



Abschlussbericht

für das Projekt

Quantenbasierte Beschleunigungsmessung auf Geodäsie-Satelliten (Q-BAGS)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Begünstigter:

Leibniz Universität Hannover (LUH),
Institut für Erdmessung (IFE)

Finanzierungscode:

50 WM 2181

Bezeichnung des Projekts:

Quantenbasierte Beschleunigungsmessung auf Geodäsie-Satelliten (Q-BAGS)

Dauer des Projekts:

01.10.2021 bis 31.09.2024

Berichtszeitraum:

01.10.2021 bis 31.09.2024

1. Einführung

1.1. Definition der Aufgabe

1.1.1. Allgemeines Ziel des Projekts

Das vorgeschlagene Projekt konzentriert sich auf die Weiterentwicklung von Simulationswerkzeugen, um eine genauere Modellierung von quantensorgestützten Schwerefeldsatellitenmissionen zu erreichen. Langfristiges Ziel ist es, die Durchführbarkeit und Umsetzung solcher Missionen deutlich zu verbessern. Unsere Bemühungen umfassen die Entwicklung eines Quantensensor-Simulators, der realistische Messungen erzeugt, indem er die physikalischen Prozesse eines Atominterferometers modelliert, z. B. die Auswirkungen von Laserwellenfronten, Eigenschaften der Atomquelle, Temperatur und Geschwindigkeit auf einer Satellitenplattform. Bei dieser Modellierung werden auch Faktoren wie Vibrationen, Drehungen und Lageregelung berücksichtigt. Der Quantensensor-Simulator, der in den Schwerefeldsimulationsprozess integriert ist, berücksichtigt die Wechselwirkungen zwischen der Satellitenplattform und dem Sensor. Mit Hilfe dieser Simulationen erforschen wir Konzepte für Schwerefeldmissionen und entwickeln realisierbare Quantensensordesigns, die zur Entwicklung eines Prototyps führen können.

1.1.2. Bezug des Projekts zu den Zielen der Förderpolitik

Dieses Projekt ist eine Zusammenarbeit zwischen dem Observatoire de Paris Department Systèmes de référence temps-espace (SYRTE) und dem Institut für Erdmessung (IFE) der Leibniz Universität Hannover (LUH), eingebettet in die deutsch-französische Forschungskoooperation QUANTA. Zugleich stellt das Projekt eine Kooperation zwischen der Sensorentwicklung in der Physik und den Anwendern in der Geodäsie dar.

1.1.3. Wissenschaftliche Ziele des Projekts

Die Entwicklung von Beschleunigungsmessern und Gradiometern auf der Grundlage der Atominterferometrie hat das Potential, die Genauigkeit künftiger Schwerefeldsatellitenmissionen zu verbessern. Daher wird die Integration dieser fortschrittlichen Konzepte in die Planung künftiger Missionen von Weltraumorganisationen wie ESA und NASA immer wichtiger. Unser Ansatz baut auf früheren Studien auf, in denen Quantensensoren oft als "Black Box" behandelt wurden (Romeshkani et al., 2024; HosseiniArani et al., 2024; Zingerle et al., 2024). Im Gegensatz dazu wollen wir diese Herausforderung mit einer grundlegend neuen Methodik angehen, die tiefere Einblicke und eine effektivere Integration in die Missionskonzepte ermöglicht.

Der in diesem Projekt entwickelte Quantensensor-Simulator wurde in die Schwerefeldsimulation integriert, in der die notwendigen Umgebungsparameter der Satellitenplattform bereitgestellt werden und die um die notwendigen Hintergrundmodelle und Hilfssensoren erweitert wurde.

Mit dieser Closed-Loop-Simulationsumgebung wurden dann verschiedene Missionsszenarien untersucht, um den Mehrwert von Quantensensoren für zukünftige Schwerefeldmissionen zu ermitteln. Diese Simulationen gehen weg vom "Black-Box"-Prinzip mit vielen Modellannahmen und basieren nun auf aktuellen Entwicklungen, z.B. kompakten Laser- und Vakuumsystemen für den Einsatz im Weltraum. Der Quantensensor-Simulator integriert die Weiterentwicklung von Teilsystemen eines Atominterferometers in die Simulation. Basierend auf dem Quantensensor-Simulator und den untersuchten Missionsszenarien wurde das Konzept eines optimierten Quantensensors, z.B. eines Beschleunigungssensors, betrachtet, der zeitnah realisiert werden kann und den Stand der Wissenschaft am Ende des Projekts widerspiegelt.

Arbeitsziele pro Projektpartner

Institut für Erdmessung (IFE), Leibniz Universität Hannover (LUH):

- Spezifikation der Quantensensoren zur Beobachtung des Erdschwerefeldes und Identifizierung der Fehlereigenschaften der Quantensensoren,
- Durchführung von Closed-Loop-Simulationen für das Schwerefeld der Erde mit Quantensensoren,
- Analyse der Simulationsergebnisse im Hinblick auf Bahnkonstellation, Instrumentenfehler (Mehrwert der Quantensensoren) und Aliasing-Fehler (Raum-Zeit-Abtastung),
- Quantifizierung der Fehlerbeiträge zum Gesamtbudget und des Mehrwerts von Quantensensoren,
- Identifizierung und Definition von Anforderungen für eine zukünftige Quantengravimetrie-Mission.

Observatoire de Paris Department Systèmes de référence temps-espace (SYRTE):

- Konfiguration und Simulation des Beschleunigungsmessers für die Kalt-Atom-Interferometrie (CAI),
- Spezifikation der verschiedenen Rauschquellen des CAI-Beschleunigungsmessers.

1.2. Anforderungen an das Projekt

1.2.1. Vorhandenes wissenschaftliches Personal

LUH:

Folgenden Personen wirkten aktiv an diesem Projekt mit:

- Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Müller (Lehrstuhlinhaber)
- Dr. Mohsen Romeshkani (Wissenschaftlicher Mitarbeiter)
- Dr. Annike Knabe (Wissenschaftliche Mitarbeiterin)

Dr. Mohsen Romeshkani arbeitete während der letzten 15 Monate des Projekts als Projektmitarbeiter für das IFE (teilweise finanziert durch dieses Projekt).

Dr. Annike Knabe arbeitete für das IFE als Projektmitarbeiterin (teilweise finanziert durch dieses Projekt) während der ersten 21 Monate des Projekts.

Das Projekt profitierte auch von Diskussionen mit Institutsmitgliedern, die in anderen Projekten an verwandten Themen arbeiten, wie Manuel Schilling (DLR-SI), Alexey Kupriyanov (IFE, DFG-finanziert), Nina Fletling (IFE, EU-finanziert), Matthias Weigelt (DLR-SI) und Alireza HosseiniArani (IFE).

SYRTE:

Folgenden Personen von SYRTE wirkten an diesem Projekt mit:

- Dr. Franck Pereira Dos Santos (Lehrstuhlinhaber)
- Dr. Quentin Beaufils (Wissenschaftlicher Mitarbeiter)

1.2.2. Beziehungen zu anderen Projekten

LUH:

Es gab keine direkte Verbindung zu anderen laufenden Projekten. Allerdings werden in anderen IFE/LUH-Projekten neue Sensortechnologien (z.B. optische Beschleunigungsmessung im DFG-SFB TerraQ oder Modellierung der CAI Beschleunigungsmessung im DLR-SI) und zukünftige Messkonzepte für die

Satellitengravimetrie (z.B. erweiterte Satellitenkonstellationen oder realistischere Missionsszenarien) untersucht. Die in diesem Projekt gewonnenen Erfahrungen können in andere Projekte einfließen. Erwähnenswert ist auch das vom DLR geförderte Projekt QUANTGRAV, das in Zusammenarbeit mit den Partnern TUM (Technische Universität München) und GFZ (GeoForschungsZentrum) mit Schwerpunkt auf hydrologischen Aspekten durchgeführt wurde. Der Fokus lag dabei auf dem Nutzen eines vorab simulierten CAI-Beschleunigungsmessers für die Schwerefeldbestimmung. CARIOQA-PMP (Cold Atom Rubidium Interferometer in Orbit for Quantum Accelerometry - Pathfinder Mission Preparation; finanziert von der Europäischen Union¹) hat sich zum Ziel gesetzt, den Technology Readiness Level zu erhöhen und die Grundlagen für eine Quantum Pathfinder Mission in der Weltraumgravimetrie bis zum Jahr 2030 zu schaffen (Lévêque et al., 2022).

SYRTE:

SYRTE ist ebenfalls am Projekt CARIOQA-PMP (EU) beteiligt.

1.2.3. Verfügbare wissenschaftliche und technische Ausrüstung

LUH:

Die LUH nutzt die Rechenanlagen der Leibniz Universität Hannover: LUIS (Leibniz Universität IT Service). Damit war der Zugang zu ausreichender Rechenleistung jederzeit gewährleistet.

SYRTE:

Nicht im Rahmen dieses Projekts finanziert, sondern aus eigenen Mitteln unterstützt.

1.2.4. Verfügbare Mittel für Betriebsausgaben

LUH:

Die gesamte erforderliche Ausrüstung (Computer, Arbeitsstation usw.) wurde von IFE/LUH zur Verfügung gestellt.

SYRTE:

Nicht im Rahmen dieses Projekts finanziert, sondern aus eigenen Mitteln finanziert.

1.3. Planung und Durchführung des Projekts

Arbeitsplan:

Der Arbeitsplan umfasste insgesamt 6 Hauptarbeitspakete, die jeweils unter der Hauptverantwortung eines Projektpartners standen (siehe Tabelle). Dies förderte den interdisziplinären Austausch zwischen den beiden Gruppen stark, so dass die jeweiligen Arbeitspakete immer in einem Gesamtzusammenhang bearbeitet wurden.

¹ <https://doi.org/10.3030/101081775>

Tabelle 1. Struktur der Arbeitspakete und Zuständigkeiten

AP	Unter-AP	Inhalt	Prozessor
1		Atom-Interferometrie	SYRTE
	110	Atom-Interferometer-Konfigurationen	LUH/SYRTE
2		Theoretische und technische Aufarbeitung	LUH
	210	Theoretische Aufarbeitung	LUH
	220	Schaffung der technischen Voraussetzungen	LUH
3		Quantensensoren	SYRTE
	310	Externe Einflüsse auf den Quantensensor	LUH/SYRTE
4		Integration in den Prozess der Schwerefeldsimulation	LUH
	410	Integration in den Prozess der Schwerefeldsimulation mit der Software XHPS	LUH
5		Missionssimulation	LUH
	510	Simulation einer Satellitengravimetrie-Mission auf der Grundlage von AP2	LUH
6		Planung Sensorkonzept NGGM	LUH
	610	Sensor, der für eine Satellitengravimetrie-Mission geeignet ist	LUH

Personal:

Siehe Abschnitt 1.2.1

Vergabe von Aufträgen an Dritte:

Es wurden keine Aufträge an Dritte vergeben.

Reiseplanung:

Wir haben im Laufe des Projekts mehrere interne Projektbesprechungen abgehalten (online).

Darüber hinaus wurden das Projekt und die Zwischenergebnisse auf wissenschaftlichen Konferenzen vorgestellt EGU (2022, 2023, 2024), AGU (2023, 2024), IUGG (2023), GGHS (2022, 2024) und Zwischenergebnisse publiziert:

HosseiniArani, S. A., Tennstedt, B., Schilling, M., **Knabe, A.**, Beaufils, Q., **Romeshkani, M.**, Wu, H., Kupriyanov, A., **Pereira Dos Santos, F.**, Schön, S., & **Müller, J.** (2022). Improved Modeling for Hybrid Accelerometers Onboard Future Satellite Gravity Missions. Abstract von COSPAR, Athen, Griechenland.

HosseiniArani, S. A., Schilling, M., Beaufils, Q., **Knabe, A.**, Tennstedt, B., Schön, S., **Pereira Dos Santos, F.**, & **Müller, J.** (2023). Advances in cold atom interferometer accelerometry and their impact on the sensitivity of gravity missions. Abstract von 28th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG 2023, Berlin, Berlin, Deutschland. <https://doi.org/10.57757/IUGG23-0743>

Knabe, A., Schilling, M., HosseiniArani, S. A., **Romeshkani, M.**, **Müller, J.**, **Beaufils, Q.**, & **Pereira Dos Santos, F.** (2022). Benefit of Cold Atom Interferometry Accelerometers for Future Low-Low Satellite-to-Satellite Tracking and Gradiometry Missions. Gravity, Geoid and Height Systems 2022 Symposium.

Knabe, A., Schilling, M., HosseiniArani, A., **Romeshkani, M.**, **Müller, J.**, **Beaufils, Q.**, **Pereira dos Santos, F.** (2023) Cold atom interferometry accelerometry for future low-low satellite-to-satellite tracking and cross-track gradiometry satellite gravity missions, XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Berlin 2023).

Knabe, A., Schilling, M., **Romeshkani, M.**, HosseiniArani, A., Fletling, N., Kupriyanov, A., **Müller, J.**, **Beaufils, Q.**, **Pereira dos Santos, F.** (2024) Cold Atom Interferometry Accelerometers for Future Satellite Gravity Missions. EGU 2024, Vienna, Austria, Apr 14-19, 2024.

Knabe, A., Schilling, M., Romeshkani, M., Hosseiniarani, A., Fletling, N., Kupriyanov, A., Müller, J., Beaufils, Q., Pereira dos Santos, F. (2024) Cold Atom Interferometry Accelerometers for Future Satellite Gravity Missions. GGHS2024 Symposium Gravity, Geoid, and Height Systems 2024, Thessaloniki, Griechenland, September 4-6, 2024.

Kupriyanov, A., Reis, A., **Knabe, A., Fletling, N., Romeshkani, M., Hosseini-Arani, A., Schilling, M., Müller, V., Müller, J.,** (2024) Performance Estimation of Novel Accelerometers and Analysis of Satellite Formations for Future Gravimetry Missions. H0.5, 'Advanced Methods for Geodesy, Metrology, Navigation and Fundamental Physics' COSPAR 2024, 45th Scientific Assembly (13-21 July 2024, South Korea).

Kupriyanov, A., Reis, A., Schilling, M., **Knabe, A., Fletling, N., Hosseini-Arani, A., Romeshkani, M., Müller, V., Müller, J.,** (2023) Beyond MAGIC: Evaluierung neuartiger Sensoren und Satelliten-Formationsflüge für zukünftige Gravimetrie-Missionen. MAGIC Science and Applications Workshop 2023, 2.-3.11.2023, Assisi, Italien.

Romeshkani, M., Müller, J., Knabe, A., und Schilling, M und HosseiniArani, A. (2022) Quantum technology for future earth observation from space - gradiometry case. Gravity, Geoid and Height Systems 2022, September 12-14, Austin, Texas, United States.

Romeshkani, M., Müller, J., Knabe, A., Schilling, M., (2023) Benefit of Quantum technology for future earth observation from space-gradiometry case. EGU 2023, Wien. Österreich, Apr 23-28, 2023.

Romeshkani, M., Müller, J., Knabe, A., Schilling, M. (2023) The benefit of Quantum technology for future satellite gradiometry missions, XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Berlin 2023).

Romeshkani, M., Müller, J., Knabe, A., Kupriyanov, A., & Schilling, M. (2024). Quantum Gravimetry and Other Quantum-based Sensors for Terrestrial and Space Observations and Applications. Abstract von AGU Fall Meeting 2024, Washington D.C., USA / Vereinigte Staaten.

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Projekts

Die Bestimmung der Massenumverteilung auf kontinentaler oder globaler Ebene erfolgt in der Regel mit monatlicher Auflösung durch entsprechende Schwerefeldsatellitenmissionen. Missionen wie GRACE oder GRACE-FO messen seit mehr als zwei Jahrzehnten die Veränderung des Schwerefelds der Erde und ermöglichen die Quantifizierung von Massenvariationen etwa im Zusammenhang mit dem Klimawandel. Zu den wichtigsten Ergebnissen gehören beispielsweise das Ausmaß des Eismassenverlusts der großen Eisschilde und Gletscher, ihr Beitrag zum Meeresspiegelanstieg oder der Zustand der kontinentalen Grundwasserleiter (Tapley et al. 2019). Auf kurzen Zeitskalen von wenigen Tagen bis zu einem Tag ermöglichen diese Daten bei deutlich reduzierter räumlicher Auflösung eine Abschätzung der gesamten Wasserspeicherung in einer Region und damit Dürre- und Hochwasserfrühwarnungen (Jäggi et al. 2019).

Um die lückenlose Beobachtung der Erdmassenschwankungen auch in Zukunft zu gewährleisten, wurden Studien für verbesserte Missionskonzepte durchgeführt (z.B. Pail et al. 2019; Haagsmans et al. 2020). Ziel dieser Studien war immer auch die Verbesserung der räumlichen und zeitlichen Auflösung der Schwerefeldprodukte, wie sie von den Nutzern gefordert wird (Pail et al. 2015), und die Berücksichtigung aktueller Sensorentwicklungen. Mit der Einführung des Laser Ranging Interferometers (LRI) auf der GRACE-FO Mission konnte eine Verbesserung der Entfernungsmessung um mehrere Größenordnungen im Vergleich zur Mikrowellenentfernungsmessung realisiert werden (Abich et al. 2019). Dieser enorme Zuwachs an Genauigkeit bei der Entfernungsmessung kann jedoch nur zu einem kleinen Teil genutzt

werden. Denn der dominierende Faktor, der die Bestimmung des Schwerfeldes einschränkt, ist neben der Modellierung der hochfrequenten Massenvariationen ("Hintergrundmodellierung") die Messung der auf die Satelliten einwirkenden nicht-gravitativen Beschleunigungen mittels elektrostatischer Beschleunigungsmesser. Die aktuelle Entwicklung der Nachfolgeneration der GRACE-FO-Beschleunigungsmesser (Christophe et al. 2018) zeigt jedoch kaum eine Reduzierung der niederfrequenten Sensordrift, die sich als systematischer Effekt in den Schwerfeldlösungen niederschlägt. In Kombination mit weiteren Einschränkungen der elektrostatischen Beschleunigungsmesser wird auch die Bestimmung der niedrigen Schwerfeldkoeffizienten beeinträchtigt (Cheng und Ries 2017; Loomis et al. 2019).

Inertialsensoren auf der Basis von Atominterferometern (Abend et al. 2020) werden als ein Schritt zur Verbesserung der Messung von nicht-gravitativen Störbeschleunigungen auf Satelliten gesehen. Dies ist vor dem Hintergrund zu sehen, dass auch die anderen Sensoren auf den Satelliten weiterentwickelt werden und durch Satellitenkonstellationen (z.B. Bender-Konstellation) höhere Genauigkeiten erreicht werden, wobei Fehler durch die Hintergrundmodellierung weniger relevant sind, dafür aber Fehler durch die Beschleunigungssensoren umso mehr ins Gewicht fallen. Ein wesentlicher Vorteil ist die höhere Empfindlichkeit, die sich aus der Frequenzstabilität von Lasern ergibt.

