

## Präzise Absolutkalibration des Jason-2 Altimeters mit Hilfe eines Mikrowellentransponders



Walter Hausleitner und Florian Moser, Graz

### Kurzfassung

Die Satellitenaltimetrie ist eine Schlüsseltechnologie zur globalen Untersuchung der Ozeandynamik und der Meeresspiegelveränderung. Um ein klares Bild dieser Prozesse zu erhalten sind zuverlässige Altimeterdaten in homogener Qualität von aktuellen und künftigen Satellitenmissionen zur Erstellung langer Beobachtungszeitreihen enorm wichtig. Zahlreiche global verteilte und eigens dafür eingerichtete Stationen bilden eine wichtige Infrastruktur zur Kalibrierung von Satellitenaltimetern und Validierung der entsprechenden Produkte.

Die Österreichische Akademie der Wissenschaften betreibt an der Cal/Val Station Gavdos (GR) direkt an einem Jason-2 Kreuzungspunkt einen Transponder. Der Hauptvorteil einer Kalibrierung mit Hilfe eines Transponders liegt darin, dass sich die Signalreflexion auf eine stabile Referenz bezieht, d.h. unabhängig von der momentanen lokalen Meeresspiegelveränderung (Gezeiten, Wellen, etc.) ist. Poseidon-3, das Jason-2-Altimeter wird bei jedem Überflug in den sog. DIODE/DEM Modus geschaltet, der es erlaubt, das Transpondersignal zu empfangen. Für die Analyse der dabei generierten Altimeter-Waveforms wurden vier verschiedene Retracking-Algorithmen implementiert. Im Zuge einer Kalibrationskampagne wurde aus 26 Überflügen ein sehr präziser und zwischen den Methoden konsistenter Altimeterbias von  $6.8 \pm 0.3$  cm berechnet.

**Schlüsselwörter:** Altimetrie, Transponder, Absolutkalibration, Jason-2

### Abstract

Satellite radar altimetry is considered a key technology for the investigation of the sea level variation on a global scale. In order to achieve a clear picture of this process reliable data of homogeneous quality from previous, current and future missions are needed for a seamless concatenation of sufficiently long observation periods. Numerous altimeter calibration sites around the world build up a dedicated scientific infrastructure for accurate calibration and validation of altimeter satellites and related products.

At the cal/val site Gavdos, Greece, the Austrian Academy of Sciences operates an altimeter transponder, located directly beneath a Jason cross-over point. The main advantage of altimeter calibration by means of a transponder is to refer to a stable reference point of pulse reflection not being affected from any local sea surface dynamics (tides, ocean waves, etc.). For every overpass the Jason-2 altimeter, Poseidon-3, is switched to the DIODE/DEM mode which allows an adjustment of the ranging gate to the transponder's elevation. For the waveform analysis we implemented four retracking algorithms following different strategies. A calibration campaign comprising 26 passes yields a very precise bias value of  $6.8 \pm 0.3$  cm with a good agreement among all the implemented methods.

**Keywords:** altimetry, transponder, absolute calibration, Jason-2

### 1. Einleitung

Für die Erforschung des Klimawandels spielen die Ozeandynamik im Allgemeinen und der säkulare Anstieg des mittleren Meeresspiegels im Besonderen eine zentrale Rolle. Aktuelle und prädiizierte Anstiegsraten zeichnen ein bedrohliches Bild und stehen daher ganz besonders im Fokus von Öffentlichkeit und Forschung.

Während des letzten Jahrhunderts ist der Meeresspiegel im Mittel mit einer Rate von  $1.5$  mm/Jahr gestiegen [1], wobei eine ständige Beschleunigung zu verzeichnen ist. Während der letzten zwei Dekaden ist die Anstiegsrate sogar auf  $3.2 \pm 0.4$  mm/Jahr angestiegen (Abbildung 1).

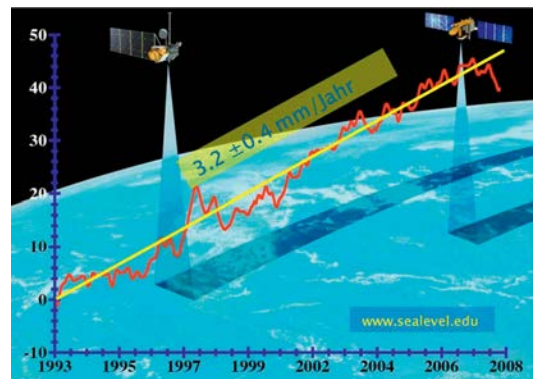


Abb. 1: Anstieg des mittleren globalen Meeresspiegels (Quelle: [www.sealevel.edu](http://www.sealevel.edu))

Globale Beobachtungsdaten von Altimetermissionen in hoher homogener Qualität und über entsprechend lange Zeiträume sind eine wesentliche Grundlage zur Erfassung von zuverlässigen und aussagekräftigen Klimadaten-sätzen. Für die Erstellung langer missionsübergreifender Beobachtungszeitreihen ist es enorm wichtig die Altimeterinstrumente bestmöglich zu kalibrieren und Missionen damit vergleichbar zu machen. Die Altimeterkalibration basiert auf dem Vergleich von beobachteten Distanzen mit entsprechenden unabhängig bestimmten Werten und soll systematische Messfehler des Altimeters weitestgehend eliminieren.

Dafür sind in Küstengebieten unter oder nahe an Satellitenspuren Altimeterkalibrationsstationen eingerichtet. Diese sind mit Instrumenten wie Gezeitenstationen, GPS-Bojen und im Meer verankerten Sensoren (Druck, Temperatur, Salinität, etc.) ausgestattet und erfassen permanent in-situ Beobachtungen des lokalen Meeresspiegels für Kalibrationszwecke. Die prominentesten dieser Cal/Val Stationen befinden sich auf der Harvest Ölplattform (CA, USA, [2]), Bass Strait (AUS, [3]), Korsika (F, [4]), Ibiza (E, [5]) und Gavdos (GR, [6]).

