

„Next Generation“ – ein Werk  
der Projektionskunst aus der  
Reihe Globale-Digitale des ZKM  
in Karlsruhe, 2015.

Wissenschaftsgeschichte

## Weltall, Text und Zahl

Ein textkritischer Stammbaum: Algorithmen aus der Evolutionsbiologie können die klassische philologische Rekonstruktion der Überlieferungsgeschichte antiker oder mittelalterlicher Texte unterstützen. Für die Analyse astronomischer Tafeln wird hingegen spezielle Software entwickelt, die mehr über die Verwandtschaftsverhältnisse und die empirische Fundierung von Texten verrät als ihr reiner Wortlaut, wie die Arbeiten an dem Projekt Ptolemaeus Arabus et Latinus zeigen.

VON BENNO VAN DALEN UND HENRY ZEPEDA

DIE ASTRONOMISCHEN und astrologischen Werke des Claudius Ptolemäus (2. Jhdt. n. Chr.) waren bis ins 17. Jahrhundert zentrale Quellentexte für das wissenschaftliche Weltverständnis der arabisch-islamischen und lateinisch-christlichen Kulturen. Davon zeugen nicht nur die in vielen Hunderten von Abschriften überlieferten arabischen und lateinischen Versionen der Werke, die von Ptolemäus stammen oder ihm zugeschrieben wurden, sondern auch die umfangreiche Kommentar-, Glossen- und Kritik-Literatur. Die Erschließung dieses Netzwerkes von Texten durch Editionen, Handschriftenkataloge, technische Analysen und historische Studien ist die Aufgabe des Projektes Ptolemaeus Arabus et Latinus. Es ermöglicht neue Erkenntnisse über die gemeinsamen Grundlagen islamischer und europäischer Kultur im Mittelalter, über die eng verzahnte Geschichte von Astronomie und Astrologie, über die Leistungen und ständigen Reformanstrengungen mittelalterlicher Wissenschaftler sowie schließlich über die Voraussetzungen und Errungenschaften der kopernikanischen Revolution. Die Fülle und Komplexität der vorliegenden Daten legt aber auch den Einsatz digitaler Methoden nahe, wofür im Folgenden zwei Beispiele gegeben werden.

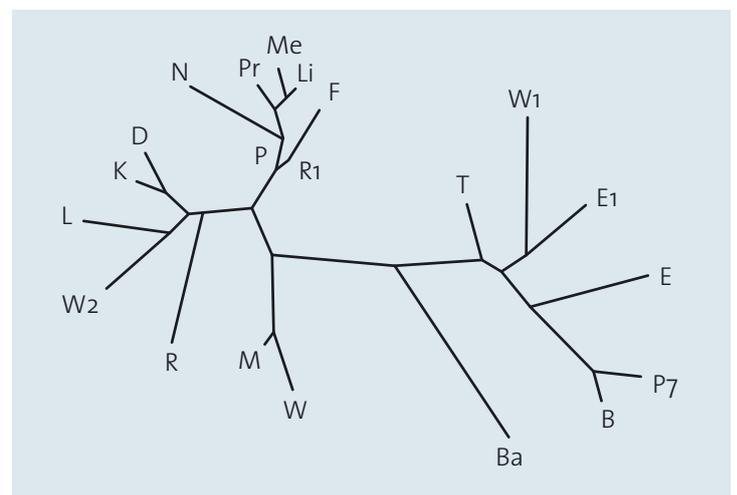
### Mühsame Suche nach dem Archetypen

Die Edition der arabischen und lateinischen Handschriften von Ptolemäus' Werken macht den Hauptteil der Arbeit im Projekt aus. Eine kritische Edition erfordert eine Sichtung der ihr zugrundeliegenden Manuskripte und die Klärung ihrer Abhängigkeitsverhältnisse. Denn nur selten kommt der Fall des sogenannten Autographen vor, also eines vom Autor des Textes selbst geschriebenen Manuskripts. Ein solches Autograph enthält im Wesentlichen den vom Autor intendierten Text, vielleicht mit einigen kleinen Versehen. In der Regel liegt aber kein Autograph vor, sondern eine mehr oder minder große Menge von Abschriften. Dieser Fall ist weniger einfach, denn jede Abschrift des Textes ist anders; jede enthält Lesarten, die die anderen nicht haben. Lesarten sind Varianten, die versehentliche oder gewollte Änderungen durch den Abschreiber darstellen. Forscher müssen das Zeugnis mehrerer Abschriften nutzen, um jene Lesung zu erschließen, die der sogenannte Archetyp hatte, also die früheste Fassung des Textes, die erschlossen werden kann.

