Apophis: tausend Jahre

Eigene numerische Langzeituntersuchung 2026–3026

Retzlaff, Proto · Stand 28. November 2026 · Version 1

Ergebnisse der ausgeführten Rechnung

Die eigene Integration über tausend Kalenderjahre ist abgeschlossen. Aus der heutigen JPL-Lösung wurden 256 unabhängig gezogene Anfangsbahnen mit jeweils acht gemeinsam gestörten, korrelierten Fitparametern bis zum 28.11.3026 verfolgt. Kein Klon des Hauptensembles unterschreitet die hier geprüfte Atmosphärenschwelle von 6.478,3 km geozentrischem Abstand. Das ist ein Ergebnis der endlichen Modellstichprobe, kein Nachweis einer Einschlagswahrscheinlichkeit null. [8]

Nach der bekannten Passage 2029 erreichen 34 von 256 Klonen (13,3 %) mindestens einmal einen Abstand unter einer mittleren Mondentfernung. Insgesamt treten dabei 43 solche Begegnungen auf. Die Zahl weiterer Passagen der nominalen Bahn unter dieser Schwelle beträgt 0. Sie allein würde die Bandbreite der heutigen Anfangsunsicherheit nicht beschreiben. [8]

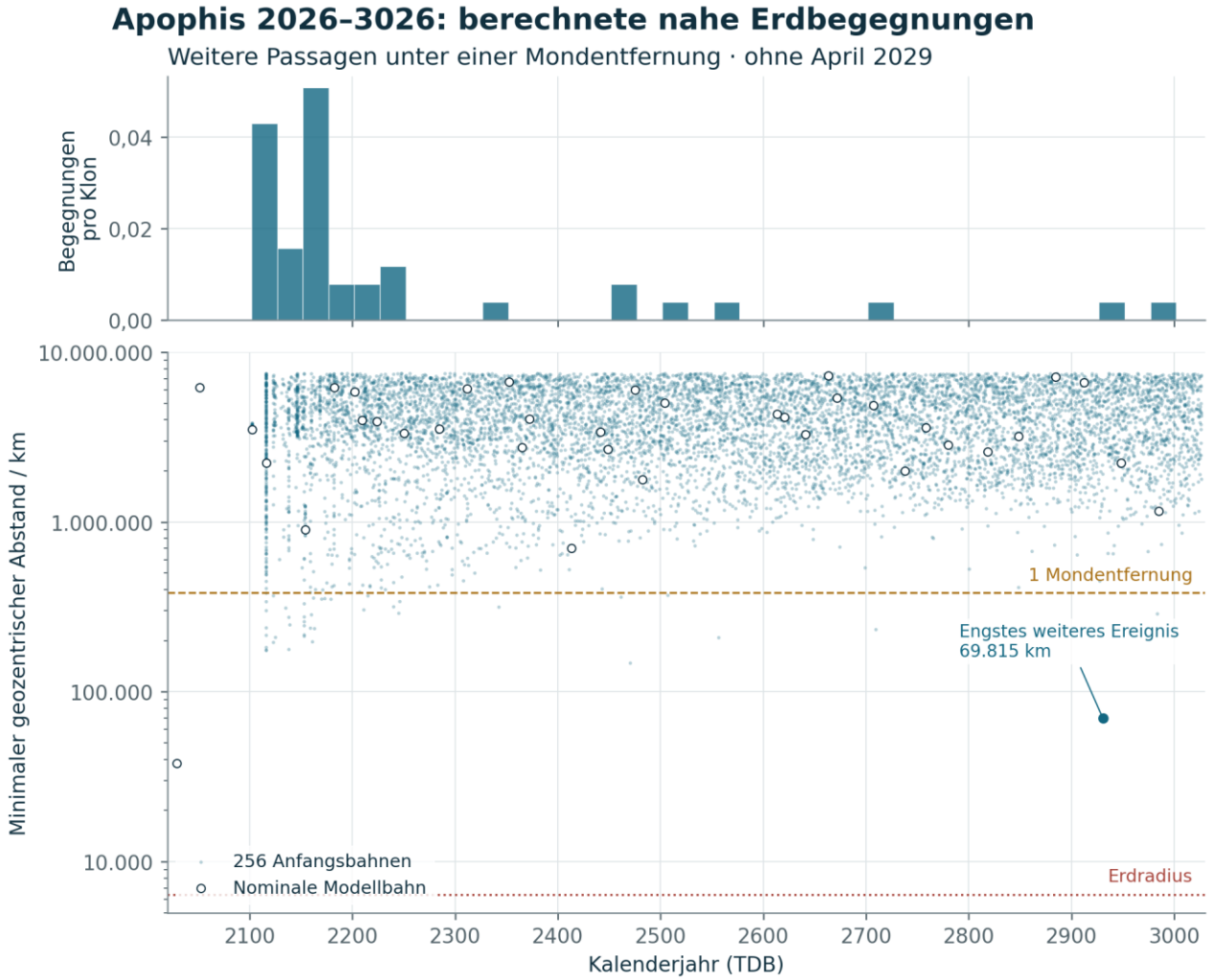

Abbildung 1. Tatsächlich integrierte Erdbegegnungen. Oben: Zahl weiterer Annäherungen unter einer Mondentfernung pro Klon in jeweils 25 Kalenderjahren; die Passage vom April 2029 ist dort ausgenommen. Unten: alle erfassten Begegnungen unter 0,05 au des Hauptensembles und der nominalen Modellbahn. Die logarithmische Entfernungsskala zeigt die große Spanne. Abstände vom Erdmittelpunkt; eine nahe Passage ist kein Einschlag. Eigene Rechnung [8].

Aussageumfang: Die Untersuchung beschreibt die heutige Bahnunbestimmtheit unter ausdrücklich festgelegten Kräften. Sie erbringt keine Entwarnung für tausend Jahre. Die amtliche Entwarnung für mindestens ein Jahrhundert, ausgesprochen 2021, bleibt davon getrennt. [1]

1 Zeitraum und Bedeutung der Ergebnisse

Untersucht wird das Intervall vom 28.11.2026, 00:00 TDB, bis zum 28.11.3026, 00:00 TDB. Zwischen den beiden proleptisch gregorianischen Kalenderdaten liegen 365.242 Tage. Das ist ein Jahrtausend von Kalenderdatum zu Kalenderdatum; die Rechnung addiert nicht pauschal 1.000 julianische Jahre zu je 365,25 Tagen. Die Startintegration setzt bereits an der zur Kovarianz passenden Epoche 01.01.2021 TDB an. Bewertet werden Ereignisse innerhalb des genannten Hauptintervalls.

TDB ist die dynamische Zeitskala der Ephemeriden. Für Ereignisse in fernen Jahrhunderten werden keine vermeintlich auf Sekunden bekannten UTC- oder mitteleuropäischen Uhrzeiten angegeben. Künftige Schaltsekunden und Erdrotation sind damit nicht vorweggenommen. [5]

Vier Größen, die auseinanderzuhalten sind

Größe	Bedeutung
Nominale Bahn	Ein einzelner Verlauf aus den besten heutigen Fitparametern bei festgelegten Kräften. Seine Berechenbarkeit bis 3026 bedeutet keine entsprechend lange Beobachtungsgenauigkeit.
Reale Annäherung	Erde und Asteroid befinden sich zur selben Zeit nahe beieinander. Gezählt werden lokale Minima ihres zeitabhängigen Abstandes.
MOID	Kleinster geometrischer Abstand zweier momentaner Keplerbahnen, unabhängig davon, wann die Körper den betreffenden Ort erreichen. In dieser Studie wird keine eigene MOID-Zeitreihe berechnet.
Einschlags-wahrscheinlichkeit	Gewicht aller Anfangs- und Modellzustände, die zu einer physischen Kollision führen. Eine Häufigkeit von Mondabstand-Passagen ist dafür kein Ersatz.

