

Was haben Atome je für uns getan?

I've got lasers. You've got atoms.

Geodäsie

Und was ich damit mache

- Geodäsie = Vermessung

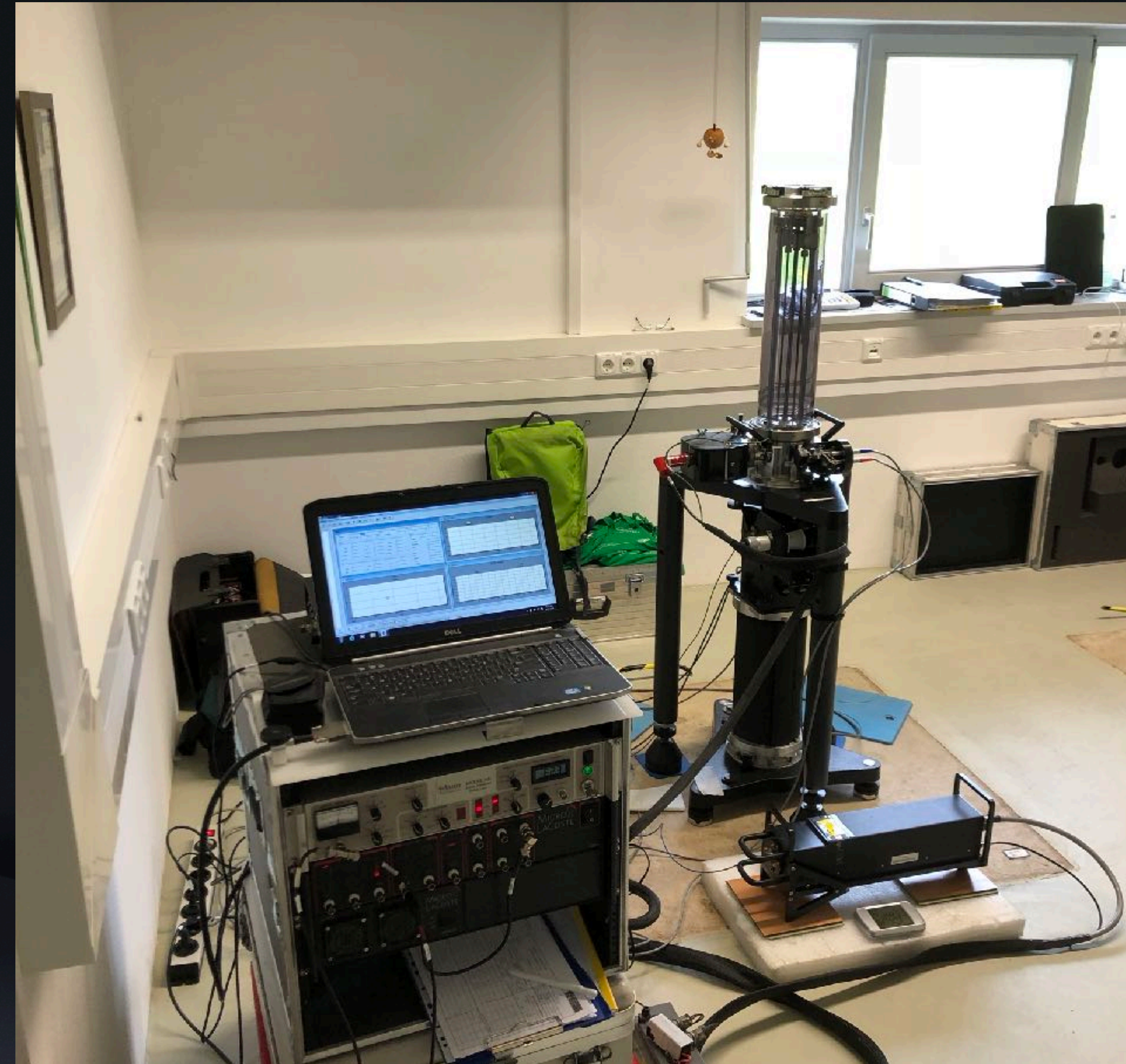


„Klassische“ Vermessung (LUH / IfE)

Geodäsie

Und was ich damit mache

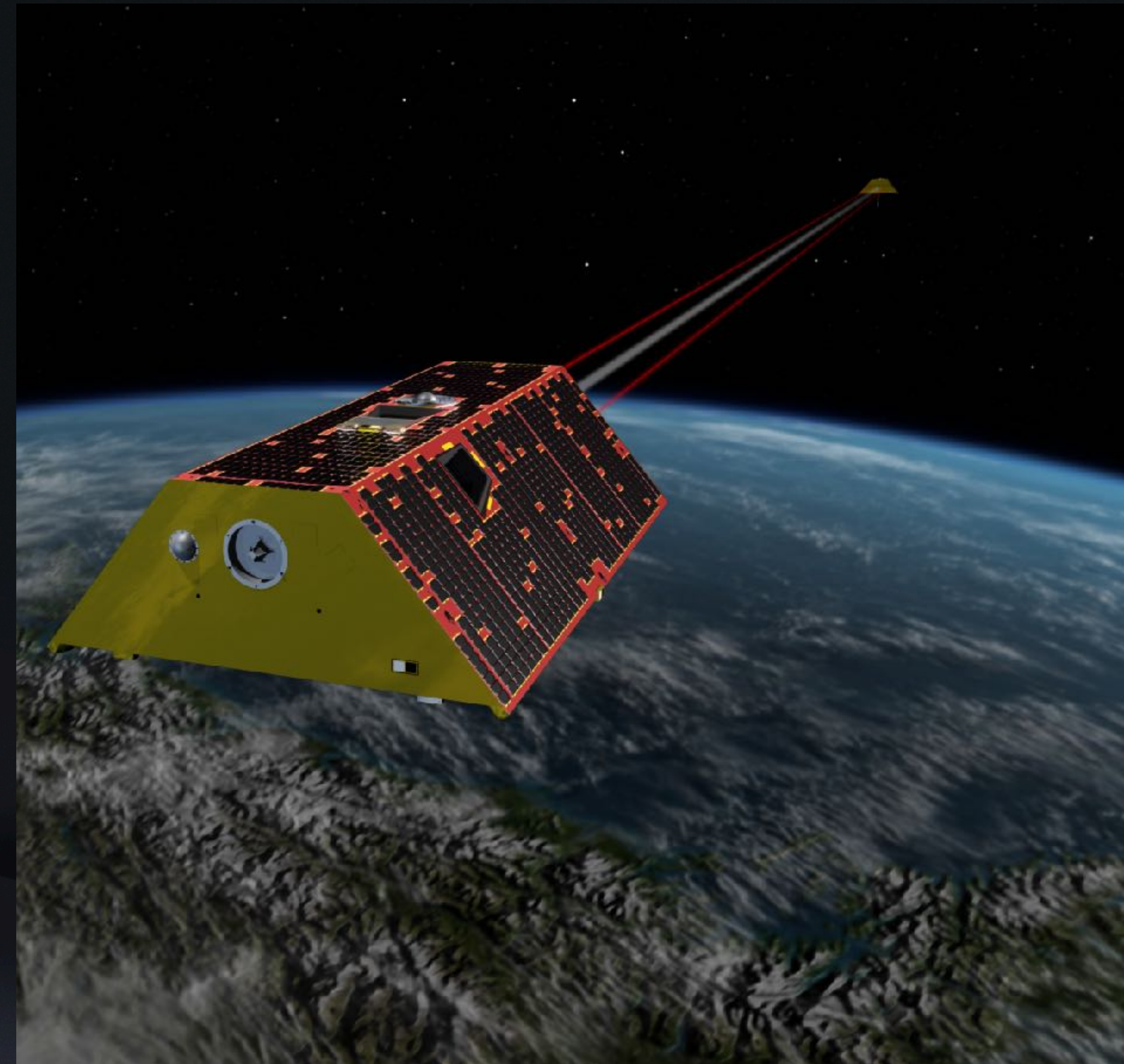
- Geodäsie = Vermessung
- Vermessung und Modellierung des Schwerefeldes



Geodäsie

Und was ich damit mache

- Geodäsie = Vermessung
- Vermessung und Modellierung des Schwerefeldes
- Schwerefeld-Satellitenmissionen unter Verwendung „neuartiger“ Sensoren



GRACE-FO (NASA / JPL)

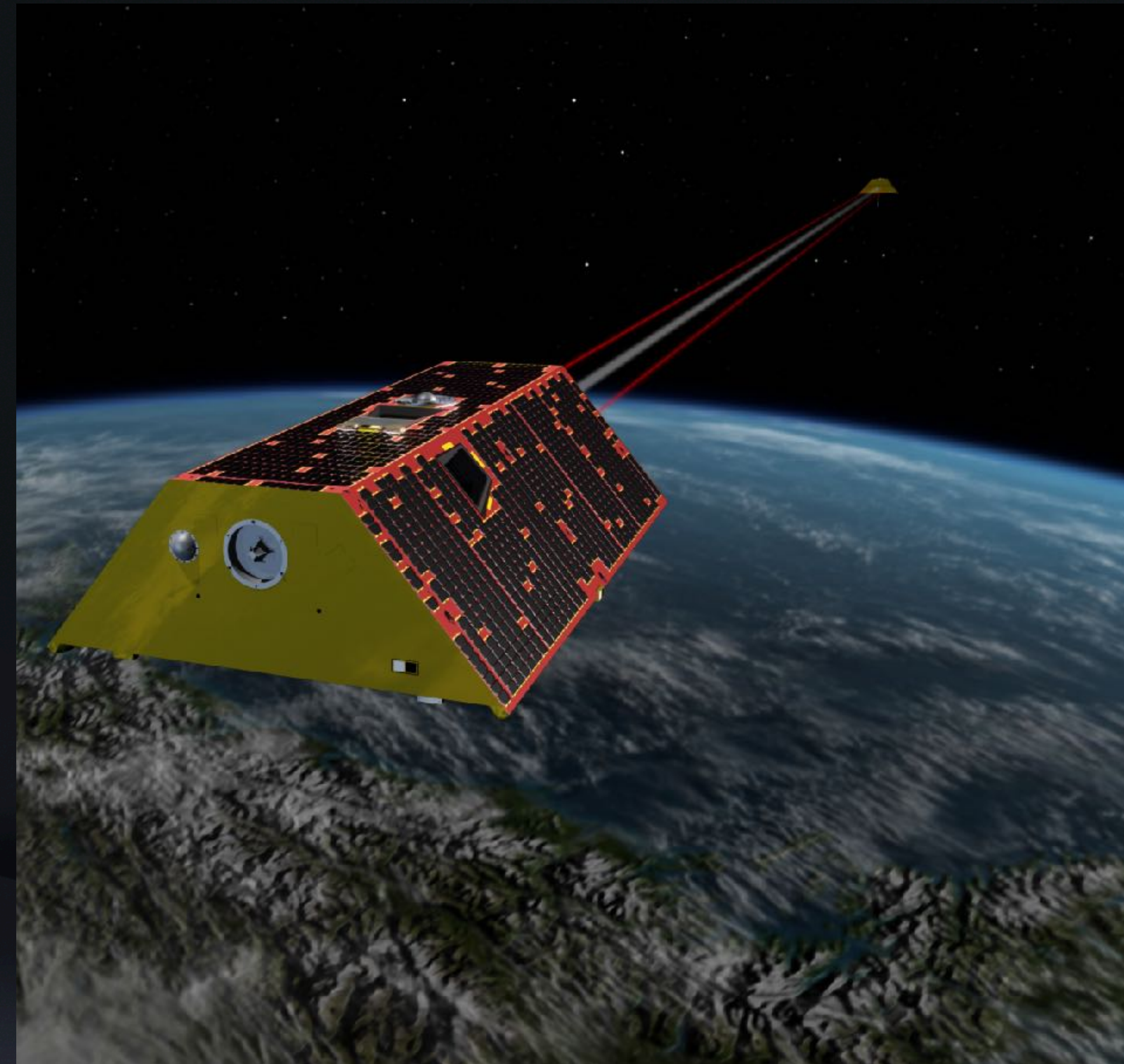
Geodäsie

Und was ich damit mache

- Geodäsie = Vermessung
- Vermessung und Modellierung des Schwerefeldes
- Schwerefeld-Satellitenmissionen unter Verwendung „neuartiger“ Sensoren

Inhalt

- „Klassische-“ und Quantensensorik
- Anwendungen im Schwerefeld



GRACE-FO (NASA / JPL)

„Klassisch“ oder „Quantum“?

Definition

„Quantum“ oder nicht?

Quantensensoren nutzen die gezielte Manipulation von Quantenzuständen als Messmethode.



„Klassisch“ = nicht „Quantum“

Klassische Instrumente stellen in vielen Bereichen den Stand der Technik.

Atominterferometrie

Beschleunigungsmessung mittels Atominterferometrie



Atome + Laser = Beschleunigung?

- Atominterferometer nutzen die Welleneigenschaften von Atomen
- Welleneigenschaften werden durch gezielte Laserimpulse verändert
- Anfällig u.a. für Schwerkraft, Rotationen, Magnetfelder, ...

Atominterferometrie

„Bausteine“

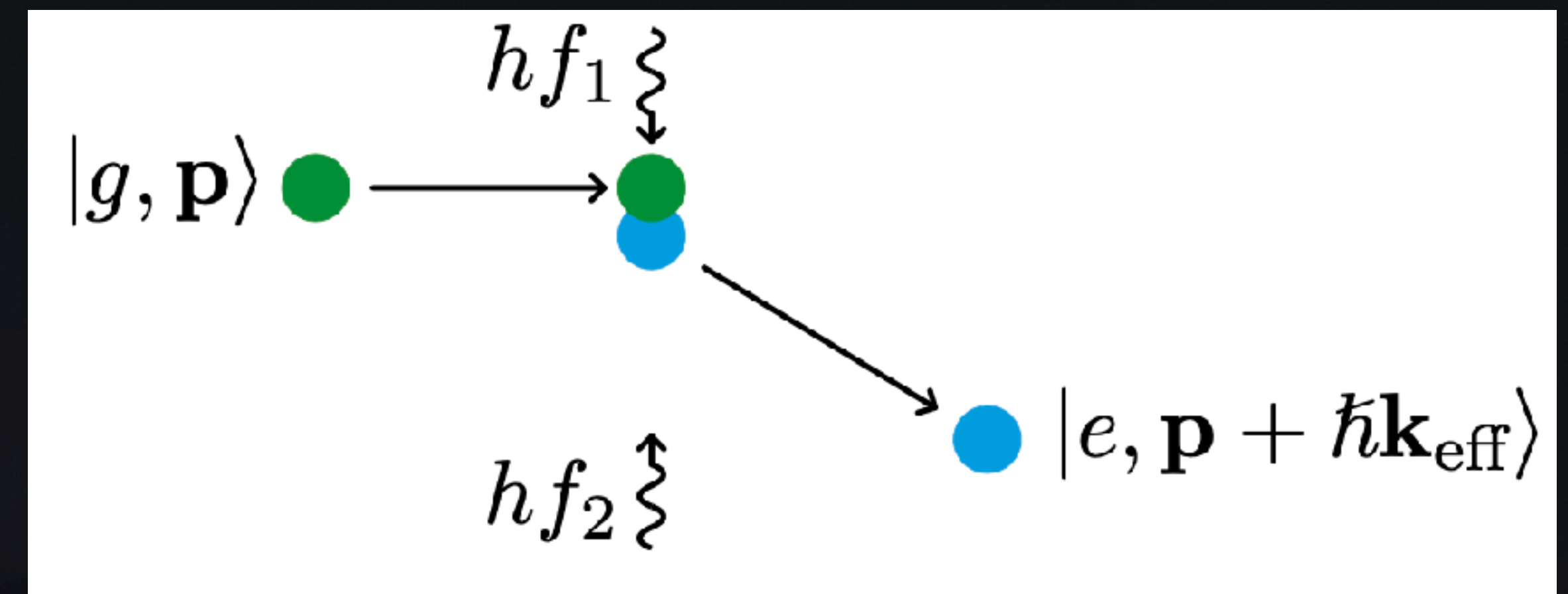


Atome interagieren mit zwei Photonen

- Energie $E = h(f_1 - f_2)$
- Impuls $\delta\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}_{eff}$