Der Hauptgrund dafür ist die deutlich geringere Drift eines CAI-Beschleunigungsmessers im Vergleich zu elektrostatischen Beschleunigungsmessern. Eine der häufigsten Anwendungen von CAI ist im Bereich der terrestrischen Gravimetrie (Freier et al. 2016; Heine et al. 2020; Bidel et al. 2020). Der Einsatz einer CAI auf einem Satelliten ermöglicht aufgrund längerer Wechselwirkungszeiten eine potenziell höhere Empfindlichkeit gegenüber Beschleunigungen als bei terrestrischen Anwendungen. Allerdings ist die Anwendung von CAI in der Schwerelosigkeit derzeit auf einzelne Experimente auf der ISS oder auf Höhenforschungsraketen beschränkt (Becker et al. 2018; Aveline et al. 2020; Lachmann et al. 2021). Der Einsatz von CAI-Beschleunigungsmessern (CAI-ACC), einschließlich hybrider Varianten aus einer Kombination von CAI- und elektrostatischen Beschleunigungsmessern (E-ACC), und CAI-Gradiometern auf Schwerfeldsatellitenmissionen war Gegenstand einiger Studien (Douch et al. 2018; Abrykosov et al. 2019; Trimeche et al. 2019; Müller und Wu 2020), an denen wir zum Teil beteiligt waren. Diese Entwicklung spiegelt sich auch in den Plänen für zukünftige Erdbeobachtungsmissionen der Raumfahrtagenturen ESA (Haagmans et al. 2020) und NASA wider, die z. B. im Decadal Survey on Mass Change berücksichtigt werden. In den genannten Studien werden die simulierten Quantensensoren im Wesentlichen als "Black Box" mit bestimmten Eigenschaften, z.B. einem Fehlermodell, aber weitgehend unabhängig von einer tatsächlichen physikalischen Realisierung verwendet. Abrykosov et al. (2019) geht von der Modellannahme eines konstanten weißen Rauschens, von z.B. $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$, im gesamten Frequenzbereich für den CAI-ACC und dem Fehlermodell eines E-ACC nach Herstellerangaben aus. Die erwartete Verbesserung durch diesen Beschleunigungsmesser liegt im Frequenzbereich unter $3 \times 10^{-4} \text{ Hz}$, was eine erhebliche Verringerung der Drift bedeutet. Die in dieser Studie getroffenen Modellannahmen basieren auf den Ergebnissen eines terrestrischen Quantengravimeters (Freier et al. 2016) und der Annahme verschiedener Verbesserungen, z.B. durch längere Wechselwirkungszeiten in Satellitenanwendungen. Darüber hinaus berücksichtigen Studien zum Einsatz von Quantengravimetern zumindest den Einfluss der Lage- und Positionsbestimmung des Satelliten (Douch et al. 2018), da die Orientierung der Gradiometerachsen einen wesentlichen Einfluss auf das gemessene Gravitationsfeld hat. In einzelnen Studien werden zusätzlich weitere Komponenten des Quantengradiometers, wie das Lasersystem und der magnetische Schild, berücksichtigt (Trimeche et al. 2019; Caldani et al. 2019) und daraus Anforderungen an das Hardware-Design abgeleitet. In der Simulation für die Schwerfeldberechnung werden zunächst fehlerfreie Beobachtungen in den oben genannten Studien generiert und dann um die Fehlereinflüsse verschiedener Sensoren ergänzt. Für die Quanten/Hybrid-Beschleunigungsmesser und Quanten-Gradiometer werden Zeitreihen des Sensorrauschens auf Basis eines Fehlermodells verwendet. Eine Simulation des Sensorverhaltens unter realistischen Bedingungen auf dem Satelliten zur Erzeugung der Messungen fand nicht statt. Darüber hinaus gibt es allgemeine Ansätze zur Simulation von Atominterferometern in verschiedenen Geometrien (z.B. Fitzek et al. 2020), die nicht geeignet sind, einen spezifischen Sensor in seiner Umgebung abzubilden. Ein weiterer Mehrwert der Kombination von CAI-

ACC und E-ACC ist die Kalibrierung (Skalierungsfaktor und Bias) des elektrostatischen Sensors durch Messungen des CAI-ACC, zumindest auf den gemeinsamen Achsen. Für die Beschleunigungssensoren der GRACE-Mission wurde eine temperaturabhängige Variation der Kalibrierungsparameter gefunden (Klinger und Mayer-Gürr 2016). Die Beschleunigungsmesser-Messungen werden nun im Voraus mit Hilfe einer Modellierung der nicht-gravitativen Beschleunigungen kalibriert. Die endgültigen Parameter werden dann in der Schwerefeldberechnung geschätzt. Bei einem hybriden Beschleunigungsmesser wären In-situ-Messungen des CAI-ACC für die Kalibrierung verfügbar. Andere mögliche Ansätze beruhen auf einem Kalman-Filter. Die verbesserte Kalibrierung führt auch zu geringeren Anforderungen an die Drag-free-Kompensation (NGGM-D Team 2014).

Das hier beantragte Projekt ist eingebettet in die QUANTA-Aktivitäten zwischen französischen Partnern unter der Leitung von CNES und deutschen Partnern unter der Leitung des DLR. Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Simulators zur Modellierung von Beschleunigungsmesser-/Gradiometer-Messungen unter Berücksichtigung der Umweltbedingungen auf dem Satelliten. Dieser Quantensensor-Simulator soll die physikalischen Eigenschaften des Sensors modellieren, z.B. Geometrie, Lasereigenschaften, atomare Quelle. Auch die Wechselwirkungen mit anderen Satellitensystemen werden berücksichtigt. Der Quantensensor-Simulator wird in den Simulationsprozess der Schwerefeldsatellitenmission integriert. Dazu werden Schnittstellen zum Quantensensor-Simulator in den bestehenden Programmen der Schwerefeldsimulation geschaffen und Modellerweiterungen vorgenommen, um die notwendigen Parameter für die Beschreibung der Satellitenumgebung bereitzustellen.

Frühere Tätigkeiten des Antragstellers

Die Arbeitsgruppe von Professor Müller am Institut für Erdmessung verfügt über langjährige Erfahrung in der Erforschung von geodätischen Satellitenmissionen. Die ESA-Mission GOCE war bereits Gegenstand seiner Habilitation (Müller 2001). In der Folge wurden verschiedene Elemente zur Fehlerabschätzung der GOCE-Mission (Brieden et al. 2011; Brieden und Müller 2014; Wu et al. 2015) und Konzepte zukünftiger Missionen mit unterschiedlicher Instrumentierung und Bauweise untersucht (Elsaka et al. 2014; NGGM-D Team 2014; Pail et al. 2019). Die Weiterverarbeitung von GRACE-Daten zur Untersuchung von Massenschwankungen auf der Erde war auch Gegenstand der Forschung auf IFE (Steffen et al. 2009; Müller et al. 2012; Vey et al. 2013; Shabanloui und Müller 2015). Gemeinsame Arbeiten mit Physikern zur Nutzung der Atominterferometrie für die terrestrische Gravimetrie liefern wichtige Erkenntnisse über das Fehlverhalten von Quantensensoren (Freier et al. 2016; Heine et al. 2020; Schilling et al. 2020). Hinsichtlich des Einsatzes von Quantengradiometern in Satellitenmissionen wurden in Zusammenarbeit mit französischen Kollegen bereits grundlegende Studien durchgeführt (Douch et al. 2018; Trimeche et al. 2019; Müller und Wu 2020). Ein Teil dieser Forschung befasste sich mit der Nutzbarkeit von Netzwerken optischer Uhren auf der Erde und im Weltraum für verschiedene geodätische Anwendungen (Müller et al. 2018; Wu et al. 2019). Ein Teil dieser Arbeiten, speziell für terrestrische Anwendungen der Quantenoptik, wird im SFB 1464 "TerraQ - Relativistische und quantenbasierte Geodäsie" vorangetrieben; der SFB ist im Januar 2021 gestartet, Jürgen Müller ist Sprecher des SFB. In der Weltraumgeodäsie sind auch die umfangreichen Forschungsarbeiten der Arbeitsgruppe IFE zur Auswertung von Lasermessungen zum Mond zu nennen (Müller et al. 2019; Biskupek et al. 2021).

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen

Innerhalb des Projektteams gab es für alle oben genannten Arbeitspakete eine enge Zusammenarbeit zwischen den jeweiligen Beteiligten. Eine weitere Zusammenarbeit mit Institutionen außerhalb des Projektteams war nicht ausdrücklich vorgesehen, erfolgte jedoch mit den Teams von CARIOQA (EU) und QUANTGRAV (DLR).

2. Projektbericht

Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete werden im Folgenden zusammengefasst und am Ende in einen gemeinsamen Kontext gestellt. Die Struktur der folgenden Abschnitte folgt dem Arbeitsplan: Der erste Teil (AP 1) konzentriert sich auf die Beschreibung und Definition der verwendeten Quantensensoren. Im zweiten Arbeitspaket (AP 2) wird der Stand der Technik der Schwerefeldsimulation und -berechnung aus anderen Studien zusammengetragen und kritisch bewertet und darüber hinaus die technischen Anforderungen an die Orbitsimulation für erweiterte Anwendungen eines Atominterferometers auf einem Satelliten ermittelt. Im dritten Arbeitspaket (AP 3) werden die äußeren Einflüsse auf den Quantensensor betrachtet und ihr Beitrag zur Messgenauigkeit untersucht. Das vierte Arbeitspaket (AP 4) befasst sich mit der Integration von Quantensensoren in den Schwerefeldbestimmungsprozess. Im fünften Arbeitspaket (AP 5) werden auf der Grundlage von Missionssimulationen und aufbauend auf AP 2 verschiedene Quantensensor-Designs für die Bestimmung des statischen und zeitlich veränderlichen Schwerefeldes untersucht. AP 6 befasst sich mit der Planung des Sensorkonzepts für NGGM.

2.1. Atominterferometerkonfigurationen (AP 1) [LUH/SYRTE]

In diesem AP wurden zunächst verschiedene Atominterferometerkonfigurationen, z.B. einzelne Beschleunigungssensoren, die Kombination mehrerer Beschleunigungssensoren und Gradiometer, bewertet und auf ihre Modellfähigkeit (numerisch oder analytisch) hin untersucht. Darauf aufbauend wurde ein Modell des Atominterferometers entwickelt, anhand dessen einzelne Komponenten, z.B. Atomquelle, Lasersystem, Detektion der Phasenverschiebung, hinsichtlich ihres Beitrags zur Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems bewertet werden konnten. Zu diesem Zweck wurden die physikalischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten untersucht, z.B. Laserwellenfront, Stabilität der optischen Komponenten und deren Ausrichtung. Die systematischen instrumentellen Fehler und die Empfindlichkeit des Sensors wurden aus diesen Untersuchungen abgeschätzt. In dieser Studie haben wir den von der LUH entwickelten Simulator verwendet.

2.2. Theoretische und technische Aufarbeitung (AP 2) [LUH]

Parallel zur Entwicklung des Quantensensor-Simulators von SYRTE hat das LUH-Team (i) den Stand der Technik bei der Schwerefeldsimulation und -berechnung aus verschiedenen Studien zusammengetragen und kritisch bewertet und (ii) die technischen Anforderungen für die Bahnsimulation festgelegt, um erweiterte Anwendungen eines Atominterferometers auf einem Satelliten, wie Kalibrierung und Widerstandsausgleich, zu unterstützen.

2.2.1. Theoretische Aufarbeitung (AP 210) [LUH]

In diesem AP wurden die Voraussetzungen geschaffen, um durch gezielte Simulationen die Vorzüge von CAI bei der Erfassung des Erdschwerefeldes und dessen Variation zu bewerten. Der Fokus lag dabei auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Auflösungen sowie den daraus resultierenden Größenordnungen der nachweisbaren Massenvariationen, z.B. in der Hydrologie, und den Anwendungszwecken, z.B. der Gefahrenabwehr bei Hochwasserereignissen. Es wurden grundsätzliche Überlegungen zur Gestaltung von Missionsszenarien im Hinblick auf die Verbesserung der räumlichen und zeitlichen Auflösung angestellt und dazu Zielgrößen entwickelt. Die notwendigen Anforderungen an die Satellitensensorik über die CAI-Einzelgeometrie hinaus sowie der begrenzende Einfluss der Hintergrundmodellierung, wie z.B. hochfrequente Massenänderungen in Atmosphäre und Ozean, wurden abgeschätzt.

Das Flussdiagramm (Abb. 1) zeigt das Simulationskonzept für die Berechnung des Erdschwerefeldes aus simulierten Messungen.

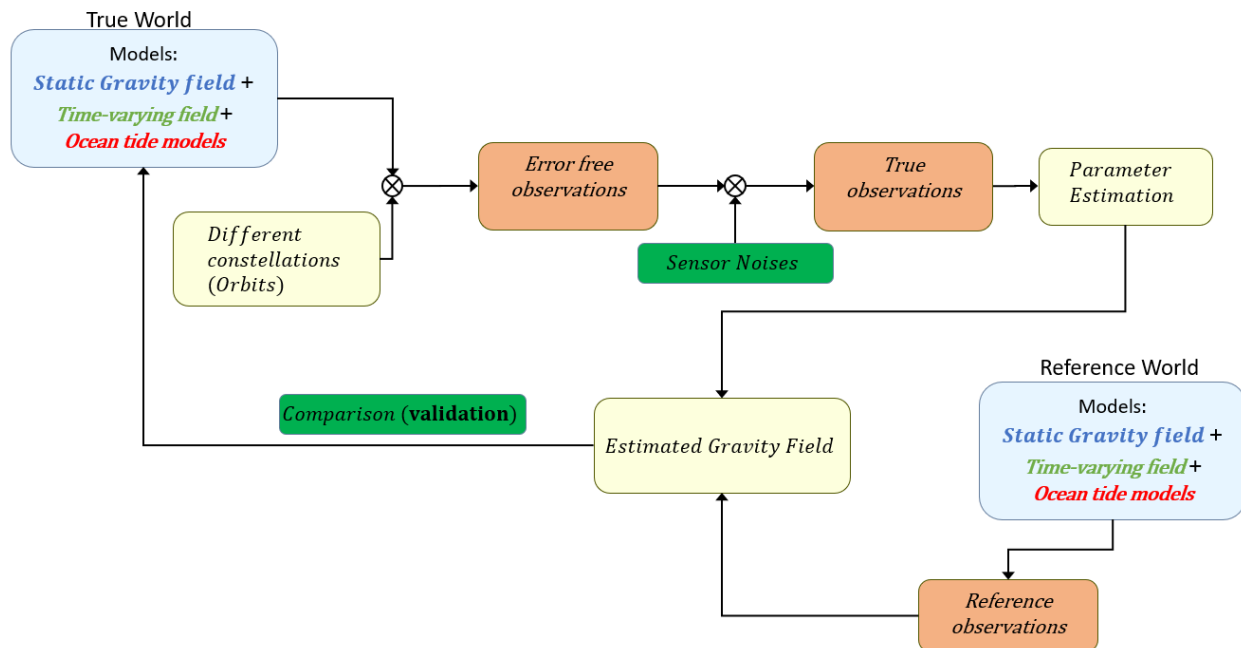


Abbildung 1. Allgemeines Flussdiagramm für die Schwerefeldbestimmung aus simulierten Messungen.

Der Mehrwert der Quantensensorik für Schwerefeldmissionen wurde durch numerische Closed-Loop-Simulationen bewertet. Im Gegensatz zur realen Datenverarbeitung bieten diese Simulationen, die in einer vollständig synthetischen Umgebung durchgeführt werden, den Vorteil eines genau bekannten "wahren" Signals. Dies ermöglicht es, die Auswirkungen von Annahmen über das Instrumentenrauschen oder Verarbeitungsstrategien direkt als Abweichungen vom "wahren" Signal zu erkennen. Folglich können diese Auswirkungen unabhängig von anderen Fehlerquellen, die zum Gesamtfehlerbudget beitragen, analysiert werden.

Abb. 2 gibt einen Überblick über die Struktur der numerischen Simulation für eine Low-Low Satellite-to-Satellite-Tracking (LL-SST) Mission. Die Simulation beginnt mit der Definition der "wahren Welt", wobei Kraftmodelle für das statische Schwerefeld sowie zeitliche Variationen durch Gezeiten- und Nicht-Gezeitenkräfte einbezogen werden. Für diese zeitlichen Variationen wurden globale geophysikalische Modelle der Landhydrologie, des Eises, der festen Erde, des Ozeans und der Atmosphäre verwendet (Dobslaw et al., 2015). Alle Schwerefeldmodelle wurden als Koeffizienten einer sphärischen harmonischen (SH) Reihenentwicklung parametrisiert.

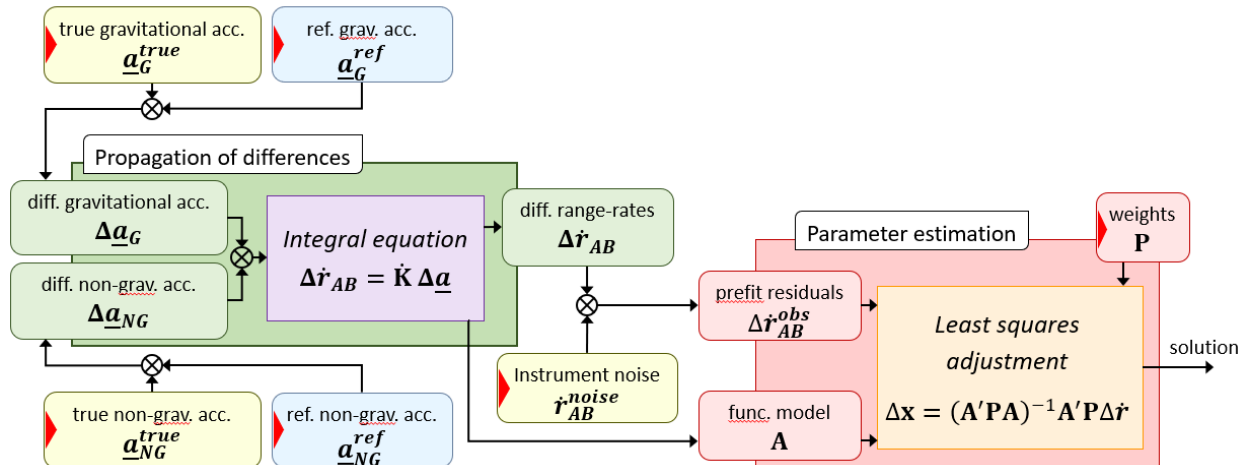


Abbildung 2. Detailliertes Flussdiagramm der Schwerefeldbestimmung für den LL-SST-Fall.

Außerdem wurden bestimmte Bahnkonstellationen und entsprechende Orbitparameter definiert. In diesem Schritt lag der Schwerpunkt vor allem auf einzelnen Paaren auf der gleichen Orbithöhe. Auf der Grundlage der a priori Kraftmodelle wurden fehlerfreie Beobachtungen entlang der Umlaufbahnen berechnet. Diese Beobachtungen bestehen aus Abständen oder Abstandsänderungen zwischen den beiden Satelliten eines Paares. Diese Beobachtungen wurden mit Instrumentenfehlern kombiniert, die durch spezifische spektrale Rauscheigenschaften gekennzeichnet sind. Zu diesem Zweck wurden die Fehlermodelle für Quanten- und Hybridbeschleunigungsmesser berücksichtigt. Dieses Verfahren führt zu "echten Beobachtungen", die reale Beobachtungen so genau wie möglich nachahmen sollen. Die Fehlerspezifikationen für die Inter-Satelliten-Entfernungsmessungen basieren auf empirisch abgeleiteten Genauigkeiten aus GRACE Follow-On Laserinterferometriedaten (Kornfeld et al., 2019).