Gesicherter Nahzeitbereich und längere Vorhersagen

Die NASA schloss 2021 einen Einschlag für mindestens die folgenden 100 Jahre aus. Sentry meldet Apophis beim Statusabruf am 28.11.2026 als aus der Risikotabelle entfernt. Dieser Status ist keine Prüfung des hier betrachteten gesamten Jahrtausends. [1] Farnocchia und Chesley beschrieben die Bahn 2022 als bis 2116 deterministisch. Ihr Tagungsbeitrag legt dafür kein mit späteren Arbeiten identisches quantitatives Grenzkriterium fest. [9]

Fuentes-Muñoz et al. (2026) finden in ihrer Rechnung 2000–3000 für Apophis eine Streuung der entfalteten mittleren Anomalie über 180° ab 2164 und eine MOID-Streuung über eine Mondentfernung ab 2634. Sie berichten 1,272 erwartete Annäherungen unter einer Mondentfernung über 2025–3000; die bekannte Passage 2029 ist darin enthalten. Das ist weder eine Einschlagswahrscheinlichkeit noch die Wahrscheinlichkeit mindestens einer Begegnung. Diese Literaturwerte beschreiben ein anderes Intervall und dienen hier nur dem Vergleich. [6]

Die eigene Auswertung weist das ganze Jahrtausend und die zusätzlichen Begegnungen ab 15.04.2029 getrennt aus. Ohne diese Trennung würde die bekannte Passage 2029 den Anteil „mindestens eine Begegnung unter einer Mondentfernung“ dominieren.

2 Datenbasis und dynamisches Modell

Bestandteil	Tatsächlich verwendete Festlegung
Bahnlösung	NASA/JPL 220, berechnet am 25.06.2024; Datensatz am 28.11.2026 abgerufen.
Beobachtungsbogen	15.03.2004–09.04.2022; 7.370 verwendete Beobachtungen, darunter 20 Radar-Laufzeit- und 30 Dopplermessungen.
Kovarianz	JD 2459215,5 TDB; acht korrelierte Parameter e, q, t_p, Ω, ω, i, A_1, A_2.
Planetendaten	JPL DE441 im nativen Originalformat; für das ganze Rechenintervall geprüft.
Asteroidenstörer	JPL SB441-N16; 16 schwere Asteroiden. Keine Ephemeride wird über ihr Dateiende extrapoliert.
Gravitation	Sonne, acht Planeten, Mond, Plutosystem und 16 Asteroiden; 27 positive und geprüfte Gravitationsparameter.
Zusatzkräfte	EIH-Relativität mit 11 Quellen; Sonnen-J_2 und Erd-J_2; radiale und transversale nichtgravitative Beschleunigung.
Numerik	ASSIST 1.2.3, REBOUND 4.6.0, IAS15; $\varepsilon = 10^{-12}$, adaptive_mode = 2, keine feste Mindestschrittweite.

Tabelle 1. Grundlage der eigenen Fortrechnung [2–5, 8]. Der Abruf im November 2026 ist keine neue Beobachtung von 2026. Die Standardepoche der veröffentlichten Bahnelemente und die Kovarianzepoche unterscheiden sich; verwendet wird die zum Kovarianzzeitpunkt passende Anfangslage. Eine eigene Neuanpassung der Rohbeobachtungen wurde nicht durchgeführt. Die unabhängige Leistung liegt in Fortrechnung, Ereignissuche und Auswertung.

Nichtgravitative Kräfte

$$a_{NG} = (A_1\,\hat{r} + A_2\,\hat{t}) \cdot (1\,au / r)^2$$

$\hat{r}$ ist die radiale Richtung von der Sonne, $\hat{t}$ die transversale Richtung in der Bahnebene. $A_1 = 5{,}0 \cdot 10^{-13}$ au/Tag² und $A_2 = -2{,}901766637153165 \cdot 10^{-14}$ au/Tag² sind die heutigen Fitwerte. Ihre formalen Standardabweichungen betragen $4{,}892 \cdot 10^{-13}$ beziehungsweise $1{,}859 \cdot 10^{-16}$ au/Tag². Die übrigen im Datensatz festgelegten Koeffizienten ergeben eine Abhängigkeit proportional r^{-2}. Die gemeinsame Kovarianz wird vollständig berücksichtigt. [2, 8]

Im Hauptmodell bleibt jeder gezogene A_1-/A_2-Wert über die gesamte Integration konstant. Das ist eine konkrete Modellannahme. Veränderungen von Rotation, Form oder thermischen Eigenschaften werden nicht durch eine kleine formale Fehlergrenze des heutigen A_2 automatisch mit abgedeckt.

3 Korrelierte Anfangszustände und Szenarien

Das Hauptensemble enthält 256 unabhängig gezogene Anfangsparametervektoren. Die nominale Lösung wird zusätzlich integriert und zählt nicht als zufällige Stichprobe. Der Zufallsstartwert ist 20261128; die verwendeten Parameter, Zustände und Klonnummern sind archiviert. Alle hier ausgewerteten Läufe erreichen das vorgegebene Enddatum, sofern nicht eine ausdrücklich dokumentierte geometrische Abbruchschwelle erreicht wird. [8]

$$\theta_j = \theta_0 + D\,L\,z_j, \quad L\,L^T = R, \quad z_j \sim N(0, I)$$

D enthält die formalen Standardabweichungen, R die Korrelationsmatrix. Die Cholesky-Zerlegung erfolgt in normierten Einheiten, damit die sehr unterschiedlichen Größenordnungen von Winkeln, Entfernungen, Zeiten und Beschleunigungen die Faktorisierung nicht verschlechtern. Die Kovarianz wird nicht durch Entfernen kleiner Eigenwerte oder durch unabhängiges Ziehen ihrer Diagonale ersetzt.