Bausteine eines Atominterferometers

- Spiegel: 100% Interaktion
- Strahlteiler: 50% Interaktion



Spiegel

Atominterferometrie

„Bausteine“

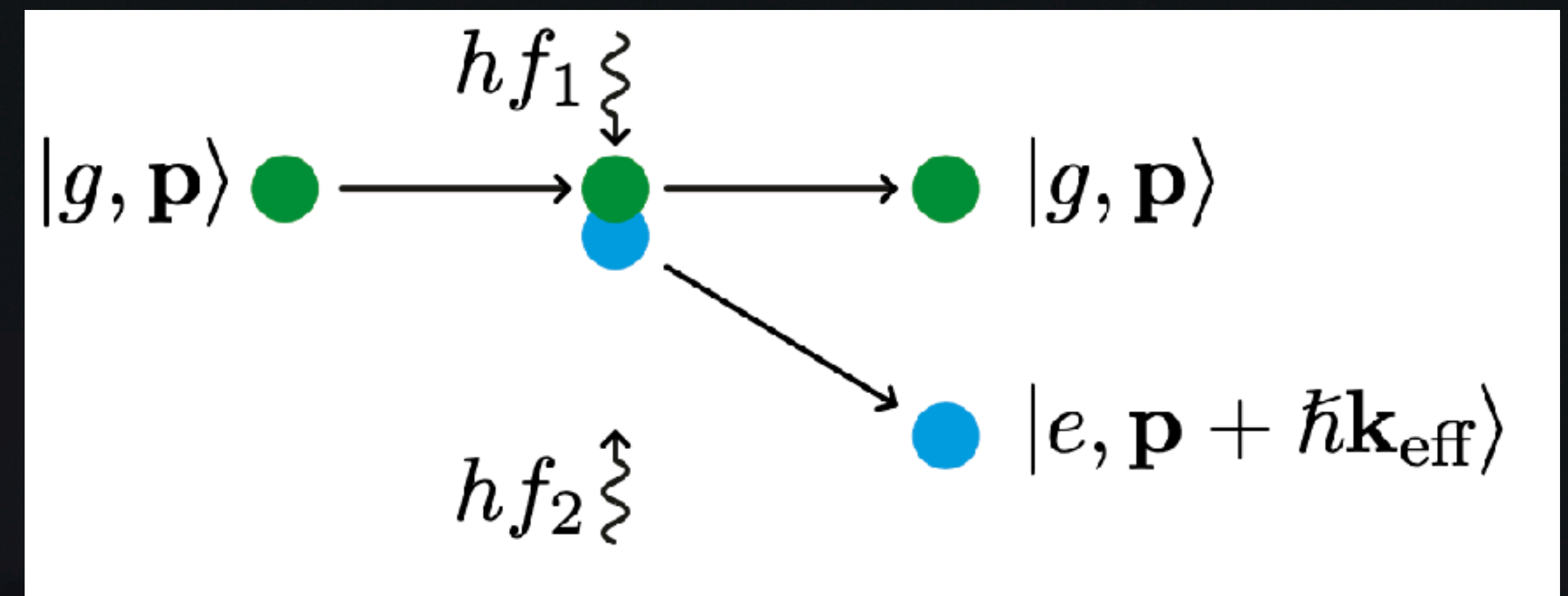


Atome interagieren mit zwei Photonen

- Energie $E = h(f_1 - f_2)$
- Impuls $\delta\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}_{eff}$

Bausteine eines Atominterferometers

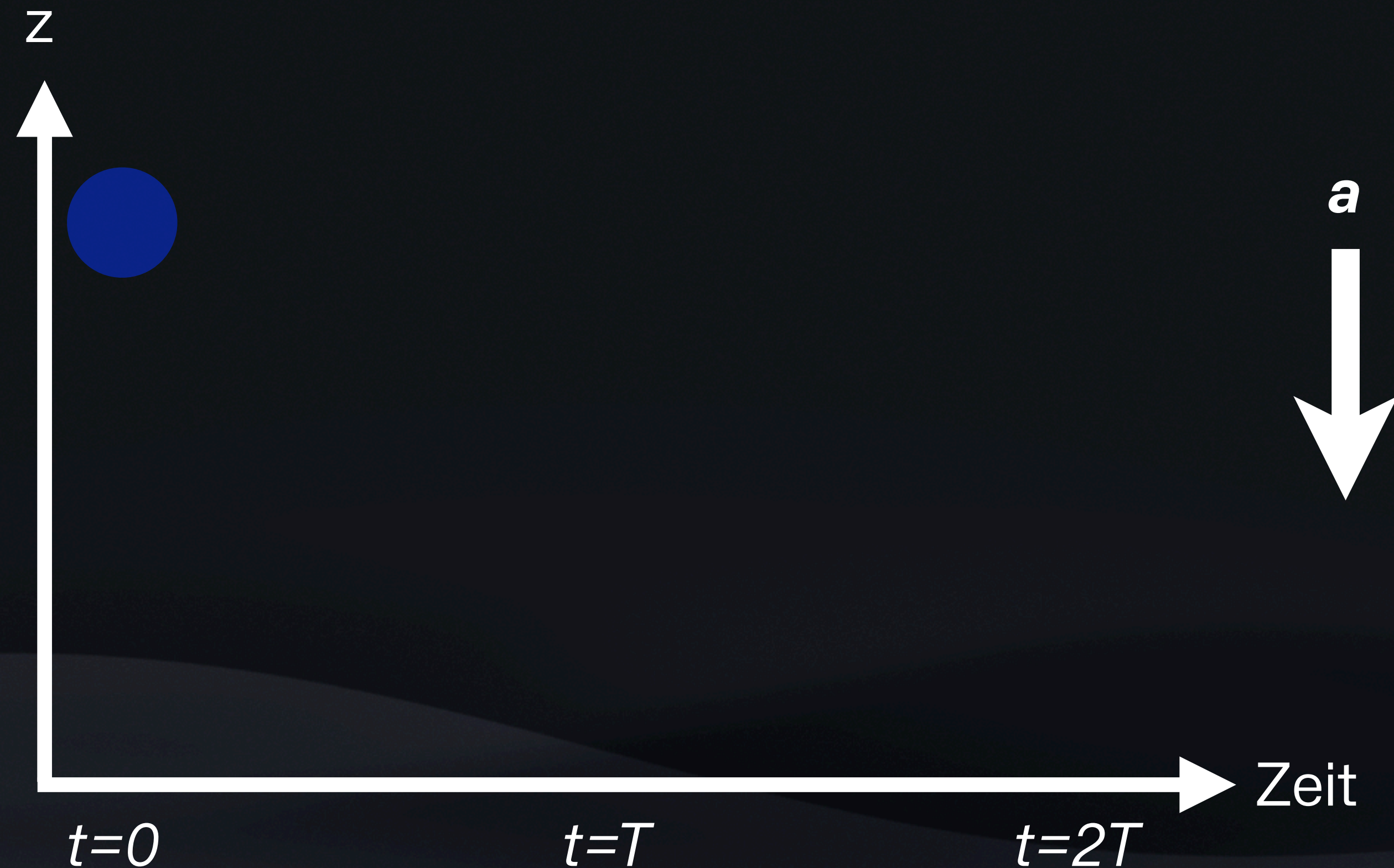
- Spiegel: 100% Interaktion
- Strahlteiler: 50% Interaktion



Strahlteiler

Einführung

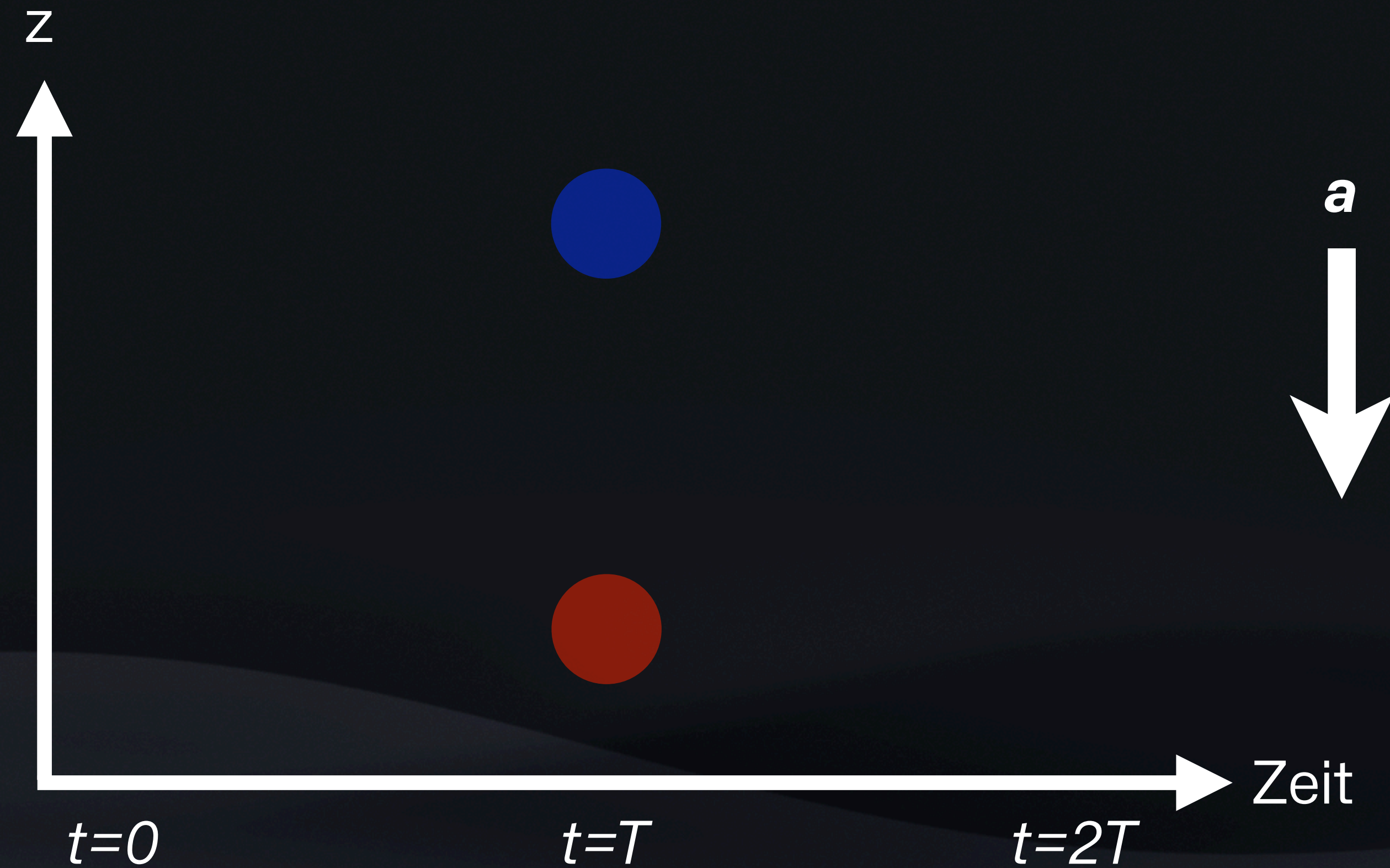
Atominterferometer Sequenz



Kasevich und Chu (1991, 1992)

Einführung

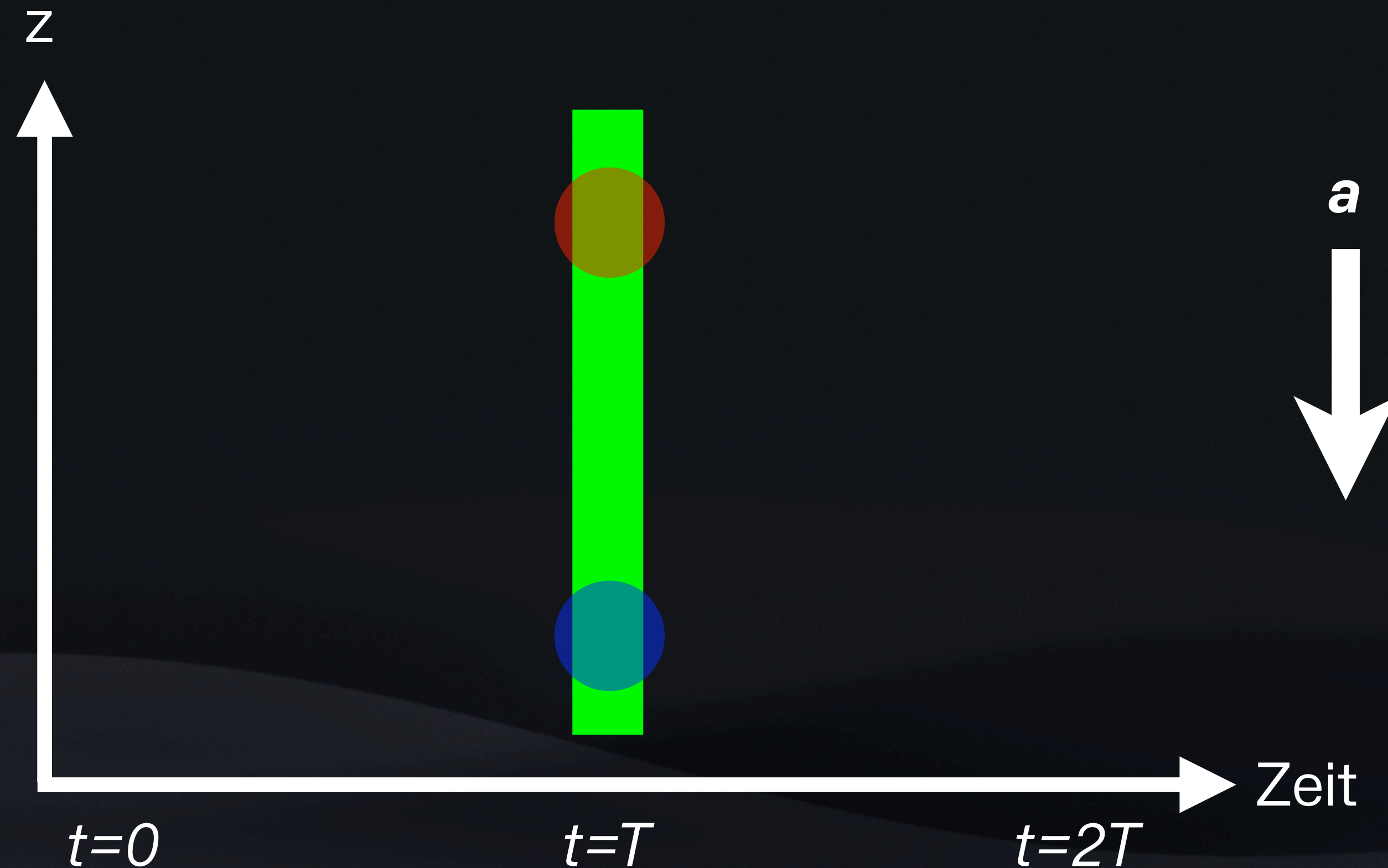
Atominterferometer Sequenz



Kasevich und Chu (1991, 1992)

Einführung

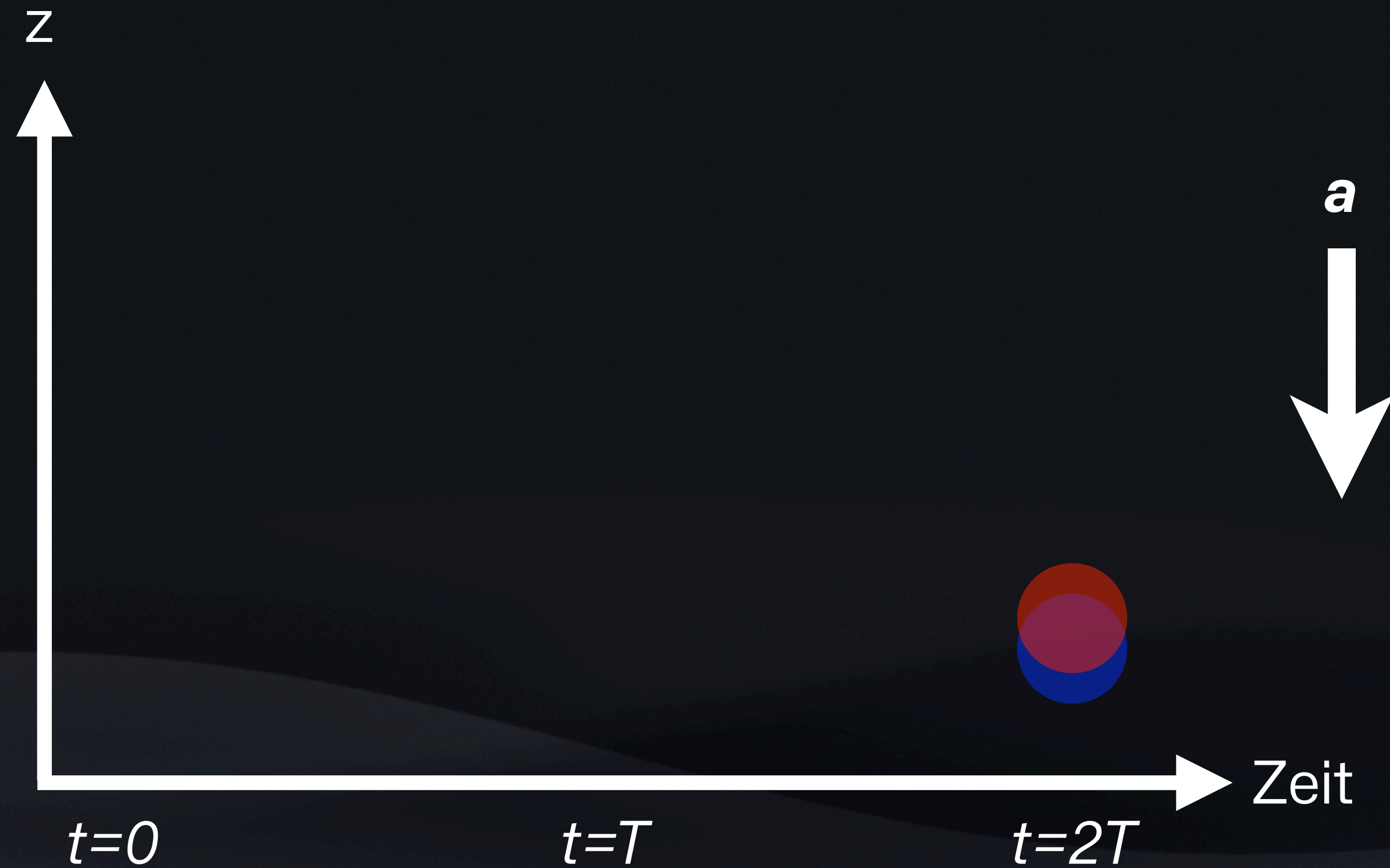
Atominterferometer Sequenz



Kasevich und Chu (1991, 1992)

