

himmelwärts

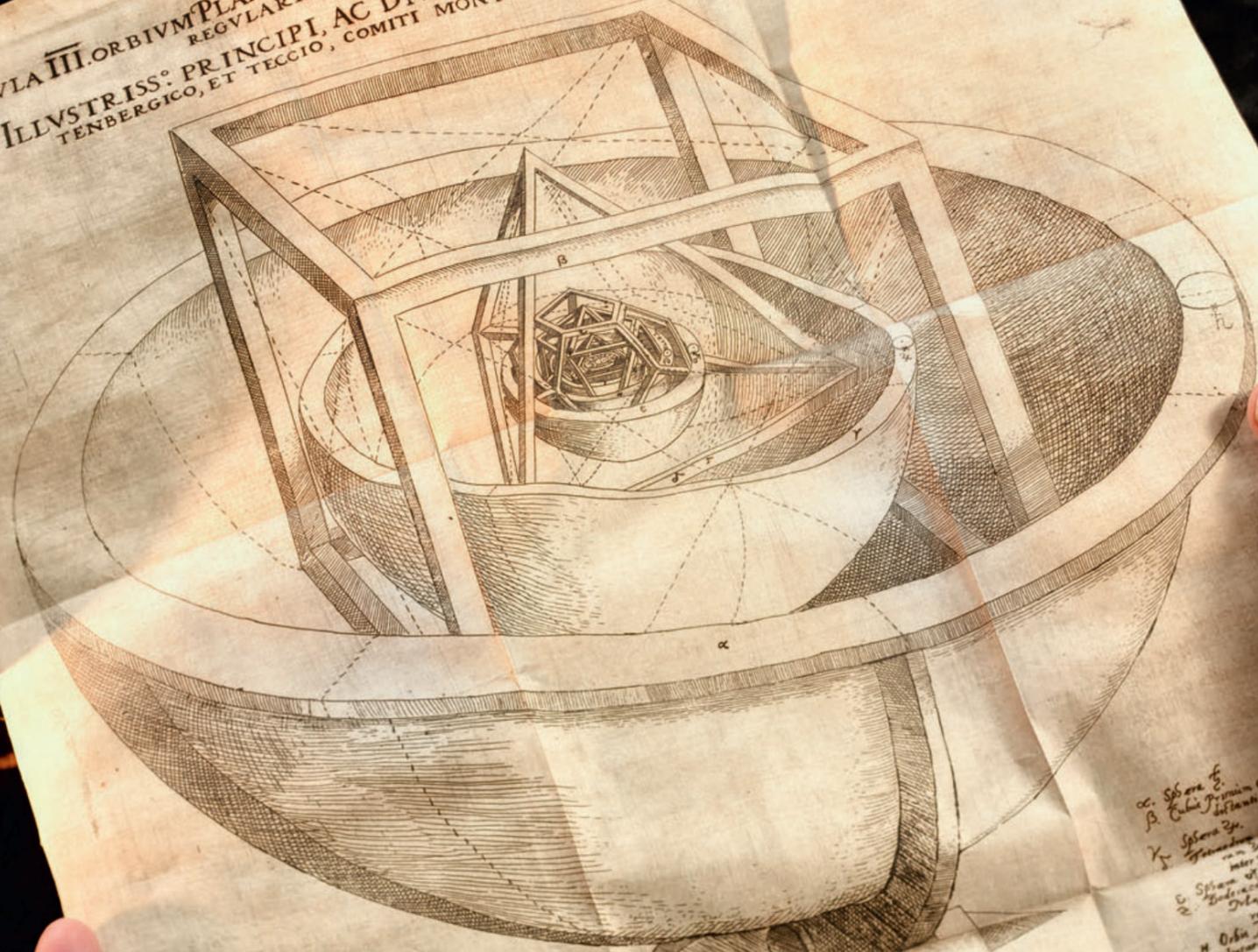
24 MYSTERI COSMOGRAPHICI
 Saturnus. Huius enim ille paulo plus diuturnum æquat. Similis apparet in cubi intimo & extimo orbe differentia. Cubum igitur Saturnus ambit, cubus Iovem.
 Æqualis ferè proportio est inter Venerem & Mercurium, nec ab similibus inter orbes Octaedri. Venus igitur hoc corpus ambit, Mercurius induit.

Reliquæ duæ proportionēs inter Venerem & Terram, inter hanc & Martem minimæ sunt, & ferè æquales, nempe inter or exterioris dodrans aut bes. In Icosaedro & Dodecaedro sunt etiam æquales distantie binorum orbium: Et proportioe vniuersa minima inter reliqua regularia corpora. Quare verisimile est, Martem ambire terram mediante alterutro horum corporum: Terram autem à Venere summotam, mediante reliquo. Quare si quis ex me querat, cur sint tantum sex orbes mobiles, respondebo, quia non oporteat plures quinque proportionēs esse, totidem nempe, quot regularia sunt in mathesi corpora. Sex autem termini cõsummant hunc proportionum numerum.

Hoc pertinet Tabula Terziæ.
 Annotatio in Capiti secundum.

Quodque his quinque Corporum nobilitas est ex simplicitate, & ex æqualitate distantie planorum à centro figuræ. Sicut enim norma & regula creaturarum Deus est: sic Sphæra corporum, qui ea habet dictas proprietates. 1. Est simplicissima, quia non clauditur termino, seipsa scilicet. 2. Omnia eius puncta æquali similitudine à centro distant. Ex corporibus igitur proximè accedunt regularia ad Sphære perfectionem. Eorum definitio hæc est, vt habeant, 1. omnia latera, 2. plana, & 3. angulos, singula æquales & speciem magnitudine, quod est simplicitatis: quam postam definitionem sequitur illud vitro, quod 4. omnium planorum centra æqualiter à medio distent, 5. quod inscripta globo omnibus angulis tangant superficiem, 6. quod in ea hæreant, 7. quod inscriptum globo omnibus planorum centris tangant, 8. quod proinde inscriptum globo hæreat immotus, 9. & quod idem centrum habeat cum figura. Quibus rebus efficitur altera similitudo cù Sphæra, quæ est ex æqualitate distantie planorum.

TABVLA III. ORBIVM PLANETARVM DIMENSIONES, ET DISTANTIAS PER QVINQVE REGVLARIA CORPORA GEOMETRICA EXHIBENS.
 ILLVSTRISS. PRINCIPI, AC DÑO, DÑO, FRIDERICO, DVCI WIR- TENBERGICO, ET TECCIO, COMITI MONTIS BELGARVM, ETC. CONSECRATA.



α. Sphæra 1.
 β. Cubi primæ corporis regularis
 γ. Sphæra 2.
 δ. Cubi secundæ corporis regularis
 ε. Sphæra 3.
 ζ. Dodecaedri primæ corporis regularis
 η. Sphæra 4.
 θ. Icosaedri primæ corporis regularis
 ι. Sphæra 5.
 κ. Sphæra 6.
 λ. Sphæra 7.
 μ. Sphæra 8.

KEPLER! mirari opus, SPECTATOR olympi
 Antea qua nunquam tua figura tibi
 Nam Planetarum distans quantia
 Quia in hunc mundum tuum
 Scilicet et Libus tanto se mu-
 nere gratum
 Auctor TECCIO non sine
 laude DVCI.



Christophorus Leib-
 nœus fecit.
 Excudebat Tubingæ Georgius Græppenbachius A.º M.º 1687.

himmel wärts

450 Jahre Johannes Kepler

Begleitband zur Mitmachausstellung

Herausgegeben von

Kepler-Gesellschaft e. V.

Hildrun Bänzner-Zehender, Hermann Faber, Wolfgang Pleithner

Universität Stuttgart

Robert Löw, Karin Otter

Technische Universität Darmstadt

Burkhard Kümmerer



Die Idee zur Ausstellung ‚himmelwärts‘ entstand im März 2020 auf der Tagung ‚Museen als gesellschaftliche Resonanzräume‘ in Tübingen. Im Rahmen der Präsentation der Projekte und Ideen aller Teilnehmerinnen und Teilnehmer berichtete die Kepler-Gesellschaft von ihrem Wunsch, anlässlich Keplers 450. Geburtstag, das Kepler-Museum in seinem Geburtshaus in Weil der Stadt zu modernisieren. Das Projekt stieß sofort auf Begeisterung beim Team vom 5. Physikalischen Institut der Universität Stuttgart: Könnte die Modernisierung nicht mit einer Ausstellung verbunden werden, in der Keplers Beitrag zur Astronomie, Mathematik und Physik sowie aktuelle Forschungsthemen mit Hands-on-Experimenten erfahrbar werden?

Wir waren uns einig, dass wir Kepler – kaiserlicher Mathematiker und Astronom, Wissenschaftler von Weltrang und einer der großen Söhne des Landes – mit seinem Vermächtnis für Wissenschaft und Forschung bis heute in das Bewusstsein der breiten Öffentlichkeit rücken wollten. Die ‚Kepler-Runde‘ war geboren! Zu der Zeit ahnte niemand von uns, dass unsere Planungs- und Vorbereitungstreffen aufgrund der Corona-Pandemie weitestgehend nur online stattfinden konnten.

Wir waren dankbar, dass wir mit dem Haus der Wirtschaft in Stuttgart einen würdigen Ausstellungsort gefunden haben. Im Anschluss wird ‚himmelwärts‘ als Wanderausstellung auf Tour gehen und in weiteren Städten zu sehen sein.

Im Begleitband zur Ausstellung ‚himmelwärts‘ geben die Autorinnen und Autoren Einblicke in die Gedankenwelt Keplers als Mensch und Wissenschaftler auf der Schwelle zur Neuzeit sowie seine Bedeutung für aktuelle Forschungsthemen in der Astrophysik und der Raumfahrt.

DR. ROBERT LÖW UND KARIN OTTER
Universität Stuttgart, 5. Physikalisches Institut
HILDRUN BÄZNER-ZEHENDER, HERMANN FABER UND WOLFGANG PLEITHNER
Kepler-Gesellschaft e.V., Weil der Stadt
PROF. DR. BURKHARD KÜMMERER (EM.)
TU Darmstadt

Grußworte



Grußwort des Schirmherrn



Am 27. Dezember 2021 jährt sich der Geburtstag des berühmten Astronomen, Mathematikers und Physikers Johannes Kepler zum 450sten Mal. Mit dem Titel ‚himmelwärts‘ widmen das 5. Physikalisches Institut der Universität Stuttgart und die Kepler-Gesellschaft Weil der Stadt e.V. einem der wichtigsten Begründer der modernen Naturwissenschaft zum Geburtstagsjubiläum eine Ausstellung, für die ich sehr gerne die Schirmherrschaft übernommen habe.

Schon immer hat das Universum die Menschen fasziniert und ihren Forscherdrang geweckt. Schließlich bilden die Positionen und Bewegungen der Himmelskörper die Grundlage, um uns in Raum und Zeit zu orientieren. In der griechischen Antike entstand schließlich die Idee der Erde als Kugel, um die Mond, Sonne und Planeten geometrisch auf Kurvenbewegungen kreisen.

Als Johannes Kepler 1571 in Weil der Stadt geboren wurde, war die Astronomie im Umbruch. Der Astronom Nikolaus Kopernikus hatte mit seiner Behauptung, nicht die Erde, sondern die Sonne bilde das Zentrum des Universums, das mittelalterliche Weltbild im ausgehenden 16. Jahrhundert gründlich auf den Kopf gestellt. Zwar war dieser Gedanke eines heliozentrischen Weltbildes für die meisten Menschen dieser Zeit nahezu unmöglich. Johannes Kepler aber, zunächst noch Theologiestudent in Tübingen, war fasziniert und machte die Entdeckung Kopernikus' zum Ausgangspunkt seiner Forschung, die letztlich in den drei Planetengesetzen – den Keplerschen Gesetzen – ihren Höhepunkt fand. Seine Berechnungen und die Beobachtungen des italienischen Astronomen Galileo Galilei bewiesen 1609 Kopernikus' Annahme und leiteten einen der radikalsten Umbrüche in der Geschichte der Wissenschaften ein. Die moderne Astronomie war geboren.

Johannes Kepler hat seine Forschungen gegen den Widerstand gängiger Fachmeinungen und kirchlicher Lehre mit Mut und Wagnis vorangetrieben und damit zum Beginn einer wissenschaftlichen Revolution beigetragen. Die Ausstellung würdigt daher einen Forscher, der zu seiner Zeit nicht nur Außergewöhnliches geleistet hat, sondern der einen entscheidenden Impuls in Richtung des modernen Wissenschaftsverständnisses gesetzt hat, das unsere Gesellschaft heute prägt.

Mein herzlicher Dank gilt allen, die an der Entwicklung des Ausstellungskonzepts und seiner Realisierung beteiligt waren. Der Ausstellung wünsche ich die verdiente breite Resonanz beim Publikum und in der Fachwelt. Allen Besucherinnen und Besuchern wünsche ich interessante Einblicke und Erkenntnisse bei der Beschäftigung mit der faszinierenden Geschichte der Astronomie!

WINFRIED KRETSCHMANN
Ministerpräsident des Landes Baden-Württemberg

Grußwort der Rektoren



Die Ausstellung ‚himmelwärts‘ ehrt den Wissenschaftler und Menschen Johannes Kepler, der vor den Toren Stuttgarts in Weil der Stadt geboren wurde und in Tübingen studiert hat, zu seinem 450. Geburtstag. Keplers unermüdliches Streben nach Wissen prägt bis heute den Weg zu wissenschaftlicher Erkenntnis und ist Vorbild für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aller Disziplinen weltweit.

Erfindungen bereiten neue Wege zu wissenschaftlicher Erkenntnis. Das Fernrohr steht am Anfang der Beobachtung neuer Planeten, und Keplers Verbesserungen machen ihn zum Begründer der modernen Optik. Kepler wäre sicher begeistert von den Fortschritten der bodengebundenen Teleskope und den Möglichkeiten, sogar aus dem Weltraum ohne störende Atmosphäre beobachten zu können – und wieviel mehr, hätte er erfahren, dass wir heute den Mond und sogar ‚seinen‘ Mars besuchen. Mit den Reisen zum Mond geht im wahrsten Sinn des Wortes ein Traum Keplers in Erfüllung: In einer der frühesten Weltraumutopien, in seinem Werk ‚Somnium – Ein Traum von einer Reise zum Mond‘, beschreibt Kepler diese Reise mit erstaunlicher physikalischer Präzision und viel Fantasie.

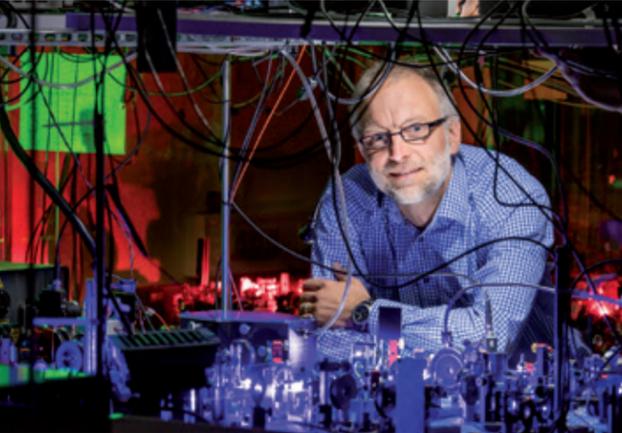
Als Kepler Anfang des 17. Jahrhunderts als erster eine einheitliche, für alle Planeten gleichermaßen gültige Bahntheorie entwickelte und seine beiden Gesetze in der 1609 erschienenen ‚Astronomia Nova‘ veröffentlichte, legte er den Grundstein für eine moderne Betrachtung des Weltraums. Bis heute ist sie die Grundlage für Forschung und Technologie auf dem Gebiet der Raumfahrt und Astronomie, die an den Universitäten Stuttgart und Tübingen eine lange Tradition haben. Sie spiegelt sich unter anderem wider in zahlreichen Forschungsprojekten in den Bereichen Weltraumforschung und Astrophysik wie auch in dem hervorragenden Ruf, den die Fakultät für Luft- und Raumfahrt und Geodäsie, die bundesweit größte ihrer Art, in der Lehre genießt. So wurde aus gutem Grund das Kompetenzzentrum für Infrarotastronomie, das Deutsche Betriebszentrum des SOFIA Observatoriums in Stuttgart angesiedelt: Ein fliegendes Stratosphären-Observatorium für Infrarotastronomie mit einem 2,7 m großen Teleskop an Bord.

Als Rektoren unterstützen wir die Ausstellung ‚himmelwärts‘ gerne, die gemeinsam mit Expertinnen und Experten an den Universitäten Stuttgart und Tübingen aus den Fachbereichen Astrophysik, Physik, Didaktik der Physik und Geschichte, der Kepler-Gesellschaft e. V., Weil der Stadt sowie der TU Darmstadt (Mathematik) erarbeitet wurde.

Wir freuen uns mit Ihnen auf eine interessante Ausstellung und hoffen, dass Sie sich ebenso für diese Reise in die Wissenschaftsgeschichte bis heute begeistern können wie wir!

PROF. DR. WOLFRAM RESSEL, Universität Stuttgart
PROF. DR. BERND ENGLER, Universität Tübingen

Grußwort Tilman Pfau



Johannes Kepler konnte aus den präzisen über viele Jahre gesammelten Beobachtungsdaten unter anderem von Tycho Brahe schließen, dass sich die Planeten in Ellipsen um die Sonne bewegen. Auch in unserer Forschung heute, die sich mit den kleinsten Bausteinen der Materie und der Quantenphysik beschäftigt, kommt es mehr denn je auf die systematische Kombination von physikalischen Modellen und präzisen Daten an.

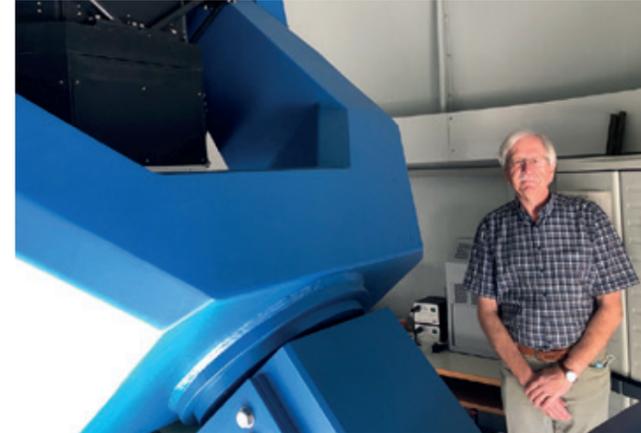
Ein Bild des riesigen ursprünglich unfassbaren Universums ist für uns dank ausgefeilter Teleskoptechnik und der modernen Raumfahrt heute leichter vorstellbar und auch vermittelbar geworden. Bilder vom Mond, unserer Milchstraße oder ferner Galaxien sind für die breite Öffentlichkeit selbstverständlich. Der Weg von der Idee des unsichtbar kleinen Atoms bei den alten Griechen bis zur heutigen Vorstellung der Atomorbitale und der Zusammensetzung der Atome aus elementaren Teilchen war ähnlichen Anpassungen unterworfen wie die Weltbilder des Universums vor und nach Kepler. Erst neue Schlüsseltechnologien wie die Erfindung des Lasers ermöglichten es der Forschung, die Theorie der Gründerväter der Quantenphysik Anfang des letzten Jahrhunderts im Labor extrem präzise zu testen. Die stetige Verbesserung der Präzision bei der Untersuchung von Atomen und ihren Bausteinen eröffnet dabei völlig neue Möglichkeiten wie beispielsweise immer präzisere Uhren oder Quantencomputer, mit denen zukünftig unter anderem molekulare Strukturen simuliert werden können, um neue Materialien oder Medikamente maßgeschneidert herstellen zu können.

Damals wie heute ist es wichtig, neueste Erkenntnisse aus der Wissenschaft in die breite Bevölkerung zu tragen sowie die Faszination der von Neugier getriebenen Forschung damals und heute zu vermitteln. Die Ausstellung ‚himmelwärts‘ ermöglicht den Besucherinnen und Besuchern beides – den Blick zurück in die Wissenschaftsgeschichte und in aktuelle Weltraum- und Astrophysikforschung.

Mit der Ausstellung möchten wir Johannes Kepler als Mensch und Forscher aus dieser Region und sein Werk erfahrbar machen. Wir freuen uns, wenn Kepler Laien wie Experten, Jung und Alt mit seinem Vorbild inspiriert und Lust auf eigenes Forschen macht.

PROF. DR. TILMAN PFAU
5. Physikalisches Institut
Universität Stuttgart

Grußwort Klaus Werner



Die heutige Astrophysik hat Kepler viel zu verdanken, was eindrücklich belegt wird durch die Verleihung der Physik-Nobelpreise in den Jahren 2019 und 2020 an Astronomen im Zusammenhang mit Exoplaneten und Schwarzen Löchern.

Die von Johannes Kepler gefundenen Gesetze haben es ihm ermöglicht, die Bewegung der Planeten in unserem Sonnensystem zu erklären und mit großer Präzision vorauszusagen. Sie stellen einen Meilenstein in der Astronomie dar und sind in vielen Teilbereichen der modernen Astrophysik nicht mehr wegzudenken. Sie beschreiben die Dynamik von Himmelskörpern und Systemen, von denen Kepler damals noch gar nichts ahnen konnte. Seine Gesetze beschreiben die Bewegung von Planeten um andere Sterne herum und ermöglichen es uns, ihre Massen abzuschätzen und damit den Schluss zu ziehen, ob auf ihnen Leben vorkommen kann. Auch für die Physik der Sterne sind die Keplergesetze grundlegend. Sie sind die einzige Möglichkeit, Massen von Sternen in Doppelsternsystemen direkt zu bestimmen. Die Masse ist die fundamentale Eigenschaft bei der Entwicklung von Sternen, Galaxien und letztlich des gesamten Universums. Keplers Gesetze lassen uns auch die Eigenschaften von Schwarzen Löchern vermessen. Wir finden diese erst mit Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie vorhergesagten faszinierenden Objekte als Überreste von Sternexplosionen oder als supermassereiche Körper in den Zentren von Galaxien, auch in unserer Milchstraße. Keplers Gesetze sind auch von fundamentaler Bedeutung für die Raumfahrt. Mit ihrer Hilfe werden die Flugbahnen berechnet, auf denen Astronauten zum Mond fliegen oder auf denen Raumsonden bis in die äußersten Bereiche unseres Sonnensystems vordringen.

Kepler fand seine Gesetze zu einer Zeit und in äußeren und persönlichen Umständen, die außerordentlich schwierig waren. Das setzt seine Weitsicht und Ausdauer sowie die Klarheit seiner Gedanken in ein ganz besonderes Licht und macht sein erfolgreiches Ringen um die Erkenntnis der Naturgesetze umso bewundernswürdiger.

Mit der Ausstellung ‚himmelwärts‘ zu Keplers 450. Geburtstag soll seine Bedeutung damals wie heute gewürdigt werden, verbunden mit dem Wunsch, Kepler als Wissenschaftler und Mensch einer möglichst breit aufgestellten, interessierten Öffentlichkeit erfolgreich nahezubringen.

PROF. DR. KLAUS WERNER
Vorsitzender der Kepler-Gesellschaft e. V.
Institut für Astronomie und Astrophysik
Universität Tübingen

Inhaltsverzeichnis



JOHANNES KEPLER

18 Zeittafel zu Keplers Leben und Werk

DIE WELT KEPLERS UM 1600

- 22 Glaubenswelten. Die Reformation im Reich ~ S. HOLTZ
- 32 Einheit von Naturwissenschaft und Philosophie in Keplers Werk ~ V. BIALAS
- 41 Schule und Bildung im Herzogtum Württemberg ~ S. HOLTZ
- 54 Keplers Reisen ~ S. HERKLE
- 60 Johannes Keplers Rolle im Hexenprozess seiner Mutter Katharina ~ H.-J. ALBINUS
- 64 Johannes Kepler und die Astrologie ~ M. FREITAG
- 71 Kepler und der Buchdruck ~ F. SECK

WELTBILDER

- 80 Himmlische Kreise: Weltbilder vor Kepler ~ B. KÜMMERER
- 94 400 Jahre Epitome - Das erste Lehrbuch auf kopernikanischer Grundlage ~ V. BIALAS

KEPLERS WERK

- 100 Die Rudolphinischen Tafeln ~ J. REICHERT
- 108 Meilensteine der Astronomie ~ H.-U. KELLER
- 118 Logarithmen verdoppeln die Lebenszeit der Astronomen ~ B. KÜMMERER
- 126 Mit einem Fass Wein zu dem Menschen Johannes Kepler ~ B. KÜMMERER
- 135 Die Bewegungsgleichung der Planeten ~ M. HOLDER
- 139 Die Keplersche Vermutung ~ J. WILLS, M. HENK
- 142 Keplers Überlegungen zur Schwerkraft ~ M. HOLDER
- 145 Das Auge als Instrument ~ O. MORSCH
- 150 Einstein und Kepler ~ G. WUNNER
- 154 Kepler in der Musik ~ M. HERMANN
- 157 Leitmotive Keplers: Stimmig - Einfach - Ideal ~ K. HENTSCHEL
- 162 Keplers Entdeckung der Gesetze der Planetenbewegung ~ E. MEYER

KEPLER HEUTE

- 168 Die Aktualität von Keplers Forschungsmethodik ~ D. B. HERRMANN
- 171 Von ‚Somnium‘ bis in die Zukunft der Raumfahrt ~ G. HASINGER
- 179 Supernovae - von Kepler bis zur Gegenwart ~ H.-T. JANKA
- 184 Die Vermessung der Milchstraße mit der Gaia-Mission ~ U. BASTIAN, S. JORDAN
- 189 Exoplaneten: Von Kepler zu anderen Welten ~ K. POPPENHÄNGER
- 192 Das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße ~ S. GILLESSEN
- 200 Die Harmonie der dunklen Himmelsphären ~ J. WAGNER
- 202 Ein Schwarzes Loch im Fokus ~ H. FALCKE

KEPLER VERNETZT

- 208 Freunde und Wegbegleiter ~ F. SECK
- 217 Kepler und Galilei ~ W. HEHL

KEPLERS NACHLASS

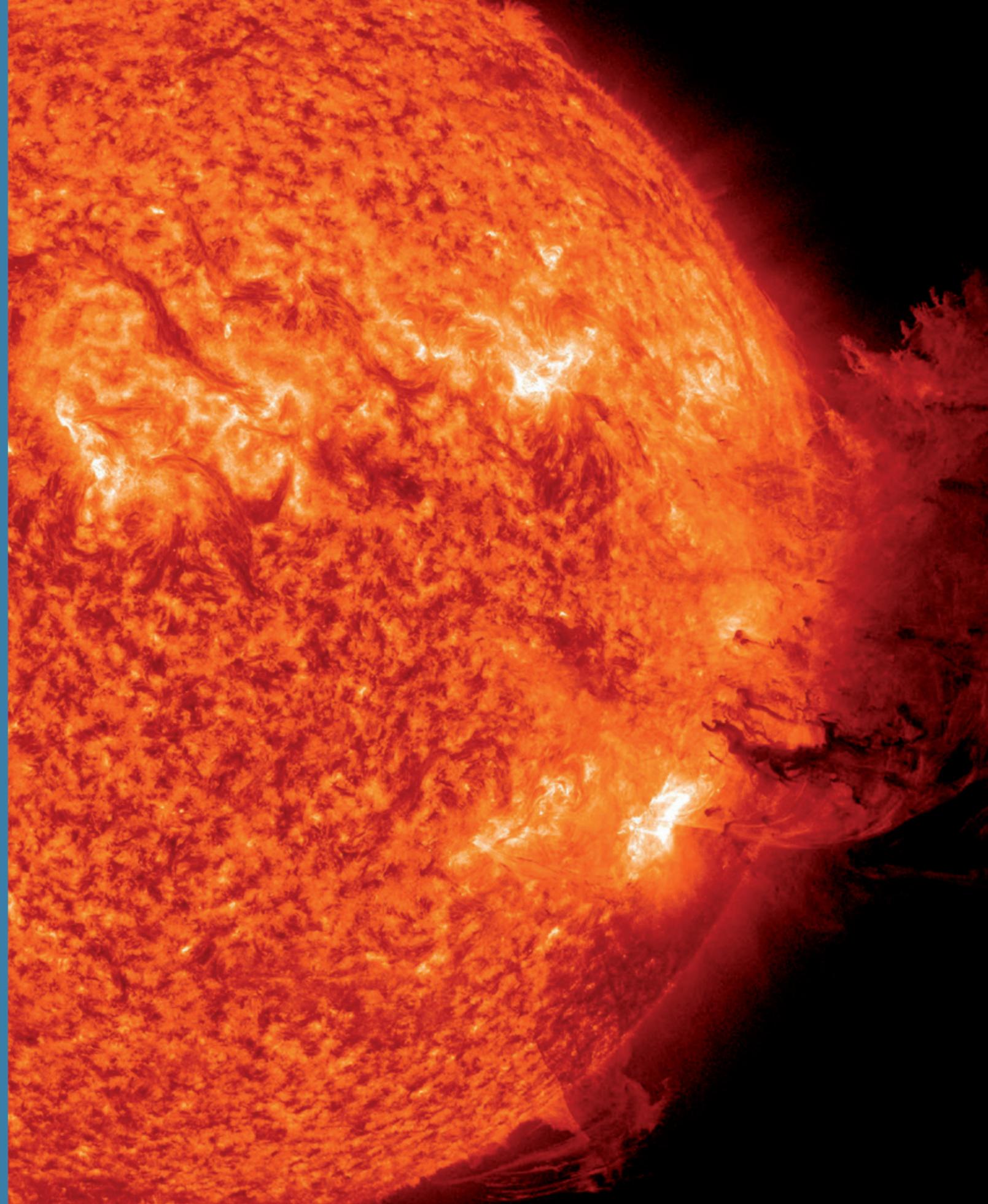
- 224 Keplers gesammelte Werke ~ P. SCHENKEL

ANHANG

- 230 Danksagung / Impressum

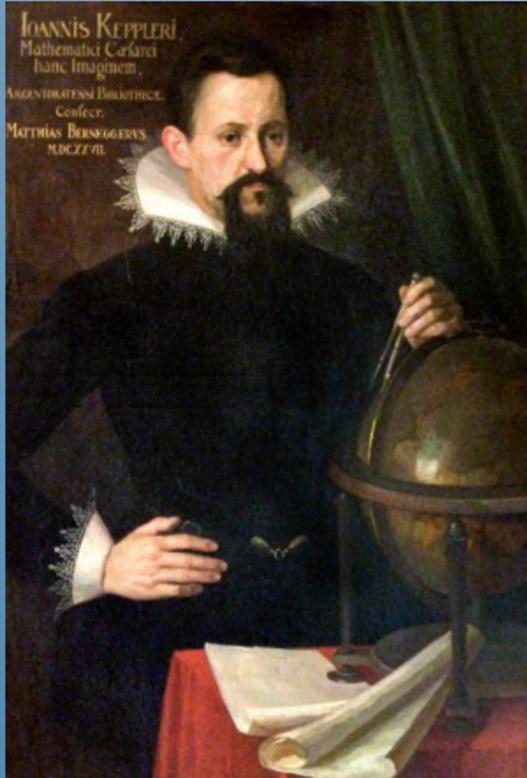
Johannes Kepler

SONNENERUPTION H-Alpha-Licht
Foto: NASA/GSFC/SDO



Zeittafel zu Keplers Leben und Werk

Kepler schenkte 1620 seinem Freund Matthias Bernegger, Professor für Geschichte an der Universität Straßburg, ein Ölgemälde von sich. Auch wenn das Gemälde laut Keplers eigenem Bekunden mit seinem wirklichen Aussehen nur wenig gemein hat, so ist es doch eine zeitgenössische Darstellung Keplers in Linz. Das Foto zeigt eine 1910 frei gestaltete Kopie des Straßburger Originals des Malers August Köhler (1881–1964). Foto: Kepler-Museum Weil der Stadt



1601-1612__ Nach Tycho Brahes Tod, Nachfolger als kaiserlicher Mathematiker Rudolphs II. in Prag

1600-1601__ Mitarbeiter Tycho Brahes in Prag

1597__ Kepler heiratet Barbara Müller

1596__ Mit seinem Erstlingswerk ‚Mysterium Cosmographicum‘ begründet Kepler seinen Ruf als Astronom

1594-1600__ Übersiedlung nach Graz als Lehrer an der evangelischen Stiftsschule

1591__ Magisterpromotion und Beginn des Theologiestudiums. Kepler wird zum überzeugten Anhänger des heliozentrischen Weltbilds.

