filter-Algorithmus. Die in den Abbildungsüberschriften angegebene Zeit gibt den Ausgabezeitpunkt des für die jeweilige Prädiktion der Uhrkorrekturen verwendeten Parametersatzes an. Der Zeitpunkt 00:00 repräsentiert dabei den Programmstart.

Abb.10.5a zeigt den mittleren Fehler der prädizierten Uhrkorrekturdaten, welche mittels jener Polynomparameter berechnet wurden, die sich nach einer Laufzeit des Kalman-Filters von nur 15 Minuten ergeben (GPS-Woche 1403, Tag 0, Sekunde 900). Dies ist auch jeweils gleichzeitig der Startpunkt der Prädiktion für die folgenden sechs Stunden. In der Folge (Abb.10.5b-d) wird dieser in Schritten von 15 Minuten verschoben. Mit den jeweils aktuellen Parametern des Prädiktionsmodells wurden die Uhrkorrekturen für das 6-stündige Prädiktionsintervall bestimmt und der mittlere Fehler der Abweichungen zu den IGR-Uhrkorrekturen für ein 6-stündiges Intervall berechnet. Die Abb.10.5a bestätigt, was basierend auf Abb.10.3 zu erwarten war: Aufgrund der sehr guten Startwerte des Kalman-Filters (in erster Linie jener des Offsets) weisen die prädizierten Uhrwerte bereits nach den ersten 15 Minuten Filter-Laufzeit eine sehr gute Genauigkeit auf. Für mehr als 50 % der Satellitenuhren liegt der mittlere Fehler des 6-stündigen Intervalls bereits für dieses kurze Filter-Intervall unter der oben schon erwähnten 2-ns-Grenze. Eine weitere Verbesserung ist in den nachfolgenden Abb.10.5b-d nur dann erkennbar, wenn eine fortlaufende Serie an Eingangsdaten vorliegt. Sprünge in den Eingangsdaten bzw. ein Datenausfall zeigen sich durch einen sofortigen Anstieg des mittleren Fehlers der betreffenden Satellitenuhr.

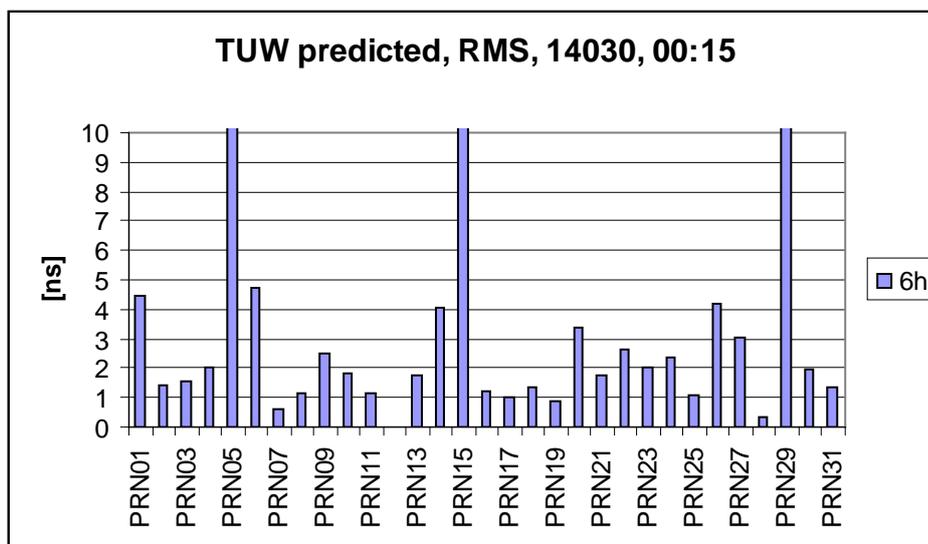


Abb.10.5a: mittlere Fehler der mit dem Kalman-Filter prädizierten Uhrkorrekturdaten, Prädiktionsstart nach 15 Minuten ab Programmstart

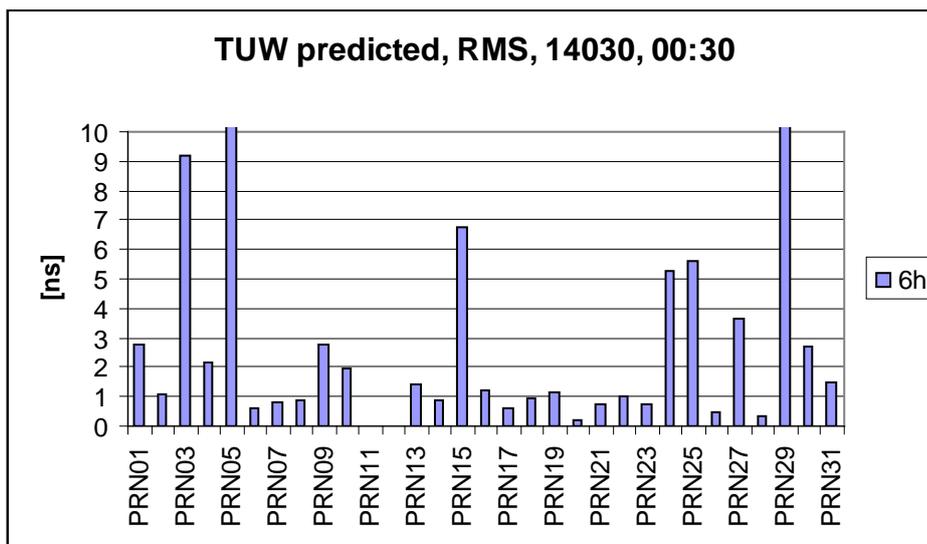


Abb.10.5b: mittlere Fehler der mit dem Kalman-Filter prädizierten Uhrkorrekturdaten, Prädiktionsstart nach 30 Minuten ab Programmstart

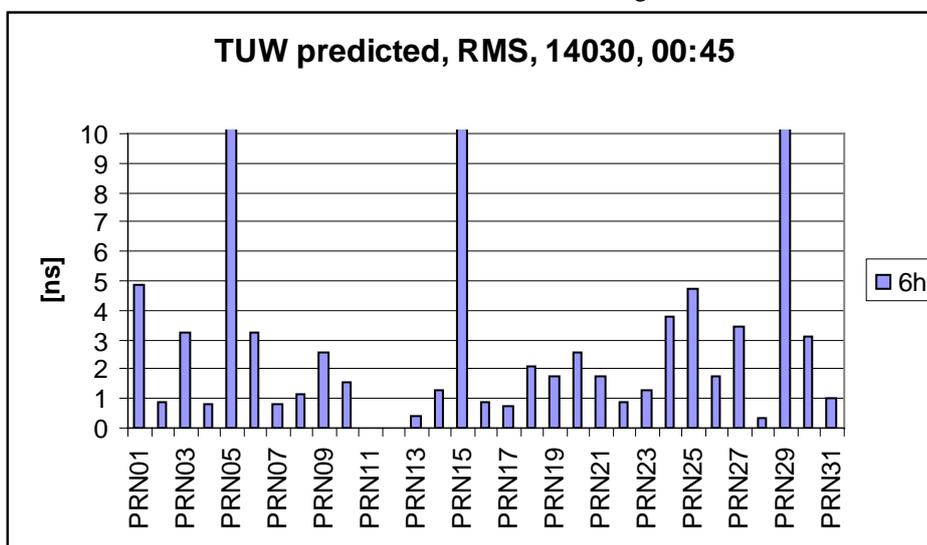


Abb.10.5c: mittlere Fehler der mit dem Kalman-Filter prädizierten Uhrkorrekturdaten, Prädiktionsstart nach 45 Minuten ab Programmstart

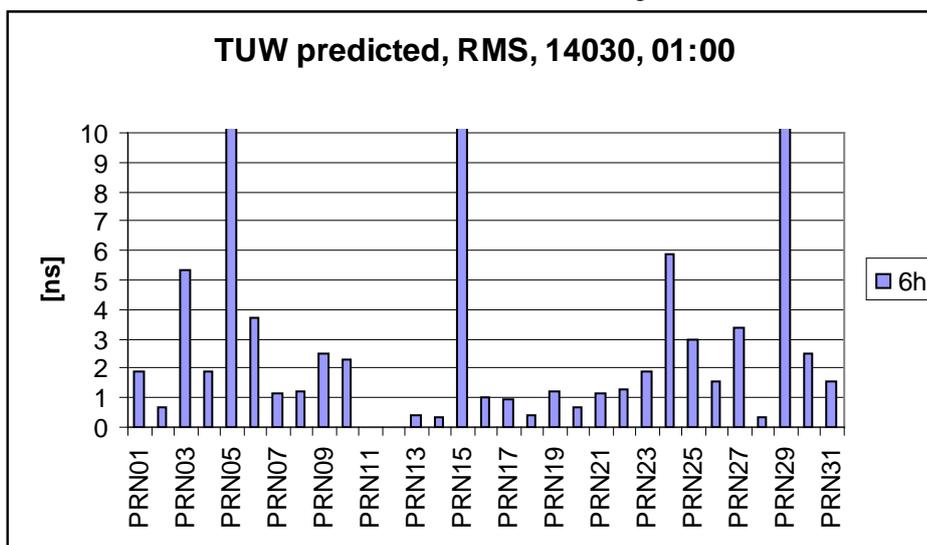


Abb.10.5d: mittlere Fehler der mit dem Kalman-Filter prädizierten Uhrkorrekturdaten, Prädiktionsstart nach einer Stunde ab Programmstart