Einführung

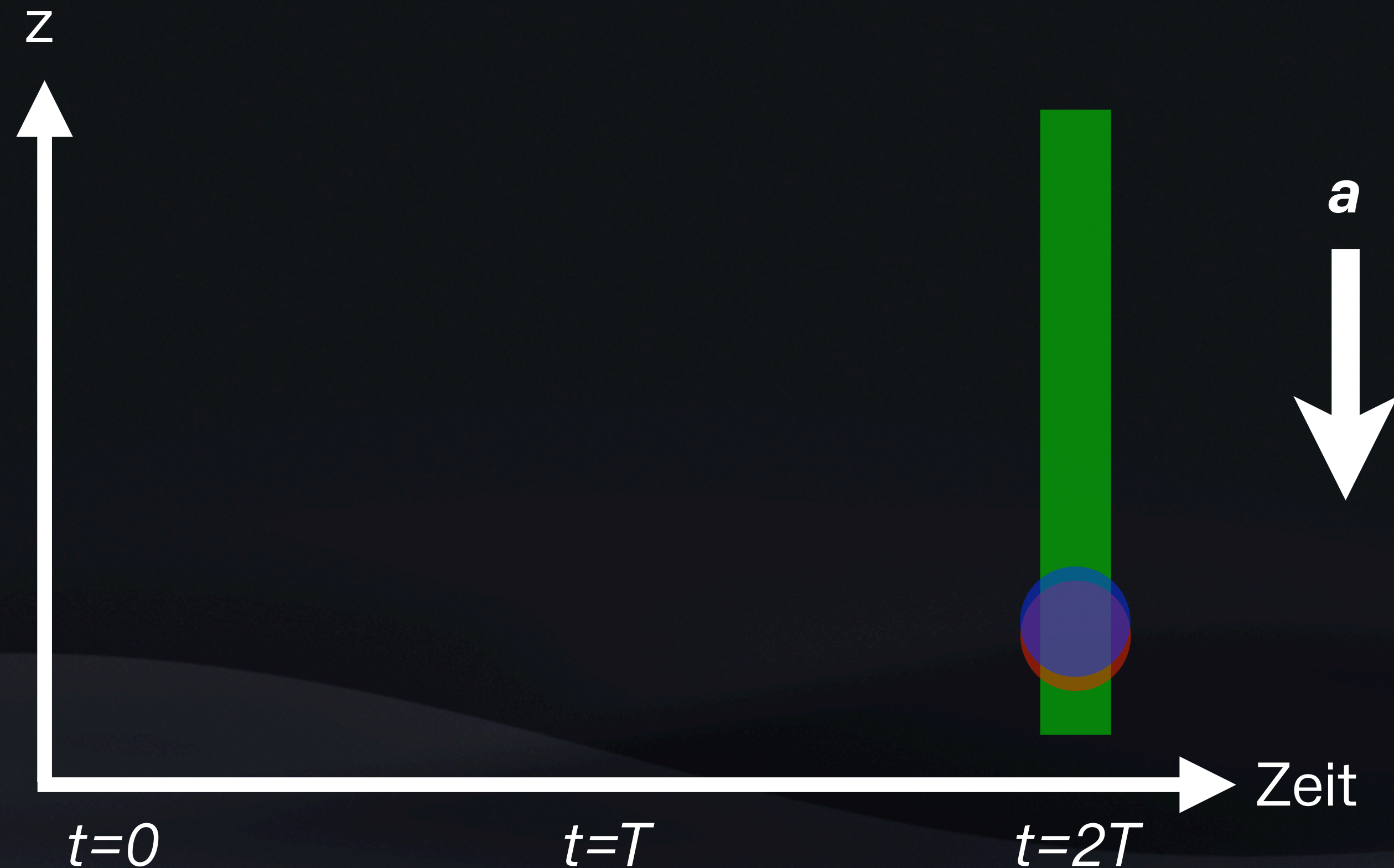
Atominterferometer Sequenz



Kasevich und Chu (1991, 1992)

Einführung

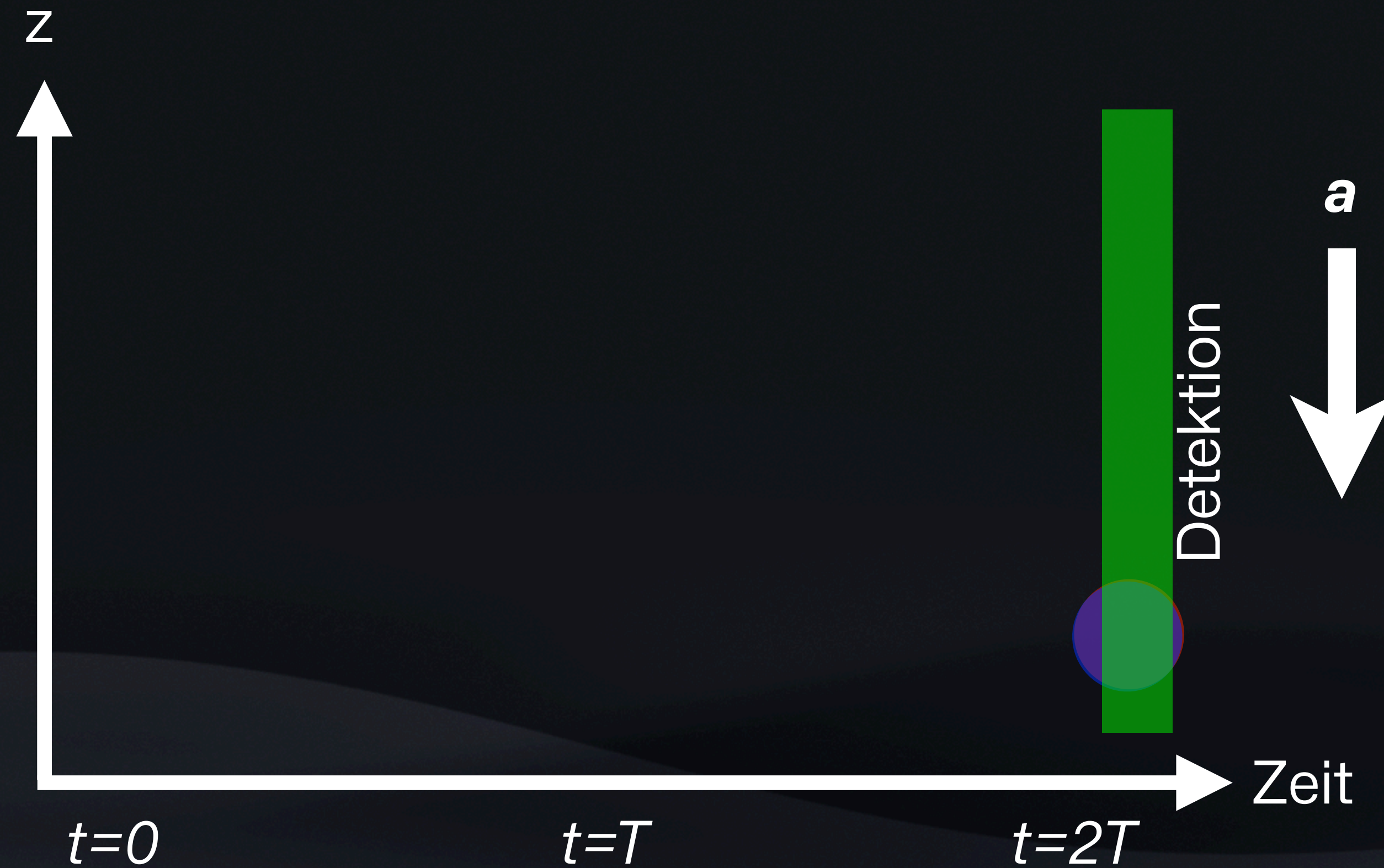
Atominterferometer Sequenz



Kasevich und Chu (1991, 1992)

Einführung

Atominterferometer Sequenz



Kasevich und Chu (1991, 1992)

Einführung

Atominterferometer Sequenz

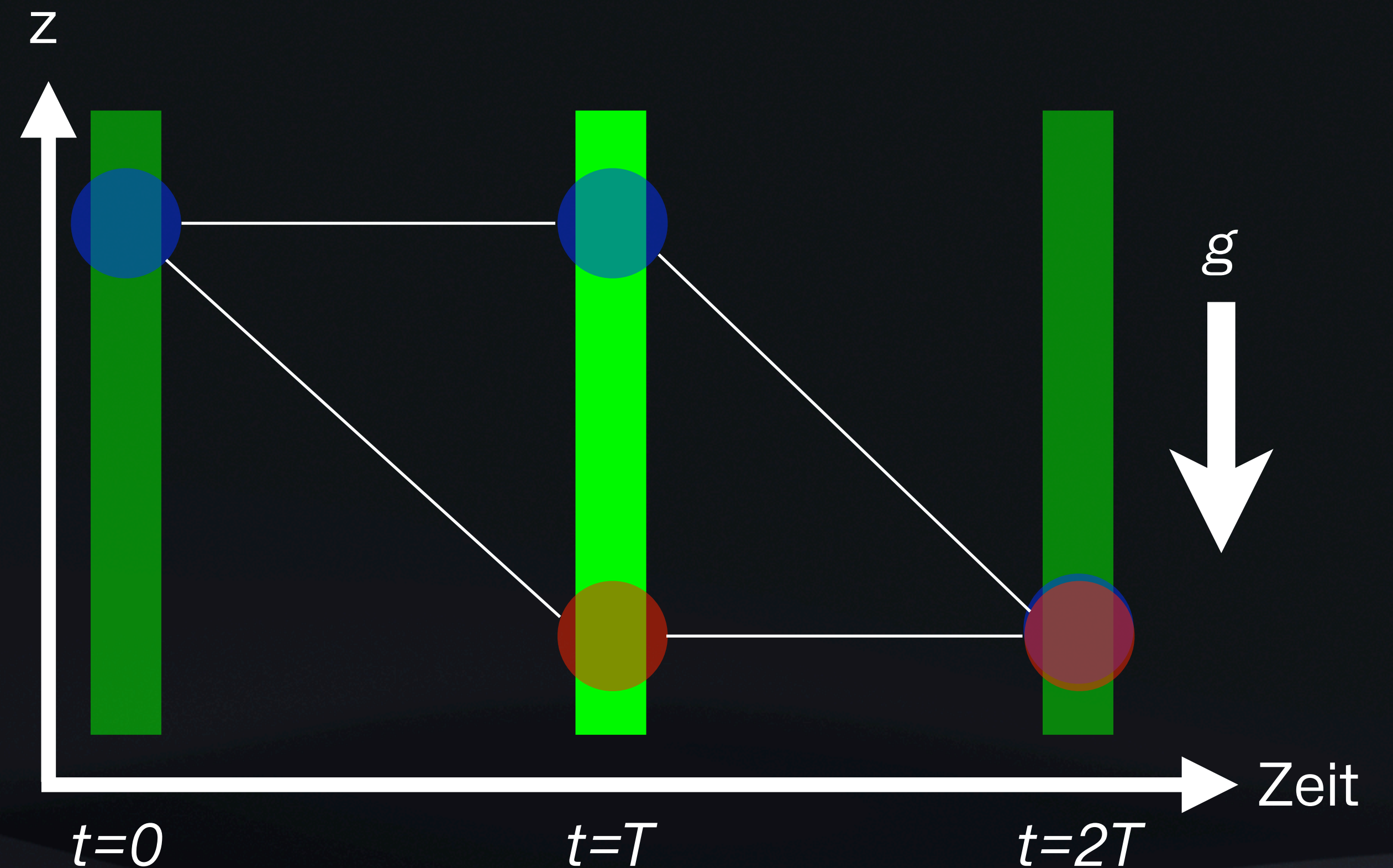
- Detektion: Atome in zwei Zuständen

- Besetzung Zustand e

$$P_e = \frac{1}{2} (1 - \cos \Delta\Phi)$$

- Interferometerphase Gravimeter

$$\Delta\Phi = k_{eff} g T^2$$



Kasevich und Chu (1991, 1992)

Atominterferometrie

Kurzfassung

- Atome interagieren mit Photonen/Laserlicht
- Die Messgröße hängt ab von
 - ☒ Geometrie der Laserstrahlen
 - ☒ Timing der Laserpulse
 - ☒ Bewegungsrichtung der Atome
- Geometrie und Timing sind vielseitig

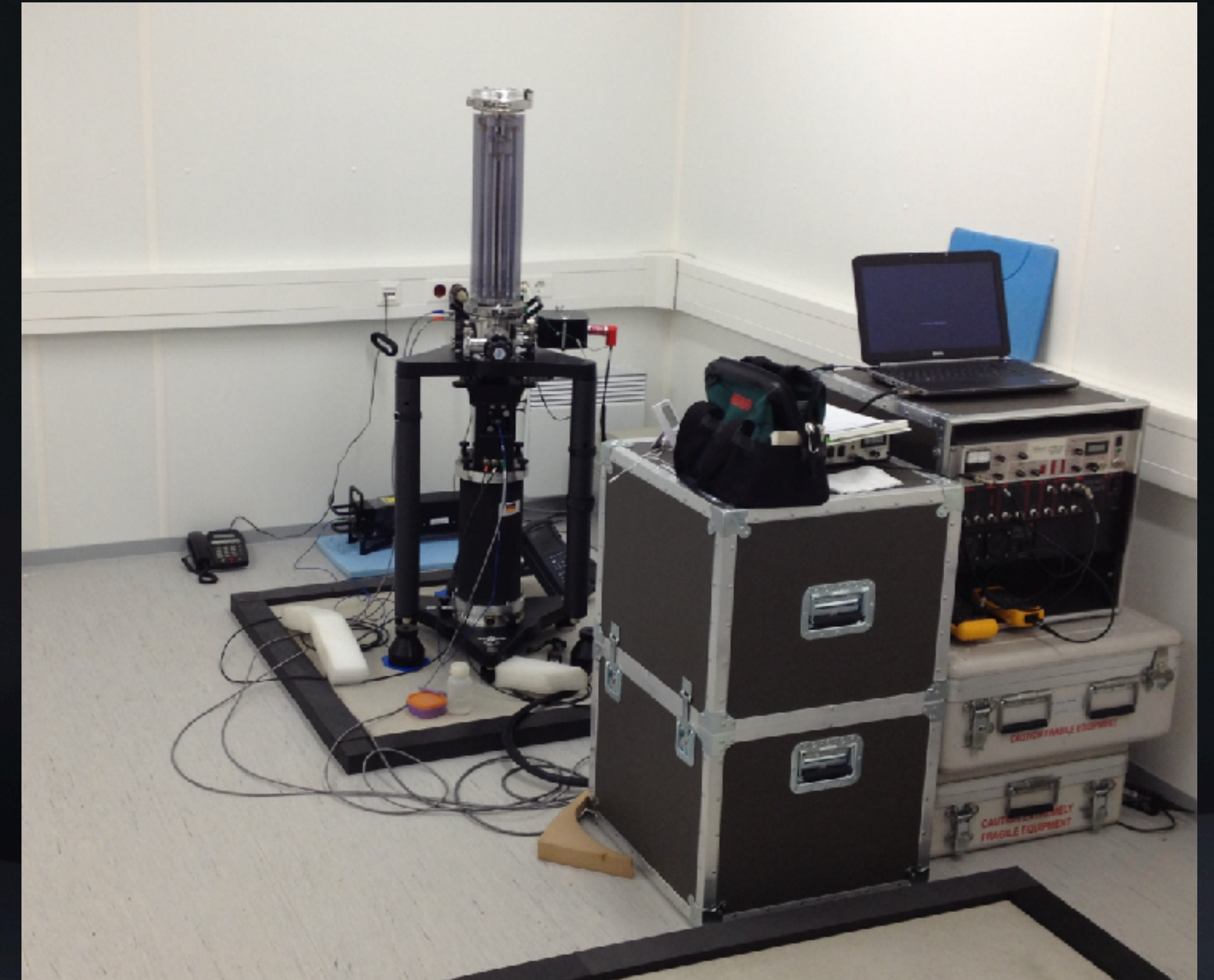
Gravimeter

Anwendung: Gravimeter

Der „Klassiker“

Anwendungen in Geophysik, Geodäsie, Hydrologie, Metrologie, ...

