

Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 73 (2015)
Heft: 386

Artikel: Wie genau kann man Ort und Zeit einer Sonnenfinsternis berechnen? :
Das verflixte Delta T
Autor: Laager, Erich
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-897345>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 08.02.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Wie genau kann man Ort und Zeit einer Sonnenfinsternis berechnen?

Das verflixte Delta T

■ Von Erich Laager

Die scheinbaren Bewegungen von Sonne und Mond sind zwar mathematisch sehr genau erfassbar, aber die Verlangsamung der Erdrotation führt zu Unsicherheiten.

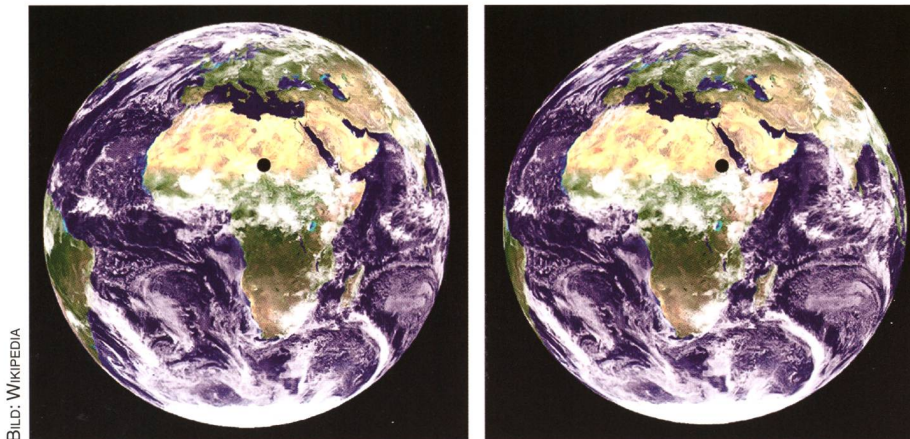


BILD: WIKIPEDIA

Abbildung 1: Blick vom Mond aus auf die Erde. Der schwarze Fleck markiert den Ort der Totalitätszone zu einem bestimmten Zeitpunkt. Links: Vorausberechneter Ort für eine fiktive, regelmässig laufende Erde. Rechts: Tatsächlicher Ort für eine Erde mit 1 Stunde Rotationsverspätung.

Weil man die Bewegung des Mondes sehr gut kennt, kann der zeitliche Verlauf von Finsternissen auf Bruchteile von Sekunden genau berechnet und vorausgesagt werden. Trotzdem kann man für künftige Finsternisse nicht genau sagen, wo auf der Erde sie stattfinden. Der Grund für diese Unsicherheit ist die

ständig langsamer werdende Rotation der Erde.

Auf der Basis einer regelmässig ablaufenden Zeit, die nicht der verlangsamten Erdrotation angepasst ist, kann man sehr genau berechnen, wann und wo (in Bezug auf den Erdmittelpunkt) die Finsternis stattfindet. Es ist jedoch unsicher,

in welcher Stellung die Erde sich dann gerade befinden wird. Ist die Erde in ihrer Rotation «verspätet», liegt die Finsternis weiter im Osten auf der Erdoberfläche (Abb. 1).

Mit verschiedenen Methoden versuchte man zu ermitteln, wie sich die Erddrehung verändert und welches die Folgen davon sind. Man verglich dazu eine grosse Zahl historischer Aufzeichnungen von Sonnenfinsternissen mit Berechnungen und fand so angenähert die gesuchten Abweichungen.

Die Zeitkorrektur Delta T

Diese Zahl ist die Zeitdifferenz (griechisch Delta für Differenz) zwischen einer konstant ablaufenden Zeit (z. B. der Atomuhr-Zeit) und derjenigen Zeit, welche durch die Erdrotation bestimmt wird. Bei der gelegentlichen Einfügung von Schaltsekunden wird diese Differenz angepasst.