Natürlich ist es auch möglich, dass sich der mittlere Fehler eines einzelnen Satelliten im Laufe des Prozesses über kürzere Zeiträume hinweg zu verschlechtern beginnt. Dies kann geschehen, wenn z. B. die Qualität der Eingangsdaten abnimmt oder diese überhaupt für eine kurze Zeitspanne ausfallen. Für Datenlücken, die kürzer als zehn Minuten andauern (siehe oben), wird dann der neue Parametervektor nur noch mittels der in der Transitionsmatrix definierten deterministischen Regeln berechnet. Da in diesem Fall keine Korrektur aufgrund von Beobachtungsdaten mehr durchgeführt werden kann, verschlechtern sich die Ergebnisse der Prädiktion kontinuierlich. Erhält GNSS-VC/kalman länger als zehn Minuten keinen neuen Eingangsdaten, wird die Bestimmung der Prädiktionsparameter für den betreffenden Satelliten eingestellt.

### **10.3.4 Handhabung von Datenlücken**

Aus in Kapitel 6.2 beschriebenen Gründen kann es vorkommen, dass die Eingangsdaten aus RTR-Control immer wieder für einige Zeit lang ausfallen. In diesem Fall wird der Parametervektor nun nicht mehr durch die normalerweise kontinuierlich eingehenden Beobachtungen korrigiert. Stattdessen werden die Polynomkoeffizienten nur noch aus den Prädiktionsgleichungen des Kalman-Filters geschätzt. Die Genauigkeit der Parameter nimmt daher mit fortschreitender Zeit kontinuierlich ab. Aus diesem Grund ist es erforderlich den Genauigkeitsverlauf der Parameter in Hinblick auf das Eintreten einer Datenlücke zu untersuchen.

Die mittleren Fehler für die Abb.10.6 wurden dabei auf die gleiche Weise wie jene für die der Abb.10.3 errechnet: Für jeden im Minutentakt ausgegebenen Parametersatz wird mittels Fehlerfortpflanzungsgesetz der Fehler des aus den Parametern berechneten Uhrwertes der Folgeminute (= erste Epoche nach dem letzten eingelesenen Uhrkorrekturwert aus RTR-Control) bestimmt.

In Abb.10.6 wird das Ergebnis der Berechnungen wiederum exemplarisch mittels des Satelliten PRN05 dargestellt. Die ersten zehn Epochen der Graphik überdecken sich mit den letzten zehn Epochen aus den Abb.10.1 bis Abb.10.3. Vom Zeitpunkt des simulierten Datenausfalls (Epoche 196) ist die Entwicklung des mittleren Fehlers für den Verlauf der folgenden Stunde dargestellt. Basierend auf dieser Untersuchung ist nun das Setzen eines Zeitfensters möglich, nach welchem der Algorithmus des Kalman-Filters bei größeren Datenlücken abgebrochen wird. Die Länge dieser Zeitspanne kann je nach gewünschter Genauigkeit mittels der in Abb.10.6 dargestellten Entwicklung des Fehlers bestimmt werden. Der mittlere Fehler der Prädiktionsparameter steigt bei einem Datenausfall sehr schnell an: Bereits nach ca. 15 Minuten erreicht er die Größenordnung von 5 ns, nach etwa 30 Minuten den 10er-Nanosekundenbereich.

Dauert eine Lücke in den Eingangsdaten länger als das vom Nutzer gesetzte Zeitfenster an, so werden für den betreffenden Satelliten keine neuen Prädiktionsparameter mehr ausgegeben. Treffen neue Eingangsdaten aus RTR-Control ein, startet der Kalman-Filter-Prozess von Neuem.

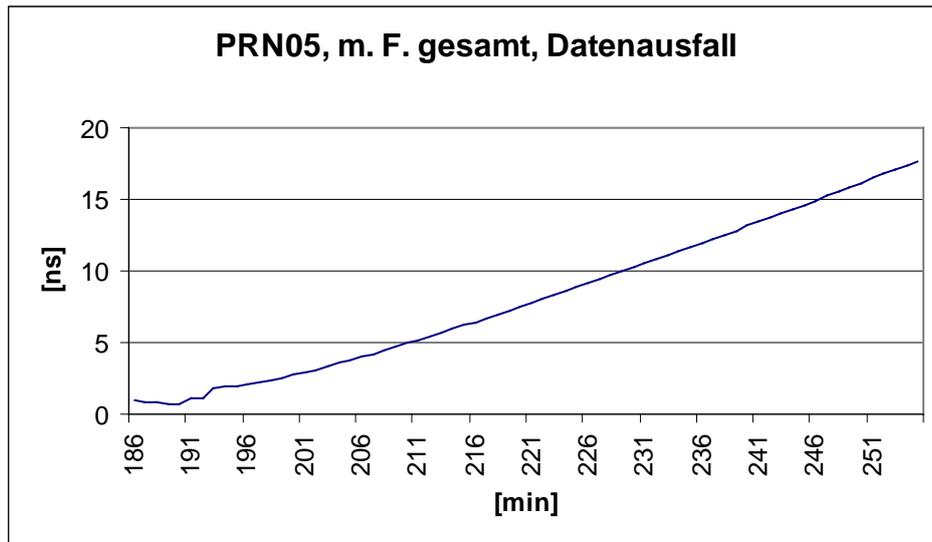


Abb.10.6: Entwicklung des mittleren Fehlers der (aus den mittels Kalman-Filter bestimmten Polynomkoeffizienten berechneten) Uhrkorrekturen bei Datenausfall zum aktuellen Zeitpunkt, ab Epoche 11700 über zwei Stunden

### 10.3.5 Datenarchivierung

Die Speicherung der prädizierten Uhrdaten (jeweils für den Verlauf von 6 Stunden) erfolgt in Intervallen von 15 Minuten im sp3-Format (mit verändertem Header). Damit können die Nutzer die gleiche Einleseroutine wie für die IGS-Produkte verwenden. Weiters werden die Polynomparameter und deren Varianzen gespeichert. Sämtliche Intervalle können natürlich, je nach Verwendungszweck, jederzeit geändert werden.

## Ausblick

(Kapitel 11)

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Algorithmen zur Berechnung von Uhrkorrekturlösungen für Echtzeitanwendungen entwickelt und implementiert. Der Vorteil der mittels GNSS-VC/static berechneten Daten gegenüber bereits bestehenden Prädiktionslösungen (z.B. die Broadcast-Uhren der GNSS-Satelliten oder die IGS-Ultra-Rapid-Uhrkorrekturen) liegt in einer geringfügig besseren Genauigkeit der Uhren. Diese liegt für einen Prädiktionszeitraum von neun Stunden für die Rubidiumuhren im Bereich von einer Nanosekunde bzw. darunter. Für die Cäsiumuhren wird dieser Wert leicht überstiegen. Der Grund dafür liegt in Schwankungen des Gangs der Cäsiumuhren aufgrund von Temperaturänderungen.

Seit September 2006 werden die mittels des Programms GNSS-VC/static prädizierten Satellitenuhrkorrekturdaten mit der 6-Stunden-Frequenz der IGS-Ultra-Rapid-Lösungen jeweils kurz nach deren Erscheinen mit einer Verzögerung von ca. 15 Minuten berechnet. Danach werden sie auf einem Server der Forschungsgruppe Höhere Geodäsie der TU Wien zur Verfügung gestellt [RT-IGS]. Bei der Verwendung der Daten sollte immer auf die neuesten Datensätze zugegriffen werden, da mit fortschreitender Zeitdauer der Prädiktion der Genauigkeitsverlust stetig anwächst. Im Idealfall sollte also ebenfalls im 6-Stunden-Takt eine Aktualisierung vorgenommen werden.