- Überwachung von Georisiken
- Beobachtung geophysikalischer Prozesse
- Referenznetze (Höhe, Schwere)
- Überwachung von Grundwasserspeichern



Absolutgravimeter FG5X-220 (Niebauer et al. 1995,2013) der LUH / IfE

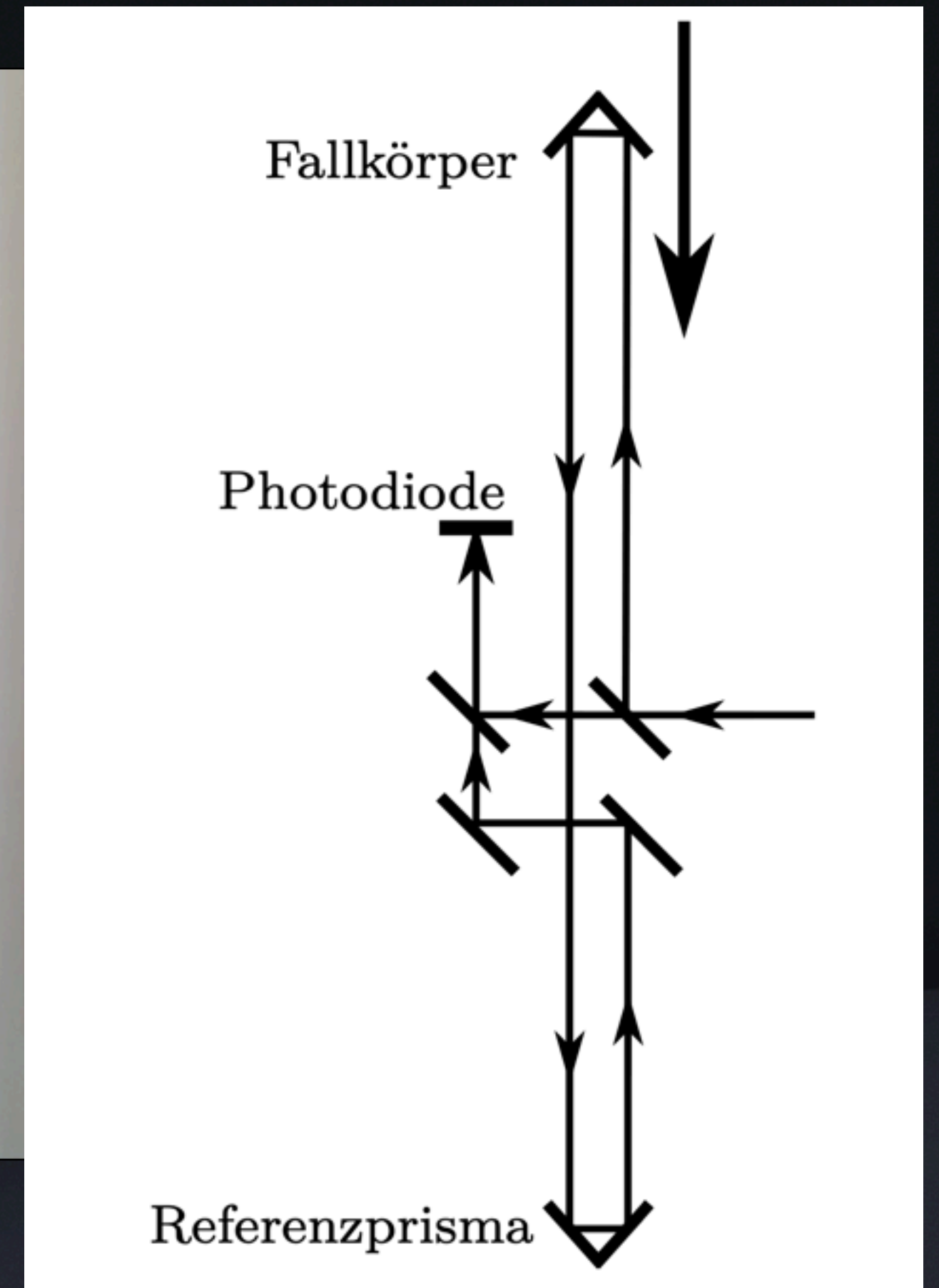
Anwendung: Gravimeter

Funktionsweise klassisches Gravimeter

Freifallexperiment

- Laserinterferometer: Fallstrecke z
- Atomuhr: Zeitstempel t
- Vereinfachte Beobachtungsgleichung:

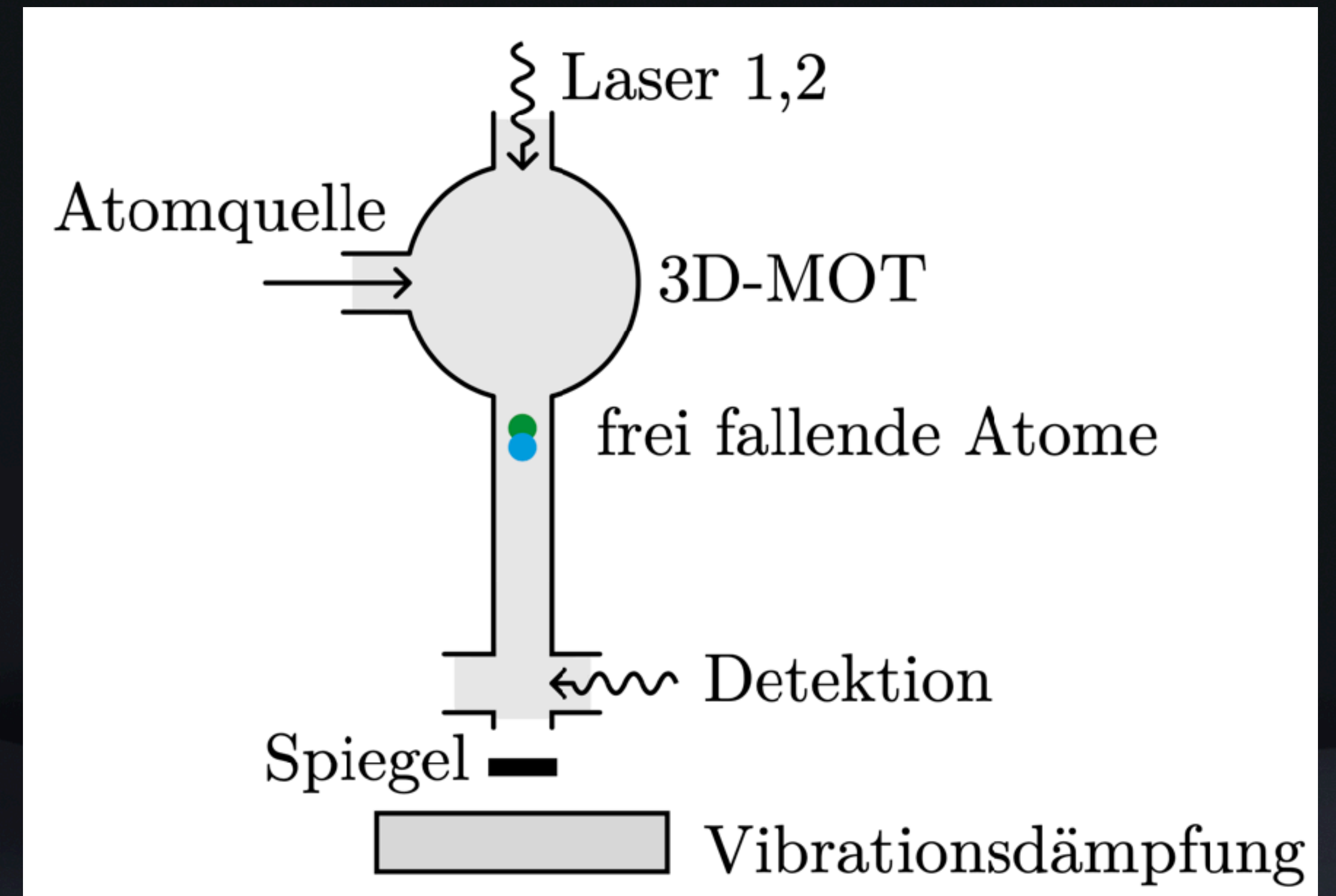
$$z(t) = z_0 + v_0 t + \frac{1}{2} g t^2$$



Anwendung: Gravimeter

Beispiel: Quantengravimeter

- Kein dynamisches System
 - ☒ geringere Ansprüche an Stellplatz
- Kontinuierlicher Betrieb
 - ☒ „klassisch“: zweites Gerät notwendig
- Hohe Datenrate: Faktor 10+
- Effektive Isolierung gegen äußere Störungen

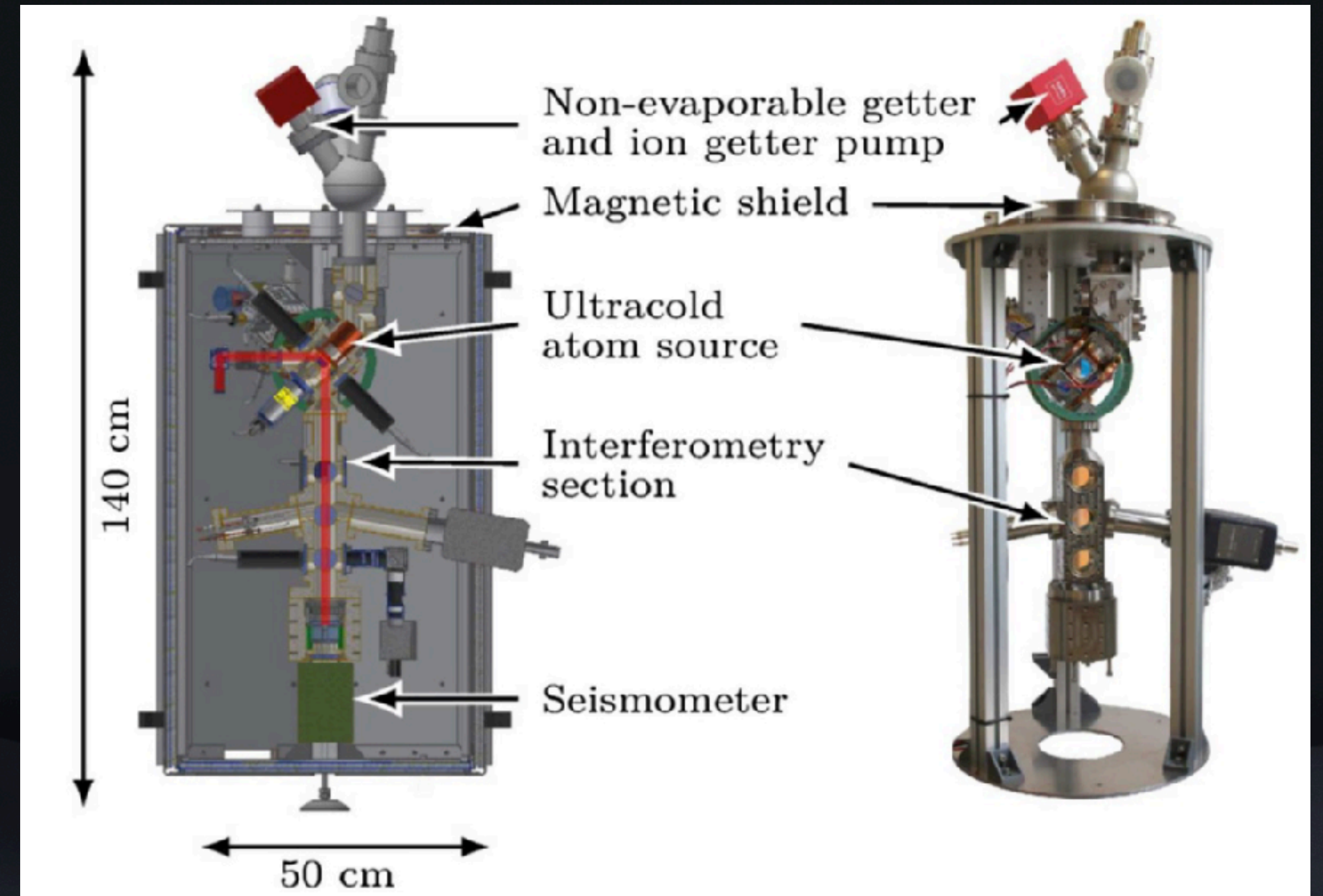


Allgemeines Schema Quantengravimeter (Schilling 2019)

Anwendung: Gravimeter

Beispiel: Quantengravimeter

- Kein dynamisches System
 - ⊕ geringere Ansprüche an Stellplatz
- Kontinuierlicher Betrieb
 - ⊕ „klassisch“: zweites Gerät notwendig
- Hohe Datenrate: Faktor 10+
- Effektive Isolierung gegen äußere Störungen

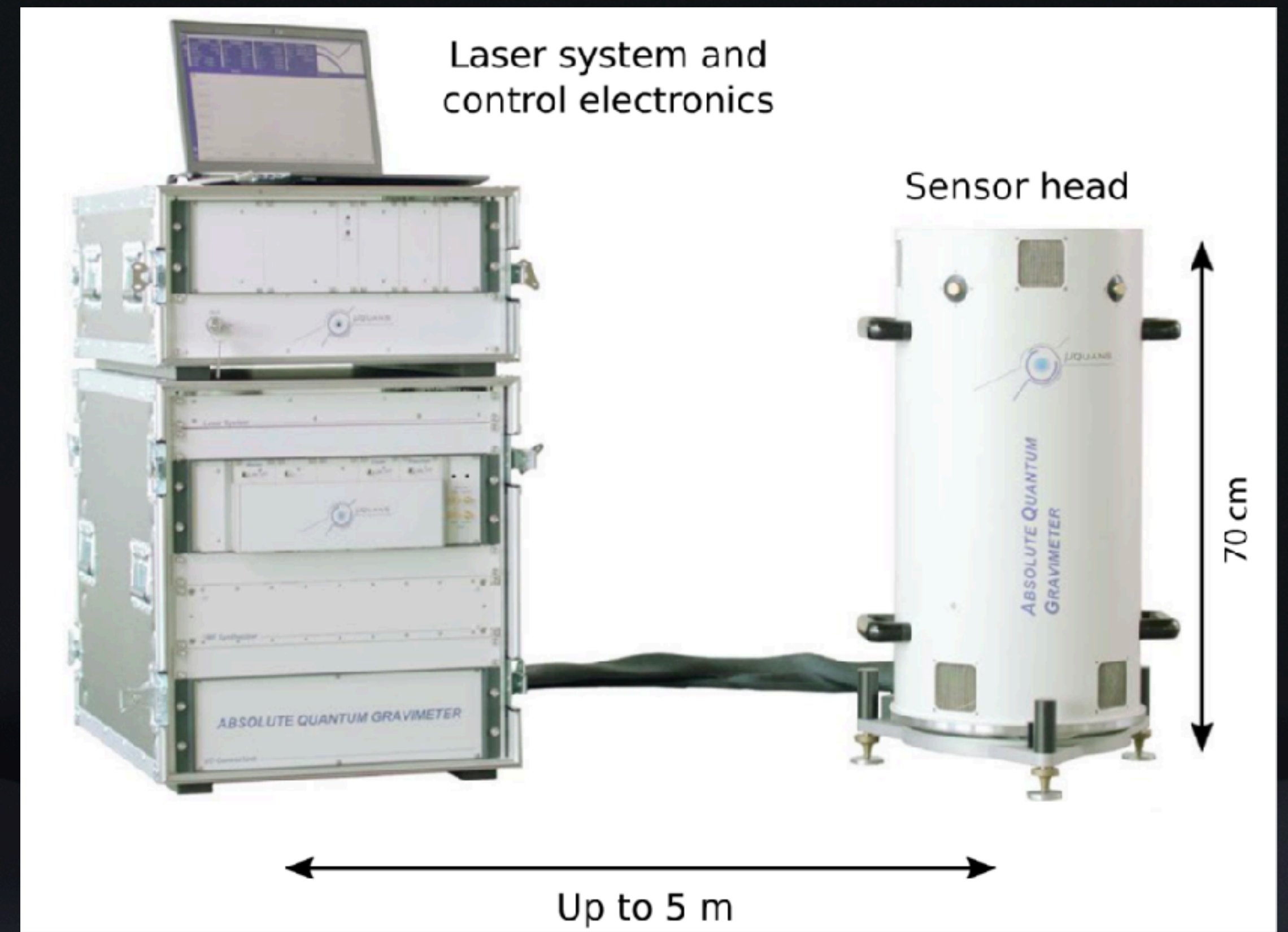


Design QG1 LUH / IQO (Heine et al. 2020)

Anwendung: Gravimeter

Beispiel: Quantengravimeter

- Kein dynamisches System
 - ☒ geringere Ansprüche an Stellplatz
- Kontinuierlicher Betrieb
 - ☒ „klassisch“: zweites Gerät notwendig
- Hohe Datenrate: Faktor 10+
- Effektive Isolierung gegen äußere Störungen

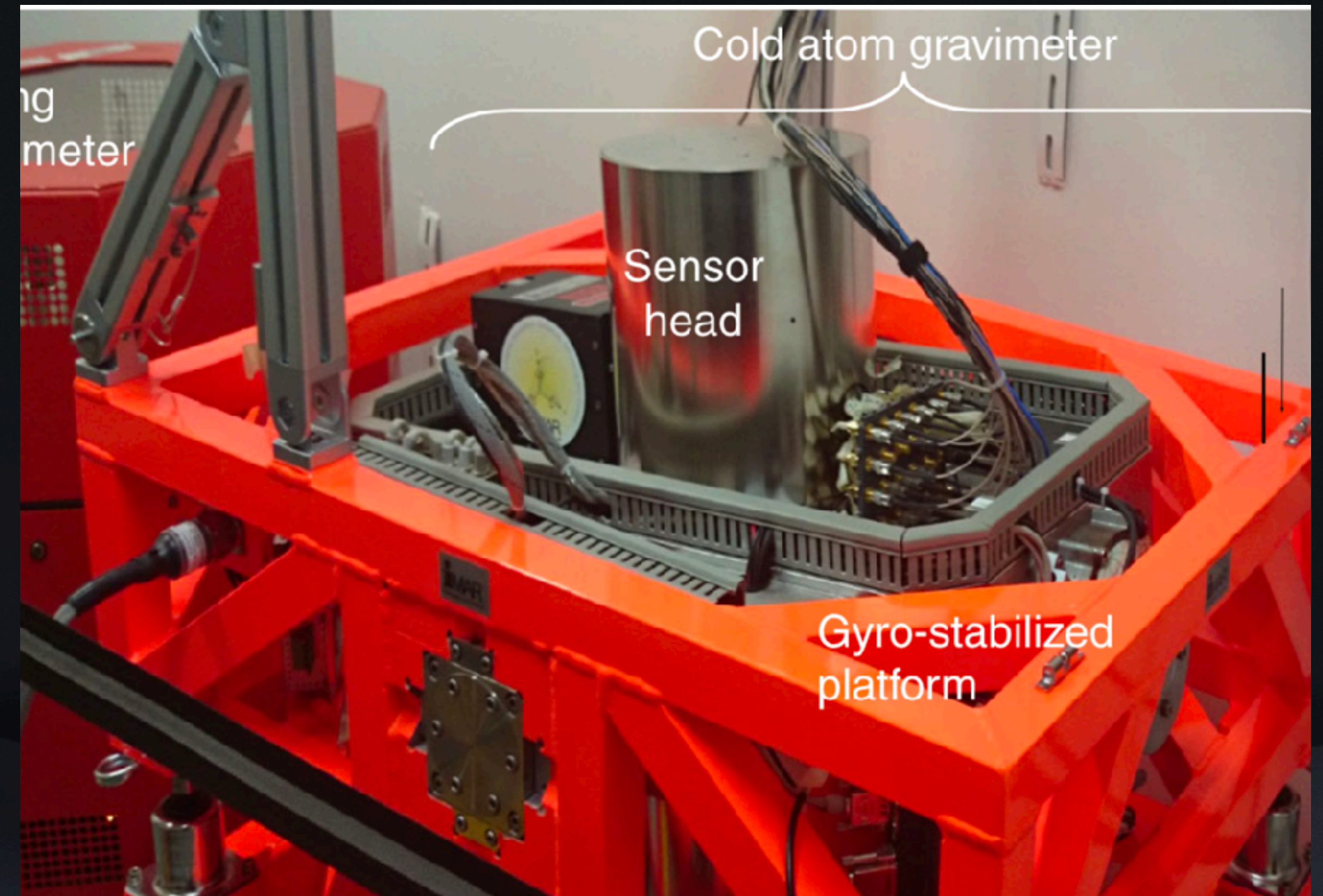


Muquans / iXblue AQG (Ménoret et al. 2018)