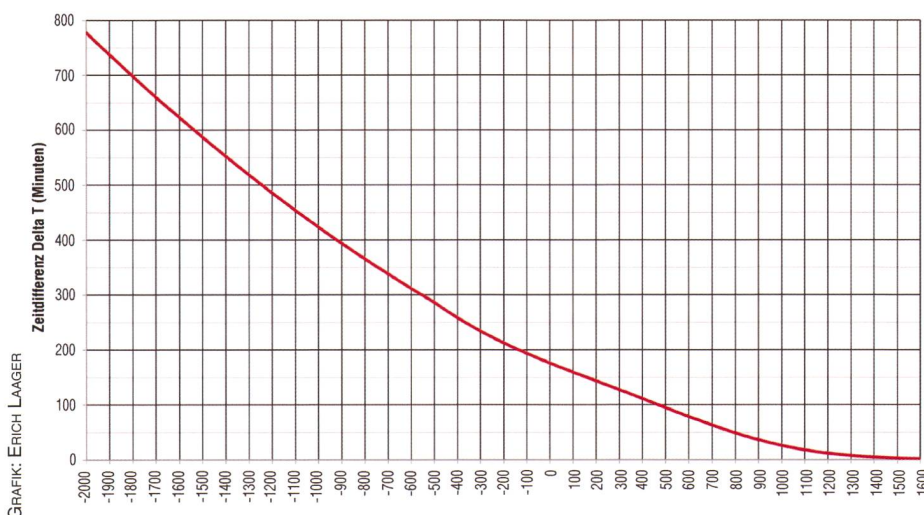
Definition (nach Wikipedia): TT = Terrestrische Zeit (eine exakt gleich laufende Zeitskala). UT = Universal Time (Zeitskala, wie sie im Alltag verwendet wird). Somit gilt: $\Delta T = TT - UT$. (Siehe auch Ergänzung von HANS ROTH am Schluss des Beitrages.)

Der Wert für Delta T verändert sich im Lauf der Zeit sehr stark. Für die Gegenwart findet man ihn durch aktuelle Beobachtungen (etwa durch die Kulminationszeit von Sternen) auf Bruchteile von Sekunden genau.

Tabellen im Canon of Lunar Eclipses geben die Werte von 1620 bis 1800 auf Sekunden genau an, bis 1860 auf Zehntelsekunden und dann auf Hundertstelsekunden.

Für vergangene und zukünftige Finsternisse hat man Formeln entwickelt, welche Resultate liefern, die möglichst gut zu den historischen Untersuchungen und zu den Beobachtungen passen. Diese Formeln sind Polynome, welche jeweils für einen bestimmten Zeitabschnitt gelten.

Man kennt die Einwirkungen des Mondes auf die Erde, sinnfällig sichtbar etwa an Ebbe und Flut. Daraus kann man für die Zukunft berechnen, wie stark die Erdrotation etwa gebremst wird. Nicht vorausehbar sind Veränderungen im Innern des Erdkörpers. Diese verändern dann die «glatte Kurve» der Prognose (siehe auch Abb. 3). Die grafischen Darstellungen (Abb. 2



GRAFIK: ERICH LAAGER

Abbildung 2: Zeitdifferenz Delta T jeweils für den Jahresanfang.