Ein Vergleich der aus den Altimetermissionen Topex/Poseidon, Jason-1 und Jason-2 abge-

leiteten absoluten Meereshöhen (Abbildung 2) zeigt eklatante Differenzen im Dezimeterbereich (9 cm zwischen Jason-1 und Topex; 18(!) cm zw. Jason-2 und Topex, [7]). Dieser Umstand war etwa ein Jahrzehnt lang nicht erklärbar und zeigt die enorme Notwendigkeit der Instrumentenkalibration und Datenvalidierung durch möglichst unabhängige Methoden. Erst 2011 wurde die Ursache im inkorrekten Phasenzentrum der Jason-Altimeter gefunden [8]. Die verhältnismäßig große Streuung dieser Werte (ca. 3-3.5 cm) resultiert aus dem hochgradig dynamischen Zustand der Meeresoberfläche.

Die Station auf der Insel Gavdos, südlich von Kreta ist neben den konventionellen Instrumenten mit einem speziellen – vom Institut für Weltraumforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften betriebenen – Altimeter-Transponder ausgestattet. Ein Transponder stellt – im Gegensatz zu der sehr dynamischen Meeresoberfläche – eine sehr stabile künstliche Reflexionsfläche (d.h. Referenzhöhe) für Altimetersignale dar. Dadurch werden alle aus der Ozeandynamik resultierenden Fehlerquellen, wie Meereswellen, Gezeiten, Strömungen oder atmosphärische Auflasteffekte eliminiert.

Es ist für eine derart kleine Insel wie Gavdos (ca. 25 km<sup>2</sup>) ziemlich einzigartig, an einem Kreu-

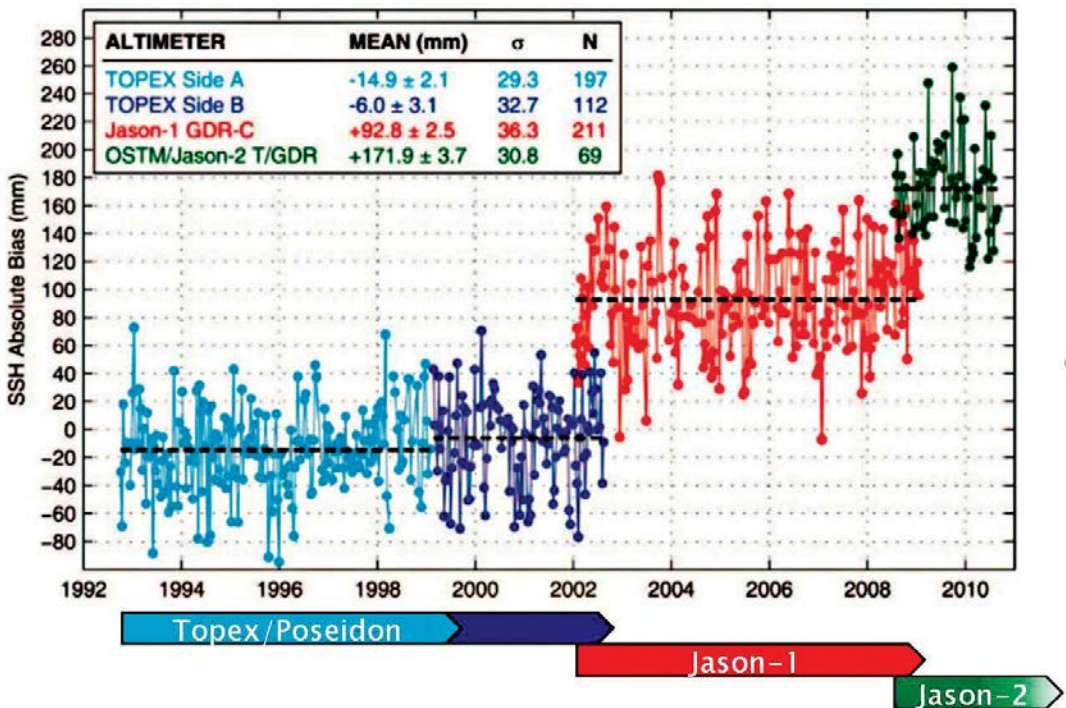


Abb. 2: Biaswerte der aus Absolutkalibration verschiedener Altimetermissionen abgeleiteten Meereshöhen [7]

zungspunkt zu liegen, was den großen Vorteil hat, einerseits quasi im offenen Meer zu messen und andererseits sowohl auf- als auch absteigende Bahnbögen beobachten zu können, was nicht nur die Beobachtungsrate verdoppelt, sondern auch damit verbundene systematische Effekte eliminiert.

Dieser Beitrag zeigt, dass die Kalibration von Satellitenaltimetern durch den Einsatz von Transpondern mit signifikant höherer Genauigkeit möglich ist und die bewährten konventionellen Methoden sinnvoll ergänzt [9].

## 2. JASON-2 und das Prinzip der Altimetrie

Das Prinzip der Satellitenaltimetrie basiert auf einer Zwei-Weg-Laufzeitmessung eines kurzen Radarpulses, der vom Altimeter an Bord des Satelliten ausgesandt und von der Meeresoberfläche wieder zurück zum Satelliten reflektiert wird. Die Größe der ausgeleuchteten Meeresfläche, der sog. Altimeter-Footprint (Abbildung 3, oben) hängt beim pulslimitierten Altimeter von der Pulslänge (ca. 105  $\mu$ s), der Flughöhe und der vorherrschenden Wellenhöhe ab und liegt bei etwa 5-50 km<sup>2</sup> für Jason-2 in 1336 km Höhe [10]. Aus dem empfangenen Radarecho (Abbildung 3, unten) kann daher nicht nur die Distanz, sondern z.B. auch der Rückstreukoeffizient, die signifikante Wellenhöhe, der Antennenausrichtungsfehler etc. abgeleitet werden [11].

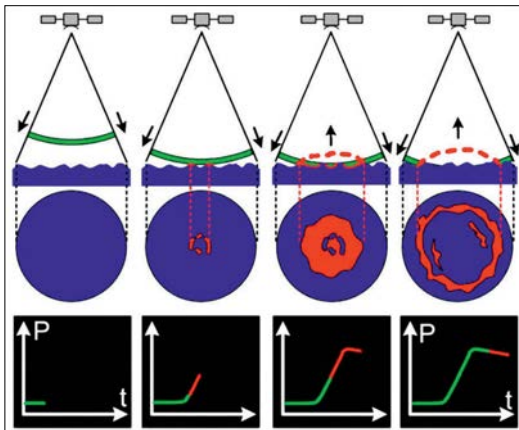


Abb. 3: Der Footprint eines pulslimitierten Altimeters (oben) und das empfangene Radarecho (unten)

Jason-2, ein von der NASA, CNES und NOAA betriebener Satellit (Abbildung 4, links), wurde 2008 als Nachfolgemission des sehr erfolgreichen Jason-1 gestartet. Die Bahnkonfiguration (10 Tages-Orbit) gewährleistet eine Ozeanüberdeckung von ca. 90% bei einer Spurseparation

von 315 km. Das Hauptinstrument ist Poseidon-3 (Abbildung 4, rechts), ein Altimeter der jüngsten Generation. Daneben sind noch einige für die Altimetrie und Bahnbestimmung relevante Instrumente (Radiometer, DORIS, GPS, LRA) an Bord.

