

# Optimierung der Orbitparameter zukünftiger Schwerefeldmissionen unter Verwendung genetischer Algorithmen

## 1 EINLEITUNG

---

Eine genaue Kenntnis des Schwerefelds der Erde ist seit langem ein Hauptziel der geodätischen wissenschaftlichen Gemeinde. In früheren Zeiten wurde die Schwere über deren Auswirkung auf die Schwingdauer eines Pendels oder auf die Ausdehnung einer Feder gemessen. Auch über die Zeit, die ein frei fallendes Objekt zur Bewältigung einer gewissen Distanz benötigt, kann auf die Anziehungskraft der Erde geschlossen werden. Diese Methoden sind aber grundsätzlich auf lokalisierte Messungen beschränkt. Ein großräumiges Modell des Erdschwerefelds konnte also nur durch Kombination von sehr vielen Einzelmessungen erstellt werden. Unter Berücksichtigung der Unterschiede der einzelnen Messmethoden und der inhomogenen Punktverteilung kann durch einen Ausgleich ein Modell entstehen, das einen kleinen Bereich der Erdoberfläche abbildet.

Die ersten wirklich globalen Modelle des Erdschwerefelds wurden über die Bestimmung der Bahnen einiger frühen Satelliten gewonnen. Die Satelliten befinden sich auf Ihrer Umlaufbahn im ständigen freien Fall, und lassen so auf die gleiche Art und Weise wie ein zum Boden fallender Apfel auf die Erdbeschleunigung an der Position des Satelliten schließen. Mit dem größer werdenden Wunsch diese Schweremodelle immer weiter zu verbessern wurden im Laufe der Jahre mehrere dedizierte Satellitenmissionen zur Bestimmung des Erdschwerefeldes geplant und durchgeführt. Im Jahr 2000 wurde der vom Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ) konzipierte Satellit CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) zur gleichzeitigen Bestimmung des Erdschwerefelds und des Erdmagnetfelds gestartet. Im Jahr 2002 folgte die auf deutsch-amerikanischer Zusammenarbeit beruhende Mission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), welche im Vergleich zu CHAMP eine stark verbesserte Schwerefeldbestimmung, vor allem im Bereich der Zeitvariablen Größen, zuließ. Im Jahr 2009 folgte dann die Mission GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer), die vor allem im Bereich des statischen Schwerefelds zu weiteren Verbesserungen führte.

Die Missionen von CHAMP und GOCE endeten mit dem Absturz des jeweiligen Satelliten in den Jahren 2009 und 2013. GRACE liefert nach nun über zwölf Jahren im Orbit immer noch für die geodätische wissenschaftliche Gemeinde und Anwender in unterschiedlichsten Gebieten äußerst wertvolle Daten. Die gewonnenen Schwerefelddaten finden nicht nur in der Ingenieursvermessung, sondern vor allem auch in den Klima- und Umweltwissenschaften Anwendung. So können auf Basis von mehreren aufeinander folgenden und voneinander unabhängigen Schwerefeldern Aussagen zu Massentransporten im System Erde gemacht werden. Diese Fähigkeit beruht auf dem einfachen Prinzip, dass Massen auf andere Massen anziehend wirken.

Im Großen ist uns dieser Effekt aus der Mechanik unseres Sonnensystems bekannt, in dem die Planeten durch die Anziehungskraft der Sonne auf Ihrer Umlaufbahn gehalten werden. Im kleineren ist der gleiche Effekt zwischen der Erde und dem Mond zu beobachten. Die Anziehung der Erde ist aber nicht die einer Punktmasse, im Gegenteil setzt Sie sich aus der Summe der Anziehungen einer Vielzahl von Einzelmassen zusammen. Jede dieser Einzelmassen trägt Ihren eigenen kleinen Beitrag zum Gesamtschwerefeld der Erde, und damit auch auf die Schwerebeschleunigung die ein Satellit erfährt, bei. Ein typisches Beispiel für eine Ansammlung solcher Einzelmasse ist der Eisanspanzer über dem Grönländischen Festland. Bewegt sich ein Satellit auf seiner Umlaufbahn auf diesen Eisanspanzer zu, so wird er durch diesen angezogen und zunehmend beschleunigt. Hat der Satellit den Eisanspanzer überquert, so wird er von dessen Schwerebeschleunigung abgebremst.