Zweitens wurde eine Referenzwelt konstruiert. Dieser Schritt war notwendig, da das funktionale Modell für die Schätzung des Schwerefeldes aus Beobachtungen der Abstände zwischen Satelliten hochgradig nichtlinear ist und einen Taylor-Punkt als ungefähres Vorwissen erfordert. Ähnlich wie die "wahren Beobachtungen" wurden auch die "Referenzbeobachtungen" unter Verwendung von Kraftmodellen berechnet, die sich im Allgemeinen von denen unterscheiden, die im Szenario der "wahren Welt" verwendet werden. Die differentiellen Abstände zwischen den Satelliten wurden dann als Beobachtungen im Rahmen einer Kleinste-Quadrate-Ausgleichung verarbeitet, was die Schätzung der Koeffizienten der sphärischen Harmonischen (SH) des statischen und/oder zeitlich veränderlichen Schwerefeldes ermöglichte. Die angenommenen Instrumentenfehler wurden als Gewichtungsfaktor in die Ausgleichung einbezogen (stochastisches Modell).

Das Hauptziel besteht darin, die Abweichungen der geschätzten SH-Koeffizienten von diesen A-priori-Modellen zu analysieren. Im Idealfall sollte die Addition der Residuen zu den A-priori-Modellen die Modelle der "wahren Welt" reproduzieren, wenn man davon ausgeht, dass keine Fehler im System vorliegen. Wenn jedoch Fehler vorhanden sind, z. B. Instrumentenfehler oder Aliasing-Fehler aufgrund der spezifischen Raum-Zeit-Abtastcharakteristik der gewählten Orbitkonstellation, weicht das geschätzte Schwerefeld von der "wahren Welt" ab. Diese Abweichung zeigt die erreichbare Leistung des spezifischen Missionsszenarios an.

In dieser Simulationswelt war es möglich, beliebige Fehlerquellen ein- und auszuschalten, was die Quantifizierung des Einflusses verschiedener Beschleunigungssensoren (elektrostatisch als Referenz, Quantensensoren, Hybrid) auf das Gesamtfehlerbudget ermöglichte. Der Vergleich der Ergebnisse mit der elektrostatischen Referenzlösung verdeutlicht den Mehrwert der neuen Sensortechnologie.

2.2.2. Schaffung von technischen Voraussetzungen (AP 220) [LUH]

Ein Schwachpunkt aktueller elektrostatischer Beschleunigungssensoren ist die Kalibrierung des Sensors (Skalierungsfaktor und Bias); diese Größen sind zeitlich nicht stabil und müssen geschätzt werden. In diesem Arbeitspaket wurden die Voraussetzungen für die Kalibrierung eines klassischen elektrostatischen Beschleunigungssensors durch Kombination mit einem Quantenbeschleunigungssensor untersucht, wobei die Messungen des Quantensensors als Referenz für die Kalibrierung des elektrostatischen Beschleunigungssensors dienen. Die dafür notwendigen Grundlagen wurden ebenfalls erarbeitet. Dazu wurde zunächst der elektrostatische Beschleunigungsmesser als Sensor in die Orbit-Simulation eingefügt, um ihn mit dem Quantensensor-Simulator zu kombinieren. Außerdem werden Szenarien zur Drag-Kompensation mit einer Ionenantriebseinheit als Aktuator untersucht und als Modul in den Orbit-Simulator integriert. Damit wurde das Spektrum der möglichen Missionsszenarien in AP 5 auf Satelliten in niedrigeren Umlaufbahnen erweitert.

2.2.2.1. Hybrid-Beschleunigungsmesser (Kombination aus elektrostatischem Beschleunigungsmesser und CAI-Beschleunigungsmesser)

Die Kombination eines elektrostatischen Beschleunigungssensors (E-ACC) mit einem Beschleunigungssensor, der Cold Atom Interferometry (CAI) anwendet, ist vorteilhaft, da die Stärken des einen Sensors die Schwächen des anderen ausgleichen können. Der CAI-Beschleunigungsmesser bietet eine ausgezeichnete Langzeitstabilität und erfordert dank seines bekannten Skalierungsfaktors aufgrund der absoluten Natur seiner Messungen keine Kalibrierung. Seine größte Einschränkung ist jedoch die niedrige Abtastrate. Das E-ACC hingegen liefert eine kontinuierliche Messung und weist eine hohe Empfindlichkeit bei höheren Frequenzen auf, ist jedoch anfällig für Ungenauigkeiten aufgrund von Bias-Drift und einer unvollkommenen Bestimmung der Kalibrierungsparameter.

Für eine optimale Hybridisierung sollten sich die beiden Beschleunigungsmesser idealerweise am selben Punkt des Satellitenkörpers befinden, d. h. im Massenmittelpunkt des Satelliten, um die nicht-gravitativen Beschleunigungen zu messen. Ein Ansatz für ein hybrides System ist das Anbringen eines Spiegels für Raman-Übergänge an der Prüfmasse des E-ACC, wie von Carraz et al. (2014) vorgeschlagen. Der von Christophe et al. (2018) beschriebene Bodenprototyp verfügt über einen Spiegel, der starr am Beschleunigungsmessergehäuse befestigt ist. Die Kontrolle der Prüfmasse des E-ACC könnte dazu beitragen, die Rotation des Satelliten während der Zeit des freien Falls der Atomwolke zu steuern. Lautier et al. (2014) stellten auch eine Kombination aus einem Atomgravimeter und einem mechanischen Beschleunigungsmesser vor (Zahzam et al., 2022).

Zusätzlich zur physikalischen Kombination müssen die Messungen der beiden Sensoren mit einem geeigneten Algorithmus kombiniert werden. Für die Echtzeitverarbeitung ist ein Kalman-Filter besonders nützlich. In dieser Studie wird das Kalman-Filter nach HosseiniArani et al. (2022 und 2024) verwendet. Dabei wird der Bias des E-ACC mithilfe der CAI-Beschleunigungsmessung geschätzt. Umgekehrt wird die Messung des E-ACC zur Bestimmung des Fringe-Indexes des CAI verwendet. Die elektrostatischen Beschleunigungsmessungen werden zur Vorhersage der Phasenverschiebung verwendet und helfen, die Mehrdeutigkeit der CAI-Messungen aufzulösen. Die CAI-Messungen werden dann als tatsächliche Messung zur Schätzung des Bias des E-ACC verwendet. Ein anderer Ansatz besteht darin, einen Hochpassfilter auf die elektrostatischen Messungen und einen Tiefpassfilter auf die CAI-Messungen anzuwenden und dann die gefilterten Messungen zu kombinieren (Romeskhani et al., 2023).

2.2.2.2. Drag-Kompensation

Drag-Kompensationssysteme bzw. Drag-Free-Systeme spielen bei Satellitenmissionen eine doppelte Rolle: Sie erleichtern die Aufrechterhaltung der Umlaufbahn und verhindern die Sättigung der Beschleunigungsmesser. Darüber hinaus können Drag-Kompensationssysteme potenziell die Fehlerbeiträge reduzieren, die durch Unzulänglichkeiten der Beschleunigungsmesser entstehen, ein Faktor, der im Zusammenhang mit II-SST- und Gradiometrie-Missionen bewertet wird, siehe Knabe (2023). Es ist jedoch zu beachten, dass der Treibstoffverbrauch für den Ausgleich des atmosphärischen Widerstands die Lebensdauer der Mission einschränken kann, ein Thema, das ebenfalls kurz diskutiert wird.

Der folgende Abschnitt wurde teilweise in Knabe (2023) publiziert und diskutiert die Anforderungen die Drag-Kompensation bei Berücksichtigung des Beschleunigungsmesserskalierungsfaktors. Die Drag-Kompensation bei II-SST-Missionen wird durch die Genauigkeit des Skalierungsfaktors des Beschleunigungsmessers und dessen Rauschlevel beeinflusst. In einem vereinfachten Szenario setzt sich die gemessene Beschleunigung a_{meas} aus der wahren Beschleunigung a_{true} , dem Skalierungsfaktor s_{true} und dem Rauschen des Beschleunigungsmessers n_{acc} zusammen:

$$a_{meas} = s_{true} a_{true} + n_{acc}. \quad (2)$$

Der Skalierungsfaktor wird mit Hilfe eines Kalibrierungsverfahrens geschätzt, und die Messung wird dann anhand des geschätzten Skalierungsfaktors s_{est} korrigiert. Ziel ist es, sicherzustellen, dass der Fehler, der sich aus der unvollkommenen Bestimmung des Skalierungsfaktors ergibt, geringer ist als das Rauschen des Beschleunigungsmessers (Knabe, 2023). Die ASD der erforderlichen Drag-Kompensation wird dann nach Gruber et al. (2014) mit der folgenden Formel geschätzt:

$$ASD(f) < \frac{1}{2} \frac{ASD_{n_{acc,x}}(f)}{s_{know}}. \quad (3)$$

Dabei steht $\frac{1}{2}$ für den Toleranzfaktor, s_{know} für den Skalierungsfaktor und $ASD_{n_{acc,x}}$ für die ASD des Beschleunigungsmesserrauschens für die x-Achse. Für bisherige Missionen wird der Skalierungsfaktor mit einer Genauigkeit von 1 % geschätzt. Für künftige Schwerefeldmissionen wird erwartet, dass dieses Wissen wesentlich präziser sein wird. In Gruber et al. (2014) wird für s_{know} ein Wert von 0,2 % angenommen. In Abrykosov et al. (2019) wird eine Genauigkeit von 10^{-5} für einen hybriden Beschleunigungsmesser angenommen, bei dem der klassische Beschleunigungsmesser mit CAI-Messungen kalibriert wird. Der Skalierungsfaktor des CAI ist außerordentlich gut bekannt, mit einer Unsicherheit von 10^{-9} oder sogar besser. Es wird erwartet, dass durch die Kalibrierung des E-ACC mit Hilfe von CAI-Messungen auch für den elektrostatischen Beschleunigungsmesser eine Genauigkeit des Skalierungsfaktors von 10^{-9} erreicht werden kann (Knabe 2023).

Die Anforderung an das maximal zulässige Beschleunigungssignal hängt vom Rauschen des Beschleunigungsmessers ab, da die Verschlechterung aufgrund der Unsicherheit des Skalierungsfaktors geringer sein muss als das Rauschlevel, siehe Abbildung 3.

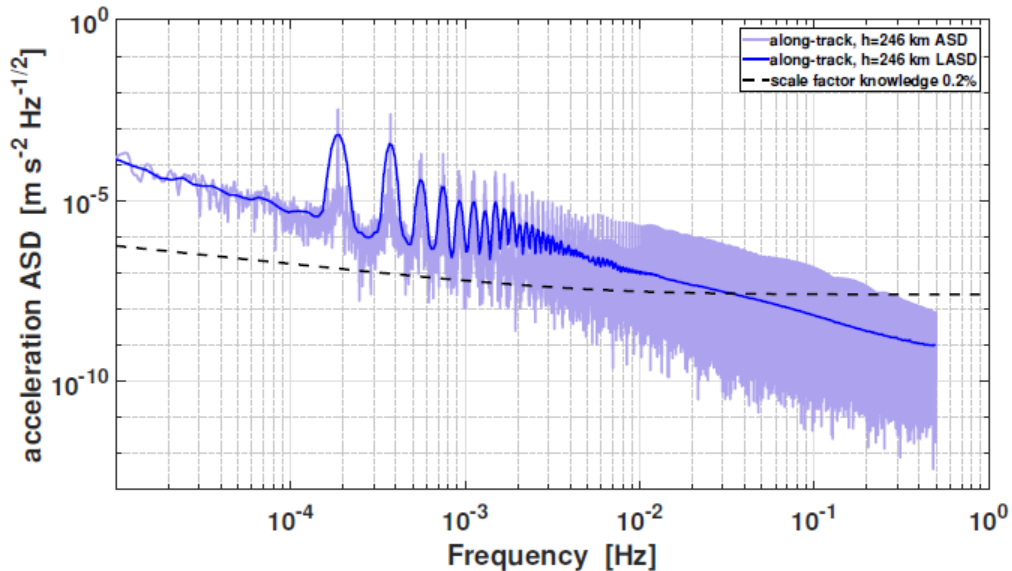


Abbildung 3. LASD und ASD des nicht-gravitativen Beschleunigungssignals in Flugrichtung für eine Bahnhöhe von 246 km (blaue Linien) und die Anforderung auf der Grundlage eines Skalierungsfaktors von 0,2 % (gestrichelte Linie) (Knabe 2023).

Die ASD wird mit zwei verschiedenen Methoden geschätzt: Die Welch-Methode und eine modifizierte Version dieser Methode. Die Ergebnisse der Welch-Methode werden als ASD bezeichnet, während die Ergebnisse der modifizierten logarithmischen Welch-Methode als LASD abgekürzt werden. In den Diagrammen stellen die blauen Kurven die ASD und LASD des durch nicht-gravitativ verursachten Beschleunigungssignals dar. Die gepunktete Linie gibt das maximal zulässige Beschleunigungssignal an. Da die blaue Kurve oberhalb der gestrichelten Linie liegt, ist die Anforderung nicht erfüllt.

In den Abbildungen dieses Abschnitts werden die empfindlichen Achsen des GRACE-Beschleunigungsmessers für die Berechnung der Anforderungen ausgewählt. Abbildung 4 zeigt die ASD des nicht-gravitativen Beschleunigungssignals in der Flugrichtung in den Orbithöhen von 246 km, 303 km, 363 km und 462 km. Abbildung 5 zeigt die Komponente quer zur Bewegungsrichtung, während Abbildung 6 die radiale Komponente darstellt. Die Ergebnisse berücksichtigen zwei verschiedene Zeitepochen, die das Maximum und das Minimum eines Sonnenzyklus und damit das Maximum und das Minimum des nicht-gravitativen Beschleunigungssignals darstellen.

Damit die Anforderung erfüllt ist, muss die ASD oder LASD des nicht-gravitativen Beschleunigungssignals (farbige Linien) unter die Anforderung (gestrichelte Linien) fallen. In der Bewegungsrichtung ist das Beschleunigungssignal aufgrund des atmosphärischen Widerstands am stärksten. Keine der beiden Annahmen für die Kenntnis des Skalierungsfaktors einer E-ACC ist erfüllt. Dies gilt für alle Umlaufbahnszenarien in verschiedenen Höhen und über den gesamten relevanten Frequenzbereich. Folglich wird der Skalierungsfaktor nicht mit ausreichender Genauigkeit geschätzt, wenn man sich ausschließlich auf ein E-ACC für Messungen entlang der Bahn verlässt. Der ungenau ermittelte Skalierungsfaktor verschlechtert die E-ACC-Messungen bis zu dem Punkt, an dem der Fehler stärker ins Gewicht fällt als das Beschleunigungsmesserrauschen. Um diese Verschlechterung zu verhindern, muss entweder die Genauigkeit der Schätzung des Skalierungsfaktors verbessert oder die Größe des nicht-gravitativen Signals reduziert werden.

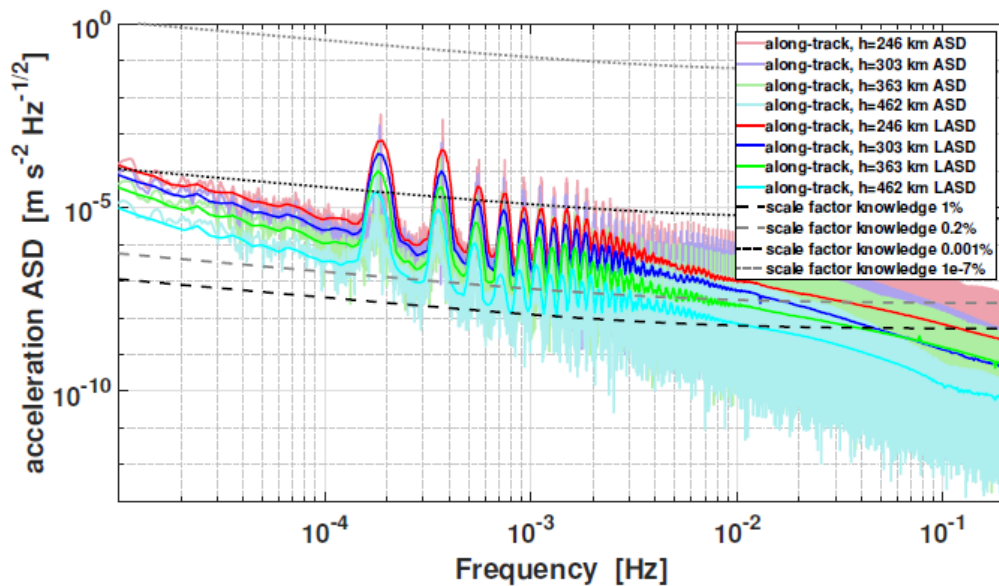


Abbildung 4. LASD und ASD des nicht-gravitativen Beschleunigungssignals in Bewegungsrichtung für verschiedene Höhen (farbige Linien) und die Anforderung bei unterschiedlichen Annahmen für die Kenntnis des Skalierungsfaktors (gepunktete Linien), für Juli 2000, der ein Maximum des Sonnenzyklus darstellt (Knabe 2023).

Die Komponente quer zu Bewegungsrichtung führt zu den gleichen Schlussfolgerungen wie die Komponente in Bewegungsrichtung. Trotz des insgesamt geringeren Signals in allen Höhenszenarien ist die Kenntnis eines Skalierungsfaktors von 1 % und 0,2 % nicht ausreichend.

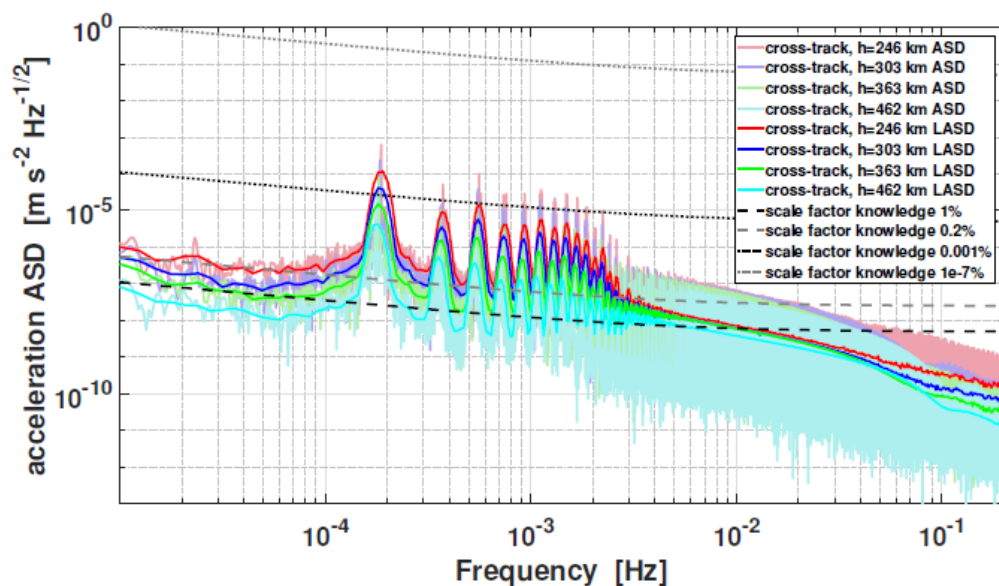


Abbildung 5. LASD und ASD des nicht-gravitativen Beschleunigungssignals in Querrichtung für verschiedene Höhen (farbige Linien) und die Anforderung mit verschiedenen Annahmen für den Skalierungsfaktor (gepunktete Linien), für Juli 2000, der ein Sonnenzyklusmaximum darstellt (Knabe 2023).

