

Größere Makroschritte bei gravitierenden Kleinkörpern

Kontrollierter Kurzversuch auf schmalzberg

Forschungsprotokoll

17. September 2026

1 Versuchsaufbau

Ausgangspunkt ist die unveränderte Anfangsdatei von ROCKS_G2: 10^5 gleichmassige Gesteinskörper mit Durchmesser 1 km und Dichte 3000 kg/m^3 , Sonne und acht planetare Systeme. Die zweidimensionale Wolke besitzt konstante Flächendichte zwischen 0.3 und 35 AU und anfängliche Keplergeschwindigkeiten. Alle Varianten starten bei $t = 0$ und enden bei $T = 0.1$ julianischen Jahren. Dieser Zeitraum enthält die aus dem bisherigen Lauf bekannten Kontakte von Körper 13133 mit Jupiter und Körper 55430 mit Uranus. Der parallel laufende Nachtversuch auf dreihemden-2 bleibt unverändert.

Die Reihenfolge der Makroschritte ist $h = 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.0025, 0.005$ Jahre. Die letzte Rechnung wiederholt den Ausgangsfall; alle Rechnungen verwenden acht Threads auf schmalzberg. Pro Variante gibt es nur eine Zeitmessung, mit Ausnahme des Ausgangsfalls. Das ist eine explorative Messung, keine statistisch abgesicherte Leistungsstudie.

2 Was verändert wird

Die Aufteilung eines Schrittes lautet schematisch

$$\Phi_h = K_{h/2}^{\text{klein}} \circ F_h^{\text{direkt}} \circ K_{h/2}^{\text{klein}}.$$

Die Impulse K berücksichtigen die gegenseitige Kleinkörpergravitation mit dem CFK-Baum ($\theta = 0.4$). F integriert alle Wechselwirkungen mit Sonne und Planeten adaptiv mit DOPRI5. Dessen Toleranzen bleiben $\text{rtol} = 10^{-13}$ und $\text{atol} = 10^{-15}$, der maximale interne Schritt bleibt 0.001 Jahre. Es gibt keine Plummer-Glättung. Einschlagbehandlung, Masse- und Impulsübertragung sowie Auswurfkriterium bleiben identisch.

Vergrößert wird also nicht pauschal jeder interne Integrationsschritt. Bei glatten Kräften besitzt die symmetrische Aufteilung global einen Fehler der Ordnung h^2 . Ein zehnfacher Makroschritt kann den zugehörigen Fehleranteil daher ungefähr verhundertfachen. Baumapproximation, adaptive Integration, Rundung und diskontinuierliche Einschlagereignisse verhindern jedoch, dass dies als allgemeine Aussage zum Gesamtfehler gilt.

3 Referenz und Messgrößen

Die feinere Rechnung $h_{\text{ref}} = 0.0025$ dient als Vergleich, nicht als exakte Lösung. Sie benutzt dieselben approximierten Kräfte. Gemeinsam überlebende Körper werden über stabile IDs zugeordnet. Am gemeinsamen Endzeitpunkt messen wir

$$\delta r_i = \|\mathbf{r}_i^{(h)} - \mathbf{r}_i^{(\text{ref})}\|_2, \quad \delta v_i = \|\mathbf{v}_i^{(h)} - \mathbf{v}_i^{(\text{ref})}\|_2.$$

Gespeichert werden Maximum, Positionsquantile und RMS der Kleinkörper sowie die ID des größten Positionsunterschieds. Separat werden überlebende IDs, Einschlagpaare und Kontaktzeiten verglichen. Gleiche Ereigniszahlen allein wären kein ausreichender Vergleich. Die Laufzeit zerfällt in die instrumentierte schnelle Kraftauswertung, die CFK-Kraftauswertung und den nicht darin erfassten Rest, insbesondere Integrator-, Ereignis- und Ausgabearbeit.