Anwendung: Gravimeter

Beispiel: Quantengravimeter

- Kein dynamisches System
 - ⊕ geringere Ansprüche an Stellplatz
- Kontinuierlicher Betrieb
 - ⊕ „klassisch“: zweites Gerät notwendig
- Hohe Datenrate: Faktor 10+
- Effektive Isolierung gegen äußere Störungen
- Technologie ermöglicht mobilen Einsatz



ONERA GIRAFE Flug-/See Gravimeter (Bidel et al. 2018)

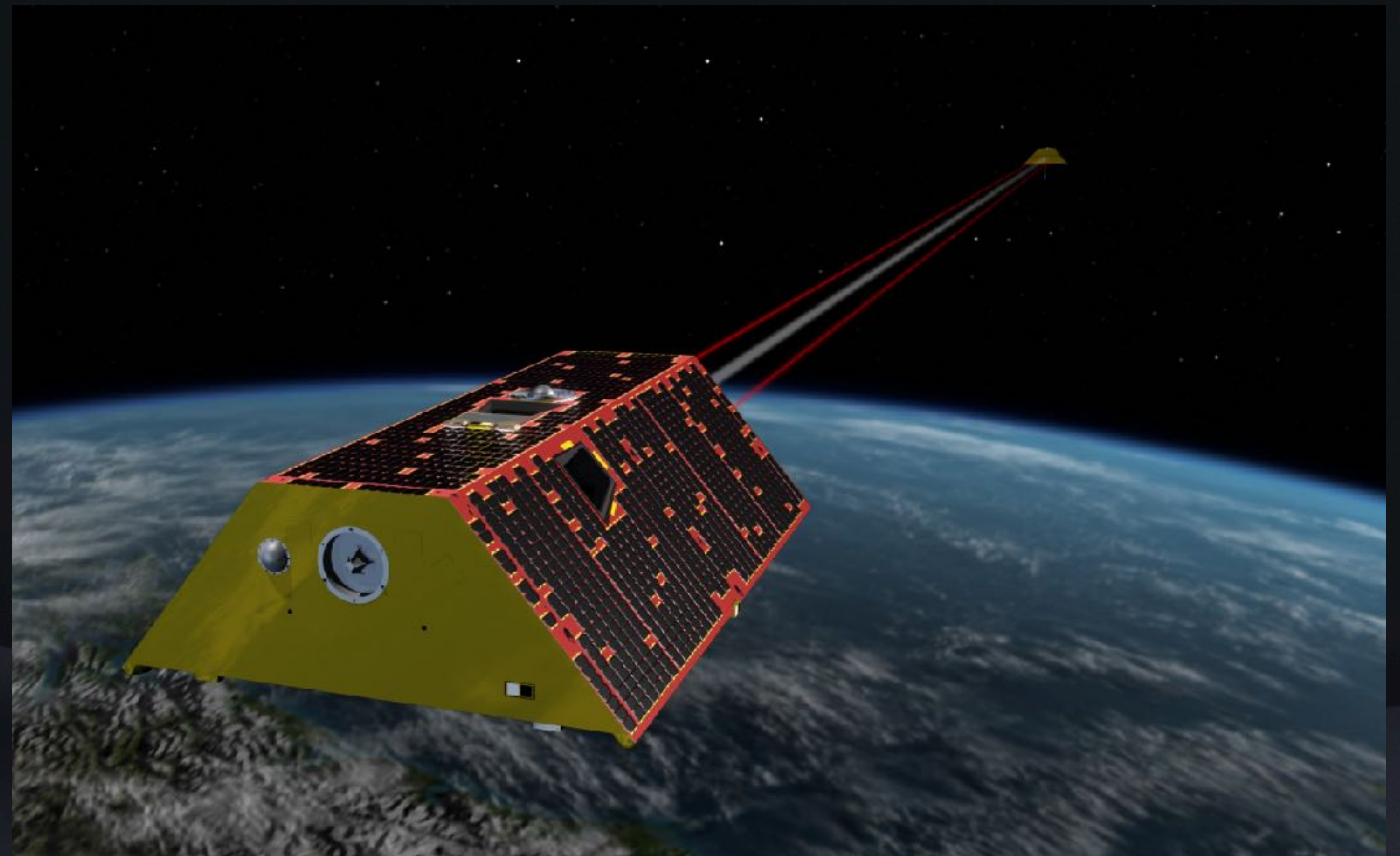
Satellitengravimetrie

Satellitengravimetrie

Gravity Recovery and Climate Experiment - Follow On

34C3 Recap

- 2002/18 Start GRACE/-FO
- Monatliche Schwerefeldlösungen
 - ☒ Globaler Massentransport



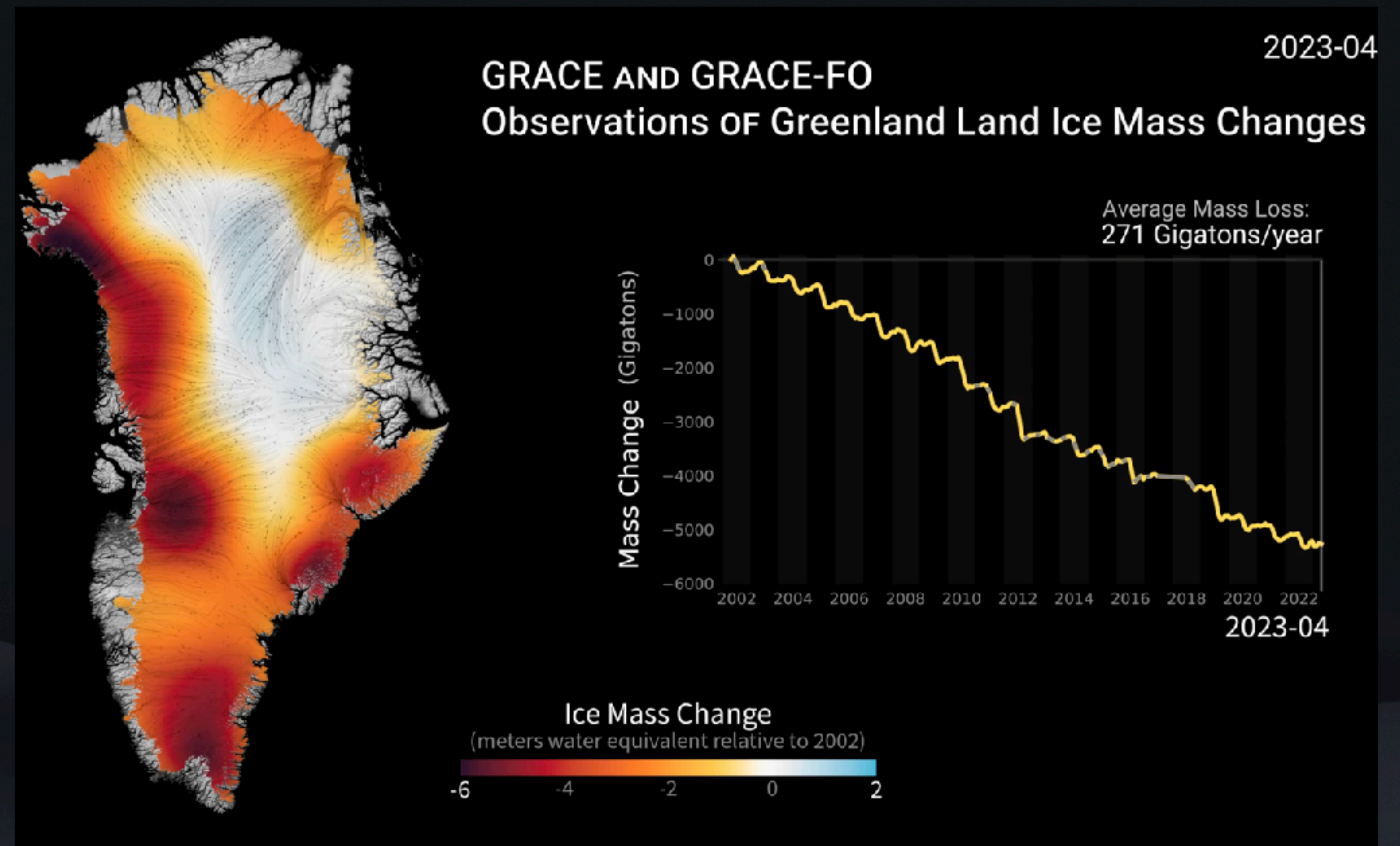
GRACE-FO (NASA / JPL)

Satellitengravimetrie

Gravity Recovery and Climate Experiment - Follow On

34C3 Recap

- 2002/18 Start GRACE/-FO
- Monatliche Schwerefeldlösungen
☒ Globaler Massentransport



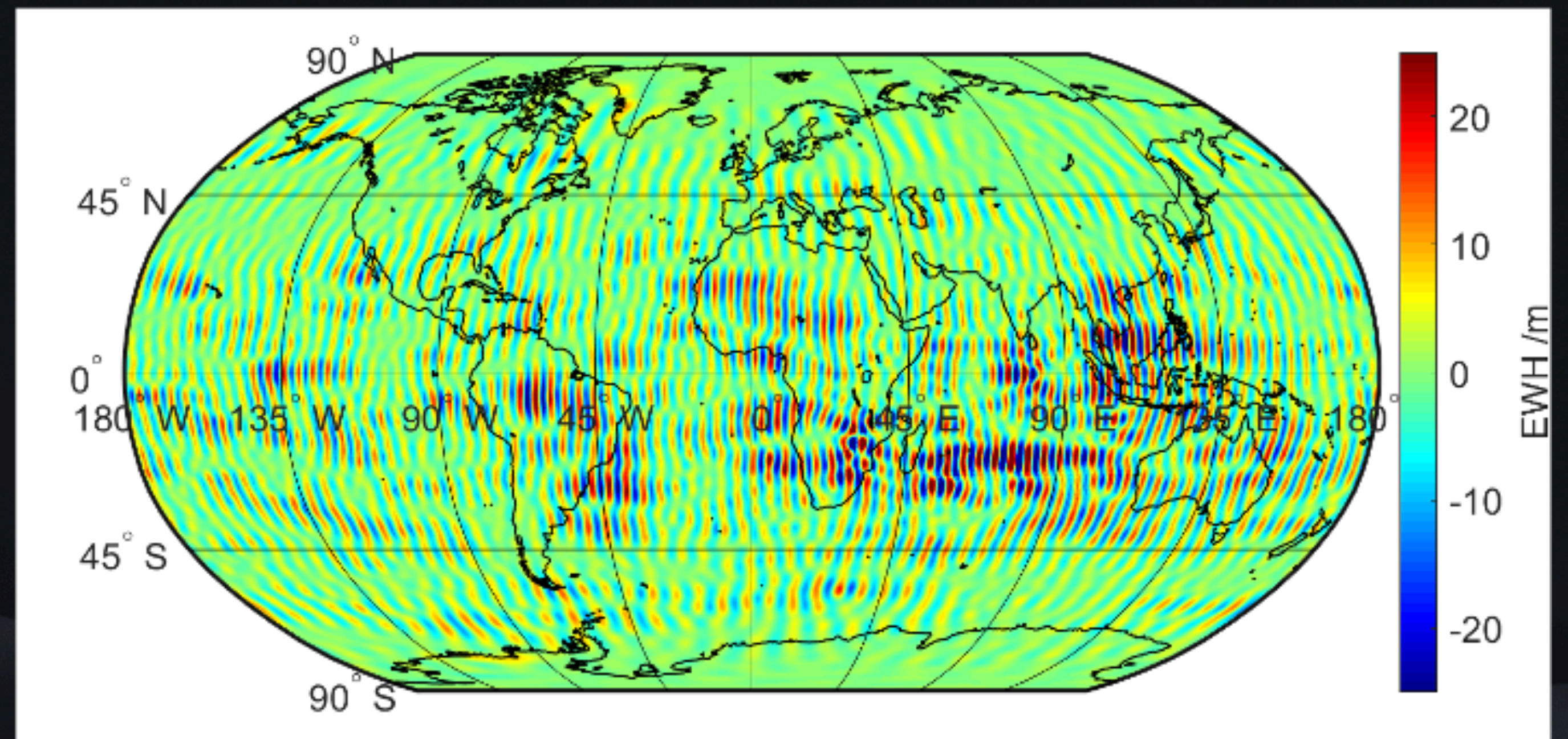
NASA and JPL/Caltech (<https://svs.gsfc.nasa.gov/31156/>)

Satellitengravimetrie

Gravity Recovery and Climate Experiment - Follow On

34C3 Recap

- 2002/18 Start GRACE/-FO
- Monatliche Schwerefeldlösungen
 - ☒ Globaler Massentransport



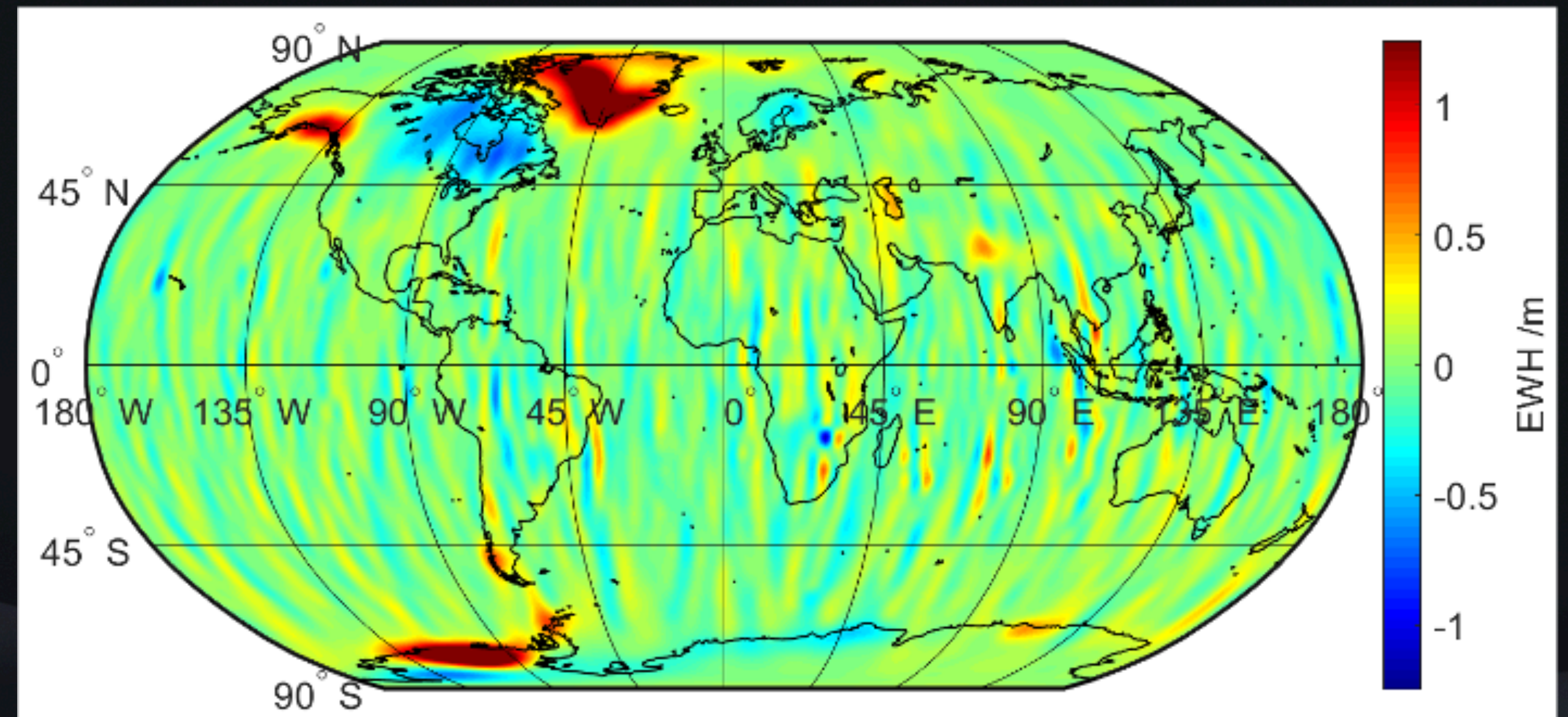
Massenverlust 2002 - 2017, GRACE ITSG2016 (Mayer-Gürr et al. 2016) ungefiltert