Die radiale Komponente weist eine noch geringere ASD der nicht-gravitativen Beschleunigungen auf. Außerdem ähneln sich die ASD-Kurven in den vier Höhen im Vergleich zu den Kurven der anderen beiden Richtungen stärker. Dies liegt daran, dass der atmosphärische Widerstand, der mit zunehmender Höhe abnimmt, in erster Linie die Richtungen entlang der Bahn und quer zur Bahn beeinflusst. Trotzdem bleibt die Schätzung des Skalierungsfaktors für ein E-ACC unzureichend genau. Diese Schlussfolgerungen gelten für beide Szenarien unterschiedlicher Sonnenaktivität (Knabe 2023).

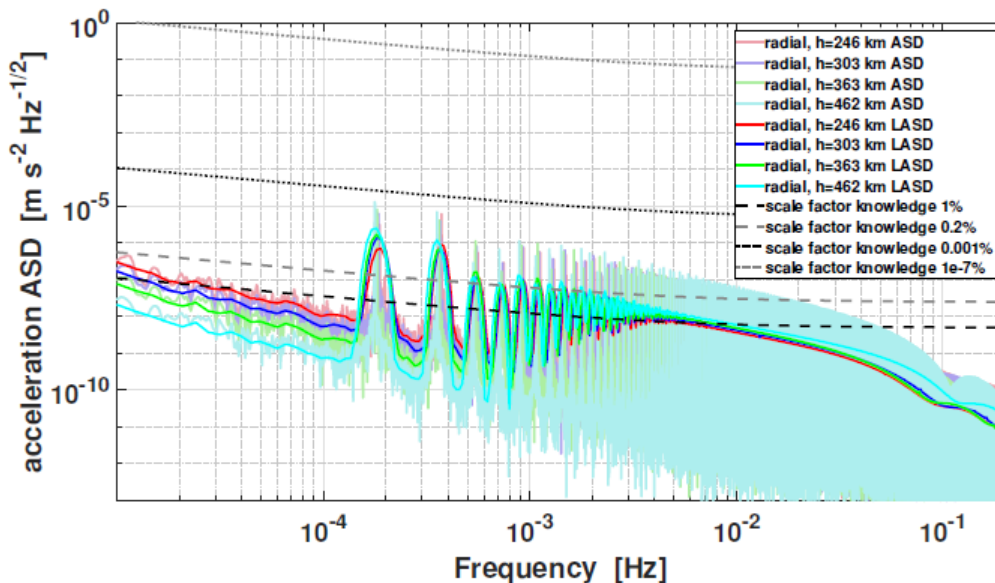


Abbildung 6. ASD des nicht-gravitativen Beschleunigungssignals in radialer Richtung für verschiedene Höhen (farbige Linien) und die Anforderung mit verschiedenen Annahmen für die Kenntnis des Skalierungsfaktors (gepunktete Linien), Juli 2000 als Maximum des Sonnenzyklus (Knabe 2023).

Die Anforderung wird für alle Orbithöhen und Richtungen erfüllt, wenn ein Skalierungsfaktor von 1×10^{-9} angenommen wird, was für einen CAI-Beschleunigungsmesser zutrifft. In Bewegungsrichtung liegt die Anforderungskurve fast drei Größenordnungen über den höchsten Peaks des Beschleunigungssignals, quer zur Bewegungsrichtung sind es vier Größenordnungen und in radialer Richtung sogar fünf. Dies zeigt, dass eine Verschlechterung aufgrund des Skalierungsfaktors bei CAI-Messungen nicht auftritt.

2.3. Externe Effekte auf den Quantensensor (AP 3) [SYRTE/LUH]²

Externe Einflüsse auf den Quantensensor werden berücksichtigt und ihr Beitrag zur Messgenauigkeit untersucht. Dazu gehören z.B. die Bestimmung und Kontrolle der Lage und die auf den Satelliten wirkenden nicht-gravitativen Kräfte als Faktoren. Daraus ergeben sich unter anderem Anforderungen an die Kompensation von Rotationen, der Entwurf eines entsprechenden Kompensationssystems und eine Abschätzung der Auswirkung von nicht kompensierten Rotationen auf die Messung. Darüber hinaus wird im Folgenden der Bedarf an weiteren Sensoren, z.B. Beschleunigungssensoren in einer hybriden Kombination zur Erweiterung des Dynamikbereichs des Quantensensors oder Gyroskope zur genaueren Messung der Drehrate, untersucht. Die Ergebnisse werden in einem Quantensensor-Simulator zusammengefasst, der Quantensensor-Beobachtungen für einen gegebenen Satellitenorbit unter Berücksichtigung der Satellitenumgebung synthetisieren kann. Zunächst wird eine Einführung in den an

² Input von SYRTE, Durchführung von LUH

der LUH verwendeten Orbit-Simulator gegeben. Mit dem Orbit-Simulator können Parameter der Satellitenumgebung, z.B. Rotationen und nicht-gravitativ Beschleunigungen, berechnet werden. In den folgenden Arbeitspaketen werden Teile des Quantensensor-Simulators in den Orbit-Simulator integriert und der Orbit-Simulator vom LUH um weitere Umgebungsparameter erweitert.

Die Arbeitspakete 2 sowie 4 bis 6 wurden hauptsächlich an der LUH durchgeführt, und zwar die Vorbereitung (AP 2), die Integration des Quantensensor-Simulators in bestehende Prozesse der Schwerefeldberechnung (AP 4), die Missionssimulation zur Evaluierung von Quantensensoren und Satellitensubsystemen (AP 5) und die Rückkopplung zwischen Sensorentwicklung in der Physik und Anwendungen in der Geodäsie (AP 6).

2.3.1. CAI-Beschleunigungsmesser-Signalmodell

Die primäre Quelle des vom CAI-Beschleunigungsmesser erfassten Signals sind die nicht-gravitativen Beschleunigungen. Die Phasenverschiebung, die durch ein konstantes Beschleunigungssignal verursacht wird, kann wie folgt beschrieben werden (Beaufils et al., 2023):

$$\Delta\varphi = (2 k_{eff} a) T^2 + \varphi_L. \quad (4)$$

Da jedoch die nicht-gravitativen Beschleunigungen während der CAI-Abfragezeit variieren, wenden wir die integrierte Form von Gleichung (4) an, die die Übertragungsfunktion, wie in Knabe et al. (2022) beschrieben, enthält. Die Phase des Interferometers φ_k im k -ten Zyklus ist gegeben durch

$$\varphi_k = 2 k_{eff} \int_{k T_c}^{(k+1) T_c} g_{a,k} a(t) dt, \quad (5)$$

wobei $g_{a,k}$ die Empfindlichkeit des Instruments ist. Sie ist in der Mitte der Interrogationszeit am höchsten und zu Beginn und am Ende des Interferometerzyklus am niedrigsten.

2.3.1.1. Modellierung der Rotationseffekte

Neben der Phasenverschiebung, die durch das nicht-gravitativ Signal verursacht wird, berücksichtigen wir auch Rotationsbeiträge zur Interferometerphase. Diese ergeben sich aus der Rotation des Satelliten um seine Querachse mit einer Rate von etwa 1,1 mrad/s, um eine Nadir-Ausrichtung beizubehalten. Diese Rotation erzeugt zusätzliche Phasenverschiebungen, die von der Position des CAI-Beschleunigungsmessers im Satelliten und der Ausrichtung seiner Empfindlichkeitsachse beeinflusst werden.

Der größte Beitrag dieser Rotation zur Phasenverschiebung im Atominterferometer stammt von der Coriolis-Beschleunigung, die durch die Geschwindigkeit der Atome in radialer Richtung hervorgerufen wird, wie von Lévêque et al. (2021) beschrieben. Darüber hinaus sind auch Euler- und Zentrifugalbeiträge zu berücksichtigen. Da die Instrumente im hybriden Fall (CAI + E-ACC) nicht gemeinsam positioniert werden können, erfordert die Positionierung des E-ACC im Massenschwerpunkt des Satelliten eine Verschiebung der Atome aus dem Massenschwerpunkt, was zu einem Gravitationsgradienten und einer Anziehungskraft der Satellitenmasse auf die Atome führt.

Die Platzierung des CAI-Beschleunigungssensors im Satelliten hat erhebliche Auswirkungen auf die erreichbare Sensitivität. In dieser Studie wird davon ausgegangen, dass sich der E-ACC im Massenmittelpunkt des Satelliten befindet, während der CAI-Beschleunigungsmesser versetzt ist. Der CAI-Beschleunigungsmesser wird in drei möglichen Positionen betrachtet: vor dem E-ACC entlang der Achse in Bewegungsrichtung, über dem E-ACC entlang der Radialachse oder neben dem E-ACC entlang der Querachse des Satelliten.

In einer Konfiguration, in der der CAI-Beschleunigungsmesser auf der Längsachse des Satelliten mit einer Verschiebung zum Massenmittelpunkt platziert ist, wirken die Zentrifugal- und Coriolis-Beschleunigungen entlang der Empfindlichkeitsachse des CAI-Beschleunigungsmessers, während die Euler-Beschleunigung senkrecht dazu ist und daher nicht im CAI-Beschleunigungsmesser wirkt. In einer Konfiguration, bei der der CAI-Beschleunigungsmesser auf der Radialachse des Satelliten mit einer Verschiebung vom Massenschwerpunkt angebracht ist, wirken sowohl die Coriolis- als auch die Euler-Beschleunigung entlang der Empfindlichkeitsachse des CAI-Beschleunigungsmessers, während die Zentrifugalbeschleunigung senkrecht dazu steht. In dieser Konfiguration führt jedoch der Gravitationsgradient der Erde aufgrund der Verschiebung in radialer Richtung zu einem zusätzlichen Effekt auf den CAI-Beschleunigungsmesser. Bei der dritten Konfiguration, bei der der CAI-Beschleunigungsmesser auf der Querachse des Satelliten angebracht ist, wirken sowohl die Zentrifugal- als auch die Coriolis-Beschleunigung entlang der CAI-Empfindlichkeitsachse. Die Zentrifugalbeschleunigung ist jedoch deutlich geringer (nahe Null), da der Hebelarm kurz ist. Infolgedessen bietet diese letzte Positionierung erhebliche Vorteile gegenüber den beiden anderen Konfigurationen.

Die Phasenverschiebung aufgrund der Satellitendrehung kann anhand der folgenden Gleichung berechnet werden (Beaufils et al. 2023):

$$\Delta\varphi = 2k_{eff}T^2[a_x + 2v_{z0}(\Omega_y + \Omega_M) - x_0\Omega_y^2 + (x_0 - x_M)(\Omega_M^2 + (\Omega_M - \Omega_I)^2)], \quad (6)$$

wobei x_0 der anfängliche Abstand der Atome vom Massenmittelpunkt des Satelliten, x_M der Abstand vom Rotationszentrum des Spiegels zum Massenmittelpunkt des Satelliten, Ω_y die Winkelgeschwindigkeit des Satelliten um die Querachse relativ zum Inertialsystem, Ω_M und Ω_I die Winkelgeschwindigkeiten des Spiegels bzw. des einfallenden Laserstrahls relativ zum körperfesten System des Satelliten und v_{z0} die Anfangsgeschwindigkeit der Atome in radialer Richtung innerhalb des Satellitensystems sind.

Die Rotationseffekte können große Fehler in den Messungen des Quantensensors verursachen, wenn sie nicht berücksichtigt werden. Verschiedene Ansätze wurden vorgeschlagen, um den Rotationseffekt zu kompensieren (HosseiniArani et al. 2024). Der Einfluss der Hauptrotation aufgrund der Orbitfrequenz kann durch Gegenrotation mit einer festen Drehrate kompensiert werden (passive Gegenrotation). Ein anderer Ansatz sieht vor, ein Gyroskop zu verwenden, um die Satellitenrotation zu jedem Zeitpunkt zu messen und ihren Beitrag zur Phasenverschiebung durch einen aktiv gegen die Rotationsrate des Satelliten rotierenden Spiegel zu eliminieren (aktive Gegenrotation). Der dritte in dieser Studie betrachtete Ansatz ist die Gegenrotation des gesamten Quantensensors. In Abbildung 7 ist die Auswirkung der unterschiedlichen Kompensationsmethoden sowie die des Gyroskoprauschens dargestellt. Das Rauschlevel eines klassischen Gyroskops entspricht $\sigma_\omega \approx 4,7 \times 10^{-7}$ rad/s/Hz^{1/2} und das eines CAI-basierten Gyroskops $\sigma_\omega \approx 4,7 \times 10^{-9}$ rad/s/Hz^{1/2} (Romeshkani et al., 2024; Zingerle et al., 2024). Es wird deutlich, dass die passive Gegenrotation für eine hohe CAI-Sensitivität nicht ausreicht. Bei Verwendung der beiden anderen Methoden ist die resultierende ASD des CAI-Rauschens in der Größenordnung von 10^{-10} m/s²/Hz^{1/2}. Ein weiterer Vergleich wird zwischen Fällen ohne und mit Rotationskompensation durchgeführt (Abb. 8) und verdeutlicht die Notwendigkeit der Kompensation.

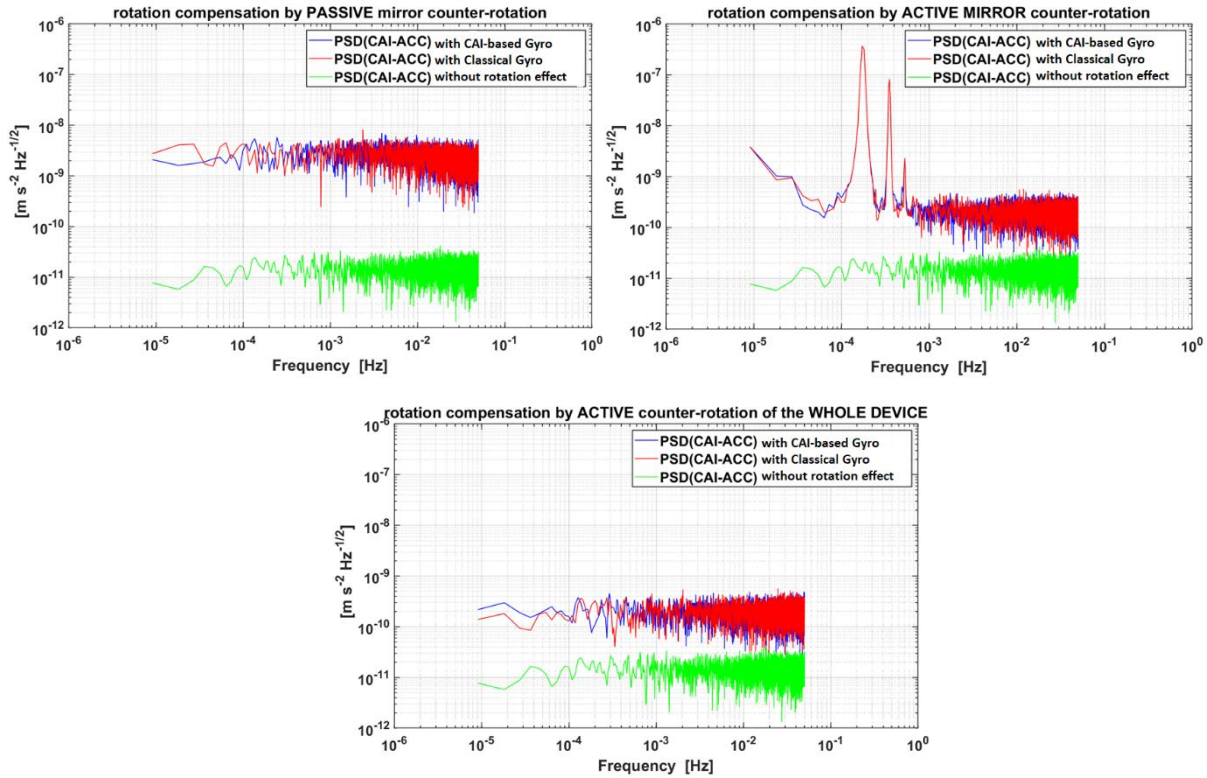


Abbildung 7. Auswirkung des Gyroskoprauschens auf die Rotationskompensation bei passiver Gegenrotation des Spiegels, aktiver Gegenrotation des Spiegels und aktiver Gegenrotation des gesamten Instruments.

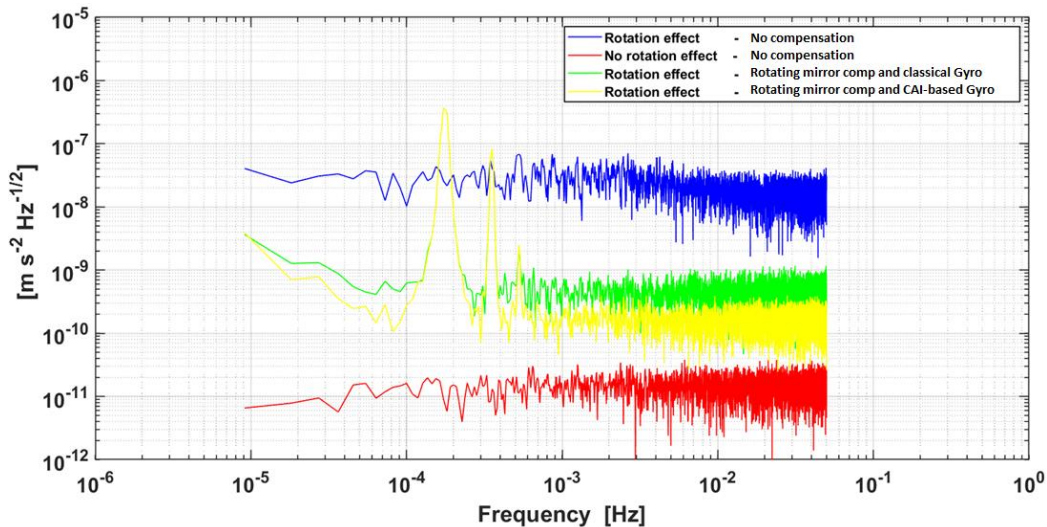


Abbildung 8. Vergleich zwischen Fällen mit Rotationskompensation und ohne Rotationskompensation.