1589-1594__ Student am evangelischen Stift der Universität Tübingen, Studium an der Philosophischen Fakultät

1587__ Immatrikulation in Tübingen und Rückkehr nach Maulbronn

1584-1589__ Besuch der Klosterschulen Adelberg und Maulbronn

1576__ Umzug nach Leonberg ins Herzogtum Württemberg

***27.12.1571**__ Geburt in der freien Reichsstadt Weil der Stadt

† 15.11.1630__ Kepler stirbt in Regensburg

1628-1630__ Kepler tritt in die Dienste Wallensteins und übersiedelt nach Sagan

1626-1627__ Druck der ‚Rudolphinischen Tafeln‘ in Ulm, Keplers Jahrhundertwerk zur Berechnung der Stellung von Sonne, Mond und Planeten

1615-1621__ Keplers Mutter Katharina wird wegen Hexerei angeklagt. Kepler reist wiederholt nach Württemberg, übernimmt die Verteidigung im Prozess und bewirkt ihren Freispruch.

1619__ Kepler veröffentlicht sein Werk ‚Harmonice Mundi‘ mit dem dritten Gesetz der Planetenbewegung

1613__ Kepler heiratet seine zweite Frau Susanne Reuttinger

1612__ Ausschluss vom Heiligen Abendmahl der lutherischen Gemeinde

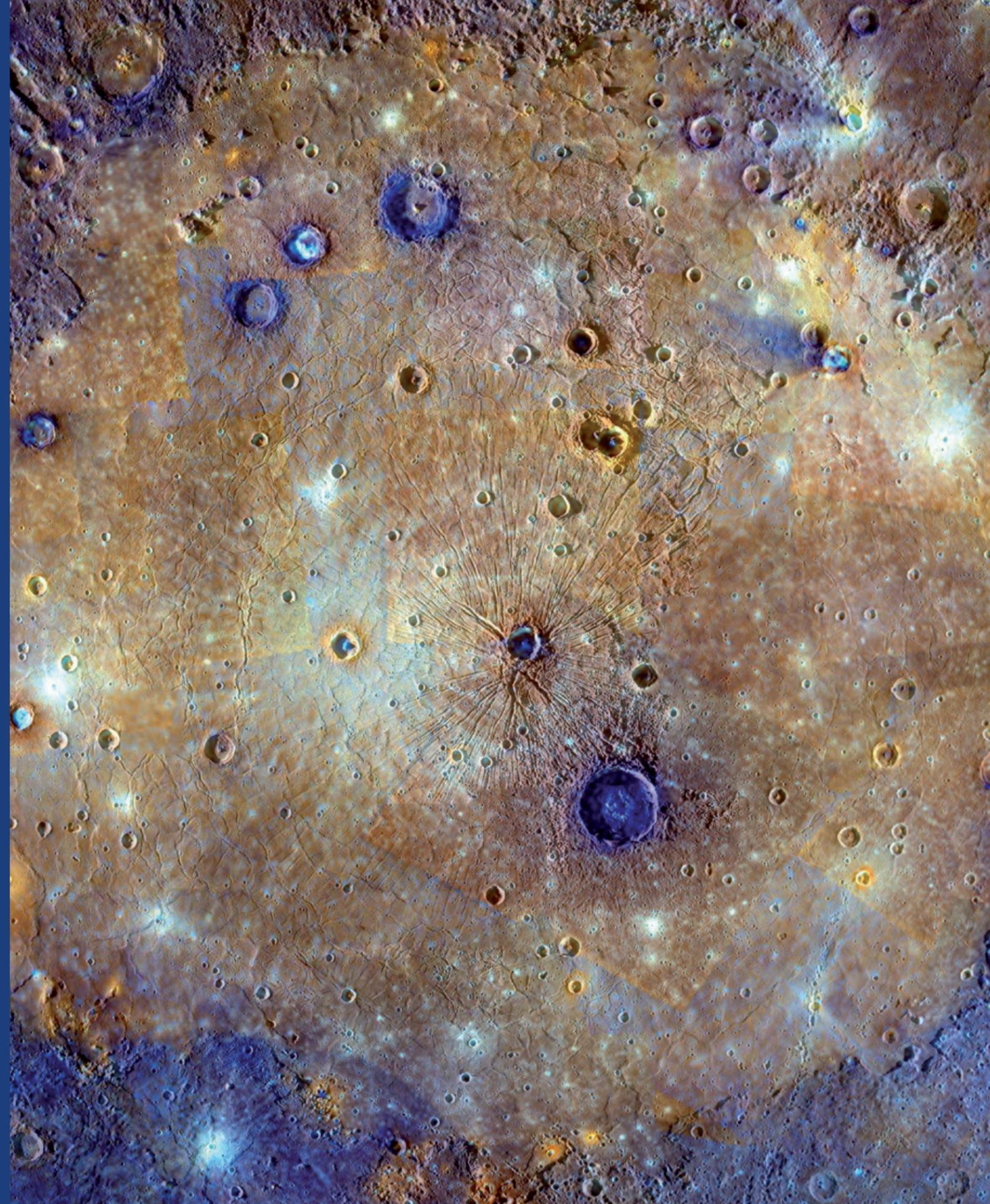
1612__ Übersiedlung nach Linz als Mathematiker der Stände von Oberösterreich, außerdem Mathematiker der Kaiser Matthias und Ferdinand II.

1611__ Kepler veröffentlicht sein Werk ‚Dioptrice‘ mit dem Konstruktionsprinzip des nach ihm benannten Fernrohrs

1611__ Barbara Kepler stirbt an ‚hitzigem‘ Fieber

1609__ In seiner ‚Astronomia Nova‘ veröffentlicht Kepler sein erstes und zweites Gesetz der Planetenbewegung

Die Welt Keplers um 1600



MERKUR
Foto: NASA/Johns Hopkins University Applied
Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington

Glaubenswelten

Die Reformation im Reich

Mit der Reformation war die Einheit der westlichen Christenheit zerbrochen.¹ Lange war offen, welche Auswirkungen dies auf die politische Struktur des Heiligen Römischen Reiches Deutscher Nation haben sollte. Auf dem Augsburger Reichstag 1530 legten die Anhänger Luthers ein Bekenntnis vor, das zur Lösung der Religionsstreitigkeiten beitragen sollte. Nach Verhandlungen und Gegenschritten erklärte Kaiser Karl V. dieses ‚Augsburger Bekenntnis‘ (Confessio Augustana) zwar für widerlegt und die Religionsverhandlungen für gescheitert, dennoch zeichnete sich in Augsburg ab, dass das Reich wohl künftig mit zwei Konfessionen würde leben müssen. Es bestand folgendes Problem: Die mittelalterliche Idee eines universellen (katholischen) Reiches ließ keine zwei christlichen Konfessionen zu. Nach zwei militärischen Auseinandersetzungen konnte das Problem verfassungsrechtlich im Augsburger Religionsfrieden gelöst werden. Unter dem Oberhaupt des Kaisers ward das Reich künftig bikonfessionell, sowohl der Katholizismus als auch das Luthertum (die Confessio Augustana-Verwandten) genossen künftig den Schutz des Landfriedens. Es wurde kein Versuch mehr unternommen, den Religionsstreit beizulegen und die Einheit der Religion wieder herzustellen. Folglich handelten Juristen, nicht Theologen bzw. kirchliche Institutionen, für beide Konfessionen Rechtsbestimmungen aus, die die Reichsfürsten übernahmen. Dezidiert ausgeschlossen waren die Reformierten/Calvinisten ebenso wie die Täufer. Die Calvinisten wurden erst im Westfälischen Frieden 1648 den beiden anderen großen christlichen Konfessionen gleichgestellt. Der Augsburger Religionsfriede war damit ein politisch-säkularer Friede, der konfessionelle Streitigkeiten überdeckte. Das Recht zur freien Wahl ihrer Konfession wurde lediglich den weltlichen Landesherren zugestanden. Der Religionsfriede schuf also keine religiöse Toleranz. Nach dem Grundsatz des landesherrlichen Reformationsrechts mussten die Unter-

SABINE HOLTZ

tanen der Konfession ihrer weltlichen Herrscher folgen. Wer sich deren Bekenntnis nicht anschließen wollte, dem wurde ausdrücklich das Recht zur Emigration eingeräumt. Das Heilige Römische Reich Deutscher Nation verzichtete somit künftig auf die Religionseinheit. Sie galt künftig nur noch auf der Ebene der einzelnen weltlichen Territorien. In den geistlichen Territorien der Fürststäbe und Fürst(erz)bischöfe konnten die Herrscher zwar persönlich ihre Konfession wechseln, mussten damit aber zugleich ihr weltliches Amt aufgeben. Diese Regelung sicherte den Bestand der katholischen Reichskirche. Mit dem Friedensschluss in Augsburg war der Weg für die Konfessionalisierung der Territorien frei. So unterschiedlich die Konfessionen in ihren theologischen Lehren auch waren, zur Einprägung ihrer Konfession bei den Untertanen wählten sie sehr ähnliche Mittel.² Dazu zählten Katechismen, Predigten und Kirchenlieder, auf katholischer Seite setzte man überdies auf Prozessionen, Wallfahrten, Reliquien- und Heiligenverehrung. Auch die Verstärkung der schulischen Bildung und die Disziplinierung der eigenen Anhänger durch Einrichtungen der Kirchenzucht dienten der Einprägung der jeweiligen Konfession. Auf katholischer Seite engagierten sich ganz besonders die Jesuiten. Die 1540 von Ignatius von Loyola gegründete Gesellschaft Jesu (Societas Jesu) war Teil der katholischen Erneuerungsbewegung. Der Orden trieb die Gegenreformation und die katholische Reform energisch voran.

Die Reformation in Württemberg

Das Herzogtum Württemberg hatte sich 1534 der Reformation angeschlossen.³ Dies war, verglichen mit zahlreichen reichsstädtischen Territorien, aber auch einigen benachbarten Schweizer Kantonen sowie der Kurpfalz und der Landgrafschaft Hessen, relativ spät. Dies hatte mit machtpolitischen Ambitionen des jungen württembergischen Herzogs Ulrich zu tun, der 1519 die Reichsstadt Reutlingen militärisch okkupiert



Die Karte zeigt die Konfessionsverteilung in Europa um 1618. Entwurf: Haus der Bayerischen Geschichte/Peter Wolf und Stefan Lippold. Grafik: Würth & Winderoll

hatte. Da dies gegen den Ewigen Landfrieden verstößt hatte, war die Reichsacht über ihn verhängt worden und er musste außer Landes gehen. Die Verwaltung in Württemberg übernahm Erzherzog Ferdinand von Habsburg. 1534 war Herzog Ulrich jedoch gemeinsam mit dem hessischen Landgrafen die militärische Rückeroberung des Herzogtums gelungen. In der Folge führte Herzog Ulrich die Reformation in Gestalt einer Fürstenreformation, also von oben verordnet, in seinem Herzogtum ein. Die frühe reformatorische Bewegung hatte viele Gesichter. Die geopolitische Lage zwischen den Schweizer Kantonen, die sich der Reformation Ulrich Zwinglis angeschlossen hatten, und der Landgrafschaft Hessen, die auf Seiten der Reformation Martin Luthers stand, legte es nahe, Reformatoren aus beiden reformatorischen Lagern nach Württemberg zu berufen. Die im Süden des deutschen Südwestens gelegenen Reichsstädte lagen im Einflussbereich der zwinglianisch-oberdeutschen Reformation (u.a. Straßburg, Esslingen, Ulm, Konstanz); im Norden hatte die lutherische Reformation in einigen Reichsstädten früh Anhänger gefunden (u.a. Schwäbisch Hall, Heilbronn und Dinkelsbühl). Trotz gegebenenfalls

früher reformatorischer Bewegungen blieben einige Reichsstädte wie beispielsweise Rottweil, Überlingen und Weil der Stadt beim alten Glauben.

Da Ulrich Zwingli 1531 den Tod auf dem Schlachtfeld gefunden hatte und das zwinglianische Lager zunächst führerlos erschien, schlossen sich nach und nach viele Reichsstädte der lutherischen Ausrichtung der Reformation an.⁴ Die beiden mit der Reformation in Württemberg beauftragten Reformatoren, der Lutheraner Erhard Schnepf und der Zwinglianer Ambrosius Blarer, unterzeichneten beide noch 1534 auf herzoglichen Druck die Stuttgarter Konkordie, die einen Ausgleich zwischen den unterschiedlichen reformatorischen Richtungen schaffen sollte. Bei genauerem Hinsehen dominierte aber die lutherische Lesart der Reformation. Dies bestätigte sich in der württembergischen Kirchenordnung (1536), der der Katechismus in der Form, die der Lutheraner Johannes Brenz für Schwäbisch Hall verfasst hatte, angehängt wurde. Es war nur konsequent, dass Ambrosius Blarer 1538 sein Amt niederlegte. Die Stuttgarter Konkordie war ein erster Schritt zur Einigung des reformatorischen Lagers. Offene Fragen wurden in weiteren Verhandlungen

gen auf dem Weg zur Wittenberger Konkordie geklärt. Die oberdeutschen Vertreter konnten letztlich der Konkordie zustimmen, die protestantischen Schweizer Kantone unter der Führung des Zwingli-Nachfolgers Heinrich Bullinger konnten jedoch nicht zum Beitritt bewegt werden. Mit der Wittenberger Konkordie trennte sich die deutsche von der schweizerischen Reformation.

Lehrstreitigkeiten innerhalb des lutherischen Lagers

Trotz der Eintracht des lutherischen Lagers blieben Lehrstreitigkeiten nicht aus. Nach dem Tod Luthers 1546 geriet das normative Fundament des Luthertums in eine andauernde Krise. Die lutherischen Theologen waren nicht kompromissbereit. Im Luthertum entstanden zwei Lager, auf der einen Seite standen die konzilianteren Anhänger Philipp Melanchthons, die sogenannten Philippisten, auf der anderen Seite die lutherischen Hardliner um Matthias Flacius Illyricus, die als sogenannte Gnesiolutheraner beanspruchten, die ‚echten‘ Lutheraner zu sein. Die Gnesiolutheraner ihrerseits bezichtigten die Philippisten, Kryptocalvinisten zu sein.

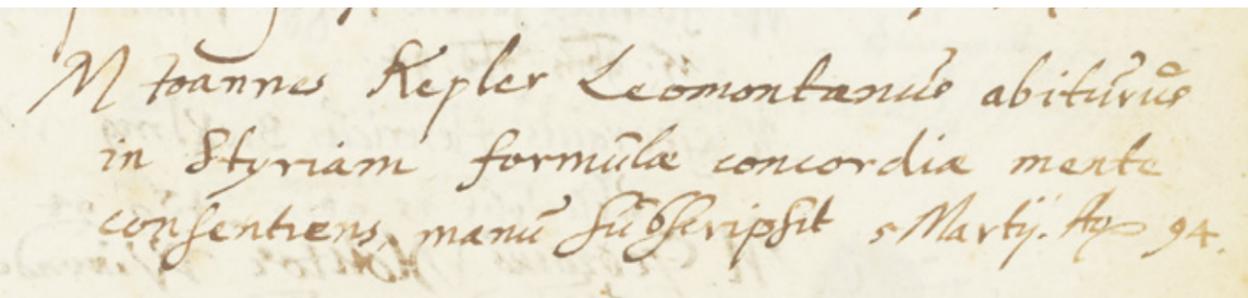


sens, Württembergs und Braunschweig-Wolfenbüttels. Zahlreiche Zusammenkünfte, Gespräche und Verhandlungen führten 1577 zur Konkordienformel (Formula Concordiae).⁵

Die Konkordienformel

Gut eine Generation nach Luthers Tod konnte somit ein Ausgleich zwischen den streitenden Parteien erzielt werden. In zwölf Artikeln wurden in der Konkordienformel (Formula Concordiae) die strittig gewordenen Positionen der Lutheraner präzisiert.⁶ Eine Werbe- und Unterschriftenaktion zur Konkordienformel unter den evangelischen Ständen sowie den Kirchen- und Schul-

Der Weil der Städter Johannes Brenz (1499 – 1570) war neben Melanchthon und Luther einer der wichtigsten Reformatoren – und der Vollender der Reformation in Württemberg. Bild: Epitaph in der Stuttgarter Stiftskirche, Rekonstruktion des Originals von Johann Sautter aus Ulm (1584). Foto: S. Schikora



Johannes Keplers Unterschrift unter der Konkordienformel (lat. formula concordiae). Quelle: Landeskirchliches Archiv Stuttgart (LKAS), Hs8: Concordia. Christliche Widerholete einmütige Bekenntnis nachbenannter Churfürsten Fürsten vnd Stende Augspurgischer Confession [...], Tübingen: Georg Gruppenbach 1580, handschriftlicher Anhang, S. 93.

Positiv betrachtet führten die anhaltenden Lehrstreitigkeiten zur Ausdifferenzierung der lutherischen Lehre. Neben den streitenden Parteien entstand eine am Konsens orientierte Partei, die sich für eine lehrmäßige Einigung engagierte. Ihr theologischer Protagonist war der Tübinger Theologieprofessor Jakob Andreae (1528-1590). Seine ‚Sechs Predigten von den Spaltungen‘ (1573) markieren den Durchbruch zum Konkordienwerk der Lutheraner. Die treibenden politischen Kräfte waren die Landesfürsten Kursach-

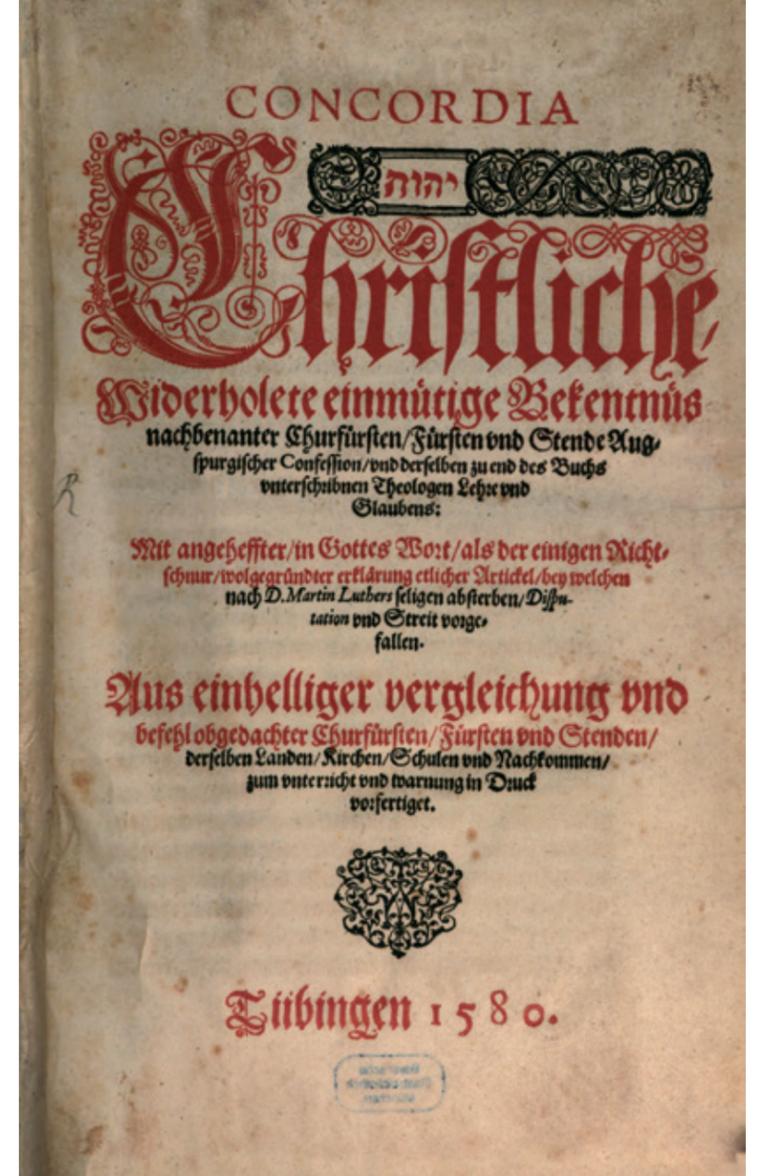
dienern holte deren Zustimmung ein. Drei Kurfürsten, 20 Fürsten, 24 Grafen, vier Freiherren, 35 Reichsstädte und mehr als 8000 Kirchendiener beglaubigten das Konkordienbuch.⁷ Trotz des sichtbaren Erfolgs muss erwähnt werden, dass rund ein Drittel der deutschen lutherischen Territorien und Reichsstädte die Unterzeichnung ablehnte. Dennoch war damit in zähem Ringen unter der Federführung des württembergischen Theologen Jakob Andreae ein Bekenntniswerk geschaffen worden, das als die theologische Kon-

solidierung der lutherischen Lehre verstanden werden kann.⁸ Zum 50-jährigen Jubiläum des ersten reformatorischen Bekenntnisses, der Confessio Augustana, wurde 1580 die Konkordienformel gemeinsam mit weiteren Stücken zum Konkordienbuch ausgestaltet und dem Kaiser überreicht.

Obwohl für die lutherische Lehre erarbeitet, ist die Konkordienformel zugleich ein zutiefst politisches Buch; nicht nur, was die Einigungsbestrebungen der Lutheraner im Reich anbelangt. In Württemberg schloss die enge Verflechtung von Kirche und Staat theologische Pluralität aus. Die Einheit der Religion war selbstverständliche Basis der Einheit der Gesellschaft. Begründet auf der Kirchenordnung und der Konkordienformel wurde in Württemberg ein konfessionell geschlossenes Territorium etabliert. Die Unterschrift unter die Konkordienformel war das sichtbare Zeichen einer wechselseitigen Durchdringung von Kirche und Staat in Württemberg.⁹ Im benachbarten katholischen Herzogtum Bayern war der Eid auf das Tridentinum bereits seit 1568 obligatorisch. Zur Sicherung der Rechtgläubigkeit hing in Württemberg künftig nicht nur die theologisch-kirchliche, sondern auch die politisch-staatliche Karriere von der Zustimmung zur Konkordienformel ab.

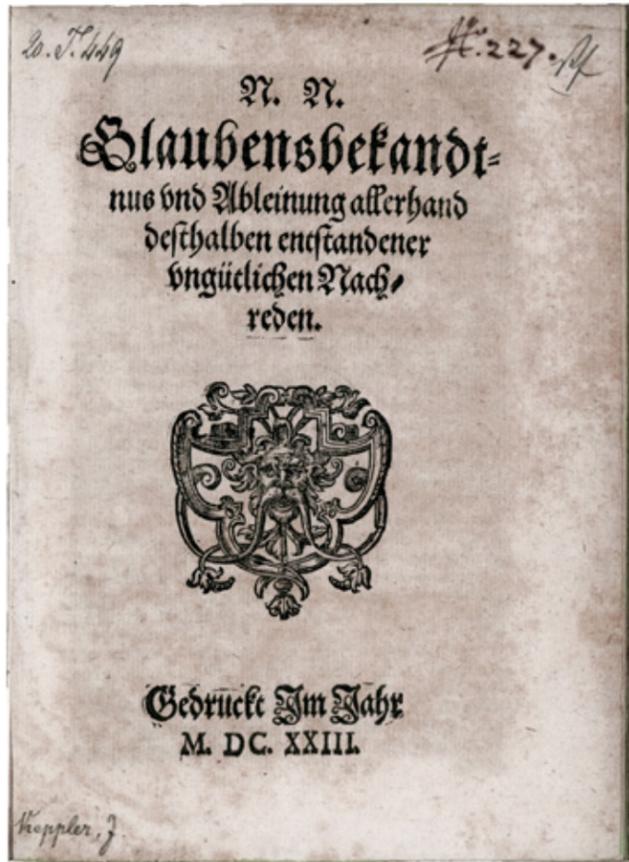
Die konfessionelle Situation in Böhmen und Habsburg und der Ausbruch des 30-jährigen Kriegs

Eine so eindeutige und dauerhafte konfessionelle Zuordnung, wie sie im Herzogtum Württemberg gegeben war, gab es nicht in allen Territorien. Die böhmische Königskrone lag seit 1526 in den Händen Habsburgs, deren Dynastie zugleich die Kaiser des Heiligen Römischen Reiches Deutscher Nation stellten. Kaiser Rudolf II. war es, der den böhmischen Protestanten im Majestätsbrief von 1609 die freie Religionsausübung zugestand. Als sein Bruder Matthias 1611 König in Böhmen wurde und 1612 zum Kaiser gewählt wurde, bedeutete dies einen tiefen Einschnitt in die Religionsausübung in Böhmen, 1617 setzte Matthias gegen den erklärten Widerstand der protestantisch gesinnten böhmischen Stände die Wahl seines Cousins, Ferdinands II., zum König von Böhmen durch. Ferdinand war ein überzeugter Anhänger des Katholizismus. Mit



seinem Regierungsantritt leitete er Maßnahmen zur Rekatholisierung Böhmens ein. Sie stießen auf heftigen Widerstand. Die böhmischen Stände opponierten gegen die Wahl und gegen die begonnene Rekatholisierung des Königreichs. Bei einer Versammlung auf der Prager Burg, dem Regierungssitz des böhmischen Königs, entlud sich ihre Wut. Sie warfen zwei Statthalter des Königs aus dem Fenster. Beide Vertreter Habsburgs überlebten den Prager Fenstersturz, der zunächst ein böhmisches Ereignis war: Die böhmischen Stände erklärten 1619 König Ferdinand für abgesetzt. Sie wählten an seiner Statt den protestantischen Pfälzer Kurfürsten Friedrich V., der zugleich Führer der 1608 gegründeten protestantischen Union war, zum

Concordia Christliche, Widerholete, einmütige Bekenntnis nachbenannter Churfürsten, Fürsten und Stende Augspurgischer Confession, und derselben zu ende des Buchs unterschriebener Theologen Lere und glaubens... Augsburg, Staats- und Stadtbibliothek 2 Th S 60



„Glaubensbekandtnus vnd Ableinung allerhand deshalben entstandener vngüelichen Nachreden“ Kepler, Johannes, 1571-1630. Anonym publiziertes, aber nachweislich Johannes Kepler zugeschriebenes Werk, in dem der Astronom abschließend sein Glaubensverständnis begründet. [Sl. Straßburg]: 1623.- [15] Bl.
Quelle: Österreichische Nationalbibliothek

neuen böhmischen König. Dieses revolutionäre Aufbegehren gegen den böhmischen König konnte Habsburg nicht unbeantwortet lassen. Es hätte einen schweren Prestigeverlust bedeutet. Als es zur militärischen Auseinandersetzung kam, fanden die böhmischen Stände in Schlesien, der Lausitz, Mähren und Ungarn Unterstützung. Den Mitgliedern der Union fehlte aber der Mut, sich für ihren Führer zu engagieren. Lediglich die protestantischen Niederlande unterstützten Friedrich finanziell. Anders agierte die 1609 gegründete katholische Liga, die den Kaiser unterstützte. Im Herbst 1620 vereinigten sich die Truppen des Kaisers und der Liga zum Marsch auf Prag. In der Nähe der Stadt kam es am 8. November 1620 zur Schlacht am Weißen Berg. Die kaiserlich-katholischen Truppen unter General Tilly schlugen die Truppen Friedrichs vernichtend. Das Schlachtgeschehen war konfessionell aufgeladen.¹⁰ Ein spanischer Karmelitermönch, Dominicus a Jesu Maria, soll dem katholischen Kriegsrat ein angeblich von pro-

testantischen Bilderstürmern geschändetes Gemälde präsentiert haben. Zudem soll der Mönch bekannt haben, dass ihm in Visionen der Sieg der katholischen Seite prophezeit worden war. Die bayerischen Truppen führten eine Reiterfahne mit eingesticktem Monogramm Mariens mit sich. Die kaiserliche Reiterfahne zeigte Maria als Königin der Engel. Der Schlachtruf der katholischen Seite lautete: ‚Maria‘. Nach dem Sieg rückten die katholischen Truppen in Prag ein. Die Sieger ließen bei den Kapuzinern in Prag ein Te Deum singen. Das Königreich Böhmen fiel an Kaiser Ferdinand II. zurück. Friedrich, der nur einen Winter lang als böhmischer König regiert hatte, erhielt von den Jesuiten den Spottnamen Winterkönig. Über König Friedrich wurde die Reichsacht verhängt, er verlor damit auch sein Pfälzer Kurfürstentum. Die Kurwürde ging 1623 auf den bayerischen Herzog Maximilian über, der den Kaiser militärisch unterstützt hatte. Der Prager Fenstersturz 1618 hatte eine verhängnisvolle Verflechtungskette ausgelöst, die in den Dreißigjährigen Krieg führte.¹¹ Der Krieg hatte in Böhmen als Religionskrieg begonnen und entwickelte sich in seinem Verlauf zu einem Krieg um die Macht in Europa.

