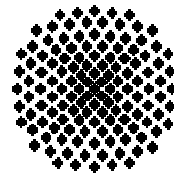


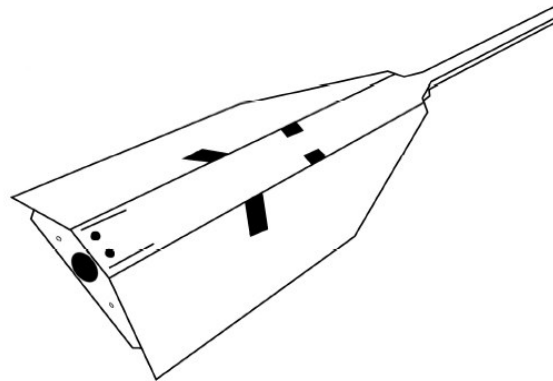
Universität Stuttgart

Geodätisches Institut



---

# **Evaluierung und Kalibrierung von CHAMP-Akzelerometerdaten anhand von Atmosphärenmodellen**



Studienarbeit im Studiengang  
**Geodäsie und Geoinformatik**  
an der Universität Stuttgart

Marina Baum

Stuttgart, Oktober 2006

---

**Betreuer:**

Prof. Dr.-Ing. Nico Sneeuw  
Universität Stuttgart

Dipl.-Ing. Tilo Reubelt  
Universität Stuttgart

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Hiermit versichere ich, Marina Baum, dass ich die von mir eingereichte Studienarbeit

**„Evaluierung und Kalibrierung von CHAMP-Akzelerometerdaten anhand von  
Atmosphärenmodellen“**

selbständig verfasst und ausschließlich die angegebenen Hilfsmittel und Quellen  
verwendet habe.

Datum, Ort: \_\_\_\_\_

Unterschrift: \_\_\_\_\_  
(Marina Baum)

# VORWORT

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Studienarbeit beigetragen haben.

Herrn Ales Bezdek (Astronomical Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic) für die Beantwortung von Fragen bezüglich der Parameter, die zur Berechnung der Atmosphärendichte aus Akzelerometermessungen benötigt werden. Für seine Unterstützung bei den aktuellen Atmosphärenmodellen, besonders für die Bereitstellung von Literatur und Literaturangaben zu den Atmosphärenmodellen.

Herrn Jason Zhang (Electro Optic Systems Pty. Ltd., Australia) für die Bereitstellung des Atmosphärenmodells DTM2000 in der Programmiersprache C++ und besonders für seine Unterstützung in der Anwendung des C-Programms.

Herrn Björn Frommknecht (TU-München) für die Bereitstellung des Atmosphärenmodells MSIS-86 in Form eines MEX-Files.

Herrn Matthias Weigelt (Geodätisches Institut, Universität Stuttgart) für die Berechnungen zur Evaluierung der Kalibrierungsparameter.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Nico Sneeuw (Geodätisches Institut, Universität Stuttgart) für seine Unterstützung und Betreuung dieser Studienarbeit.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Tilo Reubelt (Geodätisches Institut, Universität Stuttgart) für seine Hilfsbereitschaft, Betreuung und Unterstützung bei der Anfertigung dieser Studienarbeit.

Abschließend möchte ich mich noch bei meiner Familie und meinem Freundeskreis bedanken, die mir während der Dauer dieser Studienarbeit stets zur Seite standen.

# ZUSAMMENFASSUNG

## **Evaluierung und Kalibrierung von CHAMP-Akzelerometerdaten anhand von Atmosphärenmodellen**

---

Das Ziel dieser Studienarbeit ist die Kalibrierung der durch den STAR-Akzelerometer gemessenen Störbeschleunigung in alongtrack Richtung.

Dazu erfolgt zunächst ein Vergleich der aus STAR-Akzelerometermessungen berechneten Atmosphärendichte mit den aus Atmosphärenmodellen berechneten Atmosphärendichten für den Satelliten CHAMP. Die Atmosphärendichte wird einerseits aus der alongtrack Richtung der STAR-Akzelerometermessungen durch Umstellung der Gleichung zur Berechnung der Atmosphärenreibung bestimmt. Auf der anderen Seite, wird die Atmosphärendichte mittels der Atmosphärenmodelle DTM2000 und MSIS-86 berechnet. Die auf diese drei Arten bestimmten Atmosphärendichten werden anschließend bezüglich ihres jeweiligen Verlaufes, sowie durch eine Spektralanalyse, durch die Berechnung des Korrelationskoeffizienten und dem Vergleich der Sonnenstrahlung und des geomagnetischen Indexes analysiert. Danach erfolgt die Kalibrierung der aus den STAR-Akzelerometermessungen berechneten Atmosphärendichte anhand der Atmosphärenmodelle, sowohl im Orts- als auch über den Frequenzbereich. Dazu werden die Atmosphärendichten in die Störbeschleunigung in alongtrack Richtung umgerechnet. Dann werden die Kalibrierungsparameter mittels einer vermittelnden Ausgleichung sowohl im Ortsbereich als auch im Frequenzbereich bestimmt.

Zum Schluss werden die Kalibrierungsparameter analysiert und die für unterschiedliche Zeiträume berechneten Kalibrierungsparameter miteinander verglichen.

### **Schlüsselwörter:**

- Atmosphärendichte
- Atmosphärenmodell DTM2000
- Atmosphärenmodell MSIS-86
- Atmosphärenreibung
- Kalibrierung
- Satellit CHAMP
- STAR-Akzelerometer

# ABSTRACT

## Evaluation and calibration of CHAMP-accelerometer data with atmosphere models

---

The aim of this paper is the calibration of CHAMP-accelerometer data with respect to atmosphere models.

Therefore, the calculated density of atmosphere from STAR-accelerometer measurements is compared with the calculated density from atmosphere models. On the one hand the density is calculated from the conversion of the equation for the air drag using measurements of the STAR-accelerometer in alongtrack direction. On the other hand the density of atmosphere is calculated with the atmosphere models DTM2000 and MSIS-86. The three different methods are discussed graphically and by a spectral analysis, by the calculating of the coefficient of correlation and the development of solar flux and geomagnetic index. After that the calibration of the density of atmosphere from STAR-accelerometer measurements is done in the spatial domain as well as above the frequency domain. In addition the density of atmosphere is converted to the air drag in alongtrack direction. After that the parameter of calibration is calculated by a least-squares adjustment in the spatial domain as well as above the frequency domain.

At the end the parameter of calibration are analysed and the calculated parameter of calibration are compared for different time periods.

### key words:

- density of atmosphere
- atmosphere model DTM2000
- atmosphere model MSIS-86
- air drag
- calibration
- satellite CHAMP
- STAR-accelerometer

# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Aufbau der Atmosphäre.....	6
Abbildung 2: CHAMP-Forderansicht .....	12
Abbildung 3: CHAMP-Rückansicht.....	12
Abbildung 4: STAR-Akzelerometer.....	13
Abbildung 5: satellitenfestes System und Akzelerometersystem.....	15
Abbildung 6: Vergleich von Flughöhe und Störbeschleunigung .....	19
Abbildung 7: Vergleich der Differenz der lokalen Ortszeit zu Mittag mit der Störbeschleunigung .....	19
Abbildung 8: Vergleich der geodätischen Breite mit der Störbeschleunigung .....	20
Abbildung 9: Vergleich des Betrags der geodätischen Breite mit der Störbeschleunigung .....	20
Abbildung 10: Atmosphärendichte aus Akzelerometermessungen .....	26
Abbildung 11: Atmosphärendichte aus Atmosphärenmodell DTM2000 .....	29
Abbildung 12: Atmosphärendichte aus Atmosphärenmodell MSIS-86 .....	31
Abbildung 13: Atmosphärendichte über zwei Jahre .....	32
Abbildung 14: Atmosphärendichte über einen Tag.....	33
Abbildung 15: Atmosphärendichte über drei Satellitenumläufe .....	33
Abbildung 16: Vergleich der Atmosphärendichte mit der täglichen Sonnenaktivität und dem täglichen geomagnetischen Index über zwei Jahre.....	35
Abbildung 17: Vergleich Atmosphärendichte mit niedrigem und hohem geomagnetischen Index .....	36
Abbildung 18: Frequenzspektrum der Atmosphärendichte.....	38
Abbildung 19: Frequenzspektrum der Atmosphärendichte.....	39
Abbildung 20: Kalibrierungsparameter – Atmosphärenmodell MSIS-86.....	45
Abbildung 21: Kalibrierungsparameter – Atmosphärenmodell DTM2000 .....	46
Abbildung 22: Vergleich der Sonnenaktivität mit den Skalierungsfaktoren.....	47
Abbildung 23: Vergleich Sonnenaktivität und Skalierungsfaktor .....	47
Abbildung 24: Vergleich der Sonnenaktivität mit den Bias .....	48
Abbildung 25: Vergleich Sonnenaktivität und Bias .....	49
Abbildung 26: Vergleich: kalibrierte Störbeschleunigungen – Modellstör- beschleunigungen über 2 Jahre.....	50
Abbildung 27: Vergleich kalibrierte und Modellstörbeschleunigung am 11. März 2002 .....	51
Abbildung 28: Vergleich kalibrierte und Modellstörbeschleunigung am 10. März 2004 .....	51

Abbildung 29: Evaluierung der Kalibrierungsparameter .....	53
--	----

# GLEICHUNGSVERZEICHNIS

Gleichung 1: Newtongleichung .....	2
Gleichung 2: erweiterte Newtongleichung .....	3
Gleichung 3: Atmosphärenreibung .....	4
Gleichung 4: GFZ-Kalibrierungsgleichung der Störbeschleunigungen .....	17
Gleichung 5: Atmosphärendichte .....	25
Gleichung 6: Atmosphärendichte aus along-track Störbeschleunigung .....	25
Gleichung 7: Korrelationskoeffizient .....	36
Gleichung 8: Umrechnung Atmosphärendichte in Atmosphärenreibung .....	41
Gleichung 9: Kalibrierungsfunktion .....	42
Gleichung 10: Energieintegral .....	52



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>eidesstattliche Erklärung.....</b>	<b>I</b>
<b>Vorwort.....</b>	<b>II</b>
<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>II</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>III</b>
<b>Gleichungsverzeichnis .....</b>	<b>VI</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Störkräfte .....</b>	<b>2</b>
2.1 Störkräfte allgemein .....	2
2.2 Die Atmosphärenreibung .....	3
<b>3. Die Atmosphäre.....</b>	<b>6</b>
3.1 Aufbau der Atmosphäre .....	6
3.2 Einfluss der oberen Atmosphäre auf Satellitenbahnen .....	7
3.3 Atmosphärenmodelle der oberen Atmosphäre.....	8
<b>4. Der Satellit CHAMP .....</b>	<b>11</b>
4.1 Satellitenmission .....	11
4.2 Der Satellit .....	11
4.3 STAR-Akzelerometer .....	12
4.4 Satellitenfestes System und Akzelerometersystem.....	14
<b>5. CHAMP-Daten .....</b>	<b>16</b>
5.1 CHAMP-Daten .....	16
5.2 vorbereitende Berechnungen.....	16
5.3 Datenanalyse .....	18
<b>6. Berechnung der Atmosphärendichten .....</b>	<b>22</b>
6.1 vorbereitende Berechnungen.....	22
6.2 Atmosphärendichte aus Akzelerometermessungen .....	24
6.3 Atmosphärendichte aus DTM2000 – Modell .....	26
6.4 Atmosphärendichte aus MSIS-86 – Modell .....	29
<b>7. Vergleich der Atmosphärendichte .....</b>	<b>32</b>
7.1 Vergleich im Ortsbereich.....	32
7.2 Vergleich mit der Sonnenaktivität und dem geomagnetischen Index .....	34
7.3 Vergleich anhand des Korrelationskoeffizienten .....	36
7.4 Vergleich im Frequenzbereich .....	38
7.5 Schlussfolgerung aus den Vergleichen .....	40

<b>8. Kalibrierung des STAR-Akzelerometers .....</b>	<b>41</b>
8.1 Bestimmung der Kalibrierungsparameter .....	41
8.2 Analyse der Kalibrierungsparameter .....	45
8.3 Kalibrierung der gemessenen Störbeschleunigung .....	49
<b>9. Evaluierung – Kalibrierungsparameter .....</b>	<b>52</b>
<b>10. Schlussbetrachtung .....</b>	<b>55</b>
<b>Quellen- und Literaturverzeichnis .....</b>	<b>1</b>

# 1. EINLEITUNG

Wäre die Erde rund, von radial geschichteter Dichte und würden auf den Satelliten keine äußeren Störkräfte wirken, so würde die Satellitenbahn eine Ellipse beschreiben. In der Realität jedoch hat die Erde die Form einer Kartoffel und es wirken gravitative und nicht gravitative Störkräfte auf die Satellitenbahn. Dadurch beschreibt die Bahn des Satelliten keine Ellipse mehr.

Um nun eine Synthese und Analyse der Satellitenbahnen durchführen zu können, müssen die Störkräfte bekannt sein. Die gravitativen Störkräfte können relativ gut modelliert und beschrieben werden. Die Modellierung der nicht gravitativen Störkräfte dagegen gelingt nur mit großen Unsicherheiten.

Daher wurde in den Satelliten CHAMP der sogenannte STAR-Akzelerometer eingebaut. Mit dem STAR-Akzelerometer können die nicht gravitativen Störkräfte gemessen werden. Die Atmosphärenreibung ist mit einer Größenordnung von  $10^{-7} \text{ m/s}^2$  die größte der nicht gravitativen Störkräfte. Sie wirkt vor allem entgegen der Flugrichtung. Betrachtet man nun die Komponente der nicht gravitativen Störkräfte in alongtrack Richtung, so kann die Atmosphärenreibung als die gemessene Störbeschleunigung betrachtet werden.

Die gemessenen Störbeschleunigungen müssen nun kalibriert werden. Von Kalibrierung spricht man, wenn der Zusammenhang zwischen der Anzeige des Messgerätes und dem tatsächlichen Wert ermittelt wird.

Das Ziel dieser Studienarbeit ist nun auf der einen Seite die Evaluierung der STAR-Akzelerometedaten anhand von Atmosphärenmodellen. Auf der anderen Seite soll anhand der Evaluierung der Atmosphärendichten die Notwendigkeit einer Kalibrierung aufgezeigt werden. Die Atmosphärendichten werden dabei aus den Akzelerometermessungen und den Atmosphärenmodellen DTM2000 und MSIS-86 berechnet. Als Endziel dieser Studienarbeit gilt die Kalibrierung der gemessenen Störbeschleunigungen anhand der Atmosphärenmodelle DTM2000 und MSIS-86.

## 2. STÖRKRÄFTE

### 2.1 Störkräfte allgemein

Nimmt man an, dass die Erde eine radialgeschichtete Kugel ist und dass auf den Satelliten keine weiteren Einflüsse wirken, so beschreibt die Bahn eines Satelliten eine Ellipse. Diese elliptische Bahnen können durch die sechs Keplerelemente – die große Halbachse, die numerische Exzentrizität, die Inklination, die Rektaszension des aufsteigenden Knotens, das Argument des Perigäums und die wahre Anomalie – beschrieben werden, die für alle Umläufe konstant sind. Unter diesen Annahmen kann die Bewegungsgleichung eines Satelliten durch die Newtongleichung ausgedrückt werden.

*Gleichung 1: Newtongleichung*

$$\ddot{\mathbf{x}} = \nabla \frac{GM}{r} = -\frac{GM}{r^3} \mathbf{x}$$

mit:

- $\mathbf{x}$ : Position des Satelliten
- $\ddot{\mathbf{x}}$ : Beschleunigung des Satelliten
- $r$ : Abstand des Satelliten

In der Realität hat unsere Erde jedoch die Form einer Kartoffel und ist von weiteren Himmelskörpern umgeben. Zudem wirken auf den Satelliten Kräfte ein. Diese sogenannten Störkräfte werden in zwei Gruppen unterteilt:

- gravitative Kräfte oder Volumenkräfte
  - Abplattung der Erde durch das Erdgravitationsfeld
  - weitere Abweichungen des terrestrischen Gravitationsfeldes
  - Gravitative Einflüsse von Sonne, Mond, Planeten
  - Gezeitenkräfte
  - Polbewegung
- nicht gravitative Kräfte oder Oberflächenkräfte
  - Atmosphärenreibung
  - Strahlungsdruck der Sonne
  - Erdalbedo

Diese Kräfte verursachen Störungen der elliptischen Satellitenbahnen, dass heißt die Bahn eines Satelliten beschreibt keine Ellipse mehr. Die Keplerelemente sind nicht mehr konstant, sondern unterliegen einer zeitlichen Variation. Man spricht hier von oskulierenden Keplerelementen. Diese Störkräfte können durch Addition an die Newtonsgleichung des Satelliten berücksichtigt werden.

*Gleichung 2: erweiterte Newtonsgleichung*

$$\ddot{\mathbf{x}} = -\frac{GM}{r^3} \mathbf{x} + \mathbf{k}$$

mit:

- $\mathbf{x}$ : Position des Satelliten
- $\dot{\mathbf{x}}$ : Geschwindigkeit des Satelliten
- $r$ : Betrag der Position des Satelliten
- $\mathbf{k}$ : Summe der Störkräfte

Für diese Studienarbeit ist besonders die Atmosphärenreibung von Bedeutung. Da die Atmosphärenreibung mit einer Größenordnung von  $10^{-7} \text{ m/s}^2$  die größte der nicht gravitativen Kräfte ist und den Hauptanteil der STAR-Akzelerometermessungen in alongtrack Richtung des Satelliten CHAMP ausmacht.

Daher soll nur die Atmosphärenreibung näher betrachtet werden. Auf die übrigen Störkräfte soll in dieser Studienarbeit nicht eingegangen werden.

## 2.2 Die Atmosphärenreibung

Die Atmosphärenreibung ist die Reibung die der Satellit erfährt, wenn er sich in der dichteren Atmosphäre der Erde befindet. Die Luftsäule vor dem Satelliten wird dabei sehr stark komprimiert. Die Reibung verursacht eine Abbremsung, sowie eine starke Erhitzung des Satelliten, die bis zur Verglühung führen kann.

Die Atmosphärenreibung hängt folglich mit der Zusammensetzung der Atmosphäre zusammen und hat ihren größten Einfluss in der niederen Atmosphäre.

Für einen Satelliten bedeutet das in erster Näherung, dass die Atmosphärenreibung am erdnächsten Punkt, den Perigäum, am größten und am erdfernten Punkt, dem Apogäum am kleinsten ist. Befindet sich ein Satellit im Perigäum so erfährt er eine Abbremsung, dies hat zur Folge, dass der Satellit in der Nähe des Apogäums nicht mehr so stark ausschlagen kann. Die Höhe des Apogäums nimmt daher allmählich ab, wohingegen die Höhe des Perigäums nahezu konstant bleibt. Die Satellitenbahn nähert sich einer Kreisbahn an.

Verliert der Satellit auf Grund der Atmosphärenreibung an Höhe, so vergrößert sich seine Geschwindigkeit, da sich seine Umlaufbahn einer Kreisbahn annähert. Durch die größere Geschwindigkeit, wird auch der Effekt der Atmosphärenreibung größer. Der Satellit wird also immer weiter abgebremst und verliert somit schnell an Höhe.

Dieser Vorgang wiederholt sich solange, bis die Reibungskräfte so groß sind, dass der Satellit zu glühen beginnt und letztendlich ganz verglüht. Die Atmosphärenreibung beeinflusst neben dem Strahlungsdruck der Sonne auch die Lebensdauer des Satelliten.

Zusätzlich verursacht die Atmosphärenreibung eine Veränderung in der Orientierung der Satellitenbahn. In der starren Atmosphäre in einer Höhe von 120km bis 2000km dreht sich die Atmosphäre mit nahezu gleicher Geschwindigkeit mit der Erde. Dadurch entstehen kleine Seitwärtskräfte, die den Satelliten aus seiner Bahn auslenken.<sup>1</sup>

Die Modellierung der Atmosphärenreibung ist sehr schwer, da sie von zahlreichen Parametern abhängig ist. Vor allem die physikalischen Eigenschaften der Atmosphäre, im besonderen der Atmosphärendichte, sind nur unzureichend bekannt. Aber auch die dynamischen Oberflächenwerte (Widerstandsbeiwert und effektive Satellitenoberfläche) des Satelliten sind nur schwer zu bestimmen.