Ein weiterer Test im Zusammenhang mit der Rotationskompensation betraf die Fälle, in denen der CAI-Beschleunigungsmesser auf der Querachse des Satelliten mit einer Verschiebung der entsprechenden Ausgangsposition der Atome und des Rotationszentrums des Spiegels platziert wird. Abbildung 9

veranschaulicht die verschiedenen Ausgangspositionen der Atome mit einem gelben Punkt, und der Drehpunkt des Spiegels ist mit einem grünen Punkt gekennzeichnet. Der Massenmittelpunkt des Satelliten wird durch den roten Punkt angezeigt. Die Ergebnisse für diese Fälle sind in Abbildung 10 dargestellt. Die Position des CAI-Beschleunigungsmesser wie in Fall C liefert das beste Ergebnis. Das zeigt, dass der Abstand zwischen dem Massenmittelpunkt und der Ausgangsposition der Atome entscheidend ist und möglichst gering sein sollte.

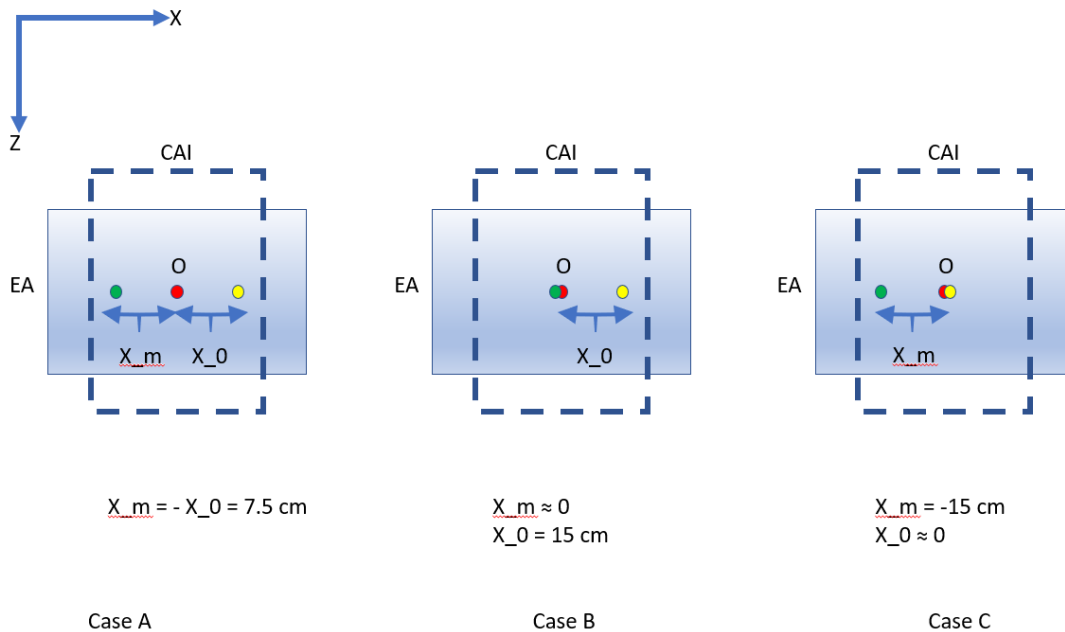


Abbildung 9: Die Position des CAI ACC im Verhältnis zum E-ACC.

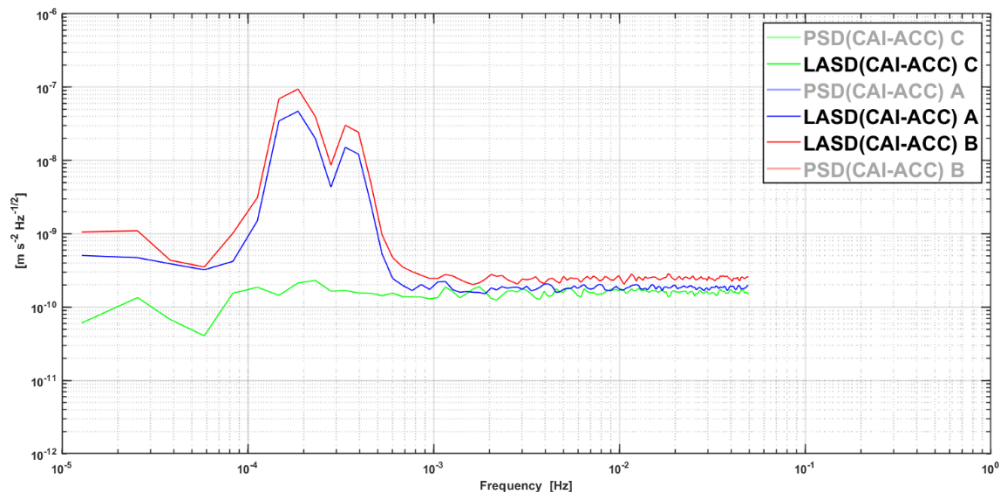


Abbildung 10. Auswirkungen verschiedener Positionen der Atome und des Spiegels bei einem hybriden ACC zur Rotationskompensation.

Schließlich wird die Auswirkung auf den CAI ACC bei Verwendung eines Drag-Free-Kontrollsystems untersucht (Abb. 11). Dabei werden die Auswirkungen eines Drag-Free-Kontrollsystems mit einer Genauigkeit angenommen, die der von GOCE entspricht, sowie eine, die um zwei Größenordnungen besser ist als die von LISA. Diese Untersuchung wurde mit verschiedenen Annahmen für den elektrostatischen Beschleunigungsmesser für zwei Bahnhöhen von 464 km und 246 km durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei der niedrigen Bahnhöhe von 246 km ein Drag-Free-Kontrollsystem das CAI-Rauschen reduziert. Eine Drag-Free-Kontrollsystem mit höherer Genauigkeit reduziert das Rauschen noch stärker. Bei dem Szenario der höheren Bahn von 464 km ist eine sehr hohe Genauigkeit des Drag-Free-Kontrollsystems erforderlich, um eine Verbesserung zu erreichen.

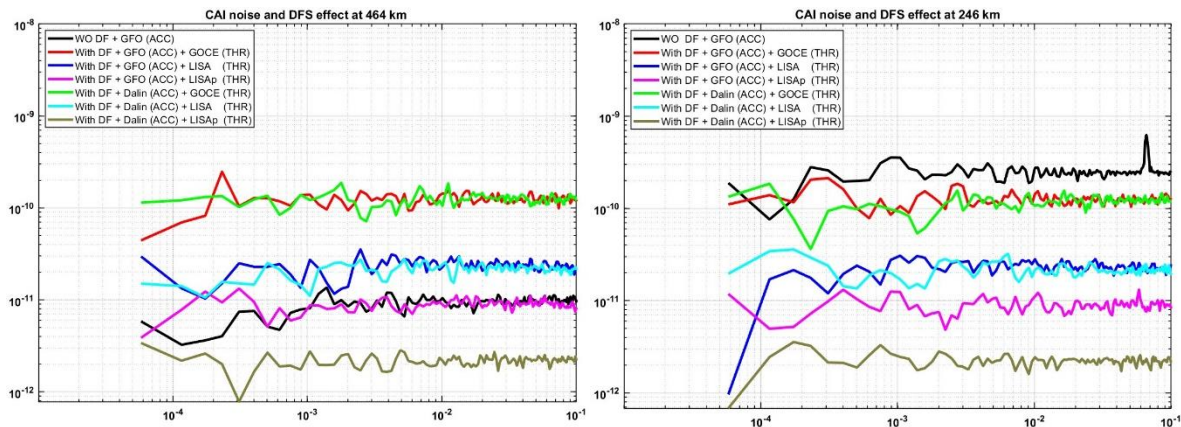


Abbildung 11. Die Auswirkung verschiedener Drag-Free-Kontrollsysteme auf das CAI-ACC in verschiedenen Bahnhöhen; Rauschen des elektrostatischen Beschleunigungsmessers: „GFO“ nach Christophe et al. (2015) und „Dalin“ nach Dalin et al. (2020).

2.4. Integration in den Schwerefeldsimulationsprozess (AP 4) [LUH]

Der Prozess der Schwerefeldsimulation besteht aus den einzelnen Schritten: (i) Bahnintegration, (ii) Berechnung der simulierten Beobachtungen, einschließlich instrumenteller Fehler und Modellfehler, und (iii) Schwerefeldberechnung. Der Quantensensor-Simulator, der in Zusammenarbeit mit Syrte in der ersten Phase des Projekts entwickelt wurde, ist in den ersten Schritt der Prozesskette eingebunden. Bei der Bahnintegration werden die Satellitenbahnen unter Berücksichtigung des Gravitationsfeldes der Erde und der nicht-gravitativen Beschleunigungen (u.a. atmosphärischer Widerstand, solarer Strahlungsdruck, Erdalbedo) mit dem eXtended High-Performance Satellite Dynamics Simulator (XHPS, Wöske et al. 2016) berechnet. Für jede Epoche der Orbitintegration sind alle für die Quantensensor-Simulation notwendigen Parameter der Satellitenumgebung verfügbar. Die Schnittstellen zwischen XHPS und dem Quantensensor-Simulator wurden definiert. Die Integration der Quantensensor-Simulator-Funktionalität in die Orbitintegration erfolgt in zwei Abschnitten: (i) über die Parametrisierung des Quantensensors und (ii) die Einbettung der Signalsynthese des Quantensensor-Simulators.

Parametrisierung eines Quantensensors

Für diesen Schritt wurde das Paket XHPS verwendet, um Eingaben für die Parametrisierung des Quantensensordesigns vorzunehmen. Eine Möglichkeit, diese Parametrisierung zu implementieren, ist z. B. ein Fehlermodell in Form einer Funktion des Leistungsdichtespektrums, das zur Berechnung des Sensorrauschens während der Orbitsimulation verwendet wird. Die Parametrisierung selbst wurde aus einem spezifischen Sensordesign, unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus AP 1, auf einem spezifischen Orbit, z.B. einer GRACE vergleichbaren Mission, abgeleitet. Zu diesem Zweck wurden auf der Grundlage

der Satellitenbahnen und der fehlerfreien nicht-gravitativen Beschleunigungen (aus XHPS) die Messungen mit dem Quantensensor-Simulator synthetisiert (Abbildung 12).

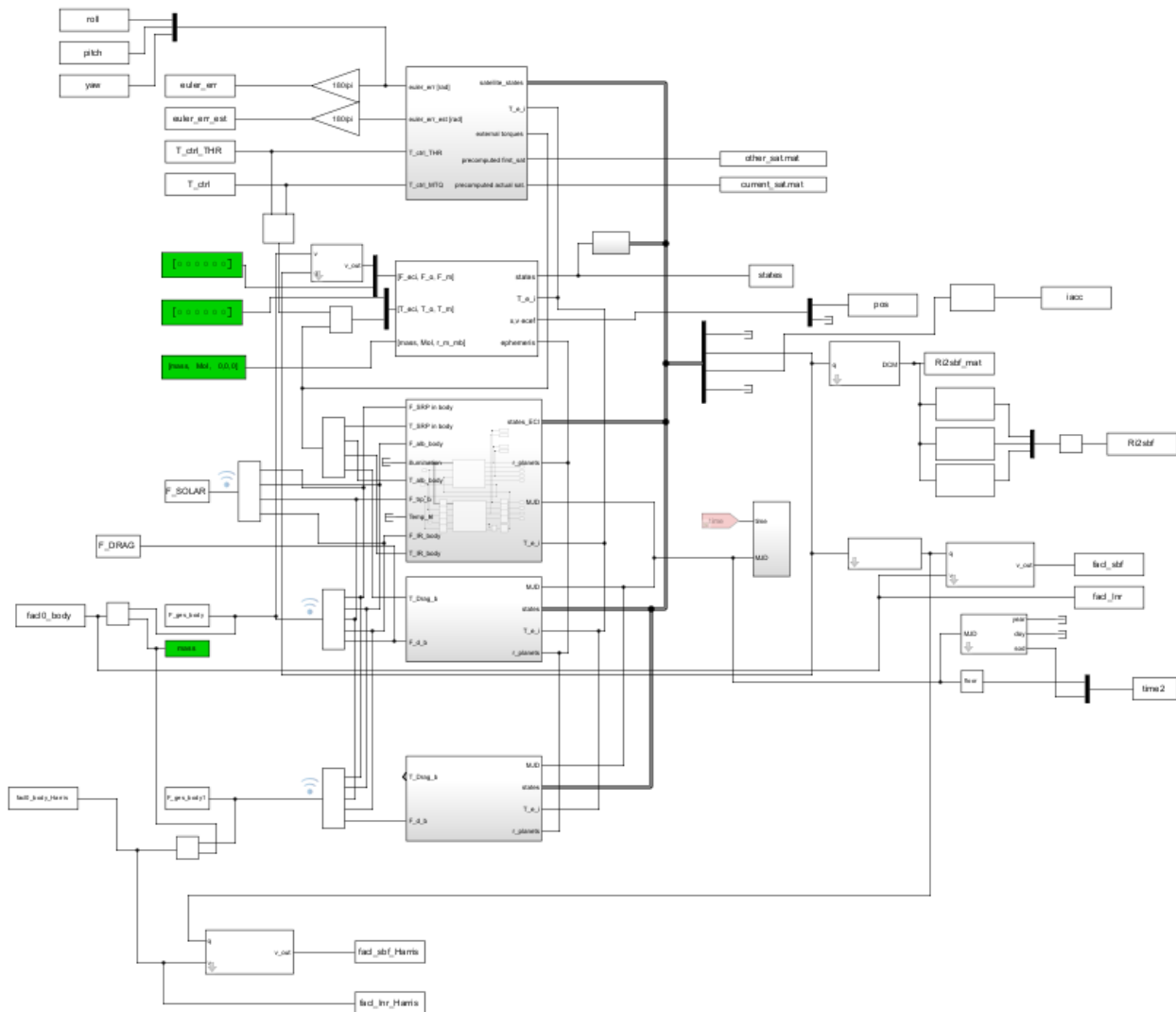


Abbildung 12. Die Parametrisierung eines Quantensensors besteht aus drei Hauptteilen: 1) Eingaben (die Parameter der Anfangsbedingungen), 2) die Verarbeitungs- und Dynamikmodelle, 3) die Ausgangsbeobachtungsdaten.

Einbettung der Signalsynthese

Die vollständige Integration des Quantensensor-Simulators erforderte die Erweiterung von XHPS um alle Umweltparameter, die in AP 2 und AP 3 behandelt wurden. Die definierten Schnittstellen wurden so implementiert, dass die Signalsynthese des Quantensensor-Simulators in der Schwerfeldsimulation aufgerufen wird, um die Beschleunigungsmesser- oder Gradiometer-Messungen zu erzeugen. Ein Schwerfeldsimulator wurde erstellt (Abb. 13).

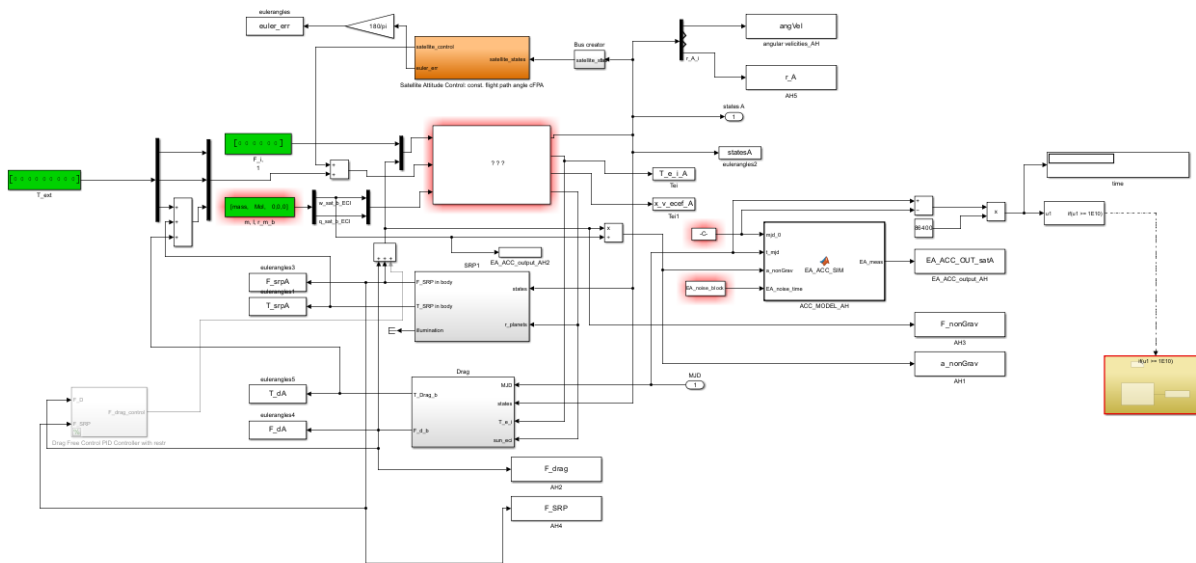


Abbildung 13. Die Einbettung der Signalsynthese umfasst drei Hauptteile: 1) Eingänge (die Parameter der Anfangsbedingungen), 2) die Verarbeitungs- und Dynamikmodelle, 3) die Ausgangsdaten der Beobachtungen.

2.5. Simulation einer Satellitengravimetrie-Mission auf der Grundlage von AP 2 (AP 5) [LUH]

Basierend auf Missionssimulationen und aufbauend auf AP 2 wurden verschiedene Quantensensor-Designs zur Bestimmung des statischen und zeitlich veränderlichen Schwerfeldes untersucht. Zu diesem Zweck wurde auch eine Hybridversion eines Beschleunigungssensors in den Orbit-Simulator implementiert, die die Kalibrierung des elektrostatischen Beschleunigungssensors nach den in AP 2 genannten Methoden erlaubt. Der Beitrag weiterer Satelliten-Subsysteme (z.B. Bestimmung der Satellitenorientierung) zur Schwerfeldlösung wurde untersucht und abgeleitet, welches die limitierenden Faktoren in der Satellitengravimetrie in Zukunft sein könnten. In diesem Zusammenhang wurden zusätzliche Sensoren betrachtet, wie z.B. zusätzliche Gyroskope zur Bestimmung der Drehrate. Darüber hinaus wurden Wechselwirkungen zwischen Quantensensor und Satellitenplattform untersucht und Kontrollmechanismen, z.B. zur Lageregelung und Drag-Kompensation des Satelliten auf Basis von Quantensensormessungen, im Orbit-Simulator implementiert.

Aus den Missionssimulationen wurden Empfehlungen für die Kombination des Quantensensor-Satelliten-Subsystems abgeleitet, um die räumliche und zeitliche Auflösung der Schwerfeldlösungen zu verbessern.

In diesem Abschnitt werden die ermittelten Schwerfeldlösungen von Knabe (2023) vorgestellt. Bei diesen II-SST-Szenarien werden verschiedene Modelle des Sensorverhaltens und Orbit-Szenarien verwendet. Die ASD der betrachteten Rauschquellen sind in Abbildung 14 dargestellt. Die mit AOD (atmosphärisches und ozeanisches Dealiasing) und den Gezeiten verbundenen Fehler sind im Frequenzbereich von 3×10^{-4} Hz bis 5×10^{-3} Hz am größten. Das Rauschen für AOD wird mit 10 % des AOD1B-Produkts RL 6 berücksichtigt, und für die ozeanischen Gezeiten beträgt es 10 % des FES2014b-Produkts (siehe Abbildung 15). Auf der Instrumentenseite ist bei niedrigen Frequenzen das E-ACC-Rauschen der primär begrenzende Faktor. Das Ausmaß und der Frequenzbereich, in dem das Beschleunigungsmesserrauschen dominiert, hängen von der Art des verwendeten Beschleunigungsmessers und des Messinstruments für das Rauschlevel ab.