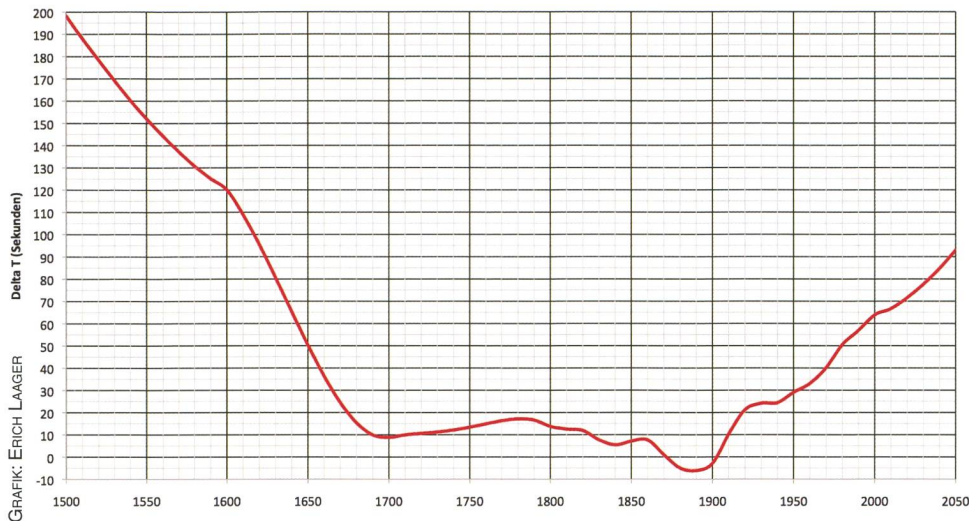


Abbildung 3: Bei einer gleichmässig (linear) abgebremsten Erdrotation wäre dies eine glatte Kurve mit einem Minimum = 0 im Jahr 1900. Die Grafik erfasst u. a. die in der Vergangenheit beobachteten Werte. Die festgestellten Unregelmässigkeiten können von Veränderungen im Innern des Erdkörpers stammen, die nicht voraussehbar sind.

bis 4) sind entstanden durch Berechnungen mit 15 verschiedenen Polynomen.

Die Korrektur bei Finsternisberechnungen

Berechnete Zeiten für einen Finsternisverlauf (wie z. B. die Kontaktzeiten) müssen am Schluss mit der Differenz Delta T korrigiert werden. Diese Korrektur bewirkt ein «Zurecht-Rücken» der Finsternis-Orte in Richtung Ost-West. Auf die Nord-Süd-Lage hat sie keinen Einfluss. In den Finsternis-Seiten der NASA (solar eclipse) wird für jede Finsternis speziell angegeben, mit welchem Wert von Delta T gerechnet wurde. (Siehe auch Ergänzung von HANS ROTH am Schluss des Beitrages.)

Die Unsicherheit der Zeitdifferenz

Leider hat man die Sache damit noch nicht «im Griff»! Je weiter in die Vergangenheit oder Zukunft man gelangt, desto grösser wird die Unsicherheit beim Bestimmen von Delta T. Ich habe zu dieser Unsicherheit alle im Internet gefundenen Tabellen ausgewertet und damit die Grafiken (Abb. 5 bis 7) erstellt. Die vorliegenden Zahlen waren zum Teil widersprüchlich. So sind auch diese Figuren mit der nötigen Skepsis zu betrachten. – Immerhin dürften die Grössenordnungen stimmen! Alle Finsternisangaben (Tabellen, Karten mit dem Verlauf der Total-

litätszonen) – auch die Prognosen in den NASA-Finsternis-Seiten – sind mit dieser Unsicherheit behaftet! Man darf sich da nicht täuschen lassen, muss die Unsicherheiten in Kauf nehmen und in die Prognosen einbeziehen! Man weiss dann nur: Die tatsächliche Lage des Finsternispfades liegt irgendwo innerhalb der gegebenen Grenzen. HANS ROTH schreibt dazu sehr passend: «Bei den Grafiken ist spannend zu sehen, wie die Kurven umso "glatter" werden, je weniger man von den exakten Daten weiss! Auch das ist ein Hinweis, dass wir für die ferne Vergangenheit ja nur einzelne Fixpunkte haben, und al-