Die Kepler-Elemente der Kovarianzepoche werden in heliozentrische ICRF-Zustände umgerechnet. Ihre Abweichungen vom entsprechend umgerechneten Nominalzustand werden auf den geometrischen baryzentrischen Anfangszustand aus Horizons aufgesetzt. So bleibt die nominale Anfangslage identisch mit dem Referenzzustand; die achtdimensionale gemeinsame Störung einschließlich der Kraftparameter bleibt erhalten.

$$y_j = y_{H,0} + F(\theta_j) - F(\theta_0)$$

Die formale Normalverteilung ist nicht nachträglich beschnitten. 41 der 256 Anfangsvektoren haben $A_1 < 0$. Das dokumentiert eine Grenze der Interpretation: Ein formales Kovarianzensemble ist kein vollständig physikalisch begründeter Posterior für Strahlungsdruck und Wärmeabgabe. Ein Positivitätsprior würde die Verteilung und ihre Korrelationen verändern und müsste neu begründet werden. [8]

Drei getrennte Kraftannahmen

Variante	A_2 ab 15.04.2029	Stichprobe
Hauptmodell	Individueller gezogener Fitwert bleibt konstant	256 Klone
Neustartkontrolle	Unverändert; identischer Neustart wie in den Varianten	64 gleiche IDs
$A_2 = 0$	Transversaler Term abgeschaltet	64 gleiche IDs
A_2 mit umgekehrtem Vorzeichen	Negativer des zuvor gezogenen Wertes	64 gleiche IDs

Tabelle 2. A_1 bleibt jeweils unverändert. Die Varianten beginnen nach der April-Passage aus demselben Zustand desselben Klons. Ein kontrollierter Neustart mit unverändertem A_2 trennt einen bloßen Neustarteffekt von der beabsichtigten Änderung. Nullsetzen und Vorzeichenumkehr sind ungegewichtete Sensitivitätstests; sie bilden kein glaubwürdiges Konfidenzintervall der künftigen Wärmeabgabe und werden nicht zu einer Gesamtwahrscheinlichkeit vermischt. [8]

Aktuelle Spinmodelle sagen nach der Erdpassage eine stark erhöhte Unsicherheit des Rotationszustands voraus; zusätzliche Lichtkurven 2027/2028 können die Vorhersage verbessern. Die vorhandenen Rechnungen kalibrieren aber keinen physikalischen Verlauf $A_2(t)$ für tausend Jahre. Deshalb bleiben diese Tests von der heutigen Messkovarianz getrennt. [7]

4 Begegnungssuche und nominale Modellbahn

Der Abstand wird bei jedem akzeptierten adaptiven Schritt überwacht. Zusätzlich begrenzen äußere Integrationsziele die Schrittweite: höchstens 3 Tage, höchstens 1 Tag innerhalb 0,1 au von der Erde und ein Achtel der momentanen Entfernung-Geschwindigkeit-Zeitskala gegenüber jedem der elf Hauptkörper, mit Sicherheitsmarge 0,8. Ein Vorzeichenwechsel des radialen Skalarprodukts liefert ein Kandidatenintervall. Dieses wird zunächst kubisch-hermitesch eingegrenzt; Minima unter 0,055 au werden durch lokale direkte Integration und Brent-Nullstellensuche verfeinert. Alle hier verwendeten kritischen Abstandsschwellen liegen innerhalb dieses Bereiches. [8]

$$g(t) = (r_{Apophis} - r_{Erde}) \cdot (v_{Apophis} - v_{Erde}) = 0$$

Ein Minimum erfordert den Übergang von abnehmendem zu zunehmendem Abstand. Es wird für jeden Klon gesucht, auch wenn dessen Begegnung zeitlich von der nominalen Bahn abweicht. Ein nur um die nominale Begegnung gelegtes Zeitfenster würde bei verzweigten Bahnen zusätzliche Ereignisse übersehen. Die gespeicherten 30-Tage-Zustände dienen der Darstellung der Bahnstreuung, nicht als alleinige Suchpunkte für enge Passagen.

Engste weitere Begegnungen der nominalen Rechnung

Modelltermin TDB	Abstand / km	Mondentfernungen
16.04.2413	701.755	1,826
15.04.2154	899.020	2,339
21.09.2984	1.159.388	3,016
15.04.2482	1.785.470	4,645
20.09.2737	1.991.677	5,181
25.04.2948	2.221.423	5,779
13.04.2116	2.232.855	5,809
23.04.2818	2.593.926	6,748

Tabelle 3. Auswahl nach Mindestabstand ab 15.04.2029; nach der starken Auffächerung des Ensembles sind diese Termine Ergebnisse einer einzelnen Modellbahn. Sie sind keine Vorhersage beobachtbarer Ereignisse mit entsprechender Kalendergenauigkeit. Die vollständige Ereignisdatei enthält die numerischen Zeiten zur Nachprüfung. [8]

Die nominale Rechnung liefert insgesamt 1021 lokale Erd-Abstandsminima im Hauptintervall, darunter 1017 nach dem 15.04.2029. Das engste weitere nominale Minimum beträgt rund 701.755 km im Modelljahr 2413. Das liegt bei 1,83 mittleren Mondentfernungen. Der Vorbeiflug 2029 bleibt mit rund 38.011 km erheblich näher. [8]

Der nominale Verlauf hat kein besonderes statistisches Gewicht. Nach einer nichtlinearen Begegnung muss er weder im dichtesten Teil der Klonverteilung liegen noch deren mittleren Mindestabstand wiedergeben. Deshalb darf die Auswahl der nominalen engsten Passagen keine Untersuchung aller zulässigen Begegnungszweige ersetzen.