Mit den mittels des Programms GNSS-VC/kalman ermittelten Uhrkorrekturen kann die Genauigkeit noch weiter gesteigert werden, da die Ergebnisse in Quasi-Echtzeit berechnet werden und damit die Verzögerung der Vorlage der IGS-Ultra-Rapid-Uhrlösungen von drei Stunden keine Rolle mehr spielt. Die prädizierten Uhrkorrekturen basierend auf GNSS-VC/kalman sowie die jeweiligen Parameter des Prädiktionspolynoms und deren Varianzen werden ab Sommer 2010 auf einem Server der Forschungsgruppe Höhere Geodäsie der TU Wien zur Verfügung gestellt.

Als konkrete Anwendungsbereiche können z. B. die Prüfung von Broadcast-Satellitenuhrdaten, vor allem aber deren Einsatz gemeinsam mit präzise prädizierten Satellitenephemeriden in allen Aufgabenstellungen der (Quasi-) Echtzeit-Punktbestimmung bis hin zu Echtzeit-PPP genannt werden. Der wesentliche Vorteil der in der vorliegenden Arbeit erstellten Uhrprodukte liegt in ihrer schnelleren Verfügbarkeit im Vergleich zu anderen Lösungen.

Im Zusammenhang mit PPP kann gesagt werden, dass zur Zeit mit satellitengestützten Verfahren im Rahmen einer statischen Punktbestimmung über lange Distanzen mittels Differenzverfahren eine Positionsgenauigkeit von ca.  $\pm 2$ -3 mm in der Lage und ca.  $\pm 5$ -6 mm in der Höhe erreichbar ist. Durch die Differenzbildung werden die meisten Fehlereinflüsse weitgehend eliminiert. Werden jedoch Fehlermodelle zur Korrektur von Code- und Phasemessungen von Referenzstationsnetzen ohne Anwendung von Differenzverfahren herangezogen, wird dies PPP genannt. So kann auch mit nur einem Empfänger eine gute Positionierungsgenauigkeit erreicht werden.

Im Post-Processing-Modus wird PPP schon über zehn Jahre lang für die Bestimmung von statischen Stationskoordinaten erfolgreich eingesetzt. Aus diesem Grund verwendet z. B. auch das IGS PPP zum Testen der Konsistenz seiner zahlreichen Produkte. PPP erlaubt gleichzeitig die Berechnung der troposphärischen Laufzeitverzögerung und eine zusätzliche Schätzung exakter Stationsuhrkorrekturen (in Bezug auf GPST).

Soll PPP in Quasi-Echtzeit eingesetzt werden, müssen präzisierte Uhrkorrekturlösungen verwendet werden. Lange Zeit waren hier nur die Broadcast-Uhren verfügbar, bis im Februar 2002 erstmals die Ultra-Rapid-Produkte des IGS den Nutzern zur Verfügung standen. Eine Verfügbarkeit der Uhrkorrekturdaten aus GNSS-VC/kalman hat den großen Vorteil, dass praktisch zu jeder beliebigen Tageszeit Uhrdaten ohne nennenswerte Verzögerung vorliegen. Die Nutzer könnten so jederzeit auf aktuelle Prädiktionsergebnisse zugreifen. Die Nutzung der derzeit präzisierten Uhrkorrekturen kann aber die Qualität der PPP-Lösung bereits kurz nach Beginn des Prädiktionsintervalls degradieren, da die Prädiktionen auf satellitenspezifischen Drifts basieren. Um die notwendige Konsistenz der Uhren über längere Zeitabschnitte zu gewährleisten, darf den Prädiktionen nur ein gemeinsamer mittlerer Drift und ein epochenspezifischer Offset zu Grunde gelegt werden.

Problematisch ist allerdings noch die Frage, wie die Uhrkorrekturen aus GNSS-VC/kalman für den Nutzer einsetzbar sind, sprich, wie sie die Empfängersoftware erreichen und hier interpretiert werden können. Am einfachsten wäre hier eine Einbindung der Polynomkoeffizienten in die RTCM-Message, quasi als Ersatz für die dort angeführten Broadcast-Uhrpolynomparameter. Eine weitere Möglichkeit wäre eine zusätzliche Software auf einem Feldnotebook bzw. eine Änderung der Empfängerfirmware, welche die präzisierten Uhrkorrekturen, bzw. die aktuellen Uhrpolynomparameter verarbeiten kann.

Zum Schluss soll noch auf zwei weitere geplante Vorhaben aufmerksam gemacht werden, welche den aktuellen Fortschritt in der Qualität von Frequenznormalen im Rahmen von Weltraummissionen zeigen sollen:

Der für 2010 geplante Start der europäischen Galileo-IOV-Satelliten eröffnet eine weitere Möglichkeit für die Nutzung des Programms zur Prädiktion von GNSS-Satellitenuhren. Da die Galileo-Satelliten so wie jene von GPS eine Rubidiumuhr sowie zusätzlich einen Wasserstoff-Maser an Bord führen werden, sind die Algorithmen direkt auf Galileo übertragbar. Der zweite der beiden Galileo-Testsatelliten, GIOVE-B, wurde am 26.04.2008 gestartet und verfügt bereits über einen hochgenauen passiven Wasserstoff-Maser. Bereits nach wenigen Wochen konnten die ersten Signale empfangen werden. Im Falle der H-Maser sollte sich aufgrund deren um ca. zwei Zehnerpotenzen besseren Stabilität die Prädiktion wesentlich einfacher gestalten als für Rubidium- oder Cäsiumuhren. Als Prädiktionsmodell wird ein Polynom zweiten Grades voraussichtlich völlig ausreichen, zusätzliche periodische Terme müssen nicht in Betracht gezogen werden. Möglicherweise genügt sogar eine lineare Funktion, um trotzdem noch ausreichend genaue Prädiktionsergebnisse ( $< \pm 1$  ns) über den Zeitraum mehrerer Stunden zu erzielen.

Für das Jahr 2012 (Stand Jänner 2009) ist des Weiteren der Start von ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) geplant. Im Rahmen dieser Mission werden zwei hochgenaue Atomuhren - ein aktiver Wasserstoff-Maser, SHM (Space Hydrogen Maser), sowie eine auf wenigen °K gekühlte Cäsiumuhr, PHARAO (Projet d''horloge atomique par refroidissement d''atomes en orbite) - an der ISS (International Space Station) angebracht. Diese beiden unterschiedlich arbeitenden Atomuhren sollen eine Frequenzstabilität und Genauigkeit im Bereich von  $10^{-16}$  bis  $10^{-17}$  erreichen. Die ersten sechs Monate der Mission sollen der Charakterisierung und Beurteilung der Atomuhren dienen (Validation Phase). In der darauf folgenden eigentlichen Nutzungsphase (Utilisation Phase), welche derzeit für 12 Monaten angesetzt ist, sollen die Nutzer auf der Erde miteinbezogen werden. Das Projekt kann bis zu 30 Monate verlängert werden. Die physikalischen Anwendungen für die ACES-Mission gestalten sich sehr vielfältig. In den Bereich der Geodäsie fallen dabei etwa die Beobachtung des Verhaltens der neuen Atomuhrengeneration im Weltraum, die Überwachung von GPS- und Galileo-Zeitsignalen, „space-to-ground“ und „ground-to-ground“ Vergleiche der GNSS-Satelliten-

und -Stationsuhren mit den ACES-Uhren, die stabile und präzise Übertragung von Frequenzen mittels des MWL (Microwave-Link), die Erdatmosphären-Sondierung sowie jene Teile der Geodäsie, in welchen relativistische Effekte von Bedeutung sind.