Zwischen den konfessionellen Fronten: Johannes Kepler

Johannes Kepler geriet in diesem konfessionellen Zeitalter zwischen die Fronten. Zwar hatte er 1594 als „M. [Magister] Joannes Kepler Leomontanus“ die Konkordienformel unterzeichnet.¹² Aber dies war kurz vor seinem Weggang nach Graz (Steiermark) gewesen, wo er seine erste Stelle als Landschaftsmathematiker (1594-1600) antrat. Möglicherweise sah er um diese Zeit darin vor allem eine rein formale Angelegenheit. Aber die konfessionellen Streitigkeiten holten Kepler ein und forderten ihn existentiell. In Graz geriet Kepler ab August 1598 in den Strudel der Gegenreformation.¹³ Der Erzherzog untersagte den lutherischen Pfarrern die Ausübung der Religion, die Feier der Sakramente und die Einsegnung von Ehen. Die evangelischen Kirchendiener und Lehrer an der Landschaftsschule mussten Graz binnen vierzehn Tagen verlassen. Bei Androhung der Todesstrafe durften sie die habsburgischen Erblände nicht mehr betreten. Auch Kepler begab sich außer Landes, durfte aber dank einer erzherzoglich-

chen Ausnahmeregelung zurückkehren. Er konnte sich vorstellen, das Land zu verlassen, aber seine Frau hing an den Besitzungen ihrer Familie, die sie bei einem Wegzug wohl hätte aufgeben müssen. In dieser Situation, die Steiermark zu verlassen oder auszuharren, räsionierte Kepler über seinen Glauben: „Ich bin ein Christ, das Augsburgische Bekenntnis habe ich aus der Belehrung meiner Eltern, aus Überlegungen, die oft der Erforschung unterworfen wurden, aus täglichen

Gedanken spielte, in sein württembergisches Vaterland zurückzukehren, zu einem Wechsel nach Prag. Als sich im Sommer 1600 die Lage in Graz zuspitzte und tausend Bürger sowie ständische Beamte binnen 45 Tagen Stadt und Land verlassen mussten, war ihm die Entscheidung abgenommen. Hab und Gut konnten nicht verkauft werden und mussten so – wie Keplers Ehefrau befürchtet hatte – ohne Erlös aufgegeben werden. Kepler schrieb an Michael Mästlin: „Ich hätte nie

Gläubige empfangen das Abendmahl in Gestalt von Brot/Leib Christi (rechts) und Wein/Blut Christi (links). Ausschnitt aus einem Ölgemälde, Ende 16. Jh., Evangelisch-Lutherische Sankt-Johannis-Kirchengemeinde Schweinfurt.
Quelle: bavarikon



Übungen der Erprobung aufgenommen.¹⁴ Ich heiße sie gut. Vortäuschen habe ich nicht gelernt, religiöse Dinge nehme ich ernst, nicht spielerisch. Deshalb ist mir auch Ernst mit ihrer Ausübung, der Gebrauch der Sakramente ist mir eine Not.“

Im Dezember 1599 erhielt Kepler eine Einladung von Tycho Brahe nach Prag. Nach ersten Zusammentreffen mit dem bedeutenden Astronomen entschied sich Kepler, der überdies immer wieder mit dem

geglaubt, daß es so süß ist, für die Religion, für Christi Ehre mit etlichen Brüdern gemeinsam Schaden und Beschimpfungen zu dulden, Häuser, Äcker, Freunde und Heimat zu verlassen.“¹⁵

Seine Zusammenarbeit mit Brahe währte nur kurz, da dieser rasch verstarb. Nach dessen Tod 1601 wurde Kepler das Amt des kaiserlichen Hofmathematikers übertragen. Im April/Mai 1609 nahm Kepler erstmals von Prag aus Kontakt mit Herzog Johann Friedrich

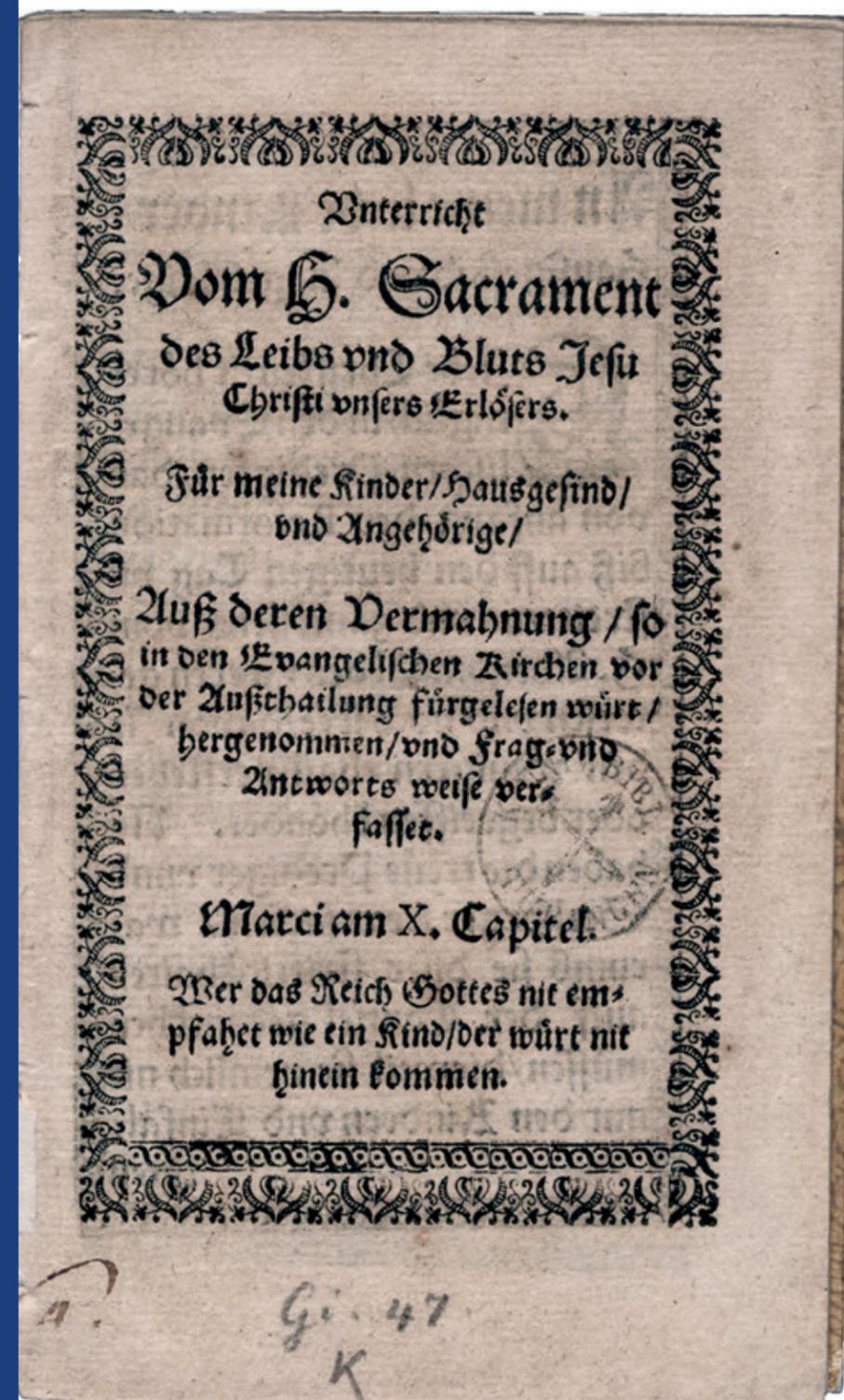
von Württemberg auf und bat darum, angesichts der sich konfessionell zuspitzenden Lage in Prag („einem so haissen Pflaster“), die Stadt gegebenenfalls verlassen zu dürfen, um sich in den Dienst eines anderen Landesherrn zu begeben.¹⁶ Keplers Bitte um berufliche Veränderung wurde vom Landesherrn stattgegeben, verbunden mit der Erinnerung, in den Dienst des Herzogs zu treten, wenn es dieser begehre. Überdies wies der Herzog die Kanzlei an, Kepler einen Becher und 12-15 Gulden zu verehren; die Kanzlei ließ Kepler großzügig 15 Gulden zukommen. Kepler bedankte sich für das Präsent und problematisierte, wiewohl er zugleich einen württembergischen Fürstendienst anstrebte, ausführlich die Konkordienformel. Die Glaubensfrage trieb Kepler weiter um. 1611 wandte sich Kepler erneut an Herzog Johann Friedrich von Württemberg und bat um eine Anstellung an der Tübinger Universität.¹⁷ Seine Bitte wurde abschlägig beschieden.

1612 gelang Kepler aber ein Wechsel nach Linz. Auch dort geriet Kepler wiederum in massive konfessionelle Auseinandersetzungen. Auf der einen Seite verfolgten die Jesuiten eine aggressive Rekatholisierung, auf der anderen Seite fasste der Calvinismus in den lutherischen Gemeinden Österreichs immer fester Fuß. Pfarrer Daniel Hitzler, der auf Betreiben des württembergischen Landesherrn seit 1611 als Pfarrer und Leiter der protestantischen Landschaftsschule im oberösterreichischen Linz seinen Dienst tat, sah sich vor große Herausforderungen gestellt.¹⁸ Offensichtlich neigte auch Kepler hier immer stärker der calvinistischen Lehre zu, weshalb ihm der lutherische Pfarrer Hitzler die Teilnahme am Abendmahl verweigerte. Kepler wandte sich hilfeschend an das Stuttgarter Konsistorium und bat um dessen Zustimmung, bei Pfarrer Hitzler am Abendmahl teilnehmen zu dürfen. Das Stuttgarter Konsistorium verweigerte unter Hinweis auf Keplers Haltung gegenüber der Konkordienformel die Teilnahme am Abendmahl. Hitzler selbst war in Linz schließlich auf verlorenem Posten und musste vor der katholischen Gegenreformation kapitulieren. Kepler hingegen, der 1612 nach Linz gekommen war, blieb mangels württembergischer Alternative, bis zu seiner Abreise aus Linz am 20. November 1626 in Oberösterreich. Letztendlich obsiegte auch in Linz die Gegenre-

formation. 1625 wurden alle Protestanten aus der Stadt ausgewiesen. Kepler konnte zunächst bleiben. Der Kaiser machte ihm ein günstiges Angebot, unter einer Bedingung: der Konversion zum Katholizismus. Eine Anstellung beim kaiserlichen Oberbefehlshaber Wallenstein sicherte kurzfristig den Lebensunterhalt und Kepler zog ins schlesische Sagans. Als Wallenstein den kaiserlichen Dienst quittieren musste, reiste Kepler über Leipzig und Nürnberg nach Regensburg. Er wollte auf dem dortigen Kurfürstentag eine Audienz beim Kaiser erwirken. Wohl geschwächt durch die Strapazen der Reise erkrankte Kepler. Er verstarb am 15. November 1630 in Regensburg als frommer Mann.

Kepler – ein frommer Mann

Kepler muss ein frommer Mann gewesen sein, denn der Wunsch, am Abendmahl teilzunehmen, trieb ihn zeitlebens um. Ende November 1618 wandte er sich an Prof. Dr. Matthias Hafenreffer, seinen ehemaligen Tübinger Universitätslehrer, und schilderte ihm, dass er aus Gewissensgründen die Unterschrift unter die Konkordienformel nicht leisten könne.¹⁹ Daraus entstand eine längere Korrespondenz zwischen Kepler, Hafenreffer, Konsistorium und theologischer Fakultät. Beide Seiten legen ihre Argumente dar und beharrten auf ihren Standpunkten. Wie von Kepler gewünscht, schrieb Hafenreffer auch an die Tübinger theologische Fakultät und an das Stuttgarter Konsistorium. Letztendlich verlor das Konsistorium die Geduld und teilte Lukas Osiander d. J. von der theologischen Fakultät mit, die Argumente seien ausreichend ausgetauscht, man werde sich nicht mehr länger mit diesem „Schwindelhirnlin“ beschäftigen, man könne doch wegen dieses „letzköpflin[s]“ nicht die gültige Lehre ändern.²⁰ Hafenreffer sah sich außer Stande, sich, wie von Kepler gewünscht, für den Gelehrten verwenden. Keplers Auffassung verstieß fundamental gegen die herrschende Lehre. Als überzeugter Lutheraner, württembergischer Theologieprofessor und Kanzler der Universität stand Hafenreffer fest zu dieser Lehre und hielt deshalb im Schreiben vom 31. Juli 1619 fest, Kepler müsse von seinen „absurden und blasphemischen Vorstellungen“ ablassen.²¹ Kepler war sich schon lange im Klaren darüber, wie er Michael Mästlin, dem Mathematikprofessor



an der Tübinger Artistenfakultät, 1616 von Linz aus geschrieben hatte, dass er nur selbst allem Streit ein Ende machen könnte.²² Er fasste in diesem Brief seine zentralen Anliegen zusammen. Er bekannte sich als Anhänger des Augsbургischen Bekenntnisses. Er war sich sicher, die „Galle“ der Theologen zu erregen, weil er „den Frieden unter den Reformierten [allen Anhängern der Reformation] wünsche.“ Er lehnte die Einstellungen und Übertreibungen der calvinistischen Dogmen ab, aber er konnte auch nicht erkennen, „daß im Grundwesen der Person Christi soviel Trennendes sein soll.“ Und mehr noch: „Die Vergehen, die man den Jesuiten und Calvinisten vorhält, erscheinen mir nicht erwiesen, was ich nicht bloß beiläufig sage, denn ich habe laute Bücher von Anfang bis zum Ende geprüft.“ Wer ihn, Kepler, vom Abendmahl ausschließe, werde „doch wenigstens Gott seine Gründe dartun [...]. Ich könnte die ganze Streitfrage beheben, wenn ich die Konkordienformel ohne Vorbehalt unterschreiben wollte, doch mir ist in Sachen des Gewissens vor-täuschen nicht redlich.“

Warum weder die Kirchenleitung noch Kepler selbst auf die bereits Jahre zuvor geleistete Unterschrift verwiesen, muss letztlich offen bleiben. Eine Erklärung könnte sein, dass für Kepler eine erneute Unterschrift nicht in Frage kam, weil er sich, bedingt durch die

Unterricht vom H. Sacrament des Leibs und Bluts Jesu Christi unsers Erlösers Kepler, Johannes. Prag 1617, UB Tübingen

konfessionellen Auseinandersetzungen, mit denen er in Prag und Linz konfrontiert worden war, sich selbst mehr mit den unterschiedlichen Glaubensinhalten befasst hatte und nun, aus tiefer persönlicher Überzeugung, einige zentrale lutherische Glaubensüberzeugungen nicht teilen konnte. Er nahm Anstoß an der Auffassung, dass Christus seiner menschlichen Natur nach – als einer Raum und Zeit unterworfenen Schöpfung – an einen bestimmten Ort gebunden sei. Die menschliche Natur Christi konnte, so Keplers Verständnis, nach Auferstehung und Himmelfahrt nicht auf Erden präsent sein.²³ Genau das aber machte den zentralen Kern der lutherischen Abendmahlslehre (Realpräsenz und Ubiquität) und der Lehre von der Person Christi (untrennbare Gemeinschaft von göttlicher und menschlicher Natur Christi) aus. Nach der Lehre der Ubiquität war Christus seiner göttlichen und menschlichen Natur nach im Abendmahl präsent. Dass Kepler dies aus persönlicher Überzeugung nicht glauben konnte, brachte ihn in den Augen der lutherischen Theologen Württembergs in die Nähe zu den Calvinisten. Sie lehnten die Gleichsetzung von Brot und Wein mit Leib und Blut Christi ab, weil der Leib Christi nach dessen Auferstehung nicht mehr auf Erden gegenwärtig sein könne. Beide protestantischen Konfessionen teilten hingegen die Auffassung, allen Gläubigen bei der Feier des Abendmals Brot und Kelch (*Communio sub utraque specis*) zu reichen. Dies unterschied sie von den Katholiken, die den Kelch dem Priester vorbehielten. Angesichts aller diffizilen Lehrstreitigkeiten war dies für viele Laien wohl der sichtbarste Unterschied zwischen Katholiken und Protestanten. Eine intensivere persönliche Auseinandersetzung mit den Glaubensinhalten mag auch der Grund dafür sein, dass Kepler nicht einfach auf seine längst geleistete Unterschrift verwies. Letztlich blieb Kepler durch seine Weigerung, die Konkordienformel (erneut) zu unterzeichnen, eine Professur an der Tübinger Universität sowie jede andere Aufgabe in der Landesverwaltung verwehrt. Die Universität und mit ihr das Herzogtum Württemberg präsentierten sich als Hort lutherischer Rechtgläubigkeit. Aus deren Überzeugung war Toleranz nicht angezeigt, da es um die konfessionelle wie politische Identität des Herzogtums ging. Die lutherische Kon-

fessionalisierung stärkte nach innen wie nach außen die territoriale Identität und trug so dazu bei, der Landesherrschaft eine einheitliche und disziplinierte Untertanenschaft zu schaffen. Kepler, auf dem Regensburger Totenbett befragt, wodurch er hoffe, selig zu werden, soll laut des Berichts von Stephan Lansius an die Universität Tübingen geantwortet haben: „Einzig durch das Verdienst unseres Erlösers Jesus Christus“.²⁴ Seine Antwort klingt wie ein Statement. Kepler wurde auf dem 1543 vor den Mauern der Stadt angelegten und 1564 erweiterten Petersfriedhof bestattet. Für die Leichenpredigt wurde der Vers: „Selig sind, die Gottes Wort hören und bewahren“ (Lukas 11, 28) gewählt. Die Reichsstadt Regensburg hatte 1577 die Konkordienformel unterschrieben. ♦



PROF. DR. SABINE HOLTZ promovierte auf dem Gebiet der württembergischen Kirchengeschichte. Sie leitet seit 2012 die Abteilung Landesgeschichte und ist geschäftsführende Direktorin des Historischen Instituts an der Universität Stuttgart. Landesgeschichte und ihre Verflechtungen stehen im Mittelpunkt der Forschungsinteressen.

1 Vgl. Kaufmann, Thomas: Geschichte der Reformation. 2. Aufl. Frankfurt/M. 2010.

2 Vgl. Burkhardt, Johannes: Das Reformationsjahrhundert. Deutsche Geschichte zwischen Medienrevolution und Institutionenbildung 1517-1617. Stuttgart 2002.

3 Vgl. Brecht, Martin / Ehmer, Hermann: Südwestdeutsche Reformationsgeschichte. Zur Einführung des Reformation im Herzogtum Württemberg 1534. Stuttgart 1984, S. 195-343.

4 Holtz, Sabine: Luthers Lehren. Zur frühen Rezeptionsgeschichte im deutschen Südwesten des Alten Reichs 1530-1540. In: Litz, Gudrun / Schenk, Susanne / Leppin, Volker (Hg.): Vieltimmige Reformation in den Jahren 1531-1548. Stuttgart 2018 (Forschungen zur Geschichte der Stadt Ulm, Dokumentation), S. 35-51.

5 Vgl. Brecht, Martin / Ehmer, Hermann: Südwestdeutsche Reformationsgeschichte. Zur Einführung des Reformation im Herzogtum Württemberg 1534. Stuttgart 1984, S. 437-442.

6 Vgl. Dingel, Irene (Hg.): Die Bekenntnisschriften der Evangelisch-Lutherischen Kirche. Vollständige Neuedition. Bd. 2: Konkordienbuch. Göttingen 2014.

7 Vgl. Schmidt, Heinrich Richard: Konfessionalisierung im 16. Jahrhundert. München 1992 (Enzyklopädie deutscher Geschichte, 12), S. 13.

8 Vgl. Holtz, Sabine: Theologie und Alltag. Leben und Lehre in den Predigten der Tübinger Theologen 1550-1750. Tübingen 1993 (Spätmittelalter und Reformation, Neue Reihe 3), S. 25-29.

9 Vgl. Schreiner, Klaus: Rechtgläubigkeit als ‚Band der Gesellschaft‘ und ‚Grundlage des Staates‘. Zur eidlichen Verpflichtung von Staats- und Kirchendienern auf die ‚Formula Concordiae‘ und das ‚Konkordienbuch‘. In: Brecht, Martin / Schwarz, Reinhard (Hg.): Bekenntnis und Einheit der Kirche. Studien zum Konkordienbuch. Stuttgart 1980, S. 351-379.

10 Vgl. Chaline, Olivier: Religion und Kriegserfahrung. Die Schlacht am Weißen Berge 1620. In: Brendle, Franz / Schindling, Anton (Hg.): Religionskriege im Alten Reich, Münster 2006, S. 511-518.

11 Vgl. Arndt, Johannes: Der Dreißigjährige Krieg 1618-1648. 4. Aufl. Stuttgart 2018.

12 Schäfer, Volker: Keplers Unterschrift unter die Konkordienformel. Eine Miscelle. In: Blätter für württembergische Kirchengeschichte 108/109, (2008/2009), S. 437f.

13 Vgl. Schmidt, Justus: Johann Kepler. Sein Leben in Bildern und eigenen Berichten. 2. Aufl. Linz 1970, S. 228; vgl. Brief 106.

14 Schmidt, Justus: Johann Kepler. Sein Leben in Bildern und eigenen Berichten. 2. Aufl. Linz 1970, S. 228; vgl. Brief 107.

15 Schmidt, Justus: Johann Kepler. Sein Leben in Bildern und eigenen Berichten. 2. Aufl. Linz 1970, S. 235; vgl. Brief 175.

16 Dyck, Walther / Caspar, Max (Hg.): Johannes Kepler. Gesammelte Werke. Bd. 16. München 1950, Brief Nr. 527.

17 Vgl. Dyck, Walther / Caspar, Max (Hg.): Johannes Kepler. Gesammelte Werke. Bd. 16. München 1950, Brief Nr. 609.

18 Vgl. Wessely, Othmar: Art. Hitzler, Daniel. In: Neue Deutsche Biographie 9, 1972, S. 276f.

19 Vgl. Dyck, Walther / Caspar, Max (Hg.): Johannes Kepler. Gesammelte Werke. Bd. 17. München 1950, Brief 808.

20 Dyck, Walther / Caspar, Max (Hg.): Johannes Kepler. Gesammelte Werke. Bd. 17. München 1950, Brief 843.

21 Dyck, Walther / Caspar, Max (Hg.): Johannes Kepler. Gesammelte Werke. Bd. 17. München 1950, Brief 847.

22 Zum Folgenden Schmidt, Justus: Johann Kepler. Sein Leben in Bildern und eigenen Berichten. 2. Aufl. Linz 1970, S. 250; vgl. Dyck, Walther / Caspar, Max (Hg.): Johannes Kepler. Gesammelte Werke. Bd. 17. München 1950, Brief 750.

23 Vgl. Hübner, Jürgen: Die Theologie Johannes Keplers zwischen Orthodoxie und Naturwissenschaft, Tübingen 1975 (Beiträge zur historischen Theologie, 50), S. 111f.

24 Zum Folgenden vgl. Schmetzer, Adolf: I. Geschichtliches. In: Stöckl, Karl (Hg.): Kepler-Festschrift. Teil 1. Regensburg 1930 (Bericht des Naturwissenschaftlichen [früher zoologisch-mineralogischen] Vereins zu Regensburg, 19), S. 71-92 (Zitate S. 83f).

Zur Einheit von Naturwissenschaft und Philosophie in Keplers Werk

VOLKER BIALAS

Wenn man Keplers wissenschaftliches Opus betrachtet, war die philosophische Tradition der Renaissance in seinen Forschungen noch lebendig. Seine Ideen wurden von neuplatonischen und aristotelischen Philosophen und Mathematikern beeinflusst. In einer engen Synopse der Verbindung zwischen Keplers Wissenschaft und seiner Philosophie liegt der Schwerpunkt auf der Methodik seiner Forschung sowie auf den Prinzipien seiner Naturphilosophie. Im Mittelpunkt steht die ‚forma mundi‘ mit seiner abschließenden Konstruktion der ‚Harmonice Mundi‘, in der Kepler Mathematik, Musiktheorie und Astronomie zu einem kompakten Gedankengeflecht verband.

Einführung

Es ist heutzutage bei Naturwissenschaftlern weitgehend in Vergessenheit geraten, dass bei der Genese der neuzeitlichen Wissenschaft die Philosophie eine maßgebende Rolle gespielt hat. Bereits im frühen 17. Jahrhundert musste sich die scholastische Naturphilosophie der Renaissance in einem Prozess des Übergangs den Herausforderungen der bald dominierenden philosophischen Richtungen von Empirismus und Rationalismus stellen, in dessen weiteren Verlauf die Mechanik zu einer der führenden Naturwissenschaften aufstieg. Jedoch mussten zuvor die Grundsätze der scholastisch-aristotelischen Naturphilosophie kritisch geprüft werden. Dafür bot sich nach der kosmologischen Neuorientierung durch das Werk von Nikolaus Copernicus (1473-1543) vor allem die Astronomie an, die in Johannes Kepler ihren herausragenden Vertreter besaß.

Um 1600 war die Astronomie noch immer eine der an der Universität gelehrteten ‚artes liberales‘, eine der sieben freien Künste, mit dem mathematischen Vierfächer-Kanon („Quadrivium“) von Arithmetik, Geometrie, Musikwissenschaft und Astronomie sowie der Dreiheit („Trivium“) sprachwissenschaftlich-philosophischer Fächer von Grammatik, Rhetorik und Dialektik. Jeder Student an einer Universität musste in der Artistenfakultät diese ‚artes liberales‘ studieren, ehe er mit dem Studium eines der drei Hauptfächer Theologie, Medizin und Jurisprudenz beginnen konnte.

Im frühen 17. Jahrhundert nahm also die Astronomie offiziell noch keine Sonderstellung ein, obwohl jeder Hochschulabsolvent, wie auch Kepler an der Universität Tübingen, neben den philosophischen Kenntnissen aus Antike und Mittelalter ein astronomisches Grundwissen erhielt.

Forschungsansätze in Keplers Werk

Zweifellos besitzt Keplers Werk einen Kern unvergänglichen Wissens, das lange Zeit hindurch zum Allgemeingut unserer Bildung gehört hat. Zur Bekräftigung dieser Aussage werden zuallererst die Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung genannt, mit deren Entdeckung die kopernikanische Astronomie prinzipiell vollendet ist. Seine genauen Berechnungen und Ableitungen haben Kepler zu einer dynamischen Betrachtungsweise aus dem Geist eines pythagoreischen Harmoniebedürfnisses geführt, der in der weiteren Entwicklung der Naturwissenschaften dann nur noch wenig Beachtung gefunden hat.

Mit dieser Eingangsbemerkung zur Größe des Werkes von Kepler seien für ein näheres Verständnis seiner wissenschaftlichen Leistungen drei wichtige methodologische, also prinzipiell auf die Methodik bezogene Forschungsansätze hervorgehoben:

1. Keplers astronomische Berechnungen basierten hauptsächlich auf sorgfältigen, für seine Zeit äußerst genauen Fixstern- und Planetenbeobachtungen, die noch ohne Fernrohr mittels fein gearbeiteter Visiergeräte ausgeführt wurden, so vor allem von

Tycho Brahe (1546-1601) auf der Insel Hven in Dänemark und dann am Prager Hof bei Kaiser Rudolph II. Die Auswertung der Beobachtungen, die für die astronomischen Forschungen einer gewissenhaften Vorgehensweise bedurfte, erfolgte durch Kepler nach neuen Überlegungen über den Begriff einer ‚wissenschaftlichen Hypothese‘ und in seinen Berechnungen mittels fehlertheoretischer Ansätze.

2. Indem Kepler in aristotelischer Weise der Frage nach der ‚causa efficiens‘ – der bewirkenden Ursache – der Himmelsbewegungen nachging, reichten seine Überlegungen weit über eine bloße Reproduktion der zu seiner Lebenszeit noch immer heftig umstrittenen kopernikanischen Kosmologie hinaus. Dieser in ein neues astronomisches Arbeitsfeld weisende Forschungsansatz führte ihn zu umfangreichen physikalischen Erörterungen der planetarischen Bewegungen und so zu seiner ‚Physik des Himmels‘, die als eine Vorstufe der späteren Himmelsmechanik zu begreifen ist. Die astronomisch-physikalische Ausarbeitung für eine „ursächlich begründete“ Astronomie ist in seinem überragenden astronomischen Werk, der ‚Astronomia Nova‘ von 1609, erfolgt.

3. Ebenso stellte Kepler im Geist der platonischen Philosophie die in späterer Zeit nahezu vergessene Frage nach Sinn und Zweck der wahrnehmbaren Naturvorgänge. Mit diesem teleologischen Forschungsansatz der ‚causa finalis‘, die in aristotelischer wie auch in neuplatonischer Tradition zu seiner Zeit noch von Bedeutung war, erkannte Kepler harmonische Strukturen in der Natur, insbesondere im Rahmen seiner kosmologischen Fragestellungen. Daraus ist das Werk seines Lebens, die ‚Harmonice Mundi‘ von 1619, erwachsen.

Noch ein Wort zu Keplers Ansatz einer wissenschaftlichen Hypothese (Punkt 1), weil gerade dieser Begriff in Keplers naturwissenschaftlichen Arbeiten, insbesondere in der Ausarbeitung seiner ‚Astronomia Nova‘, besonders fruchtbar geworden ist. Kepler hatte bereits in seiner frühen Prager Zeit mit seiner ‚Apologia Tychonis contra Ursum‘ einen Traktat über den Hypothesenbegriff geschrieben (KGW XX,1), der zu seiner Zeit unveröffentlicht blieb. Darin argumentiert er in der Unterscheidung von mathematischer und

physikalischer Betrachtungsweise, dass der Begriff einer Hypothese weder etwas Erdichtetes noch eine nur formale Rechengrundlage für die Auswertung astronomischer Beobachtungen sein kann. Vielmehr muss sich eine wissenschaftliche Hypothese auf die physikalische Realität selbst beziehen, also möglichst nahe an die Natur der Dinge anschließen. Damit soll der Erkenntnisprozess den Astronomen an das Heranführen, was entsprechend der Weltverfassung wirklich ist, und ihn zudem bei den Beobachtungen vor Täuschungen der Sinne bewahren.

Schließlich sei noch das religiöse Fundament von Keplers naturwissenschaftlichen Forschungen hervorgehoben. Der göttliche Schöpfungsplan, von dem Kepler als gläubiger Christ überzeugt war, kann dem Menschen im religiösen Glauben und ebenso durch die mathematisch-naturwissenschaftliche Erkenntnis zugänglich werden. Für Kepler ist die Natur neben der Heiligen Schrift das zweite Buch göttlichen Ursprungs, das als ‚Buch der Natur‘ aufzuschlagen und in dem zu lesen ist. So ist in der gläubigen Sicht Keplers durch die wissenschaftliche Forschung die Erkenntnis der Natur möglich, wie sie im Geiste Gottes gedacht ist. Vom christlichen Glauben erfüllt und offen für den Ausgleich zwischen den zu seiner Zeit zerstrittenen Konfessionen, verstand sich Kepler selbst als ‚Priester am Buch der Natur‘, worüber sein großes Opus beredete Auskunft gegeben hat.