Zwischen jeder Überquerung des Eisanspanzers durch den Satelliten liegt nun aber ein gewisser Zeitraum, in dem die Masse des Eisanspanzers nicht unverändert bleibt. Ein Effekt der hier zum Tragen kommt ist die saisonale Änderung der Eismasse, bei der im Winter Neuschnee abgelagert und teilweise zu Eis verdichtet wird. In der warmen Jahreszeit verliert der Eisanspanzer durch abschmelzen wieder an Masse. Der Satellit wird also auf seiner Umlaufbahn im Winter stärker von dem Eisanspanzer beschleunigt, als dies im Sommer der Fall ist. Durch Messen der Veränderungen dieser Beschleunigung im zeitlichen Verlauf, und damit auch der Veränderung des Erdschwerefelds, kann also ein Rückschluss auf sich verändernde Massen an der Erdoberfläche gezogen werden.

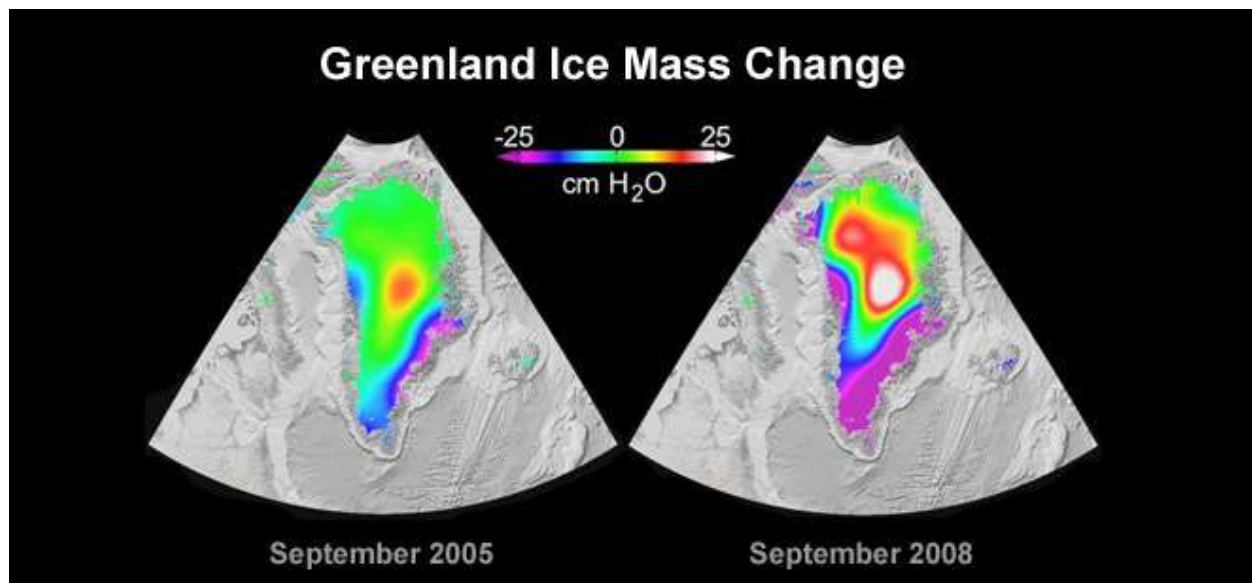


Abbildung 1: Massenveränderung in Grönland zwischen 2005 und 2008. Dargestellt als Veränderung einer Wassersäule mit äquivalenter Masse. Quelle: NASA/JPL

Weitere konkrete Anwendungsgebiete aus der jüngeren Vergangenheit sind zum Beispiel die Überwachung von Grundwasservorräten in den ariden Regionen des mittleren Ostens und Indiens. Hier wird über den gleichen Mechanismus der Massenveränderung ein Verlust oder Gewinn von Grundwasservorräten beobachtet. Im Zusammenspiel mit weiteren Basisdaten erstellten Forscher eine Karte die zur Einstufung des Dürrierisikos in den USA verwendet werden kann. Ebenso können saisonale

Veränderungen des Wasserhaushalts in großen Flusssystemen wie dem Amazonas oder in Regenwaldgebieten wie in Zentralafrika genau nachverfolgt werden.

Eine genaue Kenntnis des Erdschwerefelds hat also Anwendungen die weit über die in der klassischen Geodäsie bekannten Problemstellungen, wie zum Beispiel der Bestimmung von präzisen orthometrischen Höhen aus GPS-Beobachtungen, hinausgehen.