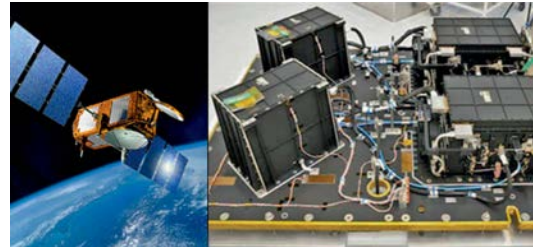


Abb.4: Jason-2 (links) und Poseidon-3 Altimeter (rechts)

Poseidon-3 ist ein Zweifrequenzaltimeter (13.6 / 5.3 GHz) mit einer Pulswiederholfrequenz von 2060 Hz, welches in vier verschiedenen Betriebsmodi (Acquisition-, Tracking-, Calibration- und DIODE/DEM Modus) arbeiten kann. Beim Übergang von Land auf Ozean schaltet das Altimeter automatisch vom Acquisition- auf den Tracking-Modus. Auf den DIODE/DEM-Modus wird weiter unten speziell im Zusammenhang mit der Transponderkalibration eingegangen.

## 3. Altimetertransponder

Ein Altimetertransponder ist vom Prinzip ein Mikrowellen-Repeater, d.h. er empfängt Radarpulse und sendet einen stark verstärkten Echopuls zurück. Die Hauptbestandteile eines Transponders sind eine Empfangs- und eine Sendeantenne mit einem Durchmesser von jeweils 42 cm und einem dazwischen liegenden Verstärker. Die Verstärkung des Gesamtsystems von 149 dB gewährleistet eine dem natürlichen Ozeanecho entsprechende Empfangsenergie am Altimeter. Der Transponder arbeitet im Ku-Band in derselben Frequenz und Bandbreite ( $13.75 \pm 0.3$  GHz) wie das Altimeter.

Im Gegensatz zu einem typischen Ozeanecho, welches dem charakteristischen Brown-Modell (vgl. Abb. 3, unten) entspricht, trägt ein Transponderecho die typische Charakteristik einer punktuellen Reflexionsquelle mit sehr engen Signalspitzen. Die interne Signalverzögerung des Transponders (ca. 13 ns) bestimmt die Lage des exakten effektiven Reflexionspunktes.

Das Gerät ist auf einem Betonfundament befestigt und mit einem gegen Regen, Staub und Wind schützenden Gehäuse untergebracht (Abbildung 5). Zudem ist die Station mit einem GPRS-Modem für die Steuerung per Fernzugriff ausgestattet. Die exakte Position und Höhe des

Transponders wurde im Zuge einer von der TU Kreta durchgeführten GPS-Kampagne bestimmt.

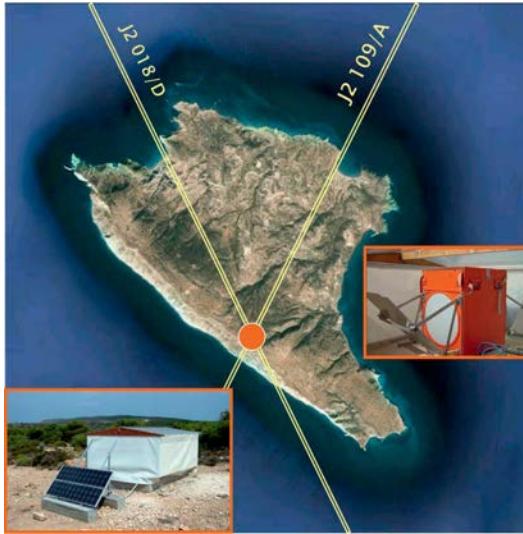


Abb. 5: Die Transponderstation und ihre Position auf Gavdos am Kreuzungspunkt von Jason-2

#### 4. Das Konzept der Altimeterkalibration

Im Gegensatz zur konventionellen Kalibrationsmethode, welche auf in-situ Vergleichsmessungen basieren, die durch verschiedene Sensoren (z.B. Pegelmesser) in Küstennähe gemacht werden (Abbildung 6, grüne Linien), beziehen sich die Kalibrationsmessungen im Transponderverfahren direkt auf die Transponderstation (Abbildung 6, gelbe Linien). Darüber hinaus können die Altimetermessungen auch bereits für die Schrägdistanzen zwischen Transponder und dem überfliegenden Satelliten erfasst werden (Abbildung 6, rote Linien).

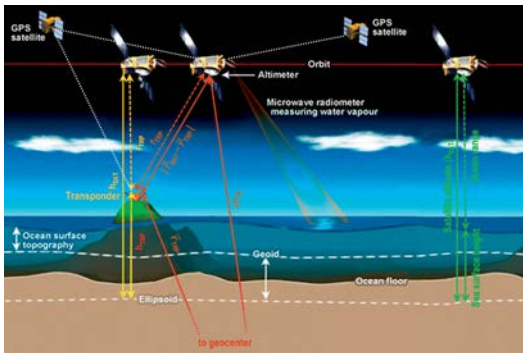


Abb. 6: Konzept der Kalibrierung mittels Transponder (gelb, rot) und konventionelle Methode (grün)

Der Altimeterbias,  $B = d_{TRP} - r_{TRP}$ , ist dabei definiert als die Differenz aus dem geometrischen

Abstand,  $d_{TRP}$ , zwischen Transponder und Satellit – berechnet aus der Orbitinformation (rot durchgezogene Linie) – und der entsprechenden Altimetermessung,  $r_{TRP}$  (rot gestrichelte Linie).