Satellitengravimetrie

Gravity Recovery and Climate Experiment - Follow On

34C3 Recap

- 2002/18 Start GRACE/-FO
- Monatliche Schwerefeldlösungen
☒ Globaler Massentransport



Massenänderungen GRACE ITSG2016 (Mayer-Gürr et al. 2016) gefiltert (300km)

Satellitengravimetrie

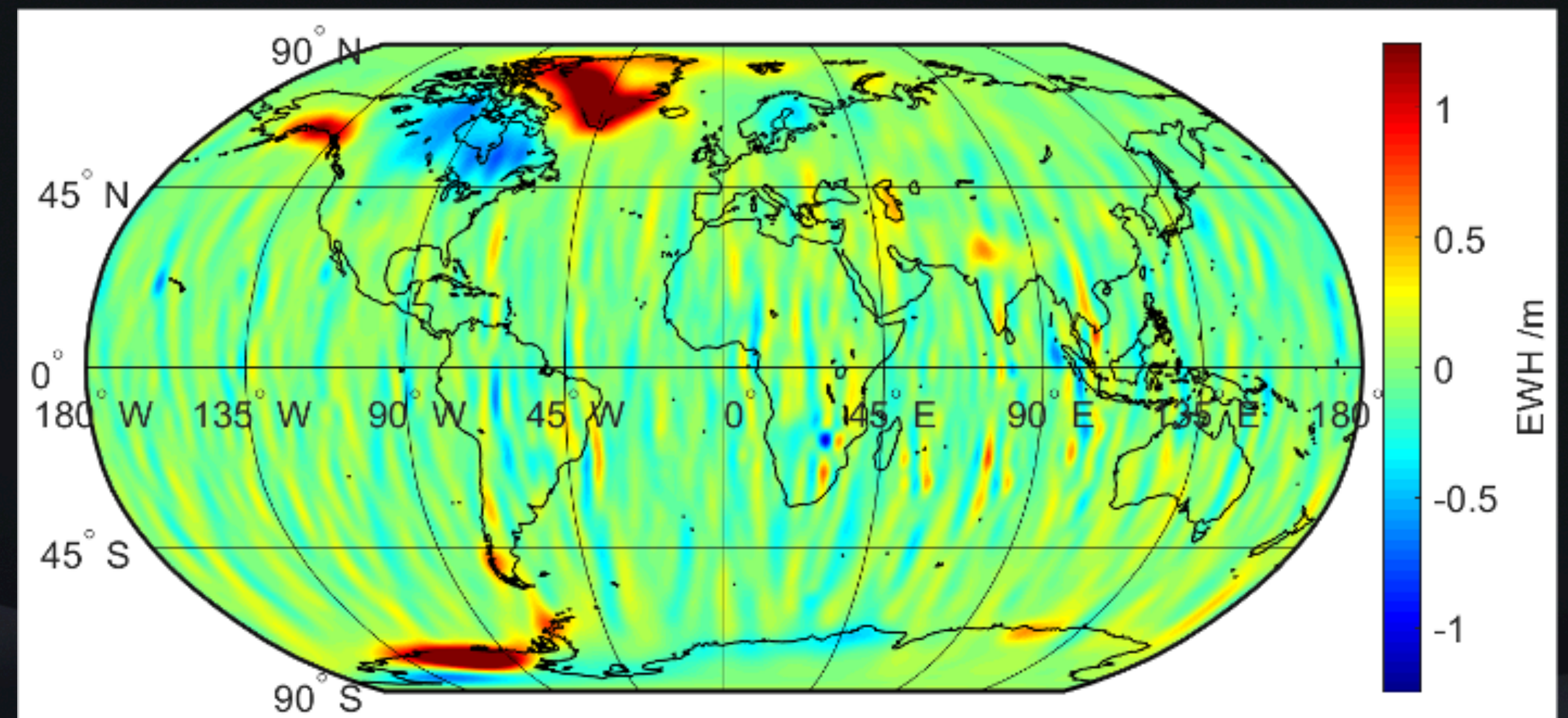
Gravity Recovery and Climate Experiment - Follow On

34C3 Recap

- 2002/18 Start GRACE/-FO
- Monatliche Schwerefeldlösungen
☒ Globaler Massentransport

Limitierung

- Beobachtungsrichtung
- Zeitlich hoch variable Änderungen in Atmosphäre/Ozean
- Sensorperformance



Massenänderungen GRACE ITSG2016 (Mayer-Gürr et al. 2016) gefiltert (300km)

Satellitengravimetrie

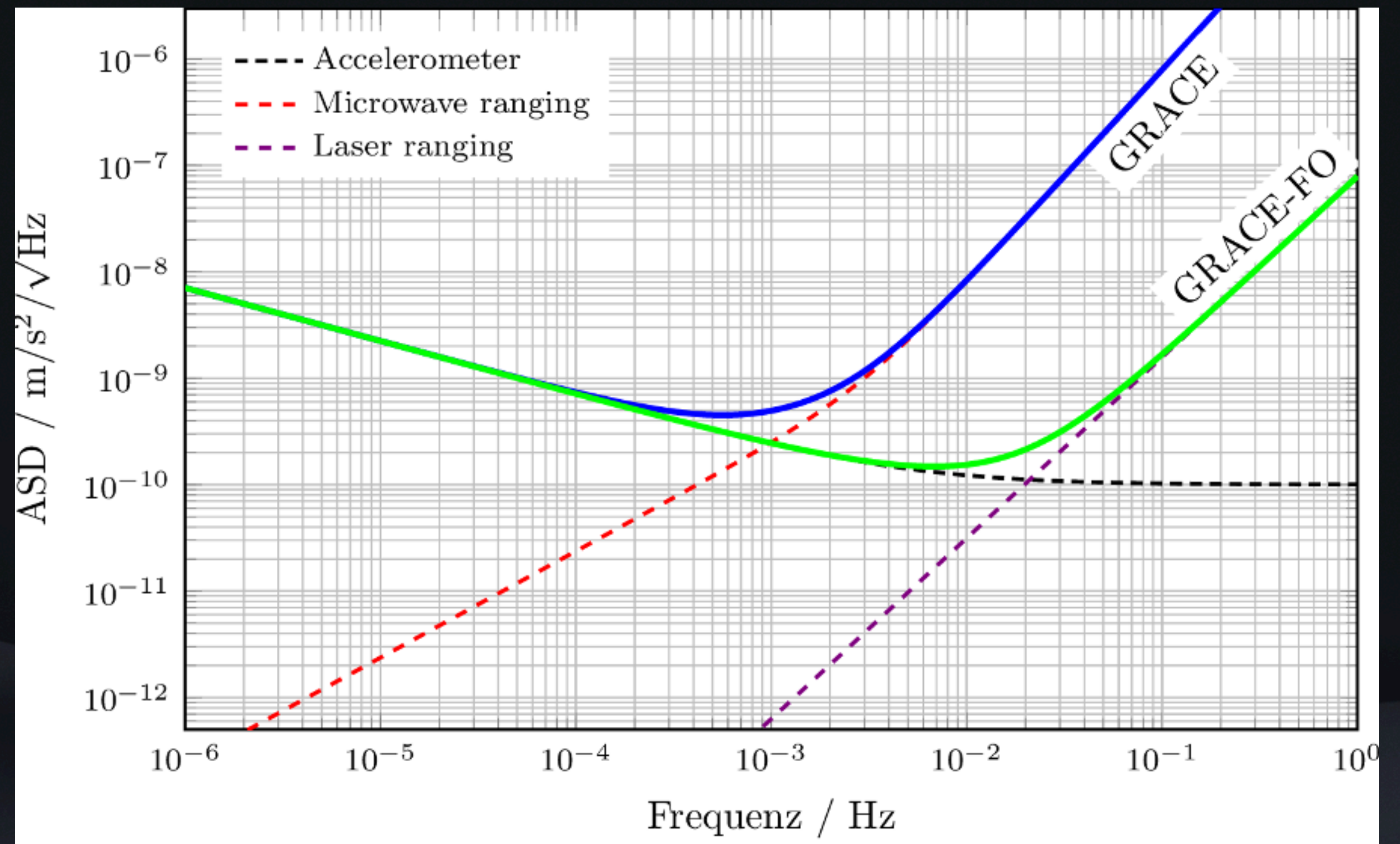
Gravity Recovery and Climate Experiment - Follow On

34C3 Recap

- 2002/18 Start GRACE/-FO
- Monatliche Schwerefeldlösungen
☒ Globaler Massentransport

Limitierung

- Beobachtungsrichtung
- Zeitlich hoch variable Änderungen in Atmosphäre/Ozean
- Sensorperformance

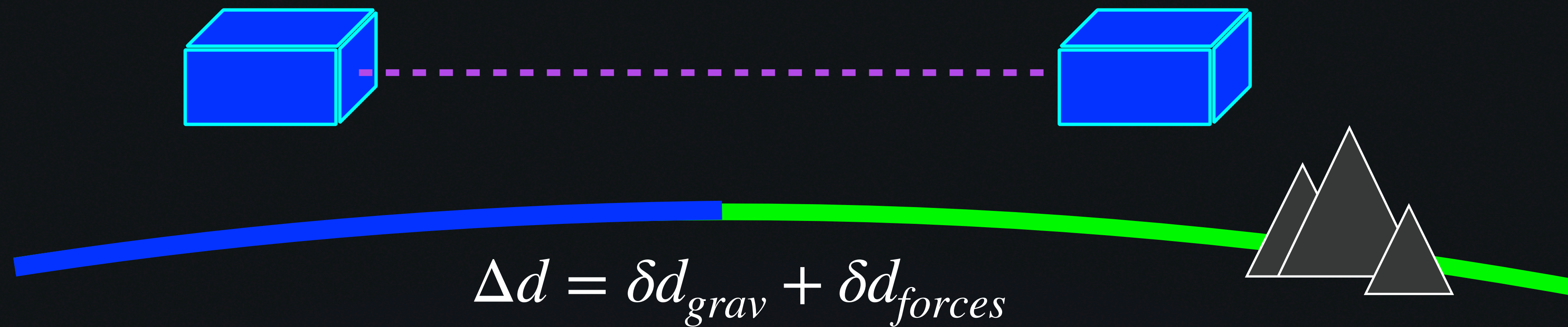


Dominante instrumentelle Fehler (ACC: Flury et al., 2008; Christophe et al., 2015 / KBR/LRI Thomas, 1999; Abich et al., 2019)

Was haben Atome je für uns getan?

Satellitengravimetrie

Beschleunigungsmesser

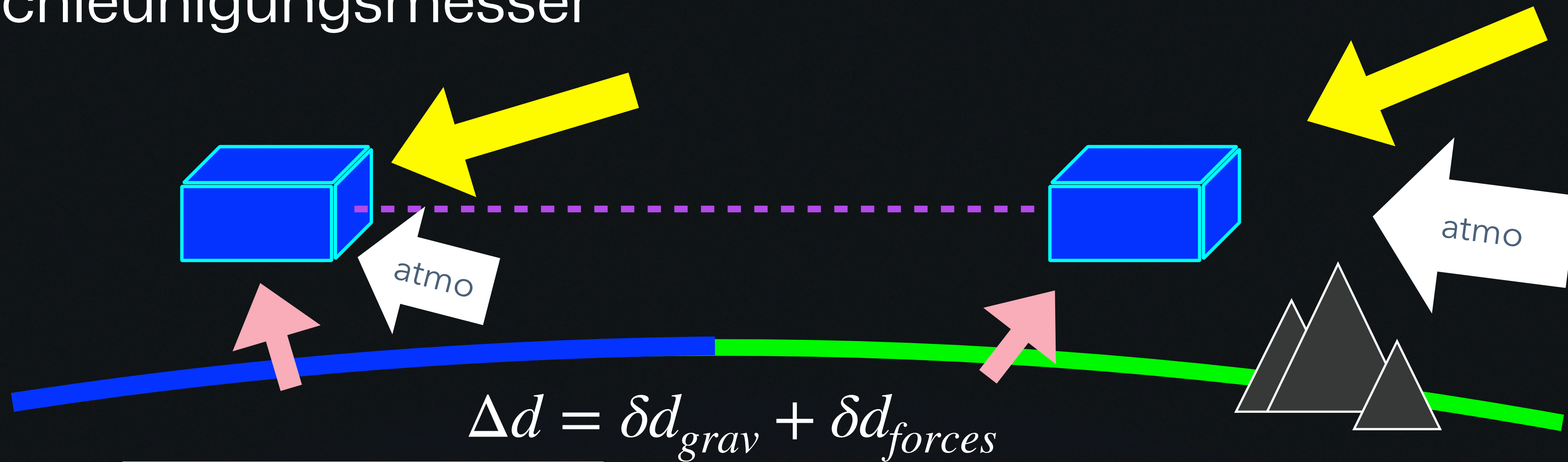
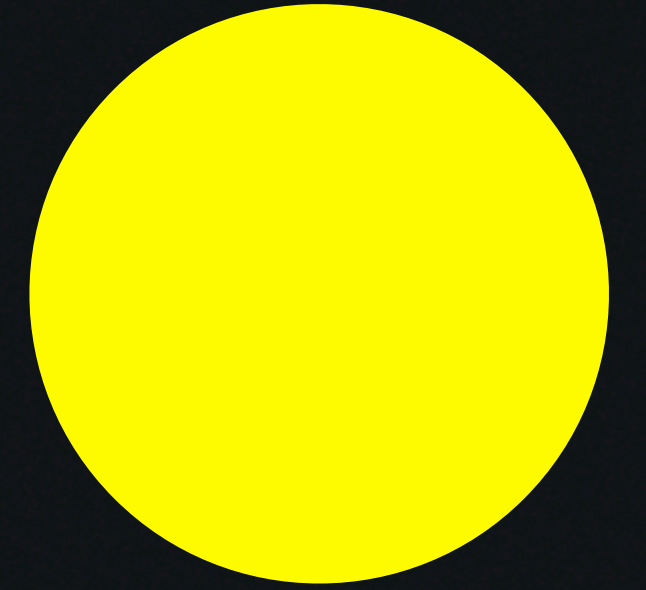


Beobachtungsgröße

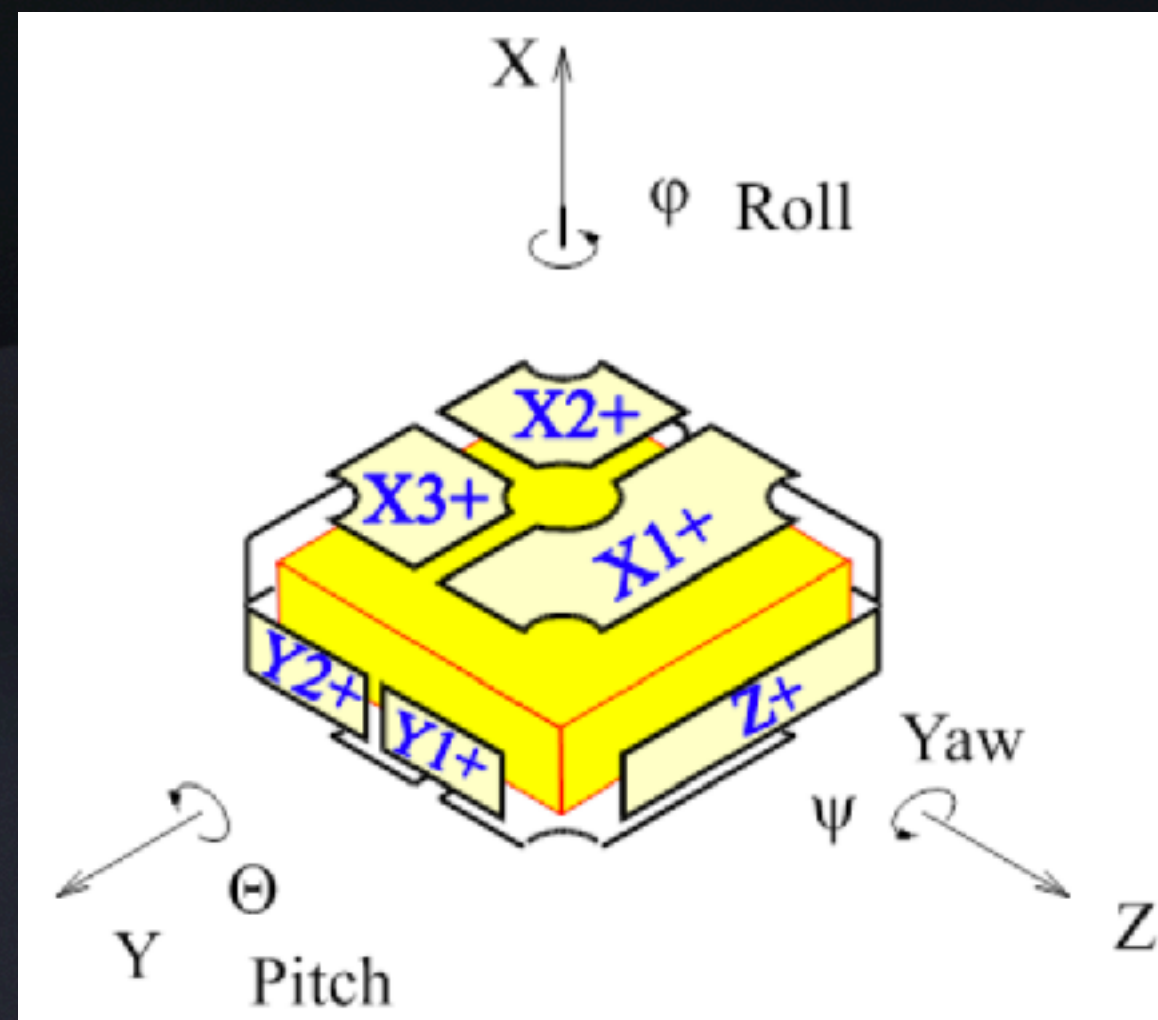
- Abstandsänderung der Satelliten Δd
- Gesucht: δd_{grav} für Schwerefeld