Die Atmosphärenreibung lässt sich mittels einer Gleichung aus der Aerodynamik berechnen.

*Gleichung 3: Atmosphärenreibung<sup>2</sup>*

$$\mathbf{F}_D = -\frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho(r, t) \cdot \frac{A}{m_S} \cdot |\mathbf{v}_{rel}| \cdot \mathbf{v}_{rel}$$

mit:

- $F_D$ : Störbeschleunigung der Atmosphärenreibung [ $\text{m/s}^2$ ]
- $C_D$ : satellitenspezifischer Widerstandsbeiwert [/-]
- $\rho(r, t)$ : Atmosphärendichte (r: Ort des Satelliten, t: Zeit) [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $A$ : effektive Satellitenoberfläche [ $\text{m}^2$ ]
- $m_S$ : Masse des Satelliten [kg]
- $\mathbf{v}_{rel}$ : relative Geschwindigkeit des Satelliten [m/s]

<sup>1</sup> Vgl. zu den letzten vier Kapiteln, King-Hele (1987), S. 8-9

<sup>2</sup> Sneeuw (2006) Vorlesungsaufschrieb: analytische Bahnberechnung

Der satellitenspezifische Widerstandsbeiwert  $C_D$  ist ein dimensionsloser Wert, der Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre und der Satellitenoberfläche beschreibt. Er nimmt Werte zwischen 1.5 und 3.0 an. Da die Bestimmung des satellitenspezifischen Widerstandsbeiwertes sehr schwer ist, wird meist für niedrig fliegende Satelliten ein Wert von 2.0 bis 2.3 angenommen. Dieser Wert ist ein Erfahrungswert, der aus der Bahnbestimmung gewonnen wurde.

Die relative Geschwindigkeit des Satelliten  $v_{rel}$  ist die Geschwindigkeit des Satelliten relativ zu der ihn umgebenden Atmosphäre. Ihre Berechnung ist sehr einfach, sie ergibt sich aus der Differenz der Geschwindigkeit des Satelliten  $v_{Sat}$  und der Geschwindigkeit der Atmosphäre  $v_{Atm}$ .

## 3. DIE ATMOSPÄRE

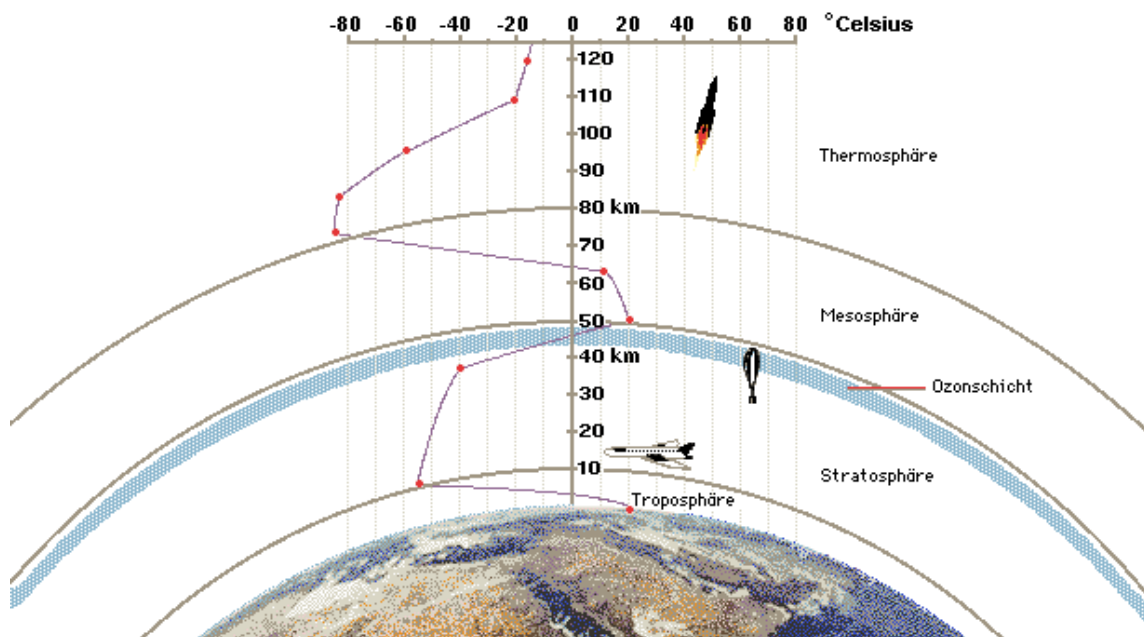
### 3.1 Aufbau der Atmosphäre

Unsere Erde ist wie auch andere Planeten und Monde von einer Gashölle umschlossen. Diese Gashölle, die Erdatmosphäre, reicht in eine Höhe von etwa 3000km über der Erdoberfläche und ist für die Existenz von Leben auf der Erde von entscheidender Bedeutung.

Die Hauptbestandteile der Atmosphäre sind Stickstoff mit 78% und Sauerstoff mit 21%. Das restliche eine Prozent, besteht vor allem aus Kohlenstoff-Sauerstoff-Verbindungen, Stickstoff-Sauerstoff-Verbindungen oder Edelgase, wie zum Beispiel Argon.

Die Erdatmosphäre wird in vier Schichten unterteilt – die Troposphäre, die Stratosphäre, die Mesosphäre und die Thermosphäre.

Abbildung 1: Aufbau der Atmosphäre



<http://de.encarta.msn.com>

Die unterste Schicht bildet die Troposphäre, sie reicht am Äquator in eine Höhe von circa 17km und an den Polen in eine Höhe von circa 9km. In dieser Schicht spielen sich die physikalischen Prozesse ab, die wir Wetter nennen. Die Temperatur der Troposphäre nimmt mit zunehmender Höhe bis auf  $-50^{\circ}\text{C}$  ab. Die Stratosphäre schließt sich an der Troposphäre an. In der Stratosphäre steigt die Temperatur



wieder an, bis sie an der Obergrenze von 50km die 0°C-Grenze erreicht. In der dann folgende Schicht, der Mesosphäre, nimmt die Temperatur mit zunehmender Höhe wieder auf –80°C ab. Die Mesosphäre reicht bis in etwa 80km Höhe.

Die an die Mesosphäre anschließende Schicht wird Thermosphäre genannt. In ihr steigt die Temperatur, aufgrund der starken Ionisierung durch die Sonneneinstrahlung, wieder mit zunehmender Höhe.

Die Flugbahn von niedrig fliegenden Satelliten befindet sich in einer Höhe von circa 400km. Daher soll in dieser Studienarbeit nur noch auf die Thermosphäre näher eingegangen werden.

### **3.2 Einfluss der oberen Atmosphäre auf Satellitenbahnen**

Die Thermosphäre, auch die obere Atmosphäre genannt, soll nun näher betrachtet werden, da sie die Bahn der Satelliten beeinflusst. Vor allem die Parameter Temperatur und Dichte bestimmen die Thermosphäre.

Die hohe Temperatur der Thermosphäre wird von der ultravioletten Strahlung der Sonne bestimmt. Sie nimmt Werte zwischen circa 350°C und 950°C an und ist in dieser Schicht abhängig von der Höhe. Die Sonnenaktivität weist zwei Temperatureffekte auf. Zum einen unterliegt die Temperatur einer täglichen Schwankung, das heißt die Temperatur am Nachmittag ist größer wie die Temperatur in der Nacht. Zum anderen unterliegt die Temperatur der Sonnenaktivität, die sich in einem 11jährigen Zyklus ändert.

Entscheidend für die auftretenden Änderungen in der Satellitenbahn ist die Atmosphärendichte, da sie im direkten Zusammenhang mit der Atmosphärenreibung steht. Die Atmosphärendichte nimmt mit größer werdender Flughöhe zu und hängt neben weiteren Parametern vor allem von der lokalen Ortszeit und der Sonnenaktivität ab.

Die zeitlichen Änderungen der Atmosphärendichte treten vor allem innerhalb eines Tages auf. Die Dichte erreicht ihr Maximum am Nachmittag und ihr Minimum nach Mitternacht. Diese Änderungen stehen ebenfalls mit der Temperatur in Verbindung.

Der Einfluss der Sonnenaktivität auf die Atmosphärendichte wird mit zunehmender Flughöhe größer. Die langzeitigen Änderungen der Sonnenaktivität können durch Messungen der Sonnenenergie bei einer Wellenlänge von 10.7cm beschrieben werden. Kurzzeitige Änderungen in der Sonnenaktivität werden dagegen von sogenannten Sonnenstürmen, die das Erdmagnetfeld stören, verursacht. Diese Änderung kann durch den geomagnetischen Index beschrieben werden. Der

geomagnetische Index wird durch Beobachtung geomagnetischer Störungen von Stationen auf der Erde bestimmt.

Die Atmosphärendichte steht wie schon erwähnt mit der Atmosphärenreibung in Verbindung. Je größer die Atmosphärendichte, desto größer die Atmosphärenreibung.<sup>1</sup>

### 3.3 Atmosphärenmodelle der oberen Atmosphäre

Die Parameter der oberen Atmosphäre können mit sogenannten Atmosphärenmodellen berechnet werden. Im Wesentlichen existieren zwei Arten von Atmosphärenmodellen. Auf der einen Seite Atmosphärenmodelle die auf der Auswertung von Atmosphärenreibungsdaten eines Satelliten beruhen und auf der anderen Seite Atmosphärenmodelle, die hauptsächlich durch Massenspektrometermessungen bestimmt wurden. Für beide Arten von Modellen wurde jeweils ein Modell beispielhaft ausgewählt.

#### 3.3.1 DTM2000

Das *Drag Temperature Model 2000* (DTM2000) wurde von S. Bruinsma entwickelt. Mit dem DTM2000 Atmosphärenmodell können die Atmosphärentemperatur, die Atmosphärendichte und die Dichten der chemischen Elemente (He, O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H) der Atmosphäre berechnet werden. Das Atmosphärenmodell ist eine Funktion, die von der geodätischen Höhe, Breite und Länge, sowie der Zeit, der Sonnenstrahlung und dem geomagnetischen Index abhängig ist.

Die Entwicklung dieses Atmosphärenmodells geht vor allem aus Atmosphärenreibungsdaten, die aus Satellitenbahnauswertungen ermittelt wurden, hervor.

Das erste DTM Atmosphärenmodell verwendete zur Herleitung seiner Parameter die direkten Messungen der Atmosphärentemperatur und der Atmosphärendichte, die aus Atmosphärenreibungsdaten hergeleitet wurden. Durch einen erweiterten Datensatz und einen verbesserten Algorithmus entstand die zweite Generation der DTM Atmosphärenmodelle. Das DTM2000 entstand nun aus deren Weiterentwicklung durch Modifikationen und zusätzliche Parameter.

Zur Herleitung der Temperatur wurden für das DTM2000 Daten aus Massenspektrometermessungen und Interferometermessungen von Satelliten herangezogen. Zusätzlich wurden Daten von Atmosphärenforschungssatelliten verwendet, um vor allem die Temperatur bei niedriger Sonnenaktivität bestimmen zu können. Zur Beschreibung der Sonnenaktivität des EUV- und UV-Lichtes wurde der

---

<sup>1</sup> Vgl. zu diesem Unterkapitel, King-Hele (1987), S. 13-18

F10.7 Index, der die Sonnenaktivität gemessen bei einer Wellenlänge von 10.7cm beschreibt, durch den sogenannte MgII Index der die Sonnenaktivität gemessen bei einer Wellenlänge von 279.9nm beschreibt, ersetzt.

Die Parameter des DTM2000 Atmosphärenmodells werden nun aus den Messungen hergeleitet. Das DTM2000 Modell basiert auf der Annahme der freien Molekülbewegung der chemischen Elemente (He, O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H) in der Atmosphäre. Durch die Integration der Differentialgleichung der freien Molekülströmung erhält man eine Höhenfunktion. Eine sphärische harmonische Funktion wird zur Beschreibung der auf die Temperatur und Dichte wirkenden Einflüsse, wie die Jahreszeit, die lokale Ortszeit, die Breite und Höhe, die Sonnenaktivität und die geomagnetische Aktivität, verwendet. Aus der Höhenfunktion und der sphärischen harmonischen Funktion lässt sich dann die Gesamtdichte der Atmosphäre berechnen.<sup>1</sup>

### 3.3.2 MSIS-86

Das *Mass-Spectrometer-Incoherent-Scatter-1986* (MSIS-86) Atmosphärenmodell wurde von A.E. Hedin am NASA Goddard Space Flight Center in Greenbelt, Maryland entwickelt. Es ermöglicht die Berechnung der Atmosphärentemperatur, der Atmosphärendichte und der Dichten der einzelnen chemischen Elementen N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, O, He, Ar, H und N der Atmosphäre. Dazu müssen jedoch die Zeit, die geodätischen Koordinaten, die Sonnenaktivität, sowie der geomagnetischen Index zur Verfügung stehen.

Zur Berechnung der Parameter wurden physikalische Werte, die aus Messungen gewonnen wurden herangezogen. Aus diesen Werten wurden dann Gleichungen zur Berechnung der Parameter abgeleitet.

Das MSIS-86 ist eine Weiterentwicklung des MSIS-83 Atmosphärenmodells. Für das MSIS-83 Atmosphärenmodell lieferten sieben Satelliten, zahlreiche Raketen und 5 Bodenstationen, die Massenspektrometermessungen durchführen, Daten über die Temperatur, die Gesamtdichte, sowie die Dichte der einzelnen chemischen Elementen (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, O, He, Ar, H) der Atmosphäre.

Das MSIS-86 Atmosphärenmodell wurde nun insofern erweitert, dass ein weiterer Satellit Messungen zur Atmosphärentemperatur und der Dichte der einzelnen Komponenten der Atmosphäre lieferte. Diese Messungen realisierten vor allem für die Pole einen größeren Datensatz und ermöglichten somit eine bessere Überdeckung. Damit konnten an den Polen vor allem Verbesserungen hinsichtlich der jahreszeitlichen Veränderungen vorgenommen werden.

---

<sup>1</sup> Vgl., Bruinsma, Thuillier, Barlier (2003)

Eine weitere Erweiterung des MSIS-83 wurde durch die Hinzunahme der Dichten des chemischen Elements Stickstoffes N, erreicht. Auch diese wurden aus Messungen von Satelliten gewonnen.

Die Parameter des Atmosphärenmodells werden also durch Annäherung einer Gleichung an einen physikalischen Wert gewonnen. Dazu werden im Wesentlichen ein Temperatur-, sowie ein Dichteprofil herangezogen.

Das Temperaturprofil wird für die obere Atmosphäre durch die sogenannte Bates-Walker Gleichung und für die niedere Atmosphäre durch einen inversen Polynomansatz beschrieben. Die Integration der hydrostatischen Gleichgewichtsformel für konstante Massen ermöglicht die Entwicklung eines Dichteprofiles aus dem Temperaturprofil. Das Dichteprofil basiert auf der Atmosphärendichte in einer Höhe von 120km, sowie weiteren Parametern. Das Dichteprofil setzt sich aus dem Modell für den homogenen Bereich und dem Modell für den heterogenen Bereich der Atmosphäre multipliziert mit Faktoren, die die chemischen Effekte und die Strömungseigenschaften beschreiben, zusammen. Der Übergang vom homogenen in den heterogenen Bereich findet in einer Höhe von circa 105km statt. Für den homogenen Bereich wird die Dichte aus den molekularen Massen der dort vorkommenden chemischen Elemente berechnet. Die Dichte am Übergang des homogenen zum heterogenen Bereich ist für beide Bereiche identisch.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Vgl. zu diesem Unterkapitel, Hedin (1987)

## **4. DER SATELLIT CHAMP**

### **4.1 Satellitenmission**

Am 15. Juli 2000 wurde der Kleinsatellit CHAMP – CHAllenging Minisatellite Payload for Geophysical Research and Application – erfolgreich in seine Umlaufbahn gebracht. Der Satellit wurde vor allem für geowissenschaftliche Grundlagenforschungen und die Atmosphärenphysik entwickelt.

Die Satellitenmission steht unter der gemeinsamen Leitung des Geoforschungszentrums Potsdam (GFZ) und des deutschen Instituts für Luft- und Raumfahrt (DLR). Die Jena-Optronik GmbH (DJD) war für den Bau der Satelliten verantwortlich. Internationale Partner, wie die USA und Frankreich wurden in Form von Geräteherstellung beteiligt.

Ein besonderes Anliegen dieser Mission ist die Schwerefeldbestimmung. Hierzu wird der Satellit selbst als Schweresensor betrachtet. Der Satellit CHAMP wurde so mit Instrumenten ausgestattet, dass seine Position und Geschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt über die von CHAMP aus sichtbaren GPS-Satelliten bestimmt werden kann. Die nicht gravitativen Störkräfte können direkt an Bord des Satelliten mit einem Beschleunigungsmesser gemessen werden. Somit lassen sich aus den beobachteten „Reststörungen“ des Satellitenorbits Rückschlüsse auf das Gravitationspotential ziehen

### **4.2 Der Satellit**

Der Satellit CHAMP ist ein trapezförmiger Satellit mit einer Länge von 4m bei eingefahrenem Ausleger, einer Höhe von 75cm, einer Breite von 1.621m auf der erdorientierten Seite und einer Breite von 30cm auf der erdabgewandten Seite. Der Ausleger an der Front des Satelliten besitzt nochmals eine Länge von 4.044m, so dass der Satellit bei ausgefahrenem Ausleger auf eine Gesamtlänge von 8.333m kommt.

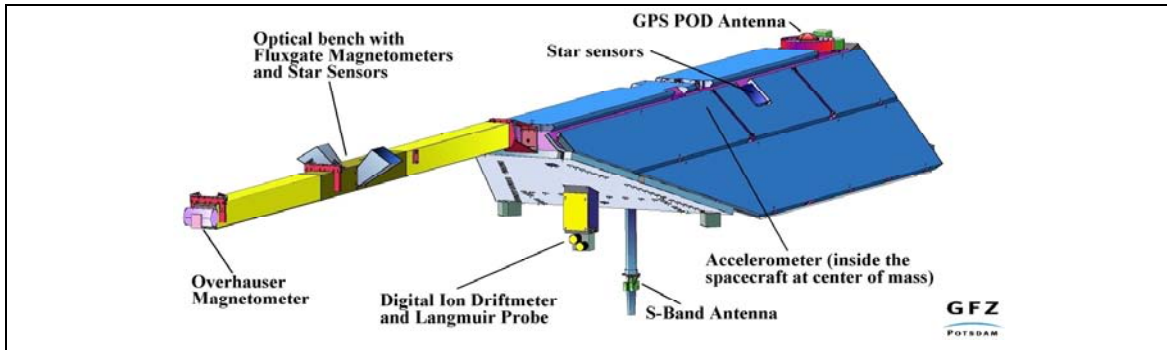
Die Masse des Satelliten beträgt 522kg, wobei die an Bord befindlichen Messinstrumente nur 30kg wiegen.

Der Satellit besteht aus einer Aluminium-Sandwich-Struktur mit fest angebrachten Sonnenkollektoren.

Die wichtigsten Messinstrumente an Bord des Satelliten sind der Overhauser Magnetometer, zwei Fluxgate-Magnetometer, vier Sternkameras, der STAR-

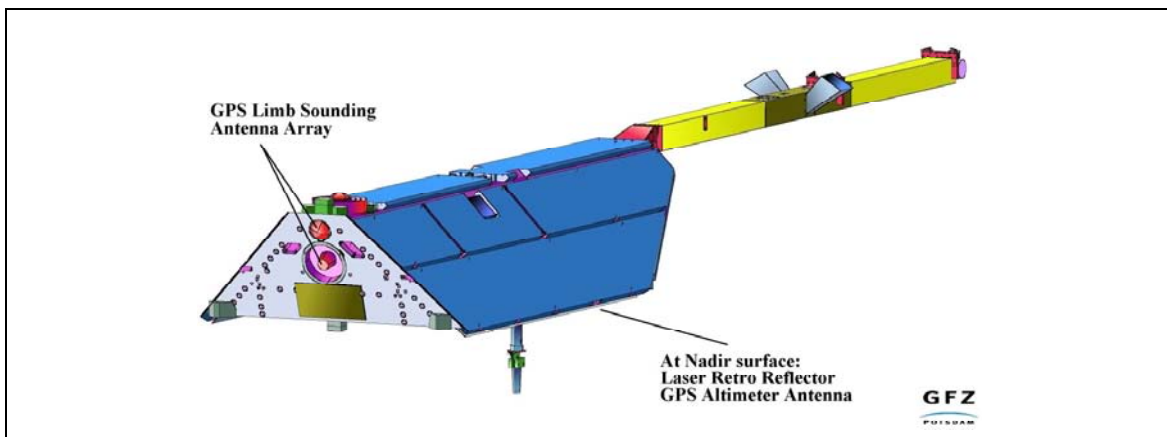
Beschleunigungsmesser, die GPS-Empfänger, der Laserretroreflektor, sowie das Ionendriftmeter.