In der praktischen Durchführung dieser Transponderkalibration, die für mehrere Satellitenmissionen wie ERS-1/2 [12] und Envisat [13] schon seit Jahren erfolgreich durchgeführt wurden, stößt man bei Altimetern der jüngsten Generation, wie sie an Bord von Jason betrieben werden, auf Probleme in der Signalerfassung. Die extrem sensitive Elektronik dieser Altimeter (AutomaticGainControl, AGC) sowie die adaptiven Ranging-Gates schalten das Altimeter beim Transponderüberflug automatisch in den Acquisition-Mode. In einer engen Kooperation mit CNES (Centre National d'EtudesSpaciales, Toulouse) wurden in der Folge eine Reihe von Experimenten (Überflug im Kalibriermodus CAL- 2) durchgeführt und schließlich ein spezieller DIODE/DEM-Modus aktiviert, um den Transponder im Signal identifizieren zu können. Nachdem dieser Modus für die regulären Altimetermessungen nicht genutzt wird, wird das Altimeter lediglich beim Transponderüberflug für ca. 5 Sekunden in den DIODE/DEM Modus umgeschaltet (Abbildung 7).

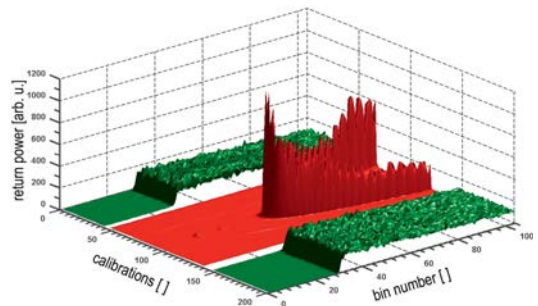


Abb. 7: Altimetersignal während eines Transponderüberfluges (Ozean-Return: grün, Transponder-Echo: rot)

Während dieser Zeit werden etwa 50-60 Einzelkalibrationen (IC) für die Schrägdistanzen durchgeführt. Jede dieser Einzelkalibrationen ist ein über 50 ms bzw. 90 Messungen gemittelte Energiekurve, welche mit einer Rate von 3.125 ns in 128 Bins gesampelt wird.

Abbildung 8 (links) zeigt die Gesamtheit der Transponder-Waveforms eines Transponderüberfluges, wobei zwei Einzelkalibrationen (magenta und blau) exemplarisch herausgegriffen wurden. Die typische spitze Signalstruktur wird durch das punktuelle Transponderecho generiert. Der DIODE/DEM Modus ist derart konfiguriert, dass sich

das Messfenster für Entfernungsmessung zum festen Transponderpunkt in Nadir-Richtung auf Bin 32 bezieht. Dieser sog. Tracker-Range,  $r_{TR}$ , ergibt zusammen mit dem sog. Bin-Range,  $r_{BR}$ , – das ist das Entfernungsäquivalent zwischen Bin 32 und dem eigentlichen Transponder-Echo –, die rohe unkorrigierte Schrägdistanz,  $r_{TRP}$ , zwischen Satellit und Transponder (Abbildung 8, rechts).

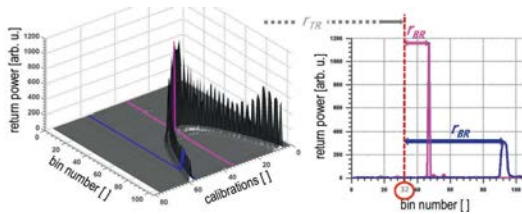


Abb.8: Transponder-Waveforms (links) und zwei exemplarisch herausgegriffene Einzelkalibrationen

Die Qualität der Kalibrierung hängt stark mit der Genauigkeit des sog. Waveform-Retrackings, d.h. der Ableitung des exakten Reflexionszeitpunktes aus den Einzelkalibrationen ab. Naheliegende Maße sind das Maximum der gemessenen oder approximierten Signalstärke, die halbe max. Signalstärke an der Anstiegsflanke, oder der Schwerpunkt des integrierten Signalverlaufs.

**5. Waveform Retracking und Berechnung des Altimeterbias**

In Abbildung 9 ist das Berechnungsschema für die Bestimmung des Altimeterbias basierend auf zwei Datenprodukten dargestellt, die beide die 20 Hz Waveform-Daten sowie die Orbitinformation mit mittlerer (MOE in S-IGDR) und hoher Genauigkeit (POE in S-GDR) enthalten. Für jeden Überflug werden zuerst die Einzelkalibrationen extrahiert und die Altimetermessung zwischen Satellit und Transponder berechnet. Für jede dieser Waveforms wird andererseits auch die Distanz zwischen Transponder und dem Satellit basierend auf der Orbitinformation berechnet. Nach Anbringen aller relevanten Korrekturen liefert der Vergleich durch Differenzbildung einen Biaswert pro Einzelkalibration, aus denen ein für den gesamten Überflug repräsentativer Bias berechnet wird.

**5.1 Waveform Retracking**

Für die Berechnung der Altimeterbiasen haben wir mehrere Algorithmen implementiert und getestet. Eine Bewertung dieser Verfahren hat gezeigt, dass die folgenden vier Methoden für die Signalanalyse sehr geeignet sind:

1. Gauss-Fit
2. Energy-Centroid
3. Sinc-Funktion
4. Zero-Padding.

Der Bin-Range,  $r_{BR}$ , d.h. die Entfernung, welche sich aufgrund des Transponder-Echo-Bins relativ zum Referenz-Bin 32 ergibt (siehe Abbildung 8), wird bestimmt durch

$$r_{BR} = (-b_{ref} + \hat{b}_*) \cdot n_{BR} \cdot c/2, \text{ mit } b_{ref} = 32,$$

der zeitlichen Auflösung  $n_{BR}$  eines Bins (3.125 ns), der Lichtgeschwindigkeit  $c$  und  $\hat{b}_*$  ( $\in \hat{b}_1 \dots \hat{b}_4$ ), den aus den vier Methoden resultierenden Return-Bins.

Die Gauss-Fit Methode approximiert das Echosignal durch eine Gauß'sche Kurve, wobei das Maximum als die Epoche der Reflexion,  $\hat{b}_1$ , angenommen wird.

Die Energy-Centroid Methode bestimmt den geometrischen Flächenschwerpunkt  $\hat{b}_2$  des integrierten Signals. Diese Methode ist sehr sensitiv bzgl. des Signal-Rausch-Verhaltens. In einem Zwischenschritt wird daher das Rauschen bestmöglich reduziert.