## Abkürzungsverzeichnis

AC	<u>A</u> nalysis <u>C</u> enter
ACES	<u>A</u> tomic <u>C</u> lock <u>E</u> nsemble in <u>S</u> pace
AFB	<u>A</u> ir <u>F</u> orce <u>B</u> ase
AODC	<u>A</u> ge of <u>D</u> ata - <u>C</u> lock
ARP	<u>A</u> ntenna <u>R</u> eference <u>P</u> oint
AS	<u>A</u> nti- <u>S</u> poofing
BIH	<u>B</u> ureau <u>I</u> nternational de l' <u>H</u> eure
BIPM	<u>B</u> ureau <u>I</u> nternational des <u>P</u> oids et <u>M</u> esures
BKG	<u>B</u> undesamt für <u>K</u> artographie und <u>G</u> eodäsie
BRS	<u>B</u> arycentric <u>R</u> eference <u>S</u> ystem
C/A-Code	<u>C</u> lear/ <u>A</u> quisition- oder <u>C</u> oarse/ <u>A</u> quisition- <u>C</u> ode
CDDIS	<u>C</u> rustal <u>D</u> ynamics <u>D</u> ata <u>I</u> nformation <u>S</u> ystem
CDMA	<u>c</u> ode <u>d</u> ivision <u>m</u> ultiple <u>a</u> ccess
CEP	<u>C</u> elestial <u>E</u> phemeris <u>P</u> ole
CIO	<u>C</u> onventional <u>I</u> nternational <u>O</u> origin
CIS	<u>C</u> onventional <u>I</u> ntertial <u>S</u> ystem
CODE	<u>C</u> enter for <u>O</u> rbital <u>D</u> etermination in <u>E</u> urope
CRF	<u>C</u> elestial <u>R</u> eference <u>F</u> rame
CS	<u>C</u> omercial <u>S</u> ervice
CSIC	<u>C</u> oordinating <u>S</u> cientific <u>I</u> nformation <u>C</u> enter
CTS	<u>C</u> ommand <u>T</u> racking <u>S</u> tations
CTS	<u>C</u> onventional <u>T</u> errestrial <u>S</u> ystem
CV	<u>C</u> ommon <u>V</u> iew
DCB	<u>D</u> ifferential <u>C</u> ode <u>B</u> ias
DT	<u>D</u> ynamic <u>T</u> ime
DUT1	<u>d</u> ifferential <u>U</u> niversal <u>T</u> ime <u>1</u>
EC	<u>E</u> uropean <u>C</u> ommission
ECEF	<u>E</u> arth- <u>C</u> entered <u>E</u> arth- <u>F</u> ixed
ECI	<u>E</u> arth- <u>C</u> entered <u>I</u> ntertial
EGM96	<u>E</u> arth <u>G</u> ravty <u>M</u> odel 1996
EMR	<u>E</u> nergy, <u>M</u> ines and <u>R</u> esources
ERP	<u>E</u> arth <u>R</u> otation <u>P</u> arameters
ESA	<u>E</u> uropean <u>S</u> pace <u>A</u> gency
ESOC	<u>E</u> uropean <u>S</u> pace <u>O</u> perations <u>C</u> enter
ET	<u>E</u> phemeris <u>T</u> ime
ERA	<u>E</u> arth <u>R</u> otation <u>A</u> ngle
FDMA	<u>F</u> requency <u>D</u> ivision <u>M</u> ultiple <u>A</u> ccess
FOC	<u>F</u> ull <u>O</u> perational <u>C</u> apability
ftp	<u>f</u> ile <u>t</u> ransfer <u>p</u> rotocol
GAST	<u>G</u> reenwich <u>A</u> pparent <u>S</u> iderial <u>T</u> ime
GCS	<u>G</u> round-based <u>C</u> ontrol <u>C</u> omplex
GFZ	<u>G</u> eoforschungszentrum Potsdam
GIOVE-A, GIOVE-B	<u>G</u> alileo <u>I</u> n- <u>O</u> rbital <u>V</u> alidation <u>E</u> lement- <u>A</u>
GLONASS	<u>G</u> lobal'naya <u>N</u> avigatsionnaya <u>S</u> putnikovaya <u>S</u> istema / <u>G</u> lobal <u>N</u> avigation <u>S</u> atellite <u>S</u> ystem
GLONASST	<u>G</u> lobal <u>N</u> avigation <u>S</u> atellite <u>S</u> ystem <u>T</u> ime
GMST	<u>G</u> reenwich <u>M</u> ean <u>S</u> iderial <u>T</u> ime
GNSS	<u>G</u> lobal <u>N</u> avigation <u>S</u> atellite <u>S</u> ystem