Abbildung 2: CHAMP-Forderansicht



Quelle: [www.gfz-postdam.de/pd1/op/champ/system/index\\_SYSTEMS.html](http://www.gfz-postdam.de/pd1/op/champ/system/index_SYSTEMS.html)

Abbildung 3: CHAMP-Rückansicht



Quelle: [www.gfz-postdam.de/pd1/op/champ/system/index\\_SYSTEMS.html](http://www.gfz-postdam.de/pd1/op/champ/system/index_SYSTEMS.html)

Da für diese Studienarbeit vor allem der STAR-Akzelerometer von Bedeutung ist, soll auf diesen nun näher eingegangen werden. Die anderen Bordinstrumente werden nicht weiter ausgeführt.

### 4.3 STAR-Akzelerometer

Der zur Messung der nicht gravitativen Störkräfte eingesetzte Beschleunigungsmesser (STAR-Akzelerometer) wurde von der französischen Raumfahrtbehörde (Centre National d'Etudes Spatiales, CNES) bereitgestellt und vom Office d'Etudes et de Recherches Aerospatiales (ONERA) entwickelt und gebaut.

Das Messprinzip des STAR-Akzelerometer basiert auf einer geladenen Probemasse, die in einem elektrischen Feld in Ruhe gehalten wird. Die Spannungen, die aufgebracht werden müssen, um die Probemasse in Ruhe zu halten, sind ein direktes Maß für die auftretenden Beschleunigungen.

Würde man im Massenzentrum eines Satelliten, auf den nur die Gravitationskraft wirkt, einen Beschleunigungsmesser installieren, so würde dieser keine Beschleunigungen messen. Außerhalb des Massenzentrums des Satelliten könnten dagegen sehr wohl Beschleunigungen, die aufgrund der Rotation des erdorientierten Satelliten CHAMP um seinen Schwerpunkt entstehen, bestimmt werden.

Um nur die nicht gravitativen Störbeschleunigungen messen zu können, wird der STAR-Akzelerometer nun im Schwerpunkt des CHAMP-Satelliten montiert. Da der Beschleunigungsmesser nicht exakt im Schwerpunkt angebracht werden kann ist die Annahme eines Toleranzbereiches von 2mm nötig.

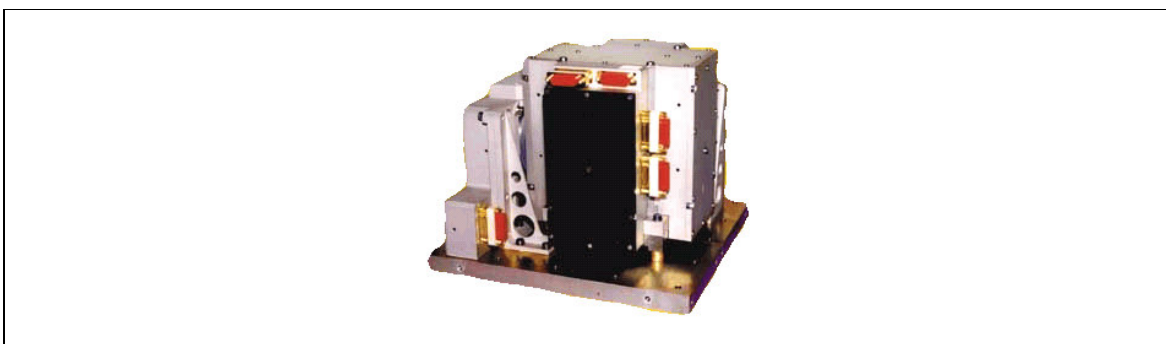
Mit dem Beschleunigungsmesser können nun drei rotatorische und drei lineare Beschleunigungen gemessen werden.

Der STAR-Akzelerometer ist 20cm lang, 20cm breit und 20cm hoch und wiegt circa 6kg. Er hat einen Energiebedarf von 4 Watt. Die Messungen der Beschleunigungen erfolgt mit der Frequenz von 1Hz.

Die Daten aus den Akzelerometermessungen werden dann zunächst einer Vorverarbeitung unterzogen. Dabei werden Ausreißer im Datenmaterial durch eine geeignete Vorverarbeitung herausgefiltert. Die wichtigsten Komponenten dieser Vorverarbeitung sind das Ausschneiden der Daten an Kontrollsteuerungszeitpunkten, die Polynomregression für sich überlappende 30-Sekunden-Intervalle mit anschließender Ausreißerdetektion anhand der  $2\sigma$ -Grenze, sowie die Datenkompression von 1Hz auf 0,1 Hz durch Mittelwertbildung eines 10-Sekunden-Intervalls.

Des weiteren müssen für die vorverarbeitete Daten noch für die einzelnen Komponenten Bias- und Skalierungsparameter geschätzt werden.

*Abbildung 4: STAR-Akzelerometer*



Quelle: [www.gfz-postdam.de/pd1/op/champ/system/index\\_SYSTEMS.html](http://www.gfz-postdam.de/pd1/op/champ/system/index_SYSTEMS.html)

Die drei Achsen des STAR-Akzelerometers sind so angeordnet, dass eine Achse in Flugrichtung (alongtrack), eine Achse rechtwinklig (crosstrack) aus der Bahnebene heraus und eine Achse in radiale Richtung, ergänzend zu einem Rechtssystem, zeigt.

Die Atmosphärenreibung ist die größte der Störkräfte und wirkt vor allem in alongtrack, aber auch in crosstrack Richtung auf den Satelliten. Der Strahlungsdruck der Sonne wirkt dagegen hauptsächlich in radialer Richtung, hat aber einen geringen Einfluss auf den Satelliten. Dieser Sachverhalt erklärt die Wahl der Auflösung der einzelnen Achsen. In crosstrack und alongtrack Richtung wurde deshalb eine Auflösung von  $\pm 3 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}^2$  und für die Achse in radialer Richtung eine Auflösung von  $\pm 3 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}^2$  gewählt. Diese Auflösung gilt für die linearen Beschleunigungen.

Für die rotatorischen Beschleunigungen liegt für eine Rotation um die Achse in radialer Richtung eine Auflösung von  $\pm 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}^2$  und für eine Rotation um eine der beiden anderen Achsen eine Auflösung von  $\pm 5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}^2$  vor.

#### 4.4 Satellitenfestes System und Akzelerometersystem

Das Satellitenfeste Referenzsystem  $B^{S/C}$  des Satelliten CHAMP ist so definiert, dass der erste Basisvektor  $B_1^{S/C}$  nach vorne zeigt, also ungefähr in die Flugrichtung, der dritte Basisvektor  $B_3^{S/C}$  nach unten gerichtet ist, also ungefähr in Nadirrichtung und der zweite Basisvektor  $B_2^{S/C}$  das System zu einem Rechtssystem vervollständigt. Der Ursprung ist im Schwerpunkt, beziehungsweise im geringfügig davon abweichenden Gravitationszentrum des Satelliten gelagert. Die Abweichungen des satellitenfesten Systems vom Bahnsystem werden durch die Abweichung des fliegenden Satelliten von seiner nominellen Lage verursacht. Bei CHAMP wird mit Hilfe von Steuermechanismen versucht diese Abweichungen im Bereich von  $2^\circ$  zu halten.

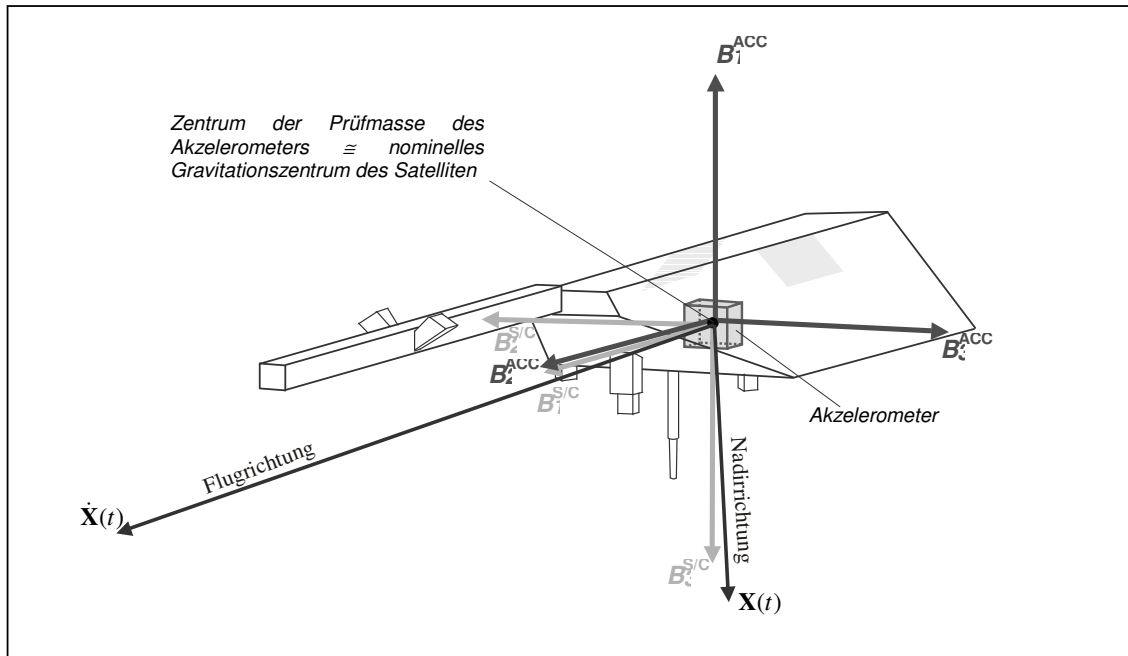
Das Akzelerometersystem  $B^{ACC}$  weist eine Ähnlichkeit mit dem satellitenfesten Referenzsystem  $B^{S/C}$  auf. Der erste Basisvektor  $B_1^{ACC}$  zeigt ungefähr entgegen der Nadirrichtung und ist somit antiparallel zu  $B_3^{S/C}$ , der zweite Basisvektor  $B_2^{ACC}$  gibt ungefähr die Flugrichtung an und ist somit parallel zu  $B_1^{S/C}$  und der dritte Basisvektor  $B_3^{ACC}$  ist antiparallel zu  $B_2^{S/C}$ . Diese Achseinteilung wurde gewählt, um die gemessenen Störbeschleunigungen ihren verursachenden Phänomenen zuordnen zu können. Das Zentrum der Prüfmassse des Akzelerometers sollte gut mit dem Gravitationszentrum des Satelliten und damit mit dem Ursprung des satellitenfesten Systems übereinstimmen, um eine möglichst fehlerfreie Messung der Störkräfte zu garantieren.

Die Achsrichtungen des satellitenfesten Systems und des Akzelerometersystems sind aufgrund von Ungenauigkeiten, Verformungen und Verlagerungen der



Prüfmasse nicht exakt antiparallel. Der Ursprung der beiden Systeme stimmt also nicht exakt miteinander überein. Diese Ausrichtungsfehler sind aber klein und können daher vernachlässigt werden.

Abbildung 5: satellitenfestes System und Akzelerometersystem



Der Abschnitt „der Satellit CHAMP“ beschränkt sich auf eine kurze Beschreibung des Satelliten und des STAR-Akzelerometers. Es wurde lediglich auf die für die Studienarbeit relevanten Aspekte des Satelliten eingegangen. Weitere Einzelheiten zu dieser Mission, ihren Zielen, dem Aufbau des Satelliten und zu den Messinstrumenten finden sich zum Beispiel auf der folgenden Internetseite: [www.gfz-potsdam.de/pd1/op/champ](http://www.gfz-potsdam.de/pd1/op/champ).

## 5. CHAMP-DATEN

### 5.1 CHAMP-Daten

Für diese Studienarbeit wurden für den Zeitraum vom 11. März 2002 bis zum 10. März 2004 folgende Daten des Satelliten CHAMP im 30s Sampling-Intervall zur Verfügung gestellt:

- Position des Satelliten im CTS-System in [m]
- Geschwindigkeit des Satelliten im CTS-System in [m/s]
- Parameter der Rotationsmatrix vom erdfesten System ins Inertialsystem
- Quaternionen, zur Transformation vom satellitenfesten System ins Inertialsystem
- nicht-kalibrierte STAR-Akzelerometermessungen im Akzelerometersystem in [m/s<sup>2</sup>]

Die Daten liegen für je einen Zeitpunkt im CHAMP-Format vor. Der im CHAMP-Format gegebene Tag, ist die Anzahl der Tage multipliziert mit dem Faktor 10, zwischen dem 01. Januar 2000 um 12TT und dem aktuellen Tag um 0h TT. Die Sekunden im CHAMP-Format beschreiben die Anzahl der Sekunden multipliziert mit dem Faktor 10<sup>6</sup>, die seit 0h TT vergangen sind.

### 5.2 vorbereitende Berechnungen

#### 5.2.1 Erstellung von MAT-Files aus den CHAMP-Daten

Zur Minimierung der Rechenzeit und zur einfacheren Anwendung der CHAMP-Daten in der Programmiersprache MATLAB, wurden aus den Textdateien der CHAMP-Daten MAT-files erstellt. Dabei wurden die Datenlücken oder Daten von Zeitpunkten, an denen Bahnkorrekturmanöver durchgeführt wurden, mittels NaN (not a number) gekennzeichnet.

Aufbau der einzelnen MAT-Files:

- Position des Satelliten im CTS-System in [m]  
pos\_CTS.mat : Tag im CHAMP-Format, Sekunde im CHAMP-Format, Position in x, Position in y, Position in z

- Geschwindigkeit des Satelliten im CTS-System in  $[m/s^2]$   
vel\_CTS.mat: Tag im CHAMP-Format, Sekunde im CHAMP-Format, Geschwindigkeit in x, Geschwindigkeit in y, Geschwindigkeit in z
- Parameter der Rotationsmatrix vom erdfestes System ins Inertialsystem:  
trafo\_e2s.mat: Tag im CHAMP-Format, Sekunde im CHAMP-Format,  $R_{11}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{13}$ ,  $R_{21}$ ,  $R_{22}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$ ,  $R_{32}$ ,  $R_{33}$
- Quaternionen, zur Transformation vom satellitenfesten System ins Inertialsystem:  
trafo\_sat2s.mat: Tag im CHAMP-Format, Sekunde im CHAMP-Format,  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ ,  $q_4$
- Nicht-kalibrierte Akzelerometermessungen in alongtrack Richtung des Satelliten in  $[m/s^2]$   
STAR\_ay.mat: Tag im CHAMP-Format, Sekunde im CHAMP-Format,  $a_y$

### 5.2.2 GFZ-Kalibrierung der Akzelerometermessungen

Die von dem STAR-Akzelerometer gemessenen Störbeschleunigung in alongtrack Richtung des Satelliten muss zunächst kalibriert werden, das heißt es muss ein Skalierungsfaktor und ein Bias an den vom STAR-Akzelerometer gemessenen Störbeschleunigungen angebracht werden. Dazu wurden die Kalibrierungsparameter und die Kalibrierungsfunktion vom Geoforschungsinstitut Potsdam (GFZ) zur Verfügung gestellt. Die Kalibrierungsparameter wurden vom GFZ aus Messdaten des Zeitraumes September 2001 bis Dezember 2001 bestimmt.

Kalibrierungsparameter:

- Bias:  $k_0 = 0.003555 \cdot e^{-3} m/s^2$
- Skalierung:  $k_1 = 0.833$

*Gleichung 4: GFZ-Kalibrierungsgleichung der Störbeschleunigungen*

$$a_{\text{kalibriert}} = (a_{\text{nicht-kalibriert}} - k_0) \cdot k_1$$

An den Tagen 10. Juni 2002, 11. Juni 2002, 06. November 2002, 09. Dezember 2002 und 10. Dezember 2002, wurden Bahnkorrekturmanöver durchgeführt. Die Messungen des STAR-Akzelerometers werden dadurch verfälscht, da das STAR-Akzelerometer durch die Bahnkorrekturmanöver auch die durch die Steuerdüsen hervorgerufenen Störbeschleunigungen misst. Es ist darauf zu achten, dass für Tage mit Bahnkorrekturmanövern die Störbeschleunigungen keine Aussagekraft besitzen und als falsch detektiert, d.h. zu NaN gesetzt werden.

Die GFZ kalibrierten Störbeschleunigungen werden ebenfalls in einem MAT-file gespeichert, das folgenden Aufbau besitzt:

- kalibrierte Akzelerometermessungen in alongtrack Richtung des Satelliten in  $[m/s^2]$   
GFZ\_ay.mat: Tag im CHAMP-Format, Sekunde im CHAMP-Format,  $a_y$

## 5.3 Datenanalyse

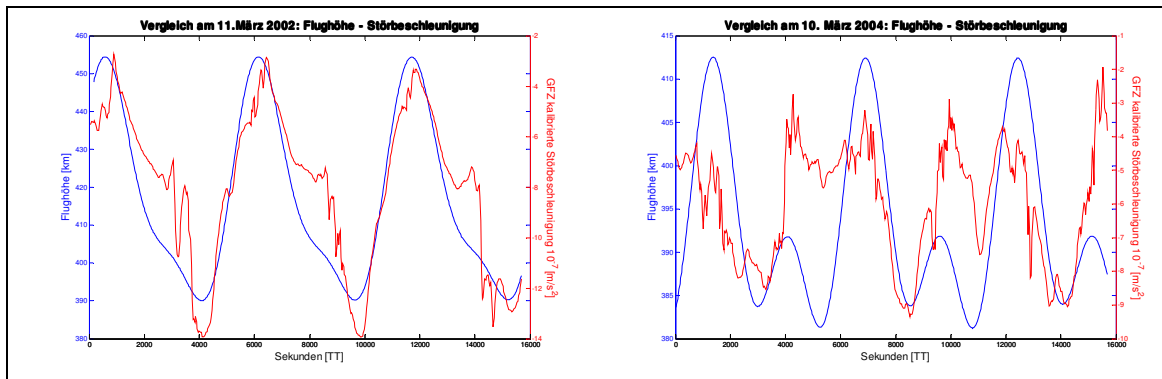
Wie im Kapitel „Störkräfte“ schon aufgeführt, dominiert die Atmosphärenreibung aufgrund ihrer Größe die nicht gravitativen Kräfte. Die Atmosphärenreibung wirkt zudem vor allem in alongtrack Richtung. Es kann daher angenommen werden, dass die Atmosphärenreibung die gemessenen Störbeschleunigungen des STAR-Akzelerometers in alongtrack Richtung dominiert. Folglich können die Störbeschleunigungen in alongtrack Richtung als Atmosphärenreibungen betrachtet werden.

Die Modellierung der Atmosphärenreibung ist, wie ebenfalls im Kapitel „Störkräfte“ dargestellt, schwierig, da die Atmosphärenreibung von zahlreichen Parametern abhängig ist. Am schwierigsten ist die Bestimmung der physikalischen Eigenschaften der Atmosphäre, insbesondere der Atmosphärendichte. Die Atmosphärendichte ist von der Flughöhe und der Sonnenaktivität abhängig. Da die Sonnenaktivität innerhalb eines Tages variiert, hängt die Atmosphärendichte und somit die Atmosphärenreibung auch von der Temperatur ab.

Um den Zusammenhang der Atmosphärenreibung mit der Atmosphärendichte aufzuzeigen, soll nun im folgenden eine Analyse der CHAMP-Daten erfolgen. Dazu soll die GFZ kalibrierte Störbeschleunigung gegenüber der Flughöhe und den Temperaturparametern untersucht werden.

In der Abbildung 6 ist die GFZ kalibrierte Störbeschleunigung in alongtrack Richtung, sowie die Flughöhe für je drei Satellitenumläufe dargestellt. Die Teilabbildungen wurden so ausgewählt, dass sie je drei Umläufe am Anfang des gegebenen Datensatzes (11. März 2002) und am Ende des Datensatzes (10. März 2004) zeigen.