Für das Abwägen der Zeugnisse ist es wichtig, das Verhältnis zwischen den Manuskripten zu verstehen. Wenn zum Beispiel ein Manuskript erwiesenermaßen von einem anderen erhaltenen Manuskript abgeschrieben wurde, kann es zur Erschließung des Archetypen nichts beitragen, was nicht schon das andere beiträgt. Außerdem ist die Klärung der Manuskriptbeziehungen wichtig, um die Rezeptionsgeschichte eines Werkes zu verstehen.

Nun kann es recht schwierig sein, alle abweichenden und gemeinsamen Lesarten zu finden und für die Frage der Verwandtschaftsverhältnisse auszuwerten. Es gibt Programme, die diese Arbeit unterstützen: Mit Software für die Edition von Texten (wie dem Classical Text Editor) können wir Textmaterial aus allen einschlägigen Manuskripten zusammentragen und dann Dateien ausgeben lassen, die auflisten, welche Manuskripte an welchen Stellen übereinstimmen oder voneinander abweichen. Diese Daten können mit einem Stemmprogramm weiterverarbeitet werden. Viele dieser Programme wurden übrigens für die Bestimmung von Stammbäumen in der Evolutionsbiologie entwickelt. Solche Programme bestimmen jenen Stammbaum, bei dem am wenigsten Änderungen in der Überlieferung angenommen werden. Für textkritische Forschungen wurden ähnliche Programme entwickelt. Freilich können die Ergebnisse dieser Programme nicht unkritisch übernommen werden, sondern müssen geprüft und berichtigt werden. Die vorgängige Berechnung aber kann es für den Forscher sehr viel leichter machen, einen Stammbaum für so früh und reich überlieferte Werke zu erstellen wie eben für die arabischen und lateinischen ptolemäischen Texte, die in unserem Projekt herausgegeben werden (Abb. 1).

Abb. 1: Eine vorläufige Darstellung der Beziehungen zwischen Manuskripten, die das *Almagestum parvum* überliefern, hergestellt mit Programmen aus dem PHYLogeny Inference Package (PHYLIPI) anhand von Daten aus dem Classical Text Editor.



### Analyse astronomischer Tafeln

Die Werke, die im Ptolemäus-Projekt untersucht und ediert werden, enthalten aber nicht nur Texte in arabischer und lateinischer Sprache, sondern auch numerische Daten, insbesondere Berechnungen, astronomische Tabellen und Horoskope. Diese Daten erfordern eine Erfassung und Analyse, die über eine rein textuelle hinausgeht. Sie erlauben Einblicke in die Geschichte und den Kontext eines Texts oder eines Tafelwerks, die auf Grund einer rein textuellen Analyse erst gar nicht möglich oder deren Ergebnisse wesentlich unsicherer wären.

Ptolemäus führte in seinem astronomischen Hauptwerk, dem *Almagest*, Berechnungen von Längen und Winkeln auf der Himmelskugel mittels sphärisch-trigonometrischer Gesetze durch. Außerdem bestimmte er Positionen von Himmelskörpern (insbesondere der Sonne, des Mondes und der fünf mit dem bloßen Auge sichtbaren Planeten) auf Grund der von ihm entwickelten geometrischen Planetenmodelle (Abb. 3). Dazu berechnete er mit sehr viel Aufwand eine Tabelle der sogenannten Sehnen, die ähnlich wie der moderne Sinus eingesetzt werden können (die Sehne eines Winkels ist das Zweifache des Sinus des halben Winkels). Um die zahlreichen Berechnungen, die praktizierende Astronomen und Astrologen täglich durchführen mussten, zu vereinfachen,