GNSS-VC	<u>G</u> <u>N</u> <u>S</u> <u>S</u> - <u>V</u> <u>i</u> <u>e</u> <u>n</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>C</u> <u>l</u> <u>o</u> <u>c</u> <u>k</u> <u>s</u>
GPS	<u>G</u> <u>l</u> <u>o</u> <u>b</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>P</u> <u>o</u> <u>s</u> <u>i</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>i</u> <u>n</u> <u>g</u> <u>S</u> <u>y</u> <u>s</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>m</u>
Block IIA	<u>A</u> <u>d</u> <u>v</u> <u>a</u> <u>n</u> <u>c</u> <u>e</u> <u>d</u>
Block IIR	<u>R</u> <u>e</u> <u>p</u> <u>l</u> <u>e</u> <u>n</u> <u>i</u> <u>s</u> <u>h</u> <u>m</u> <u>e</u> <u>n</u> <u>t</u>
Block IIR-M	<u>M</u> <u>o</u> <u>d</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>n</u> <u>i</u> <u>z</u> <u>e</u> <u>d</u>
Block IIF	<u>F</u> <u>o</u> <u>l</u> <u>l</u> <u>o</u> <u>w</u> <u>o</u> <u>n</u>
GPST	<u>G</u> <u>P</u> <u>S</u> - <u>T</u> <u>i</u> <u>m</u> <u>e</u>
GRS	<u>G</u> <u>e</u> <u>o</u> <u>c</u> <u>e</u> <u>n</u> <u>t</u> <u>r</u> <u>i</u> <u>c</u> <u>R</u> <u>e</u> <u>f</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>e</u> <u>n</u> <u>c</u> <u>e</u> <u>S</u> <u>y</u> <u>s</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>m</u>
GSS	<u>G</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>i</u> <u>l</u> <u>e</u> <u>o</u> <u>S</u> <u>e</u> <u>n</u> <u>s</u> <u>o</u> <u>r</u> <u>S</u> <u>t</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>s</u>
GST	<u>G</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>i</u> <u>l</u> <u>e</u> <u>o</u> <u>s</u> <u>y</u> <u>s</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>m</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>m</u> <u>e</u>
GST	<u>G</u> <u>r</u> <u>e</u> <u>e</u> <u>n</u> <u>w</u> <u>i</u> <u>c</u> <u>h</u> <u>S</u> <u>i</u> <u>d</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>i</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>T</u> <u>i</u> <u>m</u> <u>e</u>
GSTB-Vx	<u>G</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>i</u> <u>l</u> <u>e</u> <u>o</u> <u>S</u> <u>y</u> <u>s</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>m</u> <u>T</u> <u>e</u> <u>s</u> <u>t</u> <u>b</u> <u>e</u> <u>d</u> - <u>V</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>s</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>x</u>
GTRF	<u>G</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>i</u> <u>l</u> <u>e</u> <u>o</u> <u>T</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>r</u> <u>e</u> <u>s</u> <u>t</u> <u>r</u> <u>i</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>R</u> <u>e</u> <u>f</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>e</u> <u>n</u> <u>c</u> <u>e</u> <u>F</u> <u>r</u> <u>a</u> <u>m</u> <u>e</u>
HG	<u>H</u> <u>ö</u> <u>h</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>e</u> <u>G</u> <u>e</u> <u>o</u> <u>d</u> <u>ä</u> <u>s</u> <u>i</u> <u>e</u>
HP	<u>H</u> <u>i</u> <u>g</u> <u>P</u> <u>r</u> <u>e</u> <u>c</u> <u>i</u> <u>s</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u>
IAG	<u>I</u> <u>n</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>A</u> <u>s</u> <u>s</u> <u>o</u> <u>c</u> <u>i</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>o</u> <u>f</u> <u>G</u> <u>e</u> <u>o</u> <u>d</u> <u>e</u> <u>s</u> <u>y</u>
IAU	<u>I</u> <u>n</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>A</u> <u>s</u> <u>t</u> <u>r</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>o</u> <u>m</u> <u>i</u> <u>c</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>U</u> <u>n</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u>
ICRF	<u>I</u> <u>n</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>C</u> <u>e</u> <u>l</u> <u>e</u> <u>s</u> <u>t</u> <u>r</u> <u>i</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>R</u> <u>e</u> <u>f</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>e</u> <u>n</u> <u>c</u> <u>e</u> <u>F</u> <u>r</u> <u>a</u> <u>m</u> <u>e</u>
IERS	<u>I</u> <u>n</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>E</u> <u>a</u> <u>r</u> <u>t</u> <u>h</u> <u>R</u> <u>o</u> <u>t</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>n</u> <u>d</u> <u>R</u> <u>e</u> <u>f</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>e</u> <u>n</u> <u>c</u> <u>e</u> <u>S</u> <u>y</u> <u>s</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>m</u> <u>s</u> <u>S</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>v</u> <u>i</u> <u>c</u> <u>e</u>
IGLOS	<u>I</u> <u>n</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>G</u> <u>L</u> <u>O</u> <u>N</u> <u>A</u> <u>S</u> <u>S</u> <u>S</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>v</u> <u>i</u> <u>c</u> <u>e</u> <u>P</u> <u>i</u> <u>l</u> <u>o</u> <u>t</u> <u>P</u> <u>r</u> <u>o</u> <u>j</u> <u>e</u> <u>c</u> <u>t</u>
IGR	<u>I</u> <u>G</u> <u>S</u> <u>R</u> <u>a</u> <u>p</u> <u>i</u> <u>d</u> <u>P</u> <u>r</u> <u>o</u> <u>d</u> <u>u</u> <u>k</u> <u>t</u> <u>e</u>
IGS	<u>I</u> <u>n</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>G</u> <u>N</u> <u>S</u> <u>S</u> <u>S</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>v</u> <u>i</u> <u>c</u> <u>e</u>
IGS	<u>I</u> <u>G</u> <u>S</u> <u>F</u> <u>i</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>P</u> <u>r</u> <u>o</u> <u>d</u> <u>u</u> <u>k</u> <u>t</u> <u>e</u>
IGS TR WG	<u>I</u> <u>G</u> <u>S</u> <u>R</u> <u>e</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>T</u> <u>i</u> <u>m</u> <u>e</u> <u>W</u> <u>o</u> <u>r</u> <u>k</u> <u>i</u> <u>n</u> <u>g</u> <u>G</u> <u>r</u> <u>o</u> <u>p</u>
IGU	<u>I</u> <u>G</u> <u>S</u> <u>U</u> <u>l</u> <u>t</u> <u>r</u> <u>a</u> - <u>R</u> <u>a</u> <u>p</u> <u>i</u> <u>d</u> <u>P</u> <u>r</u> <u>o</u> <u>d</u> <u>u</u> <u>k</u> <u>t</u> <u>e</u>
IOV	<u>I</u> <u>n</u> - <u>O</u> <u>r</u> <u>b</u> <u>i</u> <u>t</u> <u>V</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>i</u> <u>d</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u>
ISS	<u>I</u> <u>n</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>S</u> <u>p</u> <u>a</u> <u>c</u> <u>e</u> <u>S</u> <u>t</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u>
ITRF	<u>I</u> <u>n</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>T</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>r</u> <u>e</u> <u>s</u> <u>t</u> <u>r</u> <u>i</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>R</u> <u>e</u> <u>f</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>e</u> <u>n</u> <u>c</u> <u>e</u> <u>F</u> <u>r</u> <u>a</u> <u>m</u> <u>e</u>
JD	<u>J</u> <u>u</u> <u>l</u> <u>i</u> <u>a</u> <u>n</u> <u>i</u> <u>s</u> <u>c</u> <u>h</u> <u>e</u> <u>s</u> <u>e</u> <u>D</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>u</u> <u>m</u>
JPL	<u>J</u> <u>e</u> <u>t</u> <u>P</u> <u>r</u> <u>o</u> <u>p</u> <u>u</u> <u>l</u> <u>s</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>L</u> <u>a</u> <u>b</u> <u>o</u> <u>r</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>o</u> <u>r</u> <u>y</u>
KF	<u>K</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>m</u> <u>a</u> <u>n</u> - <u>F</u> <u>i</u> <u>l</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>r</u>
KNIT	( <u>D</u> <u>e</u> <u>f</u> <u>e</u> <u>n</u> <u>s</u> <u>e</u> <u>o</u> <u>f</u> <u>t</u> <u>h</u> <u>e</u> <u>R</u> <u>u</u> <u>s</u> <u>s</u> <u>i</u> <u>a</u> <u>n</u> <u>F</u> <u>e</u> <u>d</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> ) <u>C</u> <u>o</u> <u>o</u> <u>r</u> <u>d</u> <u>i</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>S</u> <u>c</u> <u>i</u> <u>e</u> <u>n</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>f</u> <u>i</u> <u>c</u>
	<u>I</u> <u>n</u> <u>f</u> <u>o</u> <u>r</u> <u>m</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>C</u> <u>e</u> <u>n</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>r</u>
LEO	<u>L</u> <u>o</u> <u>w</u> <u>E</u> <u>a</u> <u>r</u> <u>t</u> <u>h</u> <u>O</u> <u>r</u> <u>b</u> <u>i</u> <u>t</u>
LMST	<u>L</u> <u>o</u> <u>c</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>M</u> <u>e</u> <u>a</u> <u>n</u> <u>S</u> <u>i</u> <u>d</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>i</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>T</u> <u>i</u> <u>m</u> <u>e</u>
LOD	<u>L</u> <u>e</u> <u>n</u> <u>g</u> <u>t</u> <u>h</u> <u>o</u> <u>f</u> <u>D</u> <u>a</u> <u>y</u>
LQG	<u>L</u> <u>i</u> <u>n</u> <u>e</u> <u>a</u> <u>r</u> <u>Q</u> <u>u</u> <u>a</u> <u>d</u> <u>r</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>c</u> <u>G</u> <u>a</u> <u>u</u> <u>s</u> <u>s</u> <u>i</u> <u>a</u> <u>n</u>
Maser	<u>M</u> <u>i</u> <u>c</u> <u>r</u> <u>o</u> <u>w</u> <u>a</u> <u>v</u> <u>e</u> <u>A</u> <u>m</u> <u>p</u> <u>l</u> <u>i</u> <u>f</u> <u>i</u> <u>c</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>b</u> <u>y</u> <u>S</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>m</u> <u>u</u> <u>l</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>d</u> <u>E</u> <u>m</u> <u>i</u> <u>s</u> <u>s</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>o</u> <u>f</u> <u>R</u> <u>a</u> <u>d</u> <u>i</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u>
MJD	<u>M</u> <u>o</u> <u>d</u> <u>i</u> <u>f</u> <u>i</u> <u>z</u> <u>i</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>s</u> <u>e</u> <u>d</u> <u>J</u> <u>u</u> <u>l</u> <u>i</u> <u>a</u> <u>n</u> <u>i</u> <u>s</u> <u>c</u> <u>h</u> <u>e</u> <u>s</u> <u>e</u> <u>D</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>u</u> <u>m</u>
MWL	<u>M</u> <u>i</u> <u>c</u> <u>r</u> <u>o</u> <u>w</u> <u>a</u> <u>v</u> <u>e</u> - <u>L</u> <u>i</u> <u>n</u> <u>k</u>
NavCen	<u>N</u> <u>a</u> <u>v</u> <u>i</u> <u>g</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>C</u> <u>e</u> <u>n</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>r</u>
NAVSTAR-GPS	<u>N</u> <u>a</u> <u>v</u> <u>i</u> <u>g</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>S</u> <u>y</u> <u>s</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>m</u> <u>w</u> <u>i</u> <u>t</u> <u>h</u> <u>T</u> <u>i</u> <u>m</u> <u>i</u> <u>n</u> <u>g</u> <u>a</u> <u>n</u> <u>d</u> <u>R</u> <u>a</u> <u>n</u> <u>g</u> <u>i</u> <u>n</u> <u>g</u> - <u>G</u> <u>l</u> <u>o</u> <u>b</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>P</u> <u>o</u> <u>s</u> <u>i</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>i</u> <u>n</u> <u>g</u>
	<u>S</u> <u>y</u> <u>s</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>m</u>
NIST	<u>N</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>I</u> <u>n</u> <u>s</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>t</u> <u>u</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>o</u> <u>f</u> <u>S</u> <u>t</u> <u>a</u> <u>n</u> <u>d</u> <u>a</u> <u>r</u> <u>d</u> <u>a</u> <u>n</u> <u>d</u> <u>T</u> <u>e</u> <u>c</u> <u>h</u> <u>n</u> <u>o</u> <u>l</u> <u>o</u> <u>g</u> <u>y</u>
NRCan	<u>N</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>u</u> <u>r</u> <u>a</u> <u>l</u> <u>R</u> <u>e</u> <u>s</u> <u>o</u> <u>u</u> <u>r</u> <u>c</u> <u>e</u> <u>s</u> <u>C</u> <u>a</u> <u>n</u> <u>a</u> <u>d</u> <u>a</u>
NRO	<u>N</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>R</u> <u>o</u> <u>t</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>n</u> <u>g</u> <u>O</u> <u>r</u> <u>i</u> <u>g</u> <u>i</u> <u>n</u>
OS	<u>O</u> <u>p</u> <u>e</u> <u>n</u> <u>S</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>v</u> <u>i</u> <u>c</u> <u>e</u>
P-Code	<u>P</u> <u>r</u> <u>e</u> <u>c</u> <u>i</u> <u>s</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> - <u>o</u> <u>d</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>P</u> <u>r</u> <u>o</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>c</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>d</u> - <u>C</u> <u>o</u> <u>d</u> <u>e</u>
PHARAO	<u>P</u> <u>r</u> <u>o</u> <u>j</u> <u>e</u> <u>t</u> <u>d</u> ' <u>h</u> <u>o</u> <u>r</u> <u>l</u> <u>o</u> <u>g</u> <u>e</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>o</u> <u>m</u> <u>i</u> <u>q</u> <u>u</u> <u>e</u> <u>p</u> <u>a</u> <u>r</u> <u>r</u> <u>e</u> <u>f</u> <u>r</u> <u>o</u> <u>i</u> <u>d</u> <u>i</u> <u>s</u> <u>s</u> <u>e</u> <u>m</u> <u>e</u> <u>n</u> <u>t</u> <u>d</u> ' <u>a</u> <u>t</u> <u>o</u> <u>m</u> <u>e</u> <u>s</u> <u>e</u> <u>n</u> <u>o</u> <u>r</u> <u>b</u> <u>i</u> <u>t</u> <u>e</u>
PPP	<u>P</u> <u>r</u> <u>e</u> <u>c</u> <u>i</u> <u>s</u> <u>e</u> <u>P</u> <u>o</u> <u>i</u> <u>n</u> <u>t</u> <u>P</u> <u>o</u> <u>s</u> <u>i</u> <u>t</u> <u>i</u> <u>o</u> <u>n</u> <u>i</u> <u>n</u> <u>g</u>
PPP	<u>P</u> <u>u</u> <u>b</u> <u>l</u> <u>i</u> <u>c</u> <u>P</u> <u>r</u> <u>i</u> <u>v</u> <u>a</u> <u>t</u> <u>e</u> <u>P</u> <u>a</u> <u>r</u> <u>t</u> <u>n</u> <u>e</u> <u>r</u> <u>s</u> <u>h</u> <u>i</u> <u>p</u>