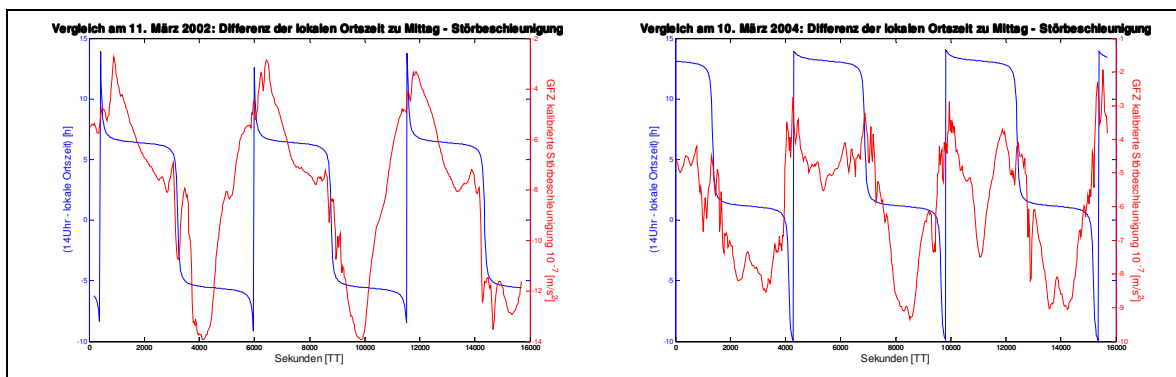
Abbildung 6: Vergleich von Flughöhe und Störbeschleunigung



Es ist deutlich eine Korrelation zwischen der durch die Exzentrizität der Satellitenbahn hervorgerufenen Änderungen in der Flughöhe und der Störbeschleunigung zu erkennen. Vergleicht man die Abbildungen zu den unterschiedlichen Zeitpunkten, so stellt man fest, dass für den späteren Zeitpunkt die Flughöhe kleiner und die Störbeschleunigung größer geworden ist. Daraus folgt, dass die Störbeschleunigung mit abnehmender Flughöhe größer wird.

Die Atmosphärendichte variiert mit der Temperatur. Die Temperatur schwankt unter anderem innerhalb eines Tages. Sie ist um die Mittagszeit größer als um Mitternacht. Um die Abhängigkeit der Atmosphärenreibung von der Temperatur zu zeigen ist in der Abbildung 7 die Störbeschleunigung in alongtrack Richtung und die Differenz der lokalen Ortszeit zu 14Uhr für drei Satellitenumläufe dargestellt.

Abbildung 7: Vergleich der Differenz der lokalen Ortszeit zu Mittag mit der Störbeschleunigung

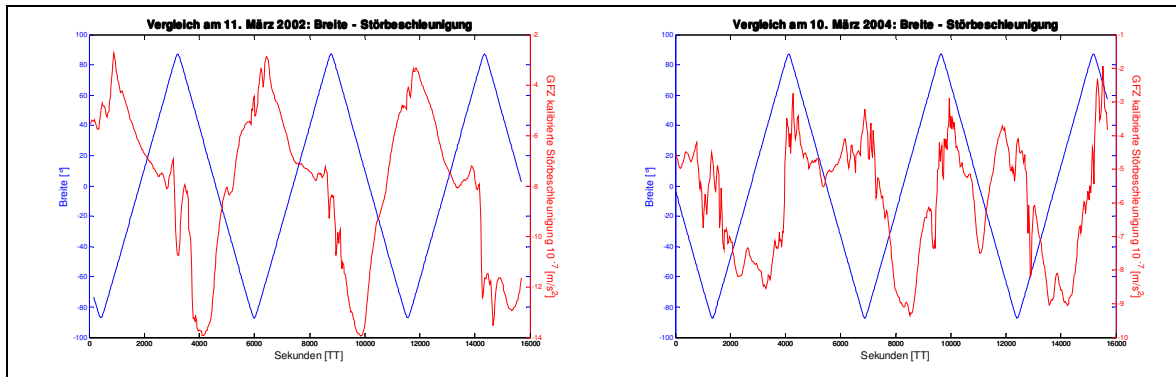


In den beiden Teilabbildungen ist zu erkennen, dass für große Differenzen der lokalen Ortszeit zu 14Uhr die Störbeschleunigung kleiner ist als für kleine Differenzen. Daraus folgt, dass die Atmosphärenreibung von der Temperatur

abhängig ist. Je größer die Tagestemperatur, desto größer ist die Atmosphärenreibung.

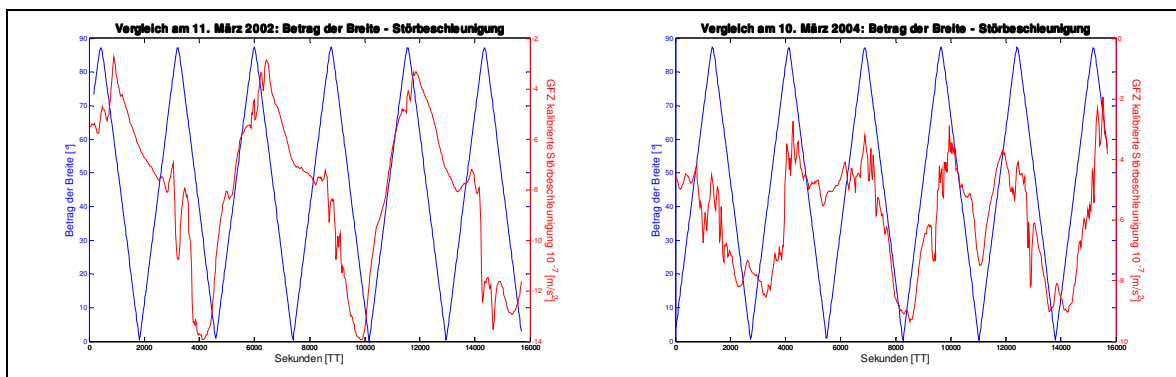
Die Temperatur variiert aber nicht nur innerhalb eines Tages, sondern sie ändert sich auch vom Pol zum Äquator hin. Am Äquator herrschen größere Temperaturen als an den Polen. Es müsste also auch eine Abhängigkeit der Atmosphärenreibung von der Breite zu erkennen sein. In der Abbildung 8 ist die Störbeschleunigung in alongtrack Richtung zusammen mit der geodätischen Breite dargestellt.

Abbildung 8: Vergleich der geodätischen Breite mit der Störbeschleunigung



Es ist zu erkennen, dass die Atmosphärenreibung am Südpol am größten ist, am Äquator ein lokales Minimum annimmt und am Nordpol einen mittleren Wert besitzt. Dies kann noch verdeutlicht werden, wenn man die Störbeschleunigung mit dem Betrag der geodätischen Breite in einer Abbildung darstellt.

Abbildung 9: Vergleich des Betrags der geodätischen Breite mit der Störbeschleunigung



Es lässt sich also die Aussage treffen, dass die Atmosphärenreibung am Äquator kleiner ist als an den Polen. Die Atmosphärenreibung nimmt also für große Temperaturen einen größeren Wert an, als für kleine Temperaturen.

*Zusammenfassung:*

Die Atmosphärenreibung hängt also von den Faktoren Flughöhe und Temperatur wie folgt ab:

- Flughöhe:  
Die Atmosphärenreibung nimmt mit zunehmender Flughöhe ab.
- Temperatur:  
Die Atmosphärenreibung nimmt mit zunehmender Temperatur zu.

## 6. BERECHNUNG DER ATMOSPHÄRENDICHTEN

Dieses Kapitel enthält die Beschreibung der Berechnungen der Atmosphärendichten aus den STAR-Akzelerometermessungen und aus den Modellen DTM2000 und MSIS-86.

### 6.1 vorbereitende Berechnungen

#### 6.1.1 entwickelte Matlab-Funktionen

- **date\_calculations**  
Diese Funktion ermöglicht die Berechnungen des aktuellen Tages [Jahr, Monat, Tag], sowie die Anzahl der Tage im laufenden Jahr aus dem Tag im CHAMP-Format für den Zeitraum 01.01.2000 bis 31.12.2004.
- **xyz2lla\_g**  
Die Berechnung der geodätischen Koordinaten Länge in [rad], Breite in [rad], Höhe in [m] aus kartesischen Koordinaten im CTS-System in [m] wird durch diese Funktion realisiert.
- **sec\_TT2LT**  
Mittels dieser Funktion kann die terrestrische Zeit in [s] in die lokale Ortszeit in [s] umgerechnet werden.
- **geomagIndex**  
Diese Funktion berechnet den Mittelwert des geomagnetischen Index  $k_p$  der letzten 24 Stunden, sowie den derzeitigen geomagnetischen Index mit einer zeitlichen Verschiebung von 3h am Pol und 6h am Äquator.
- **sat\_surface**  
Mit dieser Funktion wird die effektive Gesamtsatellitenoberfläche [m<sup>2</sup>] aus der relativen Geschwindigkeit [m/s] im Akzelerometersystem berechnet. Diese Funktion ruft ihrerseits wiederum die Funktion `surfacemod_c` auf.
- **surfacemod\_c**  
Diese Funktion ermöglicht die Berechnung der effektiven Oberfläche [m<sup>2</sup>] einer Teilfläche des Satelliten CHAMP oder GRACE. Zur Lauffähigkeit dieser Funktion muss die Funktion `surfacemod_c.dll` vorliegen.



### 6.1.2 zusätzlich generierte MAT-Files

Für die Berechnungen der Atmosphärendichten aus den Akzelerometermessungen und den Modellen werden neben den im Kapitel „CHAMP-Daten“ beschriebenen MAT-Files

- pos\_CTS.mat
- vel\_CTS.mat
- trafo\_e2s.mat
- trafo\_sat2s.mat
- Star\_ay.mat

folgende MAT-Files benötigt:

- flux\_ap.mat
- flux\_kp.mat

Die MAT-Files flux\_ap.mat und flux\_kp.mat enthalten die tägliche Sonnenaktivität (flux) und die durchschnittliche Sonnenaktivität von drei Monaten (fluxA) gemessen bei einer Wellenlänge von 10.7 cm, sowie die dreistündigen geomagnetischen Indizes eines Tages (ap / kp) und den täglichen geomagnetischen Index ( $\emptyset$ ap /  $\emptyset$ ap). Der geomagnetischen Index kann entweder durch den sogenannten ap Wert oder durch den kp Wert repräsentiert werden.

Die Parameter der Sonnenaktivität wurden von Ales Bezdek Bezdek (Astronomical Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic) für den Zeitraum vom 01.01.1957 bis zum 31.12.2004 zur Verfügung gestellt.

Die Parameter des geomagnetischen Indizes wurden von der Internetseite [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC\\_DATA/INDICES/Kp\\_Ap](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/INDICES/Kp_Ap) für den Zeitraum vom 01.01.2002 bis zum 31.12.2004 heruntergeladen.

Die MAT-Files der Sonnenaktivität und des geomagnetischen Index sind nun wie folgt aufgebaut:

- flux\_ap.mat: Tag im CHAMP-Format, Datum im Format YYYY.MMDD, flux, fluxA, ap (0-3h), ap (3-6h), ap (6-9h), ap (9-12h), ap (12-15h), ap (15-18h), ap (18-24h),  $\emptyset$ ap
- flux\_kp.mat: Tag im CHAMP-Format, Datum im Format YYYY.MMDD, flux, fluxA, kp (0-3h), kp (3-6h), kp (6-9h), kp (9-12h), kp (12-15h), kp (15-18h), kp (18-24h),  $\emptyset$ kp

## 6.2 Atmosphärendichte aus Akzelerometermessungen

### 6.2.1 Berechnung der Atmosphärendichte

Die Berechnung der Atmosphärendichte aus STAR-Akzelerometermessungen erfolgt mit dem Matlab-Programm *density\_STAR\_TEXTfile.m*. Hierzu müssen folgende MAT-Files geladen werden:

- pos\_CTS.mat
- vel\_CTS.mat
- GFZ\_ay.mat
- trafo\_e2s.mat
- trafo\_sat2s.mat

Zusätzlich müssen folgende Parameter festgesetzt werden:

- Masse des Satelliten – hier: 522kg
- satellitenspezifischer Widerstandsbeiwert – hier: 2.2

Die berechnete Atmosphärendichte wird im Textfile „Dichte\_STAR.txt“ abgespeichert, das wie folgt aufgebaut ist:

- Tag im CHAMP-Format
- Sekunde im CHAMP-Format
- Atmosphärendichte [ $\text{kg/m}^3$ ]

Zur Lauffähigkeit des Programms werden folgende Matlab-Funktion benötigt:

- sat\_surface
- surfacemod\_c mit surfacemod\_c.dll

### 6.2.2 Formel zur Berechnung der Atmosphärendichte

Die Berechnung der Atmosphärendichte aus Akzelerometermessungen erfolgt durch Umstellung der Formel zur Berechnung der Atmosphärenreibung aus dem Kapitel „Störkräfte“. Nach Umformung der Gleichung und Betrachtung der einzelnen Komponenten erhält man folgende Formel zur Berechnung der Atmosphärendichte:

## Gleichung 5: Atmosphärendichte

$$\rho(r, t) = \frac{F_{1,D}}{-0.5 \cdot C_D \cdot \frac{A}{m_S} \cdot |\mathbf{v}_{rel}| \cdot v_{1,rel}}$$

$$\rho(r, t) = \frac{F_{2,D}}{-0.5 \cdot C_D \cdot \frac{A}{m_S} \cdot |\mathbf{v}_{rel}| \cdot v_{2,rel}}$$

$$\rho(r, t) = \frac{F_{3,D}}{-0.5 \cdot C_D \cdot \frac{A}{m_S} \cdot |\mathbf{v}_{rel}| \cdot v_{3,rel}}$$

mit:

- $\mathbf{F}_D = \begin{bmatrix} F_{1,D} \\ F_{2,D} \\ F_{3,D} \end{bmatrix}$  – Störbeschleunigung der Atmosphärenreibung [ $\text{m/s}^2$ ]
- $C_D$  – satellitenspezifischer Widerstandsbeiwert [/-]
- $\rho(r, t)$  – Atmosphärendichte ( $r$  – Ort des Satelliten,  $t$  – Zeit) [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $A$  – effektive Satellitenoberfläche [ $\text{m}^2$ ]
- $m_S$  – Masse des Satelliten [kg]
- $\mathbf{v}_{rel} = \begin{bmatrix} v_{1,rel} \\ v_{2,rel} \\ v_{3,rel} \end{bmatrix}$  – relative Geschwindigkeit des Satelliten [m/s]

Die Atmosphärenreibung besitzt in alongtrack Richtung des Satelliten ihren größten Einfluss. Daher kann zur Berechnung der Atmosphärendichte nur die Komponente der Störbeschleunigung in alongtrack Richtung herangezogen werden.

Die Gleichung zur Berechnung der Atmosphärendichte vereinfacht sich dann wie folgt:

## Gleichung 6: Atmosphärendichte aus along-track Störbeschleunigung

$$\rho(r, t) = \frac{a_y}{-0.5 \cdot C_D \cdot \frac{A}{m_S} \cdot |\mathbf{v}_{rel}| \cdot v_{1,rel}}$$

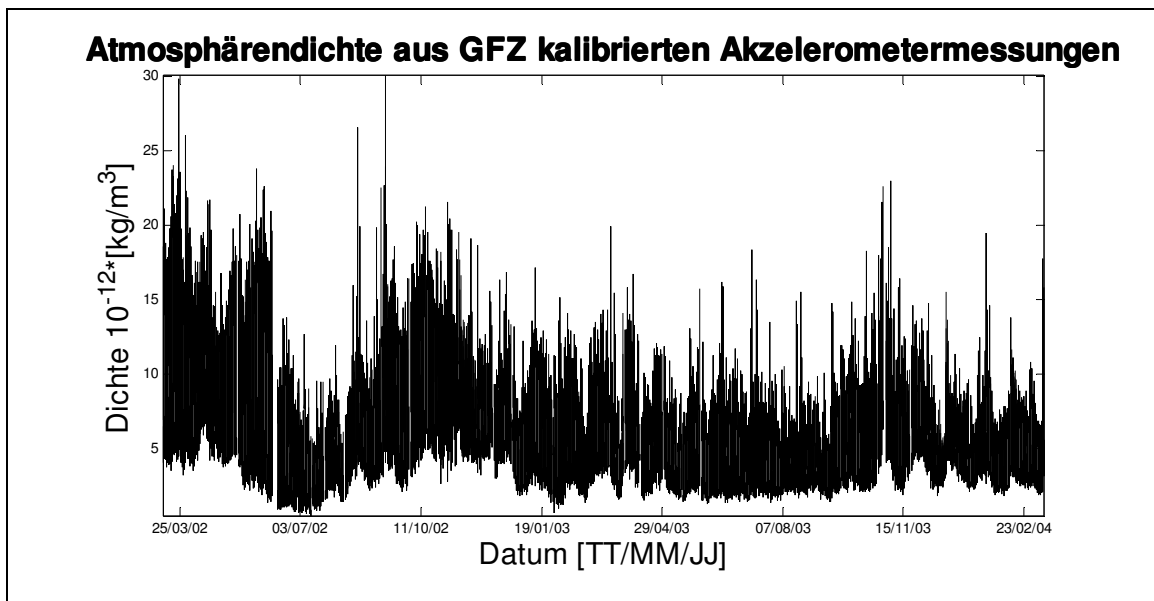
mit:

- $a_y$ : zweite Komponente der Störbeschleunigung im Akzelerometersystem  $B^{ACC}$  beziehungsweise erste Komponente der Störbeschleunigung im satellitenfesten Referenzsystem  $B^{S/C}$  in  $[m/s^2]$
- $v_{rel}^{S/C}$ : relative Geschwindigkeit des Satelliten im satellitenfesten Referenzsystem  $B^{S/C}$  in  $[m/s]$

### 6.2.3 Darstellung der Atmosphärendichte

Darstellung der aus Akzelerometermessungen berechneten Atmosphärendichte für den gegebenen Zeitraum vom 11. März 2002 bis zum 10. März 2004.

Abbildung 10: Atmosphärendichte aus Akzelerometermessungen



## 6.3 Atmosphärendichte aus DTM2000 – Modell

### 6.3.1 Berechnung der Atmosphärendichte

Zur Berechnung der Atmosphärendichte aus dem DTM2000 – Modell wurde ein C++ Programm verwendet. Das DTM2000-Atmosphärenmodell wurde von Herrn S. Bruinsma (CNES-CT/SI/GS, Toulouse) in der Programmiersprache FORTRAN entwickelt und implementiert. Die Übersetzung des FORTRAN Programms in ein C++ Programm wurde von Herrn J. Zhang (Electro Optic Systems Pty. Ltd., Australia) vorgenommen. Das C++ Programm besteht aus der Headerdatei

*DTM2000.h* und der Quellcodedatei *DTM2000.ccp*, die sowohl die Unterfunktionen als auch die Hauptfunktion MAIN, enthält.

Eingabeparameter:

- Tag im laufenden Jahr
- tägliche Sonnenaktivität
- durchschnittliche Sonnenaktivität der letzten drei Monate
- dreistündiger geomagnetischer Index  $k_p$  mit einer Verschiebung von 3 Stunden am Pol und 6 Stunden am Äquator  
(Verschiebung =  $6 - \text{Betrag}(\text{Breite}[\text{grad}]) \cdot 0.033$ )
- durchschnittlicher geomagnetischer Index  $k_p$  der letzten 24 Stunden
- Höhe [km]
- Breite [grad]
- Länge [grad]

Ausgabeparameter:

- Atmosphärendichte
- Dichte folgender chemischer Elemente: He, O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H und N
- mittlere atomare Masse
- Temperatur

Für diese Studienarbeit wurde die ursprüngliche Quellcodedatei *DTM2000.ccp* in zwei Quellcodedateien *main.ccp* und *DTM2000\_mod.ccp* aufgeteilt. Die Quellcodedatei *main.ccp* enthält die Hauptfunktion MAIN, die verändert wurde. Diese Funktion ermöglicht es nun, die Eingabeparameter aus einer Textdatei einzulesen und nach den Berechnungen die Ausgabeparameter, hier nur die Atmosphärendichte, abzuspeichern. Die *DTM2000\_mod.ccp* enthält die ursprünglichen Funktionen zur Berechnung der Ausgabeparameter.