Abb. 2: *Abjad*-Zahlen in einer arabischen astronomischen Tabelle aus dem 11. Jhdt., Staatsbibliothek zu Berlin, Stiftung Preußischer Kulturbesitz, Hs. Or. qu. 101.

erstellte Ptolemäus für alle häufig gebrauchten Funktionen Tabellen, die die Berechnungen auf einige einfache Additionen und Subtraktionen reduzierten. Das so entstandene Tafelwerk wurde ab dem Jahr 800 mehrere Male ins Arabische und ab dem 12. Jahrhundert viele Male ins Lateinische übersetzt. Die arabischen Astronomen stellten bald fest, dass Ptolemäus' fast 700 Jahre alte Tabellen in vielen Fällen keine genauen Ergebnisse mehr lieferten. Sie führten deshalb eigene astronomische Beobachtungsprogramme durch, fanden so verbesserte Parameterwerte der ptolemäischen Planetenmodelle und berechneten auf deren Grundlage genauere Tabellen. Dies war der Anfang einer Tradition, die im islamischen Raum bis ins 15. Jahrhundert produktiv blieb, mehr als 200 unterschiedliche arabische und persische Tafelwerke hervorbrachte und außerdem die Toledanischen und Alphonsinischen Tafeln, die ab dem 12. Jahrhundert die Astronomie und Astrologie

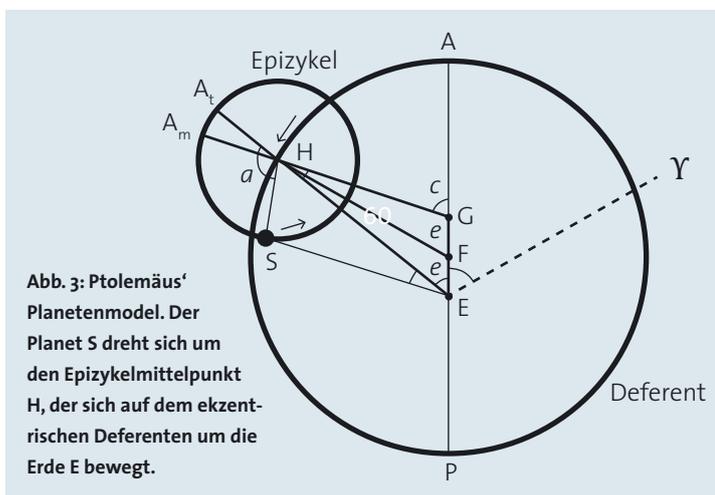


Abb. 3: Ptolemäus' Planetenmodell. Der Planet S dreht sich um den Epizykelmittelpunkt H, der sich auf dem exzentrischen Deferenten um die Erde E bewegt.

in Europa prägten, maßgeblich beeinflusste. Die vor allem in lateinischen Quellen zahlreich erhaltenen Almanache und Horoskope wurden mit Hilfe solcher Tafelwerke berechnet.

Um die Rezeption der ptolemäischen Astronomie im islamischen und europäischen Mittelalter zu erforschen, ist es besonders hilfreich, die mathematischen Eigenschaften der Tabellen, Almanache und Horoskope bestimmen zu können. Indem man diese Eigenschaften vergleicht, lässt sich feststellen, ob die Astronomen für ihre Berechnungen einfach frühere Ergebnisse kopierten, neue Beobachtungen anstellten, von welchen anderen Werken sie beeinflusst wurden und welche früheren Tafelwerke sie benutzten, um ihre eigenen Tabellen und Horoskope zu berechnen. Eine mathematische Analyse der Planetenpositionen und der astrologischen Häuser in einem Horoskop erlaubt es außerdem, zu bestimmen, für welchen Zeitpunkt und für welchen Ort das Horoskop bestimmt wurde: Angaben, die in den erhaltenen Texten häufig fehlen oder unzuverlässig sind.