## 2 DIE GRACE-MISSION

---

Nachdem sowohl CHAMP als auch GOCE das Ende Ihrer jeweiligen Mission erreicht haben ist GRACE nun die einzig verbliebene dedizierte Schwerefeldmission. GRACE besteht im Gegensatz zu CHAMP und GOCE nicht nur aus einem, sondern tatsächlich aus zwei Satelliten die im Abstand von ca. 200 km auf derselben Umlaufbahn die Erde umrunden. Überfliegt der erste der beiden Satelliten eine Massenkonzentration wie zum Beispiel den grönländischen Eispanzer so erfährt er eine Beschleunigung und entfernt sich damit von dem zweiten Satelliten. Wenig später kommt der zweite Satellit dem Eispanzer ebenfalls näher und wird genauso beschleunigt, die Distanz zwischen den Satelliten verringert sich. Beim Verlassen des Einflussbereichs des Eispanzers kommt es wiederum zu einer differentiellen Geschwindigkeitsänderung zwischen den beiden Satelliten. Die Bestimmung der Erdbeschleunigung geschieht nun indirekt über die kontinuierliche präzise Bestimmung der Entfernung zwischen den zwei Satelliten.

Diese Entfernungsmessung wird über Elektromagnetische Wellen im Mikrowellenbereich realisiert. Die genaue Entfernung zwischen den Satelliten wird im Abstand von zehn Sekunden mit hoher Präzision gemessen. Würde der erste Satellit über Stuttgart stehen, so befände sich der zweite in etwa über München. Das Mikrowellenentfernungsmessgerät kann die Distanz zwischen den beiden Satelliten nun auf weniger als die Breite eines Haars genau messen. Nur durch diese hohe Messgenauigkeit können verhältnismäßig kleine Massenveränderungen wie die in Eispanzern oder im Grundwasserspiegel überhaupt aufgelöst werden.

Um eine globale Abdeckung der Messdaten zu erreichen wurde eine polare Umlaufbahn für die beiden GRACE-Satelliten gewählt. Dies bedeutet dass die Satelliten die Erde nahe den Polen um einiges genauer abtasten als in der Nähe des Äquators. Da die Entfernungsänderung zwischen den Satelliten nur in Flugrichtung hochpräzise gemessen werden kann ergibt sich auch, dass der Einfluss der Schwerebeschleunigung in Nord-Süd Richtung um ein vielfaches besser aufgelöst werden kann als in Ost-West Richtung. Des Weiteren benötigt GRACE einen Monat um Daten auf der gesamten Erdkugel zu sammeln, weshalb die aus GRACE berechneten Schwerefelder auch meist im Monatsmittel angegeben werden. Diese Umstände führen zu Artefakten in den bestimmten Schwerefeldern, die die Qualität der Lösung stark beschränken und die durch aufwändige Nachbearbeitung und Filterung beseitigt werden müssen.

Abbildung 3 zeigt ein solches Schwerefeld mit den durch die Missionskonfiguration verursachten deutlichen Streifen in Nord-Süd-Richtung. Durch Methoden der Nachbearbeitung und Filterung kann dieser Fehler verringert werden, um so zu den eigentlich interessanten Daten, den Massenvariationen, zu gelangen.