4 Reproduzierbarkeit

Die originale GCC-13-Programmdatei ließ sich auf schmalzberg nicht starten: Die Laufzeitbibliothek besitzt die benötigten neueren Symbole nicht. Dieser Fehlversuch ist separat archiviert. Deshalb wurde der archivierte Produktions Quellcode mit GCC 11 und bereits vorhandenen Boost-Headern neu kompiliert: `-O3 -DNDEBUG -std=c++20 -ffp-contract=off -fopenmp`. Es werden weder Fast-Math noch architekturenspezifische Optimierungen benutzt. Der Solar-Test muss vor dem Start erfolgreich sein. Alle Varianten verwenden exakt dasselbe neu gebaute Programm. Die Laufzeiten sind daher nur innerhalb dieser Serie direkt vergleichbar, nicht mit dem Nachlauf auf anderer Hardware und anderem Compiler.

`build.py` und `experiment.py` enthalten den Ablauf. Unter `build/` liegen Build-Befehle, Compilerangaben und Testprotokoll; `results/worker.json` enthält Hardwareangaben und SHA-256-Werte von Programm, Eingabe und Versuchsskript. Je Variante bleiben Endzustand, Ereignisse, Status, Zeitprofile und Ressourcenprotokolle erhalten. Positionsstichproben werden nach jedem Makroschritt ausgegeben; damit nimmt deren Ausgabebelastung mit kleinerem h zu. Die Zeitmessung umfasst diesen Aufwand.

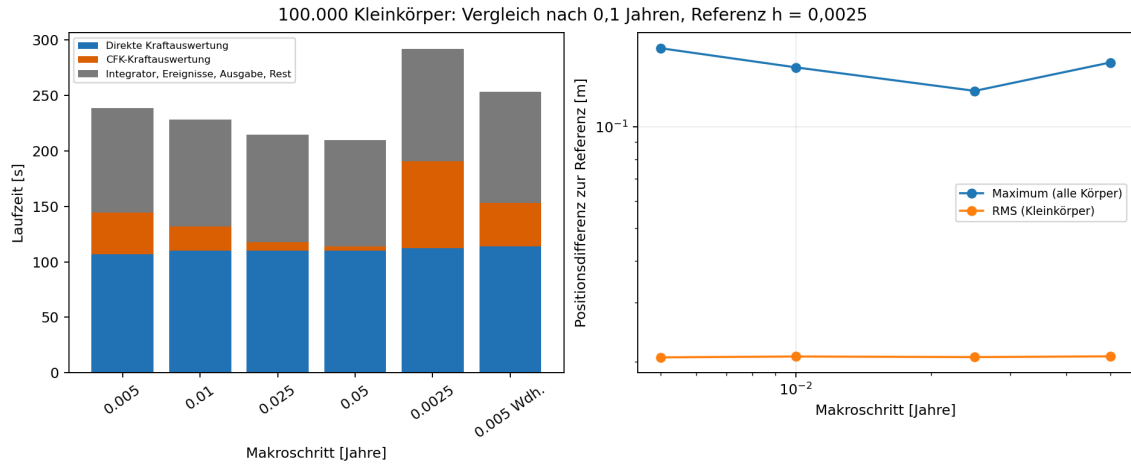
5 Ergebnisse

h [Jahre]	Zeit [s]	CFK [s]	$\max \delta r$ [m]	$\max \delta v$ [m/s]
0.0050	238.72	37.26	1.712e-01	2.669e-09
0.0100	228.29	21.29	1.501e-01	1.136e-09
0.0250	214.73	7.81	1.278e-01	1.312e-09
0.0500	209.94	3.94	1.552e-01	3.534e-09
0.0025	291.81	78.47	0.000e+00	0.000e+00
0.0050	253.37	39.22	1.712e-01	2.669e-09

Die vorletzte Zeile ist die Referenz, die letzte die Wiederholung.

h [Jahre]	Zeitdifferenz Jupiter [s]	Zeitdifferenz Uranus [s]
0.0050	9.377e-07	-7.385e-06
0.0100	6.166e-07	-6.139e-06
0.0250	1.090e-06	-9.080e-06
0.0500	9.539e-07	-3.276e-06
0.0025	0.000e+00	0.000e+00
0.0050	9.377e-07	-7.385e-06

Alle Varianten haben identische Einschlagpaare und dieselben verbleibenden IDs. Die Baseline-Wiederholung hat einen maximalen Positionsunterschied von $0.000e+00$ AU und einen maximalen Geschwindigkeitsunterschied von $0.000e+00$ AU/Jahr. Das Laufzeitverhältnis Wiederholung/erster Lauf beträgt 1.0614. Beim Vergleich von 2009 gespeicherten Zuständen mit dem früheren Produktionslauf beträgt die maximale Positionsdivergenz $3.553e-15$ AU. Dies ist nur eine Stichprobenkontrolle zwischen Rechnern, kein Vergleich aller alten Endzustände.