Obwohl es Software gibt, mit der ein Teil dieser Analysen mit modernen Daten durchgeführt werden kann, ist sie in der Praxis auf vormoderne astronomische und astrologische Quellen kaum anzuwenden. Dies liegt vor allem daran, dass diese Software für eine ganz andere Art

von Funktionen entwickelt worden ist und außerdem Eigenarten von vormodernen Rechenmethoden nur schwer berücksichtigen kann. Hierbei ist zum Beispiel an die verschiedenen Annäherungsverfahren (z. B. Abrundung von Zwischenergebnissen, lineare oder quadratische Interpolation in den Tabellen) zu denken, die vormoderne Astronomen benutzten, weil die Berechnungen sonst zu aufwändig wurden, aber auch an das Zahlensystem, das Astronomen damals hauptsächlich anwandten.

Zahlen in mittelalterlichen mathematischen und astronomischen Texten wurden meist im seit der babylonischen Zeit üblichen Sexagesimalsystem (also zur Basis 60) dargestellt. In der in der Wissenschaftsgeschichte üblichen modernen Notation für diese Zahlen steht ein Semikolon für den sexagesimalen Punkt, weitere Sexagesimalstellen werden durch ein Komma getrennt. Zum Beispiel steht 23;32,30 – ein Wert für die Schiefe der Ekliptik, der sowohl in spanischen als auch in islamisch-chinesischen Quellen benutzt wurde – für  $23 + 32/60 + 30/60^2 \approx 23,54166667$ . Auch Zahlen über 60 konnten rein sexagesimal geschrieben werden, z. B.  $33,36 = 33 \times 60 + 36 = 2016$ .

In arabischen mathematischen und astronomischen Texten wurden die Zahlen meist in einer alphabetischen Notation (nach den ersten vier Buchstaben des arabischen Alphabets *abjad* genannt) geschrieben, die von den Griechen übernommen worden war. In diesem System stehen die ersten neun Buchstaben für die Zahlen 1, 2, 3, ..., 9, die zweite Gruppe von neun Buchstaben für 10, 20, 30, ..., 90 und die restlichen Buchstaben für 100, 200, 300, .... Auf diese Weise konnten mit einfachen Buchstabenkombinationen alle Zahlen bis 1.000 dargestellt werden (die Griechen benutzten zusätzlich zu ihrem Alphabet von 24 Buchstaben einige veraltete Buchstaben; das arabische Alphabet hat 28 Buchstaben). Ins lateinische Alphabet übertragen würden einige typische Beispiele wie folgt aussehen:

$$\text{voc} = 400 + 60 + 3 = 463$$

$$\text{kc;lb,me} = 23;32,45.$$

post hunc sermonem.

Table quantitatis arcuum q̄ ff̄ ut̄ orb̄ equat̄ diei .102

Partes orb̄ medij siḡ norum.		Grad̄ declinationis q̄ ē ex partib; orb̄ meridij.	
Numeri commune.			
Partes	Minuta	Partes	Minuta
ccc lxx	i	o	xxiiii
ccc lviij	ii	o	xlvij
ccc lvij	iii	i	xlii
ccc lvi	iiii	i	xxxvii
ccc lv	v	ii	v
ccc liii	vi	ii	xxv
ccc liii	vii	ii	alix
ccc liii	viii	iii	xliii
ccc liii	ix	iii	xxxvii
ccc l	x	iiii	i
ccc alix	xi	iiii	xxv
ccc xlviii	xii	iiii	alix
ccc xlvii	xiii	v	xliii
ccc xlv	xiiii	v	xxvi
ccc xlv	xv	vi	o
ccc xliii	xvi	vi	xxiiii
ccc xliii	xvii	vi	xlvi
ccc xliii	xviii	vii	x
ccc xli	xix	vii	xxvii
ccc xl	xx	vii	lvii
ccc xxxix	xxi	viii	xx

Abb. 4: Römische Zahlen in einer Tabelle in einer der lateinischen Übersetzungen von Ptolemäus' *Almagest*. Bibliothèque nationale de France, Paris, Hs. latin 14738.

## DIE AUTOREN

**Dr. Benno van Dalen** ist einer der drei Antragssteller und seit Mai 2013 auch führender wissenschaftlicher Mitarbeiter des Projektes *Ptolemaeus Arabus et Latinus*. Er wurde 1993 in Utrecht zur mathematischen Analyse mittelalterlicher astronomischer Tabellen promoviert und forschte von 2000 bis 2007 im Rahmen von zwei DFG-Projekten am Institut für Geschichte der Naturwissenschaften in Frankfurt am Main.