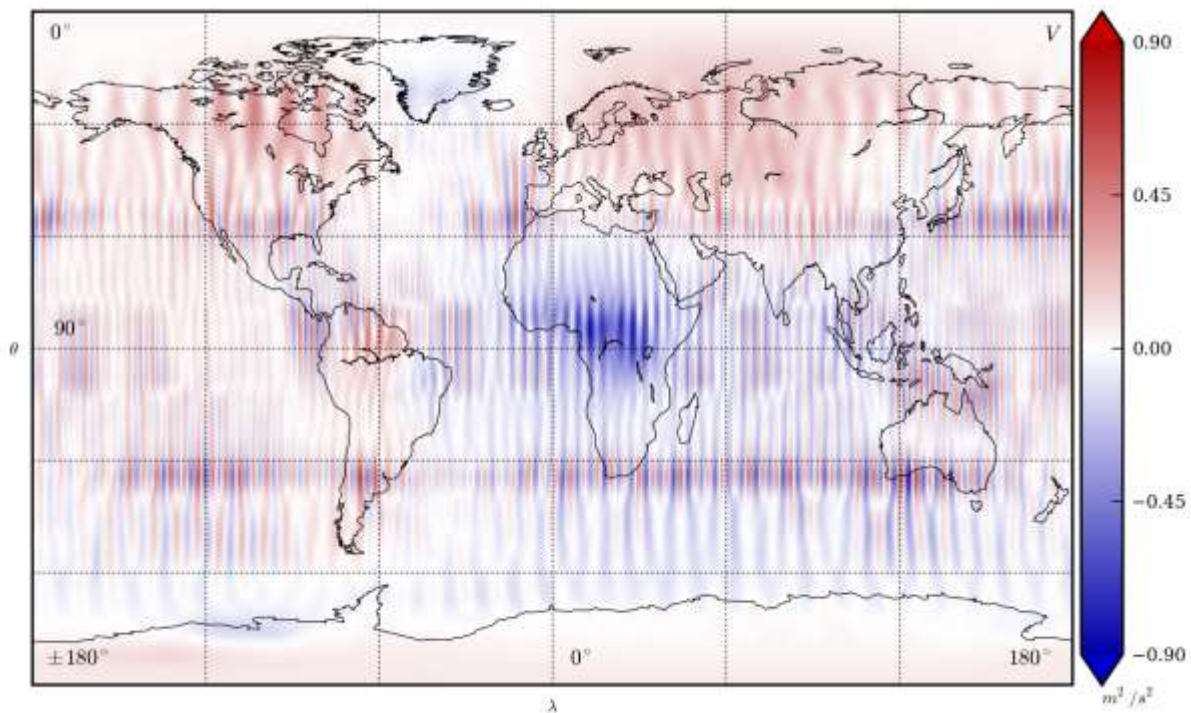


Abbildung 3: Streifenbildung bei GRACE (Simulation). Durch Streifen überlagert erkennt man Massenvariationen in Zentralafrika, Grönland, oder dem Amazonasbecken.

Die GRACE Satellitenmission war ursprünglich auf eine Dauer von nur fünf Jahren ausgelegt, und hat mit Ihrer bisherigen Leistung die Erwartungen an die Lebensdauer bei weitem übertroffen. Die beiden Satelliten zeigen Ihr Alter jedoch schon deutlich. Eine der wichtigsten Komponenten an Bord der Satelliten sind die Batterien, die die auf der Sonnenseite der Erde von den Solarpaneelen eingefangene Energie speichern und auf der Schattenseite abgeben. In den letzten Jahren wurden einige dieser Batteriemodule auf Grund von Alterungserscheinungen unbrauchbar, was die weitere Fortsetzung der Mission stark gefährdet. Beim Ausfall von nur wenigen weiteren Modulen werden die Satelliten nicht mehr in der Lage sein Ihre wichtigen Daten aufzuzeichnen. Dies hätte zur Folge dass die seit 2002 fortlaufend aufgezeichnete Zeitreihe zu den Massenvariationen der Erde abbrechen würde, was weitreichende Folgen auf viele Gebiete der Klima- und Umweltforschung hätte.

In Anbetracht dieser Gefahr vereinbarten NASA und das GFZ den möglichst baldigen Start einer Nachfolgemission, welche nun für das Jahr 2017 terminiert ist. Diese Nachfolgemission (GRACE Follow-on, oder GRACE-FO) ist aus Kosten- und Zuverlässigkeitsgründen größtenteils ein exakter Nachbau der jetzigen Mission, mit der Ausnahme eines zweiten Instruments zur Entfernungsmessung das auf Basis von Laser-Interferometrie die Entfernung zwischen den Satelliten um einen Faktor 50 besser als das bisherige Instrument bestimmen können soll. Das Laser-Interferometer und das Mikrowellensystem sollen auf GRACE-FO gleichzeitig betrieben werden.

Die verbesserte Messgenauigkeit hat aber leider keine positiven Auswirkungen auf die zuvor beschriebenen negativen Effekte die durch die Wahl der Umlaufbahn entstehen. Da eine globale

Abdeckung der Daten nicht zur Diskussion steht blieb hier auch keine andere Wahl. Um die Datenlage zu verbessern wurden Überlegungen angestellt eines oder sogar mehrere weitere Satellitenpaare zu kommissionieren, die GRACE-FO auf alternativen Umlaufbahnen unterstützen könnten. Ein solches Paar könnte zum Beispiel auf einer geneigten Bahn fliegen, um sowohl die zeitliche als auch räumliche Abtastung in Äquatornähe und den gemäßigten Breiten zu verbessern. Eine solche Bahn könnte auch den Ost-West-Verlauf des Schwerefelds deutlich genauer bestimmen als GRACE-FO dies kann.

Die Wahl einer solchen Satellitenmission war der Inhalt meiner Arbeit. Meine Betreuer und Ich stellten uns die Frage:

*„Finanzierung und politischer Wille außer Acht: Welche Satellitenkonfiguration würde GRACE oder GRACE-FO am besten unterstützen?“*

Meine Diplomarbeit beschäftigte sich nun mit der Entwicklung einer Methodik um eine solche optimale Konfiguration für eine Partnermission mit Hilfe von Computersimulationen automatisch zu bestimmen.