5 Häufigkeiten im berechneten Ensemble

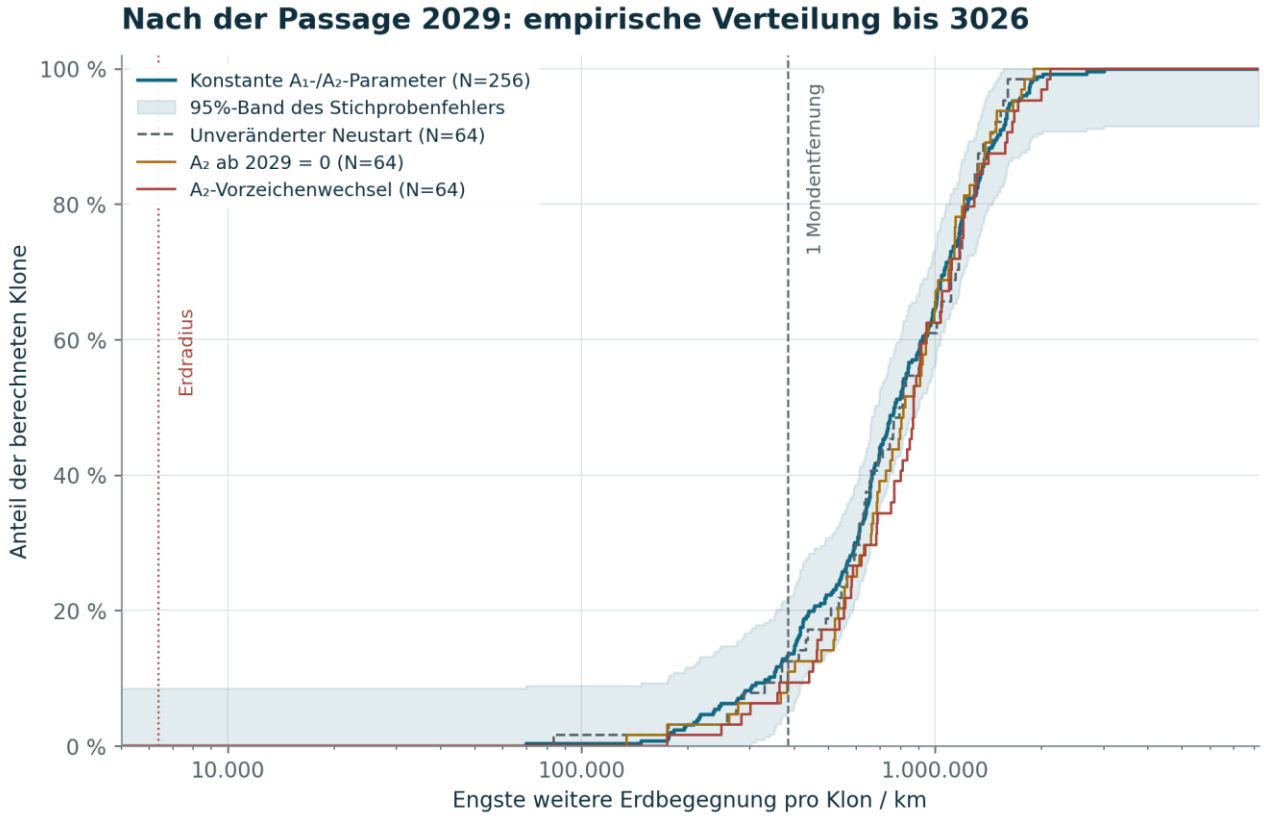

Abbildung 2. Empirische Verteilung des engsten weiteren Erdvorbeiflugs jedes Klons ab 15.04.2029 bis 28.11.3026. Ein Wert von beispielsweise 20 % bei einer Distanz bedeutet: 20 % der gezogenen Klone haben mindestens eine Passage bis zu dieser Distanz. Das Band beschreibt ausschließlich den simultanen 95%-Monte-Carlo-Stichprobenfehler des Hauptensembles (DKW–Massart); unbekannte Kräfte sind darin nicht enthalten. Szenarien werden separat gezeigt. [8, 10]

Schwelle nach 2029	Klone mit Ereignis	Anteil; 95%-MC-Intervall	Ereignisse je Klon
Erdradius: 6.378,137 km	0/256	0,0 % (0,0 %–1,5 %)	0,000
Atmosphäre: 6.478,3 km	0/256	0,0 % (0,0 %–1,5 %)	0,000
10 Erdradien	0/256	0,0 % (0,0 %–1,5 %)	0,000
1 Mondentfernung	34/256	13,3 % (9,7 %–18,0 %)	0,168
0,05 au	256/256	100,0 % (98,5 %–100,0 %)	35,703

Tabelle 4. Hauptensemble; Konfidenzintervalle nach Wilson, bedingt auf Anfangsverteilung, Kraftmodell und Ereignisdefinition. „Ereignisse je Klon“ ist die empirische Schätzung der erwarteten Anzahl und kann größer als eins sein. Mehrere Passagen einer Bahn sind keine unabhängigen Stichproben. [8]

Der kleinste weitere Abstand unter allen 256 Hauptklonen beträgt rund 69.815 km. Er gehört zu Klon 44 im Modelljahr 2930. Die empirischen 5-/50-/95-Prozent-Quantile der engsten weiteren Minima je Klon liegen bei 237.272 / 767.962 / 1.626.496 km. Diese Quantile beschreiben die gezogene Verteilung; sie schließen nicht untersuchte seltene Bahnen nicht aus. [8]

Die gerundete Atmosphärenschwelle von 6.478,3 km setzt sich aus Erdäquatorradius, 100 km Höhe und etwa 170 m angenommenem Asteroidenradius zusammen. Sie ist eine geometrische Prüfschwelle für den Asteroidenmittelpunkt; ein Atmosphären- oder Fragmentationsmodell wird nicht berechnet. Eine Passage unter einer Mondentfernung kann viele Erdradien entfernt bleiben. Der gesamte Auswertungszeitraum umfasst zusätzlich die bekannte sichere Passage 2029, die keine weitere Begegnung darstellt.

6 Wann die genaue Position verloren geht

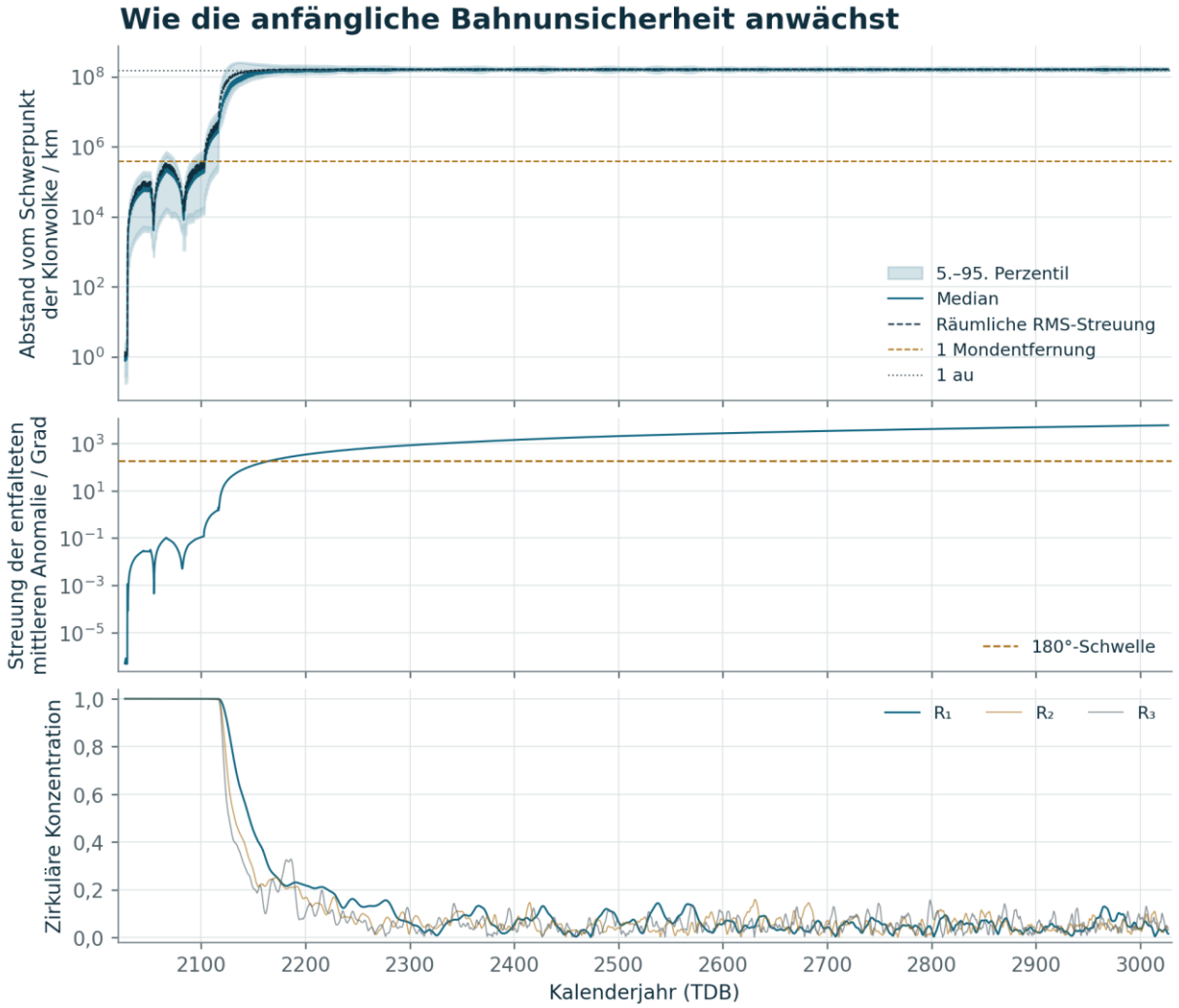

Abbildung 3. Oben: empirische Radien um den Schwerpunkt der Positionsstichprobe zu festen Zeiten, mit Median, 5.–95. Perzentil und räumlicher RMS-Streuung. Mitte: Standardabweichung der für jeden Klon zeitlich entfalteten mittleren Anomalie. Unten: Beträge der ersten drei zirkulären Momente R_1, R_2, R_3. Eine kleine Konzentration zeigt Verteilung über die Umlaufphase an; die ersten drei Momente allein beweisen keine vollständige Gleichverteilung. Keine der Kurven ist eine Einschlagswahrscheinlichkeit. [8]