Aufbau: Textdatei der Eingabeparameter:

- Tag im CHAMP-Format
- Sekunden im CHAMP-Format
- Tag im laufenden Jahr
- tägliche Sonnenaktivität
- durchschnittliche Sonnenaktivität der letzten drei Monate

- dreistündiger geomagnetischer Index  $k_p$  mit einer Verschiebung von 3 Stunden am Pol und 6 Stunden am Äquator  
(Verschiebung =  $6 - \text{Betrag}(\text{Breite}[\text{grad}]) \cdot 0.033$ )
- durchschnittlicher geomagnetischer Index  $k_p$  der letzten 24 Stunden
- Höhe [km]
- Breite [grad]
- Länge [grad]
- Flag – N: Daten falsch, Y: Daten richtig

Aufbau: Ausgabedatei:

- Tag im CHAMP-Format
- Sekunde im CHAMP-Format
- Atmosphärendichte [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Beim Start des modifizierten C++ Programmes muss zunächst der Dateiname der Eingabeparameterdatei eingegeben werden, danach erfolgt die Aufforderung zur Eingabe des Dateinamens der Ausgabedatei.

### 6.3.2 Berechnung der Eingabeparameter

Die Eingabeparameter werden vom Matlab-Programm *input\_DTM2000\_TEXTfile.m* berechnet. Dazu müssen folgende MAT-Files geladen werden:

- pos\_CTS
- flux\_kp

Die berechneten Eingabeparameter für das C++ Programm des Atmosphärenmodells DTM2000 werden in der Textdatei „input\_DTM.txt“ abgespeichert, deren Aufbau in 6.3.1 unter „Aufbau Textdatei der Eingabeparameter“, beschrieben wurde.

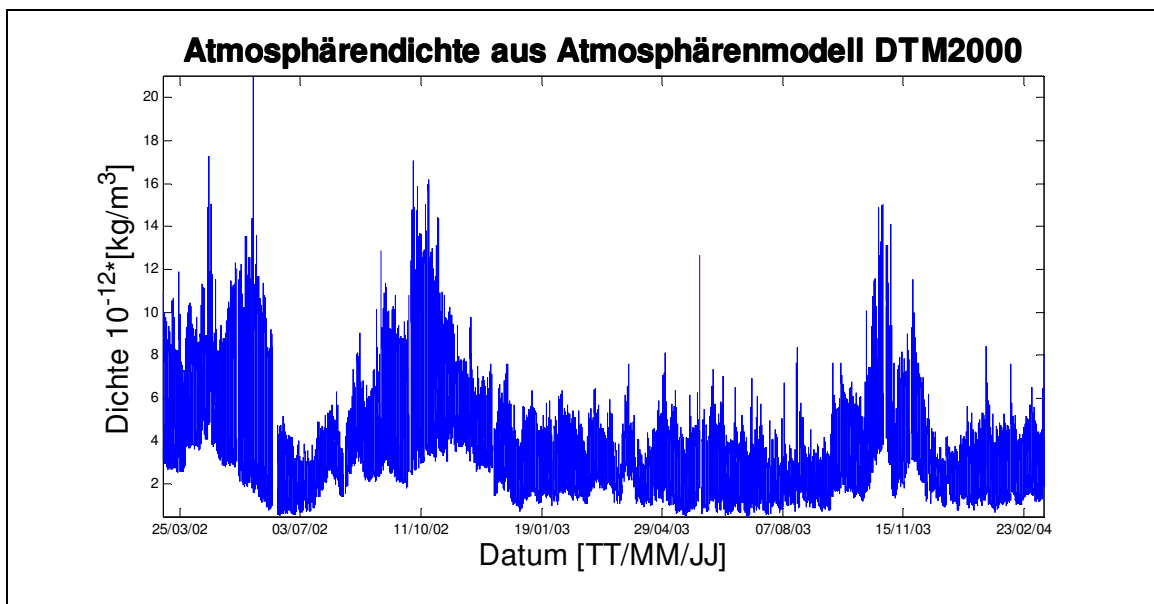
Zur Berechnung der Eingabeparameter werden zudem folgende Funktionen benötigt:

- date\_calculations
- xyz2lla\_g
- sec\_TT2LT
- geomagIndex

### 6.3.3 Darstellung der Atmosphärendichte

Darstellung der aus dem Atmosphärenmodell DTM2000 berechneten Atmosphärendichte für den gegebenen Zeitraum vom 11. März 2002 bis zum 10. März 2004.

Abbildung 11: Atmosphärendichte aus Atmosphärenmodell DTM2000



## 6.4 Atmosphärendichte aus MSIS-86 – Modell

### 6.4.1 Berechnung der Atmosphärendichte

Zur Berechnung der Atmosphärendichte aus dem MSIS-86-Modell wurde das Matlab-Programm *density\_msis86\_TEXTfile.m* verwendet. Das ursprüngliche Atmosphärenmodell wurde von Herrn A. Hadin in der Programmiersprache FORTRAN entwickelt und implementiert. Danach wurde es in die Programmiersprache C übersetzt.

Herr Björn Frommknecht (Universität München) hat schließlich die Übersetzung des C Programms in ein MEXfile vorgenommen. Dieses File ermöglicht es, die Berechnungen für das Atmosphärenmodell MSIS-86 in Matlab durchzuführen. Das MSIS-86 – Modell kann nun in Matlab mittels der Funktion *msis86\_c* aufgerufen werden. Zum Aufruf der Funktion muss zusätzlich die Datei *msis86.dat*, so wie die dll-Datei *msis86\_c.dll* vorliegen.

Eingabeparameter:

- Jahr YYYY und Tag im Jahr DDD im Format YYYYDDD
- Sekunden in UT
- geodätische Höhe [km]
- geodätische Länge [grad]
- geodätische Breite [grad]
- lokale Ortszeit [h]
- tägliche Sonnenaktivität
- durchschnittliche Sonnenaktivität der letzten drei Monate
- geomagnetischer Index  $k_p$

Ausgabeparameter:

- Atmosphärendichte
- Dichte für die chemischen Elemente O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar, H, N
- Temperatur in Flughöhe

#### 6.4.2 Berechnung der Eingabeparameter

Die Berechnung der Eingabeparameter, die zum Aufruf der Funktion `msis86_c` benötigt werden, erfolgen ebenfalls im Matlab-Programm *density\_msis86\_TEXTfile.m*. Zur Berechnung wurden zunächst folgende MAT-Files geladen:

- `pos_CTS`
- `flux_ap`

Die Ausgabeparameter werden vom Programm in das Textfile „Dichte\_msis86.txt“ gespeichert, das wie folgt aufgebaut ist:

- Tag im CHAMP-Format
- Sekunde im CHAMP-Format
- Atmosphärendichte [kg/m<sup>3</sup>]

Zur Berechnung der Eingabeparameter werden zusätzlich folgende Funktionen benötigt:

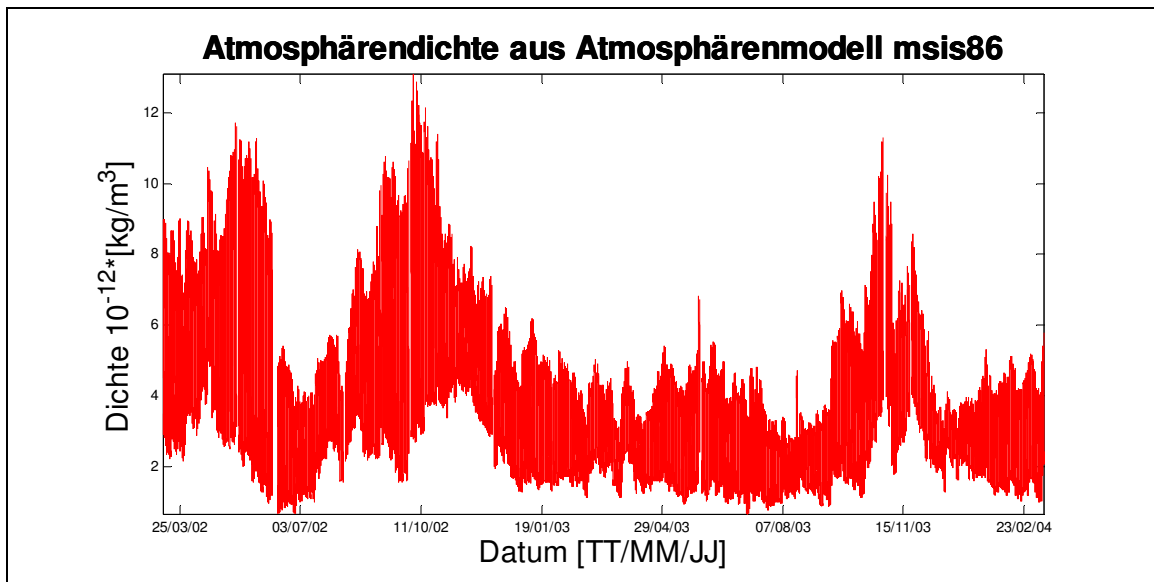


- date\_calculations
- xyz2lla\_g
- sec\_TT2LT
- msis86\_c mit msis86\_c.dll und msis86.dat

### 6.4.3 Darstellung der Atmosphärendichte

Darstellung der aus dem Atmosphärenmodell DTM2000 berechneten Atmosphärendichte für den gegebenen Zeitraum vom 11. März 2002 bis zum 10. März 2004.

Abbildung 12: Atmosphärendichte aus Atmosphärenmodell MSIS-86



## 7. VERGLEICH DER ATMOSPHÄRENDICHTE

Im folgenden Kapitel sollen die berechnete Atmosphärendichte aus Akzelerometermessungen und den Atmosphärenmodellen MSIS-86 und DTM2000 miteinander verglichen werden.

### 7.1 Vergleich im Ortsbereich

Zunächst erfolgt ein Vergleich des Verlaufes der Atmosphärendichten im Ortsbereich.

In den folgenden Abbildungen sind die berechneten Atmosphärendichten gegenüber der Zeit dargestellt.

Abbildung 13: Atmosphärendichte über zwei Jahre

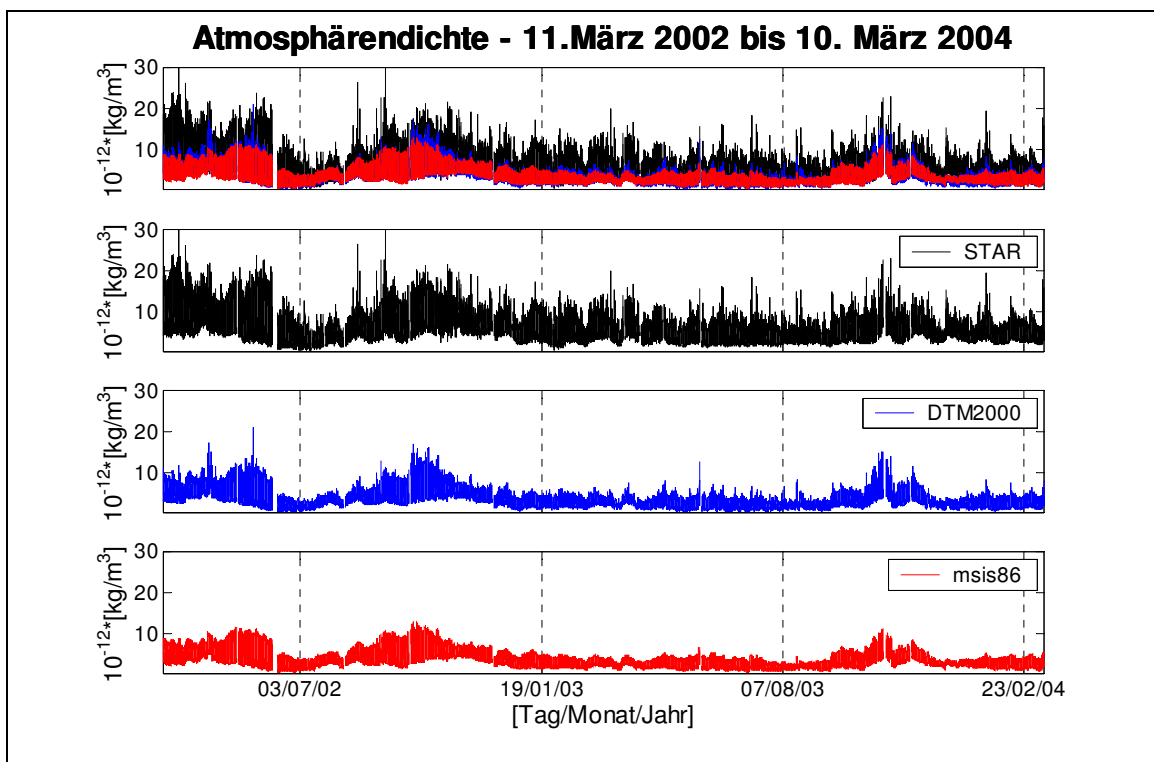


Abbildung 13 zeigt den Verlauf der Atmosphärendichten über den gesamten Zeitraum vom 11. März 2002 bis zum 10. März 2004. Der Verlauf der auf unterschiedliche Weisen bestimmten Atmosphärendichten ist sehr ähnlich. Man erkennt deutlich, dass sich die Atmosphärendichte aus den Akzelerometermessungen über einen größeren Wertebereich erstreckt, wie die Atmosphärendichten aus den Modellen.

Abbildung 14: Atmosphärendichte über einen Tag

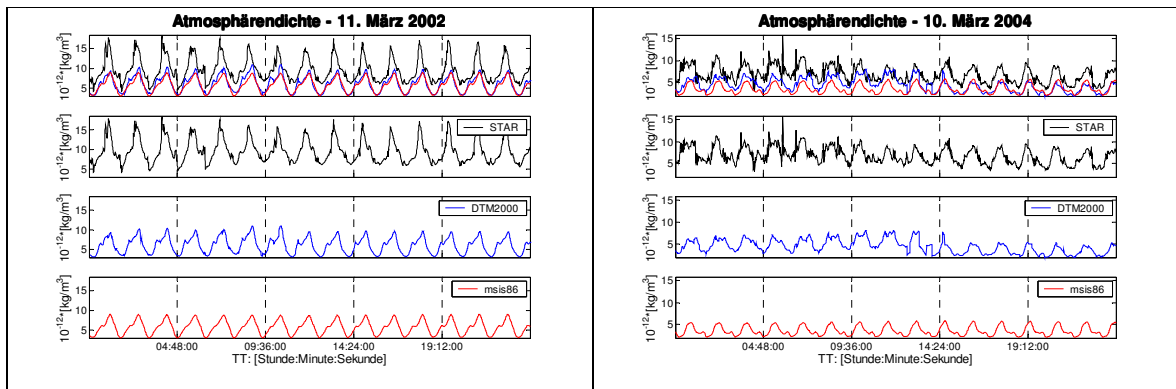
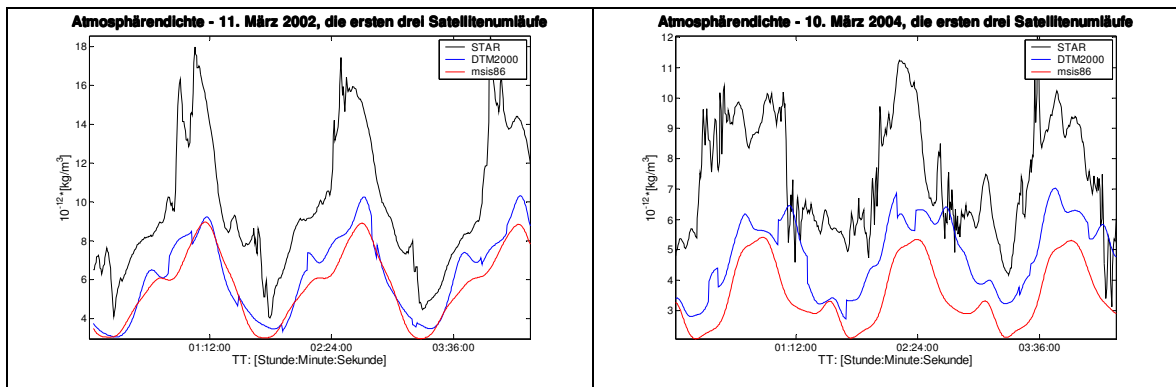


Abbildung 15: Atmosphärendichte über drei Satellitenumläufe



Betrachtet man den Atmosphärendichtenverlauf für kleiner Zeitabschnitte, so stellt man fest, dass die Atmosphärendichte aus den Akzelerometermessungen eine größere Amplitude besitzt, als die Atmosphärendichten aus den Modellen. Zudem ist ein Offset zwischen den Modell-Dichten und der STAR-Atmosphärendichte zu erkennen. Des weiteren zeigt die Atmosphärendichte des Akzelerometers zahlreiche kurzperiodische Veränderungen, die in den Atmosphärendichten aus den Modellen nicht zu erkennen sind.

Beim Vergleich der Dichten aus den Atmosphärenmodellen untereinander, erkennt man, dass die Atmosphärendichte aus dem MSIS-86-Modell einen glatteren Verlauf aufweist als die Atmosphärendichte aus dem DTM2000-Modell. Eventuell könnte dies durch die Wahl des geomagnetischen Index beeinflusst worden sein. Für das DTM2000-Modell wurden die dreistündigen geomagnetischen Indizes verwendet, für das MSIS-86-Modell dagegen nur die täglichen geomagnetischen Indizes.

Vergleicht man die Atmosphärendichten für einen Zeitpunkt am Anfang und einen Zeitpunkt am Ende des gegebenen Datensatzes, so zeigt vor allem die Atmosphärendichte aus den Akzelerometermessungen für den späteren Zeitpunkt mehr kurzperiodische Änderungen als für den früheren Zeitpunkten. Die Flughöhe ist

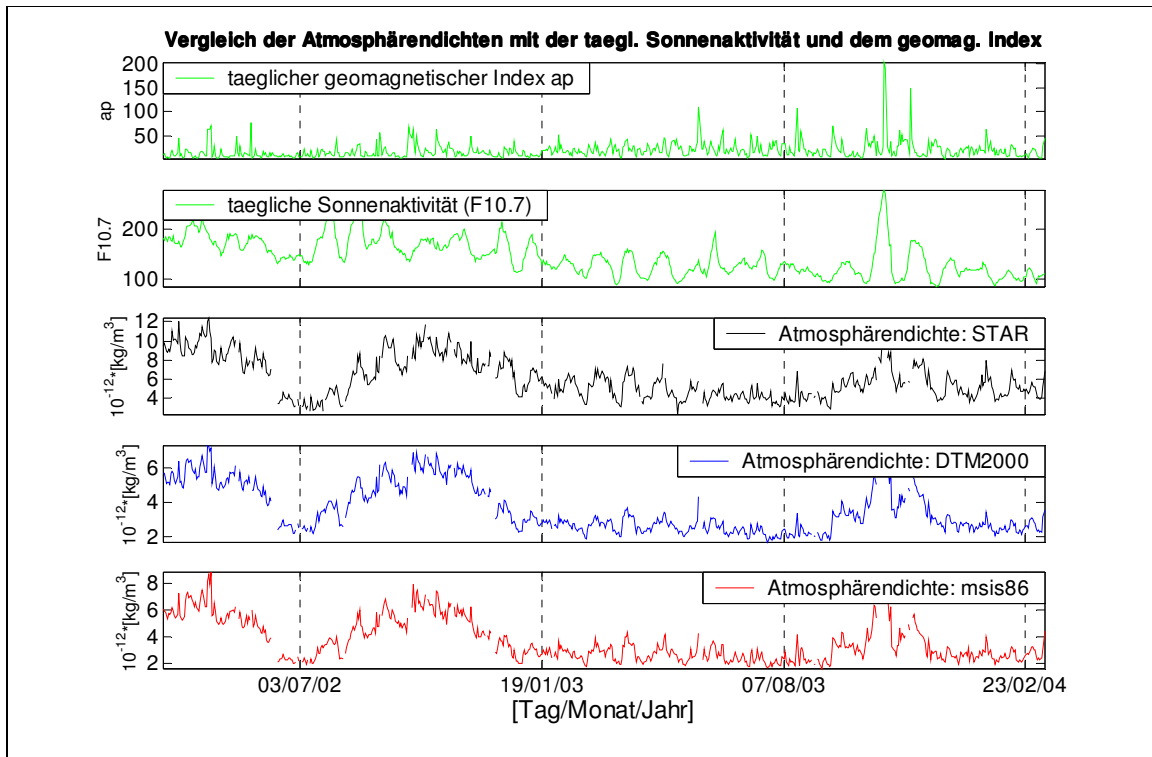
für den späteren Zeitpunkt kleiner als für den früheren Zeitpunkt, daher sind für den späteren Zeitpunkt auch größere Atmosphärensignale zu erwarten. Die Sonnenaktivität liegt für den früheren Zeitpunkt bei 182.4 und für den späteren Zeitpunkt bei 112.60. Der geomagnetische Index nimmt für den früheren Zeitpunkt einen Wert von 17.67 und für den späteren Zeitpunkt einen Wert von 36.67 an. Da für hohe Werte der Sonnenaktivität und des geomagnetischen Index größere Atmosphärensignale zu erwarten werden, die Sonnenaktivität jedoch für den früheren Zeitpunkt größer ist, werden die größeren Atmosphärensignale des späteren Zeitpunktes hier vor allem von der Änderung in der Flughöhe und dem geomagnetischen Index dominiert.