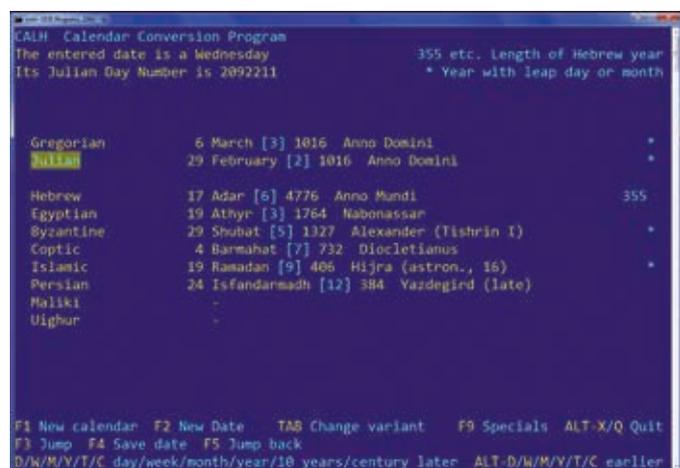
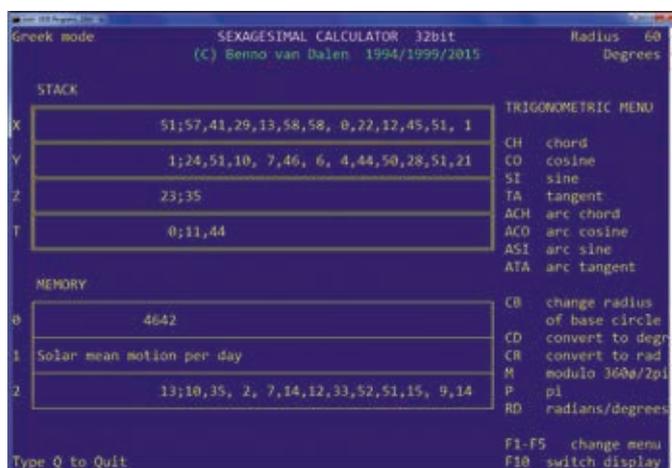
**Dr. Henry Zepeda** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Projektes *Ptolemaeus Arabus et Latinus* und arbeitet an einer Edition des *Almagestum parvum*. Er wurde 2013 in Oklahoma zur mittelalterlichen lateinischen Überlieferung des *Menelaus-Theorems* promoviert.

In lateinischen mathematischen und astronomischen Texten findet man allerdings keine ähnliche alphabetische Notation. In den frühesten Übersetzungen aus dem 12. Jahrhundert wurden noch römische Zahlen benutzt, die aber unpraktisch waren und ab dem 13. Jahrhundert von den heute noch benutzten arabischen Ziffern verdrängt wurden. Weil die arabische alphabetische Notation und die römischen Zahlen auch in Tabellen und Horoskopen benutzt wurden, sahen diese auf den ersten Blick eher wie textuelle als wie numerische Objekte aus, was die Abbildungen 2 und 4 zeigen.

Die Benutzung der Sexagesimalzahlen und die schiere Masse an numerischen Daten im *Almagest*, seinen Kommentaren und den zahlreichen arabischen und lateinischen Tafelwerken, die nach dem Vorbild des *Almagest* im Mittelalter verfasst wurden, machen einfache Nachrechnungen mit einem Taschenrechner praktisch unmöglich. Aus diesem Grund wird im Ptolemäus-Projekt spezielle Software eingesetzt, die ursprünglich von Benno van Dalen als DOS-Programme entwickelt und später teilweise in Windows-Versionen konvertiert wurde und jetzt in einem größeren Rahmen weiterentwickelt werden soll. Die Software reicht von einfachen Programmen zur Durchführung sexagesimaler Berechnungen (Abb. 5) und zur Konvertierung der zahlreichen Kalendersysteme, die im Mittelalter benutzt wurden (Abb. 6), bis hin zu komplizierten Anwendungen, mit denen Tabellen bequem ediert, analysiert und nachgerechnet sowie das Datum, die ungefähre Uhrzeit und der Ort, für die ein Horoskop berechnet wurde, aus den Planetenpositionen und den astrologischen Häusern bestimmt werden können.