Die Sinc-Funktion Methode basiert auf einer Approximation einer modifizierten sinc-Funktion des ebenfalls rauschreduzierten Signals, wobei wieder das Maximum das Returnbin  $\hat{b}_3$  definiert.

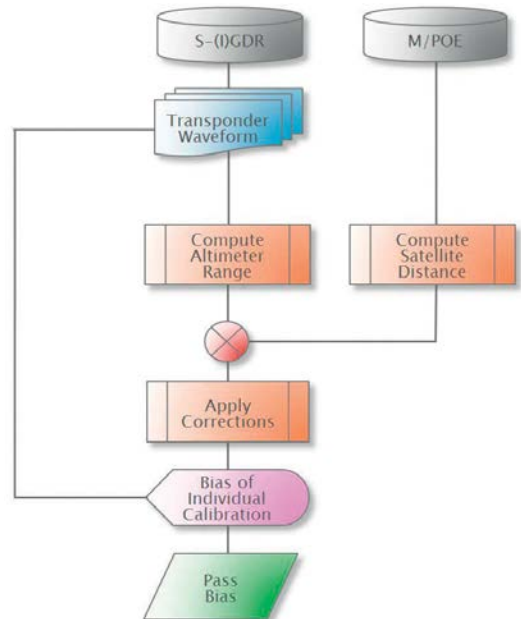


Abb. 9: Berechnungsschema der Altimeterbiasen

Bei der vierten Methode wird die Auflösung des Signals mittels Zero-Padding erhöht. Die Zero-Padding Methode nutzt den Vorteil, durch Ergänzung des Altimetersignals mit Nullen, d.h. Multiplikation mit einer Rechteckfunktion eine höhere Frequenzgenauigkeit der diskreten Fourier-Transformation zu erreichen, d.h. die Auflösung des Signals zu steigern [14]. Auf das so verdichtete Signal wird schließlich eine Gauß'sche Kurve

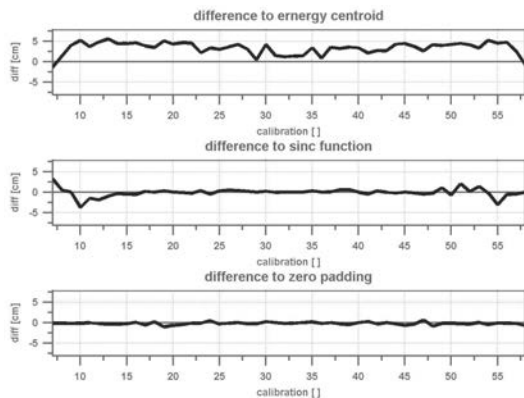


Abb. 10: Abweichungen der Methoden (Energy-Centroid, Sinc-Function und Zero-Padding) zur Gauss-Fit Methode

approximiert, wobei wieder das Returnbin  $\bar{b}_4$  am Maximum der Kurve angenommen wird.

Abbildung 10 zeigt einen Vergleich dieser Retracking-Algorithmen als Differenz bzgl. der Gauss-Fit Methode. Aufgrund der Tatsache, dass Gauss-Fit und Zero-Padding auf einer Gauß-Approximation basieren, liefern sie weitgehend idente Ergebnisse. Die Sinc-Function Methode stimmt über einen weiten Bereich der zentralen Kalibrationen mit den oben genannten Methoden überein, zeigt aber deutliche Abweichungen in den äußeren Kalibrationen, welche aufgrund der flacheren Signalstruktur mit weitaus geringerer Energie und schlechterem Signal-Rausch-Verhältnis entstehen. Die Energy-Centroid Methode zeigt über den gesamten Kalibrationssatz hinweg etwas größere Abweichungen, was aus der Tatsache, dass hier mit unaufbereiteten Signaldaten und den angewandten Filterkriterien für die Signalerkennung gearbeitet wird, herrührt.

Im nächsten Schritt wird – wieder getrennt für alle vier Methoden – aus den Echo-Bins und dem Tracker-Range eine Transponderrohmessung abgeleitet. Dazu wird ein Polynom zweiter Ordnung durch diese Messungen gelegt, welches einerseits einen exakten Zeitpunkt des Überfluges (Point of closest approach, PCA) liefert und an-

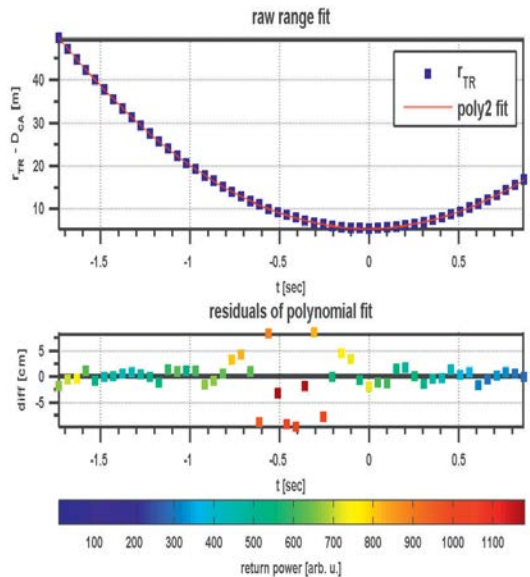


Abb. 11: Ausgleichspolynom der Altimetermessungen relativ zu Zeitpunkt und Entfernung des transpondernächsten Punktes (oben) und Residuen der Return-Bins mit farbcodierter maximaler Energie (unten)

dererseits die Ableitung von Fehlerinformationen der verschiedenen Berechnungsmethoden erlaubt. Abbildung 11 (oben, rote Linie) zeigt dieses Polynom relativ zu Zeitpunkt und Entfernung des PCA. Aus den darunter dargestellten Residuen bzgl. des Ausgleichspolynoms erkennt man die relativ großen Abweichungen der zentralen Kalibrationen mit einem hohen Energieniveau. Dieser Effekt resultiert aus der kritischen zeitlichen Auflösung, d.h. Verhältnis der Samplingrate zur Signalbreite. Aus diesem Grund wird die Schätzung der Parabel iterativ und gewichtet durchgeführt. Das Gewicht entspricht dabei dem inversen Energieniveau.