## **7.2 Vergleich mit der Sonnenaktivität und dem geomagnetischen Index**

Die Variationen im Verlauf der Atmosphärendichten könnten sich anhand der täglichen Sonnenaktivität und der geomagnetischen Störungen erklären lassen. Zur Untersuchung des Einflusses der täglichen Sonnenaktivität und der geomagnetischen Störungen auf die Atmosphärendichte können die Parameter F10.7 und ap herangezogen werden. Der Parameter F10.7 beschreibt die tägliche Sonnenaktivität gemessen bei einer Wellenlänge von 10,7cm. Der Parameter ap repräsentiert die geomagnetischen Störungen die von Beobachtungsstationen auf der Erde bestimmt werden.

In der Abbildung 16 ist der tägliche geomagnetischen Index, die tägliche Sonnenaktivität und die durchschnittliche Atmosphärendichte für einen Tag, dargestellt.

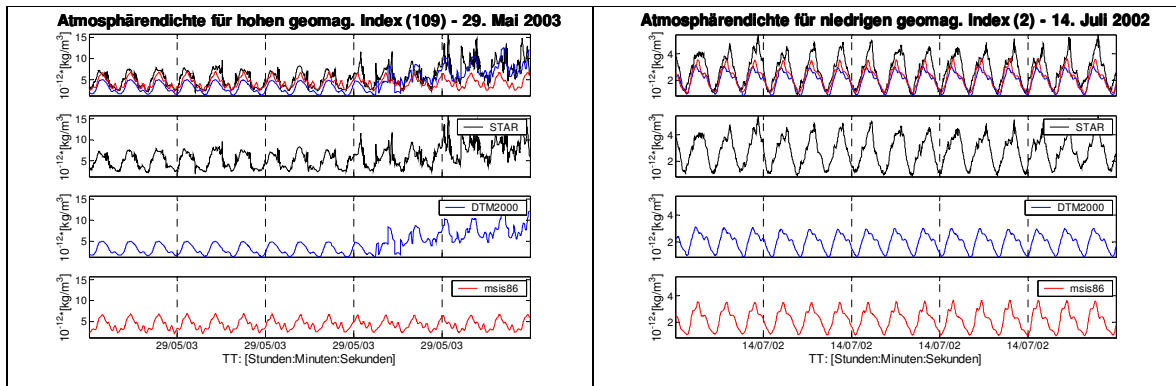
Abbildung 16: Vergleich der Atmosphärendichte mit der täglichen Sonnenaktivität und dem täglichen geomagnetischen Index über zwei Jahre



Man erkennt deutlich, dass der langperiodische Verlauf der Atmosphärendichte vorwiegend durch die tägliche Sonneneinstrahlung verursacht wird. Die kurzperiodischen Veränderungen sind dagegen eher durch den geomagnetischen Index zu erklären. Auffällig ist ebenfalls, dass für hohe Werte der täglichen Sonnenaktivität und des täglichen geomagnetischen Index Datenlücken in der Atmosphärendichte vorliegen.

Abbildung 17 stellt den Verlauf der Atmosphärendichte für einen Tag mit niedrigem (2) und hohem (109) geomagnetischem Index dar. Für den Zeitpunkt des hohen geomagnetischen Index sind die kurz- und langperiodischen Änderungen größer als für den Zeitpunkt mit niedrigem geomagnetischem Index. Die langperiodischen Änderungen der hohen geomagnetischen Störung decken einen sehr viel größeren Wertebereich ab als die der niedrigeren geomagnetischen Störung. Der Zeitpunkt mit dem niedrigeren geomagnetischen Index weist nicht so viele kurzperiodische Änderungen auf, wie der Zeitpunkt mit hohem geomagnetischem Index.

Abbildung 17: Vergleich Atmosphärendichte mit niedrigem und hohem geomagnetischen Index



### 7.3 Vergleich anhand des Korrelationskoeffizienten

Der Korrelationskoeffizient beschreibt die Ähnlichkeit zweier Signale. Strebt der Korrelationskoeffizient gegen Null, so sind sich die Signale kaum oder nicht ähnlich, strebt er dagegen gegen Eins, so liegt eine starke oder sehr starke Ähnlichkeit der Signale vor. Bei einem Korrelationskoeffizient von minus Eins sind die beiden Signale gegeneinander gespiegelt.

Der Korrelationskoeffizient zweier Signale x und y berechnet sich wie folgt:

Gleichung 7: Korrelationskoeffizient

$$\rho = \frac{\sum_i ((x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y}))}{\sqrt{(\sum_i (x_i - \bar{x})^2) \cdot (\sum_i (y_i - \bar{y})^2)}}$$

Für die Korrelationen der auf unterschiedliche Weise bestimmten Atmosphärendichten wurde der Korrelationskoeffizient für unterschiedliche Zeitabschnitte berechnet.

Die folgende Tabelle zeigt die Korrelation der Atmosphärendichte aus STAR-Akzelerometermessungen mit der aus den Modellen DTM2000 und MSIS-86 bestimmten Atmosphärendichte, sowie die Korrelation zwischen den Atmosphärendichten aus den Modellen. Der Korrelationskoeffizient wurde für den Datensatz über beide Jahre, sowie für jeweils ein Jahr und für je drei Monate berechnet.

Tabelle 1: Korrelationskoeffizient

Korrelationskoeffizient			Zeitraum	
STAR – MSIS-86	STAR – DTM2000	MSIS-86 – DTM2000	von	bis
			Datum	Datum
0.87	0.85	0.94	11.03.02	10.03.04
0.86	0.84	0.95	11.03.02	10.03.03
0.78	0.79	0.91	11.03.03	10.03.04
0.86	0.81	0.93	11.03.02	10.06.02
0.88	0.87	0.92	11.06.02	10.09.02
0.80	0.77	0.93	11.09.02	10.12.02
0.82	0.80	0.91	11.12.02	10.03.03
0.74	0.77	0.85	11.03.03	10.06.03
0.83	0.81	0.85	11.06.03	10.09.03
0.83	0.78	0.92	11.09.03	10.12.03
0.68	0.71	0.84	11.12.03	10.03.04

Anhand der Tabelle zeigt sich, dass die Atmosphärendichten aus den Modellen stark miteinander korrelieren. Die Korrelation zwischen der Atmosphärendichte aus STAR-Akzelerometermessungen und der Atmosphärendichte aus den Modellen zeigt dagegen eine geringere Korrelation. Greift man sich die Korrelationskoeffizienten für den gegebenen Datensatz von zwei Jahren heraus. So ist die Korrelation der Dichte aus den Modellen mit 94% sehr groß, wohingegen die Korrelation zwischen der Dichte aus den STAR-Akzelerometermessungen und den Modellen für das DTM2000 Modell bei 85% und für das MSIS-86 Modell bei 87% liegt.

Die Korrelation zwischen den Atmosphärendichten aus den Akzelerometermessungen und dem MSIS-86 Modell ist im Vergleich zu der Korrelation zwischen den Atmosphärendichten aus den Akzelerometermessungen und dem DTM2000 Modell immer etwas besser.

## 7.4 Vergleich im Frequenzbereich

Die Atmosphärendichten sollen nun auch im Frequenzbereich miteinander verglichen werden. Dazu wurde die Atmosphärendichte mittels der Fourier Transformation in den Frequenzbereich transformiert. Im folgenden werden für einen am Anfang und einen am Ende des Datensatzes gelegenen 10tägigen Zeitraum die Frequenzen der Atmosphärendichte dargestellt.

Abbildung 18: Frequenzspektrum der Atmosphärendichte

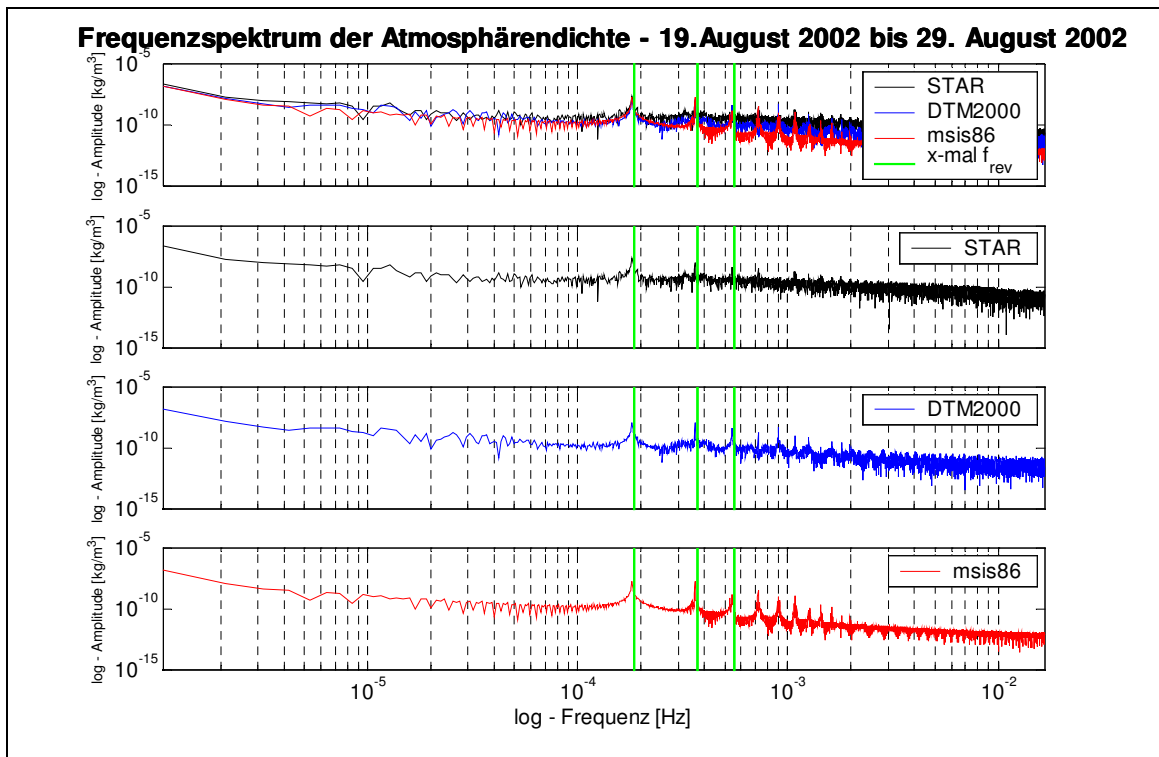
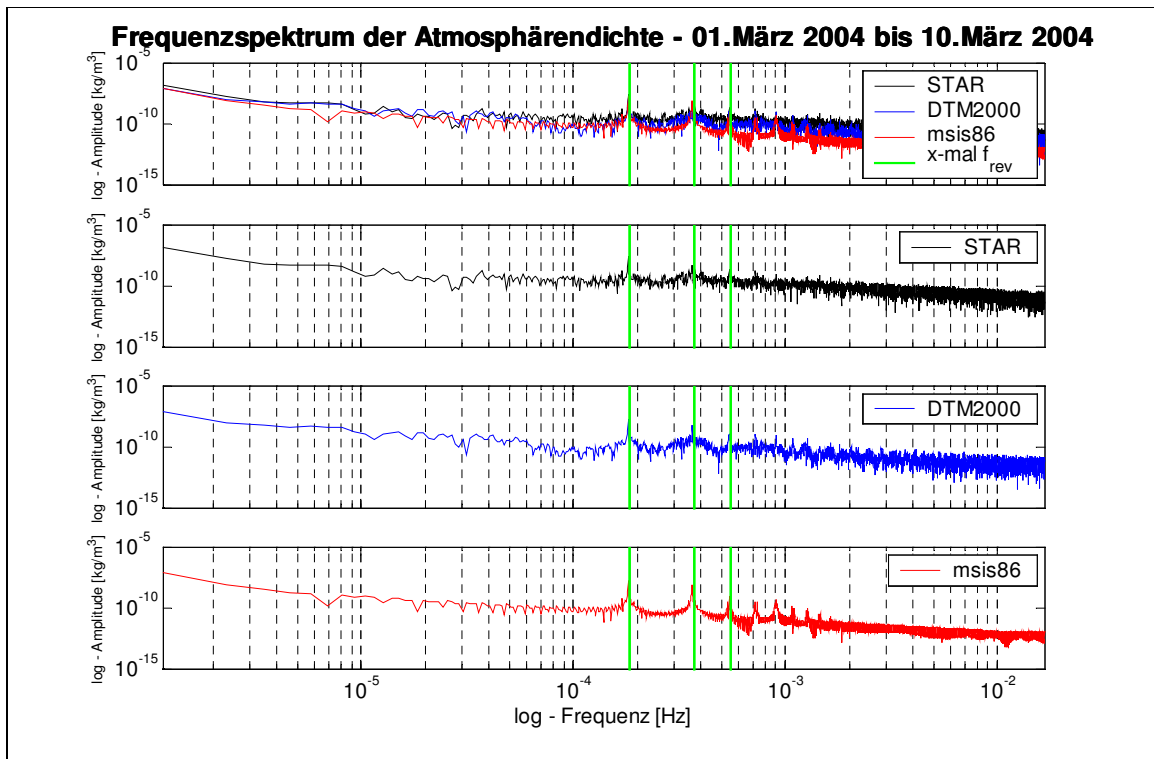




Abbildung 19: Frequenzspektrum der Atmosphärendichte



Vergleicht man die Frequenzen der aus STAR-Akzelerometermessungen bestimmten Atmosphärendichte mit den Frequenzen der Atmosphärendichte aus den Modellen, so ist die Ähnlichkeit des Frequenzverlaufes groß.

Man hätte eigentlich erwartet, dass für den Frequenzverlauf der Atmosphärendichten aus den Akzelerometermessungen die Signale auf hohen Frequenzen Messrauschen erkennen lassen. Für die Modelle dagegen würde man auf den hohen Frequenzen einen glatten Verlauf erwarten. Betrachtet man jedoch die Graphik 19, so kann man sowohl für die Atmosphärendichte aus Akzelerometermessungen, als auch für die Atmosphärendichte aus dem Modell DTM2000 Rauschen erkennen.

Das Rauschen ist vor allem für Frequenzen größer als einmal die Umlauffrequenz (erste grüne Linie von links) zu erkennen. Für Frequenzen kleiner als die Umlauffrequenz ist das Rauschen erheblich kleiner.

Die Kennzeichnung der x-ten Umlauffrequenz zeigt dass für die Frequenz der Satellitenumläufe die Amplitude ansteigt. Der Grund dafür ist, dass sich pro Umlauf die Flughöhe und die Geschwindigkeit, sowie die Sonnenaktivität und die Temperatur zyklisch ändern.

## 7.5 Schlussfolgerung aus den Vergleichen

Die Vergleiche der auf unterschiedliche Weisen berechneten Atmosphärendichten, zeigen, dass die Dichte aus den Akzelerometermessungen und die Dichte aus den Modellen Unterschiede aufweisen. Es könnte ein Skalierungsfaktor und/oder ein Bias zwischen den Atmosphärendichten vorliegen. Zudem könnten diese Unterschiede auch aus dem Messrauschen des Akzelerometers und/oder aus der Modellierungsungenauigkeit der Modelle stammen. Das könnte bedeuten, dass die GFZ kalibrierten Störbeschleunigungen nicht genau genug vorliegen. Im Folgenden sollen nun die gemessenen Störbeschleunigungen anhand der Atmosphärenmodelle kalibriert werden.

## 8. KALIBRIERUNG DES STAR-AKZELEROMETERS

### 8.1 Bestimmung der Kalibrierungsparameter

Da der Vergleich der aus STAR-Akzelerometermessungen berechneten Atmosphärendichte mit den aus Modellen bestimmten Atmosphärendichten einen Skalierungsfaktor und/oder einen Bias zwischen der Atmosphärendichte für STAR und den Atmosphärendichten aus Modellen erkennen lässt, soll nun eine Kalibrierung der gemessenen Störbeschleunigungen in alongtrack Richtung anhand der Atmosphärenmodelle vorgenommen werden. Dazu werden zunächst die Atmosphärendichten aus den Atmosphärenmodellen nach Gl. 8 in Störbeschleunigungen umgerechnet. Danach kann die Kalibrierung der Störbeschleunigungen des STAR-Akzelerometers anhand der Störbeschleunigungen aus den Atmosphärenmodellen erfolgen (siehe Gl. 9).

Von einer Kalibrierung spricht man, wenn der Zusammenhang zwischen der Anzeige des Messgerätes, hier der Störbeschleunigung aus STAR-Akzelerometermessungen, und dem tatsächlichen Wert, hier der Störbeschleunigungen aus den Atmosphärenmodellen, ermittelt wird.

*Gleichung 8: Umrechnung Atmosphärendichte in Atmosphärenreibung*

$$a_y = -\frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \frac{A}{m_S} \cdot \rho_{\text{mod}}(r, t) \cdot \left| \mathbf{v}^{S/C}_{\text{rel}} \right| \cdot v^{S/C}_{x,\text{rel}}$$

mit:

- $a_y$ : zweite Komponente der Störbeschleunigung im Akzelerometersystem  $B^{\text{ACC}}$  beziehungsweise erste Komponente der Störbeschleunigung im satellitenfesten Referenzsystem  $B^{S/C}$  in  $[\text{m/s}^2]$
- $v^{S/C}_{\text{rel}}$ : relative Geschwindigkeit des Satelliten im satellitenfesten Referenzsystem  $B^{S/C}$  in  $[\text{m/s}]$
- $C_D$  – satellitenspezifischer Widerstandsbeiwert  $[-]$
- $\rho_{\text{mod}}(r, t)$  – modellierte Atmosphärendichte ( $r$  – Ort des Satelliten,  $t$  – Zeit)  $[\text{kg/m}^3]$
- $A$  – effektive Satellitenoberfläche  $[\text{m}^2]$
- $m_S$  – Masse des Satelliten  $[\text{kg}]$

Zur Kalibrierung wird folgende Kalibrierungsfunktion herangezogen:

*Gleichung 9: Kalibrierungsfunktion*

$$a_y^{\text{kalibriert}} = m \cdot a_y^{\text{nicht-kalibriert}} + x_0$$

mit:

- m - Skalierung
- $x_0$  - Bias

Die Bestimmung der Kalibrierungsparameter erfolgt durch eine vermittelnde Ausgleichung/ Gauß-Markov-Ausgleichung:

**vermittelnde Ausgleichung:**

lineares funktionales Modell:

$$\tilde{L}_i = m \cdot x_i + x_0$$

Aufstellen der Designmatrix:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1 & 1 \\ \dots & \dots \\ x_i & 1 \end{bmatrix}$$

Da für dieses Problem keine Kovarianzinformation vorliegt, geht man für diesen Ansatz von gleichartigen, gleichgenauen Beobachtungen aus, die Kovarianzmatrix ergibt sich also zu:

$$\Sigma_{ll} = \sigma_0 \cdot \mathbf{I}$$

Der Kalibrierungsparametervektor bestimmt sich dann wie folgt:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{L}$$

### 8.1.1 Kalibrierung im Ortsbereich

Für die Kalibrierung im Ortsbereich sind die gemessenen Störbeschleunigungen des STAR-Akzelerometers als bekannt gegeben ( $x_i$ ). Die berechneten Störbeschleunigungen aus den Atmosphärenmodellen beschreiben die Beobachtungen ( $L_i$ ). Somit lassen sich also die Kalibrierungsparameter, die Skalierung und der Bias, über eine vermittelnde Ausgleichung bestimmen.