6 Beobachtung zur Endzeitbehandlung

Bei $h = 0.01$ liegt die aufsummierte Zeit nach zehn Schritten bei 0.09999999999999999 statt beim gespeicherten Zielwert 0.1 . Die unveränderte Abbruchbedingung erzeugt deshalb einen elften Schritt von ungefähr $1.39 \cdot 10^{-17}$ Jahren. Trotz der verschwindend kleinen Zeitspanne werden zwei zusätzliche Baumkräfte ausgewertet. Die Messung enthält diesen Aufwand unverändert (rund zwei Sekunden). Für eine spätere Verbesserung sollte die Endzeit durch eine robuste Schrittplanung erreicht werden, ohne physikalisch relevante Restintervalle pauschal wegzulassen. Hier wird bewusst keine Variante nachträglich optimiert.

7 Einordnung und Entscheidung

Im Kurzversuch liegen die maximalen Positionsabweichungen zur feineren Rechnung für alle vier untersuchten Makroschritte zwischen etwa 0.13 und 0.17 Metern. Insbesondere ist hier kein systematisches Anwachsen dieser Differenz mit h^2 erkennbar. Das widerlegt die Ordnung der Aufteilung nicht: Es wird nur ein Anteil des Fehlers verändert, und die gegenseitige Gravitation dieser sehr leichten Kleinkörper ist schwach. Die Messung isoliert Rundungs-, Baum- und RK-Fehler nicht voneinander. Eine Konvergenzordnung oder ein absoluter Fehler zur exakten Lösung lässt sich aus diesen Differenzen daher nicht bestimmen. Die RMS-Positionsabweichung der Kleinkörper liegt bei allen vier Makroschritten nahe 2.1 cm. Die größte Verschiebung einer Einschlagzeit zur Referenz bleibt unter $10\ \mu\text{s}$. Alle Varianten enden mit denselben 99998 Kleinkörpern; kein Auswurf wurde entfernt.

Beim zehnfachen Makroschritt werden noch 1537 statt 1553 akzeptierte adaptive Schritte benötigt. Die feine Behandlung der Planetenbegegnungen bleibt bestehen; größere Makroschritte sparen hauptsächlich CFK-Kräfte. Gegenüber der ersten Baseline-Messung sinkt die Gesamtzeit von 238.72 auf 209.94 Sekunden, also um rund 12 Prozent, nicht um Faktor zehn. Die Wiederholung in der Ergebnistabelle zeigt die beobachtete Streuung des Ausgangsfalls: 253.37 Sekunden statt 238.72 Sekunden bei bitweise identischem Endzustand. Bezogen auf diese beiden Baseline-Zeiten liegt die Ersparnis des zehnfachen Makroschritts zwischen 12 und 17 Prozent. Das ist keine statistische Messreihe und kein Konfidenzintervall.

Für dieses Modell ist $h = 0.05$ Jahre damit ein plausibler Kandidat für einen anschließenden längeren Vergleich. Die vorliegenden 36,525 Tage sind jedoch keine Absicherung einer jahrzehntelangen Integration. Vor einem wissenschaftlich ausgewerteten Langlauf sollten die bisherige und die größere Schrittweite über einen längeren gemeinsamen Zeitraum verglichen werden, einschließlich Ereignisstatistik und Bahnelementen. Der laufende Nachtversuch wird nicht umgestellt. Auch auf 10- oder 100-km-Körper ist diese Aussage nicht übertragbar: Bei gleicher Dichte steigen ihre Massen um Faktoren 10^3 bzw. 10^6 , also gerade der hier nur schwache gegenseitige Kraftanteil.