Keplers naturwissenschaftliches Opus

In seinem 1621 abgeschlossenen Werk ‚Epitome Astronomiae Copernicanae‘ gibt Kepler im ersten Teil („De Doctrina Sphaerica“) einen auf die Astronomie hin orientierten Überblick mathematisch-naturwissenschaftlicher Bereiche. Dieser Entwurf von 1618, charakteristisch für Keplers eigenes Opus, stellt die zentrale Stellung der Astronomie in der engen Beziehung zur Mathematik, Physik (Mechanik) und Optik sowie in der Anwendung auf andere wissenschaftliche Fachgebiete heraus (vgl. Übersichtsskizze).

Für Kepler hängt die Astronomie eng mit der Physik zusammen, weil diese die Ursachen der natürlichen Dinge, insbesondere der Bewegungen der Himmelskörper, zu klären hilft (KGW VII, S. 23f.). Als ober-

System mathematisch-naturwissenschaftliche Gebiete mit der Astronomie im Zentrum
Abbildung:
Celina Brandes



stes Ziel hat sich die Astronomie gesetzt, die harmonische Gestalt des Weltgebäudes und seiner Teile zu erforschen. Sie ist die Seele von Geographie und Nautik, der Chronologie und ebenso der Meteorologie, weil die Gestirne die sublunare Natur, also die Vorgänge unterhalb des Mondes, bewegen und anregen. Für die Chronologie, eigentlich kein naturwissenschaftliches Gebiet, ist die Astronomie für die Bestimmung des Geburtsjahres Christi behilflich (KGW V). Des Weiteren umfasst die Astronomie einen Teil der Optik, weil sie als optische Astronomie das Licht der Gestirne untersucht sowie die menschlichen Sinnestäuschungen bei astronomischen Beobachtungen an den Bewegungen und Formen der Himmelskörper aufdeckt und somit zu der Bereitstellung begründeter Hypothesen beiträgt.

Außer mit der Physik und Optik ist die Astronomie eng mit der Mathematik verbunden, indem sie die Geometrie und die Arithmetik wie zwei Flügel benutzt. Dadurch kann sie Gestalt und Größe der Himmelskörper bestimmen und über die Himmelsbewegungen die Zeit ableiten. Auf diese Weise gelangt die Astronomie mit Hilfe der Mathematik zu ihren Beweisführungen und den praktischen Nutzenwendungen in den astronomischen Kalendern, den Ephemeriden, sowie in den umfangreichen Verzeichnissen

der Fixsterne und der Planetenbewegung.

Zu diesen Ausführungen ist noch Folgendes zu bemerken: Eine genaue Gliederung nach Fachgebieten ist in Keplers Opus nicht möglich, weil sich seine vielfältigen Überlegungen durchdringen und überlagern. Davon zeugt besonders Keplers umfangreiche, teils noch erhaltene Korrespondenz mit etwa 1200 Briefen, die in den 'Gesammelten Werken von Johannes Kepler' sechs großformatige Bände füllen (KGW XIII – KGW XVIII). Von den astronomischen Werken seien hier besonders hervorgehoben:

– ‚Mysterium Cosmographicum‘ (Graz 1596), das in pythagoreisch-platonischer Tradition geschriebene Jugendwerk mit dem ersten kosmographischen Weltentwurf;

– ‚Astronomia Nova‘ (Prag 1609), das astronomische Hauptwerk mit einer durchgehenden Physikalisation der Astronomie und dem ersten und zweiten Gesetz der Planetenbewegung;

– ‚Harmonices Mundi libri V‘ (Linz 1619), das große harmonikale Werk, das einen tiefen Einblick in Keplers philosophisch fundierte Weltsicht vermittelt und in astronomischer Hinsicht das hier als harmonikal gedeutete ‚dritte Keplersche Gesetz‘ enthält (vgl. nächsten Abschnitt);

– ‚Epitome Copernicanae Astronomiae‘ (Linz u. Frankfurt/M 1618-1621) mit der detaillierten physikalisch-astronomischen Darstellung von Keplers astronomischen Weltbild, weitaus mehr als einen ‚Grundriss der kopernikanischen Astronomie‘ enthaltend;

– ‚Tabulae Rudolphinae‘ (Ulm 1627), das große astronomische Tabellenwerk, das die praktische Umsetzung und Anwendungen von Keplers theoretischer Astronomie sowie einen Fixsternkatalog, eine Weltkarte und ein geographisches Ortsverzeichnis enthält.

Etlliche publizierte astronomische Abhandlungen wie auch unveröffentlichte Schriften und Entwürfe aus dem handschriftlichen Nachlass Keplers (in vier Bänden der KGW) bleiben hier unerwähnt, ebenso die astrologischen Schriften und Horoskope. Die optischen und mathematischen Forschungen und Probleme sind in größtenteils in speziellen Werken behandelt:

Werke zur Optik:

– ‚Astronomiae Pars Optica‘ (Frankfurt/M 1604), ein Werk über theoretische Probleme der Optik wie Natur des Lichtes, Lichtbrechung und den Sehvorgang im menschlichen Auge sowie über astronomisch-optische Fragen der Licht- und Schattenverhältnisse der Himmelskörper und über die Theorie der Finsternisse (KGW II).

– ‚Dioptrice‘ (Augsburg 1611), eine relativ kleine, gleichwohl bedeutsame Schrift der Dioptrik, u. a. über Lichtbrechung an verschiedenen Medien und über die Theorie des Linsenfernrohres nach den ersten astronomischen Fernrohrbeobachtungen von Galilei (KGW IV, S.329-414).

Mathematische Schriften:

– ‚Stereometrische Abhandlungen‘ (Linz 1615 u. 1616) über die regulären gewölbten Körper, Inhaltsberechnungen von Weinfässern, teils unter Hinzuziehung von Lehrsätzen des griechischen Mathematikers und Physikers Archimedes (285–212 v. Chr.).

– ‚Logarithmische Schriften‘ (Marburg 1624 u. 1625) über die Berechnung der neuen und die Entwicklung eigener Logarithmen. (Die stereometrischen und logarithmischen Werke sind neu herausgegeben in KGW IX.)

– ‚Manuscripta Mathematica‘ (aus dem Nachlass, zumeist undatiert), enthalten in der Rezeption antiker Mathematiker und Philosophen teils fragmentarische Entwürfe u. a. zur Zahlentheorie, Arithmetik und Geometrie (KGW XXI,1 S. 441–590).

Auch andere Wissenschaftler der Kepler-Zeit, wie etwa der englische Staatsmann und Empiriker Francis Bacon (1561-1626), haben sich mit der Anordnung und gegenseitigen Abhängigkeit der Wissenschaften beschäftigt. Bacon subsumierte die Astronomie bereits unter die Physik, ohne die Keplerschen Werke zu kennen, und hielt die physikalischen Ursachen der Bewegungen der Himmelskörper noch für unerforscht.

Zur Stellung der Astronomie im wissenschaftlichen Leben um 1600 sei schließlich noch angemerkt, dass sich der astronomische Wissensstand aufgrund der steigenden Bedürfnisse in Seefahrt und Handel

und beflügelt durch die Fortschritte in optischen Fragen und in der instrumentellen Feinmechanik erheblich erweiterte. Auf der Basis von hervorragenden astronomischen Beobachtungen u. a. von Tycho Brahe (1546-1601) und Galileo Galilei (1564-1642) stieg Kepler zum bedeutendsten astronomischen Theoretiker auf. Die Astronomie wurde die führende Wissenschaft und erreichte besonders durch astronomische Kalender und astrologische Voraussagen eine gewisse Popularität, ohne dass ihr Primat schon allgemein wahrgenommen oder gebilligt worden wäre.

Besonderheiten der Keplerschen Naturphilosophie

In Keplers naturwissenschaftlichen und harmonikalen Forschungen sind naturphilosophische Betrachtungen bestimmend gewesen. Sie betreffen die immer wieder neuen Fragen: Wie ist die Welt beschaffen? Was liegt hinter ihren wahrzunehmenden Phänomenen? In wissenschaftlichen Erkenntnissen sah Kepler seinen religiösen Glauben bestätigt: Der Grund der Welt liegt im Schöpfungsplan Gottes. Es ist der in der Naturforschung erfahrbare göttliche Geist, der die Welt im Innersten zusammenhält.

Im Zentrum von Keplers wissenschaftlichem Lebenswerk steht die Untersuchung der ‚forma mundi‘, die Erkundung der Prinzipien in den Bewegungen und Strukturen der Welt. Dieses komplexe Problem wurde in vielen Einzelheiten von ihm in feinsinniger Weise mathematisch analysiert wie auch in metaphysischen Überlegungen betrachtet, wodurch ein ausgleichendes Spannungsverhältnis von ratio und imaginatio für sein Werk charakteristisch ist.

Von den Grundzügen seiner Naturphilosophie seien drei Elemente hervorgehoben:

- Annahme eines aktiven seelischen Prinzips in der Natur;
- Anwendung mathematisch-mechanischer Modelle auf die Kosmologie;
- Keplers umfassende Idee von der Harmonie der Welt.

Zum seelischen Prinzip

Bereits während seines Studiums an der Universität Tübingen erhielt Kepler erste Impulse für seine späteren Untersuchungen über den Bewegungsmechanis-

mus des Planetensystems, so u. a. durch Lektüre der ‚Übungen der philosophischen Wissenschaften‘ des italienischen Aristotelikers Julius Caesar Scaliger (1484–1558) mit dessen Lehre von bewegenden Geisteskräften. Ebenso zeigte sich Kepler in der Ausarbeitung seiner ‚Astronomia Nova‘ von dem belgischen Naturphilosophen Cornelius Gemma (1535–1577) beeinflusst, der im Universum einen überall tätigen Geist wirken sah und jeden Organismus für beseelt hielt.

Unter dem Einfluss derartiger Ideen konzipierte Kepler seine Auffassung von einem umfassenden seelischen Prinzip, das den inneren Zusammenhang der Natur durch eine alles durchströmende und belebende Geisteskraft erklärte: Diese Allbeseeltheit ist in allen Teilen des Universums vom naturhaft Kleinsten bis zum kosmisch Größten wirksam. So besitzt auch der Gesamtorganismus der Erde ein seelisches Vermögen, woraus diese ihre innere Gestaltungskraft schöpft.

Das seelische Prinzip war für Kepler ebenso eine wesentliche Grundlage seiner Erkenntnislehre, in der er dem Begriff des ‚Archetypus‘ eine zentrale Stelle zuwies: Da der Kosmos geometrisch strukturiert ist, haben dem Schöpfer geometrische Urbilder zur Ausgestaltung der Welt gedient. Derartige Urbilder oder ‚Archetypen‘ sind in die menschliche Seele eingeflossen und dort präsent. Erst dadurch ist dem Menschen die Erkenntnis regulärer geometrischer Gestaltungen der Natur möglich und darüber hinaus die große Ordnung der Harmonie der Welt erkennbar.

Für Kepler ist die menschliche Seele eng mit der Natur des Lichtes verbunden. So sind grundsätzliche Darlegungen über Wesen und Ursprung des Lichtes in der ‚Optik‘ von 1604 in seiner Seelenlehre verankert. Für Kepler ist die Seele nicht körperhaft und unsichtbar; insofern muss sie ein dem Licht verwandtes Wesen haben. Wenn sie einem Geschöpf Leben einhaucht, geschieht dies in Verbindung mit Licht und Wärme. In diesem Zusammenhang ist Licht ein ‚Spross der Seele‘ (KGW II, S. 36). Das Licht ist also nicht ein isoliertes physikalisches Phänomen, sondern organischer Bestandteil des Schöpfungsganzen.

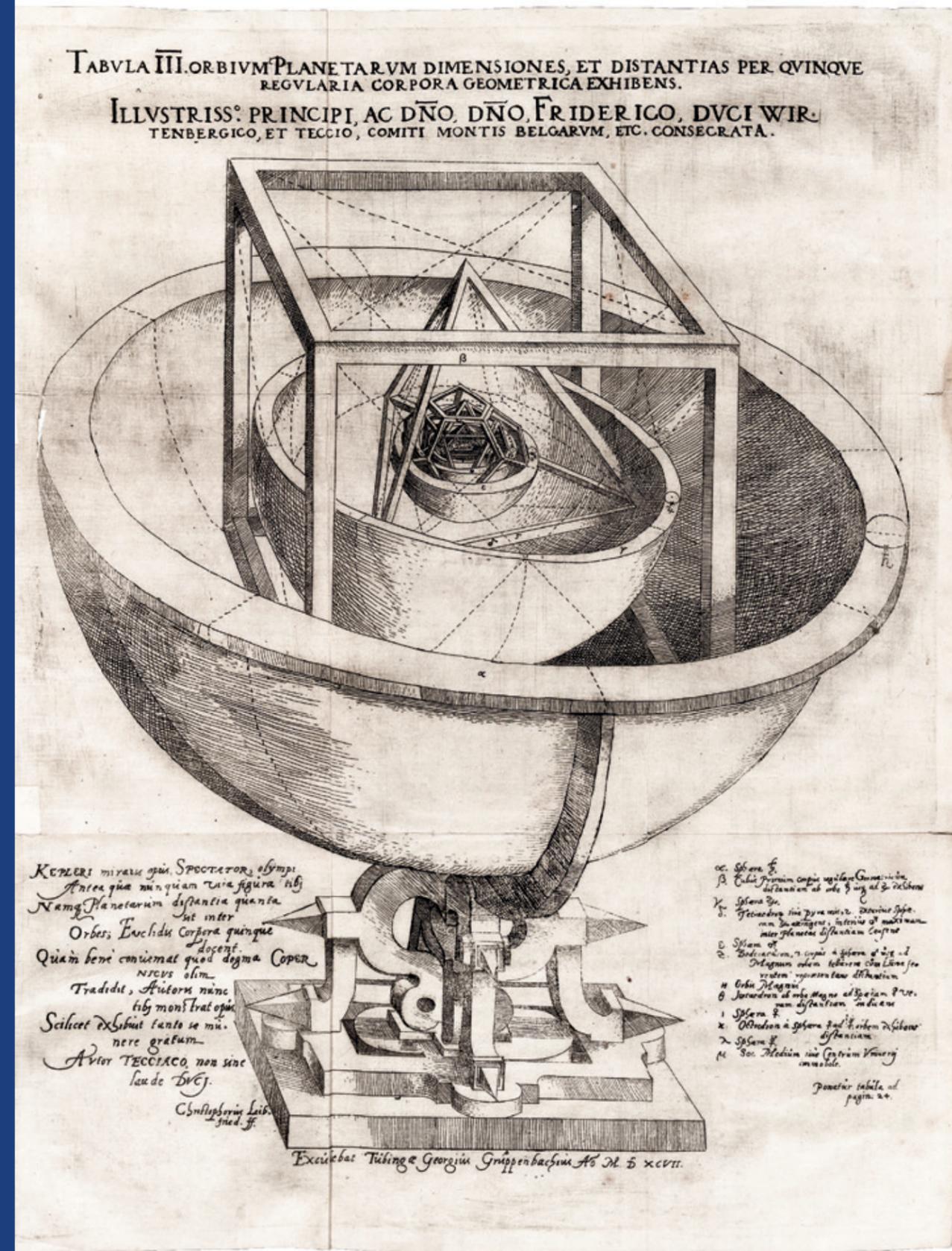
In der Entwicklung seiner Theorie der dynamischen Planetenbewegung war Kepler davon über-

zeugt, dass der Sonne ein seelisches Vermögen inneohnt, das sie rotieren lässt. Dadurch wird ein Planet von ihrer bewegenden Kraft mittels eines dem Licht ähnlichen feinen Materiestroms, der ‚species immateriata‘, kreisförmig im Ätherraum herumgeführt. Zur Erklärung der Elliptizität der Planetenbahn gab Kepler der englische Naturphilosoph William Gilbert (1544–1603) mit seiner Magnetismuslehre einen wichtigen Impuls. Kepler stellt sich vor, dass ein Planet gleichsam wie ein Magnet polarisiert ist und bei seiner Bewegung um die Sonne unveränderliche, in sich parallele Fibern oder Fasern besitzt. Diese werden je nach Lage in ihrer Bahn von der quasi-magnetischen Kraft der Sonne bald mehr angezogen, bald mehr abgestoßen, so dass, wie in der ‚Astronomia Nova‘ ausführlich dargelegt, aus dem Kreis eine elliptische Bahn entsteht (KGW III, S. 351ff.).

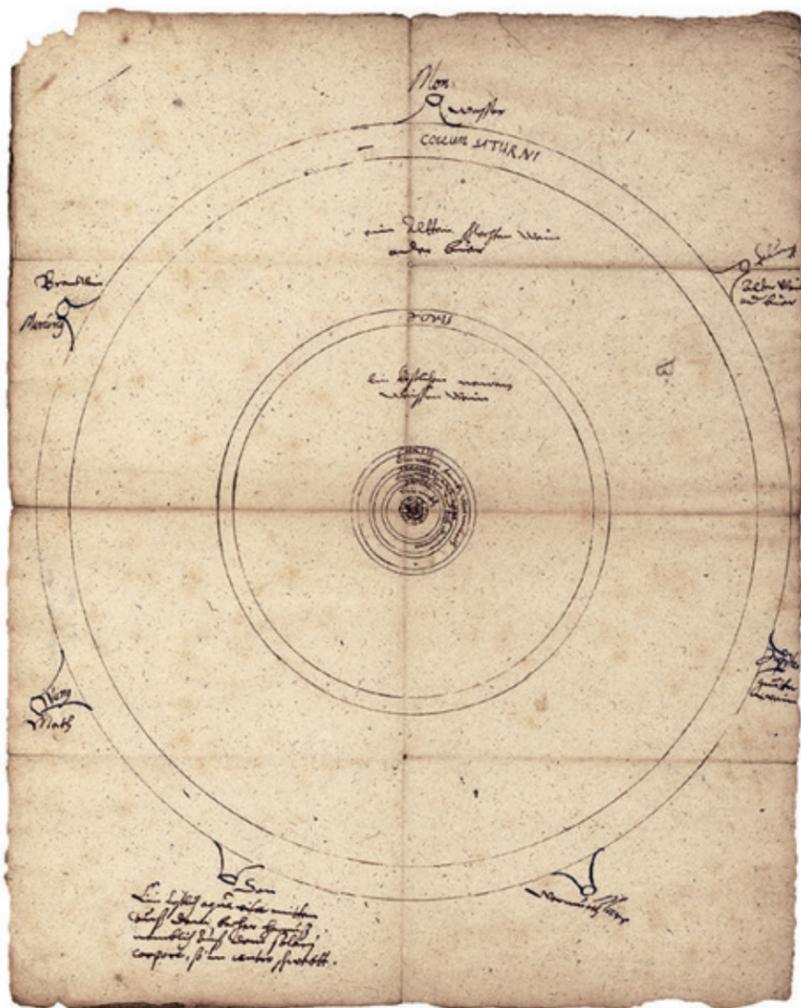
Anwendung mathematisch-mechanischer Modelle auf die Kosmologie

Keplers naturwissenschaftliche Forschungen stehen ebenso in einem Zusammenhang mit den in der Renaissance entwickelten Vorstellungen von einer ‚Mechanisierung der Natur‘. In dieser Anschauung wurden mechanische Vorgänge und Erzeugnisse des handwerklichen Gewerbes wie Waage und Uhrwerk analog auf die Natur übertragen, um einzelne Naturvorgänge zu veranschaulichen und besser verstehen zu können. Dabei traten auch neue messtheoretische Fragen auf. So vertrat etwa Nicolaus Cusanus (1401–1464) im Zusammenhang seiner ‚Versuche mit der Waage‘ die Anschauung, dass Wissen und Erkennen Messen ist.

In der Rezeption derartiger Überlegungen ging Kepler von dem Grundsatz aus, dass die Gesetze der Natur erst durch die quantifizierende Methode des Messens, Wägens und Zählens erkannt werden könnten. In diesem Sinne schrieb Kepler noch während der Grazer Zeit im Jahr 1597 an seinen astronomischen Lehrer Michael Mästlin in Tübingen, der menschliche Geist erfasse einen Gegenstand der Natur umso richtiger, je mehr dieser den reinen Quantitäten seines Ursprungs zuzuordnen sei. Damit erhob Kepler die messbare Quantität des Objekts zu einer wichtigen Kategorie seiner wissenschaftlichen Erkenntnis.



Keplers Modellvorstellung des Planetensystems. Illustration aus Johannes Keplers ‚Mysterium Cosmographicum‘ (Tübingen: Georg Gruppenbach, 1596). ETH-Bibliothek Zürich, RAR 1367:1



Zeichnung Johannes Keplers (1571–1630) eines Kosmosmodells, Beilage zu einem Brief an Herzog Friedrich (reg. 1593–1608) vom 17. Februar 1596, WLB, Alte Drucke.

Ein herausragendes Beispiel für den Einfluss der mechanistischen Denkrichtung der Renaissance auf die Kosmologie ist der Begriff einer ‚machina mundi‘, einer ‚Weltmaschine‘, mit der das mechanisch aufgefasste Getriebe des Kosmos veranschaulicht werden sollte. Bis in seine Prager Zeit hinein (1600–1611) war Kepler darum bemüht, die Vorgänge und Strukturen des Planetensystems innerhalb der endlich gedachten Welt durch ein derartiges einfaches Modell zu erklären. Bereits in seinem Erstlingswerk ‚Mysterium cosmographicum‘ von 1596 erklärte er den Bau des Sonnensystems mittels eines quantitativ genau ausgeführten Modells. In der Suche nach den Ursachen für die Anzahl, Anordnung und Größe der Bahnen der damals

sechs bekannten Planeten entwarf Kepler ein Modell, bei dem sich in die Zwischenräume der als Halbkugeln dargestellten Planetenbahnen gerade die aus der Mathematik bekannten regulären fünf Platonischen Körper einschalten lassen.

Daraus resultierte der Entwurf eines Planetariums, das für Herzog Friedrich von Württemberg angefertigt werden sollte. Auch dafür legte Kepler Anfang 1598 eine genaue Beschreibung und entsprechende Skizzen vor. Das Gerät sollte die Bewegungen der Planeten veranschaulichen, wurde aber nicht angefertigt.

Für Kepler war die mathematisch durchdachte Darstellung des Sonnensystems im ‚Mysterium Cosmographicum‘ der Vorläufer oder Vorbote (‚prodomus‘) seiner kosmographischen Untersuchungen, doch zugleich das Schlüsselwerk für seine weiteren astronomischen Forschungen. In seinen Überlegungen zur ‚Astronomia Nova‘ über die Ursache der Planetenbewegung hat sich Kepler die ‚machina caelestis‘ als ein Uhrwerk (‚horologium‘) vorgestellt. Im Planetensystem, so schreibt Kepler 1605 an den Bayerischen Kanzler Herwart von Hohenburg, werden die Himmelsbewegungen durch eine Kraft ähnlich so erzeugt wie der Gang eines Uhrwerks durch ein Gewicht:

„Mein Ziel ist es zu zeigen, dass die ‚himmliche Maschine‘ nicht wie ein göttliches Lebewesen, sondern wie ein Uhrwerk ist, insofern darin nahezu die gesamte Verschiedenheit der Bewegungen von einer äußerst einfachen magnetischen körperlichen Kraft (besorgt wird), wie bei einem Uhrwerk beinahe alle Bewegungen von einem ganz einfachen Gewicht.“ (KGW XV, S. 146).

Auf diese Weise machte sich Kepler die mechanistische Denkrichtung seiner Zeit zunutze, behielt jedoch stets eine gewisse Distanz zu ihr. Für ihn war das Wesentliche der Weltverfassung nicht in der Vorstellung von ihrer Mechanisierung zum Ausdruck zu bringen, sondern allein durch die Erkenntnis der Harmonie der Welt.

Die Idee von der Harmonie der Welt

Von Grund auf hat der Harmoniegedanke in der Vorstellung eines der gesamten Natur immanenten Ord-

nungsprinzips Keplers Naturforschungen bestimmt. Das formale und zugleich fundamentale Gestaltungsprinzip der Natur, das gleichermaßen das Kleinste wie das Größte, den Schneekristall wie die Strukturen des Kosmos, bestimmt, war für ihn geometrischer Art. Hiernach hat der Schöpfer für die Formung der Welt von Anfang an mathematische Größen in sich getragen, die dem Menschen durch seine Erkenntnisfähigkeit zugänglich sind.

Über diese seine Naturforschungen leitende wie auch erfüllende Idee hat Kepler im Jahr 1619 sein großes Werk ‚Harmonice Mundi‘ (die Weltharmonik) veröffentlicht. Keplers Weltbegriff (‚mundus‘) ist keineswegs in sich einheitlich. Ist ‚mundus‘ im Rahmen seiner Kosmologie der in sich geordnete Kosmos von endlicher Größe mit Einschluss der Fixsternwelt, so ist dieser Begriff in der ‚Harmonice Mundi‘ ohne den ‚ungeheuer großen Fixsternraum‘ vorrangig auf das Planetensystem bezogen.

Dieses „mein an Pythagoras und Platon anklingende Werk“ – so Kepler in der Widmung an König Jakob von Großbritannien – ist in fünf Bücher oder Teile gegliedert:

- I. Geometrisches Buch (über die regelmäßigen Figuren);
- II. Architektonisches Buch (Figürliche Geometrie, reguläre Figuren in Ebene u. Raum);
- III. Harmonisches Buch (Ursprung harmonischer Proportionen u. musikalische Dinge);
- IV. Metaphysisch-astrologisches Buch (Harmonische Konfigurationen der Gestirnsstrahlen);
- V. Astronomisches und metaphysisches Buch (Harmonien der himmlischen Bewegungen).

Bereits in dieser kurzen Inhaltsübersicht werden die Schwerpunkte der harmonischen Forschungen Keplers in den drei Schwerpunkten Mathematik, Musiktheorie und Astronomie deutlich, die sich in dem Werk zu einem dichten Gewebe verbinden.

Während Kepler in mathematischen Fragen vor allem an neuplatonische Ideen anknüpft, ist er in der Musiktheorie von dem bedeutenden Musiktheoretiker Vincenzo Galilei (ca. 1520–1591), dem Vater des Naturforschers Galileo Galilei, beeinflusst. Ebenso hat

sich Kepler intensiv mit der Harmonik von Ptolemaios, der umfassendsten musiktheoretischen Schrift der Antike, auseinandergesetzt und dadurch seine eigenen harmonischen Vorstellungen begrifflich präzisiert (KGW XXI,2.1). Diese wichtige Vorarbeit zur ‚Harmonice Mundi‘ war ursprünglich als ‚Appendix‘ zur ‚Harmonice Mundi‘ vorgesehen, konnte aber wegen ihres großen Umfangs wie auch infolge der widrigen Zeitumstände dem Werk nicht beigelegt werden.

Der Ursprung der harmonischen Proportionen liegt für Kepler in den am Kreis konstruierbaren regelmäßigen Vielecken. Bestimmte, in dieser Konstruktion als konsonant definierte Proportionen lassen sich auf die konsonanten Tonintervalle eines Monochords – einer über einen Resonanzkasten gespannten Saite – übertragen.

Insgesamt ergeben sich so im Oktavraum sieben harmonische Proportionen,

$\frac{1}{2}$ $\frac{2}{3}$ $\frac{3}{4}$ $\frac{3}{5}$ $\frac{4}{5}$ $\frac{5}{8}$ $\frac{5}{6}$,

die als Teilungsverhältnisse der Saite des Monochords die folgenden Tonintervalle bilden:

Oktave Quinte Quarte Dursexta Durterz Mollsexta Mollterz

Diese konsonanten Tonintervalle sind für die weiteren Überlegungen überaus wichtig, denn mit ihrer Hilfe schließt sich im astronomischen Teil (Buch V) der harmonikale Themenkreis. Hier erkennt Kepler die harmonischen Himmelsbewegungen in den Proportionen sowohl zwischen den Tagesbewegungen eines einzigen Planeten in den Punkten extremer Abstände zur Sonne, den Apsiden, als auch zwischen den entsprechenden Bewegungen zweier benachbarter Planeten. Diese Proportionen werden von Kepler als harmonische Verhältnisse erkannt und nach geringfügigen Anpassungen in musikalische Intervalle umgeformt, um sie schließlich nach dem musikalischen Verfahren der Oktavtransposition durch fortgesetzte Halbierung bzw. Verdoppelung auf einen Oktavraum zu übertragen. So lässt sich z. B. das Verhältnis 5:24 auf 5:6, entsprechend einer kleinen Terz plus zwei Oktaven, transponieren (Haase 1974, S.105). Schließlich ist jedem Planeten aufgrund dieser Transposition ein charakteristisches musikalisches Motiv zugeordnet, wobei in der Tonfolge die Zwischennoten zwischen den Extremlagen eines Planeten von Kepler noch hinzugefügt sind.



Charakteristische musikalische Motive für Planeten und Mond in Keplers ‚Harmonices Mundi libri V‘ (Linz 1619). ETH-Bibliothek Zürich, e-rara-11132

Diese Tonfolgen entsprechen der jeweiligen Schwankungsbreite der Planetenbewegung, sind also auf die unterschiedlichen Exzentrizitäten der Planetenbahnen zurückzuführen.

Wesentlich für Keplers methodische Überlegungen ist hier besonders sein Forschungsansatz nach der ‚causa finalis‘. Das gilt ebenso für die von Kepler genau datierte Entdeckung seines dritten Planetengesetzes, das in der ‚Harmonice Mundi‘ nicht unmittelbar einem astronomischen Zweck dient. Der nähere harmonikale Zweck seines dritten Planetengesetzes besteht hier für Kepler darin, mit dessen Hilfe in der Umkehrung der bisherigen Vorgehensweise die ursächliche Erklärung für die Entstehung der Exzentrizitäten, Bahnhalbmesser und Umlaufzeiten der Planeten, zu erkennen und so auch den von ihm gesuchten ‚harmonischen Kosmos‘.

Im Bewusstsein der vollbrachten Leistung hat Kepler nach Abschluss seines bedeutsamen Werkes in großer Freude und Demut Worte gefunden (KGW VI, S. 362f.), die über seinem gesamten Opus stehen können:

„Ich sage Dir Dank, Schöpfer, Herr, weil Du mir Freude gegeben hast an dem von Dir Geschaffenen und über die Werke Deiner Hände. Siehe, ich habe jetzt das Werk vollendet, zu dem ich berufen war. Ich habe alle Kräfte meines Geistes genutzt, die Du mir verliehen hast. Ich habe die Herrlichkeit Deiner Werke den Menschen, die meine Ausführungen lesen werden, geoffenbart, so viel von ihrem unendlichen Reichtum mein enger Verstand hat erfassen können.“

Literatur

- Bialas, Volker: Johannes Kepler, Astronom und Naturphilosoph. (2. erweiterte Auflage von: Johannes Kepler, 2004). Linz: Trauner-Verlag 2013.
- Haase, Rudolf: Aufsätze zur harmonikalen Naturphilosophie, Graz 1974.
- Johannes Kepler: Weltharmonik. Übersetzt und eingeleitet von Max Caspar, München/ Berlin 1939, Neuauflage 1967.
- KGW = Johannes Kepler Gesammelte Werke, hrsg. im Auftrag der Deutschen Forschungsgemeinschaft u. der Bayer. Akademie der Wissenschaften. München 1937 ff.