Die räumliche RMS-Streuung überschreitet in den gespeicherten Zuständen erstmals etwa 2102 eine mittlere Mondentfernung und etwa 2147 1 au. Im Hauptensemble wird die 180°-Schwelle der entfalteten mittleren Anomalie erstmals an einem gespeicherten Zustand am 27.06.2164 erreicht. Das vorige gespeicherte Datum ist 28.05.2164. Die belastbare Angabe ist daher etwa 2164, nicht eine exakt bekannte physische Grenzzeit. Am Ende der Rechnung beträgt die räumliche RMS-Streuung rund 1,09 au. Alle ausgewerteten Winkel bestehen die verwendete Raster- und Ellipsenprüfung. Auch nach Überschreiten der Phasenschwelle werden alle Begegnungen weiterhin direkt aus den integrierten Einzelbahnen gezählt. [8]

Die Winkel werden entlang der Zeit für jeden Klon entfaltet. Das Ausgaberaster wird gegen die halbe kleinste lokale Umlaufperiode geprüft; diese Prüfung allein schließt abrupte Änderungen oskulierender Elemente bei einer engen Passage nicht aus. Schon eine gleichverteilte endliche Stichprobe besitzt zufällige zirkuläre Momente: Ihre quadratische Mittelgröße beträgt bei N = 256 etwa $1/\sqrt{N} = 0{,}063$. Der Schwerpunkt der späten Positionswolke ist ein statistischer Bezugspunkt und keine physisch durchlaufene Bahn. Eine einzige Fehlerellipse beschreibt eine ringförmige oder mehrgipflige Verteilung nur unzureichend.

7 Die Bahn im Raum

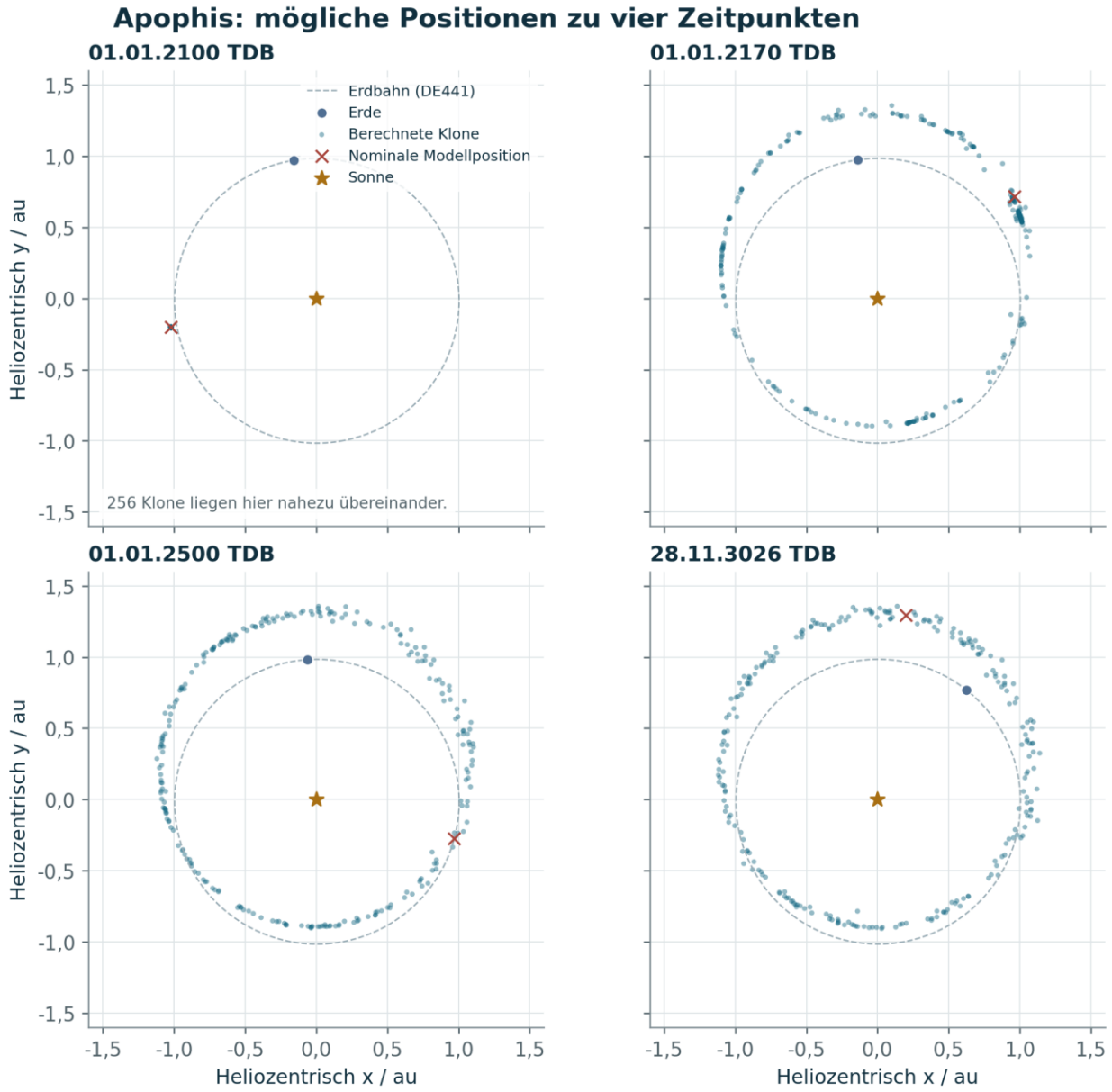

Abbildung 4. Positionen derselben Klonstichprobe zu vier ausdrücklich angegebenen Zeiten; Projektion auf die feste Ekliptikebene J2000. Jeder Punkt ist eine mögliche Apophis-Position unter dem Hauptmodell. Die gestrichelte Erdbahn und die Erdposition stammen aus DE441. Das Kreuz markiert den nominalen Zustand. Sonne und Erde sind vergrößerte Symbole; die Ortskoordinaten sind in au maßstäblich. Eine Projektionsüberschneidung beweist weder räumliche Nähe noch einen gleichzeitigen Einschlag. [8]

Die Grafik zeigt, warum eine noch so genau gezeichnete einzelne Langzeitbahn kein ausreichendes Bild der Vorhersage liefert. Anfangs liegen die Zustände nahezu übereinander. Später können die noch heute kaum unterscheidbaren Anfangsdaten zu unterschiedlichen Umlaufphasen und Begegnungsfolgen führen. Die Punkte stellen weder viele reale Asteroiden noch eine auseinanderbrechende Materiewolke dar.