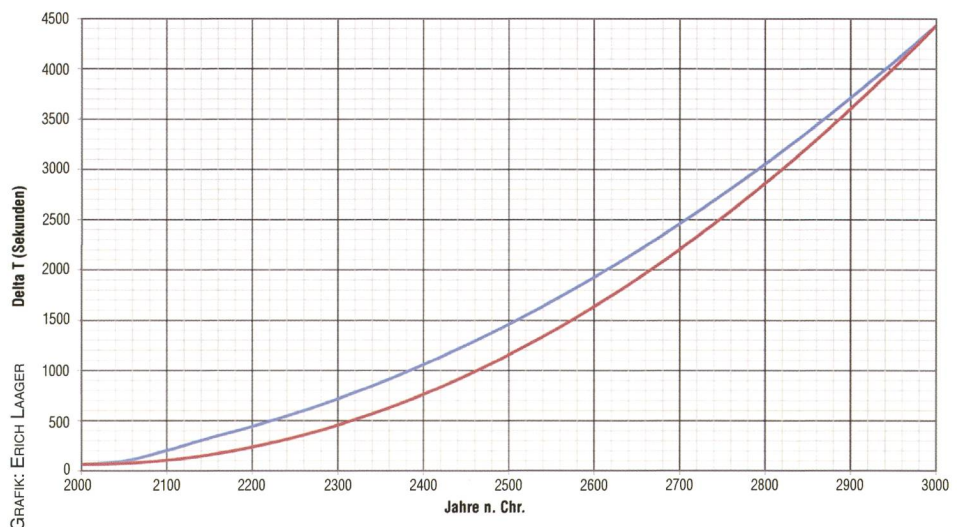


Abbildung 4: Prognosen für Delta T für die nächsten 1000 Jahre. Blaue Linie nach Polynomen NASA, rote Linie aus Aufsummierung von gleichmässig zunehmenden Tageslängen. (Zusätzliche Erklärungen im Text.)

les dazwischen irgendwie interpoliert wurde.»

Nachgefragt zu Abb. 4

Frage: Wenn wir annehmen, dass die Erde ihre Rotation gleichmässig verlangsamt, weshalb ist denn die Veränderung von Delta T nicht «regelmässig», d. h. nicht proportional zur Zeit?

Stark vereinfachte Antwort: Der Rückstand des ersten Tages bleibt bestehen, dann kommt derjenige des zweiten Tages hinzu und so weiter. Die Zeitdifferenzen summieren sich auf.

Zur Veranschaulichung stellen wir uns folgende Situation vor. Zwei Züge fahren mit konstanter Geschwindigkeit auf zwei Gleisen nebeneinander: Normalzug N und Langsamzug L, dieser etwas langsamer.

Unsere Betrachtung beginnt zu dem Zeitpunkt (Startzeit Null), wo Zug N den Zug L überholt. Beide Züge sind dann genau nebeneinander. Nach 1 Minute hat Zug L 100 m Rückstand, nach 2 Minuten sind es 200 m, usw. Der Rückstand von Zug L gegenüber Zug N vergrössert sich pro Minute gleichmässig um jeweils 100 m, d. h. der Abstand wächst proportional zur Zeit.

Nun kommt ein dritter Zug B auf einem dritten Gleis ins Spiel: Zur Startzeit Null fährt dieser neben den andern beiden Zügen mit derselben Geschwindigkeit wie Zug L. Genau in diesem Moment beginnt er ganz leicht zu bremsen, und zwar so,

dass seine Geschwindigkeit ständig um denselben Betrag abnimmt. Er kommt somit gegenüber Zug L in Rückstand. Dieser nimmt jedoch nicht proportional zur Zeit zu, sondern er wächst stärker an. Dies wird einsichtig, wenn man sich vorstellt, dass Zug B sich der Geschwindigkeit Null nähert und dadurch sehr stark ins Hintertreffen gerät.

Der Vergleich:

Zug N entspricht einer Atomuhr, die eine gleichmässig ablaufende Zeit anzeigt, etwa die Terrestrische Zeit TT.

Zug L entspräche einer gleichmässig rotierenden Erde, deren Tage aber etwas länger wären als diejenigen der Atomuhr, jedoch immer gleich lang.

Zug B entspricht einer gleichmässig abgebremsten Erde, deren Tage zunehmend länger werden.

Dazu noch etwas Mathematik

(Als ergänzende Erklärung zu Abb. 4) Auf der NASA-Seite «Polynomial Expressions for Delta T» findet man für die Zeit von 2000 bis 3000 fünf verschiedene Formeln für fünf Zeitabschnitte in diesem Intervall.

Für die Zeit nach 2150 rechnet man:
 $u = (\text{Jahr} - 1820) / 100$

$\Delta T = -20 + 32 \cdot u \cdot u$ (Sekunden).
 ΔT wächst nicht linear, sondern quadratisch mit der Zeit! Für das Jahr 3000 erhält man:

$u = (3000 - 1820) / 100 = 11,8$. $\Delta T = -20 + 32 \cdot 11,8 \cdot 11,8 = 4436$ Sekunden. Im Jahr 2000 war $\Delta T = 64$ Sekunden, der Wert wächst innerhalb 1000 Jahren um 4372 Sekunden. Mit welcher Verlangsamung der Erdrotation pro Tag erreicht man diesen Wert nach 1000 Jahren?