Die so berechneten Rohdistanzen aus der Altimetermessung werden mit den aus den Bahndaten berechneten Distanzen verglichen (vgl. Abbildung 9 rechts). Die Distanz zwischen Transponder und Orbitposition wird rein geometrisch bestimmt. Die Transponderposition wurde dabei aus einer GPS-Kampagne bestimmt (vgl. Kapitel 3) und die Orbitposition entweder aus dem S-IGDR oder dem S-GDR Datenprodukt entnommen. Die unterschiedlichen Bahngenauigkeiten werden mit 2.5 cm (S-IGDR, Latenzzeit: 1-2 Tage) bzw. mit 1.5 cm (S-GDR, Latenzzeit: ca. 60 Tage) angegeben [15].

Für die Korrektur der oben abgeleiteten Altimetermessungen sind eine Reihe von Signallaufzeit und -ausbreitungseffekten zu berücksichti-

gen. Grundsätzlich kann man diese Korrekturen einteilen in Instrumenteneffekte seitens des Altimeters ( $\Delta r_{ALT}$ ) und des Transponders ( $\Delta r_{TRP}$ ), Ausbreitungseffekte ( $\Delta r_{PROP}$ ), geophysikalische Effekte ( $\Delta r_{GEO}$ ) sowie prozedurale Korrekturen ( $\Delta r_{PROC}$ ). Die Transponderentfernung ist daher

$$r_{TRP} = r_{TR} + r_{BR} + \sum \Delta r,$$

mit der Summe der Korrekturen

$$\sum \Delta r = \Delta r_{ALT} + \Delta r_{TRP} + \Delta r_{PROP} + \Delta r_{GEO} + \Delta r_{PROC},$$

welche in Tabelle 1 zusammengefasst sind.

Die Altimeter-Instrumentenkorrekturen umfassen den internen Signallaufpfad sowie Massenschwerpunkt- und DORIS Oszillatorkorrekturen. Transponderseitig werden die gesamte elektronische und geometrische Signallaufzeitverzögerung sowie die Verzögerung durch die Transponderabdeckung korrigiert. Die Ausbreitung des Radarpulses durch die Erdatmosphäre wird verzögert durch die Ionosphäre sowie des Trocken- und Nassanteils der Troposphäre. Ebenfalls müssen die relevanten geophysikalischen Korrekturen wie Gezeiten der festen Erde, Folgezeiten und gezeitenbedingte Auflasteffekte, die zu einer Höhenänderung der Transponderposition führen, berücksichtigt werden. Schließlich wird noch eine Doppler-Korrektur berücksichtigt und ein Offset in der Altimeter-Absolutzeiterfassung [16] angebracht.

Type of Corr.	Description		Source
$\Delta r_{ALT}$	$\Delta r_{path}$	Altim. Internalpathdelay	GDR
	$\Delta r_{cog}$	Altim. Phase centre wrt COG	GDR
	$\Delta r_{iso}$	DORIS USO driftcorr.	GDR
$\Delta r_{TRP}$	$\Delta r_{elec}$	Transp. electronic delay	HF lab calibr.
	$\Delta r_{geom}$	Transp. Freeairpath	Manufacturer
	$\Delta r_{pmma}$	Delay oftransp. housingroof	HF lab
$\Delta r_{PROP}$	$\Delta r_{iono}$	Ionosphericrangecorr.	GIM model
	$\Delta r_{dry}$	Dry troposphericrangecorr.	GDR
	$\Delta r_{wet}$	Wettroposphericrangecorr.	AMR@ECMWF
$\Delta r_{GEO}$	$\Delta r_{solid}$	Solid Earth tides	GDR
	$\Delta r_{pole}$	Pole tides	GDR
	$\Delta r_{load}$	Tidalocceanoading	GDR
$\Delta r_{PROC}$	$\Delta r_{dopp}$	Transp. related Doppler corr.	Computed
	$\Delta r_{dat}$	Pseudo datationbiascorr.	CNES

Tab. 1: Übersicht aller Korrekturen für die Transponderkalibration relevanten Korrekturen

### 5.2 Berechnung des Altimeterbias

Es wurde bereits oben darauf hingewiesen, dass sowohl die Altimetermessung,  $r_{TRP}$ , als auch der entsprechende geometrische Abstand zwischen Transponder und Satellit,  $d_{TRP}$ , für jede einzelne

Kalibrationen mit einer Rate von 20 Hz berechnet werden. Im Zuge eines Satellitenüberfluges werden daher in der Regel ca. 50 „individuelle Biaswerte“ bestimmt, aus denen letztlich ein für den gesamten Überflug repräsentativer Bias bestimmt wird. Im konkreten Fall wird dies mittels einer robusten Ausgleichsgerade aller Einzelwerte (Abbildung 12) durchgeführt. Auch hier kommt wieder eine inverse Gewichtung nach der Energie zur Anwendung.

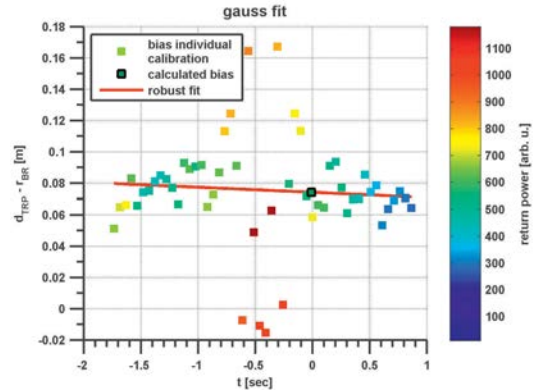


Abb. 12: Bestimmung des Altimeterbias (schwarzes Quadrat) für den Satellitenpass durch robuste Ausgleichung der Biases der Einzelkalibrationen

Der letztlich resultierende Bias wird von dieser Ausgleichsgeraden am Punkt der geringsten Annäherung bestimmt. Es bleibt anzumerken, dass die Steigung der robust geschätzten Geraden statistisch nicht signifikant ist.

## 6. Ergebnisse und Diskussion

Für diese Arbeit wurde eine Kalibrationskampagne von Oktober 2010 bis Jänner 2012 mit insgesamt 26 Transponderüberflügen durchgeführt. Die im Kapitel 5.1 vorgestellten Analysemethoden wurden für alle Passes angewandt, wobei sowohl die Altimeter- als auch Orbit-Daten aus dem Level-2 Produkt S-GDR-T stammen. Die „T“-Version berücksichtigt die in der Einleitung angesprochene Korrektur des Tracker-Ranges von 18,8 cm, um den jüngst entdeckten Fehler im Poseidon-3 Antennenphasenzentrum zu korrigieren [7].

Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse der Gauß Methode sowie die relativen Abweichung der übrigen drei Methoden.

Die Spannweite der Biases liegt bei etwa 5 cm, während diese bei den konventionellen Methoden bei etwa dem Dreifachen liegt. Eine Korrelation zwischen den Biaswerten und der maximalen Energie kann nicht gefunden werden.

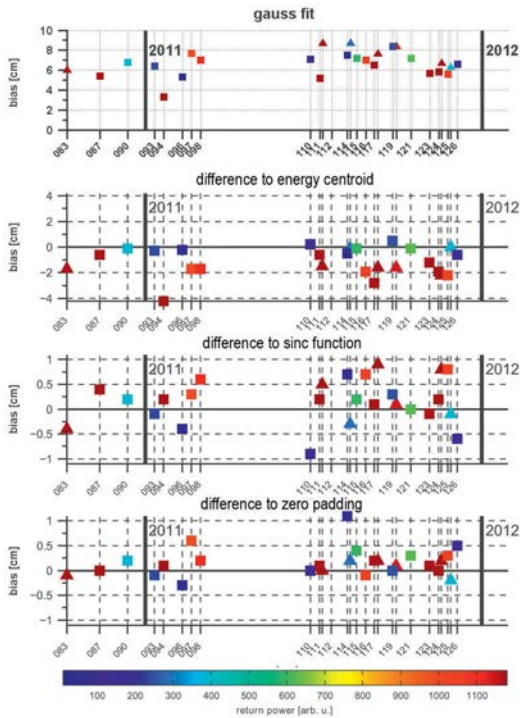


Abb. 13: Ergebnisse der Altimeterbiases aus den vier Methoden (Dreieck: aufsteigend; Quadrat: absteigend)

Ebenso gibt es keinen statistisch signifikanten Trend in den Biases. Es können zudem keine signifikanten Unterschiede zwischen aufsteigenden und absteigenden Passes festgestellt werden. Tabelle 2 gibt einen Vergleich der wichtigsten statistischen Größen (Mittelwert, Standardabweichung des Mittelwertes, Median), die eine sehr gute Übereinstimmung der einzelnen Methoden zeigen. Die Energy-Centroid Methode ergibt geringfügig höhere Standardabweichungen der individuellen und der mittleren Pass-Biases.

Aus Abbildung 13 ist ebenfalls ersichtlich, dass mit wenigen Ausnahmen (z.B. geringe Energie im Cycle 114) die Sinc-Function und die

Analyse-Methode	Ergebnisse aus S-IGDR-T Daten [cm]			
	Mittelw. $\bar{x}$	Std. d. Mittelw. $s_x$	Std. $s_i$	Median $\tilde{x}$
Gauss-Fit	6.8	0.3	1.6	6.8
Energy-Centroid	5.7	0.4	2.1	6.0
Sinc-Function	7.1	0.3	1.8	7.1
Zero-Padding	7.0	0.3	1.7	6.9

Tab. 2: Statistische Parameter der aus S-IGDR-T Daten berechneten Bias-Werte

Zero-Padding Methode mit Abweichungen von weniger als 1 cm mit der Gauß Methode übereinstimmen.

Die Differenzen der Energy-Centroid Methode sind (mit Ausnahme von Cycle 094) kleiner als 3 cm. Sehr wohl kann eine starke Korrelation zwischen der Return-Energie und den Bias-Differenzen zur Gauß Methode nachgewiesen werden, der wohl in der oben erwähnten kritisch geringen Auflösung der vorherrschenden Signalstruktur zu begründen ist.

Schließlich wurde die gesamte Analyse sowohl mit S-IGDR als auch mit S-GDR Daten, welche unterschiedliche Orbit-Genauigkeiten aufweisen, durchgeführt. Die Ergebnisse der S-GDR Daten zeigen eine deutlich geringere Streuung und der über alle Passes resultierende mittlere Bias ist für S-GDR-Daten mehr als 5 mm kleiner als der von S-IGDR ermittelte mittlere Bias.

### 7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das primäre Ziel dieser Arbeit war es, die Stärken der Altimeter-Absolutkalibration mittels Transponder zu demonstrieren.

Der mittels Transpondermethode berechnete Absolutbias für das Jason-2 Altimeter liegt bei 6.8 cm.

Die aus den verschiedenen Analysemethoden resultierende Präzision dieser Technik ist tatsächlich sehr beeindruckend. Während konventionelle Methoden, die sich auf in-situ Messungen der momentanen Meereshöhe mittels GPS und Pegelmesser beziehen, Standardabweichungen von typischerweise 1-2 cm ergeben, ist mit der Transpondermethode eine Kalibrierung mit signifikant geringerer Standardabweichung von weniger als 3 mm möglich.

Die Ursache für diese konstante systematische Abweichung ist noch nicht restlos geklärt, liegt aber vermutlich an einem überholten Transponderkalibrierwert, als Folge eines Alterungsprozesses des Transponders. Das Gerät ist seit mehreren Jahren sehr starken Umwelteinflüssen (extreme Hitze, Staubstürme, etc.) ausgesetzt, was zu einer Beeinträchtigung der Messgenauigkeit geführt haben könnte und die nun durch Rekalibration wieder hergestellt werden sollte.

Diese Präzision einerseits und die extrem flexiblen Anwendungsmöglichkeiten machen die Transpondertechnik für weitere Altimetermissionen, wie Saral/AltiKa, Jason-CS, etc. sehr interessant. Die Portabilität des Transponders ermöglicht auch neuartige Anwendungen, wie etwa der Betrieb des Gerätes in bestmöglicher Nähe einer SLR-Station, um über die Bestimmung einer