Die Erdpositionen und die Klonpositionen gehören jeweils zum selben Datum. Der für die Grafik eingezeichnete Erdumlauf ist der modellierte Verlauf während eines Jahres um diesen Termin. Die monatlichen Zustände und die vier exakten Bildepochen stammen aus der Integration; die Grafik enthält keine frei gezeichneten Apophis-Bahnen.

8 Empfindlichkeit gegenüber thermischen Kräften

Der Hauptlauf beantwortet eine bedingte Frage: Was ergibt die heutige Bahnlösung, wenn das verwendete Kraftmodell weiter gilt? Die beiden zusätzlichen A_2-Varianten untersuchen, wie empfindlich die Ergebnisse gegenüber einer ausgewählten Änderung nach 2029 sind. Aus diesem Vergleich lässt sich keine Eintrittswahrscheinlichkeit der Änderung selbst ableiten.

Variante	N	Weitere Passage < 1 LD	Engstes Ereignis / km
Konstante A_1-/A_2-Parameter	256	34/256; 13,3 %	69.815
Unveränderter Neustart	64	8/64; 12,5 %	83.652
A_2 ab 2029 = 0	64	7/64; 10,9 %	134.176
A_2-Vorzeichenwechsel	64	6/64; 9,4 %	175.038

Tabelle 5. Gepaarte Varianten mit denselben 64 Anfangsklonen; der Hauptlauf enthält 256 Klone. Der folgende Vergleich nutzt gleiche Klonnummern. Die Minimaldistanz ist ein Extremwert der Stichprobe, keine Untergrenze aller zulässigen Bahnen. [8]

Der gepaarte Vergleich derselben 64 Anfangszustände gegen den unveränderten Neustart ergibt für den Anteil mit weiteren Passagen unter einer Mondentfernung: $A_2 = 0$: −1,6 Prozentpunkte; 95%-Intervall −10,9 bis +7,8 Prozentpunkte. A_2-Vorzeichenwechsel: −3,1 Prozentpunkte; 95%-Intervall −12,5 bis +6,2 Prozentpunkte. Beide Intervalle schließen null ein; ein gerichteter Unterschied der Häufigkeit ist mit dieser Stichprobe für keine der beiden Varianten aufgelöst. Die Intervalle stammen aus 4.000 Neuziehungen vollständiger Klonpaare und erfassen den bedingten Monte-Carlo-Stichprobenfehler. [8]

An der wesentlich weiteren Schwelle von 0,05 au verändert der A_2-Vorzeichenwechsel die mittlere Zahl weiterer Begegnungen von 36,625 auf 34,625 je Klon. Die Differenz beträgt -2,00 mit einem gepaarten 95%-Intervall von -3,94 bis -0,17 Ereignissen je Klon. Dieser Einzelbefund unter mehreren ausgewerteten Kennzahlen besitzt keine Korrektur für Mehrfachvergleiche. Er betrifft die Gesamtzahl der Vorbeiflüge innerhalb von 0,05 au und begründet keine allgemeine Aussage über eine Verringerung der Einschlagsgefahr. [8]

Einzelbahnen und Häufigkeiten

Nach chaotischer Auffächerung können kleine Änderungen einzelne Klonbahnen stark verschieben. Für die Begegnungshäufigkeit ist deshalb der Vergleich der Verteilungen maßgebend. Die Stichprobengröße begrenzt seine Aussagekraft; die numerischen Kontrollen im folgenden Abschnitt gehören zur Beurteilung.

Physikalische Grenzen des Modells

Thermische Entwicklung: Künftige Änderungen von Spin, Oberfläche und Wärmeleitung werden nicht durch ein gekoppeltes Spin-/YORP-/Thermikmodell fortgeschrieben. Die A_2-Varianten bleiben ungegewichtete Tests. [7, 8]

Äußere Störer: Alle Klone teilen dieselben DE441-/SB441-N16-Bahnen und Gravitationsparameter. Deren Unsicherheiten werden nicht mitgezogen. Das Sonnen-GM bleibt in der Testkörperkraft konstant; eine explizite solare Massenabnahme wird dort nicht fortgeschrieben. Die vorgegebenen Planetenbahnen bleiben die von DE441. [3, 4, 8]

Erdschwerefeld: Der Erd-J_2-Term verwendet eine feste J2000-Achse; J_3 und J_4 sind abgeschaltet. Für diese Modellwahl wird keine separat quantifizierte Fehlergrenze angesetzt. [4, 8]

Körpermodell: Apophis bleibt ein masseloser Testkörper ohne zusätzliche Impulsereignisse. Die Studie ordnet nicht modellierten Kollisionen oder Massenabgaben keine erfundenen Wahrscheinlichkeitsgewichte zu. [8]

9 Numerische Kontrolle und Belastbarkeit

Prüfung	Befund	Bedeutung
Kernelabdeckung	2020–3030 mit Randpolsterung; Ziel 3026 innen	Keine Extrapolation über das Dateiende.
Verlustfreier Ausschnitt	3.726 ASSIST- und 2.208 CSPICE-Zustände bitidentisch	Vergleich an 138 Zeitpunkten einschließlich Randnähe.
Gravitationsparameter	Alle 27 positiv und gegen den geprüften Satz abgeglichen	Jupiter-GM gesondert geprüft.
Frühe Ereignissuche	200 Minima je Rastervariante; gleiche Schwellenzählungen	Acht Klone bis 2050, 3- gegen 1,5-Tage-Höchstgrenze.
Numerische Rasteränderung	2029 bis 1,543 m; spätere Minima bis 105,9 km	Beobachtete Differenzen, keine Langzeit-Fehlergrenze.
Separate Horizons-Kontrolle	35 Zustände; max. 3D-Differenz 1.543 km	Eigener Kontrolllauf mit dem gewählten Produktionsmodell; Vergleich mit Horizons 2021–2051.
Toleranzkontrolle	32 gleiche Anfangsklone; $\varepsilon = 10^{-12}$ gegen 10^{-11}	6/32 gegen 5/32 Klone mit weiterer Passage unter einer Mondentfernung.

Tabelle 6. Tatsächlich ausgeführte Kontrollen. Ein Vergleichsunterschied ist keine allgemeine Fehlerobergrenze. Beim Langzeitvergleich wird zwischen numerischem Fehler, systematischer Modellabweichung und physikalischer Anfangsunsicherheit unterschieden. [8]

Der separate kurze Kontrolllauf ergibt für 2029 38.011,357306 km; die Produktionsbahn ergibt 38.011,355741 km. Ihre Differenz beträgt 1,57 m. Für 2044 unterscheiden sich die eigenen Produktions- und Kontrollminima um 97,3 km. Die unterschiedlichen Schritt- und Ausgabehistorien wirken sich nach 2029 stärker aus. Diese Zahlen dienen der Methodenprüfung und sind keine Behauptung entsprechender physikalischer Vorhersagegenauigkeit für 3026.