HANS ROTH lieferte mir dazu folgende Formel:

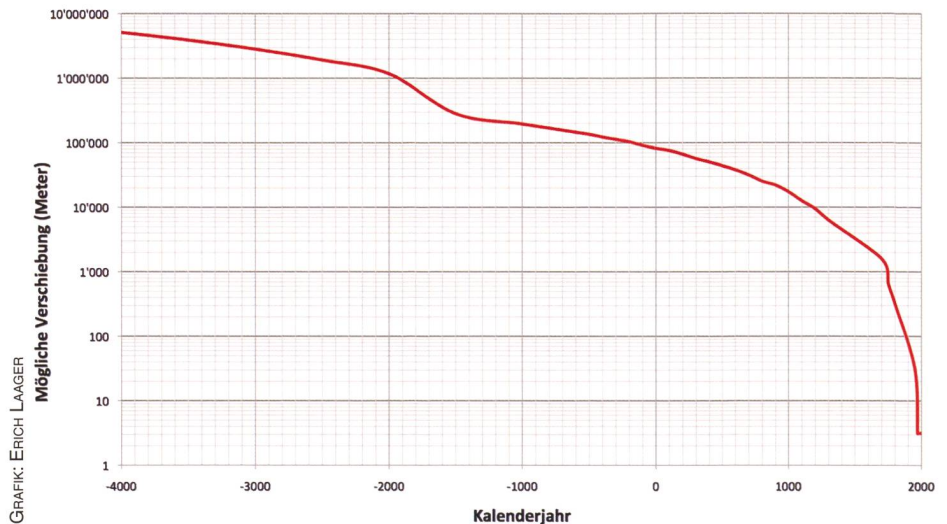


Abbildung 5: Die Verschiebung in Metern ist für eine geogr. Breite von 47° gerechnet. Gegen den Äquator zu wird sie grösser, in hohen geogr. Breiten wird sie wesentlich kleiner. Man beachte die logarithmische Skala für die y-Achse. Ablesbeispiele: Für das Jahr 3000 v. Chr. ist die Unsicherheit für die Lage der Finsterniszone etwa 1200 km! In der Gegenwart beträgt diese nur wenige Meter.

Wenn die Tageslänge jeden Tag x Sekunden anwächst, ist die Zeitdifferenz nach n Tagen $n \cdot (n+1) / 2 \cdot x$ Sekunden.

$$\text{Anzahl Tage } n = 1000 \cdot 365,242 = 365242$$

$$4372 = 365242 \cdot 365243 / 2 \cdot x$$

$$x = 0,000\,000\,065546 \text{ Sekunden}$$

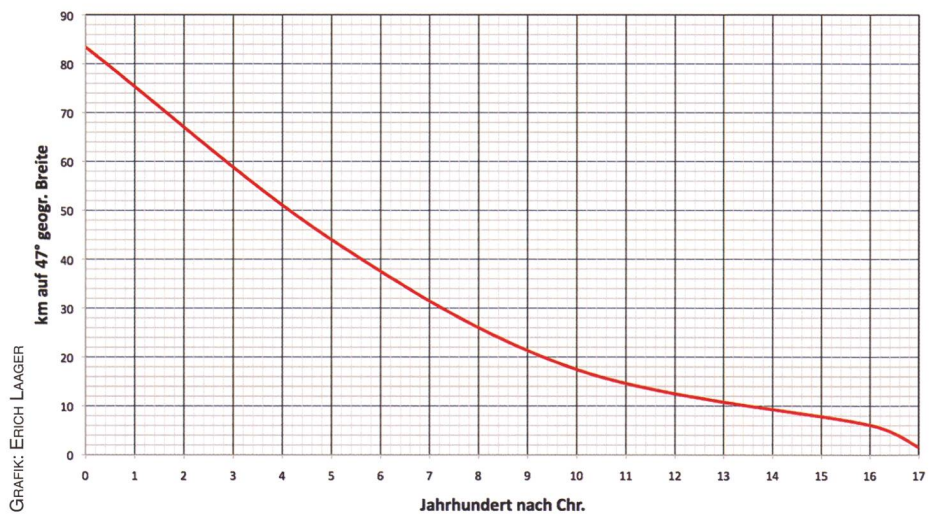


Abbildung 6: In der näheren Vergangenheit ist die Unsicherheit für Finsternisprognosen nur wenige Kilometer.