Satellitengravimetrie

Beschleunigungsmesser



$$\Delta d = \delta d_{grav} + \delta d_{forces}$$



Beschleunigungsmesser messen δd_{forces}

- Strahlungsdruck der Sonne
- Reibung durch Atmosphäre
- Erdalbedo / IR Rückstrahlung

(Zahzam et al. 2022)

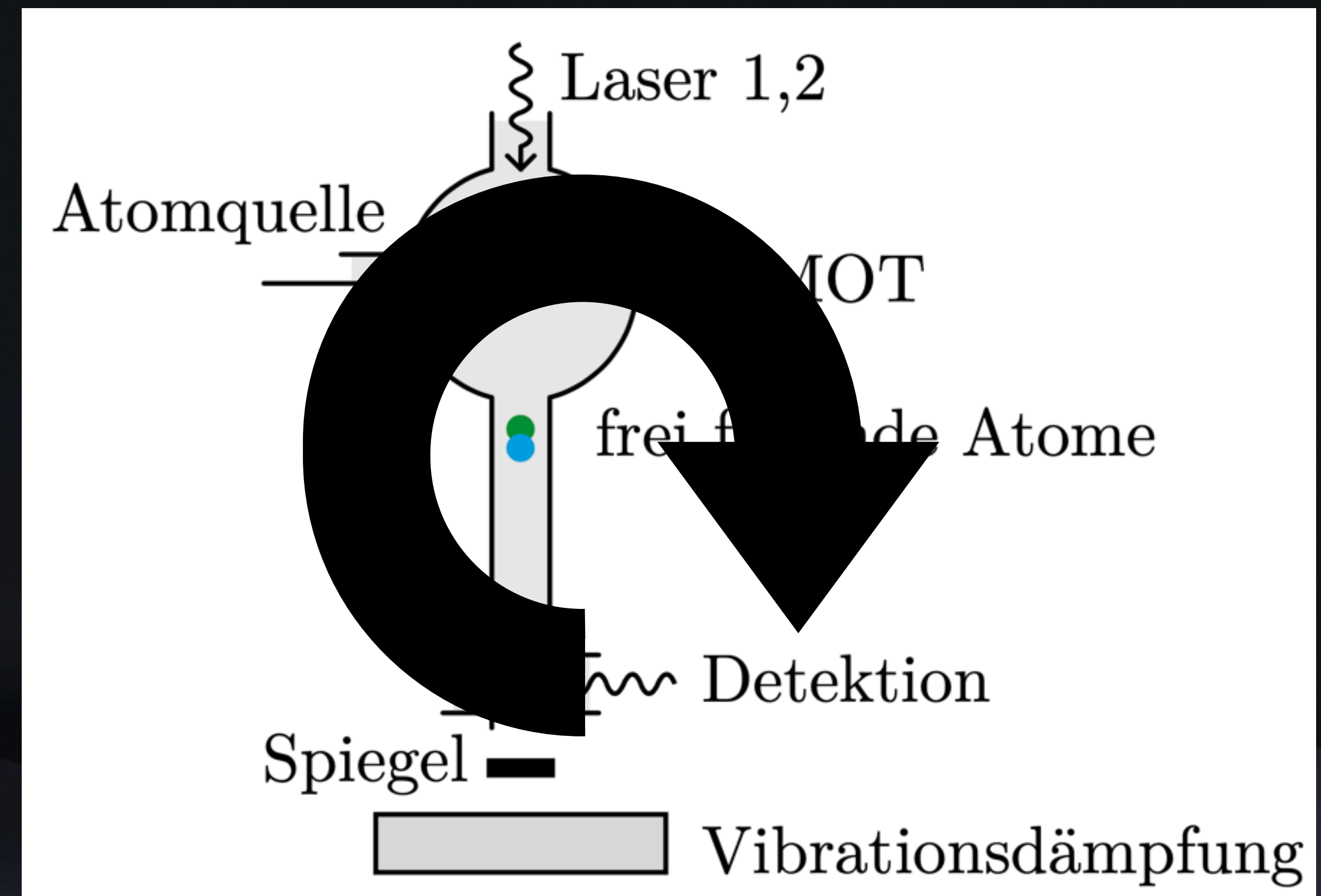
Satellitengravimetrie

Warum Quantenbeschleunigungsmesser?

Potential Quantentechnologie

- Gesteigerte Sensitivität

$$\Delta\Phi = 2k_{eff} a T^2$$



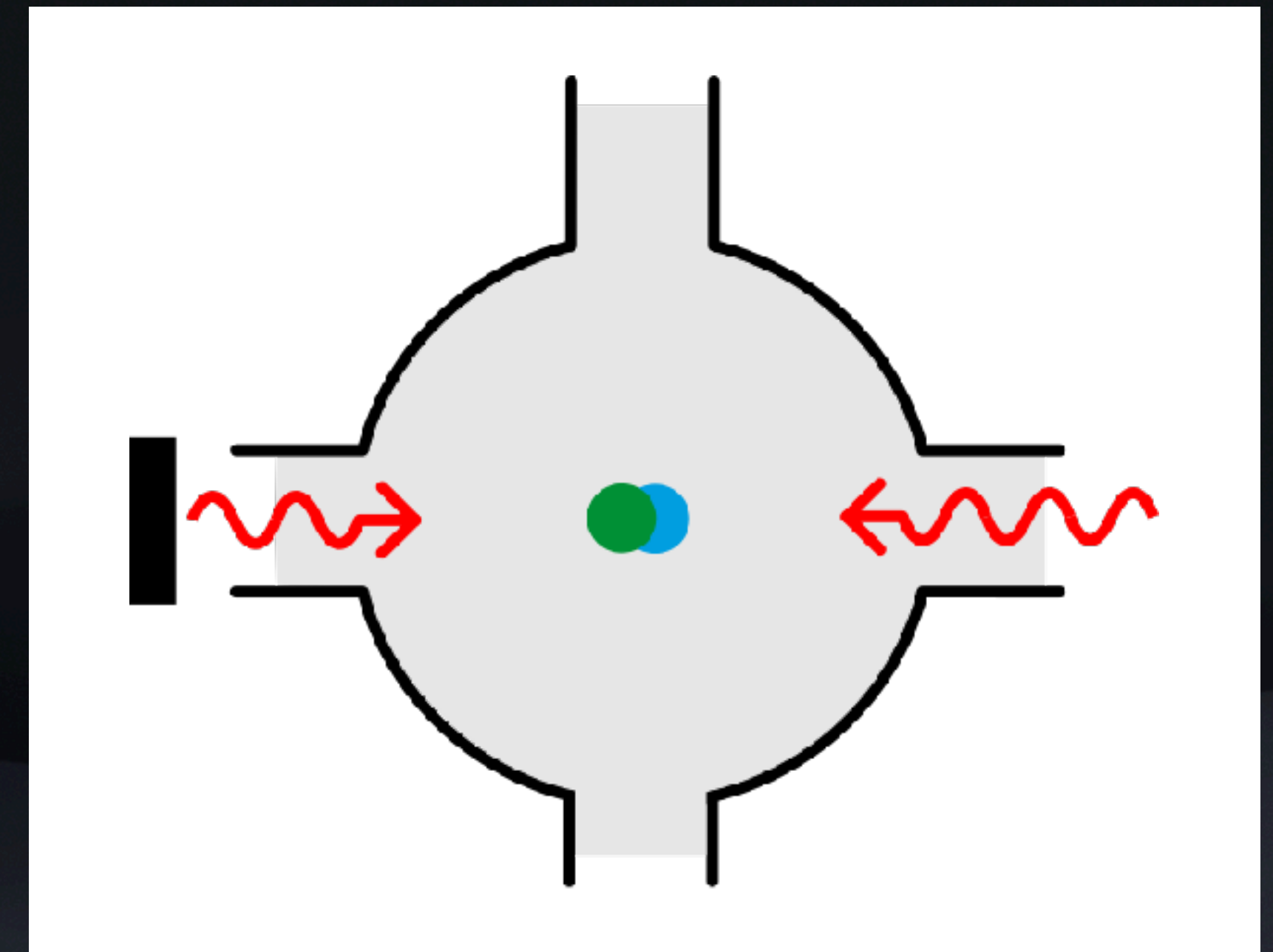
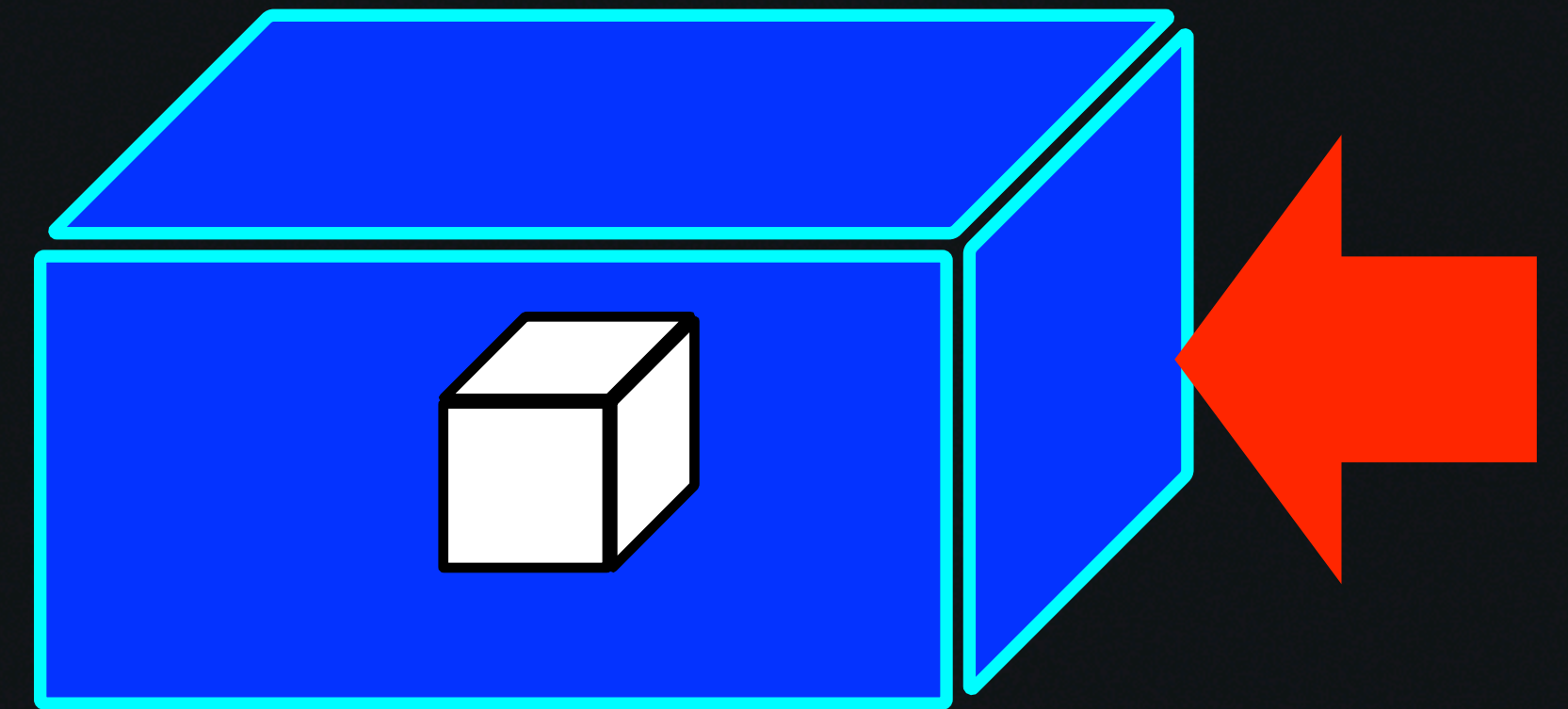
Satellitengravimetrie

Warum Quantenbeschleunigungsmesser?

Potential Quantentechnologie

- Gesteigerte Sensitivität

$$\Delta\Phi = 2k_{eff} a T^2$$



Satellitengravimetrie

Warum Quantenbeschleunigungsmesser?