Numerischer Vergleich	N	Klone: Bezug → Variante	Änderung / Prozentpunkte; 95%-Intervall
Unveränderter Neustart	64	7 → 8	+1,6; +0,0 bis +4,7
Toleranz $\varepsilon = 10^{-11}$	32	6 → 5	−3,1; −9,4 bis +0,0

Gepaarter Vergleich: mindestens eine weitere Passage unter einer Mondentfernung. Bezug ist jeweils die kontinuierlich integrierte Hauptrechnung mit genau denselben Klonnummern. Die Intervallbildung zieht vollständige Klonpaare neu. [8]

Bei beiden numerischen Vergleichen schließt das gepaarte 95%-Intervall der Anteilsänderung null ein. Ein gerichteter Unterschied der Häufigkeit zusätzlicher Mondabstand-Passagen ist mit diesen Kontrollstichproben nicht aufgelöst. Das ist keine Bestätigung jeder späten Einzelbahn und kein Nachweis einer beliebig kleinen numerischen Unsicherheit.

Warum nicht alle späten Einzelbahnen übereinstimmen müssen

Wird ein sehr kleiner numerischer Unterschied durch eine enge Begegnung verstärkt, ist eine spätere Punkt-für-Punkt-Übereinstimmung kein geeignetes alleiniges Gütekriterium. Die überprüften frühen Bahnstücke müssen genau sein; im stark aufgefächerten Bereich werden zusätzlich die Häufigkeiten und Streuungsmaße kontrolliert. Eine begrenzte Kontrollstichprobe kann grobe Instabilitäten erkennen, aber keine Vollständigkeit der extrem seltenen Verteilungsflanken beweisen.

Die offizielle Horizons-Berechnung von Asteroiden ist auf 1600–2500 begrenzt. Die lange Gültigkeit von DE441 für Planeten verlängert diese Grenze nicht automatisch für das separat integrierte Apophis-Objekt. Deshalb wird keine Horizons-Bestätigung bis 3026 behauptet. [5]

10 Was sich über Einschläge sagen lässt

Kein atmosphärischer Eintrittskandidat wurde im Hauptensemble gefunden. Sämtliche 256 Hauptklone und die ausgewerteten Vergleichsvarianten erreichen 3026 ohne terminalen geometrischen Kandidaten. In Verbindung mit der Auflösung der Stichprobe erlaubt dies eine Beschreibung der häufigeren Begegnungen; eine belastbare sehr kleine absolute Einschlagswahrscheinlichkeit wird damit nicht bestimmt. [8]

$$P_{Impakt} = \int 1[d_{min}(\theta, M) \leq R_K]\, p(\theta, M \mid Beobachtungen)\, d\theta\, dM$$

θ bezeichnet Anfangsparameter, M das künftige Kraftmodell und R_k eine definierte Kollisionsschwelle. Das gezogene Ensemble untersucht eine vereinfachte Verteilung von θ bei jeweils festem M. Die Integration über alle physikalisch möglichen künftigen Modelle wird damit nicht ausgeführt. Diese Unterscheidung begrenzt die Wahrscheinlichkeitsaussage auch dann, wenn jede einzelne numerische Bahn sehr genau berechnet wurde.

Die Auflösungsgrenze einer endlichen Stichprobe

Bei N unabhängigen Klonen und null Ereignissen lautet die exakte einseitige 95%-Obergrenze für den Anteil innerhalb genau dieses Modells:

$$p_{95} = 1 - 0{,}05^{1/N}$$

Für N = 256 ergibt sich 1,16 %. Dieser Wert ist eine bedingte Auflösungsgrenze der Stichprobe, keine neu bestimmte reale Einschlagswahrscheinlichkeit von Apophis. Die einzelne Anteilsstufe 1/N beträgt bereits 0,39 %. Für deutlich seltenere Ereignisse kann eine Stichprobe dieser Größe auch bei nichtverschwindender Modellwahrscheinlichkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit null Treffer ergeben.

Zielanteil p	Klone für mindestens 95 % Trefferchance
10^{-3} (0,1 %)	rund 3.000
10^{-4} (0,01 %)	rund 30.000
10^{-6} (0,0001 %)	rund 3 Millionen

Tabelle 7. Größenordnung aus $1 - (1 - p)^N \geq 0{,}95$ bei gewöhnlicher unabhängiger Zufallsstichprobe; keine Aussage, dass Apophis einen dieser Anteile besitzt. Für seltene Einschlagszweige sind gezielte Verfahren und eine physikalisch begründete Unsicherheitsmodellierung wesentlich effizienter als ein bloß größeres Zufallsensemble.

Fachliche Schlussfolgerung

Die Rechnung zeigt, dass eine einzelne nominale Fortsetzung bis 3026 den Bereich möglicher späterer Begegnungen nicht ausreichend charakterisiert: Im Hauptensemble treten bei 13,3 % der Anfangsbahnen weitere Passagen unter einer Mondentfernung auf. Zugleich liefert diese Studie keinen Beleg für einen konkreten zukünftigen Einschlag und keine tausendjährige Sicherheitsgarantie. Belastbar sind die dokumentierten bedingten Begegnungsstatistiken und das sichtbar anwachsende Maß der Positionsunsicherheit.

Die nächste sachlich begründete Verbesserung ist die Neuberechnung mit zusätzlichen astrometrischen Daten sowie mit vor und nach 2029 gemessenen Rotations- und thermischen Eigenschaften. Dann werden nominale Bahn, Kovarianz und Kraftparameter gemeinsam aktualisiert. Die heute breite Langzeitverteilung ist kein unveränderliches Schicksal: Sie beschreibt den heutigen Kenntnisstand ohne diese künftigen Messungen.

11 Reproduzierbarkeit und weitere Verwendung

Das begleitende Daten- und Programmpaket enthält die tatsächlich verwendete Anfangslösung, die gezogenen korrelierten Parameter, vollständige Begegnungslisten, Zustandsausgaben, Auswertungen, Quelltext und eine Anleitung. Zusammenfassungen werden aus den Ergebnisdateien erzeugt. Große Originalephemeriden werden über dokumentierte offizielle Bezugsadressen und Prüfsummen zugeordnet; vorhandene verlustfreie Ausschnitte werden gesondert gekennzeichnet.

Dateigruppe	Inhalt und Zweck
Anfangsdaten	JPL-Antworten, Kovarianz, exakte gezogene Parameter, ICRF-Zustände, Zufallsstartwert und Herkunftsangaben.
Ephemeridenausschnitte	Originalpolynome aus DE441 und SB441-N16 mit Randpolsterung, Prüfsummen und Vergleich gegen die vollständigen Dateien.
Numerische Programme	Dynamik, Klonerzeugung, Schrittüberwachung, Ereignisverfeinerung und gesonderter kurzer Horizons-Vergleich.
Rohresultate	Ereignisdateien, Monatszustände, Kraftparameter, Abbruchdiagnostik und Laufprotokolle je unabhängigem Batch.
Statistische Auswertung	Anteile, Ereigniszahlen, Konfidenzintervalle, gepaarte Varianten, Randprüfungen und Phasen-/Positionsmaße.
Bericht und Grafiken	Datengesteuerte Erzeugung der Tabellen und vier Abbildungen; bearbeitbare Word-Datei und geprüfte PDF.