PROF. DR. VOLKER BIALAS war wissenschaftlicher Leiter der Kepler-Edition (1986–2003) und apl. Professor an der Technischen Universität München.

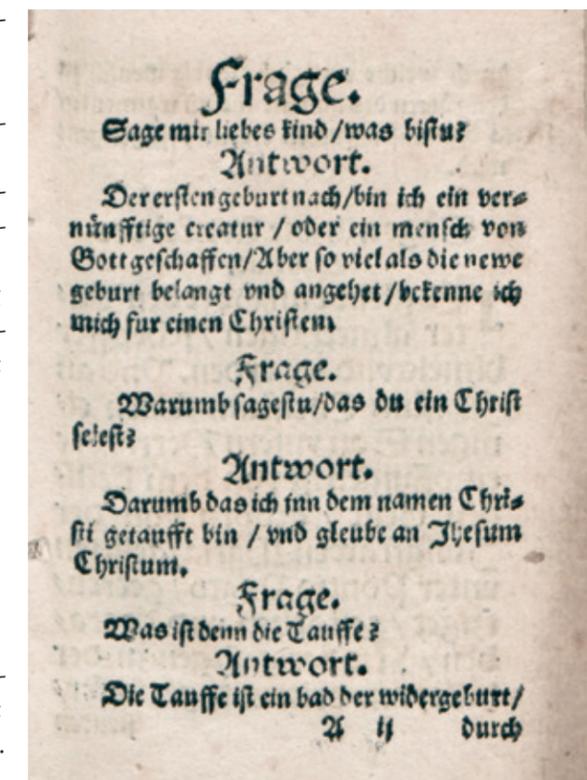
Schule und Bildung im Herzogtum Württemberg

SABINE HOLTZ

Die Elementarschulen

Der Einstieg in das frühneuzeitliche Bildungswesen erfolgte über zwei Schultypen, der Deutschen Schule oder der Lateinschule. Übergänge zwischen beiden Schultypen waren nicht festgelegt. Vor allem das Elementarschulwesen hatte durch die Reformation einen deutlichen Impuls erhalten. Das Ziel der Reformatoren war es, allen Kindern, Jungen und Mädchen, das Lesen und Schreiben beizubringen. Dies war notwendig, um die Bibel selbständig lesen zu können und damit in Fragen des Glaubens selbst urteilsfähig zu sein. Das württembergische Herzogtum griff dieses Bildungsziel auf. In der Ordnung für die Deutschen Schulen, die Bestandteil der großen Württembergischen Kirchenordnung (1559) war, wurde der Schulbesuch von Jungen und Mädchen vorgeschrieben. Um den Schulbesuch publik zu machen und um ihn nachdrücklich anzumahnen, wurden die Pfarrer beauftragt, zwei Mal jährlich eine Schulpredigt zu halten, denn es war nicht einfach, die Eltern vom Nutzen des Schulbesuchs ihrer Kinder zu überzeugen. Erklärtes Ziel war, dass es an allen Pfarrorten des Herzogtums solche Deutschen Schulen geben sollte. Aus der landesherrlich verordneten Einführung Deutscher Schulen darf jedoch nicht geschlossen werden, dass diese projektierten Schulen sofort in Stadt und Land eingerichtet wurden. Das brauchte seine Zeit. Unverständnis und Widerstand der Eltern gegen einen Schulbesuch der Kinder war in einer agrarisch strukturierten Lebenswelt, in der man auf die Mithilfe schon der Kinder angewiesen war, sehr groß. 1559 gab es in Württemberg 156 Deutsche Schulen, zu Beginn des 17. Jahrhunderts war ihre Zahl bereits auf rund 400 angewachsen.¹ Zumeist besuchten die Kinder nur im Winterhalbjahr die Schule. Der ganzjährige Schulbesuch von Jungen und Mädchen setzte sich zumeist erst nach dem ersten Drittel des 18. Jahrhunderts durch. Die Wirren des 30-jährigen Kriegs hatten die mühsam begonnene Aufbauarbeit zunichte gemacht.

Die württembergische Kirchenordnung sah vor, dass die Schülerinnen und Schüler der Deutschen Schule in drei „Heufflin“ eingeteilt und unterrichtet werden.² Im ersten Häuflein wurden die Buchstaben gelernt, im zweiten Häuflein wurde das Lesen von Silben eingeübt, das dritte Häuflein erlernte Lesen und Schreiben. In der Schulstube sollten Kinder aus den verschiedenen Häuflein, die sich aber untereinander gut verstanden, in „Roten“ nebeneinander gesetzt werden. Dies sollte zum einen die Kinder untereinander zum Fleiß anspornen, zum anderen den Schulmeister entlasten. Die Überlegung war wohl, dass Jüngere von den Älteren lernen konnten. Die Schulmeister wurden ermahnt, den Kindern ausreichend Zeit zu geben, die einzelnen Arbeitsschritte zu erlernen. Wichtig war



Die erste Frage aus ‚Der kleine Katechismus‘ von Johannes Brenz, Magdeburg 1538 Staatsbibliothek zu Berlin PPN 816559236

der Ordnung, dass die Kinder die Buchstaben richtig benennen, die Silben deutlich aussprechen und die letzten Silben nicht verschlucken („die letzten Syllaben im Mund nit verschlagen“).³

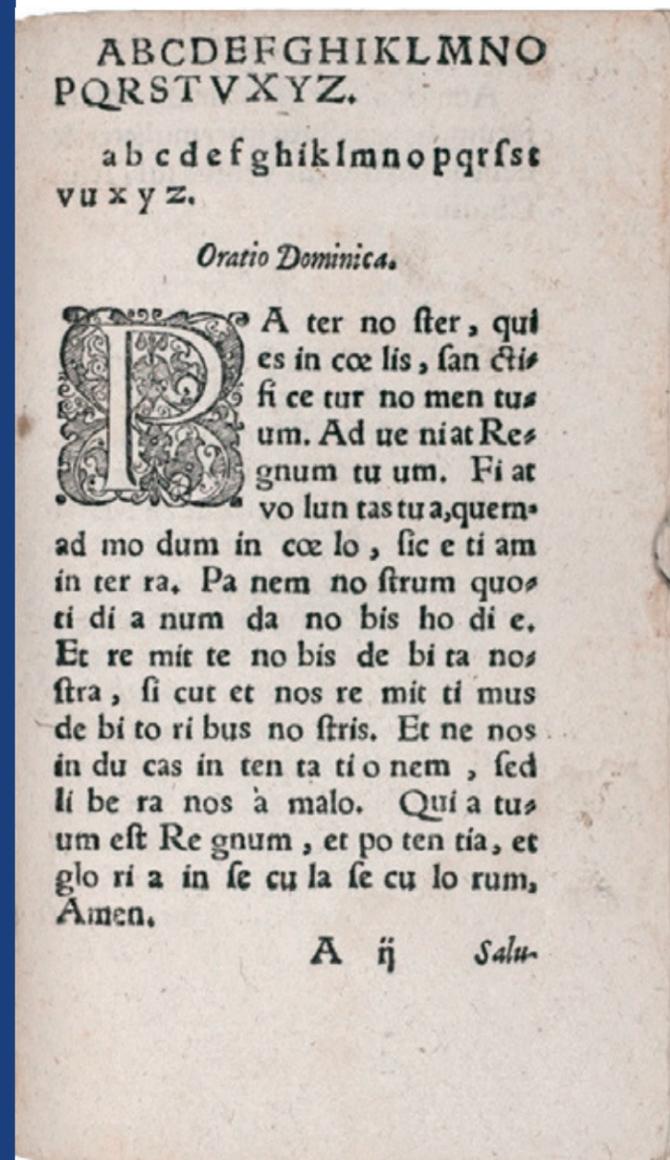
Wenn die Kinder dann so leidlich lesen konnten, wurden sie im Schreiben unterrichtet. Dazu schrieb der Schulmeister Texte (‘Vorschriften’) mit gut lesbarer Handschrift in ein Büchlein, das die Kinder mitbrachten. Die Kinder schrieben die Texte ab, und der Schulmeister kontrollierte die Abschrift und wies auf Fehler und Mängel hin. Dem Schulmeister wurde empfohlen, gegebenenfalls zur Verbesserung und Einübung die Hand des Kindes zu führen. Da die Kinder zur Gottesfurcht erzogen werden sollten, hatte der Lehrer darauf achten, dass die Kinder keine schändlichen und sektiererischen Bücher lasen, sondern zum Katechismus, dem Psalmbüchlein bzw. zu den Sprüchen Salomos, zu Jesus Sirach und dem Neuen Testament griffen. Unter diesen Büchern nahm der Katechismus eine ganz besondere Rolle ein. Er sollte auswendig gelernt werden. Dafür war eigens ein fester Platz im Stundenplan vorzusehen. Jungen und Mädchen stellten sich dazu in zwei getrennten Reihen gegeneinander auf und übten das Rezitieren der Fragen und Antworten. Wurde der Katechismus gut beherrscht, wurde er von Zeit zu Zeit in der Gemeinde im Gottesdienst aufgesagt. Hierzu trafen sich die Schüler, die für diese Präsentation ausgesucht worden waren, vor dem Läuten der Kirchenglocken in der Schule und gingen dann gemeinsam mit dem Schulmeister in die Kirche. Nach der Predigt hatte der Schulmeister abzufragen, was die Kinder von der Predigt behalten haben. Die männlichen Schüler mussten, anders als die Mädchen, ebenfalls zu fest im Stundenplan verankerten Zeiten, den Kirchengesang einüben.⁴ Dieser Unterrichtsteil war direkt auf den sonn- und feiertäglichen Gottesdienst ausgerichtet. Auf dem Land und lange auch in den Städten Württembergs mussten in den Gemeinden Schüler unter Leitung des Lehrers oder Pfarrers die Lieder im Gottesdienst anstimmen und den Gemeindegesang führen. Orgeln verbreiteten sich nur sehr langsam und waren zudem äußerst kostspielig.

Im Unterricht nicht geduldet wurden Gotteslästerung sowie schändliche und moralisch verwerfli-

che („leichtfertige“) Reden und „vil weniger ergerlichen Sachen vnd Handlungen“.⁵ Der Unterricht sollte pünktlich beginnen, Umhergehen während des Unterrichts war nicht erlaubt. Jeder sollte an seinem Platz sitzen. Auch sollten die Kinder friedlich miteinander umgehen, sich gegenseitig nicht verspotten und schmähen. Ein ungebührliches Verhalten war mit der Rute zu strafen. Die Strafe diente zugleich der Besserung und der Abschreckung. Nach Schulschluss am Vormittag sollte der Schulmeister zunächst ein Gebet sprechen und dann das Vaterunser, das Glaubensbekenntnis und die Zehn Gebote aufsagen lassen. Rechnen stand in der Deutschen Schule noch nicht auf dem Stundenplan. Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass Auswendiglernen, schriftliche Übungen und Wiederholungen den Unterricht an den Elementarschulen bestimmten.

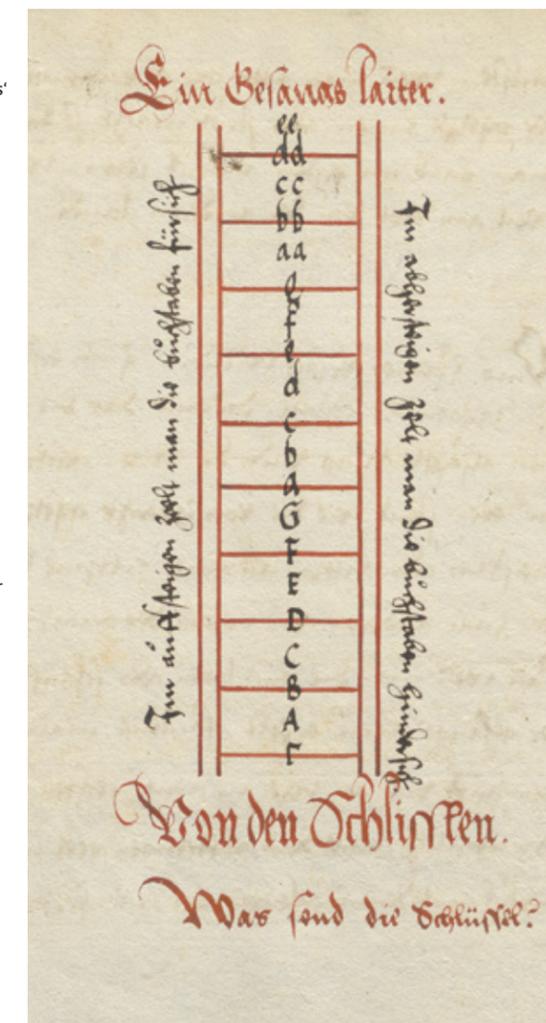
Die Lateinschulen

Die zweite Säule des frühneuzeitlichen Schulwesens waren die Lateinschulen. Hier konnten nur Jungen eine höhere schulische Ausbildung erhalten. Ihre Wurzeln reichten teilweise weit ins Mittelalter zurück, wie beispielsweise in der kleinen Reichsstadt Weil der Stadt, aber auch in zahlreichen Amtsstädten Württembergs. Dort, wo sich die Territorien der Reformation anschlossen, erhielten sie einen kräftigen Impuls, denn sie standen im Mittelpunkt der Bildungsbestrebungen in der Reformationszeit. Teils vom Bildungsideal des Humanismus angeregt, hauptsächlich jedoch wegen der zentralen Bedeutung der Bibel für das evangelische Glaubensverständnis wurde eine gründliche Ausbildung der künftigen Pfarrer bereits in der Lateinschule gefordert. Der in der Großen Württembergischen Kirchenordnung für die Lateinschulen enthaltene Lehrplan sah idealerweise fünfklassige Lateinschulen vor. Dass sich dies praktisch nicht umsetzen ließ, war schon der Kirchenordnung bewusst. Sie schrieb deshalb vor, sich an den Möglichkeiten vor Ort zu orientieren; auch kleinere Lateinschulen mit zwei, drei oder vier Klassen waren denkbar. Lediglich in Stuttgart konnte eine Lateinschule mit fünf Klassen eingerichtet werden. In Tübingen bestand eine vierklassige Lateinschule, in Nürtingen konnten drei Klassen eingerichtet werden. Darüber hinaus bestanden in Stuttgart und Tübingen



Eltern und Schulmeister, die erste Stunde entfallen. In der ersten Klasse wurde Lesen und Schreiben anhand des gedruckten Katechismus, der auch ein lateinisches Alphabet enthielt, erlernt. Im Einzelnen wurden zunächst die Buchstaben des Alphabets gelernt und dann anhand des Vaterunser das Lesen von Silben gelernt. Hierfür wurde eine erste lateinische Lesefibel verwendet, die den Text des lateinischen Vaterunser in Silben wiedergab.⁶

Abb. links: Lateinische Lesefibel 'Tabula elementaria pro pueris elementaris' Sigmund Wölflin, Tübingen 1582. Württembergische Landesbibliothek



Tonleiter (handschriftliche Musiklehre des Johann Parsimonius, Klosterschule Hirsau?) WLB Cod. hist. 4° 198

Pädagogen, die Schülern der kleinen Lateinschulen zur direkten Vorbereitung auf ein Universitätsstudium dienten. An allen übrigen Lateinschulen Württembergs unterrichteten zwei, in der Regel sogar nur ein Lehrer. Der Unterricht sollte im Sommer vormittags von 6–7 und von 8–10 bzw. im Winter von 6–8 und 9–10 sowie nachmittags ohne Unterschied der Jahreszeiten von 12–2 und von 3–4 Uhr dauern. In der ersten Klasse konnte im Winter, im Einvernehmen zwischen

Der Präzeptor hatte darauf zu achten, „damit die Knaben nit ihrer Mu[ot]ter Sprach/ sonder der lateinischen Sprach art nach/ die Vocales vnnnd Consonantes vnterschiedlich vnnnd deutlich außsprechen.“⁹ Im weiteren Verlauf der ersten Klasse wurde der Donat, ein lateinisches Grammatiklehrbuch, eingeführt und gegebenenfalls bereits auf Melanchthons ‚Quaestiones Grammaticae‘ zurückgegriffen, das der Autor selbst allerdings erst für die dritte und vierte Klasse empfahl. Am Ende der ersten Klasse sollte ‚Cato‘ gelesen werden können. Dabei handelte es sich um Sinnsprüche eines anonymen Autors aus spätrömischer Zeit, nicht um den bekannten römischen Staatsmann. Um den Wortschatz (Nomen und Verben) zu erweitern, sollten den Schülern täglich zwei Vokabeln aufgeschrieben werden, die sie abends auswendig lernen und am nächsten Tag rezitieren sollten. In der zweiten Klasse war weiterhin der Donat im Gebrauch. Lateinische Deklinationen und Konjunktionen waren einzuüben, Etymologien sollten erläutert werden. Der lateinische Katechismus und ‚Cato‘ standen weiterhin auf dem Stundenplan. Neu hinzukamen die Proverbien Salomos und die Dialoge Sebaldu Heidens. Ihre Beispiele dienten dazu, sie nach allen Regeln der Grammatik zu zerlegen: „jetz und disen dann ein andern Casum, Tempus, Modum &c. fragen/ vnd sie ettwann beide Nominatiuos singularem & pluralem, beid Genetiuos, Datiuos, Accusatiuos, Vocatiuos, Ablatiuos jtem/ alle Praesentia, Praeterita et Futura durch alle Modos lassen nach ein ander sagen/ damit die Knaben hurtig werden zu responsiern.“¹⁰ Ziel war es, in dieser Klassenstufe mit dem „Lateinreden“ zu beginnen.¹¹ In der dritten Klasse kamen als Lektüre die Fabeln Aesopica, ausgewählte Briefe Ciceros sowie Terenz als Schulautor hinzu.¹² Ein Schwerpunkt lag auf Terenz, seine Komödien sollten „mit den Knaben vil vnd fleissig geuebt/ auch in guot teutsch gebracht/ darmit das Lateinreden vnd schreiben dardurch gefürdert werde.“¹³ Stilübungen schlossen sich an. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass kein Schüler das Scriptum des anderen abschrieb, sondern sein eigenes ‚Buch‘ führte. Vierteljährlich wurden Kontrollen durchgeführt und Fleiß und Unfleiß der Schüler wie der Präzeptoren dokumentiert. In der vierten Klasse wurde Melanchthons ‚Quaestiones‘ noch gründlicher behan-



Übersichtskarte mit evangelischen Klosterschulen (blaues Klostersymbol) im Herzogtum Württemberg. Die Karte, die hier verwendet wird, erstellte Georg Gadner 1596. Landesarchiv Baden-Württemberg, Abt. Hauptstaatsarchiv Stuttgart, N 3 Nr. 1/2

delt als in der vorausgegangenen Klasse. Die Komödien des Terenz (Eunuchus) sowie Ciceros Werke ‚De Amicitia‘ und ‚De Senectute‘ standen auf der Lektüreliste. In dieser Klasse sollten sie, wie offensichtlich schon in der dritten Klasse, die Lektionen, die sie aus Aesop, Terenz und Cicero gehört hatten, abschreiben. Die Abschriften mussten zwei Mal täglich dem Präzeptor vorgelegt werden, der sie korrigieren musste. Das Abschreiben sollte auch eine gute Basis dafür sein, dass die Schüler die Lektionen auswendig lernen mussten. Neu hinzu kamen Grundzüge der griechischen Grammatik. In der fünften Klasse wurden, nachdem die Schüler nun die Grammatik, das hieß das Latein so beherrschten, dass sie lateinisch reden und schreiben konnten, Dialektik und Rhetorik als Unterrichtsfächer ergänzt, genutzt wurden die Lehrbücher Melanchthons. Damit war das Trivium komplettiert (Grammatik, Dialektik, Rhetorik). Dies führte dazu, dass die Lateinschulen manchmal auch Trivialschulen genannt wurden. Freilich wurde der Lateinunterricht fortgesetzt. In ihm sollten die Schüler nun selbst zum Verfassen lyrischer Texte („carmina“) angeleitet werden. In dieser Klasse sollten nun auch die „teütsche Argumenta“ anspruchsvoller behandelt werden. In Dialektik und Rhetorik geschult, sollten sie nicht nur Epistola, sondern von Zeit zu Zeit auch ein Exordium, eine Narratio, einen Locus communis, eine Confirmatio, eine Peroratio, eine Descriptio, eine tractatio Fabulae etc. verfassen. Dabei ging es nicht um die Quantität des Textes, also die reine Länge,

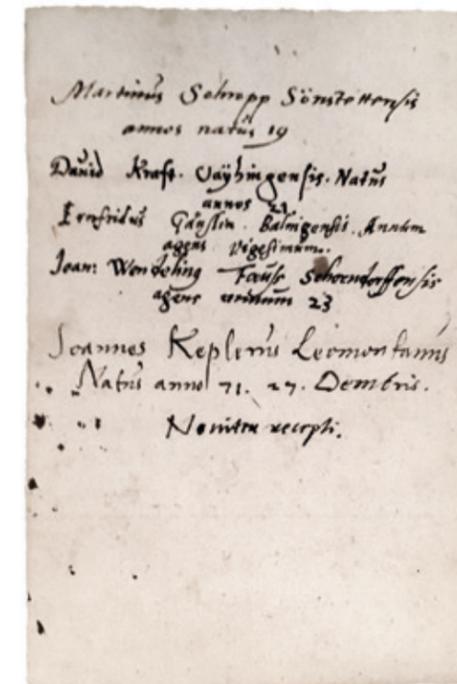
sondern um Qualität. Sie bemaß sich in der möglichst gelungenen Imitation der Vorgaben Ciceros. Alle Klassen der Lateinschule waren ebenfalls stark mit dem gottesdienstlichen Leben verbunden. Der Besuch der Predigt war verpflichtend, aus ihr wurde examiniert. Die Lehrer der Lateinschulen waren gemeinhin Theologen, die sich entweder ganz der Schule verpflichtet hatten (selten freiwillig), oder Theologen, die sich in der Wartestellung auf ein Pfarramt befanden. Eine eigene Ausbildung zum Präzeptor, zum Lehrer an den Lateinschulen gab es nicht.

Die meisten Schüler an den Lateinschulen kamen in der Praxis aber wohl kaum über Grundkenntnisse in Grammatik (Latein), Rhetorik, Musik und Religion hinaus. Sie mussten deshalb, bevor sie an der Universität in Tübingen studieren konnten, eines der beiden Pädagogien besuchen, um Wissenslücken aufzufüllen. Damit bereiteten sie sich auf den Erwerb des ersten akademischen Grads des Baccalaureus an der Universität vor.

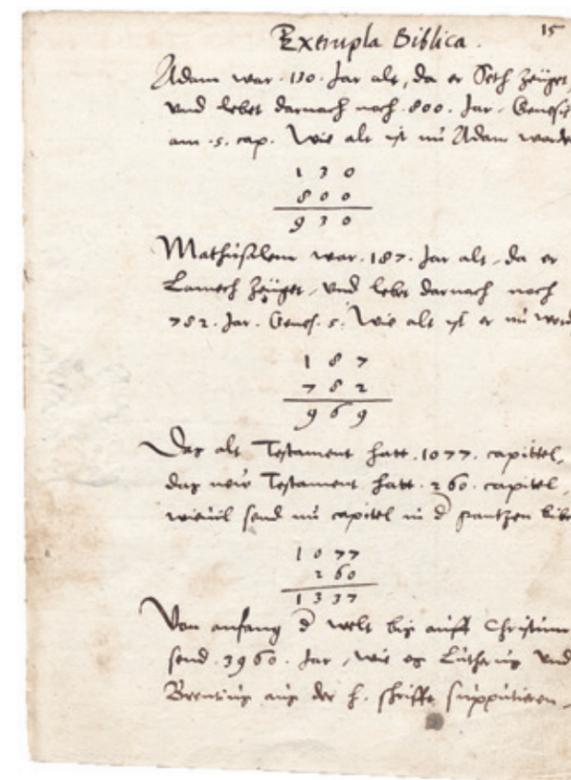
Die evangelischen Klosterschulen

In Württemberg gab es neben der Lateinschule einen frühzeitig vollkommen auf das Studium der Theologie zugeschnittenen Bildungsweg. Für Interessenten sollte idealerweise nach Abschluss der dritten Lateinschulklasse eine Aufnahmeprüfung an die niedere Klosterschule abgelegt werden können. Üblicherweise konnten Präzeptoren interessierte Schüler aber auch

nach zwei Lateinschulklassen (das sind üblicherweise vier Schuljahre) im Wissensstand so weit vorbereiten, dass sie die Aufnahmeprüfung an der niederen Klosterschule, das sogenannte Landexamen, bestehen konnten. Lehrbücher und Unterricht an der Klosterschule entsprachen weitgehend dem Lehrplan der Lateinschule. Der Griechischunterricht begann allerdings bereits an den niederen Klosterschulen, und zwar anhand von Melanchthons Lehrbuch. An der höheren Klosterschule begann dann der theologische Unterricht anhand eines Buches aus dem Alten Testament oder neutestamentlicher Briefe, vorzugsweise der paulinischen Briefe. Grundzüge der biblischen Sprachen und klassischer Autoren (Xenophon) kamen hinzu. Auch Mathematik fand nun im Lehrplan Platz.



Es war üblich, dass sich die Stipendiaten bei der Aufnahme (Rezeption) in eine kleine Liste eintrugen. Die fünfte Eintragung von oben stammt von Johannes Kepler „Joannes Keplerus Leomontanus Natus anno 71. 27. Decembris“ und ist vermutlich das älteste erhaltene handschriftliche Schriftstück von ihm. Ev. Stift Tübingen



Aus der höheren Klosterschule in Hirsau haben sich Kolleghefte des Prälaten Johann Parsimonius (1525–1588) erhalten. Dort finden sich auch zwei Beispiele für den Unterricht in Arithmetik. Die Textaufgaben aus dem 16. Jahrhundert lauteten:¹⁴ „1) Adam war 130

Jar alt, da er Seth zeuget, und lebet darnach noch 800 Jar. Genesis am 5. Kapitel. Wie alt nu Adam worden? Mathusalem war 187 Jar alt, da er Lamech zeuget, und lebet darnach noch 752 Jar. Genes. 5. Wie alt ist er nu worden?“ 2) Der Hertzog von Wirtemberg gibt jährlich zu Unerhaltung der Kirchen, Universitet und Schulen (wöllen also setzen) 185.700 fl. (Anm. d. Verf. fl. = Gulden). Die Cantzlei gestehet im jährlich 20.510 fl. Auff die Hoffhaltung gehen jährlich 386.790 fl. Was gehet nun in einer Summa über den Hertzogen zu Wirtemberg?“ Überdies behielt man an den evangelischen Klosterschulen, anders als an den Lateinschulen, den vorreformatorischen klösterlichen Tagesablauf bei.¹⁵ Der Musikunterricht stand hier im Zusammenhang mit dem Chordienst, von dessen ursprünglich sieben Chorgebeten 1556 fünf übernommen worden waren.¹⁶ Seit der dritten Klosterordnung von 1582 war jeweils nach dem Mittag- sowie nach dem Abendessen eine Stunde für Gesang und Saitenspiel eingeplant; hier sollten sich die Schüler erholen können. Letztlich diente gerade das Singen der Vorbereitung für den sonn- und feiertäglichen Gottesdienst. Zur Vorbereitung auf einen künftigen Pfarr- oder Schuldienst sollten die Schüler bei den Lesungen in den Gottesdiensten „laut, langsam [und] verstentlich lesen“.¹⁷

Für künftige Theologen sah das württembergische Schulwesen also ein ziemlich festes Schulsystem vor. Es führte über die Eingangsprüfung für die niedere

Abb. links: Rechenaufgaben (handschriftliche Aufgaben des Johann Parsimonius, Klosterschule Hirsau)⁸ WLB Cod. hist. 4 198

Stundenplan der zweiten Lateinschulklasse (Sommerhalbjahr) nach der Großen Württembergischen Kirchenordnung (1559)

	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag
6-7 Uhr	Grammatik Wortkunde	Grammatik Wortkunde	Grammatik Wortkunde	Grammatik Wortkunde	Grammatik Wortkunde	Grammatik Wortkunde
7-8 Uhr	Schüler gehen zur Morgensuppe (Frühstück) nach Hause					
8-10 Uhr	Grammatik	Grammatik	Grammatik	Grammatik	Grammatik	Grammatik
	Aufsagen eines Katechismusstücks zum Unterrichtsende					
10-12 Uhr	Mittagsuppe zu Hause und Arbeit für Lehrer und Schüler in der Landwirtschaft					
12-2 Uhr	Singen Grammatik Wortkunde	Singen Grammatik Wortkunde	Singen Grammatik Wortkunde	Singen Grammatik Wortkunde	Singen Grammatik Wortkunde	Singen Grammatik Wortkunde
2-3 Uhr	Pause: eventuell Arbeit zu Hause in der Landwirtschaft					
3-4 Uhr	Grammatik	Grammatik	Grammatik	Grammatik	Grammatik	Grammatik
	Beendigung des Schultages mit Gebet des Präzeptors sowie gemeinsamen Vaterunser und Glaubensbekenntnis					

Vgl. Bauer, Lothar: Die große Kirchenordnung: Konzeption und Aufbau eines Bildungswesens unter Herzog Christoph. In: 450 Jahre Kirche und Schule in Württemberg. Ausstellung zur 450-Jahr-Feier der Evangelischen Landeskirche. Teil 3, Stuttgart 1984, S. 46-73, hier S. 67.

re Klosterschule über die höhere Klosterschule an das Fürstliche Stipendium in Tübingen (Evangelische Stift) und zum Studium an der Universität. Da es sich bei den Plätzen für Schüler und Studenten um Stipendien handelte, waren sie sehr begehrt. Pro Stipendiat ging man von Kosten in Höhe von 25 fl. Jährlich aus (18/19 fl. für Verpflegung, 6 fl. in bar) aus. Die Kosten wurden von den Städten und Ämtern Württembergs sowie vom fürstlichen Haus getragen, je nach der Anzahl der von ihnen entsandten Stipendiaten. Finanzielle Basis der Klosterschulen wie des Stifts waren die vormals dem Kloster gehörenden Liegenschaften und Einkommen.¹⁸ Die Klosterschulen wie das Fürstliche Stipendium in Tübingen waren in ehemaligen Klöstern untergebracht, die im Zuge der Reformation säkularisiert worden waren. Die Zahl von 100 Stipendiaten (1557) am Stift wurde 1565 auf 150 erhöht. Die Aufnahme ins Stift war mit weiteren Prüfungen verbunden, und zwar in Stuttgart durch den Kirchenrat und schließlich in Tübingen durch die Stiftsleitung.¹⁹ Je nach präsentiertem Wissensstand musste der Stipendiat anfangs erst einmal Lektionen im Tübinger Pädagogium besuchen und so schulische Defizite ausgleichen. Zum Studiengang war vorgeschrieben, dass dann zunächst das Bakkalaureat, das ausreichende Kenntnisse in den Fächern des Triviums, Grammatik, Dialektik und Rhetorik erforderte, binnen eineinhalb Jahren zu absolvieren war. Der Magistergrad in den Disziplinen des Quadriviums (Arithmetik, Geometrie, Astronomie, Musik) war anschließend innerhalb von zwei Jahren zu erwerben. Gemeinsam mit den Disziplinen des Triviums (Grammatik/Latein, Rhetorik, Dialektik) waren dann die Septem Artes Liberales komplett absolviert. Damit konnte der akademische Grad des Magister Artium erworben werden. Er berechnete zum Studium an einer der höheren Fakultäten (Theologie, Jurisprudenz, Medizin). Für die Stipendiaten des Stifts schloss sich ein Theologiestudium an, schließlich sollten die Stipendiaten später in den Kirchendienst („oder wie wir sie taugenlich erkennen werden“) gehen. Alle Stipendiaten unterschrieben deshalb die Verpflichtung „[...] mich alsdann one seiner F[ürstlichen]. G[naden]. [...] wissen, willen und erlauben in keiner frembden Herrschaft Dienst zu verpflichten, Sondern so Sein F.G. [...] mich zugebrau-