---

PRN	<u>P</u> seudo <u>R</u> andom <u>N</u> oise
PRS	<u>P</u> ublic <u>R</u> egulated <u>S</u> ervice
PSD	<u>P</u> ower <u>S</u> pectral <u>D</u> ensity
PZ (-90)	= Parameter der Erde
RINEX	<u>R</u> eceiver <u>I</u> ndependent <u>E</u> xchange
rms	root <u>m</u> ean <u>s</u> quare
RT-IGS	<u>R</u> eal <u>T</u> ime- <u>I</u> GS
SA	<u>S</u> elective- <u>A</u> vailability
SAR	<u>S</u> earch and <u>R</u> escue Service
SBAS	<u>S</u> atellite <u>B</u> ased <u>A</u> ugmentation <u>S</u> ystem
SHM	<u>S</u> pace <u>H</u> ydrogen <u>M</u> aser
SI-System	le <u>S</u> ystème <u>I</u> nternational d'unités
SoL	<u>S</u> afety- <u>o</u> f- <u>L</u> ife Service
SP	<u>S</u> tandard <u>P</u> recision
SP	<u>S</u> tandard <u>P</u> roduct
SPP	<u>S</u> ingle <u>P</u> oint <u>P</u> ositioning
SP3	<u>S</u> tandard <u>P</u> roduct <u>3</u>
SPS	<u>S</u> tandard <u>P</u> ositioning <u>S</u> ervice
SRNS	<u>S</u> atellite <u>R</u> adio <u>N</u> avigation <u>S</u> ystem
ST	sidereal <u>t</u> ime
TAI	<u>T</u> emps <u>A</u> tomique <u>I</u> nternational (International <u>A</u> tomique <u>T</u> ime)
TCB	<u>B</u> arycentric <u>C</u> oordinate <u>T</u> ime
TCG	<u>G</u> eocentric <u>C</u> oordinate <u>T</u> ime
TDB	<u>B</u> arycentric <u>D</u> ynamic <u>T</u> ime
TDT	<u>T</u> errestrial <u>D</u> ynamic <u>T</u> ime
TEC	<u>T</u> otal <u>E</u> lectron <u>C</u> ontent
TEC-U	<u>TEC</u> <u>U</u> nits
TIC	<u>T</u> ime <u>I</u> nterval <u>C</u> ounter
TRF	<u>T</u> errestrial <u>R</u> eference <u>F</u> rame
TT	<u>T</u> errestrial <u>T</u> ime
TUW	<u>TU</u> <u>W</u> ien
TWSTFT	<u>T</u> wo- <u>W</u> ay <u>S</u> atellite <u>T</u> ime and <u>F</u> requency <u>T</u> ransfer
U.S.DoD.	<u>U.S.</u> <u>D</u> epartment of <u>D</u> efense
USERE	<u>U</u> ser- <u>E</u> quivalent <u>R</u> ange <u>E</u> rror
USNO	<u>U.S.</u> <u>N</u> aval <u>O</u> bservatory
UT0	<u>U</u> niversal <u>T</u> ime <u>0</u> (Null)
UT1	<u>U</u> niversal <u>T</u> ime <u>1</u>
UT2	<u>U</u> niversal <u>T</u> ime <u>2</u>
UTC	<u>C</u> oordinated <u>U</u> niversal <u>T</u> ime
VLBI	<u>V</u> ery <u>l</u> ong <u>B</u> aseline <u>I</u> nterferometry
VNIIFTRI	Main Metrological Center of Russian Time and Frequency Service
VTEC	<u>V</u> ertical <u>T</u> otal <u>E</u> lectron <u>C</u> ontent
WGS-84	<u>W</u> orld <u>G</u> eodetic <u>S</u> ystem-84

## Quellenangaben der Abbildungen

- Abb.1.1 <http://www.intergeo.de/archiv/2009/muellerJ.pdf>: Erdrotation - Plage oder Freude der Geodäsie?, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Müller, Intergeo 2009, 04.03.2010
- Abb.1.3 [Audoin, Guinot, 2001]
- Abb.1.4 [Senior K., Ray J., 2007]
- Abb.3.2 <http://www.allanstime.com>, "The Science of Timekeeping ", 04.03.2010
- Abb.3.3 <http://tf.nist.gov/general/glossary.htm>, 04.03.2010
- Abb.3.4 <http://tf.nist.gov/general/glossary.htm>, 04.03.2010
- Abb.3.5 <http://tf.nist.gov/general/glossary.htm>, 04.03.2010
- Abb.3.6 [http://www.esa.int/esaCP/SEMW398A9HE\\_Germany\\_0.html#subhead2](http://www.esa.int/esaCP/SEMW398A9HE_Germany_0.html#subhead2), 15.06.2005
- Abb.3.7 <http://tf.nist.gov/general/glossary.htm>, 04.03.2010
- Abb.3.8 <http://tf.nist.gov/general/glossary.htm>, 04.03.2010
- Abb.4.1a <http://www.aero.org/publications/crosslink/summer2002/07.html>, 04.03.2010
- Abb.4.1b <http://www.kowoma.de/gps/Satelliten.htm>, 05.12.2005
- Abb.4.2 [Bretterbauer K., 1995]
- Abb.4.3 [Seeber, 2003]
- Abb.4.4 <http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/gim.jpg>, 04.03.2010
- Abb.4.5 [http://nercslr.nmt.ac.uk/current\\_rnd/Hx\\_parameters/webparams.html](http://nercslr.nmt.ac.uk/current_rnd/Hx_parameters/webparams.html), 23.08.2007  
<http://www.spacetoday.org/Satellites/GLONASS.html>, 23.08.2007
- Abb.4.6 [http://ilrs.gsfc.nasa.gov/satellite\\_missions/list\\_of\\_satellites/glob\\_general.html](http://ilrs.gsfc.nasa.gov/satellite_missions/list_of_satellites/glob_general.html), 04.03.2010
- Abb.4.7 [http://www.esa.int/esaCP/SEMW398A9HE\\_Germany\\_0.html#subhead2](http://www.esa.int/esaCP/SEMW398A9HE_Germany_0.html#subhead2), 15.06.2005
- Abb.4.8 [Eissfeller B., 2004]
- Abb.5.1 <http://tf.nist.gov/general/glossary.htm>, 04.03.2010
- Abb.5.2 <http://tf.nist.gov/general/glossary.htm>, 04.03.2010
- Abb.5.3 <http://tf.nist.gov/general/glossary.htm>, 04.03.2010
- Abb.5.4 <http://tf.nist.gov/general/glossary.htm>, 04.03.2010
- Abb.5.5 <http://tf.nist.gov/general/glossary.htm>, 04.03.2010
- Abb.5.6 <http://tf.nist.gov/general/glossary.htm>, 04.03.2010
- Abb.6.1 <http://igscb.jpl.nasa.gov/network/netindex.html>, 04.03.2010
- Abb.6.2 <http://www.rtings.net/network.php>, 07.10.2009
- Abb.8.1 [Senior K., Ray J., 2007]
- Abb.8.4 [Senior K., Ray J., 2007]

## Quellenangaben der Tabellen

- Tab.1.1 [Kneubühl, 1994]  
Tab.2.2 <http://de.wikipedia.org/wiki/Schaltsekunde>, 04.03.2010  
Tab.3.1 <http://tf.nist.gov/general/glossary.htm>, 04.03.2010, ergänzt  
Tab.4.1 [Kaplan, Hegarty, 2006]  
Tab.4.2 <http://www.glonass-ianc.rsa.ru>, 29.05.2008  
Tab.4.3 [DVW Bayern e.V., 2006]  
Tab.6.1 <http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>, 04.03.2010