### 3 SATELLITENORBITS

---

Eine kreisförmige Umlaufbahn eines Satelliten kann durch vier der üblichen sechs Kepler-Elemente eindeutig beschrieben werden. Die große Halbachse der Umlaufbahn ( $a$ ) beschreibt die Höhe der Bahn über der Erde. Die Inklination ( $i$ ) beschreibt die Neigung der Bahnebene mit Bezug zur Äquatorialebene. Die Länge des aufsteigenden Knotens ( $\Omega$ ) beschreibt die Verdrehung der Bahnebene zum raumfesten System. Die mittlere Anomalie ( $M$ ) beschreibt die Position des Satelliten auf seiner kreisförmigen Umlaufbahn. Wir stellten uns die Aufgabe, genau die acht Parameter zu finden die die Bahn der zwei Satelliten einer optimalen Zusatzmission definieren. Bei der Auswahl der Mission wollten wir uns nicht nur auf GRACE-artige Bahnen beschränken. Wir ließen auch Bahnen zu, bei denen aus der Sicht der Satelliten der zweite dem ersten nicht direkt folgt, sondern eine Art Pendelbewegung beschreibt.

Beschreibt man die Satellitenbahnen nun nicht unabhängig voneinander, sondern in Form von gemeinsamen Parametern (z.B. die große Halbachse soll bei beiden Satelliten gleich sein; statt zwei mittleren Anomalien wird nur ein Unterschied  $\Delta M$  angegeben), so verringert sich die Anzahl der benötigten Parameter noch einmal etwas.

### 4 PARAMETERSTUDIEN

---

Zur Bewertung jeder Kandidatenmissionen führten wir einen geschlossenen Simulationskreislauf durch. Als Eingangsgröße diente uns hier ein Erdschwerefeldprodukt, das Massenvariationen im Verlauf eines Monats beinhaltet. Mit Hilfe dieses Schwerefelds können die Beobachtungen der Satelliten im Verlauf eines Monats simuliert werden. Aus diesen Beobachtungen kann man nun ein mittleres Schwerefeld für diesen Monat berechnen, in dem die Abtastfehler, die durch zeitliches und räumliches Aliasing sowie die Konfiguration der Satellitenbahn entstehen enthalten sind. Dieses Feld verglichen wir nun mit dem Mittelwert der Eingangsgröße. Aus den auftretenden Differenzen kann man nun auf die Qualität der Kandidatenmission schließen.

Um eine vollständig automatisierte Beurteilung des Ergebnisses einer solchen simulierten Mission zu ermöglichen, musste eine Reihe von charakteristischen Kennzahlen festgelegt werden. Hier wurden zum Beispiel Werte wie die mittlere Quadratsumme der globalen Abweichungen des Schwerfelds verwendet. Da eine solche Zahl eher abstrakt ist entschlossen wir uns eine Reihe von Simulationen durchzuführen, die das statistische Verhalten und die Aussagekraft der von uns gewählten Kennzahlen beleuchten sollten. Hierzu haben wir ausgehend von einem gemeinsamen Satz an Orbitparametern jeweils nur einen geringfügig verändert und dann die Auswirkung dieser Änderung auf das Ergebnis der Simulation betrachtet.

Beispiele für Parameter die verändert wurden sind der Öffnungswinkel des orbitalen Pendels, oder die Inklination des Satelliten (Abbildung 6). So entstand eine Vielzahl von Parameterkombinationen die das Verhalten der von uns gewählten Kennzahlen genau beleuchteten und uns ermöglichten diese besser zu verstehen.

Insgesamt wurden in diesem Abschnitt 9510 verschiedene Parameterkombinationen untersucht. Auf Basis dieser Daten wurde dann ein Algorithmus entwickelt der in der Lage ist voll autonom die Parameter für eine optimale Partnermission zu GRACE-FO zu bestimmen.

## 5 GENETISCHER ALGORITHMUS

---

An der Menge der bisher durchgeführten Studien konnten wir schon erkennen dass die Anzahl der möglichen Parameterkombinationen unglaublich groß ist. Wir grenzten diesen Suchraum ein, indem wir Grenzwerte für einige Parameter der Bahnen festlegten. So entschlossen wir zum Beispiel dass die Bahnhöhe und Inklination der Satellitenpaare in einem bestimmten Bereich liegen sollten. Wir legten außerdem fest dass sich diese Variablen nicht kontinuierlich verändern durften, sondern nur inkrementell. So durfte sich die Inklination der Bahnen z.B. in Schritten von  $2^\circ$  zwischen  $30^\circ$  und  $150^\circ$  bewegen. Insgesamt ließen diese Einschränkungen aber immer noch insgesamt 27 702 000 mögliche Partnermissionen zu. Eine solche Anzahl von Missionen komplett zu simulieren ist nicht möglich.