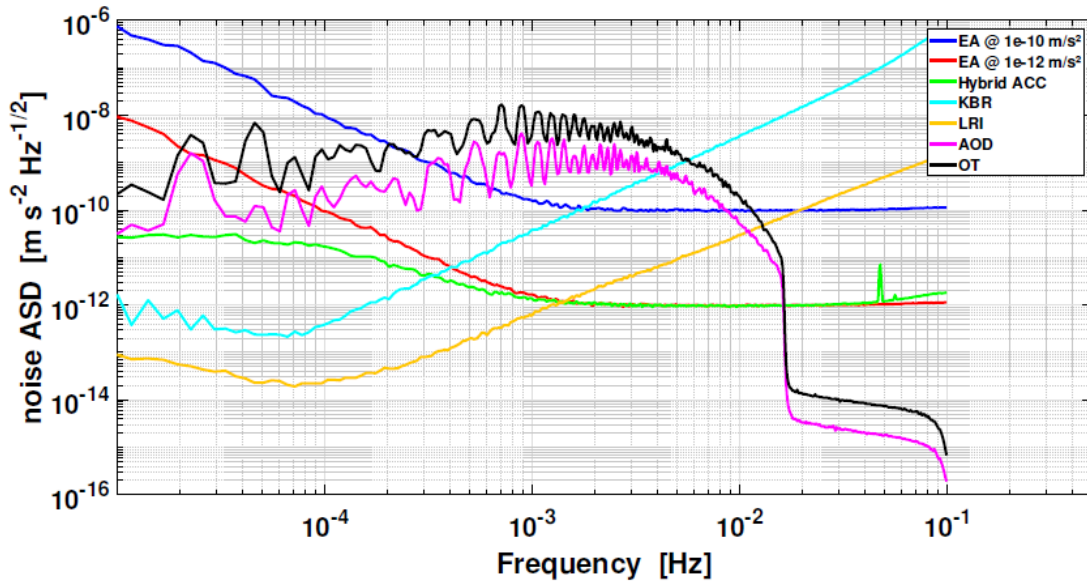


Abbildung 14. ASD der in Betracht gezogenen Rauschquellen für die berechneten Schwerefeldlösungen der Il-SST-Missionen (Knabe 2023).

Wie im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, hat die Größe des Signals der nicht-gravitativen Beschleunigung erhebliche Auswirkungen auf die Leistung des Beschleunigungsmessers. Höhere Umlaufbahnhöhen führen zu kleineren nicht-gravitativen Beschleunigungen, was von Vorteil ist, aber das Gravitationssignal wird mit zunehmender Entfernung von der Erde schwächer. Daher wurden verschiedene Bahnhöhen getestet: 462 km, 363 km, 303 km und 246 km. Alle Szenarien in diesem Abschnitt gehen davon aus, dass der Satellit mit einem Drag-Free-Kontrollsystem ausgestattet ist. Folglich werden hier keine zusätzlichen Fehler aufgrund von Unsicherheiten des Skalierungsfaktors oder Variationen der Beschleunigung innerhalb eines einzelnen Interferometerzyklus berücksichtigt.

Zur Bewertung der Simulationsergebnisse bei Verwendung verschiedener Arten von Beschleunigungsmessern werden die Differenzen zwischen dem Referenzschwerefeldmodell und dem berechneten Schwerefeldmodell berechnet. Diese Koeffizientendifferenzen werden verwendet, da sie die wahren Fehler darstellen. Die Auswertung erfolgt sowohl im spektralen als auch im räumlichen Bereich. Abbildung 15 gibt einen Überblick über die Schwerefeldlösungen, die mit verschiedenen Eingabeparametern erzeugt wurden. Die Ergebnisse werden in Form des Koeffizientengrad-RMS der Geoidhöhe ausgedrückt. Es ist wichtig zu beachten, dass die Beobachtungen nur unter Verwendung von Schwerefeldkoeffizienten bis zum Grad und der Ordnung 90 synthetisiert werden, was in einigen Szenarien zu einer Verringerung des Grad-RMS bei höheren Graden führt. Durch die Anwendung desselben maximalen Grades sowohl bei der Synthese als auch bei der Schwerefeldberechnung ist ein fairer Vergleich der verschiedenen Szenarien gewährleistet, da dieser Ansatz den Fehler und das Aliasing von hochfrequenten Signalen in niedrigere Frequenzen ausschließt (Knabe 2023).

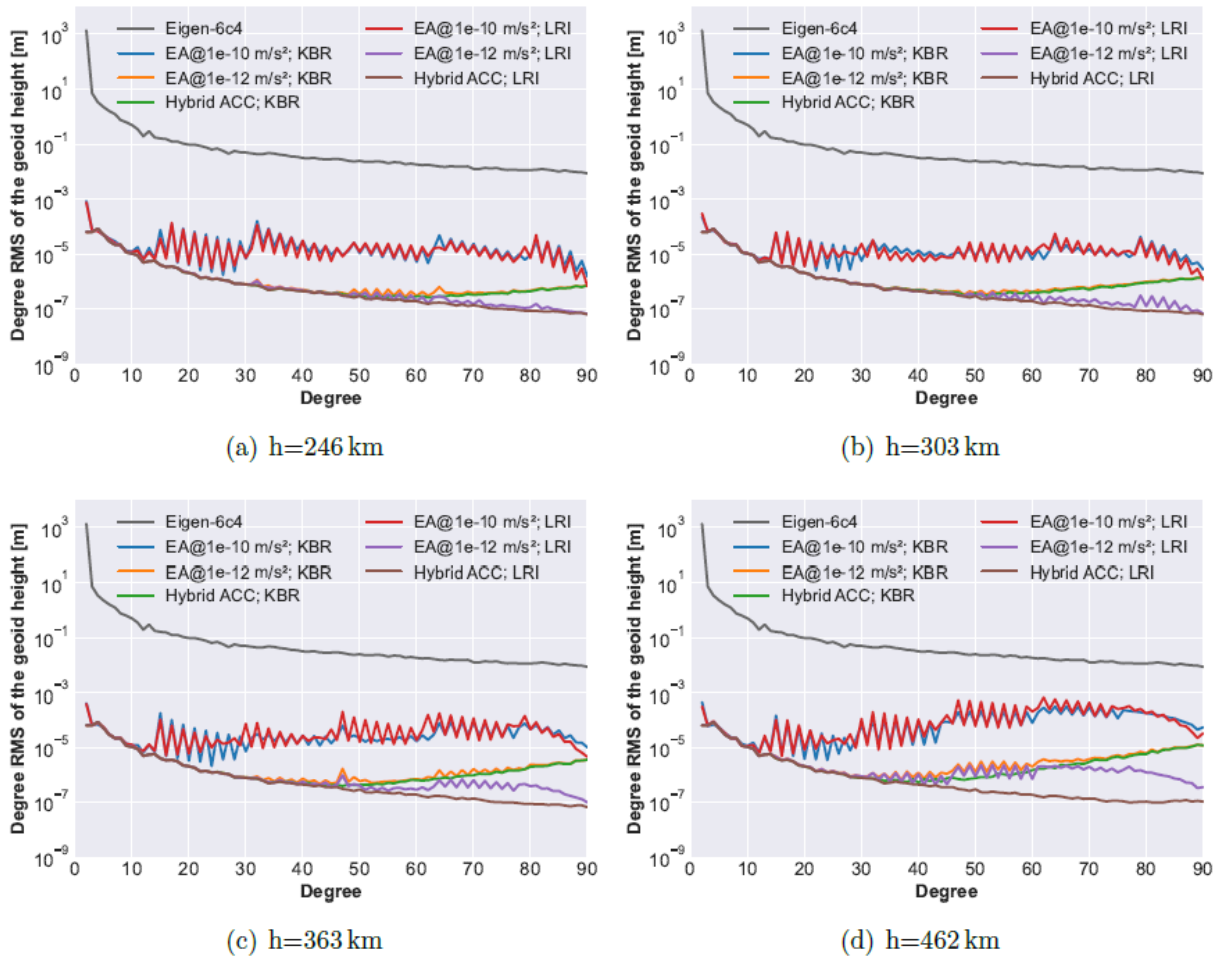


Abbildung 15: Grad-RMS der Koeffizientendifferenzen für verschiedene Beschleunigungsmesser-Rauschmodelle für die Bahnhöhen (a) 246 km, (b) 303 km, (c) 363 km und (d) 462 km einschließlich AOD- und Ozeangezeitenfehler (Knabe 2023).

Abbildung 15 zeigt, dass es bis zum Grad 10 keinen signifikanten Unterschied zwischen den Lösungen aller Szenarien gibt. Dies ist auf die Dominanz von AOD- und Ozeangezeitenfehlern in diesen Koeffizienten niedriger Ordnung zurückzuführen. Bei Graden über 10 ist die Lösung mit einem E-ACC mit einem Rauschlevel von $1 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$ im Frequenzbereich von $2 \times 10^{-3} \text{ Hz}$ bis $1 \times 10^{-1} \text{ Hz}$ (wie in den blauen und roten Kurven dargestellt) deutlich schlechter als die mit einem E-ACC mit einem Rauschlevel von $1 \times 10^{-12} \text{ m/s}^2$ im gleichen Frequenzbereich. Dies deutet darauf hin, dass der Beschleunigungsmesser mit einem Rauschlevel von $1 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$ der begrenzende Faktor ist. Diese Schlussfolgerung wird noch dadurch untermauert, dass das Rauschen in der Entfernungsmessung nur einen minimalen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Die Ergebnisse mit LRI-Rauschen (rote Kurve) und KBR-Rauschen (blaue Kurve) sind für diese Beschleunigungsmesser-Performance über alle Bahnszenarien hinweg nahezu identisch.

Eine deutliche Verbesserung ergibt sich bei Verwendung eines E-ACC mit einem Rauschlevel von $1 \times 10^{-12} \text{ m/s}^2$ im Frequenzbereich von $2 \times 10^{-3} \text{ Hz}$ bis $1 \times 10^{-1} \text{ Hz}$. Die Ergebnisse für den E-ACC mit diesem Rauschlevel und für den hybriden Beschleunigungsmesser (der ein E-ACC-Rauschen mit $1 \times 10^{-12} \text{ m/s}^2$ in der Hauptbandbreite und ein CAI mit $1 \times 10^{-11} \text{ m/s}^2$ Rauschen über alle Frequenzen kombiniert) sind bis zum Grad 30 für Höhen von 363 km und 462 km und bis zum Grad 40 für Höhen von 246 km und 303 km

identisch. Diese Ähnlichkeit ist auf die Verschlechterung zurückzuführen, die durch AOD- und Ozeangezeitenfehler bei diesen Frequenzen verursacht wird. Bei höheren Graden übertreffen die Lösungen mit LRI-Rauschen die Lösungen mit KBR-Rauschen, wobei der Einfluss des LRI-Rauschens bei größeren Höhen stärker ausgeprägt ist. Es fällt auch auf, dass die Schwerefeldlösungen mit einem hybriden Beschleunigungsmesser glatter sind als die mit einem elektrostatischen Beschleunigungsmesser, obwohl sie das gleiche Fehlerniveau beibehalten, wenn KBR-Rauschen eingeführt wird. Dieses Muster gilt auch für LRI-Rauschen in Höhen von 246 km und 303 km. Bei Szenarien in größeren Höhen nimmt der Einfluss des Rauschens der Entfernungsmessung in Graden von 50 bis 90 zu.

Zeitvariable Hintergrundmodellfehler werden in die Simulationen eingeführt (Abbildung 15), indem die Modelle skaliert werden, 10 % des AOD1B-Produkts RL 6 und 10 % des FES2014b-Produkts. Ein anderer Ansatz besteht darin, die Unterschiede zwischen verschiedenen Modellen zu berücksichtigen. Abbildung 16 vergleicht die Schwerefeldlösungen unter diesen beiden Optionen für Hintergrundmodellierungsfehler.

Bei der Verwendung des E-ACC mit einem Rauschlevel von $1 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$ hat die Fehlerannahme für die Hintergrundmodellierung keinen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse. Bei Szenarien mit präziseren Beschleunigungsmessern führen die Annahmen basierend auf Modelldifferenzen, RL5-RL6 für AOD und EOT11a-FES2014b für die Ozeangezeiten, zu einer etwas größeren Verschlechterung im Vergleich zu den 10% Fehlerannahmen einer Modellierung (Knabe 2023).

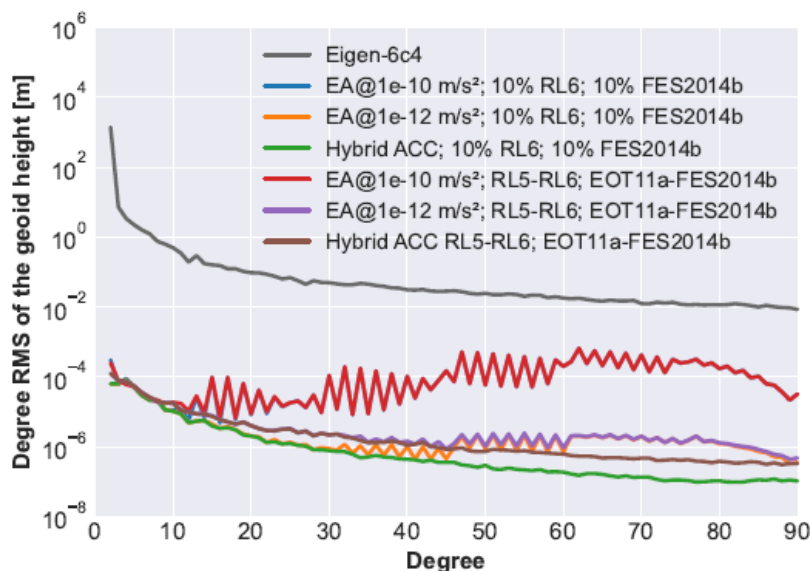


Abbildung 16: Grad-RMS der Koeffizientendifferenzen für verschiedene Beschleunigungsmesser-Rauschmodelle mit einem LRI-Rauschmodell für die Höhe von 462 km mit verschiedenen Fehlerannahmen für AOD- und Gezeitenfehler (Knabe 2023).

2.6. Sensor für eine Satellitengravimetrie-Mission (AP 6) [LUH]

Basierend auf den verschiedenen Missionsszenarien wurde eine Analyse der vorhandenen Hardware-Komponenten aus der Quantensensor-Simulation durchgeführt und eine Priorisierung für die (Weiter-)Entwicklung fehlender Komponenten für die Herstellung von Quantenbeschleunigungsmessern und -gradiometern erstellt. Daraus werden Konzepte für die zeitnahe Realisierung eines für eine Demonstrator- oder Schwerefeldmission geeigneten Sensors vorgeschlagen.

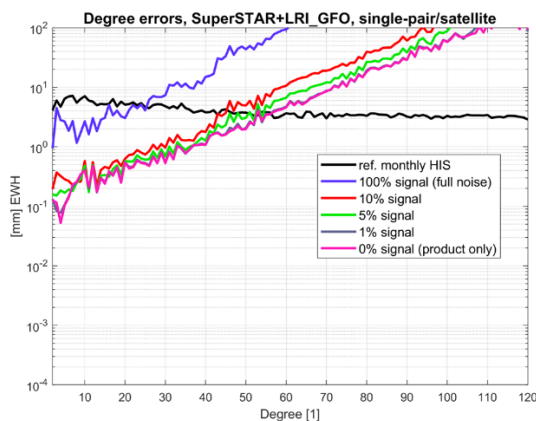
Die wesentlichen Missionsanforderungen wurden auf der Grundlage des Nutzens eines geplanten künftigen Missionsszenarios im Vergleich zum derzeitigen Stand der Technik abgeleitet. Dieser Nutzen kann im Hinblick auf verschiedene Produkte quantifiziert werden, darunter die Hydrologie und zeitvariable Erdschwerefeldmodelle. Diese Produkte können während der Schwerefeldverarbeitung je nach Verarbeitungsgrad logisch in eine Hierarchie integriert werden. Ein übergeordnetes Produkt kann direkt von einem untergeordneten Produkt abgeleitet werden. Das bedeutet logischerweise, dass ein Nutzen in abgeleiteten (übergeordneten) Produkt nur dann vorhanden sein kann, wenn ein Nutzen auch im (untergeordneten) Ursprungsprodukt vorhanden ist. In der Schwerefeldprozessierung (z.B. in GRACE/-FO oder GOCE) haben sich die folgenden wichtigen (Zwischen-)Produkte (oder Level Lx) etabliert:

- a) In-situ-Beobachtungen, angepasst/kalibriert,
- b) Lösungen für das Schwerefeld, parametrisiert als sphärische harmonische Koeffizienten,
- c) Räumliche Schwerefeldprodukte.

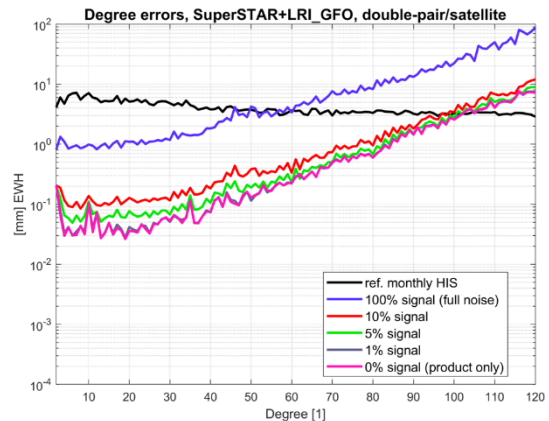
Möglichkeit zur Verbesserung der Schwerefeldlösungen

Um eine Verbesserung der Schwerefeldlösungen bei identischem Konstellationsdesign zu erreichen, ist es zunächst notwendig das Rauschverhalten der in-situ-Beobachtungen zu verbessern. Dies ist jedoch nur eine notwendige, nicht aber eine hinreichende Bedingung, da bei der Berechnung von Schwerefeldlösungen zusätzliche Fehlerquellen ins Spiel kommen, die das Fehlerniveau der Instrumente deutlich übersteigen. So erfordert beispielsweise die Berechnung globaler Schwerefeldlösungen eine gewisse Akkumulationszeit, um eine ausreichende globale Abdeckung (bis zur Zielauflösung) zu erreichen. Da diese Akkumulationszeit bei den untersuchten Missionen deutlich länger ist als die der zeitlich veränderlichen Schwerefeldsignale (insbesondere Ozeangezeiten und hochfrequente Signale des Ozeans und der Atmosphäre), tritt der Effekt des sogenannten "Temporal Aliasing" auf. Dieser zeitliche Aliasing-Fehler dominiert - derzeit - den Gesamtfehler der Schwerefeldlösung selbst bei Verwendung des schlechtesten Instrumentenrauschens (GRACE-FO-Niveau) um mindestens einen Faktor 10 und bei Verwendung des besten Instrumentenrauschens (CAI12-Niveau) um mehr als einen Faktor 1000. Dies bedeutet, dass unter der Annahme des derzeitigen Konstellationsdesigns (und der klassischen Parametrisierung) kaum ein Nutzen aus den verbesserten Instrumenten (oder Beobachtungen) für die Berechnung der globalen Schwerefeldlösungen gezogen werden kann. Um das zeitliche Aliasing auf ein Niveau zu reduzieren, bei dem verbesserte Instrumente wieder eine Rolle spielen, müssten viel größere Satellitenkonstellationen in Betracht gezogen werden (Zingerle et al., 2024). Um beispielsweise halbtägliche Schwerefeldsignale bis zu einer Auflösung von etwa 300 km aufzeichnen zu können, wären mehr als 20 Satellitenpaare erforderlich (und selbst dann wären noch Resteinflüsse durch zeitliches und räumliches Aliasing vorhanden). Um Satellitenkonstellationen dieser Größenordnung zu realisieren, müsste jedoch zunächst das gesamte Messkonzept miniaturisiert und (deutlich) kostengünstiger gestaltet werden, da ansonsten nicht von einer wirtschaftlichen Realisierbarkeit einer solchen Mission ausgegangen werden kann.