## Literaturverzeichnis (Bücher, Zeitschriften, Fachartikel)

- ALLAN D. W., ASHBY N., HODGE C. C., 1997: The Science of Timekeeping; Application Note 1289. Hewlett-Packard Company, USA
- AUDOIN C., GUINOT B., Englische Übersetzung 2001: The Measurement of Time; Time Frequency and the Atomic Clock. Cambridge University Press, Cambridge
- BAUCH A., 1994: Lieferanten der Zeit. In: Physik in unserer Zeit / 25. Jahrg. 1994 / Nr. 4, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim
- BAUER M., 1994: Vermessung und Ortung mit Satelliten. Wichmann-Verlag GmbH, Heidelberg
- BAUERSIMA I., 1983: NAVSTAR/Global Positioning System (GPS III). Mitteilungen der Satellitenbeobachtungsstation Zimmerwald, Nr. 10, S. 1-15
- BEUTLER G., et al., 2001: Bernese GPS Software Version 4.2; Documentation. Astronomical Institute University of Berne
- BRAMMER K., SIFFLING G., 1975: Kalman-Bucy-Filter. R. Oldenburg Verlag München Wien
- BRETTTERBAUER K., 1995: Skriptum Höhere Geodäsie. TU Wien
- BRIGHAM E. O., 1987: FFT - Schnelle Fourier-Transformation. Oldenbourg Verlag GmbH, München
- BRÖDERBAUER V., 2000: Lösung von Phasenmehrdeutigkeiten und Genauigkeitsbetrachtungen im österreichischen GPS-Grundnetz AREF. Diplomarbeit, Institut für Geodäsie und Geophysik der TU Wien
- BRÖDERBAUER V., WEBER R., 2003: Results of Modelling GPS Satellite Clocks. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), Eigenverlag OVG
- BRÖDERBAUER V., OPITZ M., WEBER R., 2007: Automated quasi-realtime prediction of GNSS clock corrections. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), Eigenverlag OVG
- BUTTKUS B., 1991: Spektralanalyse und Filtertheorie in der angewandten Geophysik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
- CHUI C. K., CHEN G., 1987: Kalman Filtering with Real-Time Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- CRAMER F., 1996: Der Zeitbaum. Grundlegung einer allgemeinen Zeittheorie. Insel Verlag Frankfurt am Main und Leipzig
- DEFRAIGNE p., 2008: Time Transfer from combined Analysis of GPS and TWSTFT Data. 40th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting (Paper)
- DACH R., BEUTLER G., HUGENTOBLER U., SCHAER S., SCHILDKNECHT T., SPRINGER T., DUDLE G., PROST L., 2003: Time Transfer Using GPS Carrier Phase: Error Propagation and Results. In: Journal of Geodesy, Vol. 77, DOI 10.1007/s00190-002-0296-z
- DEISTING B., HEIN G. W., 2006: Galileo - ein europäisches Projekt von internationaler Bedeutung. Zeitschrift für Vermessungswesen, 131. Jg., Heft 5/2006

- DINWIDDY S., 2003: Project Galileo /Galileo/GSRD, System Requirement Document Version 3.0. printed by Simon Dinwiddy, generated form DOORS 5.2
- DVW Bayern e.V., 2006: Mitteilungen; Schwerpunktheft GALILEO. 58. Jahrgang, 3.2006, Herausgeber: DVW Bayern e.V.
- EISSFELLER B., 2004: Das Europäische Satellitennavigationssystem GALILEO. Vortrag: Fachtagung der ITG Satellitennavigationssystem, Universität Bern, 16.09.2004
- FRAGNER E., 1998: Satellitenbahnprädiktion unter Einbeziehung aktueller Laserdistanzmessungen. Diplomarbeit, Institut für Geodäsie und Geophysik der TU Wien
- GREWAL M.S., ANDREWS A.P., 1993: Kalman Filtering. Theory and Practice. Prentice-Hall, Inc. A Simon & Schuster Company Englewood Cliffs, New Jersey 07632
- GUREVICH E. L., 1995: Two-way time transfer experiment via the Horizon satellite. In: Metrologica, Vol. 32, S 51-53
- HANSON D. W., 1989: Fundamentals of Two-Way Time Transfer by Satellite. 43rd annual Symposium and Frequency Control
- HOFMANN-WELLENHOF B., LEGAT K., WIESER A., 2003: Navigation. Springer-Verlag Wien
- HOFMANN-WELLENHOF B., LICHTENEGGER H., WASLE E., 2008: GNSS (GPS, GLONASS, Galileo & more). Springer-Verlag Wien NewYork
- HOFMANN-WELLENHOF B. et al., 2001: GPS: Theory and Practice. Springer-Verlag, Wien / New York
- HORVAT M., 1984: Das Phänomen Zeit. Literas-Verlag, Wien
- JAROS A., NUSSBAUMER A., NUSSBAUMER P., KUNZE H., MATHELITSCH L., 1990: Physik-compact, Basiswissen 1-4. Schulbuch, hpt-Verlag Wien
- JIANG Z., PETIT G., 2009: Combination of TWSTFT and GNSS for accurate UTC time transfer. In: Metrologia, Vol. 45, S. 305-314
- KAPLAN E. D., HEGARTY C. J., 2006: Understanding GPS, Principles and Applications, 2nd Edition. Artech House, Inc., Norwood
- KNEUBÜHL F. K., 1994: Repetitorium der Physik. B. G. Teubner-Verlag, Stuttgart
- KOUBA J., 2003: A Guide to using International GPS Service (IGS) Products. Geodetic Survey Division, NRCan
- KOUBA J., 2004: Improved relativistic transformations in GPS. GPS Solutions, Springer-Verlag, Volume 8, Nr. 3, S.170-180
- LAHAYE F., ORGIAZZI D., TAVELLA P., CERRETTO G., 2006: GPS Time Transfer. GPS World, November 2006
- LENZ H., 2005: Universalgeschichte der Zeit. Marixverlag, Wiesbaden
- LIGHTMAN A., 2004: Und immer wieder die Zeit. (Einstein's Dreams). Knaur Taschenbuch, München
- LINZBAUER J., 2000: Die Zeit. Lösung des Problems aus morphologisch-energetischer Sicht. HAAG + HERCHEN Verlag, Frankfurt am Main
- MAINZER K., 1999: Zeit. Von der Urzeit zur Computerzeit. C.H.Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München

- MAYBECK P. S., 1979: Stochastic models, estimation, and control. Volume 1, Academia Press, New York / San Francisco / London
- MÜLLER J., 1999: Zeitskalen. Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, Band 5, S. 77-83
- OPITZ M., 2010: Real Time Integrity Monitoring of GPS Orbit and Clock Products by Means of the Global RT-IGS Reference Station Network. Dissertation, Institut für Geodäsie und Geophysik der TU Wien; in Druck
- OPITZ M., WEBER R., 2008: Real Time Monitoring of IGS Products within the RTIGS Network. Proceedings of the IGS Workshop, Darmstadt, 8 – 12 May 2006
- PEROVIC G., 2005: Least Squares (Monograph). Printed by D.O.O. TON, Belgrad
- PETIT G., JIANG Z., 2008: GPS All in View time transfer for TAI computation. In: Metrologia, Vol. 45, S. 35-45
- PROGRESS IN ASTRONAUTICS AND AERONAUTICS [PARKINSON B. W., SPILKER J. J. Jr. (Eds.), AXELRAD P., ENGE P. (Assoc. Eds.)], 1996: Global Positioning System: Theory and Applications, Volume II. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Volume 164
- RAY J., 2000: IGS/BIMP Time Transfer Pilot Project, IGS 1999 Technical Reports, November 2000
- RAY J., SENIOR K., 2005: Geodetic Techniques for Time and Frequency Comparisons Using GPS Phase and Code Measurements. In: Metrologia, Vol. 42, S. 215-232
- RAY J., SENIOR K., 2002: IGS/BIMP Pilot Project: GPS Carrier Phase for Time/Frequency Transfer and Time Scale Formation; Metrologia, 4th International Symposium on Time Scale Algorithms - 15 March 2002
- REIßMANN G., 1976: Die Ausgleichsrechnung. VEB-Verlag für Bauwesen, Berlin
- ROTHACHER M., 2003: Erdmessung und Satellitengeodäsie 2, Vorlesungsskriptum. TU München
- RÖTHLEIN B., 2004: Schrödingers Katze. Einführung in die Quantenphysik. Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG, München
- SCHÖDLBAUER A., 2000: Geodätische Astronomie. Walter de Gruyter Verlag, Berlin / New York
- SEEBER G., 2003: Satellite Geodesy, 2nd Edition. Walter de Gruyter Verlag, Berlin / New York
- SEEMANN F. W., 1997: Was ist Zeit? - Einblicke in die unverstandene Dimension. Wissenschaft & Technik-Verlag, Berlin
- SEIDELMANN P. K. (Editor), 1992: Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac. University Science Books, 20 Edgehill Road, Mill Valley, CA 94941
- SENIOR K., KOPPANG P., MATSAKIS D., RAY J., 2003: Developing an IGS Time Scale. In: Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on; Volume: 50, pp. 585- 593
- SENIOR K., RAY J., 2007: IGS Clock Products for Accurate Geodetic & Timing Applications. Presentation, AGU Fall Meeting 2007
- SENIOR K., RAY J., BEARD R., 2008: Characterization of periodic variations in the GPS satellite clocks. In: GPS Solutions, Volume 12, Nr. 3