SaharaSky
Hôtel & Observatoire

Maroc
www.saharasky.com
www.hotel-sahara.com

Die Tage – gemessen an der Erdrotation – müssten also täglich um etwa 0,065 Millionstelsekunden länger werden, um im Jahr 3000 das prognostizierte Delta T von rund 73 Minuten zu erreichen.

Ergänzungen von HANS ROTH

1. Zum jeweils aktuellen Wert von Delta T

Im Nachhinein (oder kurz vor der Finsternis, wenn sich Delta T nicht mehr stark verändern wird) kann man auf der IERS-Website (International Earth Rotation and Reference Systems Service): www.iers.org/IERS/ unter Publications, dann IERS Bulletin Bulletin B anklicken und den Wert UT1 - UTC für den betreffenden Tag herauslesen.

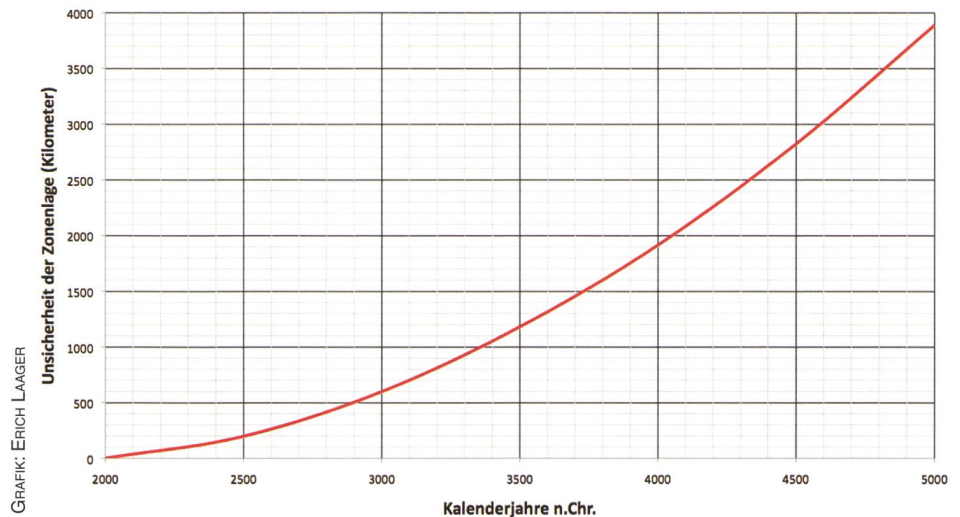
Es gilt dann: $\Delta T = \text{Anzahl Schaltsekunden} + 32.184 \text{ s} - (\text{UT1} - \text{UTC})$ oder, weil die nächste Schaltsekunde frühestens Ende Juni 2015 kommt, gilt bis dann

$$\Delta T = 67.187 \text{ s} - (\text{UT1} - \text{UTC}).$$

2. Zu den Zeitskalen

Die TAI ist die Internationale Atomzeit, TT die Terrestrische Zeit: Absolut gleichmässig ablaufende Zeit, exakt parallel zur TAI, gegenüber dieser immer 32.184 s voraus. In dieser Zeitskala berechnen die Astronomen die Bewegungen im Sonnensystem auf Zehntausende von Jahren zurück und in die Zukunft.

Als UT1 wird die «Weltzeit», so wie die Erde im Moment steht, bezeichnet.



GRAFIK: ERICH LAAGER

Abbildung 7: Für die Zukunft kann man sehr präzise berechnen, wann sich Sonnenfinsternisse ereignen. Wo dann diese Ereignisse stattfinden werden, ist jedoch sehr unsicher! Die Unsicherheit beträgt «schon bald» viele hundert Kilometer.

net, während UTC die «Koordinierte Weltzeit», also die Grundlage der gesetzlichen Zeiten (MEZ, MESZ usw.) darstellt.