Eine Strategie um einen solch großen Parameterraum effizient zu durchsuchen sind Optimierungsalgorithmen. Ein solcher Algorithmus kann zum Beispiel sein ausgehend von einem Näherungswert für die Parameter alle Nachbarn dieser Lösung im Parameterraum zu untersuchen. Repräsentiert einer dieser Nachbarn eine bessere Lösung, so untersucht man dessen Nachbarn. Diese Schritte werden wiederholt bis sich keine Verbesserung mehr feststellen lässt.

Ein solcher Algorithmus führt bei unkompliziert strukturierten Lösungsräumen oft zu guten Ergebnissen. An Abbildung 6 kann man an einem kleinen Ausschnitt unseres fünf-dimensionalen Lösungsraums erkennen dass dieser sich nicht für einen solchen Algorithmus eignet. Er ist sehr ungleichmäßig, mit plötzlichen Sprüngen und vielen lokalen Maxima und Minima des entwickelten Bewertungskriteriums.

Da wir an einem globalen Maximum interessiert sind mussten wir eine andere Optimierungsstrategie wählen. Eine Strategie die sich sehr gut für ungleichmäßige Lösungsräume eignet sind die genetischen Algorithmen. Genetische Algorithmen suchen den Lösungsraum nicht wie herkömmliche Optimierungsalgorithmen ab, sondern springen von Punkt zu Punkt bis sie eine Stelle erreicht haben die

der Algorithmus als „ausreichend gut“ einstuft. Ausgehend von diesem Punkt werden dann die Parameter in kleinen Schritten verändert um eine bessere Lösung zu finden.

Der Name der genetischen Algorithmen lässt auch schon Rückschlüsse auf seinen Ursprung her. Die Methodik ist stark von der biologischen Evolution inspiriert, und viele Begriffe die in genetischen Algorithmen verwendet werden sind aus diesem Fachbereich entlehnt. So wird zum Beispiel die Repräsentation eines Lösungsraums als Genom bezeichnet. Für das Genom werden bestimmte Regeln festgelegt, so dass es nur Werte annehmen kann, die Lösungen innerhalb unseres festgelegten Parameterraums repräsentieren. Für unsere Simulation hat ein Genom genau fünf Gene. Jedes der Gene beschreibt einen der Parameter die die kombinierte Satellitenmission festlegen. Eine bestimmte Kombination dieser fünf Gene ist nun ein Individuum.

Die Qualität oder Eignung eines bestimmten Individuums wird durch die sogenannte Fitness-Funktion beschrieben. In biologischer Sicht wäre dies die Eignung eines bestimmten Organismus, in seiner Umwelt erfolgreich zu überleben. In unserem Fall ist dies die Eignung der Satellitenmission, das Erdschwerefeld möglichst gut abzutasten. Als Fitnessfunktion verwendeten wir nun genau eine Kombination der Kennzahlen, die wir mit Hilfe der Parameterstudien bestimmt haben. So kann für zwei Satellitenkonfigurationen — jeweils durch ein Genom repräsentiert — anhand einer einzelnen Zahl, der Fitness, entschieden werden, welche der beiden „besser“ ist.

Ein weiterer Aspekt der genetischen Algorithmen ist die Fortpflanzung. Hier werden im Allgemeinen drei verschiedene Verfahren angewendet. Das erste Verfahren ist die Mutation. Hier werden kleine, durch statistische Verteilungen festgelegte, Veränderungen an einem Individuum durchgeführt. So kann z.B. die Inklination einer Satellitenbahn um ein paar Grad vergrößert oder verkleinert werden, und es wird eine Art lokale Optimierung im Suchraum durchgeführt. Das zweite angewendete Verfahren ist die Kreuzung. Hier werden Teile eines Individuums zufällig mit Teilen eines anderen Individuums kombiniert. Dies stellt größere Sprünge im Suchraum dar, und führt dazu, dass optimale Parameterkombinationen schneller gefunden werden können. Die dritte Möglichkeit ist die Genese. Hier wird aus allen möglichen Varianten des Genoms ein zufälliges neues Individuum erstellt. Hierdurch wird ständig neues genetisches Material zur Verfügung gestellt, es werden größere Bereiche des Lösungsraums abgetastet.