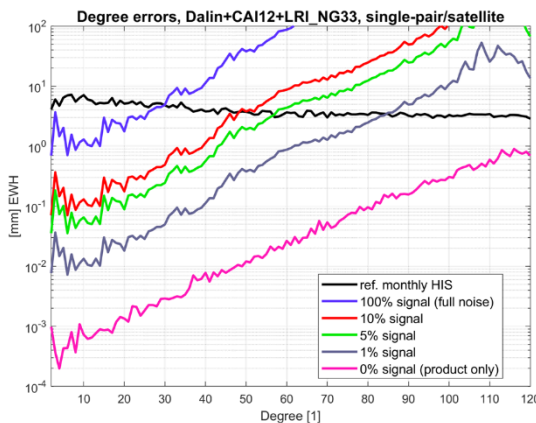
Im Prinzip kann das zeitliche Aliasing auch durch verbesserte De-Aliasing-Modelle (Hintergrundmodelle) reduziert werden. Die Verringerung des zeitlichen Aliasing-Fehlers ist proportional zur Verringerung des Fehlers in den Hintergrundmodellen (Abbildung 17). Es kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass sich die Hintergrundmodelle in naher Zukunft drastisch verbessern werden (eine Verbesserung um den Faktor 2 bis 5 in den nächsten 10 Jahren erscheint bereits ambitioniert). Würde man hingegen davon ausgehen, dass perfekte Hintergrundmodelle zur Verfügung stünden, könnte zwar zeitliches Aliasing vermieden werden, aber der gesamte Nutzen einer Schwerefeldmission wäre dann in Frage gestellt, da das Schwerefeld bereits durch die Hintergrundmodelle optimal beschrieben wäre. Es lässt sich also feststellen, dass Hintergrundmodelle zwar dazu beitragen, zeitliches Aliasing zu reduzieren, das Problem aber nicht lösen können.



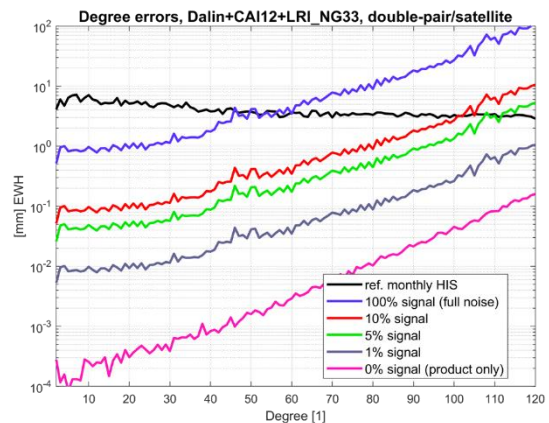
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 17. Beziehung zwischen zeitlichem Aliasing-Fehler und Instrumentenrauschen in globalen Schwerfeldlösungen durch Reduzierung des zeitlich veränderlichen Hintergrundsignals für das schlechteste (GRACE-FO) und beste Instrumentenszenario (CAI12). (a) Gradabweichungen für ein einzelnes Paar mit dem GRACE-FO-Instrumentenszenario. (b) Gradabweichungen für das Doppelpaar mit dem GRACE-FO Instrumentenszenario. (c) Gradabweichungen für ein einzelnes Paar mit dem CAI12-Instrumentenszenario. (d) Gradabweichungen für das Doppelpaar mit dem CAI12-Instrumentenszenario.

Verbesserungsmöglichkeiten für räumliche Schwerfeldprodukte

Da räumliche Schwerfeldprodukte in der Regel direkt aus Schwerfeldlösungen abgeleitet werden, ist leider kaum ein direkter Nutzen für diese Produkte durch eine alleinige Verbesserung des Instrumentenrauschens zu erwarten (wegen des dominierenden zeitlichen Aliasing-Fehlers in den Schwerfeldprodukten). Nur wenn man davon ausgeht, dass der zeitliche Aliasing-Fehler reduziert werden kann, ist hier ein Einfluss der besseren Instrumente zu sehen. Zeitvariable Schwerfeldmodelle spiegeln grundsätzlich die Summe aller Massenänderungen wider. Im Bereich der Anwendungen besteht daher eine weitere große Herausforderung darin, das Zielsignal (z.B. Landhydrologie) von anderen Signalquellen (z.B. Effekte der festen Erde, der Kryosphäre oder der Atmosphäre) zu trennen. Für die Signaltrennung sind häufig ergänzende Produkte oder Modelle der Nicht-Zielsignale erforderlich, um das eigentliche Zielsignal zu erhalten. Die Qualität dieser externen Modelle und nicht die Lösung des Schwerfeldes selbst bestimmt letztlich oft die Genauigkeit des Zielsignals. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich auch diese ergänzenden Produkte zur Signaltrennung im Laufe der Zeit verbessern werden, und es bleibt abzuwarten, welche Fehlerquelle diesen Aspekt in Zukunft dominieren wird.

Schlussfolgerung

Zusammenfassend lässt sich für die SST Missionen feststellen, dass verbesserte (CAI) Instrumente die Schwerefeldbeobachtungen tatsächlich verbessern können. Allerdings können diese Verbesserungen der Beobachtungen derzeit nur eingeschränkt für die globalen Schwerefeldlösungen genutzt werden (aufgrund von zeitlichem Aliasing, das durch die intrinsische Unterabtastung in Satellitenkonstellationen entsteht). Die Tatsache, dass globale Schwerefeldlösungen und daraus abgeleitete Produkte derzeit kaum verbessert werden können, bedeutet nicht, dass verbesserte In-situ-Beobachtungen keinen Nutzen haben (sondern lediglich, dass die Inversion zu einem globalen Schwerefeldprodukt derzeit fast nicht von ihnen profitieren kann). So könnte es beispielsweise für künftige Anwendungen oder Nutzer möglich sein, In-situ-Beobachtungen direkt zu verarbeiten, ohne den "Zwischenschritt" globaler Schwerefeldlösungen zu machen. In-situ-Beobachtungen enthalten praktisch kein zeitliches und räumliches Aliasing und können daher das Schwerefeld am entsprechenden Ort und zur entsprechenden Zeit mit voller Instrumentengenauigkeit reproduzieren. Verschiedene Erdsystemmodelle könnten beispielsweise Schwerefelddaten assimilieren, indem sie ihre Modelldaten auf der Beobachtungsebene vorwärts modellieren und sie dann im Hinblick auf die gemessenen In-situ-Beobachtungen minimieren. Dies würde jedoch ein Umdenken erfordern, weg von der derzeit etablierten Verarbeitungskette und hin zu einer komplexeren Schnittstelle zwischen Benutzer/Modell und Schwerefeldinformationen.

2.7. Die wichtigsten Elemente des numerischen Nachweises

LUH:

Die im Rahmen dieses Projekts erhaltenen Personalmittel wurden wie geplant für eine wissenschaftliche Mitarbeiterstelle (Dr. Mohsen Romeshkani und unterstützend Dr. Annike Knabe) verwendet. Die Reisekosten wurden für die Präsentation der Projektzwischenergebnisse auf Konferenzen verwendet.

2.8. Erforderlichkeit und Angemessenheit der durchgeführten Arbeiten

Die durchgeführten Arbeiten wären ohne die Förderung durch das DLR nicht möglich gewesen. Um das gesetzte Ziel, ein Missionskonzept für eine Quantengravimetrie-Mission zu entwickeln, zu erreichen, waren alle Arbeitspakete notwendig und wurden entsprechend gestaltet.

2.9. Voraussichtlicher Nutzen

Es wird erwartet, dass die Simulationsergebnisse dieser Studie die weiteren Diskussionen über zukünftige Schwerefeldmissionen bei ESA, EU und NASA maßgeblich beeinflussen werden. Außerdem wird davon ausgegangen, dass die untersuchten Konzepte und Ergebnisse in weiterführende Studien zu Quantensensoren für Schwerefeldmissionen eingehen. Dank der gewonnenen Expertise können die beteiligten Partner schnell Missionsszenarien analysieren, um die optimale Konfiguration bei sich ändernden technologischen Rahmenbedingungen zu bestimmen. Mit dieser Studie und dem Austausch mit SYRTE wurde die Grundlage für eine Schlüsselrolle bei einer zukünftigen Schwerefeldmission unter maßgeblicher deutscher Beteiligung geschaffen.

2.10. Fortschritte auf dem Gebiet des Projekts an anderen Standorten

Es gibt mehrere Projekte bei der ESA und der NASA. Die ESA und die EU führen derzeit eine Reihe von Studien zu Aspekten solcher Konzepte für künftige Quantengravimetrie-Missionen durch, an denen auch

Projektpartner aus diesem Projekt beteiligt sind. Diese Aspekte können dazu beitragen, die dort definierten Missionskonzepte weiter zu verfeinern.

2.11. Veröffentlichung der Ergebnisse

Begutachtete Veröffentlichungen:

HosseiniArani, S. A., Tennstedt, B., Schilling, M., **Knabe, A.**, Wu, H., Schön, S., & **Müller, J.** (2022). Kalman-Filter Based Hybridization of Classic and Cold Atom Interferometry Accelerometers for Future Satellite Gravity Missions. In J. T. Freymueller, & L. Sánchez (Eds.), *International Association of Geodesy Symposia* (pp. 221-231). (International Association of Geodesy Symposia; Vol. 154). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/1345_2022_172

HosseiniArani, A., Schilling, M., **Beaufils, Q.**, **Knabe, A.**, Tennstedt, B., Kupriyanov, A., Schön, S., **Pereira dos Santos, F.**, & **Müller, J.** (2024). Advances in Atom Interferometry and their Impacts on the Performance of Quantum Accelerometers On-board Future Satellite Gravity Missions. *Advances in space research*, 74(7), 3186-3200. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.06.055>

Knabe, A., Schilling, M., Wu, H., HosseiniArani, A., **Müller, J.**, **Beaufils, Q.**, & **Pereira Dos Santos, F.** (2022). The Benefit of Accelerometers Based on Cold Atom Interferometry for Future Satellite Gravity Missions. In J. T. Freymueller, & L. Sánchez (Eds.), *International Association of Geodesy Symposia* (pp. 213-220). (International Association of Geodesy Symposia; Vol. 154). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/1345_2022_151

Knabe, A., (2023) *New Concepts for Gravity Field Recovery using Satellites*, Dissertation, ISSN 0065-5325, ISBN 978-3-7696-5328-1.

Kupriyanov, A., Reis, **A.**, **Knabe, A.**, Fletling, N., HosseiniArani, S. A., **Romeshkani, M.**, Schilling, M., Müller, V., & **Müller, J.** (2024). Analysis of Novel Sensors and Satellite Formation Flights for Future Gravimetry Missions. *International Association of Geodesy Symposia*, https://doi.org/10.1007/1345_2024_279

Kupriyanov, A., Reis, A., Schilling, M., Müller, V., & **Müller, J.** (2024). Benefit of enhanced electrostatic and optical accelerometry for future gravimetry missions. *Advances in space research*, 73(6), 3345-3362., <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.12.067>

Lévêque, T., Fallet, C., Lefebve, J., Piquereau, A., Gauguet, A., Battelier, B., Bouyer, P., Gaaloul, N., Lachmann, M., Piest, B., Rasel, E., **Müller, J.**, Schubert, C., **Beaufils, Q.**, **Pereira Dos Santos, F.** (2022): CARIOQA: Definition of a Quantum Pathfinder Mission. *Proceedings of International Conference on Space Optics (ICSO) 2022; 3-7 October 2022; Dubrovnik; Croatia*, <https://doi.org/10.1117/12.2690536>

Meister, J., Bremer, S., HosseiniArani, A., Leipner, A., List, M., **Müller, J.**, Schilling, M. (2022): Reference mirror misalignment of cold atom interferometers on satellite-based gravimetry missions. *International Astronautical Congress 2022, 18.-22. Sep. 2022, Paris, Frankreich*.

Mu, Q., **Müller, J.**, Wu, H., **Knabe, A.**, & Zhong, M. (2024). Satellite gradiometry based on a new generation of accelerometers and its potential contribution to Earth gravity field determination. *Advances in Space Research*, 73(6), 3321-3344. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.08.023>

Romeshkani, M., Müller, J., Knabe, A., & Schilling, M. (2024). Quantum gravimetry for future satellite gradiometry. *Advances in space research*, 75(2), 1653-1664. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.11.072>

Van Camp, M., Dos Santos, F. P., Murböck, M., Petit, G., & **Müller, J.** (2021). Lasers and Ultracold Atoms for a Changing Earth. *Eos*, 102(1), 33-37. <https://doi.org/10.1029/2021eo210673>

Zingerle, P., **Romeshkani, M.**, Haas, J., Gruber, T., Güntner, A., **Müller, J.**, & Pail, R. (2024). The Benefits of Future Quantum Accelerometers for Satellite Gravimetry. *Earth and Space Science*, 11(9), Artikel e2024EA003630. <https://doi.org/10.1029/2024EA003630>

Nicht-begutachtete Veröffentlichungen:

Haas, J., Güntner, A., Gruber, T., **Müller, J.**, Pail, R., **Romeshkani, M.**, Zingerle, P. (2023) An evaluation of quantum gravimetry satellite missions for quantifying terrestrial water storage variations, XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Berlin 2023).

HosseiniArani, S. A., Tennstedt, B., Schilling, M., **Knabe, A.**, Beaufils, Q., **Romeshkani, M.**, Wu, H., Kupriyanov, A., **Pereira Dos Santos, F.**, Schön, S., & **Müller, J.** (2022). Improved Modeling for Hybrid Accelerometers Onboard Future Satellite Gravity Missions. Abstract von COSPAR, Athen, Griechenland.

HosseiniArani, S. A., Schilling, M., Beaufils, Q., **Knabe, A.**, Tennstedt, B., Schön, S., **Pereira Dos Santos, F.**, & **Müller, J.** (2023). Advances in cold atom interferometer accelerometry and their impact on the sensitivity of gravity missions. Abstract von 28th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG 2023, Berlin, Berlin, Deutschland. <https://doi.org/10.57757/IUGG23-0743>

Knabe, A., Schilling, M., HosseiniArani, S. A., **Romeshkani, M.**, **Müller, J.**, **Beaufils, Q.**, & **Pereira Dos Santos, F.** (2022). Benefit of Cold Atom Interferometry Accelerometers for Future Low-Low Satellite-to-Satellite Tracking and Gradiometry Missions. Gravity, Geoid and Height Systems 2022 Symposium.

Knabe, A., Schilling, M., Hosseini-Arani, A., **Romeshkani, M.**, **Müller, J.**, **Beaufils, Q.**, **Pereira dos Santos, F.** (2023) Cold atom interferometry accelerometry for future low-low satellite-to-satellite tracking and cross-track gradiometry satellite gravity missions, XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Berlin 2023).

Knabe, A., Schilling, M., **Romeshkani, M.**, Hosseini-Arani, A., Fletling, N., Kupriyanov, A., **Müller, J.**, **Beaufils, Q.**, **Pereira dos Santos, F.** (2024) Cold Atom Interferometry Accelerometers for Future Satellite Gravity Missions. EGU 2024, Wien. Österreich, Apr 14-19, 2024.

Knabe, A., Schilling, M., **Romeshkani, M.**, HosseiniArani, A., Fletling, N., Kupriyanov, A., **Müller, J.**, **Beaufils, Q.**, **Pereira dos Santos, F.** (2024) Cold Atom Interferometry Accelerometers for Future Satellite Gravity Missions. GGHS2024 Symposium Gravity, Geoid, and Height Systems 2024, Thessaloniki, Griechenland, September 4-6, 2024.

Kupriyanov, A., Reis, A., **Knabe, A.**, Fletling, N., **Romeshkani, M.**, Hosseini-Arani, A., Schilling, M., Müller, V., **Müller, J.**, (2024) Performance Estimation of Novel Accelerometers and Analysis of Satellite Formations for Future Gravimetry Missions. H0.5, 'Advanced Methods for Geodesy, Metrology, Navigation and Fundamental Physics' COSPAR 2024, 45th Scientific Assembly (13-21 July 2024, South Korea).

Kupriyanov, A., Reis, A., Schilling, M., **Knabe, A.**, Fletling, N., HosseiniArani, A., **Romeshkani, M.**, Müller, V., **Müller, J.**, (2023) Beyond MAGIC: Evaluation of Novel Sensors and Satellite Formation Flights for Future Gravimetry Missions. MAGIC Science and Applications Workshop 2023, 2.-3.11.2023, Assisi, Italy.

Mu, Q., **Müller, J.**, Wu, H., & **Knabe, A.** (2022). Satellite Gradiometry based on a New Generation of Accelerometers and its Contribution to Earth Gravity Field Determination. COSPAR, Athen, Griechenland.

Müller, J (2022): Novel Sensors and Quantum Technology for Geodesy, GGOS Days, 14.-15. November 2022, München (online)

Müller, J (2022): Benefit of Quantum Technology for Geodesy, AGU Fall Meeting, 12.-16. Dezember 2022, Chicago, USA

Müller, J. (2023). Benefit of Quantum Technology for Geodesy. Vening Meinesz lecture, EGU 2023, 23-28 April 2023, Vienna, Austria

Müller, J. (2023). Novel Sensors and Quantum Technology for Geodesy (QuGe). Invited talk, IUGG GA 2023, 11-20 July 2023, Berlin

Müller, J. and IfE satellite gravimetry team (2023). Advancing Future Gravimetry Missions: Assessing Novel Sensors and Measurement Concepts. AGU Fall meeting, 11-15 December 2023, San Francisco, USA

Müller, J. (2024). Advancing Future Gravimetry Missions Using CAI Sensors. EC Meeting of Quantum Space Gravimetry (QSG) Consultation Platform, 14 May 2024, (virtual)

Müller, J. (2024). Benefit of Quantum Technology for Geodesy. Webinar of IAG QuGe and FIG, 29 July 2024 (virtual)

Müller, J. (2024). Status report on project QuGe. IAG EC meeting, 3 September 2024, Thessaloniki, Greece

Romeshkani, M., Müller, J., Knabe, A., und Schilling, M und Hosseini-Arani, A. (2022) Quantum technology for future earth observation from space - gradiometry case. Gravity, Geoid and Height Systems 2022, September 12-14, Austin, Texas, United States.

Romeshkani, M., Müller, J., Knabe, A., Schilling, M., (2023) Benefit of Quantum technology for future earth observation from space-gradiometry case. EGU 2023, Wien. Österreich, Apr 23-28, 2023.