Einige Beispiele zeigen, welche Operationen sich mit der zurzeit zur Verfügung stehenden Software durchführen lassen. Abbildung 7 zeigt die Standarddarstellung im Programm „ZijManager“ (nach dem arabisch-persischen Wort *zij* für astronomische Tafelwerke, ausgesprochen als *siedsch*) mehrerer Kopien der gleichen Tabelle aus verschiedenen Handschriften, in diesem Fall aus den Bibliotheken in Escorial und Leipzig. Das erste Exemplar einer Tabelle, die eingegeben werden soll, kann auf Grund einiger kennzeichnender Werte in den meisten Fällen zuverlässig „vorhergesagt“ werden, sodass nur noch relativ kleine Anpassungen vorgenommen werden müssen, indem man die richtigen Zahlen über die vorgeschlagenen tippt oder mit den Tasten + und – den Wert auf den in der Handschrift gefundenen bringt. Die Spalte „Corrected“ fungiert praktisch als die Edition der Tabelle. In ihr werden Fehler in den Handschriftkopien der Tabelle korrigiert, die in den anderen Spalten in Rot angezeigt werden. Weitere Kopien derselben Tabelle können sofort aus der Spalte „Corrected“ erstellt und dann mit weiteren Handschriften abgeglichen werden. Jede Spalte kann auch problemlos nachgerechnet werden (vgl. die Spalte „Recomputed“), wenn die Art der tabellierten Funktion und die benutzten Parameterwerte bekannt sind. In der Spalte „Error“ werden die Fehler in der Nachrechnung angezeigt. In dieser Tabelle sind die typischen Grüppchen von Fehlern, die mit demselben Programm auch graphisch dargestellt werden können, auf eine ganz spezifische Art linearer Interpolation zurückzuführen. Der größere Fehler für Argument 56 ist das Ergebnis eines häufigen Schreibfehlers in arabischen Texten, nämlich der Verwechslung von 11 und 51, 12 und 52 usw.,

Abb. 5 und 6: Die Programme SCTR für die Durchführung von Berechnungen im Sexagesimalsystem (links) und CALH für die Konvertierung von im islamischen Mittelalter benutzten Kalendertypen (rechts). Quelle: Projekt *Ptolemaeus Arabus et Latinus*.