Diese Methoden werden nun auf eine Population von Individuen angewendet. Zu Beginn unserer Optimierung wurden 50 zufällige Individuen generiert. Für jedes der 50 Individuen wurde die Fitness bestimmt. Nun wurden die drei oben beschriebenen Reproduktionsmethoden angewendet, wobei Individuen mit einer höheren Fitness eine größere Chance hatten, in die neue Generation von Individuen einzufließen. So wurden Individuen mit schlechter Fitness z.B. mit größerer Wahrscheinlichkeit durch komplett neue Individuen ersetzt. Individuen mit guten Fitnesswerten wurden durch Kreuzung und Mutation in die neue Population überführt. Nachdem die neue Generation mit 50 Individuen besetzt ist wird wieder für jedes Individuum ein Fitnesswert berechnet, und der Algorithmus wiederholt.

Wir wählten eine feste Anzahl von Iterationen als Abbruchkriterium, und zwar die Vollendung von 50 Generationen des Algorithmus. Insgesamt wurden so 2500 Individuen generiert und untersucht. Die Gesamtrechenzeit des Algorithmus betrug 15 Tage. Auf Grund eines Stromausfalls wurde ein Teil des Algorithmus zwei Mal berechnet. Weiter wurden auf Grund der zufälligen Veränderungen einige Individuen mehrmals untersucht. Insgesamt wurden 1487 eindeutige Individuen behandelt, was einer

Abdeckung von 0.05 % des Lösungsraums entspricht. Abbildung 7 zeigt den Verlauf der Fitnesswerte während der Laufzeit des genetischen Algorithmus. Man erkennt dass ein großer Teil der Optimierung zu Beginn des Algorithmus geschah, und dass das Ergebnis später nur noch leicht verbessert wurde.

## 6 ERGEBNISSE

---

Das Ergebnis meiner Diplomarbeit sind zum einen die Implementierung des genetischen Algorithmus zur Bahnoptimierung zukünftiger Schwerefeldmissionen, und zum anderen natürlich auch das Ergebnis des genetischen Algorithmus, ein konkreter Vorschlag zur Auswahl einer solchen Mission. Die von uns ausgewählte Mission ist die Mission mit dem besten Fitnesswert, wie vom genetischen Algorithmus bestimmt.

In Abbildung 8: Oben: Ergebnis einer einzelnen, GRACE-artigen Formation. Unten: Beste Partnermission als Ergebnis des genetischen Algorithmus. Die Karte zeigt jeweils die Unterschiede zwischen Eingangs- und Ausgangsschwerefeld. Rechts und unterhalb der Karte sieht man Visualisierungen von zwei der Werte, die zur Bestimmung der Kennzahlen und der Fitness herangezogen wurden. Unten rechts sieht man jeweils Details zur Umlaufbahn sowie den berechneten Fitnesswert. Man erkennt einmal die Schwerefelddifferenz aus Eingangs- und Ausgangsfeld von nur einer GRACE-artigen Mission, wie sie auch GRACE-Follow-on sein soll. Man erkennt vor allem im Äquatorbereich deutlich die vertikalen Strukturen im beobachteten Schwerefeld. Darunter sieht man nun das Ergebnis des genetischen Algorithmus, die von uns bestimmte optimale Partnermission zu GRACE. Man kann erkennen dass durch die Kombination von GRACE mit dieser zweiten Mission die Streifenbildung in Nord-Süd Richtung komplett verschwunden ist. Die Größenordnung der beobachteten Fehler sinkt enorm ab. Die Inklination der bestimmten Bahn liegt bei  $58^\circ$ , was eine gute Abtastung in Ost-West Richtung ermöglicht. Zusätzlich hat der genetische Algorithmus bestimmt, dass eine Pendelformation mit einer langen Entfernung zwischen den Satelliten von 250 km das beste Ergebnis liefert.

In meiner Arbeit konnten wir nun zeigen dass eine vollständig automatische Optimierung bei der Orbitbestimmung von Satelliten zu durchaus zufriedenstellenden Ergebnissen führen kann. Da die Bewertung der einzelnen Missionen auf charakteristische Kennzahlen gestützt wird kann eine objektive Rangfolge von „schlechtester Mission“ bis zu „besten Mission“ aufgestellt werden. Wir haben demonstriert, dass der in dieser Arbeit angewendete genetische Algorithmus in der Satellitengeodäsie erfolgreich zur Lösung komplexer Probleme angewendet werden kann.