Potential Quantentechnologie

- Gesteigerte Sensitivität

$$\Delta\Phi = 2k_{eff} a T^2$$

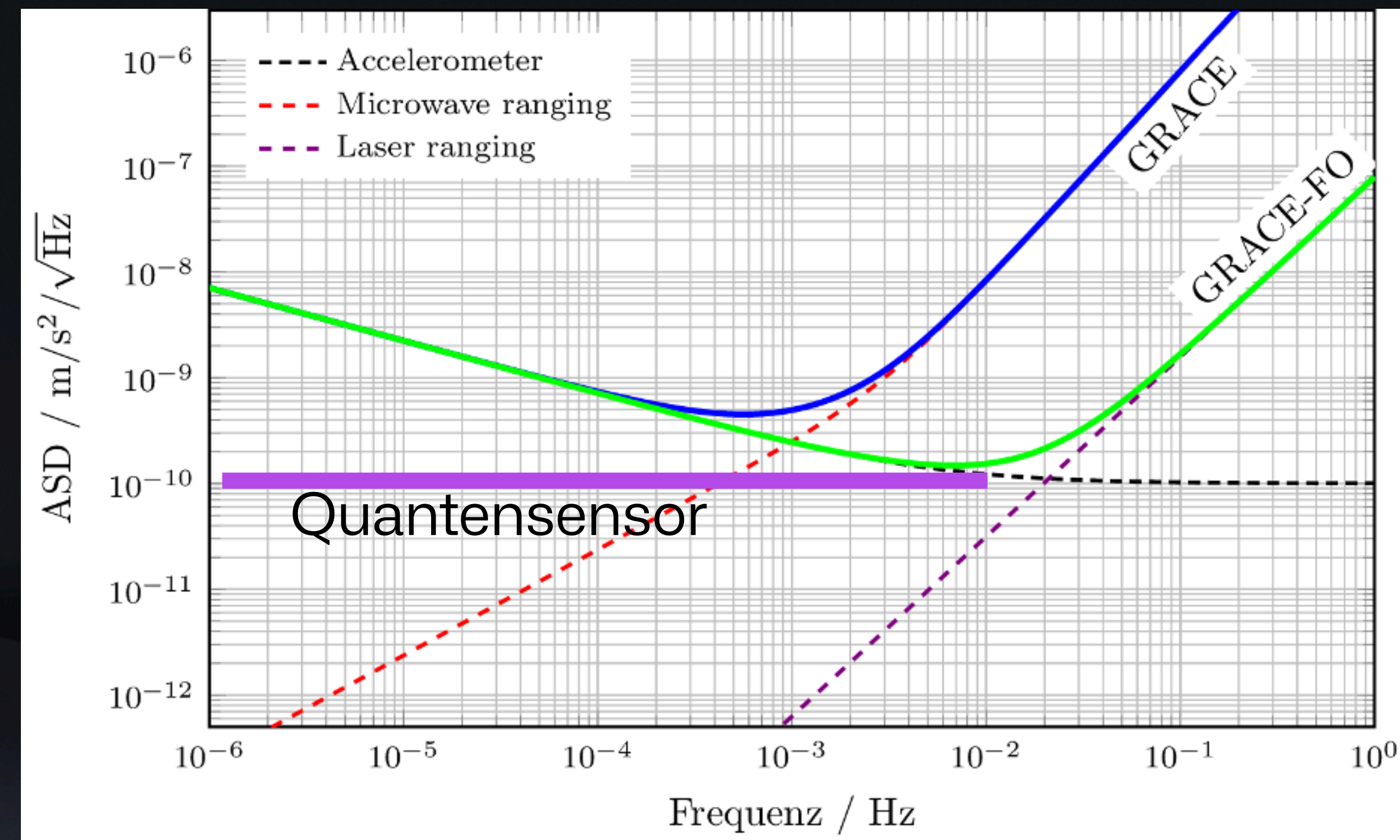
- Driftfreie Messung

- Lasertechnologie erprobt, z.B. GRACE-FO und LISA Pathfinder

- Weisses Rauschen in breitem Frequenzband

- Kombination mit klassischem Sensor

- Genauigkeitssteigerung



Atominterferometrie in Schwerelosigkeit

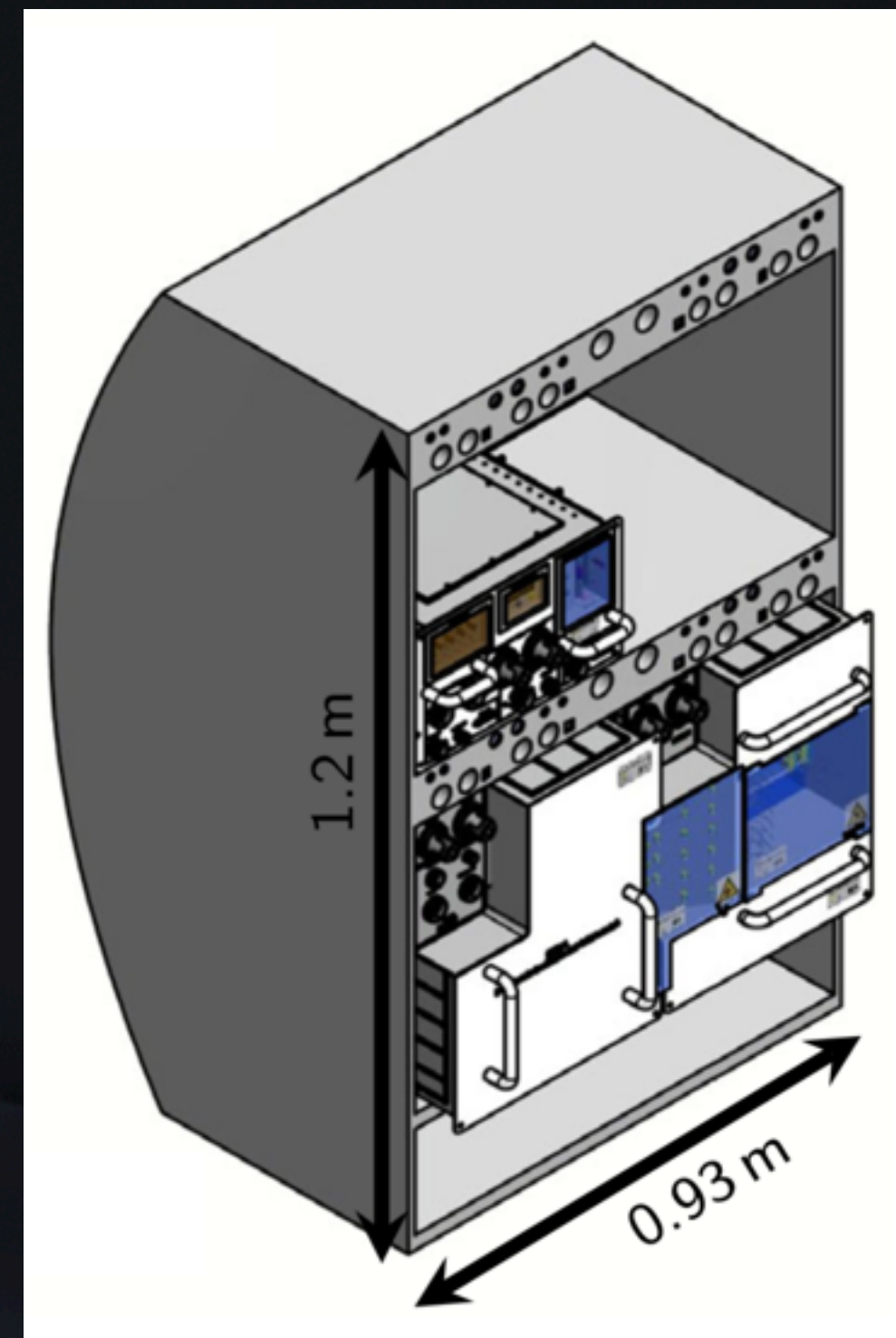
Stand der Technik

Kurzfassung

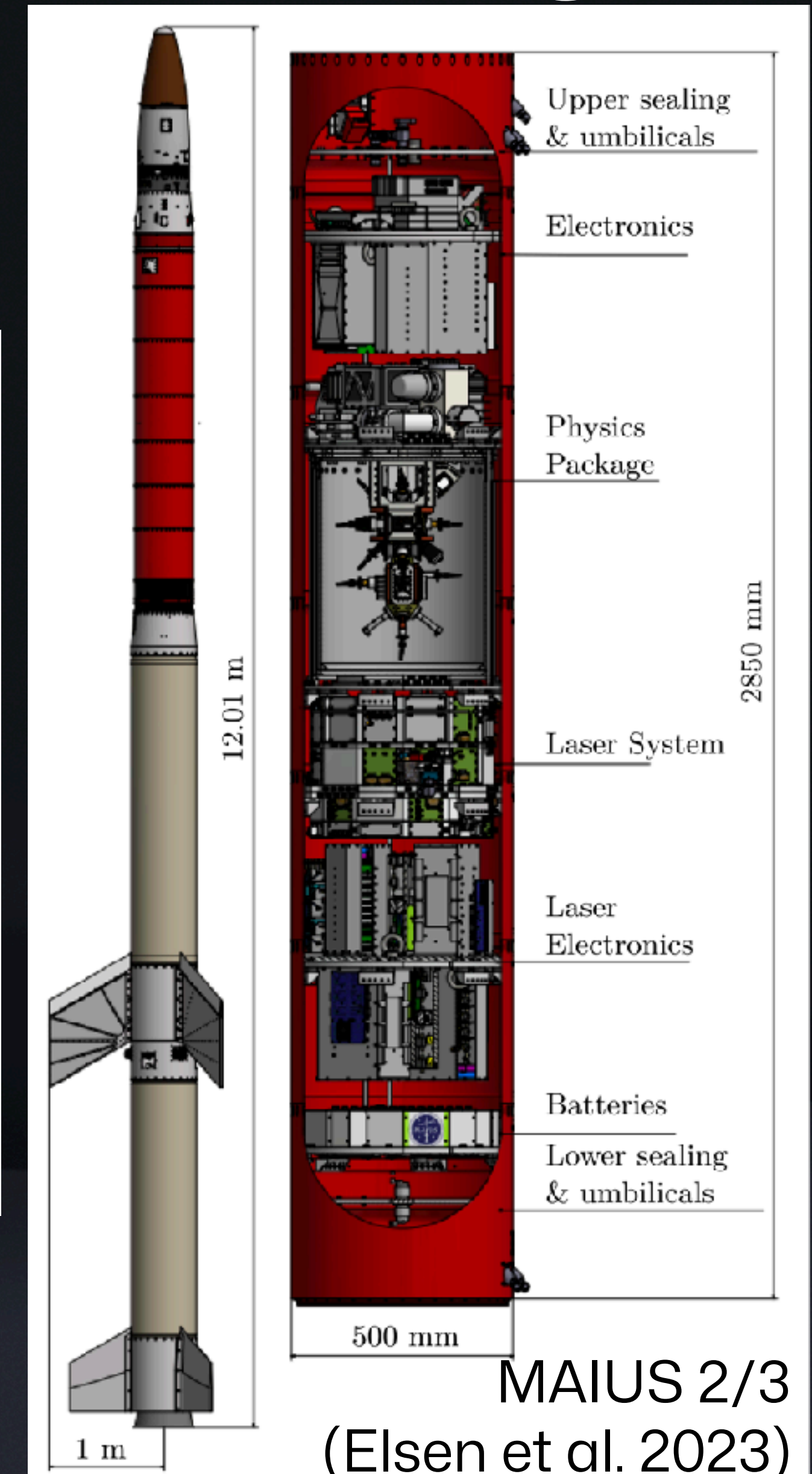
- Kein Sensor/Beschleunigungsmesser verfügbar
- Mangelnde technologische Reife (TRL) von Schlüsseltechnologien

Grundlagenforschung

- NASA: Cold Atom Laboratory auf ISS
- Fallturm, Einstein Elevator, Zero-G Flug



BECCAL
(Fyre et al. 2021)



MAIUS 2/3
(Elsen et al. 2023)

Was haben Atome je für uns getan?

Aktuelle Entwicklung und Funding

Quantensensorik in der Erdbeobachtung (Satellit)

Förderung im Rahmen Horizon Europe Cluster 4

„The **QSG pathfinder mission** shall be launched within **this decade**, paving the way for the deployment of an **EU QSG mission** within the **next decade**.“

Laufende Projekte

- CARIOQA-PMP: Entwicklung eines Engineering Models / Laboraufbau eines ACC
<https://carioqa-quantumpathfinder.eu> (Lévèque et al. 2023)
- CARIOQA-Phase A (Start 2024): Definition der Pathfinder Mission



Funded by
the European Union

Offener Call: Technologie Demonstrator Phase B Studie (HORIZON-CL4-2024-SPACE-01)

- Steigerung Reifegrad bis TRL 6/7

Quantensensorik in der Erdbeobachtung (terrestrisch)

Forschung im universitären Umfeld

- ⊕ Beschleunigungs-/Rotationssensoren und Fundamentalphysik
- ⊕ Anwendungen von mobil bis zu Stationären Experimenten (10 – 100er Meter)

Technologietransfer

- ⊕ Meist über Förderung, z.B. Bundesministerium für Bildung und Forschung
<https://www.quantentechnologien.de>
- ⊕ Von enabling Technologies bis Serienreife
inkl. (wirtschaftliche) Hochrisiko Projekte
- ⊕ KMU und Nutzerbeteiligung zwingend Erforderlich

Beispiel Quantenfluggravimeter (AeroQGrav)

- ⊕ BMBF Programm: Leuchtturmprojekte der quantenbasierten Messtechnik
- ⊕ Zusätzliche Herausforderung: Transportbeschleunigungen
- ⊕ Prototyp mit Demonstration der Anwendung zu Projektende

Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Es gibt auch Quantum Sensing
- Nutzung von Quantentechnologien
 - ⊕ Höhere Genauigkeit
 - ⊕ Reduktion der Messtechnik und des Zeitaufwandes
- Weltweites Forschungsthema
 - ⊕ Beschleunigungsmessung/Gravimeter
- Technologietransfer oder Innovation Valley of Death?
 - ⊕ Bedingt abhängig von Fördermitteln

Vielen Dank

Manuel Schilling

DLR Institut für Satellitengeodäsie und Inertialsensorik

Kontakt: manuel.schilling@dlr.de

Referenzen

- Alonso, I., Alpigiani, C., Altschul, B. et al. (2022): „Cold atoms in space: community workshop summary and proposed road-map“. EPJ Quantum Technol. 9, 30. doi: [10.1140/epjqt/s40507-022-00147-w](https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-022-00147-w)
- Bidel, Y., N. Zahzam, C. Blanchard, A. Bonnin, M. Cadoret, A. Bresson, D. Rouxel, und M. F. Lequentrec-Lalancette (2018): „Absolute Marine Gravimetry with Matter-Wave Interferometry“. Nature Communications 9, Nr. 1: 627. doi: [10.1038/s41467-018-03040-2](https://doi.org/10.1038/s41467-018-03040-2).
- Bidel, Y., N. Zahzam, A. Bresson, C. Blanchard, A. Bonnin, J. Bernard, M. Cadoret, u. a. (2023): „Airborne Absolute Gravimetry With a Quantum Sensor, Comparison With Classical Technologies“. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 128, Nr. 4: e2022JB025921. doi: [10.1029/2022JB025921](https://doi.org/10.1029/2022JB025921).
- Dobslaw, Henryk, Inga Bergmann-Wolf, Robert Dill, Ehsan Forootan, Volker Klemann, Jürgen Kusche, und Ingo Sasgen (2015): „The Updated ESA Earth System Model for Future Gravity Mission Simulation Studies“. Journal of Geodesy 89, Nr. 5: 505–13. doi: [10.1007/s00190-014-0787-8](https://doi.org/10.1007/s00190-014-0787-8).
- Elsen, M., Piest, B., Adam, F. et al. (2023): „A Dual-Species Atom Interferometer Payload for Operation on Sounding Rockets“. Microgravity Sci. Technol. 35, 48. doi: [10.1007/s12217-023-10068-7](https://doi.org/10.1007/s12217-023-10068-7)
- Freier, Christian, M Hauth, V Schkolnik, B Leykauf, Manuel Schilling, H Wziontek, H-G Scherneck, J Müller, und A Peters (2016): „Mobile quantum gravity sensor with unprecedented stability“. Journal of Physics: Conference Series 723: 012050. doi: [10.1088/1742-6596/723/1/012050](https://doi.org/10.1088/1742-6596/723/1/012050).
- Frye, K., Abend, S., Bartosch, W. et al. (2021): „The Bose-Einstein Condensate and Cold Atom Laboratory“. EPJ Quantum Technol. 8, 1. doi: [10.1140/epjqt/s40507-020-00090-8](https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-020-00090-8)
- He, Meng, Xi Chen, Jie Fang, Qunfeng Chen, Huanyao Sun, Yibo Wang, Jiaqi Zhong, u. a. (2023): „The Space Cold Atom Interferometer for Testing the Equivalence Principle in the China Space Station“. Npj Microgravity 9, Nr. 1: 58. doi: [10.1038/s41526-023-00306-y](https://doi.org/10.1038/s41526-023-00306-y).
- Heine, Nina, Jonas Matthias, M. Sahelgozin, Waldemar Herr, Sven Abend, Ludger Timmen, Jürgen Müller, und Ernst M. Rasel (2020): „A transportable quantum gravimeter employing delta-kick collimated Bose-Einstein condensates“. European Physics Journal D 74: 174. doi: [10.1140/epjd/e2020-10120-x](https://doi.org/10.1140/epjd/e2020-10120-x).
- Kasevich, Mark, und Steven Chu (1991): „Atomic Interferometry Using Stimulated Raman Transitions“. Physical Review Letters 67, Nr. 2: 181–84. doi: [10.1103/PhysRevLett.67.181](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.67.181).
- Kasevich, Mark, und Steven Chu (1992) „Measurement of the Gravitational Acceleration of an Atom with a Light-Pulse Atom Interferometer“. Applied Physics B Photophysics and Laser Chemistry 54, Nr. 5: 321–32. doi: [10.1007/BF00325375](https://doi.org/10.1007/BF00325375).
- Mayer-Gürr, Torsten; Behzadpour, Saniya; Ellmer, Matthias; Kvas, Andreas; Klinger, Beate; Zehentner, Norbert (2016): ITSG-Grace2016 - Monthly and Daily Gravity Field Solutions from GRACE. GFZ Data Services, doi: [10.5880/icgem.2016.007](https://doi.org/10.5880/icgem.2016.007)
- Geiger, R., G. Stern, P. Cheinet, A. Bresson, A. Landragin, P. Bouyer, V. Ménoret, B. Battelier, N. Zahzam, und F. Pereira Dos Santos (2017): „A transportable cold atom inertial sensor for space applications“. In International Conference on Space Optics – ICSO 2010, herausgegeben von Naoto Kadowaki, 110. Rhodes Island, Greece: SPIE. doi: [10.1117/12.2309256](https://doi.org/10.1117/12.2309256).

Referenzen

- Abich K, Abramovici A, Amparan B, et al (2019) In-Orbit Performance of the GRACE Follow-on Laser Ranging Interferometer. *Physical Review Letters* 123:031101. [doi: 10.1103/PhysRevLett.123.031101](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.031101).
- Christophe B, Boulanger D, Foulon B, et al (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. [doi: 10.1016/j.actaastro.2015.06.021](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.06.021)
- Flury J, Bettadpur S, Tapley BD (2008) Precise accelerometry onboard the GRACE gravity field satellite mission. *Advances in Space Research* 42:1414-1423. [doi: 10.1016/j.asr.2008.05.004](https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.05.004).
- HosseiniArani, Alireza, Benjamin Tennstedt, Manuel Schilling, Annike Knabe, Hu Wu, Steffen Schön, und Jürgen Müller (2022): „Kalman-filter Based Hybridization of Classic and Cold Atom Interferometry Accelerometers for Future Satellite Gravity Missions“. In IAG Symposia, Vol 154. [doi: 10.1007/1345_2022_172](https://doi.org/10.1007/1345_2022_172),
- Ménoret, Vincent, Pierre Vermeulen, Nicolas Le Moigne, Sylvain Bonvalot, Philippe Bouyer, Arnaud Landragin, und Bruno Desruelle (2018): „Gravity Measurements below 10⁻⁹ g with a Transportable Absolute Quantum Gravimeter“. *Scientific Reports* 8, Nr. 1: 12300. [doi: 10.1038/s41598-018-30608-1](https://doi.org/10.1038/s41598-018-30608-1).
- Lévêque, T., C. Fallet, J. Lefebvre, A. Piquereau, A. Gauguet, B. Battelier, P. Bouyer, u. a. „CARIOQA: definition of a Quantum Pathfinder Mission“. In *International Conference on Space Optics – ICSO 2022*, herausgegeben von Kyriaki Minoglou, Nikos Karafolas, und Bruno Cugny, 129. Dubrovnik, Croatia: SPIE, 2023. [doi: 10.1117/12.2690536](https://doi.org/10.1117/12.2690536).
- Niebauer, T M, G S Sasagawa, J E Faller, R Hilt, und F Klopping (1995): „A new generation of absolute gravimeters“. *Metrologia* 32, Nr. 3: 159-80. [doi: 10.1088/0026-1394/32/3/004](https://doi.org/10.1088/0026-1394/32/3/004).
- Niebauer, T M, Ryan Billson, Aaron Schiel, Derek van Westrum, und Fred Klopping (2013): „The self-attraction correction for the FG5X absolute gravity meter“. *Metrologia* 50, Nr. 1: 1-8. [doi: 10.1088/0026-1394/50/1/1](https://doi.org/10.1088/0026-1394/50/1/1).
- Schilling, Manuel (2017): „Watching the Changing Earth“, 34C3, [Fahrplan](https://www.youtube.com/watch?v=34C3). Doi: [10.5446/34825](https://doi.org/10.5446/34825)
- Schilling, Manuel (2019): „Kombination von klassischen Gravimetern mit Quantensensoren“. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover Nummer 350*. [doi: 10.15488/4710](https://doi.org/10.15488/4710).
- Thomas JB (1999) *An Analysis of Gravity-Field Estimation Based on Intersatellite Dual-1-Way Biased Ranging*. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California
- Zahzam, Nassim, Bruno Christophe, Vincent Lebat, Emilie Hardy, Phuong-Anh Huynh, Noémie Marquet, Cédric Blanchard, u. a. (2022): „Hybrid Electrostatic-Atomic Accelerometer for Future Space Gravity Missions“. *Remote Sensing* 14, Nr. 14: 3273. [doi: 10.3390/rs14143273](https://doi.org/10.3390/rs14143273).