Ein neuer Datenstand erfordert einen neuen Lauf

Vor einer Aktualisierung werden die neue JPL-Lösungsnummer, die Kovarianzepoche und die Kraftkonventionen geprüft. Ein neuer Datensatz wird neben dem vorhandenen archiviert. Die Anfangsvektoren müssen zur neuen Epoche gehören; eine alte Kovarianz darf nicht unbesehen auf neue Bahnelemente gelegt werden. Zufallsstartwert und Stichprobengröße werden dokumentiert, damit Änderungen durch neue Daten von bloßem Stichprobenrauschen unterschieden werden können.

Eine reproduzierte Rechnung muss bei anderen Rechnerarchitekturen oder Bibliotheksversionen nicht jede späte chaotische Einzelbahn bitweise wiederholen. Entscheidend sind die identischen Eingangsdaten und Kräfte, die frühen Referenzvergleiche sowie die innerhalb ihrer Stichprobenfehler konsistenten Langzeitkennzahlen.

Anschluss an die vorangegangene Untersuchung

Der Bericht bis 2050 untersuchte einen Zeitraum, in dem die heutigen Bahndaten noch eine wesentlich engere Ereignisvorhersage ermöglichen. Diese Arbeit verlängert den Integrationszeitraum und ersetzt die dort für eine einzelne spätere Begegnung geeignete lokale lineare Fehlerfortrechnung durch eine direkte nichtlineare Stichprobe. Die amtliche Bewertung bis mindestens etwa 2121 und die hier untersuchten bedingten Langzeitergebnisse beantworten unterschiedliche Fragen.

Anhang: zusätzliche statistische Prüfungen

Abhängigkeit von der endlichen Stichprobe

Erste N Klone	Klone mit weiterer Passage < 1 LD	Anteil	Ereignisse je Klon
64	7	10,9 %	0,125
128	21	16,4 %	0,203
256	34	13,3 %	0,168

Tabelle 8. Verschachtelte Teilstichproben derselben unabhängigen Anfangsziehungen. Sie sind keine unabhängigen Wiederholungen. Die Änderungen beim Vergrößern von N veranschaulichen den Monte-Carlo-Stichprobenfehler; sie liefern keinen Nachweis, dass sämtliche seltenen Begegnungszweige gefunden sind. [8]

Formaler Flügel mit negativem A_1

Gruppe	N	Klone < 1 LD	Anteil	Engstes weiteres Minimum / km
$A_1 < 0$	41	6	14,6 %	182.384
$A_1 \geq 0$	215	28	13,0 %	69.815

Tabelle 9. Nachträgliche beschreibende Unterteilung des unveränderten Hauptensembles; keine neue Ziehung und keine physikalische Umgewichtung. [8]

Das engste weitere Ereignis des Hauptensembles liegt in der Gruppe $A_1 \geq 0$. Diese Unterteilung ist rein beschreibend: A_1 ist mit anderen Fitparametern korreliert; sie isoliert keinen kausalen Effekt des Strahlungsdrucks und ersetzt keinen physikalischen Prior. Die Ausgangsverteilung bleibt für alle hier berichteten Hauptzahlen unverändert.

Prüfung der Zeitränder

Weder der linke noch der rechte Rand des Berichtsintervalls fügt in der ausgeführten Stichprobe einen zusätzlichen Schwellenfall hinzu. Bei 184 Hauptklonen wäre die auslaufende Passage am 15.04.2029 näher als alle späteren lokalen Minima. Sie wird bewusst nicht als neue Begegnung gezählt. „Engste weitere Begegnung“ bedeutet daher nicht „kleinster Abstand an irgendeinem Zeitpunkt nach dem 15.04.2029“.

Verschiedene Unsicherheitsintervalle beantworten verschiedene Fragen

Das zweiseitige 95%-Wilsonintervall beschreibt den Monte-Carlo-Fehler eines Anteils an einer fest gewählten Abstandsschwelle. Das DKW–Massart-Band gilt dagegen gleichzeitig für die ganze Verteilungsfunktion und ist deshalb breiter; für N = 256 beträgt seine Halbbreite rund 8,49 Prozentpunkte. Die exakte einseitige Nulltreffergrenze in Abschnitt 10 beantwortet nochmals eine andere Frage. Keine dieser drei statistischen Grenzen umfasst unbekannte Änderungen des zukünftigen Kraftmodells. [8, 10]

Quellen und Datennachweise

[1] NASA/JPL CNEOS (2021; Statusabruf 28.11.2026). NASA Analysis: Earth Is Safe From Asteroid Apophis for 100-Plus Years; aktueller Sentry-Status
https://www.jpl.nasa.gov/news/nasa-analysis-earth-is-safe-from-asteroid-apophis-for-100-plus-years/

https://ssd-api.jpl.nasa.gov/sentry.api?des=99942

[2] NASA/JPL Solar System Dynamics (2026). Small-Body Database: (99942) Apophis, Lösung 220; vollständige Kovarianz und Modellparameter
https://ssd-api.jpl.nasa.gov/sbdb.api?sstr=99942&full-prec=true&cov=mat&phys-par=true&ca-data=true&vi-data=true

[3] Park, R. S.; Folkner, W. M.; Williams, J. G.; Boggs, D. H. (2021). The JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE440 and DE441. The Astronomical Journal 161, 105.
https://doi.org/10.3847/1538-3881/abd414

[4] Holman, M. J. et al. (2023). ASSIST: An Ephemeris-quality Test-particle Integrator. The Planetary Science Journal 4, 69.
https://doi.org/10.3847/PSJ/acc9a9

https://arxiv.org/abs/2303.16246

[5] NASA/JPL Solar System Dynamics (2026). Horizons System Manual: Zeitskalen, Koordinaten, Integrationsgrenzen und Ephemeriden
https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/manual.html

[6] Fuentes-Muñoz, O.; Farnocchia, D.; Chesley, S. R.; Park, R. S. (2026). The Hazardous NEOs of the Future: Long-term Predictions under Uncertainty. The Journal of the Astronautical Sciences 73, 61.
https://doi.org/10.1007/s40295-026-00598-8

[7] Ďurech, J. et al. (2026). The spin state of asteroid Apophis and a prediction of its change during the 2029 close encounter with Earth. Astronomy & Astrophysics 709, A278.
https://doi.org/10.1051/0004-6361/202658974

https://arxiv.org/abs/2604.24566

[8] Retzlaff, Proto (2026). Eigene numerische Langzeituntersuchung 28.11.2026–28.11.3026: Programm, Eingabedaten, Rechenprotokolle und Ergebnisse

[9] Farnocchia, D.; Chesley, S. R. (2022). Apophis Trajectory, Impact Hazard, and Sensitivity to Spacecraft Contact. Apophis T−7 Years: Knowledge Opportunities for the Science of Planetary Defense, Abstract 2007.
https://www.hou.usra.edu/meetings/apophis2022/pdf/2007.pdf

[10] Massart, P. (1990). The Tight Constant in the Dvoretzky–Kiefer–Wolfowitz Inequality. The Annals of Probability 18(3), 1269–1283.
https://doi.org/10.1214/aop/1176990746

Alle Internetquellen zuletzt geprüft am 28. November 2026. Die Quellen stützen Datenkonventionen, Kraftmodell und die gekennzeichneten Literaturangaben. Die tabellierten eigenen Ergebniszahlen und wissenschaftlichen Abbildungen sind aus dem archivierten Rechenlauf abgeleitet; sie sind keine von NASA oder ESA veröffentlichte neue Risikobewertung.