- SENOIR K., RAY J., PETIT G., 2004: Comparison of Instrumental and Empirical Station Timing Biases for a set of ASHTECH Z12T GPS Receivers. 18<sup>th</sup> Frequency and Time Forum, University of Surrey, Guildford, UK., 5-7 April 2004
- SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT SPEZIAL, 1/2003: Phänomen Zeit.
- SPORK Peter, 2004: Das Uhrwerk der Natur. Chronobiologie - Leben mit der Zeit. Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbeck bei Hamburg
- WASLE E., 2007: GNSS - GPS, GLONASS, Galileo & more. Dissertation, Fakultät der Technischen Mathematik und Technischen Physik der Universität Graz
- WASLE E., HOFMANN-WELLENHOF B., 2005: Galileo - Europas Beitrag zur Satellitenavigation, Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation, Heft 1/2005, S. 3-16
- WEINMANN R., 1986: Diskretes Kalmanfilter. Diplomarbeit, Institut für Elektrische Regelungstechnik der TU Wien
- WELCH G., BISHOP G., 2006: An Introduction to the Kalman Filter. TR 95-041, Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC 27599-3175.
- WELSCH W., HEUNECKE G., KUHLMANN H., 2000: Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. Aus der Reihe: Möser M., Müller G., Schlemmer H., Werner H. (Hrsg.): Handbuch Ingenieurgeodäsie. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg
- ZUMBERGE J. F., HELFIN M. B., JEFFERSON D. C., WATKINS M. M., WEBB F. H., 1997: Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, Journal of Geophysical Research (JGR), Vol. 102, No. B3, pp. 5005-5017
- ZUMBERGE J. F., LIU R., NEILAN R.E., 1995: IGS Annual Report 1994, Pasadena, Jet Propulsion Laboratory
- XU G., 2003: GPS - Theory, Algorithms and Applications. Springer-Verlag Berlin / Heidelberg

---

## Weblinks

ACES: [http://www.spaceflight.esa.int/users/downloads/factsheets/fs031\\_10\\_aces.pdf](http://www.spaceflight.esa.int/users/downloads/factsheets/fs031_10_aces.pdf)

Allan's Time: <http://www.allanstime.com>

Astronomical Times: <http://www.gb.nrao.edu/~rfisher/Ephemerides/times.html>

GLONASS-1: <http://www.gs-enduro.de/html/navigation/gps.htm>

GLONASS-2: <http://www.glonass-center.ru/>

BIMP: <http://www.bipm.fr>

C<sup>14</sup>-Methode: [http://www.uni-bayreuth.de/departments/didaktikchemie/umat/mars/int\\_e5.htm](http://www.uni-bayreuth.de/departments/didaktikchemie/umat/mars/int_e5.htm)

CDDIS: <http://cddis.gsfc.nasa.gov/>

ESA: <http://www.esa.int/esaCP/index.html>

Galileo Contact Point Austria: <http://www.ffg.at/content.php?cid=193>

Galileo (ESA): <http://www.esa.int/esaNA/galileo.html>

GTRF: [http://www.ggsp.eu/ggsp\\_gtrf.html](http://www.ggsp.eu/ggsp_gtrf.html)

HG: <http://hg.tuwien.ac.at>

IERS Conventions 2003:  
<http://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn32.html>

IGL-Summary-Files: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov>

IGS: <http://igscb.jpl.nasa.gov/>

IGS Formate: <http://igscb.jpl.nasa.gov/components/formats.html>

IGS Mail: <http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/igsmail.html>, Mail-5155

IGS Produkte: <http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>

IGS RT WG: <http://www.rtigs.net/>

Kalender: <http://www.ortelius.de/kalender/index.php>

MPQ: <http://www.mpq.mpg.de/~haensch/comb/prosa/prosa.html>

NavCen (Navigation Center): <https://www.navcen.uscg.gov/>

NIST: <http://www.nist.gov>

PTB: <http://www.ptb.de/de/wegweiser/einheiten/si/sekunde.html>

RT-HG: <http://rtclocks.hg.tuwien.ac.at/>

Russian Space Agency: <http://www.glonass-ianc.rsa.ru/>

Sagnac-Effekt: <http://homepage.univie.ac.at/Franz.Embacher/rel.html>

Space and Tech: <http://www.spaceandtech.com/>

Synchronizer: [http://ivvgeo.uni-muenster.de/Vorlesung/GPS\\_Script/kapitel7/main7-1.html](http://ivvgeo.uni-muenster.de/Vorlesung/GPS_Script/kapitel7/main7-1.html)

USNO: <http://tycho.usno.navy.mil/>

## Lebenslauf

22.02.1975 geboren in Krems / Donau als Tochter von Josef Bröderbauer, Pensionist (ehem. Hauptschullehrer) und Christine Bröderbauer (ehem. Hausfrau); eine Schwester: Maria Bröderbauer, geboren am 08.08.1983

1981-1985 Besuch der VS-Stein, Philosophensteig, 3504 Krems-Stein  
1985-1993 Besuch des BRG-Krems, Ringstr. 33, 3500 Krems / Donau  
16.06.1993 Ablegung der Reifeprüfung

### **Teil I: technischer Ausbildungsweg**

28.09.1993 Inskription an der TU-Wien, Studienrichtung Vermessungswesen  
10.06.1996 1. Diplomprüfung

1996-1998 Ferienjobs am Vermessungsamt Krems an der Donau, Rechte Kremszeile 60, 3500 Krems / Donau

09.98-12.98 geringfügig beschäftigt im Vermessungsbüro Meißinger, Bahnhofplatz 8, 3500 Krems / Donau

18.10.1999 Anstellung im Vermessungsbüro Egger, Kremserstr. 3, A-3550 Langenlois

9.10.2000 2. Diplomprüfung

1.10.2001 Reduzierung des Dienstverhältnisses mit dem Vermessungsbüro Egger auf 25 Wochestunden; Beginn eines freien Dienstvertrages mit dem Institut für Geodäsie und Geophysik, Abteilung Höhere Geodäsie, TU Wien, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien

06.02-05.06 Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter in Ausbildung am Institut für Geodäsie und Geophysik, Abteilung Höhere Geodäsie, TU Wien, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien

07.06-06.10 Anstellung als Universitätsassistent (25 Stunden) am Institut für Geodäsie und Geophysik, Abteilung Höhere Geodäsie, TU Wien, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien

10.10-04.11 Univ.Lektor an der TU Wien

wissenschaftliche Arbeiten seit 2002:

- Autor bzw. Koautor von mehreren Publikationen und Posterbeiträgen über GNSS-Punktbestimmung sowie zum Thema GNSS-Satellitenuhren und die statistische Analyse von Satellitenuhrdaten
- mehrjährige Erfahrung in der Lehre durch Mithilfe bei Vorlesungen und Übungen
- derzeit Arbeit an der Dissertation zum Thema „Prädiktion und statistische Untersuchungen von GNSS-Satellitenuhren“

## **Teil II: energetischer Ausbildungsweg**

### Abgeschlossene Kurse / Ausbildungen:

- 13.03.2009 Kahi Loa
- 12.09.2009 Energiearbeit an der Hand (aus Korea)
- 1996-2010 Ausbildung in Shiatsu am ESI (Europäisches Shiatsu-Institut)
- 22.07.2010 Diplomprüfung ESI Shiatsu
- 23.09.2010 Dachverbandsdiplomprüfung für Shiatsu
- 2010- Ausbildung zum Bowen-Practitioner an der Europäischen Bowen-Akademie

### Seminare bei Serge Kahili King (Abschlussdatum):

- 12.10.2007 Dynamind Technique
- 12.10.2008 Changing Reality
- 18.10.2009 Money Mastery
- 30.10.2010 Huna in Counseling and Therapy