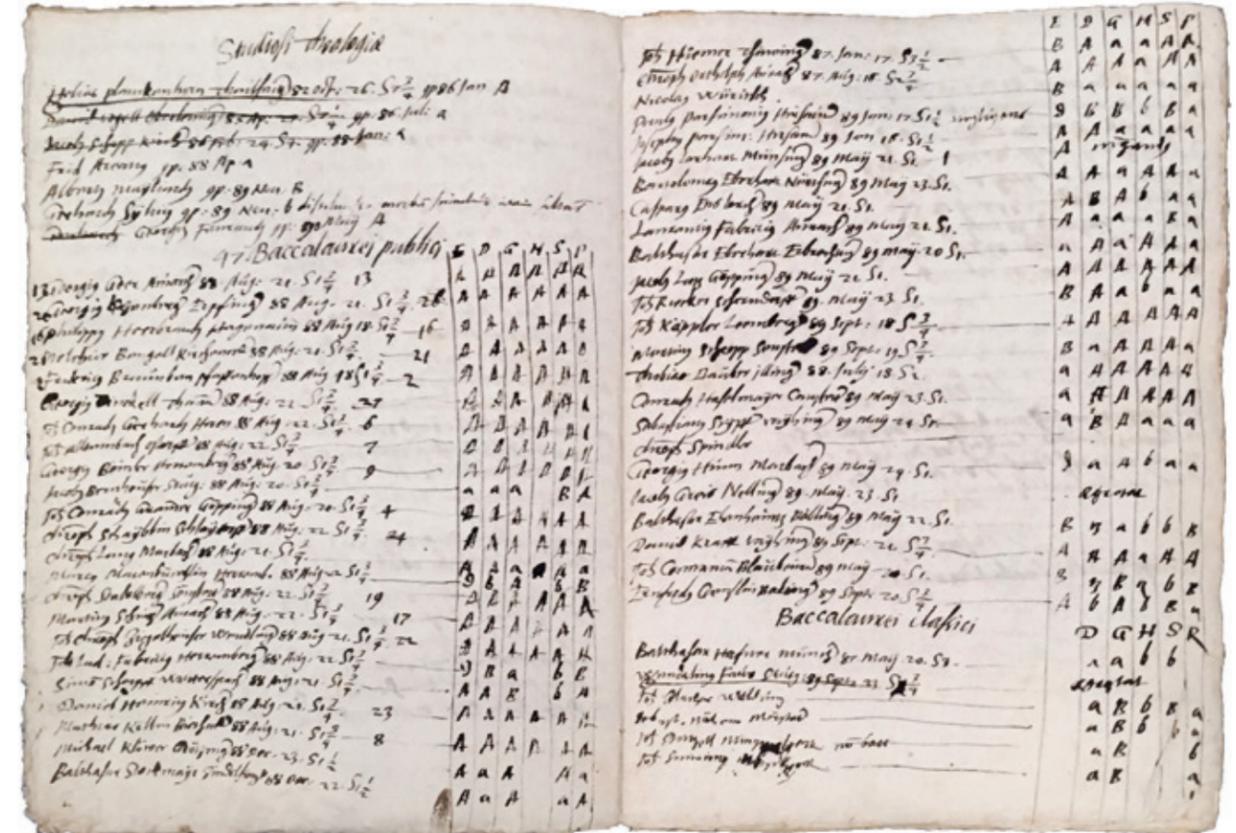
chen willens, alsdann dero als ein Pfarrherr, Predicant, Diacon oder Schulmeister gegen gebürlicher Besoldung und Underhaltung unterthäniglich und gehorsamlich gewärtig zusein.“²² Ziel des Stipendiums nach Marburger Vorbild war es, die Versorgung des Landes mit gebildeten Theologen zu garantieren.

Eine Untersuchung der Studentenfrequenz kleinerer württembergischer Landstädte hat ergeben, dass zu keiner Zeit mehr Studenten aus solchen Orten und aus einfachen bäuerlichen Familien an die Universität Tübingen kamen als zwischen dem Inkrafttreten der Klosterordnung von 1556 und dem Beginn des 30-jährigen Kriegs. Wesentlich zu dieser Bildungswelle haben die Klosterschulen beigetragen, aber auch die Lateinschulen, die durch die Reformation einen wichtigen Impuls erhalten hatten, haben daran ihren Anteil.²³ Durch die intensive Lektüre der lateinischen (und griechischen) Klassiker sowohl an den Lateinschulen als auch an den Klosterschulen blieb der humanistische Geist an den höheren evangelischen Schulen erhalten.

Auch Johannes Kepler profitierte von diesem speziellen Bildungssystem. Auch wenn seine schulischen Anfänge, bedingt durch seine Erkrankung in der frühen Kindheit, lange nicht unter einem günstigen Stern standen. Offensichtlich spielte die schulische Bildung im Elternhaus zu Beginn keine große Rolle, weshalb der Junge 1577 nicht in die Lateinschule der Stadt Leonberg gegeben wurde, sondern zunächst die dortige Deutsche Schule offensichtlich ein Jahr lang besuchte.²² Nach dem Umzug seiner Familie in die württembergische Amtsstadt Leonberg besuchte er die dortige Lateinschule in Leonberg. 1579 schaffte er den Eintritt in die zweite Lateinklasse. Der Ortswechsel seiner Eltern nach Ellmendingen, seine Mithilfe im elterlichen Gasthaus, aber auch seine angeschlagene Gesundheit führten zur Unterbrechung seiner schulischen Ausbildung. 1582 konnte er die zweite Lateinklasse fortsetzen, da seine Eltern nach Leonberg zurückgekehrt waren. Kepler erwarb dort so viel Wissen, dass er 1584 das sogenannte Landexamen, die Aufnahmeprüfung an die niedere Klosterschule in Adelberg bestand. Für die finanziell schlecht gestellte Familie die große Chance, den Sohn zu einem späteren Studium schicken zu können. Das mit dem bestandenen

Landexamen verbundene Stipendium sicherte, gute Leistungen vorausgesetzt, einen ziemlich sorgenfreien weiteren Bildungsweg, der letztlich zum Theologiestudium nach Tübingen führte. Zwei Jahre später, 1586, konnte er dank seiner schulischen Leistungen auf die höhere Klosterschule in Maulbronn wechseln. Bereits 1588 konnte er die Bakkalaureats-Prüfung in Tübingen ablegen. Von dort ging er nochmals nach Maulbronn zurück.

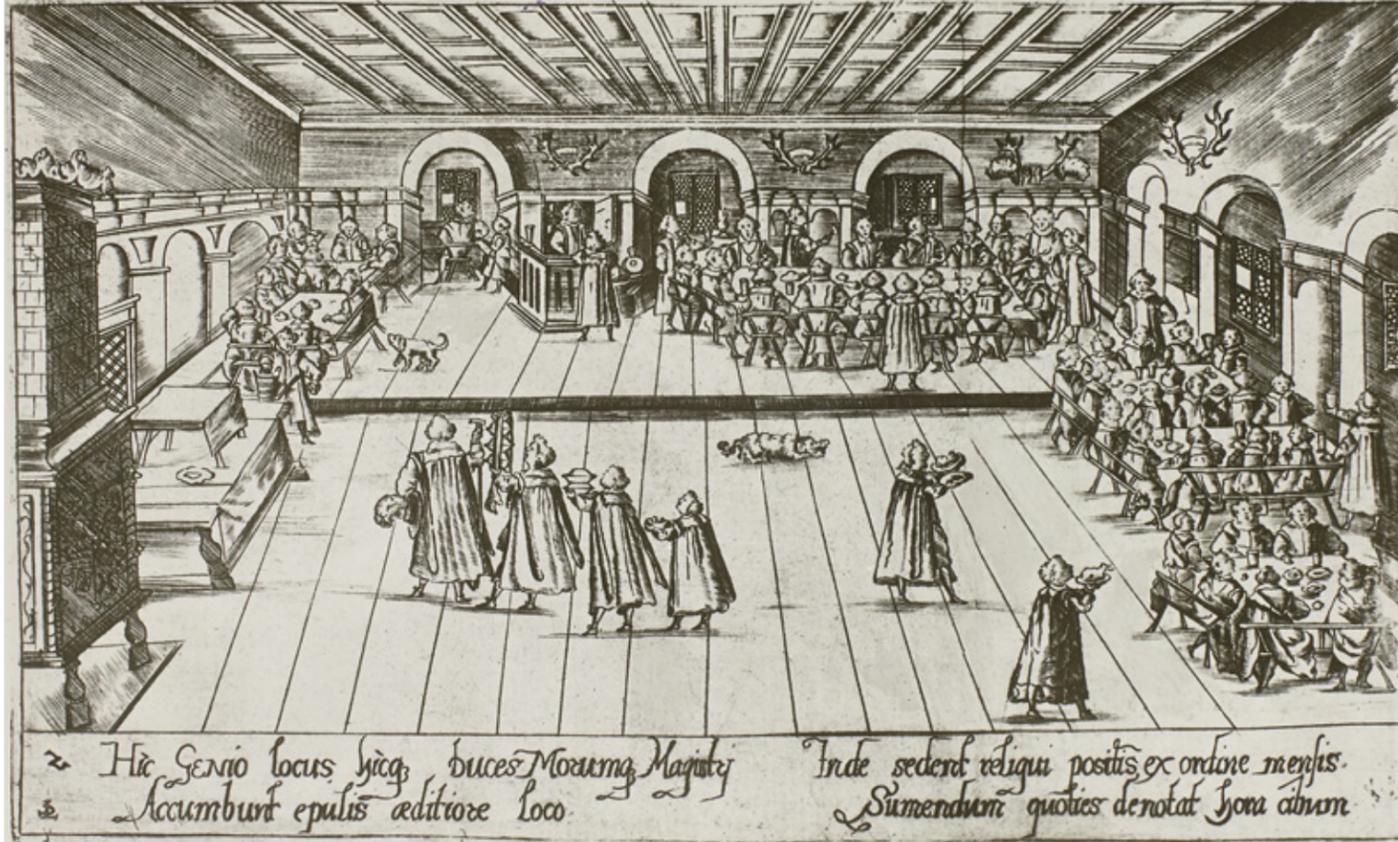
Im Mittelpunkt standen zunächst die philosophischen und sprachlichen Fächer, die später durch Geschichte und Mathematik (mit Astronomie) ergänzt wurden. Aus dem fürstlichen Stipendium erhielt er neben freier Kost und Logis im Stift sechs Gulden zur eigenen Verfügung. Darüber hinaus erhielt er die Zinsen aus einem Kapital von 400 fl., das der reichsstädtische Magistrat seiner Vaterstadt Weil der Stadt als Ruoff'sches Stipendium vergeben hatte. Er stellte sich



Kepler als Stifter an der Universität Tübingen
 1589 kam er ans Fürstliche Stipendium (Evangelische Stift) in Tübingen. Nach erfolgreichem Ablegen der Eingangsprüfungen vor dem Konsistorium in Stuttgart und dem Stift in Tübingen, musste er zunächst die Artes-Fakultät (später: Philosophische Fakultät) zum Grundstudium besuchen. Da er das Bakkalaureat bereits abgelegt hatte, ging es nun um einen Fächerkanon, der auf eine Allgemeinbildung ausgerichtet war.

damit finanziell besser als mancher Kommilitone. An der Artistenfakultät hörte Kepler Vorlesungen u. a. bei Martin Crusius, Erhard Cellius und Michael Mästlin über Aristoteles und über die griechischen Klassiker, über Ethik und Naturrecht sowie über Mathematik und Astronomie.²³ Der Lernfortschritt der Studenten wurde in Übungsdisputationen überprüft. Hierzu formulierten die Professoren zum Vorlesungsstoff Thesen, mit denen sich die Studenten öffentlich aus-

Quartalszeugnis der Stipendiaten. E, D, G, H, S und P stehen für die Fächer Ethik, Dialektik (Logik), Griechisch, Hebräisch, Sphaera (Astronomie) und Naturphilosophie (P). Kepler erzielte überall die Bestnote A (re. Zeile 13). Ev. Stift Tübingen

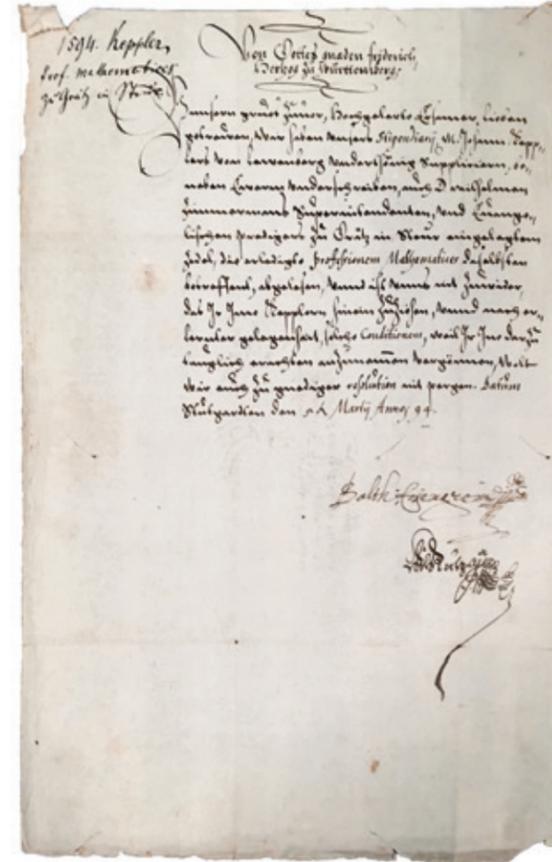


Speisesaal des Collegium Illustre in Tübingen, einer Bildungsanstalt für den evangelischen Hochadel, der dem Speisesaal im Ev. Stift ähnlich war. Kupferstich (um 1600) von Ludwig Ditzinger nach Johann Christ. Neuffer. Deutsche Fotothek Dresden, Rudolph Kramer 1966

einandersetzen mussten. Die Disputationen konnten auch publiziert werden. Anhand ihrer Themen lassen sich die Arbeitsgebiete der Professoren ablesen. Jeder Student musste mindestens an einer Disputation teilnehmen, um den Abschluss des Artes-Studiums zu erlangen. Kepler beteiligte sich in dieser Zeit auch am studentischen Leben im Stift und spielte dort bei der Aufführung eines Theaterstücks mit. Dort übernahm er eine der weiblichen Rollen, da Frauen nicht mitspielen durften.²⁴

Kepler sagt von sich selbst, er habe „häufig in physikalischen Disputationen der Kandidaten die Lehren des Kopernikus verteidigt und eine sorgfältige Disputation über die erste Bewegung, welche die Umwälzung der Erde bewirkt, geschrieben.“²⁵ Ich war schon so weit, daß ich der Erde die Bewegung der Sonne aus physikalischen oder, wenn man so will, metaphysischen Gründen zuschrieb.“

Ein besonderes Interesse galt stets den Fragen nach ursächlichen Zusammenhängen der Phänomene. Bei dem angesehenen Astronomen Michael Mästlin besuchte Kepler Lehrveranstaltungen in Geometrie und in Trigonometrie. Seinen astronomischen Vorlesungen legte Mästlin sein erst kürzlich 1582 erschienenes Lehrbuch ‚Epitome Astronomiae‘ zugrunde. Auch die neue Lehre des Kopernikus und dessen heliozentrisches Weltbild ließ Mästlin dezent einfließen. Später hielt Kepler in seiner Erinnerung fest: „Schon zu der Zeit, als ich mich vor sechs Jahren in Tübingen eifrig dem Verkehr mit dem hochberühmten Magister Michael Mästlin widmete, empfand ich, wie ungeschickt in vieler Hinsicht die bisher übliche Ansicht über den Bau der Welt ist.“²⁶ Ich ward daher von Kopernikus, den mein Lehrer sehr oft in seinen Vorlesungen erwähnte, so sehr entzückt, daß ich nicht nur häufig seine Ansichten [...] verteidigte, sondern auch eine



Herzoglicher Aufnahmebefehl ins Stift Tübingen, Stuttgart, 3. September 1589. „Von Maulbrunn: Johannes Capper von Lewenberg“ Ev. Stift, Archiv K III, F 16,5 (91)



Abb. links: Matthias Hafenreffer (1561-1619), Prof. an der theologischen Fakultät, seit 1618 auch Kanzler der Universität Tübingen



Abb. rechts: Stephan Gerlach (1546-1612), Prof. an der theologischen Fakultät

Ölgemälde Anonym 1604 (Hafenreffer) und Hans Ulrich Alt? 1604 (Gerlach). Professorengalerie, Museum Universität Tübingen MUT



Abb. von links: Martin Crusius (1526-1607), Prof. an der Artistenfakultät.

Erhard Cellius (1546-1606), Prof. der an Artistenfakultät.

Michael Mästlin (1550-1631), Prof. der an Artistenfakultät.

Ölgemälde von Hans Ulrich Alt 1590 (Crusius, Cellius) und Conrad Melberger 1619 (Mästlin). Professorengalerie, Museum Universität Tübingen MUT

sorgfältige Disputation über die These, daß die ‚erste Bewegung‘ von der Erde herrühre, verfaßte.“

Kepler fand dies so interessant, dass er sich der kopernikanischen Lehre anschloss. Später schrieb er: „Die Lehren des Kopernikus widersprechen der Natur der Dinge nicht nur nicht, sie dienen ihr vielmehr zur Stütze.“²⁷ Die Natur liebt die Einfachheit, sie liebt die Einheit. Nichts ist in ihr je untätig oder überflüssig; ja nicht selten wird ein Ding von ihr zu vielerlei Wirkungen verwendet. Nun aber ist bei den herkömmlichen Lehren in der Einführung von Hilfskreisen kein Ende abzusehen; bei Kopernikus dagegen ergeben sich die meisten Bewegungen aus der Annahme von ganz wenigen Kreisen. So hat jeder Mann nicht nur die Natur von jenem lästigen und unnützen Hausrat der ganzen großen Zahl von Kreisen befreit, er hat uns zudem einen immer noch unerschöpflichen Schatz von wahrhaft göttlichen Einsichten in die so herrliche Ordnung der ganzen Welt und aller Körper erschlossen.“

1591 legte er die Prüfung zum Magister Artium als Zweitbester unter 14 Kandidaten ab und begann das dreijährige Theologiestudium.²⁸ Die theologischen Vorlesungen vor allem bei Stephan Gerlach und Matthias Hafenreffer beschäftigten ihn nachhaltig. Aus wohlverstandener evangelischer Sicht wollte er die theologischen Lehren einer eigenen Prüfung unterziehen. Deutliche Schwierigkeiten machten ihm die Lehrsätze vom Abendmahl und der Realpräsenz Christi im Abendmahl. Als die Universität Tübingen 1594 eine Anfrage aus der Steiermark erhielt, in welcher die dortigen Landstände einen Nachfolger für ihren Landschaftsmathematiker und Professor am Grazer Gymnasium suchten, fiel die Wahl des Universitätssenats auf Kepler. Trotz aller dogmatischen Schwierigkeiten fiel es Kepler nicht leicht, seine angefangene Laufbahn im württembergischen Kirchen- oder Schuldienst aufzugeben. Er sagte nur unter der Bedingung zu, in württembergische Dienste zurückkehren zu können. Er war sich im Klaren darüber, dass seine Eltern lieber wollten, dass er das Theologiestudium beende, um sein Leben der Kirche widmen zu können.²⁹ Sie hofften deshalb, dass der Begleitbrief, den der Tübinger Universitätsprofessor an die Grazer Landschaftsschule schrieb, bewirken könnte, dass ihrem Sohn dort Gelegenheit

gegeben werde, sich im kirchlichen Dienst zu üben und in der Theologie weiterbilden zu können. Als „Professor der Mathematik und Moral“ erhielt er in Graz ein Gehalt von 150 Gulden. Seine Hauptaufgabe als Landschaftsmathematiker bestand in der Anfertigung des Landschaftskalenders, in dem neben meteorologischen Vorhersagen auch politische Prognostika erwartet wurden. Seine Kenntnisse in der astrologischen Wissenschaft waren ihm da sehr zuträglich. Für diese Dienste erhielt er ein eigenes Salär. ♦



PROF. DR. SABINE HOLTZ promovierte auf dem Gebiet der württembergischen Kirchengeschichte. Sie leitet seit 2012 die Abteilung Landesgeschichte und ist geschäftsführende Direktorin des Historischen Instituts an der Universität Stuttgart. Landesgeschichte und ihre Verflechtungen stehen im Mittelpunkt der Forschungsinteressen.

- 1 Zum Folgenden Eugen Schmid: Geschichte des Volksschulwesens in Altwürttemberg. Stuttgart, 1927, S. 36, 103, 120, 195 und 311.
- 2 Ordnung der deutschen Schulen 1559. In: Arend, Sabine (Bearb.): Die evangelischen Kirchenordnungen des XVI. Jahrhunderts Bd. 17, 1, Tübingen 2007, S. 583-587, hier S. 583.
- 3 Ordnung der deutschen Schulen 1559. In: Arend, Sabine (Bearb.): Die evangelischen Kirchenordnungen des XVI. Jahrhunderts Bd. 17, 1, Tübingen 2007, S. 583-587, hier S. 583.
- 4 Vgl. Holtz, Sabine: Zur Rolle des Musikunterrichts in der Theologenausbildung des württembergischen Herzogtums. In: Kremer, Joachim/Haag, Norbert / Holtz, Sabine (Hg.): Die Kantate im deutschen Südwesten. Quellen, Repertoire und Überlieferung 1700-1770. Mainz 2021, S. 11-23.
- 5 Ordnung der deutschen Schulen 1559. In: Arend, Sabine (Bearb.): Die evangelischen Kirchenordnungen des XVI. Jahrhunderts Bd. 17, 1, Tübingen 2007, S. 583-587, hier S. 584
- 6 Tabula elementaria pro pueris elementaris Tübingen 1582, S. Aiiir.
- 7 Vgl. Bauer, Lothar: Die große Kirchenordnung. Konzeption und Aufbau eines Bildungswesens unter Herzog Christoph, in: 450 Jahre Kirche und Schule in Württemberg. Ausstellung zur 450-Jahr-Feier der Evangelischen Landeskirche. Bilder, Dokumente und Texte, im Auftrag des Evangelischen Oberkirchenrats hrsg. vom Pädagogisch-Theologischen Zentrum, Stuttgart 1984, S. 46 -73, hier S. 69.
- 8 Vgl. ebenda, hier S. 71.
- 9 Ordnung der deutschen Schulen 1559. In: Arend, Sabine (Bearb.): Die evangelischen Kirchenordnungen des XVI. Jahrhunderts, Bd. 17, 1, Tübingen 2007, S. 583-587, hier S. 533
- 10 Ordnung der Lateinschulen 1559. In: Arend, Sabine (Bearbb.): die evangelischen Kirchenordnungen des des XVI. j)ahrhunderts Bd. 17, 1, Tübingen 2007, S. 528-552, hier S. 536
- 11 Ordnung der deutschen Schulen 1559. In: Arend, Sabine (Bearb.): Die evangelischen Kirchenordnungen des XVI. Jahrhunderts Bd. 17, 1, Tübingen 2007, S. 528-552, hier: 537
- 12 Ordnung der Lateinschulen 1559. In: Arend, Sabine (Bearb.): Die evangelischen Kirchenordnungen des XVI. Jahrhunderts Bd. 17, 1, Tübingen 2007, S. 528-552, hier S. 536.
- 13 Ordnung der Lateinschulen 1559. In: Arend, Sabine (Bearb.): Die evangelischen Kirchenordnungen des XVI. jahrhunderts Bd. 17, 1, Tübingen 2007, S. 528-552, hier S. 538

- 14 Bauer, Lothar: Die große Kirchenordnung. Konzeption und Aufbau eines Bildungswesens unter Herzog Christoph, in: 450 Jahre Kirche und Schule in Württemberg. Ausstellung zur 450-Jahr-Feier der Evangelischen Landeskirche. Bilder, Dokumente und Texte, im Auftrag des Evangelischen Oberkirchenrats hrsg. vom Pädagogisch-Theologischen Zentrum, Stuttgart 1984, S. 46-73, hier S. 71.
- 15 Ordnung der Klosterschulen 1559. In: Arend, Sabine (Bearb.): Die evangelischen Kirchenordnungen des XVI. Jahrhunderts Bd. 17, 1, Tübingen 2007, S. 361 -380, hier S. 368-372
- 16 Vgl. Ehmer, Hermann: Die württembergischen Klosterschulen. In: Die württembergischen Klosterschulen und Seminare. Das Evangelisch-Theologische Seminar Urach 1818-1977. Hg. vom Verein für württembergische Kirchengeschichte. Metzingen 1991, S. 10-52, hier S. 41.
- 17 Vgl. Ordnung der Klosterschulen 1559. In: Arend, Sabine (Bearb.): Die evangelischen Kirchenordnungen des XVI. Jahrhunderts Bd. 17, 1, Tübingen 2007, S. 361 -380, hier S. 368-372
- 18 Leube, Martin: Geschichte des Tübinger Stifts. Erster Teil: 16. und 17. Jahrhundert-Stuttgart 1921, S. 16f.
- 19 Hahn, Joachim / Mayer, Hans: Das Evangelische Stift in Tübingen. Geschichte und Gegenwart – Zwischen Weltgeist und Frömmigkeit. Stuttgart 1985, S. 123f.
- 20 Die Ordnung des Tübinger Stipendiums 1559. In: Arend, Sabine (Bearb.): Die evangelischen Kirchenordnungen des XVI. Jahrhunderts Bd. 17, 3, Tübingen 2007, S. 555-579, hier S. 557.
- 21 Brecht/Ehmer: Reformation, S. 333.
- 22 Zu den biographischen Daten Günther, Siegmund/Hartmann, Julius: Art. Johannes Kepler, In: Allgemeine Deutsche Biographie 15, 1882, S. 603-624. URL: [https://www.deutsche-biographie.de/pnd118561448.html#ndbcontent \(07.08.2021\).](https://de.wikisource.org/w/index.php?title=AD-B:Kepler,_Johannes&oldid=- (07.08.2021); widersprüchliche Daten bei List, Martha: Art. Kepler, Johannes. In: Neue Deutsche Biographie 11, 1977, S. 494-508 [Online-Version]; URL: <a href=)
- 23 Zum Folgenden List, Martha: Art. Kepler, Johannes. In: Neue Deutsche Biographie 11, 1977, S. 494-508 [Online-Version]; URL: [https://www.deutsche-biographie.de/pnd118561448.html#ndbcontent \(07.08.2021\).](https://www.deutsche-biographie.de/pnd118561448.html#ndbcontent (07.08.2021).)
- 24 Frisch, Christian von: Joannis Kepleri Astronomi Opera Omnia, Bd. 8,2. Frankfurt /M., Erlangen 1871, S. 672. Vgl. Schmidt, Justus: Johann Kepler. Sein Leben in Bildern und eigenen Berichten. 2. Aufl. Linz 1970, S. 221.

- 25 Frisch, Christian von: Joannis Kepleri Astronomi Opera Omnia, Bd. 8,2. Frankfurt /M., Erlangen 1871, S. 672. Vgl. Schmidt, Justus: Johann Kepler. Sein Leben in Bildern und eigenen Berichten. 2. Aufl. Linz 1970, S. 221. Vgl. Hoppe, Johannes: Johannes Kepler. 5. Aufl. Leipzig 1987 (Biographien hervorragender Wissenschaftler, Techniker und Mediziner, 17), S. 18.
- 26 Zitiert bei Kuhn, Wilfried: Ideen-geschichte der Physik. Eine Analyse der Entwicklung der Physik im historischen Kontext. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg 2016, S. 89 (unter Verweisung auf die Einleitung zu Keplers Frühwerk Prodiromus, 1596).
- 27 Zitiert bei Bühke, Thomas: Sternstunden der Astronomie. Von Kopernikus bis Oppenheimer. München 2001, S. 38.
- 28 Frisch, Christian von: Joannis Kepleri Astronomi Opera Omnia, Bd. 8,2. Frankfurt /M., Erlangen 1871, S. 672. Vgl. Schmidt, Justus: Johann Kepler. Sein Leben in Bildern und eigenen Berichten. 2. Aufl. Linz 1970, S. 221.
- 29 Zum Folgenden Dyck, Walther / Caspar, Max (Hg.): Johannes Kepler. Gesammelte Werke. Bd. 13. München 1945, Brief Nr. 8. Vgl. Schmidt, Justus: Johann Kepler. Sein Leben in Bildern und eigenen Berichten. 2. Aufl. Linz 1970, S. 221.