Die Kalibrierungsparameter wurden für den Datensatz für unterschiedliche Zeiträumen bestimmt. Die Zeiträume wurden dabei auf den gesamten Datensatz von zwei Jahren, jeweils ein Jahr, jeweils drei Monate, und respektive auf fünf einzelne Tage unterteilt.

Tabelle 2: Kalibrierungsparameter (Ortsbereich)

Kalibrierungsparameter				Datum	
MSIS-86		DTM2000		von	bis
Skalierung	Bias [m/s <sup>2</sup> ]	Skalierung	Bias [m/s <sup>2</sup> ]		
0.54	-1.89e-006	0.55	-1.94e-006	11.03.02	10.03.04
0.53	-1.87e-006	0.54	-1.92e-006	11.03.02	10.03.03
0.53	-1.85e-006	0.55	-1.93e-006	11.03.03	10.03.04
0.53	-1.86e-006	0.53	-1.90e-006	11.03.02	10.06.02
0.55	-1.99e-006	0.51	-1.86e-006	11.06.02	10.09.02
0.60	-2.08e-006	0.60	-2.09e-006	11.09.02	10.12.02
0.41	-1.47e-006	0.40	-1.45e-006	11.12.02	10.03.03
0.42	-1.52e-006	0.46	-1.66e-006	11.03.03	10.06.03
0.43	-1.53e-006	0.47	-1.66e-006	11.06.03	10.09.03
0.59	-2.07e-006	0.61	-2.14e-006	11.09.03	10.12.03
0.43	-1.55e-006	0.49	-1.71e-006	11.12.03	10.03.04
0.55	-1.91e-006	0.60	-2.07e-006	11.03.02	11.03.02
0.62	-2.09e-006	0.55	-1.97e-006	11.09.02	11.09.03
0.39	-1.36e-006	0.37	-1.34e-006	11.03.03	11.03.03
0.57	-2.01e-006	0.56	-1.95e-006	11.09.03	11.09.03
0.48	-1.68e-006	0.58	-1.97e-006	10.03.04	10.03.04

Betrachtet man nun den Skalierungsparameter sowohl für das MSIS-86 Modell als auch für das DTM2000 Modell so zeigt sich, dass der Parameter in der Regel zwischen 0.4 und 0.6 liegt. Der Biasparameter variiert zwischen  $-1.4e^{-6} \text{ m/s}^2$  und  $-2.1e^{-6} \text{ m/s}^2$ .

### 8.1.2 Kalibrierung über den Frequenzbereich

Um die Kalibrierung der gemessenen Atmosphärenreibung im Frequenzbereich durchführen zu können wurde zunächst der Mittelwert der Atmosphärenreibung für die STAR-Akzelerometermessungen und die beiden Atmosphärenmodelle bestimmt. Der Mittelwert wurde dann von den ursprünglichen Werten abgezogen. Die um den Mittelwert korrigierte Atmosphärenreibung wurde anschließend mittels der Fourier Transformation in den Frequenzbereich transformiert. Alle Frequenzen größer als zweimal die Umlauffrequenz von  $1/5400 \text{ s}^{-1}$  wurden zu Null gesetzt, um die Frequenzen von anderen Einflüssen, wie z.B. Rauschen zu eliminieren. Danach wurde die korrigierten Frequenzen mit der Inversen Fourier Transformation wieder in den Ortsbereich transformiert und der Mittelwert auf die frequenzkorrigierten Störbeschleunigungen addiert. Die Kalibrierung erfolgte analog zu der Kalibrierung im Ortsbereich.

Da die gegebenen Daten Lücken aufweisen, werden für die Kalibrierung im Frequenzraum kleine über den gesamten Datensatz verteilte Zeiträume ausgewählt.

Tabelle 3: Kalibrierungsparameter (Frequenzbereich)

Kalibrierungsparameter				Datum	
MSIS-86		DTM2000		von	bis
Skalierung	Bias [ $\text{m/s}^2$ ]	Skalierung	Bias [ $\text{m/s}^2$ ]		
0.52	-1.84e-006	0.55	-1.93e-006	12.03.02	18.03.02
0.59	-2.08e-006	0.47	-1.73e-006	19.08.02	25.08.02
0.43	-1.54e-006	0.42	-1.49e-006	01.01.03	20.01.03
0.48	-1.72e-006	0.47	-1.67e-006	01.07.03	07.07.03
0.54	-1.87e-006	0.59	-2.06e-006	01.03.04	10.03.04
0.54	-1.88e-006	0.57	-1.98e-006	12.03.02	12.03.02

0.72	-2.36e-006	0.63	-2.14e-006	10.09.02	10.09.02
0.42	-1.47e-006	0.40	-1.42e-006	12.03.03	12.03.03
0.59	-2.07e-006	0.58	-2.01e-006	11.09.03	11.09.03
0.47	-1.64e-006	0.67	-2.29e-006	10.02.04	10.02.04

Betrachtet man die berechneten Kalibrierungsparameter so befindet sich für beide Modelle der Skalierungsfaktor in der Regel zwischen 0.4 und 0.6. Der Bias schwankt dagegen zwischen  $-1.4e^{-6}$  m/s<sup>2</sup> und  $-2.3e^{-6}$  m/s<sup>2</sup>.

### 8.1.3 Vergleich der Kalibrierungsparameter

Beim Vergleich der im Ortsraum berechneten Kalibrierungsparameter und der über den Frequenzraum bestimmten Kalibrierungsparameter stellt man fest, dass die Skalierungsfaktoren nahezu den gleichen Wertebereich einnehmen. Auch der Bias liegt ungefähr im gleichen Wertebereich. Es ist aber auch zu beachten, dass für die Bestimmung über den Frequenzraum nur kleinere Datenbereiche vorliegen.

## 8.2 Analyse der Kalibrierungsparameter

Zur Analyse der Kalibrierungsparameter wurden pro Tag die Kalibrierungsparameter im Ortsbereich bestimmt. Die Abbildungen 20 und 21 zeigen den Skalierungsfaktor und den Bias für die aus den Modellen MSIS-86 und DTM2000 bestimmten Kalibrierungsparameter.

Abbildung 20: Kalibrierungsparameter – Atmosphärenmodell MSIS-86

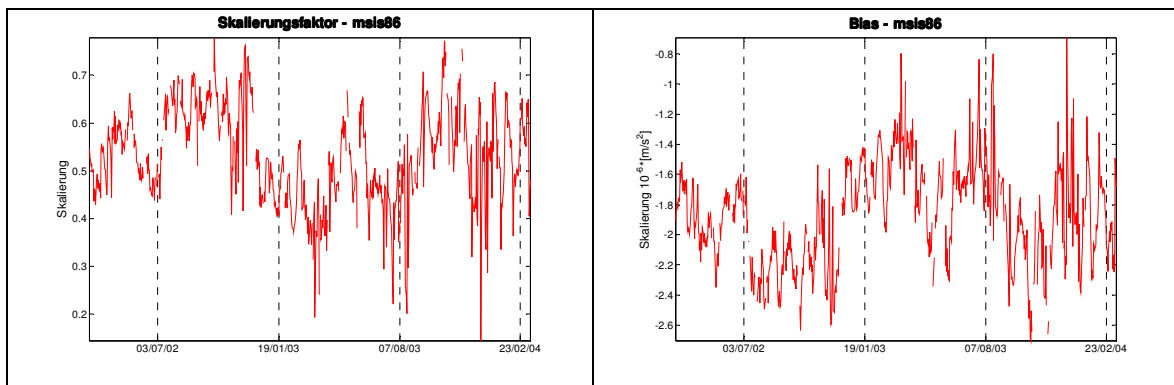
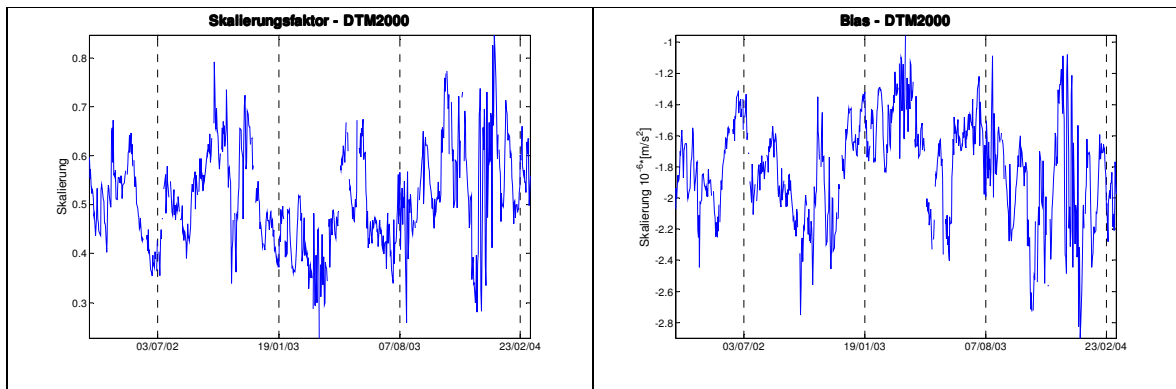


Abbildung 21: Kalibrierungsparameter – Atmosphärenmodell DTM2000

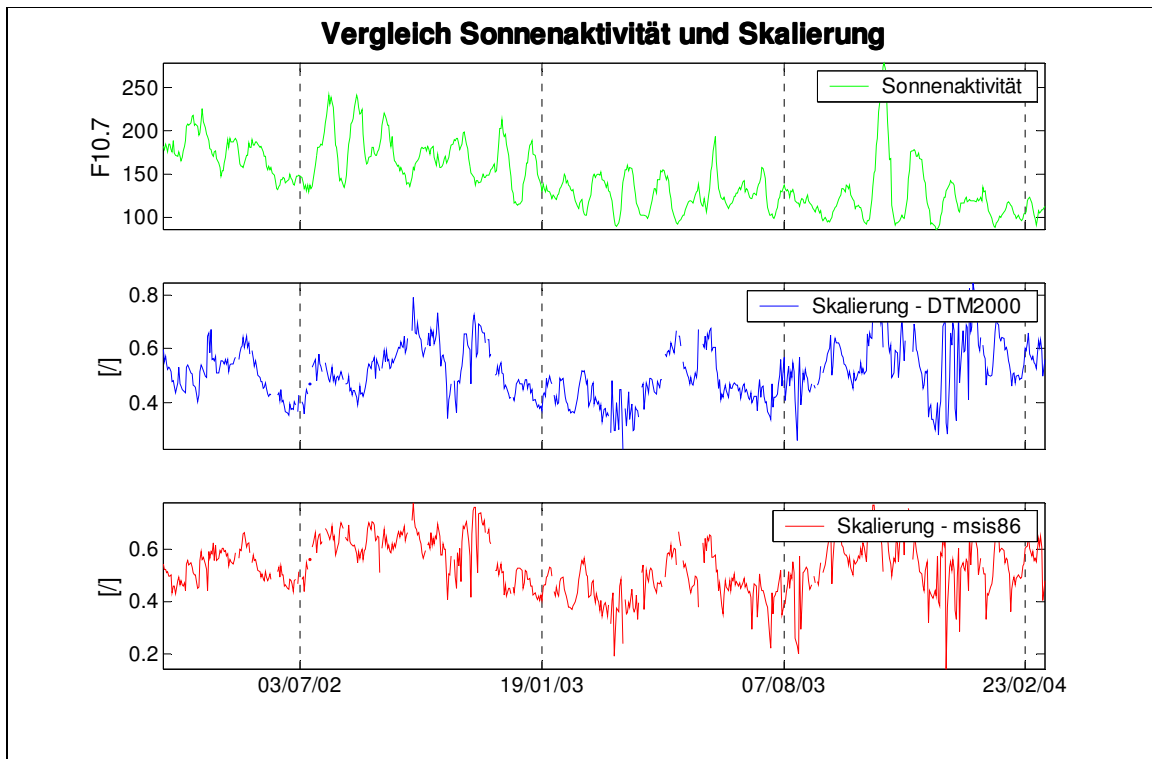


Beim Vergleich der Kalibrierungsparameter des jeweiligen Modells, scheinen die Kalibrierungsparameter negativ miteinander korreliert zu sein. Die Berechnung des Korrelationskoeffizienten zwischen der Skalierung und des Bias bestätigt diese Annahme. Der Korrelationskoeffizient zwischen dem Skalierungsfaktor und dem Bias des MSIS-86 Modells beträgt  $-0.99$ . Die Berechnung des Korrelationskoeffizienten der Kalibrierungsparameter aus dem Atmosphärenmodell DTM2000 ergibt ebenfalls eine Korrelation von  $-0.99$ .

Nun sollen die Variationen in den Kalibrierungsparameter untersucht werden. Für die im Kapitel „CHAMP-Daten“ durchgeführte Datenanalyse wurden unter anderem die Abhängigkeit der Atmosphärenreibung von der Sonnenaktivität beziehungsweise von der Temperatur untersucht. Im Folgenden soll der Skalierungsfaktor, sowie der Bias mit der Sonnenaktivität verglichen werden, da in den Modellen für Tage mit hoher Sonnenaktivität größere Ungenauigkeiten erwartet werden. Die Sonnenaktivität wird dazu zusammen mit den täglichen Skalierungsfaktoren in einer Abbildung gegenüber der Zeit dargestellt.



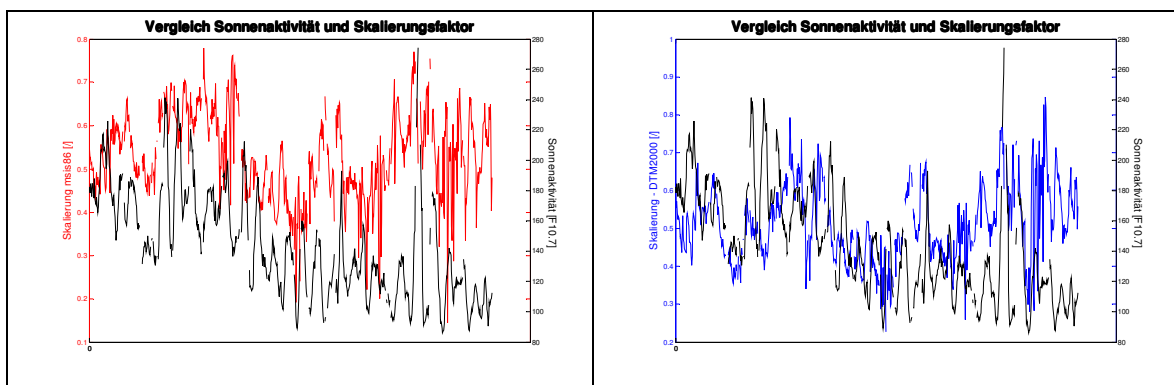
Abbildung 22: Vergleich der Sonnenaktivität mit den Skalierungsfaktoren



Betrachtet man die Abbildung 22 so könnte man die Annahme treffen, dass immer dann wenn die Sonnenaktivität hoch ist, die Skalierung klein ist und immer dann wenn die Sonnenaktivität klein ist, die Skalierung groß ist.

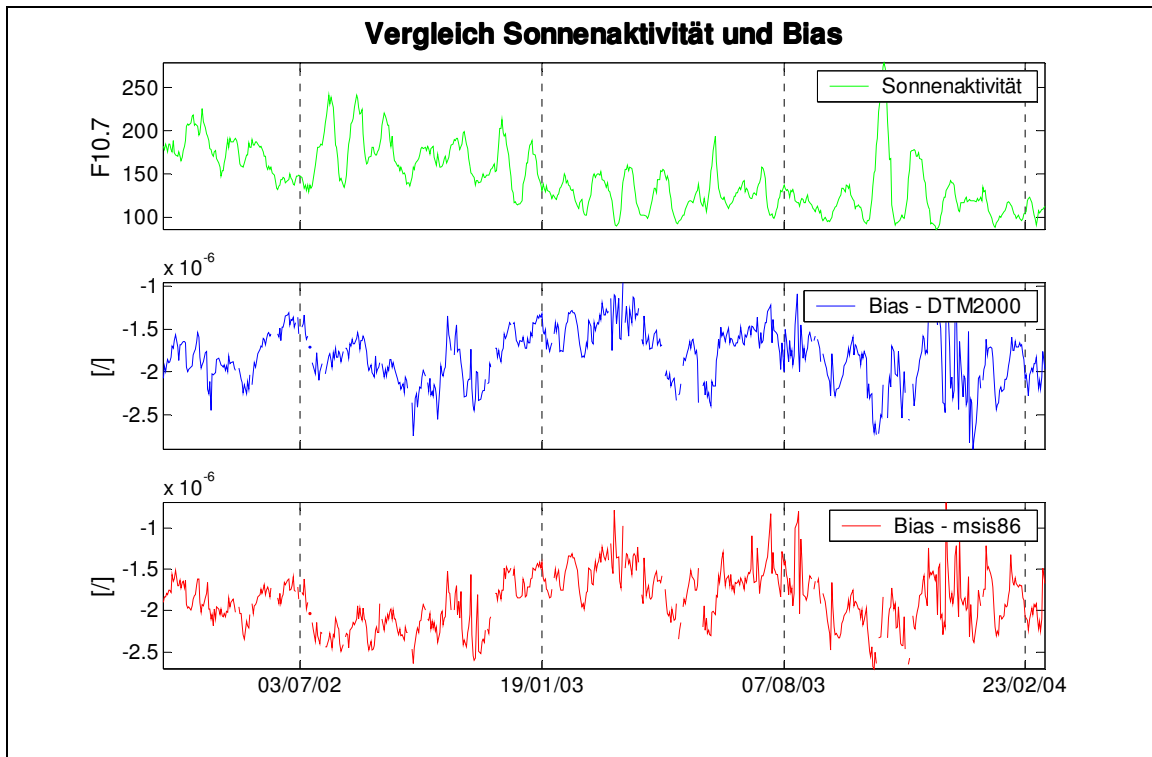
Die Berechnung des Korrelationskoeffizienten zwischen der Sonnenaktivität und der Skalierung liefert allerdings keine große Korrelation. Der Grund dafür könnte sein, dass die Bestimmung der Skalierungsfaktoren von weiteren Einflüssen abhängig ist. Dennoch kann die oben getroffenen Aussage bei genauerer Betrachtung des Verlaufes der Sonnenaktivität und der Skalierungsfaktoren bestätigt werden.

Abbildung 23: Vergleich Sonnenaktivität und Skalierungsfaktor



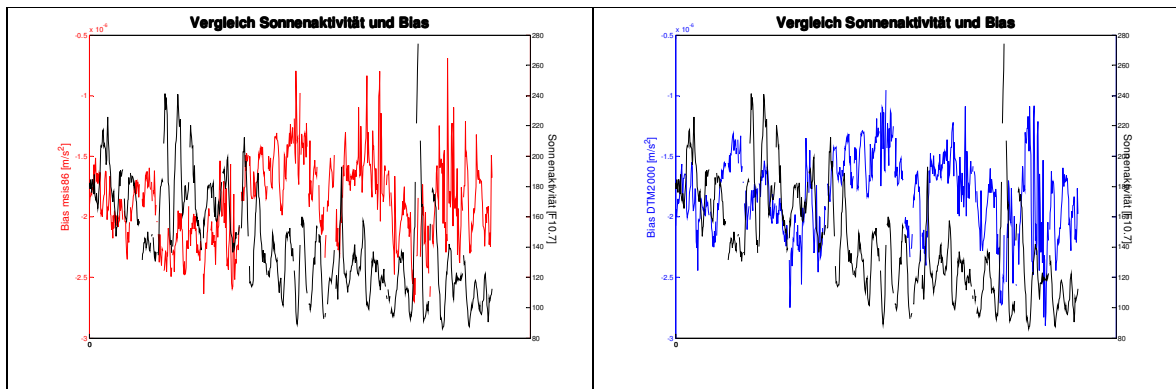
Beim Vergleich der Bias mit der Sonnenaktivität erkennt man wiederum eine Ähnlichkeit im Verlauf. Hier könnte man die Annahme wie folgt formulieren, je größer die Sonnenaktivität desto größer der Bias und desto kleiner die Sonnenaktivität desto kleiner der Bias.

Abbildung 24: Vergleich der Sonnenaktivität mit den Bias



Eine genauere Betrachtung bestätigt die oben getroffene Aussage. Auch hier gilt, dass der Bias nicht nur von der Sonnenaktivität beeinflusst wird, sondern dass bei der Bestimmung und Modellierung weitere Parameter einfließen. Dies erklärt die anderen kurzperiodischen Einflüsse.