Die UTC «tickt» parallel zur TAI, wird aber mit Schaltsekunden an die UT1 angenähert, so dass sie nie mehr als 0.9 s von der UT1 abweicht. Somit gilt $\Delta T = TT - UT1$. Weil sich UT1 sehr wenig von UTC unterscheidet, kann man TT aus ΔT und der Zonenzeit berechnen:

$$TT \approx \text{MEZ} - 1^h + \Delta T \text{ bzw.}$$

$$TT \approx \text{MESZ} - 2^h + \Delta T$$

■ Erich Laager

Schlüchtern 9
CH-3150 Schwarzenburg

Letztmals 1919 bis 1922

In den kommenden 15 Jahren gibt es eine ganze Serie von Sonnenfinsternissen in Europa, wie die Tabelle 1 unten zeigt. Da eine Sonnenfinsternis im Schnitt nur alle paar Jahre von einem bestimmten Ort aus zu beobachten ist, darf die Häufung als Seltenheit betrachtet werden. Letztmals gab es in der Schweiz zwischen 1919 und 1922 eine Folge von vier Sonnenfinsternissen, wie sie uns von 2025 bis 2028 erwartet. Nimmt man die Finsternisse von 2021, 2022 und 2030 hinzu, dürfen wir uns auf astronomisch spannende Jahre freuen. Herausragend wird die Sonnenfinsternis vom 12. August 2026 sein, die einen Bedeckungsgrad von über 90% erreicht! (tba)

Finsternishäufung: Acht Sonnenfinsternisse bis 2030 fast im Jahrestakt!

20. März 2015 Totale Sonnenfinsternis	10. Juni 2021 Ringförmige Sonnenfinsternis	25. Oktober 2022 Partielle Sonnenfinsternis	29. März 2025 Partielle Sonnenfinsternis	12. August 2026 Totale Sonnenfinsternis	2. August 2027 Totale Sonnenfinsternis	26. Januar 2028 Ringförmige Sonnenfinsternis	1. Juni 2030 Ringförmige Sonnenfinsternis
Beginn 09:26.6 Max. 10:34.2 Gösse* 69.4% Ende 11:46.0	Beginn 11:29.5 Max. 12:20.8 Gösse 6.6% Ende 13:14.7	Beginn 11:14.9 Max. 12:11.3 Gösse 18.6% Ende 13:09.3	Beginn 11:20.6 Max. 12:06.9 Gösse 13.3% Ende 12:53.8	Beginn 19:24.6 Max. 20:18.0 Gösse 90.6% Ende** 20:42.0	Beginn 10:04.0 Max. 11:07.6 Gösse 54.9% Ende 12:14.4	Beginn 16:40.9 Max.** 17:17.0 Gösse 33.6% Ende u. H.	Beginn 06:13.3 Max. 07:13.5 Gösse 61.2% Ende 08:19.2
Total verläuft sie für 2 ^m 43 ^s über dem Nordatlantik, den Färöer-Inseln und Spitzbergen. Partiiell ist sie in ganz Europa zu sehen.	Ringförmig verfinstert wird die Sonne maximal 3 ^m 51 ^s zwischen Grönland und Ellesmere-Island.	Diese Finsternis verläuft global partiell. Sie erreicht mit 86% in Sibirien ihre maximale Bedeckung.	Diese partielle Sonnenfinsternis erreicht mit fast 94% in Nordkanada ihr Tagesmaximum. Europa liegt am Südrand.	Über den Balearen geht die Sonne total verfinstert unter. Die Finsternis erreicht vor Island mit 2 ^m 18 ^s das Maximum.	Die «Big One» kehrt in unsere Gefilde zurück. Mit langen 6 ^m 23 ^s Totalität erreicht die Finsternis über Ägypten ihr Maximum.	Über Spanien geht die Sonne ringförmig verfinstert unter! Über Brasilien dauert die Ringphase 10 ^m 27 ^s .	In Griechenland ist diese Finsternis ringförmig zu erleben. Sie dauert im Tagesmaximum 5 ^m 21 ^s .

Die Kontaktzeiten sind für Zürich angegeben.

*Grösse in Flächenprozenten

**Ende, respektive maximale Bedeckung bei Sonnenuntergang

Tabelle 1