Romeshkani, M., Müller, J., Knabe, A., Schilling, M. (2023) The benefit of Quantum technology for future satellite gradiometry missions, XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Berlin 2023).

Romeshkani, M., Müller, J., Knabe, A., Kupriyanov, A., & Schilling, M. (2024). Quantum Gravimetry and Other Quantum-based Sensors for Terrestrial and Space Observations and Applications. Abstract von AGU Fall Meeting 2024, Washington D.C., USA / Vereinigte Staaten.

Zingerle, P., Abrykosov, P., Pail, R., Gruber, T., **Romeshkani, M., Müller, J.**, (2022) Simulating CAI accelerometers on SST gravity field missions: first results. GGHS2022 Symposium Gravity, Geoid, and Height Systems 2022, Thompson Conference Center, UT Austin, USA, September 12-16, 2022.

Referenzen

- Abend, S., Gersemann, M., Schubert, C., et al. (2020). Atom interferometry and its applications. In E. M. Rasel, W. Schleich, & S. Wölk (Eds.), *Proceedings of the International School of Physics “Enrico Fermi”, Volume 197: Foundations of Quantum Theory* (pp. 345–392).
- Abich, K., Abramovici, A., Amparan, B., Baatzsch, A., Okiihiro, B. B., Barr, D. C., Bize, M. P., Bogan, C., Braxmaier, C., Burke, M. J., Clark, K. C., Dahl, C., Dahl, K., Danzmann, K., Davis, M. A., de Vine, G., Dickson, J. A., Dubovitsky, S., Eckardt, A., Ester, T., Barranco, G. F., Flatscher, R., Flechtner, F., Folkner, W. M., Francis, S., Gilbert, M. S., Gilles, F., Gohlke, M., Grossard, N., Guenther, B., Hager, P., Hauden, J., Heine, F., Heinzl, G., Herding, M., Hinz, M., Howell, J., Katsumura, M., Kaufer, M., Klipstein, W., Koch, A., Krüger, M., Larsen, K., Lebeda, A., Leikert, T., Liebe, C. C., Liu, J., Lobmeyer, L., Mahrtdt, C., Mangoldt, T., McKenzie, K., Misfeldt, M., Morton, P. R., Müller, V., Murray, A. T., Nguyen, D. J., Nicklaus, K., Pierce, R., Ravich, J. A., Reavis, G., Reiche, J., Sanjuan, J., Schütze, D., Seiter, C., Shaddock, D., Sheard, B., Sileo, M., Spero, R., Spiers, G., Stede, G., Stephens, M., Sutton, A., Trinh, J., Voss, K., Wang, D., Wang, R. T., Ware, B., Wegener, H., Windisch, S., Woodruff, C., Zender, B., & Zimmermann, M. (2019). In-orbit performance of the GRACE Follow-On Laser Ranging Interferometer. *Physical Review Letters*, 123(3), 031101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.031101>
- Abrykosov, P., Pail, R., Gruber, T., Zahzam, N., Bresson, A., Hardy, E., Christophe, B., Bidel, Y., Carraz, O., & Siemes, C. (2019). Impact of a novel hybrid acceleromometer on satellite gravimetry performance. *Advances in Space Research*. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.01.034>
- Aveline, D. C., Williams, J. R., Elliott, E. R., et al. (2020). Observation of Bose–Einstein condensates in an Earth-orbiting research lab. *Nature*, 582, 193–197. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2346-1>
- Beaufils, Q., Lefebvre, J., Baptista, J. G., Piccon, R., Cambier, V., Sidorenkov, L. A., Fallet, C., Lévêque, T., Merlet, S., & Pereira dos Santos, F. (2023). Rotation related systematic effects in a cold atom interferometer onboard a nadir pointing satellite. *NPJ Microgravity*, 9(1).
- Becker, D., Lachmann, M. D., Seidel, S. T., et al. (2018). Space-borne Bose-Einstein condensation for precision interferometry. *Nature*, 562, 391–395. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0605-1>
- Bidel, Y., Zahzam, N., Bresson, A., et al. (2020). Absolute airborne gravimetry with a cold atom sensor. *Journal of Geodesy*, 94, 20. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01350-2>
- Brieden, P., & Müller, J. (2014). Cross-overs assess quality of GOCE gradients. In F. Flechtner, W.-D. Schuh, & N. Sneeuw (Eds.), *Observation of the System Earth from Space - CHAMP, GRACE, GOCE and future missions*, Geotechnologies Science Report No. 20 (pp. 123-129).
- Brieden, P., Müller, J., Flury, J., & Heinzl, G. (2011). Die Einsatzoption OPTIMA - Neuerungen und Nutzen. *Geotechnologies Science Report*, 17, 134-139.
- Biskupek, L., Müller, J., & Torre, J.-M. (2021). Benefit of new high-precision LLR data for the determination of relativistic parameters. *Universe*, 7, 34. <https://doi.org/10.3390/universe7020034>
- Caldani, R., Merlet, S., Pereira Dos Santos, F., et al. (2019). A prototype industrial laser system for cold atom inertial sensing in space. *European Physical Journal D*, 73, 248. <https://doi.org/10.1140/epjd/e2019-100360-2>
- Carraz, O., Siemes, C., Massotti, L., Haagmans, R., & Silvestrin, P. (2014). A spaceborne gravity gradiometer concept based on cold atom interferometers for measuring Earth's gravity field. *Microgravity Science and Technology*, 26(3), 139-145. <https://doi.org/10.1007/s12217-014-9385-x>
- Cheng, M., & Ries, J. (2017). The unexpected signal in GRACE estimates of C20. *Journal of Geodesy*, 91, 897–914. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0995-5>
- Christophe, B., Boulanger, D., Foulon, B., Huynh, P., Lebat, V., Liorzou, F., & Perrot, E. (2015). A new generation of ultra-sensitive electrostatic accelerometers for GRACE Follow-on and towards the next generation gravity missions. *Acta Astronautica*, 117, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.06.021>
- Christophe, B., Foulon, B., Liorzou, F., Lebat, V., Boulanger, D., Huynh, P. A., Zahzam, N., Bidel, Y., & Bresson, A. (2018). Status of Development of the Future Accelerometers for Next Generation Gravity Missions. In J. Freymueller & L. Sánchez (Eds.), *International Symposium on Advancing Geodesy in a Changing World*, International Association of Geodesy Symposia (Vol. 149). Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/1345201842>

- Dalin, M., Lebat, V., Boulanger, D., Liorzou, F., Christophe, B., Rodrigues, M., & Huynh, P. (2020). ONERA accelerometers for future Gravity Mission. EGU 2020. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-5721>
- Dobslaw, H., Bergmann-Wolf, I., Dill, R., et al. (2015). The updated ESA Earth System Model for future gravity mission simulation studies. *Journal of Geodesy*, 89, 505–513. <https://doi.org/10.1007/s00190-014-0787-8>
- Douch, K., Wu, H., Schubert, C., Müller, J., & Pereira Dos Santos, F. (2018). Simulation-based evaluation of a cold atom interferometry gradiometer concept for gravity field recovery. *Advances in Space Research*, 61, 1307–1323. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.12.005>
- Elsaka, B., Raimondo, J.-C., Brieden, P., Reubelt, T., Kusche, J., Flechtner, F., Pour, S. I., Sneeuw, N., & Müller, J. (2014). Comparing seven candidate mission configurations for temporal gravity field retrieval through full-scale numerical simulation. *Journal of Geodesy*, 88, 31–43. <https://doi.org/10.1007/s00190-013-0665-9>
- Fitzek, F., Siemß, J.-N., Seckmeyer, S., et al. (2020). Universelle Atom-Interferometer-Simulation von elastischen Streuprozessen. *Scientific Reports*, 10, 22120. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78859-1>
- Freier, C., Hauth, M., Schkolnik, V., et al. (2016). Mobile quantum gravity sensor with unprecedented stability. *Journal of Physics: Conference Series*, 723, 012050. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/723/1/012050>
- Gruber, T., Murböck, M., Baldesarra, M., Brieden, P., Danzmann, K., Daras, I., Doll, B., Feili, D., Flechtner, F., Flury, J., Heinzl, G., Iran Pour, S., Kusche, J., Langemann, M., Löcher, A., Müller, J., Müller, V., Naeimi, M., Pail, R., Raimondo, J., Reiche, J., Reubelt, T., Sheard, B., Sneeuw, N., & Wang, X. (2014). e2.motion: Earth System Mass Transport Mission (Square) - Concept for a Next Generation Gravity Field Mission - Final report of project "Satellite Gravimetry of the Next Generation (NGGM-D)". Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften Reihe B, Angewandte Geodäsie, 318. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften und in Kommission beim Verlag C.H. Beck. ISBN: 9783769685978.
- Haagmans, R., Siemes, C., Massotti, L., et al. (2020). ESA's next-generation gravity mission concepts. *Rendiconti Lincei - Scienze Fisiche e Naturali*. <https://doi.org/10.1007/s12210-020-00875-0>
- Heine, N., Matthias, J., Sahelgozin, M., et al. (2020). A transportable quantum gravimeter employing delta-kick collimated Bose-Einstein condensates. *European Physical Journal D*, 74, 174. <https://doi.org/10.1140/epjd/e2020-10120-x>
- HosseiniArani, A., Schilling, M., Beaufils, Q., Knabe, A., Tennstedt, B., Kupriyanov, A., Schön, S., Pereira dos Santos, F., & Müller, J. (2022). Advances in Atom Interferometry and their Impacts on the Performance of Quantum Accelerometers On-board Future Satellite Gravity Missions. *Advances in Space Research*, 74(7), 3186–3200. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.06.055>
- HosseiniArani, A., Schilling, M., Beaufils, Q., Knabe, A., Tennstedt, B., Kupriyanov, A., Schön, S., Pereira dos Santos, F., & Müller, J. (2024). Advances in Atom Interferometry and their Impacts on the Performance of Quantum Accelerometers On-board Future Satellite Gravity Missions. *Advances in Space Research*, 74(7), 3186–3200. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.06.055>
- Jäggi, A., Weigelt, M., Flechtner, F., et al. (2019). European Gravity Service for Improved Emergency Management (EGSIEM) - from concept to implementation. *Geophysical Journal International*, 218, 1572–1590. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz238>
- Klinger, B., & Mayer-Gürr, T. (2016). The of accelerometer data calibration within GRACE gravity field recovery: Results from ITSG-Grace2016. *Advances in Space Research*, 58(9), 1597–1609. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.08.007>
- Knabe, A., Schilling, M., Wu, H., Hosseini-Arani, A., Müller, J., Beaufils, Q., & Pereira dos Santos, F. (2022). The Benefit of Accelerometers based on Cold Atom Interferometry for Future Satellite Gravity Missions. In *International Association of Geodesy Symposia*. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/13452022151>
- Knabe, A. (2023). New Concepts for Gravity Field Recovery using Satellites [Dissertation]. ISSN 0065-5325, ISBN 978-3-7696-5328-1.
- Kornfeld, R. P., Arnold, B. W., Gross, M. A., Dahya, N. T., Klipstein, W. M., Gath, P. F., & Bettadpur, S. (2019). GRACE-FO: The Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On Mission. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 56(3), 931–951. <https://doi.org/10.2514/1.A34326>
- Lachmann, M. D., Ahlers, H., Becker, D., et al. (2021). Ultracold atom interferometry in space. *Nature Communications*, 12, 1317. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21628-z>

- Lautier, J., Volodimer, L., Hardin, T., Merlet, S., Lours, M., Pereira dos Santos, F., & Landragin, A. (2014). Hybridizing matter-wave and classical accelerometers. *Applied Physics Letters*, 105(14), 144102.
- Lévêque, T., Fallet, C., Lefebvre, J., Piquereau, A., Gauguier, A., Battelier, B., Bouyer, P., Gaaloul, N., Lachmann, M., Piest, B., Rasel, E., Müller, J., Schubert, C., Beaufils, Q., & Pereira Dos Santos, F. (2022). CARIOQA: Definition of a Quantum Pathfinder Mission. *International Conference on Space Optics—ICSO 2022*. Vol. 12777. <https://doi.org/10.1117/12.2690536>
- Loomis, B. D., Rachlin, K. E., & Luthcke, S. B. (2019). Improved Earth Oblateness Rate Reveals Increased Ice Sheet Losses and Mass-Driven Sea Level Rise. *Geophysical Research Letters*, 46, 6910–6917. <https://doi.org/10.1029/2019GL082929>
- Müller, J. (2001). Die Satellitengradiometrie GOCE - Theorie, technische Realisierung und wissenschaftliche Nutzung. Veröffentlichung der Deutschen Geodätischen Kommission, Habilitation, Reihe C, Nr. 541, München.
- Müller, J., Naeimi, M., Gitlein, O., et al. (2012). A land uplift model in Fennoscandia combining GRACE and absolute gravimetry data. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 53-54, 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.12.006>
- Müller, J., Dirx, D., Kopeikin, S. M., et al. (2018). High performance clocks and gravity field determination. *Space Science Reviews*, 214, 5. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0431-z>
- Müller, J., Hofmann, F., & Biskupek, L. (2019). Why to measure the distance to the moon. In *BWG Jahrbuch 2018*. Braunschweig: J. Cramer Verlag, S. 17–28.
- Müller, J., & Wu, H. (2020). Using quantum optical sensors for determining the Earth's gravity field from space. *Journal of Geodesy*, 94, 71. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01401-8>
- NGGM-D Team. (2014). e2.motion - Earth System Mass Transport Mission (Square) - Concept for a Next Generation Gravity Field Mission - Final Report of Project "Satellite Gravimetry of the Next Generation (NGGM-D)". ISBN 978-3-7696-8597-8. DGK-Schriftenreihe B Nr. 318.
- Pail, R., Bamber, J., Biancale, R., Niebauer, T., Pottier, E., Landerer, F., Wiese, D., Gruber, T., Hugentobler, U., Flechtner, F., & Müller, J. (2019). Mass variation observing system by high low inter-satellite links (MOBILE) - a new concept for sustained observation of mass transport from space. *Journal of Geodetic Science*, 9, 48–58. <https://doi.org/10.1515/jogs-2019-0006>
- Pail, R., Bingham, R., Braitenberg, C., Dobslaw, H., Eicker, A., Güntner, A., Horwath, M., Ivins, E., Longuevergne, L., Panet, I., & Wouters, B. (2015). Science and User Needs for Observing Global Mass Transport to Understand Global Change and to Benefit Society. *Surveys in Geophysics*, 36(6), 743–772. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9348-9>
- Romeshkani, M., Müller, J., Knabe, A., & Schilling, M. (2025). Quantum gravimetry for future satellite gradiometry. *Advances in Space Research*, 75(2), 1653–1664. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.11.072>
- Romeshkani, M., Müller, J., Knabe, A., & Schilling, M. (2023). Benefit of Quantum technology for future earth observation from space-gradiometry case. *EGU 2023, Vienna, Austria, Apr 23–28, 2023*.
- Steffen, H., Gitlein, O., Denker, H., Müller, J., & Timmen, L. (2009). Present rate of uplift in Fennoscandia from GRACE and absolute gravimetry. *Tectonophysics*, 474, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.01.012>
- Shabanloui, A., & Müller, J. (2015). Mass Variations in the Siberian Permafrost Region Based on New GRACE Results and Auxiliary Modeling. In S. Jin & R. Barzaghi (Eds.), *IGFS 2014, International Association of Geodesy Symposia (Vol. 144, pp. 189–197)*. Springer International Publishing, Cham.
- Schilling, M., Wodey, É., Timmen, L., et al. (2020). Gravity field modeling for the Hannover 10 m atom interferometer. *Journal of Geodesy*, 94, 122. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01451-y>
- Tapley, B. D., Watkins, M. M., Flechtner, F., Reigber, C., Bettadpur, S., Rodell, M., Sasgen, I., Famiglietti, J. S., Landerer, F. W., Chambers, D. P., Reager, J. T., Gardner, A. S., Save, H., Ivins, E. R., Swenson, S. C., Boening, C., Dahle, C., Wiese, D. N., Dobslaw, H., Tamisiea, M. E., & Velicogna, I. (2019). Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nature Climate Change*, 9(5), 358–369. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0456-2>

- Trimeche, A., Battelier, B., Becker, D., Stern, G., Aguilera, D., Bertoldi, A., Bouyer, P., Braxmaier, C., Calonico, D., Dittus, H., Franciolini, M., Hartwig, J., Hauth, M., Ibrahim, H., Nofrarias, M., Osullivan, B., Peters, A., Schleich, W., Schubert, C., Sopena, C. F., Suleiman, H., Summhammer, J., Wodey, E., Zahzam, N., Araújo, H., Chiofalo, M. L., Dos Santos, F. P., Ertmer, W., Klein, H., Landragin, A., Lemonde, P., Picard, F., Prevedelli, M., Rasel, E., Reynaud, S., Schiller, S., Schlippert, D., Sorrentino, F., Del Aguila, R. S., Tino, G. M., von Klitzing, W., & Müller, J. (2019). Concept study and preliminary design of a cold atom interferometer for space gravity gradiometry. *Classical Quantum Gravity*, 36, 215004. <https://doi.org/10.1088/1361-6382/ab4548>
- Vey, S., Steffen, H., Müller, J., & Boike, J. (2013). Inter-annual water mass variations from GRACE in central Siberia. *Journal of Geodesy*, 87, 287–299. <https://doi.org/10.1007/s00190-012-0597-9>
- Wiese, D. N., Visser, P. N. A. M., & Nerem, R. S. (2011). Estimating low resolution gravity fields at short time intervals to reduce temporal aliasing errors. *Advances in Space Research*, 48, 1094–1107. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.05.027>
- Wöske, F., Kato, T., List, M., & Rievers, B. (2016). Development of a high precision simulation tool for gravity recovery missions like GRACE. In R. Zanetti, R. P. Russel, M. T. Ozimek, & A. L. Bowes (Eds.), *Proceedings of the 26th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting*. Vol. 158. *Advances in the Astronautical Sciences*, 2445–2457.
- Wu, H., Müller, J., & Brieden, P. (2015). The IFE global gravity field model recovered from GOCE orbit and gradiometer data. In *Proceedings of the 5th International GOCE User Workshop*, ESA Special Publication SP-728, CD-ROM.
- Wu, H., Müller, J., & Lämmerzahl, C. (2019). Clock networks for height system unification: a simulation study. *Geophysical Journal International*, 216, 1594–1607. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy508>
- Zahzam, N., Christophe, B., Lebat, V., Hardy, É., Huynh, P., Marquet, N., Blanchard, C., Bidel, Y., Bresson, A., Abrykosov, P., Gruber, T., Pail, R., Daras, I., & Carraz, O. (2022). Hybrid Electrostatic-Atomic Accelerometer for future space gravity missions. *Remote Sensing*, 14(14), 3273. <https://doi.org/10.3390/rs14143273>
- Zingerle, P., Romeshkani, M., Haas, J., Gruber, T., Güntner, A., Müller, J., & Pail, R. (2024). The Benefits of Future Quantum Accelerometers for Satellite Gravimetry. *Earth and Space Science*, 11(9), e2024EA003630. <https://doi.org/10.1029/2024EA003630>