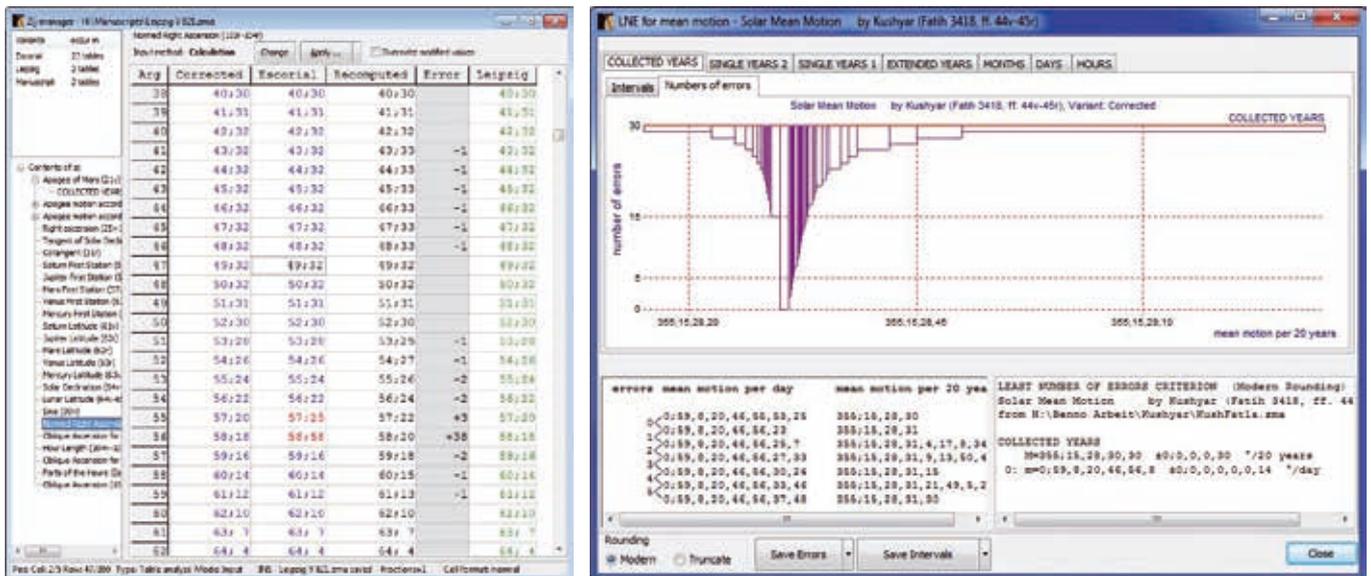


Abb. 7 und 8: Das Programm *ZijManager*: Edition und Nachrechnung einer astronomischen Tabelle (links) und statistische Bestimmung eines Parameters (rechts). Quelle: Projekt Ptolemaeus Arabus et Latinus.

die sich jeweils nur in einem diakritischen Punkt unterscheiden.

In Abbildung 8 wird das Ergebnis einer Parameterschätzung gezeigt. Häufig sind die astronomischen Parameterwerte, etwa die Schiefe der Ekliptik, die geographische Breite, die mittlere Geschwindigkeit oder die Exzentrizität eines Planeten, die für die Berechnung einer historischen Tabelle benutzt wurden, nicht im Text angegeben. Mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate können diese Werte zuverlässig geschätzt und ein 95%-Konfidenzintervall graphisch dargestellt werden. In vielen Fällen ist diese Methode genau genug, um die historisch wahrscheinlichsten Werte des Parameters zu bestimmen. In der Abbildung wird eine insbesondere für mittlere Planetenbewegungen geeignete numerische Methode benutzt, die die Parameterwerte bestimmt, für die eine Tabelle die kleinste Fehlerzahl aufweist.

Es ist geplant, diese Werkzeuge im Rahmen einer internationalen Kooperation weiterzuentwickeln. Sie sollten dann auf eine Datenbank mathematischer und astronomischer Tabellen zugreifen, die nicht nur islamische und lateinische Tabellen, sondern auch solche aus anderen Kulturkreisen enthalten wird. Weil die Datenbank zudem Angaben zum genauen Layout der Tabellen enthält, wird es möglich sein, automatisch vollständige

Editionen aller Aspekte einer bestimmten Art von Tabelle aus verschiedenen Quellen in unterschiedlichen Sprachen zu produzieren. Ähnlichkeiten zwischen Tabellen aus verschiedenen Quellen können nicht nur mittels numerischer und statistischer Methoden, sondern dank der heutigen Rechengeschwindigkeit auch durch bloßes Vergleichen zahlreicher Tabellen festgestellt werden. Auf ähnliche Weise können die benutzten Algorithmen und Rechenmethoden (z. B. Abrundung, Interpolation) festgestellt werden. Die Tabellen können in jedem gewünschten Format, mit oder ohne kritischen Apparat, als Datei ausgegeben oder gedruckt werden. ■

#### Literatur und WWW

O. Neugebauer, *The Exact Sciences in Antiquity*, 2nd ed., Brown University Press, Providence 1957. Verschiedene Nachdrucke.

K. Manitius, *Ptolemäus. Handbuch der Astronomie*, 2 Bände, Teubner, Leipzig 1912–1913. Nachdruck 1963.

O. Pedersen, *A Survey of the Almagest*, University Press, Odense 1974. Nachdruck Springer, New York 2010.

B. van Dalen, *Islamic Astronomical Tables. Mathematical Analysis and Historical Investigation*, Ashgate, Farnham 2013.

[www.ptolemaeus.badw.de](http://www.ptolemaeus.badw.de)

[www.stemmaweb.net](http://www.stemmaweb.net)

[www.bennovandalen.de/Research/research.html](http://www.bennovandalen.de/Research/research.html)