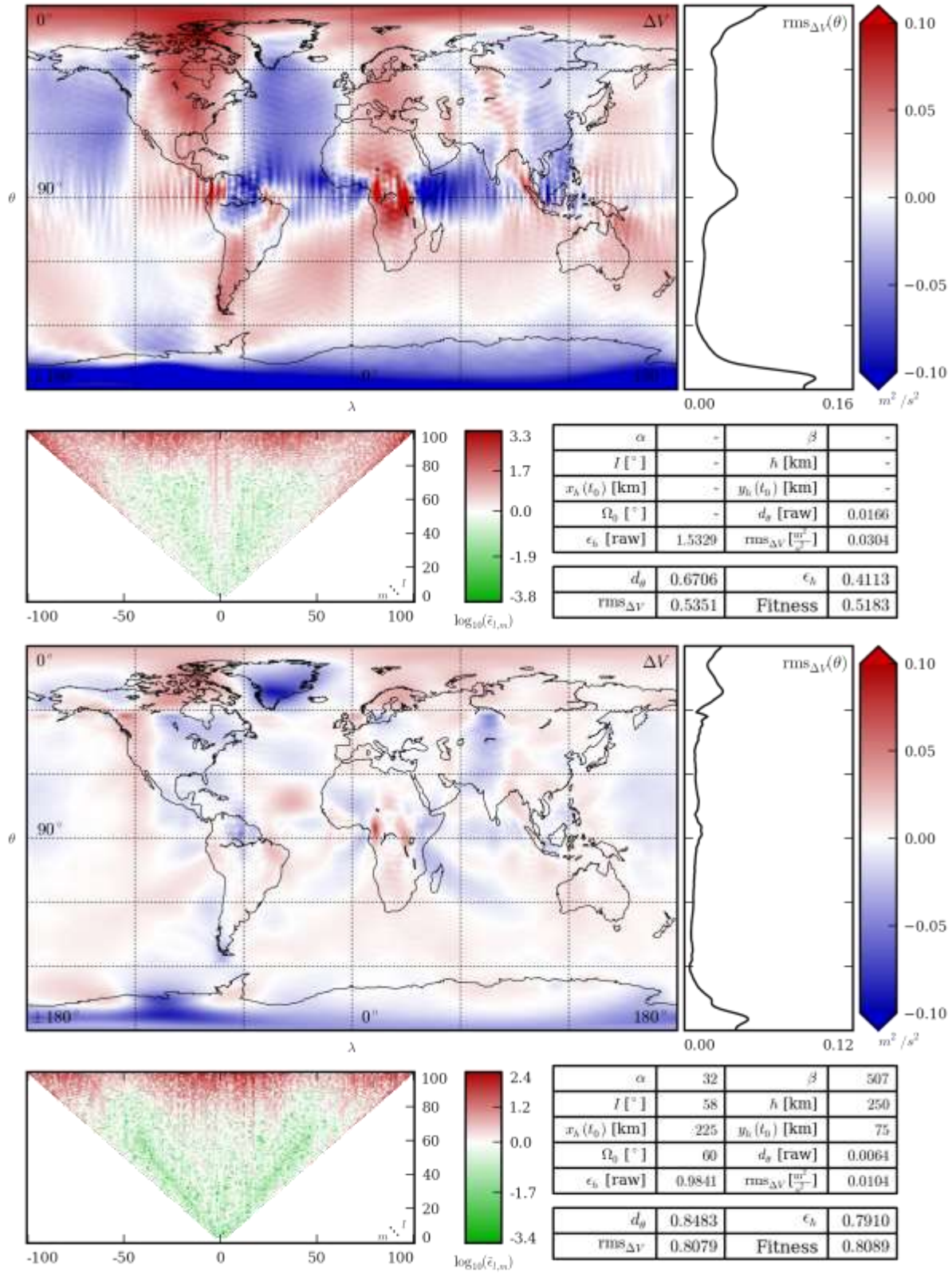


Abbildung 8: Oben: Ergebnis einer einzelnen, GRACE-artigen Formation. Unten: Beste Partnermission als Ergebnis des genetischen Algorithmus. Die Karte zeigt jeweils die Unterschiede zwischen Eingangs- und Ausgangsschwerefeld. Rechts und unterhalb der Karte sieht man Visualisierungen von zwei der Werte, die zur Bestimmung der Kennzahlen und der Fitness herangezogen wurden. Unten rechts sieht man jeweils Details zur Umlaufbahn sowie den berechneten Fitnesswert.