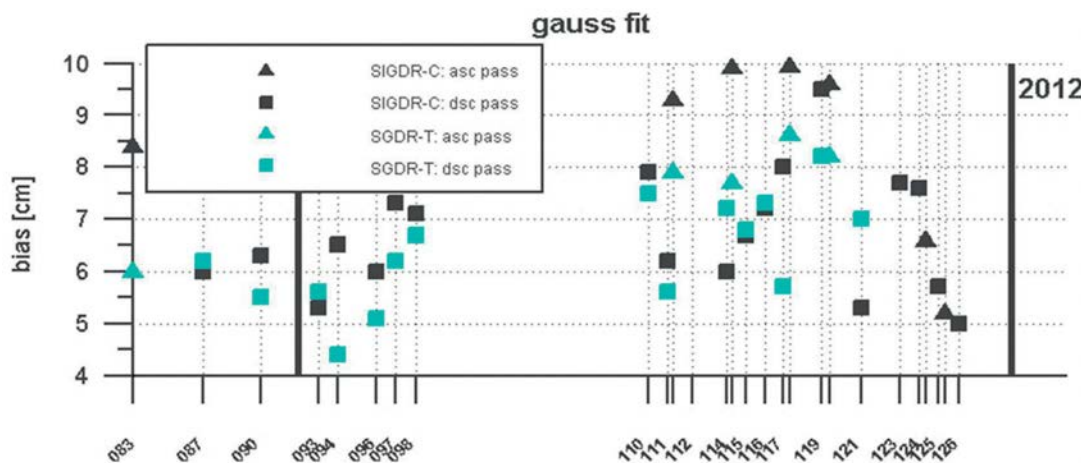


Abb. 14: Biaswerte (berechnet nach der Gauß Methode) basierend auf S-IGDR (schwarz) und S-GDR (cyan) Daten

hochgenauen Radialkomponente des Satellitenorbits mittels SLR, die Kalibriergenauigkeit des Altimeters noch weiter zu steigern.

#### Literaturverzeichnis

- [1] Douglas B.C., 1997: Global Sea Rise: A Redetermination, *Surveys in Geophysics*. Vol. 18, No. 2-3, 279-292, doi: 10.1023/A:1006544227856.
- [2] Hains B.J., D. Dong, G.H. Born, S.K. Gill, 2003. *The harvest experiment: monitoring Jason-1 and TOPEX/Poseidon from a California offshore platform*. In: Special issue of Jason-1 calibration/validation, Part 1. *Marine Geodesy* 26(3-4): 239-259.
- [3] Watson C.S., N. White, R. Coleman, P. Morgan, R. Govind, 2004: Topex/Poseidon and Jason-1 absolute calibration in Bass Strait, Australia. In: Special issue on Jason-1 calibration/validation, Part 2. *Marine Geodesy* 27(1-2):107-131.
- [4] Bonnefond P., P. Exertier, O. Laurain, Y. Menard, A. Orsoni, G. Jan and E. Jeansou, 2003: Absolute Calibration of Jason-1 and TOPEX/Poseidon altimeters in Corsica. *Marine Geodesy* 26(3-4):261-284.
- [5] Martinez-Benjamin J.J., M. Martinez-Garcia, S. Gonzales Lopez, A. Nunez Andres, F. Buill Pozuelo, M. Espinola Infantes, J. Lopez-Marco, J. Martin Davila, J. Garate Pasquin, C. Garcia Silva, P. Bonnefond, O. Laurain, A. M. Baron Isanta, M. A. Ortiz Castellon, J. Talaya Lopez, B. Perez Gomez, E. Alvarez Fanjul, G. Rodriguez Velasco, D. Gomis, M. Marcos, Y. Menard, G. Jan, E. Jeansou and F. Lyard & L. Roblou, 2004: Ibiza Absolute Calibration Experiment: Survey and Preliminary Results, *Marine Geodesy*. Vol. 27, Issue 3-4, doi: 10.1080/01490410490883342.
- [6] Mertikas S.P., R.T. Ioannides, I.N. Tziavos, G.S. Vergos, W. Hausleitner, X. Frantzis, A. Tripolitsiotis, P. Partsinevolos, D. Antrikopoulos, 2010: Statistical Models and Latest Results in the Determination of the Absolute Bias for the Radar Altimeters of Jason Satellites using the Gavdos facility. *Marine Geodesy*, 33: S1, 114-149, doi: 10.1080/01490419.2010.488973.
- [7] Vignudelli S., A.G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste, (2011): Coastal Altimetry, 259-296, doi: 10.1007/978-3-642-12796-0. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- [8] Willis J. 2011: Report of the 2011 Ocean Surface Topography Science Team (OSTST) Meeting. San Diego, CA, October 19-21.
- [9] Hausleitner, W., Moser, F., Desjonqueres, J.-D., Boy, F., Picot, N., Weingrill, J., Mertikas, S., Daskalakis, A. (2012): A new method of precise Jason-2 altimeter calibration using a microwave transponder, *Marine Geodesy*, Special Issue, Vol. 3, in print.
- [10] Chelton D.B., E.J. Edward, J.L. MacArthur, 1988: Pulse Compression and Sea Level Tracking in Satellite Altimetry. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, American Meteorological Society.
- [11] Rosmorduc V., J. Benveniste, O. Lauret, M. Milagro, N. Picot, 2006: Radar Altimetry Tutorial, (<http://www.altimetry.info>)
- [12] Denys P.H., A.R. Birks, P.A. Cross, J. Powell, 1993: Precise Height Determination using the ERS-1 Radar Altimeter and Active Ground Based Transponders. Final Report 93/0804, Version 4.0
- [13] Cristea E. and P. Moore, 2007: Altimeter Bias Determination Using Two Years of Transponder Observations. Proceedings of the Envisat Symposium, 23-27 April 2007, Montreux, Switzerland, ESA SP-636.
- [14] Richards M.A., 2005: Fundamentals of Radar Signal Processing, ISBN 0-07-144474-2, McGraw-Hill Verlag.
- [15] Dumont J.P., V. Rosmorduc, N. Picot, S. Desai, H. Bonekamp, J. Figa, J. Lillebridge, R. Scharroo, 2009: OSTM/Jason-2 Products Handbook, Issue: 1 rev 3, CNES: SALP-MU-M\_OP-15815-CN, JPL: OSTM-29-1237, January 20, 2009.
- [16] Desjonqueres J.-D., N. Picot, 2011: OSTM/Jason-2 Absolute Bias Technical Note. Reference: TP3-JPOS3-NT-1627-CNES, Edition: 01/00.

#### Anschrift der Autoren

Dr. Walter Hausleitner, Institut für Weltraumforschung, Österreichische Akademie der Wissenschaften, Schmiedlstraße 6, 8042 Graz.  
E-Mail: Walter.Hausleitner@oeaw.ac.at

Dipl.-Ing. Florian Moser, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz, Steyrergasse 30, 8010 Graz.  
E-Mail: Florian.Moser@TUGraz.at