Keplers Reisen

SENTA HERKLE

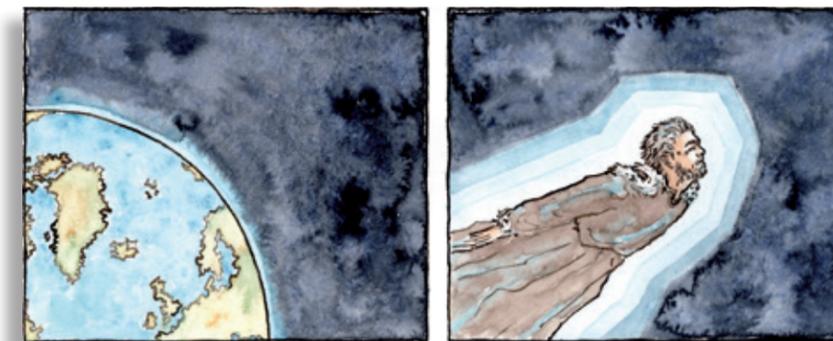
„5000 deutsche Meilen entfernt liegt in der Tiefe des Äthers die Insel Levania. Der Weg von hier dorthin oder von dort hierher steht nur sehr selten offen. Und wenn er offensteht, kann unser Volk ihn zwar leicht beschreiben, für menschliche Reisende ist er aber ganz schwierig und mit höchster Lebensgefahr verbunden. Keine Freunde sitzender Lebensweise werden von uns in unsere Gemeinschaft aufgenommen, keine dicken, keine verzärtelten Leute. Vielmehr wählen wir die aus, die ihr Leben lang ständig auf schnellen Pferden reiten oder die häufig nach Indien segeln; sie müssen daran gewöhnt sein, sich von Zwieback, Knoblauch, Dörrfisch und abscheulichen Speisen zu ernähren. Besonders eignen sich für uns saftlose alte Weiber, die von Kindheit an mit der Kunst vertraut sind, nachts auf Böcken, Astgabeln oder zerschlissenen Mänteln zu reiten und riesenhafte Entfernungen zwischen Ländern überwinden. Deutsche Männer sind überhaupt nicht geeignet. Spanier mit ihren drahtigen Körpern nehmen wir gerne auf.“¹

In seinem Werk ‚Somnium‘ schildert Johannes Kepler seinen Traum von einer Reise zum Mond und geht detailliert auf die Bedingungen einer solchen Reise wie auch auf die notwendige Konstitution potentieller Mondreisender ein. Obwohl er zu Lebzeiten reisend knapp 25.000 Kilometer zurückgelegt hat, sind derart minutiöse Berichte über seine eigenen, real unternommenen Reisen nicht überliefert.² Die Beschreibung der Reisebedingungen auf den Mond erinnern allerdings an die Beschwerlich- und Entbehrlichkeit des frühneuzeitlichen Reisens, das genauso wenig für „verzärtelte Leute“ geeignet war. Auch wenn Kepler selbst wenig Auskunft über seine eigenen Reiseerfahrungen gibt, so lassen sich besonders anhand seiner Briefe und Aufzeichnungen die infrastrukturellen Bedingungen wie auch die Gefahren und Schwierigkeiten frühneuzeitlichen Reisens ablesen.

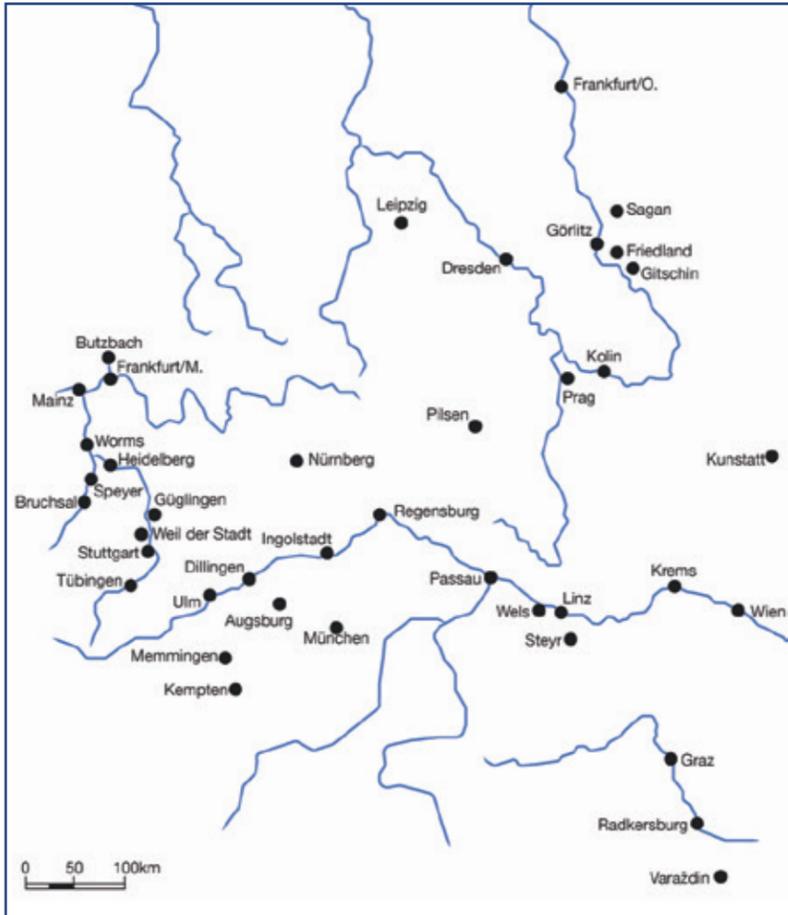
Insgesamt 70 Reisen listet Hella Kothmann in einem zweiteiligen Itinerarium auf, die Johannes Kepler zwischen 1594 und 1630 unternommen hat.³ Nach seinem Studium in Tübingen im Herzogtum Württemberg führte ihn sein beruflicher Weg zunächst in die rund 650 Kilometer entfernte kaiserliche Residenzstadt Graz, wo er eine Stelle als Landschaftsmathematiker und Lehrer antrat. Von Graz aus siedelte er nach Prag über, um dort als kaiserlicher Mathematiker Dienst zu tun.⁴ Es folgten Arbeitsverhältnisse in Linz, ebenfalls als Landschaftsmathematiker, in der

Reichsstadt Ulm⁵ und in Sagan in Schlesien. Dabei verband sich seine persönliche Situation bzw. Konfession immer wieder mit seiner beruflichen Laufbahn, zum Beispiel bei seiner ersten Anstellung in Graz in der dortigen protestantischen Stiftsschule. In Graz setzte Erzherzog Ferdinand II. nachdrücklich die Gegenreformation durch und ließ in diesem Zusammenhang im Jahr 1598 die Stiftsschule schließen und die dort angestellten Lehrer und Prediger des Landes verweisen. Auf einem Floß soll der nun arbeitslos gewordene Johannes Kepler auf der Mur ins Exil nach Ungarn gereist, aber – vermutlich dank guter Beziehungen zur Grazer Jesuitenuniversität – bald wieder nach Graz zurückgekehrt sein. Die konfessionellen Auseinandersetzungen in Graz bedingten aber schließlich zwei Jahre später, dass er eine Anstellung als kaiserlicher Astronom in Prag annahm.⁶

Allein die Liste der Wohnorte Keplers verweist auf die vielen Kilometer, die er im Laufe seines Lebens reisend zurückgelegt hat. Von seinen jeweiligen Wohnorten unternahm Kepler zudem viele Reisen privater wie beruflicher Art: Er reiste nach Ulm und Nürnberg, um den Druck seiner Werke in Auftrag zu geben oder diesen zu überprüfen, er ritt auf die Messen in Frankfurt und Leipzig, um dort seine Werke zu verkaufen, er reiste von Linz aus in das Herzogtum Württemberg, um seiner Mutter beizustehen, als diese der Hexerei angeklagt wurde. Er reiste, um Naturphänomene zu



‚Somnium‘ als Illustration von Ava und Susan Hösl, erschienen im Rahmen der Kepler Jubiläumsausstellung



Die meisten Menschen des 16. und 17. Jahrhunderts hatten selten die Möglichkeit ihre nähere Umgebung oder Wohnort zu verlassen. Keplers Leben prägten dagegen zahlreiche Umzüge und Reisen zu Pferd, mit der Kutsche oder per Schiff. Illustration: Celina Brandes

betrachten und Wetterbeobachtungen aufzuzeichnen, er besuchte die Sternwarte des Landgrafen Philipp III. von Hessen-Butzbach, die dieser im Schloss Butzbach eingerichtet hatte, er unternahm Reisen, um potentielle Ehefrauen kennenzulernen oder Erbschaftsangelegenheiten zu regeln. Oftmals konnte er auf seinen Reisen das Berufliche mit dem Privaten verbinden, beispielsweise als er gezwungenermaßen aufgrund des Hexenprozesses gegen seine Mutter im Herzogtum Württemberg zugegen war und von dort aus etwa im Jahr 1620 seinen ehemaligen Lehrer Michael Mästlin in Tübingen aufsuchte, um mit ihm eine fachliche Diskussion zu führen.⁷

Unterwegs auf dem Land und auf dem Wasser

Zu Fuß, auf dem Pferd, im Wagen, mit dem Schiff. Diese Möglichkeiten standen frühneuzeitlichen Rei-

senden zur Verfügung, um ihre Ziele zu erreichen. Im Gegensatz zum Reisen auf dem Land bot der Wasserweg immer eine einigermaßen kalkulierbare und bequeme Möglichkeit, längere Distanzen zu überwinden. Die Personenbeförderung auf dem Land veränderte sich hingegen im Laufe der frühen Neuzeit erheblich, vor allem durch die europaweite Etablierung eines Etappensystems – die Einrichtung von ‚Posten‘, die einen Pferdewechsel und den nach Fahrplan geregelten Postkutschenverkehr erlaubten – das spätestens in der Mitte des 17. Jahrhunderts systematisch ausgebaut wurde.⁸ Johannes Kepler (1571–1630) konnte auf diese infrastrukturelle Neuerung dementsprechend nur eingeschränkt zugreifen. Er nutzte die zu seiner Zeit üblichen Strukturen, indem er beispielsweise mehrfach im Tross von Kaufleuten mitreiste. So ritt er etwa im Jahr 1627 von Ulm aus mit dort ansässigen Kaufleuten – „cum mercatoribus Ulmesibus“⁹ – auf die Messe nach Frankfurt. Die Möglichkeit, sich Fuhr- und Kaufleuten anzuschließen, nutzten viele Reisende, um in einer reiseerfahrenen Gruppe sicher ans Ziel zu gelangen.

Viele seiner Reisen legte Johannes Kepler auf dem Rücken von Pferden zurück, die er oft zu diesem Zweck erwarb oder lieh und anschließend verkaufte oder zurückgab. Rund 60 Kilometer pro Tag konnte ein Reiter mit leichtem Gepäck schaffen. Um die Reise zu erleichtern und schneller voranzukommen, konnte sperriges und schweres Gepäck bei Fuhrleuten oder Schiffern aufgegeben werden. Diese Option nutzte Kepler mehrfach, um beispielsweise seine Bücher auf die Messen in Leipzig und Frankfurt zu versenden. Die Kosten, die Keplers Reisen verursachten, sind in wenigen Fällen nachvollziehbar und verweisen darauf, dass Reisen per Pferd oder gar Umzüge in der frühen Neuzeit ein teures Unterfangen waren, weshalb Johannes Kepler auch regelmäßig die Erstattung seiner Reisekosten einforderte. So ist beispielsweise überliefert, dass seine erste rund vierzehntägige und 650 Kilometer lange Reise von Tübingen nach Graz 50 Gulden kostete. Er bezog zu diesem Zeitpunkt vierteljährlich rund 37 Gulden, was veranschaulicht, wie hoch die Reisekosten bei diesem Umzug lagen.¹⁰ Unterkunft fand Johannes Kepler bei seinen Reisen zumeist bei Bekannten, Gönnern oder Kollegen; in Prag wohnte er etwa im Haus des Tycho Brahe, in Ulm bei Gregor Horst, einem

bekanntem Stadtarzt, in Graz bei einem Verwandten seiner Ehefrau Barbara.¹¹

Das Reisen auf dem Landweg in der frühen Neuzeit war dabei mit einigen Herausforderungen verbunden. Ein schwer kalkulierbarer Faktor war das Wetter, das nicht selten zu erheblichen Zeitverzögerungen oder auch Gefährdungen der Reisenden führte. Es war darüber hinaus unbedingt notwendig, eine Vorstellung der zurückzulegenden Wege, der Geographie, Topographie wie auch der infrastrukturellen Gegebenheiten der Reiseroute zu haben. Die Wege führten über Berge, durch Wälder, an Flüssen entlang. Zölle und Kosten für die Unterbringung mussten beglichen und Ländergrenzen passiert werden. Je nach Verfügbarkeit führten Reisende zur Orientierung Karten, geeignetes Instrumentarium, Handbücher oder beispielsweise Reisebeschreibungen mit. Ein nützliches und notwendiges Hilfsmittel, das in der frühen Neuzeit zunehmend an Verbreitung gewann, war darüber hinaus ein Reisepass, zeitgenössisch auch ‚passbrief‘ oder auch beispielsweise ‚passzettel‘ genannt, der dem Inhaber ein möglichst ungehindertes Reisen gestattete.¹² Für seine Übersiedlung von Linz nach Ulm im Jahr 1626 zum Druck der ‚Rudolphinischen Tafeln‘ ist beispielsweise überliefert, dass Johannes Kepler einen von der kaiserlichen Hofkanzlei ausgestellten Passbrief mit sich führte, der anwies, den „Kay. Mathematicum aller orthen frey durchpaßieren zulaßen“.¹³

Wenn sein Weg an der Donau oder am Rhein entlang führte, nutzte Johannes Kepler auch häufig das Schiff als Verkehrsmittel. Hella Kothmann weist darauf hin, dass er die Schiffsreisen in seinen Briefen häufiger thematisierte als die Reisen zu Land. So musste er etwa 1627 ohne seine Familie von Regensburg aus in einem Wagen abreisen, weil Eisschollen auf der Donau – das „schiff vor eis nit fort gemacht“¹⁴ – eine Abfahrt verhinderten. Seinem Assistenten und späteren Schwiegersohn Jakob Bartsch berichtete er im Jahr 1629 von seiner Reise im Oktober des Jahres 1627, dass er von

Frankfurt aus „auf langsamer Reise dem Rhein entlang und durch Württemberg nach Ulm“ zurückkehrte.¹⁵

Als seine Mutter Katharina Kepler wegen Hexerei angeklagt wurde, reiste Johannes Kepler im Jahr 1620 von Linz aus donauaufwärts mitsamt Familie und Hausrat mit dem Schiff nach Regensburg. Flussaufwärts dauerte eine Schifffahrt naturgemäß deutlich länger; in diese Richtung wurden die Schiffe von Pferden oder Ochsen gezogen. Diese harte Arbeit wurde Treideln oder auch beispielsweise Schiffziehen genannt. In Regensburg angekommen quartierte Johannes Kepler seine Familie mitsamt seinem gesamten Hausrat inklusive Büchern und astronomischem Instrumentarium ein, stieg auf ein Pferd um und ritt über Ulm und Stuttgart nach Göggingen, um seine Mutter zu unterstützen. Im Vorfeld des Hexenprozesses gegen seine Mutter erregte Keplers Schrift ‚Somnium‘ einiges Aufsehen, die er im Jahr 1609 fertiggestellt hatte. Zwar hatte er sie nicht publiziert, dennoch fand sie Verbreitung unter den Zeitgenossen und wurde unter anderem von der Klägersseite im Hexenprozess gegen seine Mutter Katharina verwendet. Schon das

Seine Reisen führten Kepler auch öfter nach Regensburg. Stadtansicht ‚Ratisbona‘ aus der Weltchronik von Hartmann Schedel, Nürnberg 1493. Bayerische Staatsbibliothek, bs00034024-1



eingangs angeführte Zitat verweist auf die teils brisanten Inhalte der Schrift. Kepler hielt in den Notizen zum Traum fest, dass sein Haus „gut auf sechs Jahre Quälerei hätte verzichten können und auch ich selbst auf die letzte Reise [Anm.: im Jahr 1620] von einem Jahr“¹⁶, wenn seine Schrift nicht verbreitet worden wäre. Der zeitaufwändige Prozess gegen seine Mutter erforderte seine Präsenz im Herzogtum Württemberg und machte es notwendig, dass er den Weg von Linz in den deutschen Südwesten auf sich nahm.

Ein Brief Keplers an Herzog Johann Friedrich von Württemberg aus dem Jahr 1620 verweist zudem auf die Auswirkungen des kurz zuvor ausgebrochenen Dreißigjährigen Krieges (1618–1648) und auf die Reisesituation in Zeiten machtpolitischer und konfessioneller Konflikte. In diesem Brief bat Johannes Kepler den Herzog um Aufschub des Prozesses gegen seine Mutter, „weil Ich durch das jetzige Kriegswesen, wölches das Land ob der Ens vrpötzlich und allerdings vberschwemmet, an eilender Zueraisung höchst gehindert werde“.¹⁷ Der Krieg nahm aber auch Einfluss auf seine familiäre Situation – die Übersiedlung seiner Familie von Linz nach Regensburg war seiner Aussage nach der kriegsbedingt gefährlichen Situation in Linz geschuldet.

Die letzten Reisen im Jahr 1630

In seinem Todesjahr 1630 sind insgesamt vier Reisen von Johannes Kepler überliefert. Inzwischen hatte Kepler ein Angebot Wallensteins angenommen und war mitsamt Familie im Jahr 1628 von Regensburg nach Sagan in Schlesien (heute Polen) übergesiedelt. Von dort aus besuchte er im März/April des Jahres 1630 Wallenstein in dessen Residenz im rund 95 Kilometer entfernten Gitschin in Nordböhmen. Im September reiste er ins schlesische Luban, um dort den Transport seiner Ephemeriden in Bücherfässern auf die Messe nach Frankfurt zu organisieren. Nur wenige Wochen später – am 18. Oktober 1630 – brach Kepler nach Leipzig auf, um die dortige Messe zu besuchen, auf die er ebenfalls Bücherfässer hatte senden lassen. Für die Strecke von rund 280 Kilometern benötigte er sechs Tage. Johannes Kepler blieb in Leipzig – er logierte im Haus seines Kollegen und Universitätsprofessors Philipp Müller –, bis die Messe am 21. Oktober beendet war. Für seine Reise nach Leipzig nutzte Kepler ein Pferd, das sich bereits in seinem Besitz befand, das aber an der Infektionskrankheit Mykose litt, weshalb er Philipp Müller im Vorfeld anschrrieb und um eine entsprechende Unterbringung und Versorgung seines Pferdes vor Ort bat: „Würdest Du bitte Ausschau halten nach einem Platz in Deiner Nachbarschaft oder in irgendeiner abgelegenen Ecke Deines Wohnsitzes, wo ich meinem an Mukose erkrankten Pferd Stroh unterstreuen und einen Eimer vorsetzen kann, aus dem es seinen

Hafer fressen soll, den Du bitte auf meine Kosten vorher besorgst, zusammen mit gehäckseltem Stroh und ein paar Handvoll Heu.“¹⁸

Von Leipzig aus machte er zunächst einen mehrtägigen Abstecher nach Nürnberg, um dort die Herstellung einer Weltkarte zu überprüfen, die als Beigabe in den ‚Rudolphinischen Tafeln‘ erscheinen sollte. Anschließend steuerte Kepler – mit einem Zwischenstopp in Regensburg – Linz an. Deutlich geschwächt und krank traf Johannes Kepler am zweiten November in Regensburg ein.¹⁹ „Während der neulichen Tagung des Reichstags kam unser Kepler auf einem mageren Gaul (den er hernach um zwei Gulden verkauft hat) in unserer Stadt an“, berichtete Stephan Lansius in einem Brief an einen anonymen Freund in Tübingen.²⁰ Linz, das eigentliche Ziel seiner Reise, hatte er nicht mehr erreicht – er starb in Regensburg wenige Tage nach seiner Ankunft im Haus des Handelsmannes Hillebrand Billi am 15. November. Allein in seinem letzten Jahr hatte Johannes Kepler auf den überlieferten Reisen rund 1000 Kilometer – zumeist zu Pferd – zurückgelegt.

Der Blick auf Johannes Keplers Reisen legt nicht nur die infrastrukturellen Rahmenbedingungen frühneuzeitlichen Reisens offen, er verweist auch auf die Dauer einer Reise, die Gefahren und die Notwendigkeit eines möglichst genauen und sicheren Reiseplans. Zu Fuß, auf dem Pferd, im Wagen, mit dem Schiff – Johannes Kepler nutzte alle ihm zur Verfügung stehenden und jeweils der Situation angepassten Reismittel, um seine Ziele zu erreichen. ♦



DR. SENTA HERKLE arbeitet als Akademische Rätin a. Z. in der Abteilung Landesgeschichte am Historischen Institut der Universität Stuttgart. Ihr Forschungsinteresse gilt besonders der Handwerks- und Handelsgeschichte der Frühen Neuzeit sowie der Umbruchszeit um 1800.

1 Kepler, Johannes: Der Traum, oder: Mond-Astronomie. Aus dem Lateinischen von Hans Bungarten und mit einem Leitfaden für Mondreisende von Beatrix Langner. Berlin 2011.

2 Vgl. Kothmann, Hella: Die Reisen des Johannes Kepler. Eine Chronologie – Ein Itinerarium. In: Boockmann, Friederike; Di Liscia, Daniel A.; Kothmann, Hella (Hg.): *Miscellanea Kepleriana. Festschrift für Volker Bialas zum 65. Geburtstag* (Algorismus. Studien zur Geschichte der Mathematik und der Naturwissenschaften, Heft 47), Augsburg 2005, S. 229–246, hier S. 229.

3 Kothmann, Hella: Die Reisen des Johannes Kepler. Eine Chronologie – Ein Itinerarium. In: Boockmann, Friederike; Di Liscia, Daniel A.; Kothmann, Hella (Hg.): *Miscellanea Kepleriana. Festschrift für Volker Bialas zum 65. Geburtstag* (Algorismus. Studien zur Geschichte der Mathematik und der Naturwissenschaften, Heft 47), Augsburg 2005, S. 229–246; Kothmann, Hella: Die Reisen des Johannes Kepler. Eine Chronologie – Ein Itinerarium. Teil 2: 1614–1630. In: *Berichte der Kepler-Kommission*, Heft 16, 2005, S. 43–67.

4 Vgl. Zu den beruflichen Stationen vgl. Caspar, Max: Johannes Kepler. Hg. von der Kepler-Gesellschaft, Weil der Stadt, 4. Aufl. Stuttgart 1995 (Nachdruck d. 3. Aufl. v. 1958); Bialas, Volker: Johannes Kepler. München 2004. Zu Keplers Zeit in Prag und Linz vgl. auch Bauer, Katrin: *Der andere Kepler. Vom Aufstieg eines frühneuzeitlichen Gelehrten mit Hilfe der Astrologie*. Erlangen-Nürnberg Dissertation 2014, <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bvb:29-opus4-51657>, S. 35–97.

5 Vgl. Albinus, Hans-Joachim; Suckrau, Detlef: *Reminiscenzen an Johannes Keplers Aufenthalt in Ulm 1626–1627. Neues, Merkwürdiges und ungelöste Rätsel*, in: *Ulm und Oberschwaben. Zeitschrift für Geschichte, Kunst und Kultur*, Bd. 61 (2019), S. 175–211.

6 Vgl. zur Grazer Zeit von Johannes Kepler: Sutter, Berthold: *Johannes Kepler und Graz im Spannungsfeld zwischen geistigem Fortschritt und Politik*, Graz 1975; Johannes Kepler 1571–1971. *Gedenkschrift der Universität Graz*, Graz 1975; <https://www.keplerraum.at/www/index.php/kepler/biografie> (17.09.2021).

7 Vgl. Kothmann, Hella: Die Reisen des Johannes Kepler. Eine Chronologie – Ein Itinerarium. Teil 2: 1614–1630. In: *Berichte der Kepler-Kommission*, Heft 16, 2005, S. 43–67, hier S. 50.

8 Vgl. Beyrer, Klaus: *Die Postkutschenreise*, Tübingen 1985; Behringer, Wolfgang: *Im*

Zeichen des Merkur. Reichspost und Kommunikationsrevolution in der Frühen Neuzeit (= Veröffentlichungen des Max-Planck-Instituts für Geschichte, Bd. 189), Göttingen 2002; Beyrer, Klaus, ‚Personenbeförderung‘, in: *Enzyklopädie der Neuzeit Online*, Im Auftrag des Kulturwissenschaftlichen Instituts (Essen) und in Verbindung mit den Fachherausgebern herausgegeben von Friedrich Jaeger. Copyright © J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung und Carl Ernst Poeschel Verlag GmbH 2005–2012. Consulted online on 18 September 2021 http://dx.doi.org/10.1163/2352-0248_edn_COM_337071 (17.09.2021).

9 KGW18, Brief Nr. 310 zit. nach Kothmann, Hella: Die Reisen des Johannes Kepler. Eine Chronologie – Ein Itinerarium. Teil 2: 1614–1630. In: *Berichte der Kepler-Kommission*, Heft 16, 2005, S. 43–67, hier S. 58.

10 Vgl. KGW 19, Nr. 6 und 7; Kothmann, Hella: Die Reisen des Johannes Kepler. Eine Chronologie – Ein Itinerarium. In: Boockmann, Friederike; Di Liscia, Daniel A.; Kothmann, Hella (Hg.): *Miscellanea Kepleriana. Festschrift für Volker Bialas zum 65. Geburtstag* (Algorismus. Studien zur Geschichte der Mathematik und der Naturwissenschaften, Heft 47), Augsburg 2005, S. 229–246, hier S. 233.

11 Vgl. Kothmann, Hella: Die Reisen des Johannes Kepler. Eine Chronologie – Ein Itinerarium. In: Boockmann, Friederike; Di Liscia, Daniel A.; Kothmann, Hella (Hg.): *Miscellanea Kepleriana. Festschrift für Volker Bialas zum 65. Geburtstag* (Algorismus. Studien zur Geschichte der Mathematik und der Naturwissenschaften, Heft 47), Augsburg 2005, S. 229–246, hier S. 233.

12 Vgl. Groebner, Valentin: *Der Schein der Person. Steckbrief, Ausweis und Kontrolle im Europa des Mittelalters*. München 2004; *Didczuneit, Veit, ‚Reisepass‘*, in: *Enzyklopädie der Neuzeit Online*, Im Auftrag des Kulturwissenschaftlichen Instituts (Essen) und in Verbindung mit den Fachherausge-

bern herausgegeben von Friedrich Jaeger. Copyright © J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung und Carl Ernst Poeschel Verlag GmbH 2005–2012. Consulted online on 18 September 2021 http://dx.doi.org/10.1163/2352-0248_edn_SIM_325879 (17.09.2021); Behringer, Wolfgang, ‚Beschleunigung‘, in: *Enzyklopädie der Neuzeit Online*, Im Auftrag des Kulturwissenschaftlichen Instituts (Essen) und in Verbindung mit den Fachherausgebern herausgegeben von Friedrich Jaeger. Copyright © J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung und Carl Ernst Poeschel Verlag GmbH 2005–2012. Consulted online on 18 September 2021 http://dx.doi.org/10.1163/2352-0248_edn_SIM_246188 (17.09.2021).

13 KGW18, Brief Nr. 323 zit. nach Kothmann, Hella: Die Reisen des Johannes Kepler. Eine Chronologie – Ein Itinerarium. Teil 2: 1614–1630. In: *Berichte der Kepler-Kommission*, Heft 16, 2005, S. 43–67, hier S. 58.

14 KGW18, Brief Nr. 310 zit. nach Kothmann, Hella: Die Reisen des Johannes Kepler. Eine Chronologie – Ein Itinerarium. Teil 2: 1614–1630. In: *Berichte der Kepler-Kommission*, Heft 16, 2005, S. 43–67, hier S. 58.

15 Brief an Bartsch vom 6.11.1629. In: Johannes Kepler in seinen Briefen, Bd. II, Max Caspar und Walther von Dyck (Hg.), S. 300–308, hier S. 302. München und Berlin, Verlag von R. Oldenbourg

16 Reise auf den Mond, Johannes Keplers Noten zum Traum. Geschrieben in den Jahren 1620–30, vgl. Johannes Kepler: ‚Der Traum, oder: Mond-Astronomie‘. Aus dem Lateinischen von Hans Bungarten und mit einem Leitfaden für Mondreisende von Beatrix Langner. Berlin 2011.

17 KGW 18, Brief Nr. 39.

18 Brief (1141a) Johannes Kepler an Philipp Müller in Leipzig, Sagan 18.09.1830. *Württembergischen Landesbibliothek* (Signatur: Z 8799-126.6); gedruckt bei: Döring, Detlef: *Die Beziehungen zwischen Johannes Kepler und dem Leipziger Mathematikprofessor Philipp Müller: eine Darstellung auf der Grundlage neuentdeckter Quellen und unter besonderer Berücksichtigung der Astronomiegeschichte an der Universität Leipzig*. - Berlin: Akad.-Verl., 1986., S. 46–49

19 Freitag, Matthias: *Kepler und Regensburg*. In: Dietz, Karlheinz und Waldherr, Gerhard: *Berühmte Regensburger. Lebensbilder aus zwei Jahrtausenden*. Regensburg 1997, S. 153–161.

20 Stephan Lansius an einen Freund in Tübingen, Regensburg, 24. Januar 1631. In: Johannes Kepler in seinen Briefen, Bd. II, Max Caspar und Walther von Dyck (Hg.), S. 300–334, hier S. 333. München und Berlin, Verlag von R. Oldenbourg

berausgegeben von Friedrich Jaeger. Copyright © J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung und Carl Ernst Poeschel Verlag GmbH 2005–2012. Consulted online on 18 September 2021 http://dx.doi.org/10.1163/2352-0248_edn_COM_337071 (17.09.2021).

13 KGW 19, Brief S. 113 zit. nach Kothmann, Hella: Die Reisen des Johannes Kepler. Eine Chronologie – Ein Itinerarium. Teil 2: 1614–1630. In: *Berichte der Kepler-Kommission*, Heft 16, 2005, S. 43–67, hier S. 58.

14 KGW 18, Brief Nr. 323 zit. nach Kothmann, Hella: Die Reisen des Johannes Kepler. Eine Chronologie – Ein Itinerarium. Teil 2: 1614–1630. In: *Berichte der Kepler-Kommission*, Heft 16, 2005, S. 43–67, hier S. 58.

15 Brief an Bartsch vom 6.11.1629. In: Johannes Kepler in seinen Briefen, Bd. II, Max Caspar und Walther von Dyck (Hg.), S. 300–308, hier S. 302. München und Berlin, Verlag von R. Oldenbourg

16 Reise auf den Mond, Johannes Keplers Noten zum Traum. Geschrieben in den Jahren 1620–30, vgl. Johannes Kepler: ‚Der Traum, oder: Mond-Astronomie‘. Aus dem Lateinischen von Hans Bungarten und mit einem Leitfaden für Mondreisende von Beatrix Langner. Berlin 2011.

17 KGW 18, Brief Nr. 39.

18 Brief (1141a) Johannes Kepler an Philipp Müller in Leipzig, Sagan 18.09.1830. *Württembergischen Landesbibliothek* (Signatur: Z 8799-126.6); gedruckt bei: Döring, Detlef: *Die Beziehungen zwischen Johannes Kepler und dem Leipziger Mathematikprofessor Philipp Müller: eine Darstellung auf der Grundlage neuentdeckter Quellen und unter besonderer Berücksichtigung der Astronomiegeschichte an der Universität Leipzig*. - Berlin: Akad.-Verl., 1986., S. 46–49

19 Freitag, Matthias: *Kepler und Regensburg*. In: Dietz, Karlheinz und Waldherr, Gerhard: *Berühmte Regensburger. Lebensbilder aus zwei Jahrtausenden*. Regensburg 1997, S. 153–161.