Abbildung 25: Vergleich Sonnenaktivität und Bias



Aus dem Zusammenhang der Skalierung und des Bias mit der Sonnenaktivität, lässt sich schließen, dass mit größter Wahrscheinlichkeit die Modelle für eine hohe Sonnenaktivität schlecht modellierbar sind. Es könnten aber auch für eine hohe Sonnenaktivität die Messwerte des STAR-Akzelerometer nicht so gut sein, wie für eine geringere Sonnenaktivität.

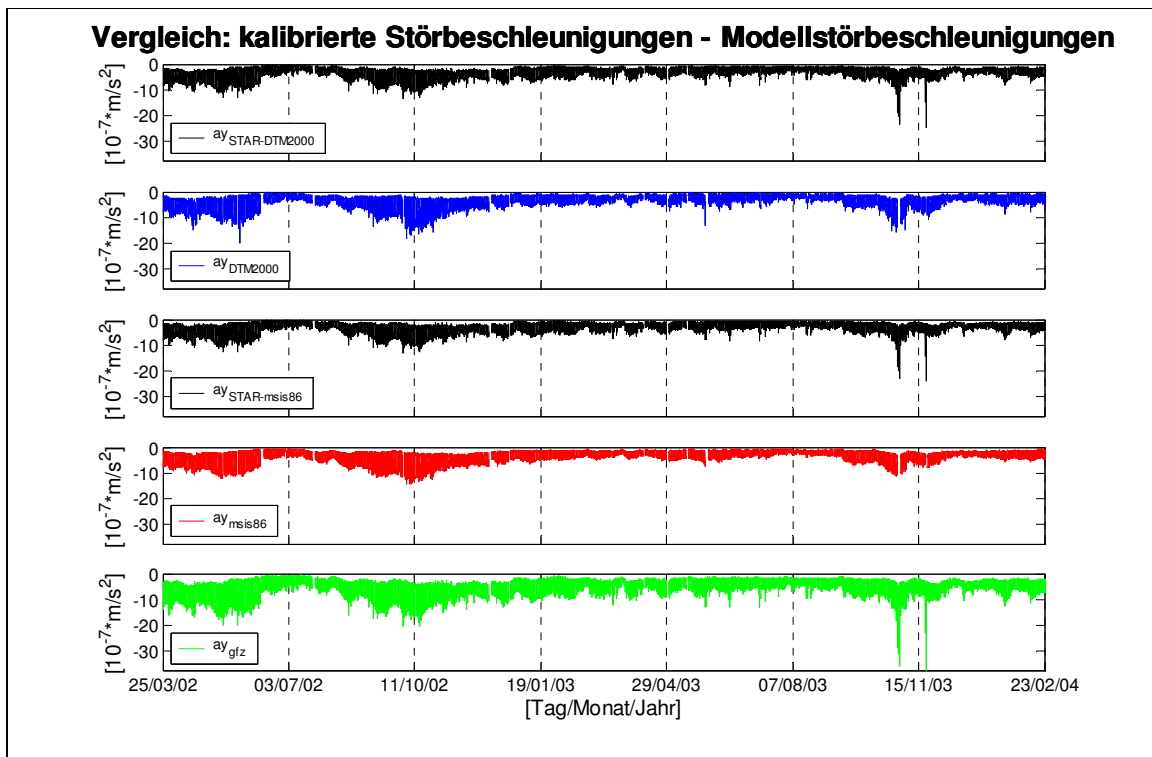
### 8.3 Kalibrierung der gemessenen Störbeschleunigung

Die gemessenen Störbeschleunigungen sollen nun mittels der im Ortsbereich bestimmten Kalibrierungsparameter kalibriert werden. Zunächst soll die Kalibrierung mit den Kalibrierungsparametern, die aus dem gesamten Datensatz vom 11. März 2002 bis zum 10. März 2004 bestimmt wurden, erfolgen.

Tabelle 4: Kalibrierungsparameter im Ortsbereich über zwei Jahre

Kalibrierungsparameter				Datum	
MSIS-86		DTM2000		von	bis
Skalierung	Bias [m/s <sup>2</sup> ]	Skalierung	Bias [m/s <sup>2</sup> ]		
0.54	-1.89e-006	0.55	-1.94e-006	11.03.02	10.03.04

Abbildung 26: Vergleich: kalibrierte Störbeschleunigungen – Modellstörbeschleunigungen über 2 Jahre



Aus der Abbildung 26 ist deutlich zu erkennen, dass die anhand der Atmosphärenmodelle kalibrierte Störbeschleunigungen nun den Störbeschleunigungen aus den Modellen sehr ähnlich sind. Die GFZ kalibrierten Störbeschleunigungen weisen dagegen im Vergleich zu den anhand der Atmosphärenmodelle kalibrierten Störbeschleunigungen noch einen Skalierungsfaktor auf.

Abschließend wird noch ein Tag am Anfang des Datensatzes und ein Tag am Ende des Datensatzes mit den über den jeweiligen Tag bestimmten Kalibrierungsparametern kalibriert.

Tabelle 5: Kalibrierungsparameter im Ortsbereich für den 11. März 2002

Kalibrierungsparameter				Datum	
MSIS-86		DTM2000		von	bis
Skalierung	Bias [m/s <sup>2</sup> ]	Skalierung	Bias [m/s <sup>2</sup> ]		
0.55	-1.91e-006	0.60	-2.07e-006	11.03.02	11.03.02
0.48	-1.68e-006	0.58	-1.97e-006	10.03.04	10.03.04

Abbildung 27: Vergleich kalibrierte und Modellstörbeschleunigung am 11. März 2002

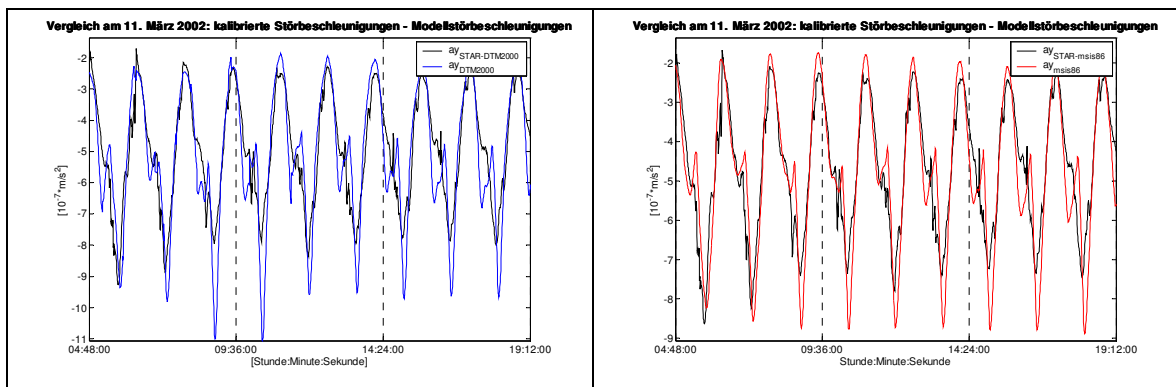
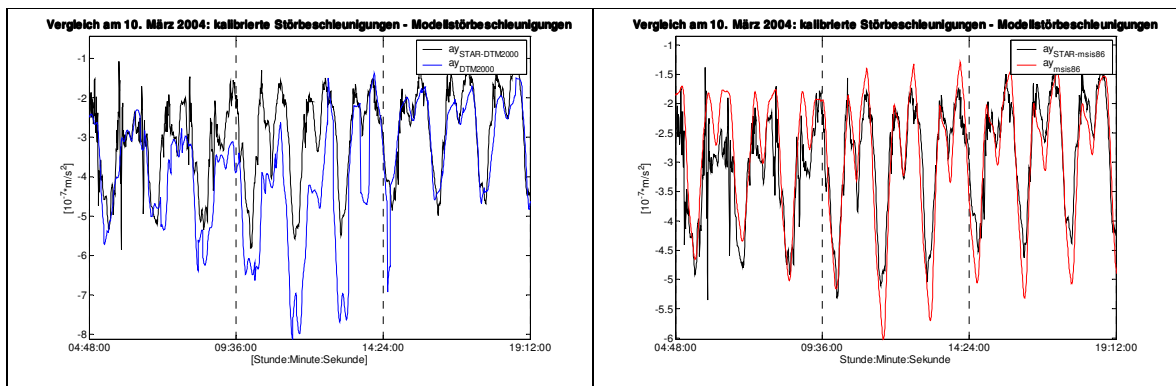


Abbildung 28: Vergleich kalibrierte und Modellstörbeschleunigung am 10. März 2004



Auch hier sieht man sehr deutlich, dass durch die Kalibrierung der gemessenen Störbeschleunigungen diese sehr ähnlich den Beschleunigungen aus den Modellen sind.

## 9. EVALUIERUNG – KALIBRIERUNGSPARAMETER

Zur Evaluierung der Kalibrierungsparameter wurden von Matthias Weigelt (Geodätisches Institut, Universität Stuttgart) anhand des Energieintegrals Berechnungen durchgeführt.

*Gleichung 10: Energieintegral <sup>1</sup>*

$$T + c = E_{\text{kin}} - U - Z - \int (f + \sum_k g_k) dx$$

mit:

- T: Störpotential
- c: Integrationskonstante
- $E_{\text{kin}}$ : kinetische Energie
- U: Gravitationspotential
- Z: Zentrifugalpotential
- f: CHAMP-Akzelerometerdaten
- $\sum_k g_k$ : Summe der zeitvariablen gravitativen Kräfte

Die rechte Seite der Gleichung kann bestimmt werden. Die kinetische Energie wird mittels der Geschwindigkeit des Satelliten berechnet. Das Gravitationspotential sowie das Zentrifugalpotential können mittels der Position des Satelliten und weiteren Parametern modelliert werden (z.B. WGS84). Auch das Integral der Akzelerometerdaten und der Summe der zeitvariablen gravitativen Kräfte kann berechnet werden.

Das Störpotential der linken Seite der Gleichung kann ebenfalls durch Modelle ermittelt werden.

Somit lässt sich also die Integrationskonstante berechnen. Da der Energieerhaltungssatz besagt, dass die Energie konstant bleibt, dürfte die Integrationskonstante sich nicht ändern. Ist eine Änderung der Integrationskonstante zu erkennen, so geht Energie im System verloren. Neben anderen Modellierungsparametern könnte das ein Indiz dafür sein, dass die Akzelerometermessungen nicht genau genug kalibriert wurden, da sich ein Bias in den Akzelerometerdaten als Drift in der Energie auswirkt.

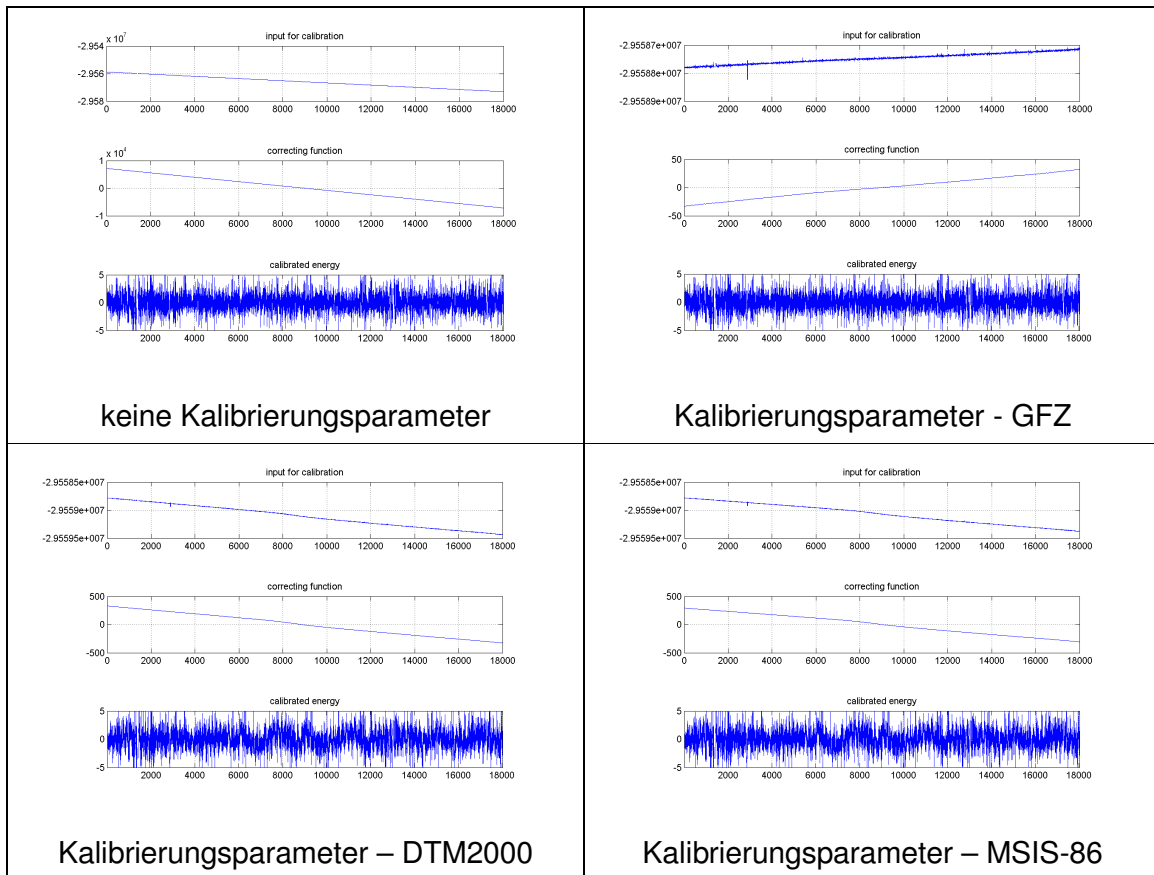
Herr Weigelt schätzte nun aus 6 Tagen im Januar 2003 mit dem Energie-Integral einen Drift für die Kalibrierungsparameter aus den Atmosphärenmodellen.

---

<sup>1</sup> Sneeuw N., Weigelt M. (2005)

In der folgenden Graphik wird zunächst die Gesamtenergie dargestellt. Die zweite Teilgraphik zeigt die Korrekturfunktion, die nötig ist, um eine konstante Energie zu erhalten. Teilgraphik drei stellt die kalibrierte Energie, d.h. die um die Korrekturfunktion verbesserte Energie, dar. (Einheiten der Graphik: y-Achse:  $\text{m}^2/\text{s}^2$ , x-Achse: Anzahl der Beobachtungen)

Abbildung 29: Evaluierung der Kalibrierungsparameter



Vergleicht man die Teilgraphiken, so stellt man fest, dass die Korrekturfunktion für die reinen Akzelerometermessungen im Bereich von  $-1\text{e}^4 \text{ m}^2/\text{s}^2$  und  $1\text{e}^4 \text{ m}^2/\text{s}^2$  liegt und damit sehr groß ist. Die Korrekturfunktionen der Kalibrierungsparameter aus den Atmosphärenmodellen liegen beide im Wertebereich von  $-500 \text{ m}^2/\text{s}^2$  bis  $500 \text{ m}^2/\text{s}^2$  und sind sich sehr ähnlich. Die aus den GFZ kalibrierten Akzelerometerdaten gewonnene Korrekturfunktion weist die kleinsten Korrekturen auf, sie liegen im Bereich von  $-50 \text{ m}^2/\text{s}^2$  bis  $50 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Es lässt sich also die Aussage treffen, dass die Kalibrierungsparameter aus den Atmosphärenmodellen schlechter sind wie die Kalibrierungsparameter des GFZ. Die anhand der Modelle kalibrierten Akzelerometermessungen sind aber dennoch besser wie die nicht kalibrierten Akzelerometerdaten.

Das verbleibende Rauschen in der Energie der Teilgraphik 3, wird vor allem durch Fehler in der Bahn und der Geschwindigkeit des Satelliten, sowie durch Rauschen in den Akzelerometerdaten hervorgerufen.



## 10. SCHLUSSBETRACHTUNG

Das Ziel dieser Studienarbeit war auf der einen Seite der Vergleich der Atmosphärendichte aus GFZ kalibrierten STAR-Akzelerometermessungen und den Atmosphärenmodellen DTM2000 und MSIS-86. Der Vergleich hat gezeigt, dass zwischen der Atmosphärendichte aus GFZ kalibrierten Akzelerometerdaten und den Modellen ein Skalierungsfaktor, ein Bias und/oder ein Rauschen vorliegt. Dies könnte bedeuten, dass die GFZ Kalibrierungsparameter nicht genau genug vorliegen.

Auf der anderen Seite wurde als weiteres Ziel dieser Studienarbeit die Kalibrierung der STAR-Akzelerometermessungen anhand der Atmosphärenmodelle durchgeführt. Zunächst wurden die Kalibrierungsparameter über eine vermittelnde Ausgleichung geschätzt. Die Kalibrierungsparameter wurden im Ortsbereich, sowie über den Frequenzbereich ermittelt. Dabei war auffällig, dass für unterschiedliche Zeitpunkte der Bias in der Regel zwischen  $1.4e^{-6} \text{ m/s}^2$  und  $2.1e^{-6} \text{ m/s}^2$  lag, der Skalierungsfaktor schwankte zwischen 0.4 und 0.6.

Die mit diesen Kalibrierungsparametern kalibrierten Akzelerometermessungen zeigten dann eine große Ähnlichkeit mit der aus den Modellen berechneten Atmosphärenreibung.

Nun wurde die Qualität der Kalibrierungsparameter anhand des Energieintegrals ermittelt. Aus der Evaluierung der Kalibrierungsparameter konnte man feststellen, dass die Kalibrierungsparameter aus den Atmosphärenmodellen schlechter sind als die Kalibrierungsparameter des GFZ. Die aus den Modellen kalibrierten STAR-Akzelerometermessungen sind jedoch besser als die reinen Messwerte des Akzelerometers.

Abschließend lässt sich sagen, dass die Akzelerometermessungen auf jeden Fall kalibriert werden sollten, da die Abweichungen des Messwertes vom realen Wert doch erheblich sind.

## QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS

- Bruinsma, S., Thuillier, G., Barlier, F. (2003): The DTM-2000 empirical thermosphere model with new data assimilation and constraints at lower boundary: accuracy and properties. J. Atm. Solar-Terr. Phys. 65(9), 1053-1070
- Geodätisches Forschungszentrum Postdam: The CHAMP Mission, <http://www.gfz-potsdam.de/pb1/op/champ> (10.08.2006)
- Hähnle H. (1999): Modellierung von Satellitenoberflächen für die Berechnung von Oberflächenstörkräften am Beispiel des Satelliten CHAMP, Studienarbeit am Geodätischen Institut der Universität Stuttgart
- Hedin, A. E. (1987): MSIS-86 Thermospheric Model, J. Geophys. Res. 92, 4649
- King-Hele, D. (1987): Satellite orbits in an atmosphere, Blackie
- Kleusberg (1998): Navigation I, Skriptum zur Vorlesung: Navigation I, Institut für Navigation der Universität Stuttgart
- Kraus S. (1998): Wirkung der Atmosphärenreibung auf Satelliten, Studienarbeit am Geodätischen Institut der Universität Stuttgart
- Lühr H., Grünwaldt L., Förste Ch (2002): CHAMP Reference Systems, Transformations and Standards, Dokument CH-GFZ-RS-002, GFZ-Postdam
- Meyers Lexikonredaktion (1987): Meyers großes Taschenlexikon – 2.Band, B.I. Taschenbuchverlag
- Montenbruck O., Eberhard G. (2000): Satellite Orbits, Models, Methods, Applications, Springer
- Reubelt T., Austen G. (2000): Räumliche Schwerefeldmessung aus semi-kontinuierlichen Ephemeriden niedrigfliegender GPS-vermessener Satelliten vom Typ CHAMP, GRACE and GOCE, Diplomarbeit am Geodätischen Institut der Universität Stuttgart

Sneeuw, N. (2006): Dynamic Satellite Geodesy, Skriptum zur Vorlesung: Analytische Bahnberechnung künstlicher Satelliten, Geodätisches Institut der Universität Stuttgart

Sneeuw N., Weigelt M. (2005): Numerical Velocity Determination and Calibration Methods for CHAMP Using the Energy Balance Approach, In: Jeheli C., Bastos L., Fernandes J.: Gravity, Geoid and Space Missions, IAG Symposia, Volume 129, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 54-59

Trovatello, M., Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum: CHAMP – CHAllening Minisatellite Payload, <http://www.dlr.de/champ> (15.09.2006)