20 Stephan Lansius an einen Freund in Tübingen, Regensburg, 24. Januar 1631. In: Johannes Kepler in seinen Briefen, Bd. II, Max Caspar und Walther von Dyck (Hg.), S. 300–334, hier S. 333. München und Berlin, Verlag von R. Oldenbourg

Johannes Keplers Rolle im Hexenprozess seiner Mutter Katharina

HANS-JOACHIM ALBINUS

Hexenverfolgung gab es in Württemberg von 1497 bis 1750; auch die Protestanten glaubten an magische Phänomene. Württemberg war aber ein verfolgungsarmes Territorium ohne Massenprozesse mit ca. 350 Untersuchungen und Gerichtsverfahren, ca. 600 Betroffenen und 197 Hinrichtungen [7] [8]; Opfer waren wie überall vor allem verwitwete, ältere, arme, ungebildete Frauen. Es gab ein ordentliches Verfahren auf Grundlage des Strafgesetzbuchs ‚Constitutio criminalis Carolina‘ von 1532 analog dem römischen Zivilrechtsverfahren. Die meistverhängten Strafen waren Verbannungen, Geld- oder Leibstrafen, die seltenere Todesstrafe wurde oft nur als Schwertstrafe (Enthauptung) vollzogen. Der Staat wurde nur aufgrund einer Anzeige tätig.

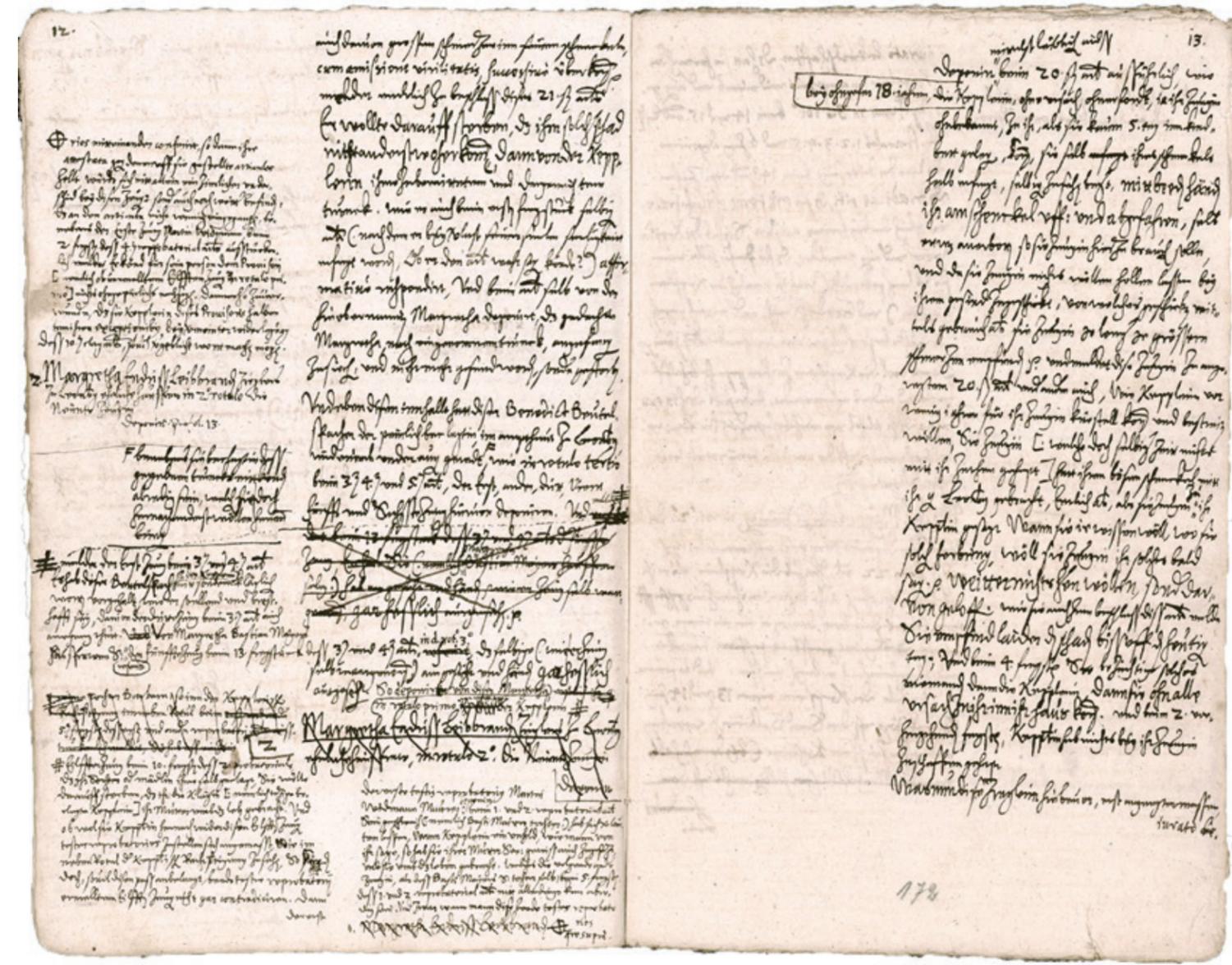
Die Hochgerichtsbarkeit lag bei den amtsstädtischen Gerichten, besetzt mit 12 Schöffen und dem herzoglichen Vogt als Ankläger, ebenfalls kein Jurist, der auch die Voruntersuchungen führte und den Prozess leitete. Rechtsaufsicht und Entscheidungskompetenz hatte der Oberrat zu Stuttgart als Zwischeninstanz in den peinlichen Verfahren (u.a. Hexerei). An ihn musste der Vogt berichten zwecks Beratung, Prozessanweisungen und Urteilsfindung; in schwierigen Fällen wurden unter Vorlage der Akten juristisch-theologische Gutachten der Universität Tübingen eingeholt. Wichtig war die grundsätzliche Schriftlichkeit der Verfahren. Oberste Rechtsinstanz war der Herzog. Der Staat übernahm teilweise die Prozesskosten, was zu einer restriktiveren Zulassung von Anklagen beitrug.

Württemberg war ein frühmoderner Konfessionsstaat mit funktionierendem Behördenapparat, aber neben der Ahndung des ‚Maleficium‘ (schädlicher Zauber) hatte auch die lutherische Kirche ein Interesse an der Verfolgung Hoher Magie (Teufelspakt, Teufelsbuhlschaft), weil diese einen Abfall von Gott darstellte. Und Massenhysterie, die Suche nach Sündenböcken, Aber- und Endzeitglaube waren in der einfachen Bevölkerung auch hier verbreitet. Hinzu kamen wie üblich

Missgunst, Neid, üble Nachrede und Nachbarschaftsstreitigkeiten, die das Denunziantentum beförderten.

Hexenprozesse waren durch Zeugenaussagen geprägte Indizienprozesse. Bei der Beweisaufnahme wurde der Leumund der Beklagten geprüft, ihre Glaubensfestigkeit wurde durch die Pfarrer examiniert. Ein Verhalten, das nicht den Erwartungen entsprach, machte verdächtig (z.B. Verstocktheit statt Reue). Grade und Dauer der Tortur bei peinlichen Verfahren waren geregelt von der ‚territio‘ (Androhung, mit der Folter zu beginnen) bis zum ein- und mehrmaligen Aufziehen (Strecken) ohne und mit Gewichten. Viele Delinquenten überstanden die Folter, auch in Hexenprozessen, in denen sie in 12,5 % der Fälle angewendet wurde [10]. Ziel war nicht Tod oder Schädigung, sondern ein Geständnis, ohne das nicht schuldig gesprochen werden durfte; die Wahrheit sollte herausgeschreckt werden. Dabei dürfte es zu vielen falschen Aussagen gekommen sein. Familienangehörige, Verwandte und Bekannte mussten fürchten, durch Geständnisse belastet zu werden.

Katharina Kepler (1547–1622), eine einfache Frau, die weder lesen noch schreiben konnte, war 67 Jahre alt und Witwe, als sie 1615 in Leonberg erstmals der Zauberei und Hexerei bezichtigt wurde, insofern ein typischer Fall. Sie wohnte dort seit Ende 1575, als die Keplers aus der Reichsstadt Weil der Stadt ins Herzogtum Württemberg gezogen waren. Die Beschuldigungen entstanden zeittypisch aus Streitigkeiten mit Nachbarn, zuerst mit Ursula Reinhold, an denen sich bald andere Personen beteiligten. Die Keplerin war daran nicht unschuldig, denn sie war starrsinnig, streitsüchtig und jähzornig und hatte sich bei vielen unbeliebt gemacht. Auslöser waren volksmedizinische Arzneien, die sie für die Reinholds und andere zubereitet und die wider Erwarten nicht geholfen oder gar das Leiden verschlimmert hatten (‚Hexentrank‘). So kam es zur Unterstellung des Schadenzaubers gegen Mensch und Tier.



Der herzogliche Vogt Lutherus Einhorn (~1570-1633) war ein scharfer Hexenankläger, in dessen Amtszeit allein 9 der insgesamt 12 Todesurteile (bei insgesamt 34 Anschuldigungen 1533–1722 [8]) im Amt Leonberg fielen und der 1616 den Hexereverdacht an den Stuttgarter Oberrat meldete. Die Keplers klagten auf Verleumdung, um die Verdächtigungen zurückzuweisen. Johannes Kepler (1571–1630) erkannte die drohende Gefahr und versuchte zusammen mit seinem

Bruder Christoph (1587–1633) mehrmals vergeblich, die Mutter zu sich nach Linz zu holen. Diese verkante jedoch, dass ihr trotz Unschuld die Vorwürfe sehr gefährlich werden konnten, und zog letztlich nach Heumaden (heute Ortsteil Stuttgarts) zu Tochter Margaretha (1584–~1650) und Schwiegersohn Pfarrer Georg Binder (1580–1634). 1617 war Kepler für drei Monate in Württemberg und intervenierte erfolglos bei Hof, um den Zivilprozess wegen Verleumdung in Gang zu

Das Protokoll eines Zeugenverhörs aus dem Hexenprozess gegen Katharina Kepler gibt Einblicke in das Justizwesen der Zeit und in die Denk- und Verhaltensweisen der betroffenen Menschen. Hauptstaatsarchiv Stuttgart A 209 Bü 1055 Q. 66

bringen. 1618 folgte unter Ausnutzung von Beziehungen ihrer Verwandtschaft zum Hof die Schadenersatzklage der Reinbolds über 1.000 Gulden zum Ausgleich der durch die Keplerin verursachten Schäden. Die geschickte Formulierung legte ein Hexereidelikt nahe. 1619 kam es zu Verhören Katharinas, der Klägerin Reinbold und von Zeugen durch den Vogt sowie zu einer Anklageschrift. Deren 49 Artikel betrafen¹

– Schadenzauber gegen Menschen: u. a. Hexentränke gegen Ursula Reinbold, den Schulmeister, den Barbiergesellen und andere; Verletzung durch ‚Hexengriff‘ von Burga Haller, Metzger Stoffel Frick, Burga Hallers Tochter, eines Mädchens aus Gebersheim, zweier Bürgerkinder – teilweise mit Todesfolge

– Schadenzauber gegen Tiere: u. a. ein Kalb tödlich angegriffen, um Mitternacht eine Kuh geritten, zwei Schweine zu Tode geritten

– Sonstiges: u. a. Hexerei-Bezichtigung durch den (geistig behinderten) Sohn Heinrich (1573-1615), versuchte Verführung der Barbara Bastian zur Hexerei, versuchte Bestechung des Vogts (Silberbecher für die Aufnahme der verschleppten Verleumdungsklage).

1620 folgten die Verhaftung in Heumaden und der Beginn des Strafprozesses in Leonberg, der bestimmungsgemäß von Vogt Einhorn geführt wurde. Somit war Katharinas Leben in höchster Gefahr, und Margaretha benachrichtigte ihren Bruder Johannes, bat die Mutter aber auch, alles zu gestehen, was sie getan habe, damit möglichst wenig Schande über die Familien käme. Auf Eingabe Christoph Keplers, der als Zinngießer in Leonberg wirtschaftliche Nachteile fürchtete, wurden Kerkerhaft und Prozess verlegt nach Güglingen (Zabergäu); dies war aber auch wegen der emotionalen und voreingenommenen Stimmung in Leonberg sinnvoll. Dort übernahm im Sinne Einhorns sein Kollege Vogt Johann Ulrich Aulber (1572–1635).

Johannes Kepler war inzwischen wieder nach Württemberg gereist und hielt sich vor allem in Güglingen auf. Kepler hielt den Grund seiner Reise geheim [2]. Die Verteidigung war erschwert durch das störrische Verhalten der Mutter und ihren Bestechungsversuch. Problematisch waren auch Keplers von der lutherisch-orthodoxen abweichende theologische Haltung² und sein 1609 begonnenes Werk ‚Somnium seu

opus posthumum de Astronomia Lunari‘³ mit einer Anspielung auf einen ‚Hexenritt‘, das zwar erst 1634 im Druck erschien, aber schon vorab in Auszügen bekannt geworden war. In Leonberg und Güglingen ließ sich Kepler von Anwälten vertreten und bestand in allen Details auf der Schriftlichkeit des Verfahrens, was wegen der Kosten von seinen Geschwistern, die um ihr Erbe fürchteten, nicht gutgeheißen wurde. Kepler nutzte seine alten Beziehungen zur Universität Tübingen, z. B. zu seinem Studienfreund Christoph Besold (1577–1638), inzwischen Professor an der juristischen Fakultät. Kepler handelte klug, die theologische Frage der Existenz von Hexen nicht anzusprechen, sondern alle juristischen Möglichkeiten auszuschöpfen.

Von Vorteil war auch die pragmatische, eher mildere Haltung der Tübinger Universität, die über großes Aufsehen solcher Prozesse vermeiden wollte. Weil Zweifel an der Glaubwürdigkeit der Angeklagten geblieben waren, wurde Vogt Aulber eine Folter bis zum 1. Grad (‚territio verbalis‘) gestattet. Hier kam der Keplerin ihre Starrköpfigkeit zugute: „Wenn ihr mir schon eine Ader nach der anderen aus dem Leib ziehen würdet, wüsste ich nichts zu bekennen.“ Sie musste also 1621 nach 405 Tagen Untersuchungshaft freigelassen werden. Der Prozess kostete Johannes Kepler über 900 Gulden (mehr als zwei Jahresgehälter), weil der Aufwand künstlich in die Höhe getrieben wurde durch Prozessverzögerungen, übermäßige Haftkosten für Heizung, Verpflegung und zwei Wärter.

Katharina Kepler, geschwächt von der Untersuchungshaft, starb 1622 in Roßwälden (heute Ortsteil Ebersbachs an der Fils) bei Tochter und Schwiegersohn, der inzwischen dorthin versetzt worden war.

Letztlich verlief der Hexenprozess innerhalb des in Württemberg Üblichen. Besonders war jedoch der vorbehaltlose, lange und kostspielige Einsatz Keplers für seine Mutter. Er machte Eingaben an Herzog Johann Friedrich (1582–1628), beauftragte Anwälte, holte Rechtsauskünfte und Abschriften juristischer Fachliteratur aus Tübingen ein, arbeitete an Verteidigungs- und Konklusionsschrift mit, um die Argumente des Vogts zu widerlegen und die Glaubwürdigkeit der Zeugen der Gegenseite zu diskreditieren. Dies führte schließlich zum Freispruch.

Dies alles war für Kepler nicht ohne persönliches Risiko. Sein wissenschaftliches Werk hatte sich noch nicht durchgesetzt und seine vermittelnde theologische Position in Württemberg hatte viele Feinde. Seine Prominenz als kaiserlicher Mathematiker weckte auch Vorbehalte: „Verhaftin erscheint leider mit Beystandt Ihres Herrn Sohns Johann Keplers Mathematici.“ Teile seines ‚Somnium‘ schon vor Druck bekannt gemacht zu haben, hatte Kepler später gereut: „dass mein Haus gut auf sechs Jahre Quälerei hätte verzichten können und auch ich selbst auf die letzte Reise von einem Jahr, wenn ich nicht die geträumten Ratschläge [d.h. die Mondastronomie nicht aufzuschreiben] ... missachtet hätte.“ Zum Hexenprozess wäre es aber in jedem Fall gekommen, denn in Leonberg hatte man aus anderen Gründen genügend Belastendes gegen die Keplerin konstruiert. ♦



DIPL.-MATH. HANS-JOACHIM ALBINUS beschäftigt sich seit langem mit Johannes Keplers Leben und Werk, bietet Stadtführungen und Vorträge an, veröffentlicht in Zeitungen und wissenschaftlichen Zeitschriften. Er setzt sich insbesondere dafür ein, dass Keplers Andenken in Leonberg lebendig bleibt.
Foto: H. Trunz

Literaturverzeichnis

- [1] Caspar, Max: Johannes Kepler. Verlag für Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik, Stuttgart, 1995, 4.A.
- [2] Caspar, Max; von Dyck, Walther (Hrsg.): Johannes Kepler in seinen Briefen. 2 Bde. Oldenbourg, München, 1930
- [3] De Gennaro, Enrico: Hexen, Tod und Teufel. Der Fall Katharina Kepler und weitere Stationen der Hexenverfolgung. Begleitband zur Sonderausstellung im Römermuseum Güglingen vom 10.06.2012-03.03.2013. Schriftenreihe des Römermuseums Güglingen, Bd. 4. Römermuseum, Güglingen, 2012
- [4] Günther, Ludwig: Der Hexenprozeß gegen Katharine Kepler. Weltbild, Augsburg, 1998 (Nachdruck von 1906)
- [5] Kepler, Johannes: Gesammelte Werke. 22 Bde (in 26). Beck, München, 1937-2017
- [6] Kepler, Johannes: Der Traum oder Mond-Astronomie. Aus dem Lateinischen von Hans Bungarten, herausgegeben und mit einem Leitfaden für Mondreisende von Beatrix Langner. Matthes und Seitz, Berlin, 2012, 2.A.
- [7] Lorenz, Sönke; Schmidt, Jürgen Michael (Hrsg.): Wider alle Hexerei und Teufelswerk. Die europäische Hexenverfolgung und ihre Auswirkungen auf Südwestdeutschland. Thorbecke, Ostfildern, 2004
- [8] Raith, Anita: Das Hexenbrennen in Leonberg. In: Dürr, Renate (Hrsg.): Nonne, Magd oder Ratsfrau. Frauenleben in Leonberg aus vier Jahrhunderten. Beiträge zur Stadtgeschichte, Bd. 6. Stadtarchiv Leonberg, 1998, S. 53-73
- [9] Rublack, Ulrika: Der Astronom und die Hexe. Johannes Kepler und seine Zeit. Klett-Cotta, Stuttgart, 2020, 5.A.
- [10] Sauter, Marianne: Hexenprozess und Folter. Die strafrechtliche Spruchpraxis der Juristenfakultät Tübingen im 17. und beginnenden 18. Jahrhundert. Hexenforschung, Bd. 13. Verlag für Regionalgeschichte, Bielefeld, 2010
- [11] Sutter, Berthold: Der Hexenprozeß gegen Katharina Kepler. Kepler-Gesellschaft und Heimatverein Weil der Stadt, Weil der Stadt, 1984, 2.A.
- [12] Walz, Eberhard: Johannes Kepler Leomontanus. Gehorsamer Underthan und Burgerssohn von Löwenberg. Beiträge zur Stadtgeschichte, Bd. 3. Stadtarchiv Leonberg, 1994

¹ Der Prozess ist gut dokumentiert [5] (Bd. 12) [11]; die Akten befinden sich im Landesarchiv Baden-Württemberg. Zur Historie des Prozesses siehe [3] [4] [7] [8] [11], zu Johannes und Katharina Kepler in Leonberg [1] [9] [12].

² Kepler war seit 1612 in Linz wegen krypto-calvinistischen Verdachts vom Abendmahl ausgeschlossen [12].

³ Die phantastische Erzählung, ein Traum, in dem ein Dämon als Geist der Astronomie von den Himmelserscheinungen aus Sicht der Mondbewohner berichtet, war als witzig-

satirisches und didaktisch-astronomisches Werk für einen gebildeten Leser angelegt und erwähnt als für die Reise zum Mond geeignete Personen „saftlose alte Weiber, die ... mit der Kunst vertraut sind, nachts auf Böcken, Astgabeln oder zerschlissenen Mänteln zu reiten und riesenhafte Entfernungen ... zu überwinden“ [6].

„Die Edelsteine aus dem Mist herauslesen“ Johannes Kepler und die Astrologie

MATTHIAS FREITAG

Es fällt der modernen Betrachtungsweise schwer, neben dem Astronomen Kepler auch den Astrologen zu würdigen oder ihn überhaupt wahrzunehmen. Das hat mit den heute gültigen Kategorien von Wissenschaft und Wissenschaftlichkeit zu tun, die streng empirisch definiert sind. In diesem Koordinatensystem stellen Keplers drei Gesetze zur Planetenbewegung einen glanzvollen Höhepunkt der Wissenschaftsgeschichte dar; seine Beschäftigung mit der Sterndeutung dagegen passt nicht ins Bild und wird deshalb gerne einfach ausgeblendet.

Diese Verengung hindert aber daran, der Person und der Persönlichkeit Keplers in Gänze gerecht zu werden. In seinen Augen und in seinem Denken gehörten beide Sphären, die Astronomie und die Astrologie, untrennbar zusammen, insofern nämlich, dass erst in ihrer Gemeinsamkeit – und unter Hinzuziehung weiterer Wissensgebiete, die an dieser Stelle ausgeblendet werden müssen – das entstand, was Kepler eigentlich zeitlebens anstrebte, nämlich umfassende Erkenntnisse in der Naturphilosophie. Keplers denkerischer Ansatz war einer, den man heute mit dem Begriff der ‚Ganzheitlichkeit‘ beschreiben könnte; und genau darin liegt das Charakteristische seines Werks – charakteristisch sowohl für ihn als Individuum als auch für seine Zeit. Kepler steht bekanntermaßen, wissenschaftsgeschichtlich gesehen, zwischen Mittelalter zur Neuzeit, das heißt zwischen einem spekulativen, deduktiven, universalistischen Forschungsansatz und einem, der der Empirie, der Induktion, der Spezialisierung verpflichtet ist. Altes und neues Denken stoßen bei ihm zusammen; Arthur Koestler hat in seinem Buch über die ‚Nachtwandler‘ das Kepler-Kapitel passenderweise unter das Motto der ‚Wasserscheide‘ gestellt. Daraus aber, dass Kepler genau in der Mitte zwischen zwei gegensätzlichen Denkkonzepten steht, ergibt sich eine Konsequenz, die die Beschäftigung mit ihm noch auf einer ganz anderen, zusätzlichen Ebene als der des rei-

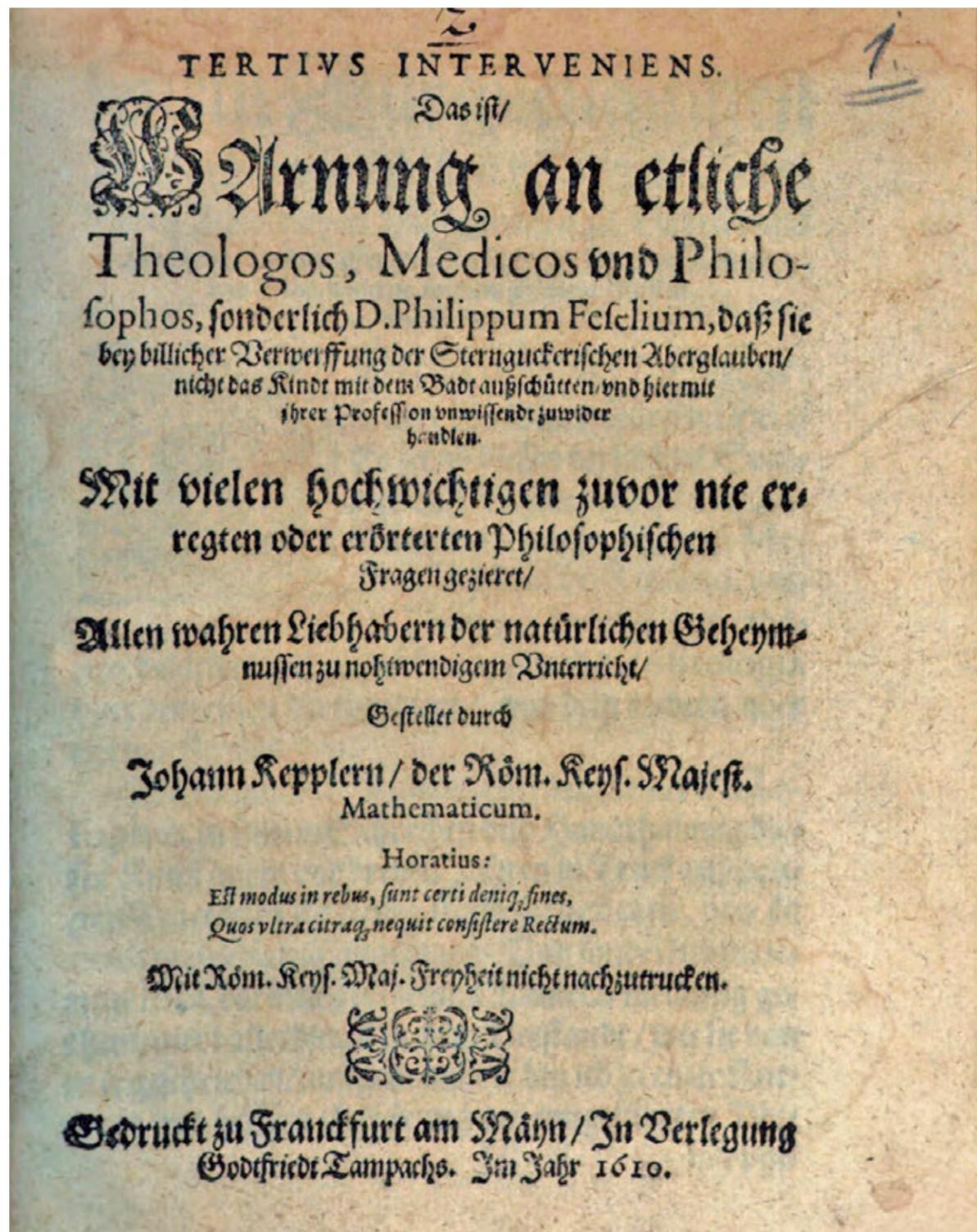
nen Erkenntnisgewinns interessant und faszinierend macht. Kepler bewegt sich in fast allen seiner Werke gedanklich immer auch auf einer Art von Meta-Ebene und stellt die Frage, was eigentlich Wissenschaft ist und was nicht, welche Methoden zum Erfolg führen und welche nicht. Er dokumentiert damit den Wandel des Wissenschaftsbegriffs, der sich in seiner Zeit vollzieht, aus erster Hand.

Ein Themenfeld, auf dem diese beiden Aspekte – Ganzheitlichkeit und Wissenschaftlichkeit – in aller Deutlichkeit hervortreten, ist das der Sterndeutung. Kepler betreibt nicht einfach Astrologie, stellt Horoskope, macht Vorhersagungen – Tätigkeiten, die aus seinen diversen beruflichen Anforderungen resultierten, am bekanntesten sicherlich im Fall Albrechts von Wallenstein. Er denkt vielmehr, ausgehend von solchen Beschäftigungen, auch darüber nach, was er – und andere – als Astrologen eigentlich tun, ob und inwieweit das Metier als solches überhaupt sinnvoll und zulässig ist. Und er schreibt die Schlussfolgerungen seines Reflexionsprozesses nieder, macht sie dadurch für andere – für Heutige – nachvollziehbar. Als Mann der ‚Wasserscheide‘ gelangt er allerdings zu keiner Zeit zu einer in sich gänzlich stringenten Position, jedenfalls nicht in dem Sinne, dass man sie als eindeutig ‚pro‘ oder ‚contra‘ Astrologie verstehen könnte. Er unternimmt den kühnen Versuch, ‚falsche‘ und ‚richtige‘ Astrologie voneinander zu trennen. Sein Hauptwerk zu diesem Thema trägt den bezeichnenden Titel ‚Tertius interveniens‘ mit dem schönen erläuternden Untertitel ‚Warnung an etliche Theologos, Medicos und Philosophos, dass sie bei billiger Verwerfung des sternguckerischen Aberglaubens nicht das Kind mit dem Bad ausschütten‘ – womit eigentlich schon alles gesagt ist. Das ist das Spannende an Kepler und der Astrologie: Die Beschäftigung mit dem Thema führt mitten hinein in die erstaunliche Originalität seines Denkens.

Seit seinen frühen Berufsjahren betrieb Kepler zeitlebens Astrologie im klassischen Sinn und erstellte ‚Prognostiken‘ für seine jeweiligen Arbeitgeber. Bereits im ersten von ihm erstellten Jahreshoroskop wird seine Distanz zum Thema überdeutlich, wenn er darum bittet, „man wolle solches geringe, doch wohlgemeinte Werk von mir zum Besten und nicht anders als von einem Astrologen, der nämlich selber nicht zu viel davon hält, an- und aufnehmen“. Vorhersagungen zu konkreten Ereignissen sind in seinen Augen „althergebrachter Wahn“ und „eine lächerliche Phantasie“. Wenn sie mitunter eintreffen, dann gibt es dafür eine einfache Erklärung: „Da kenne ich ihrer etliche, die kaufen allerlei Kalender zusammen, deren der eine auf einen gewissen Tag weiß, der andere schwarz setzt. Es gerate nun das Wetter, wie es wolle, so finden sie es nach dem einen Kalender getroffen, haben also ihre tägliche Freude und unfehlbare Ergötzlichkeit mit diesem Zutreffen.“ Kepler erkennt – das machen solche Äußerungen deutlich – sehr früh, dass der Erfolg konventioneller Astrologie nichts mit den Sternen, aber viel mit den Menschen zu tun hat, und argumentiert damit im Grunde bereits auf der Ebene moderner Wahrnehmungspsychologie: Es ist „der Menschen Aberglauben“, der „den Wahrsager selten stecken lässt, (...) dieweil uns Menschen alles das getroffen heißt, was nicht in allen Dingen gefehlt ist; und sobald man der großen Menge täglicher Fehlschüsse pflegt zu vergessen, weil solches nichts Seltsames, umso länger ist man es eingedenk, wenn einmal einer etlichermaßen trifft.“ Sterndeutung als Handwerk im Sinne der Vorhersagung von Einzelereignissen lehnt er konsequenterweise rundheraus ab und fordert hier sogar rigorose staatliche Maßnahmen: „Ich (...) mache mir die Gedanken, dass (...) die Astrologie (...) verboten werden möchte.“

Doch dies alles bezieht sich bei Kepler nur auf die Astrologie, wie sie landläufig betrieben wird. Die grundsätzliche Sinnhaftigkeit, sich mit ihr zu beschäftigen, stellt er keineswegs in Frage. Die Grenze zwischen ‚richtig‘ und ‚falsch‘ zieht er zwischen eher allgemeinen und sehr speziellen Aussagen, die sich aus den Sternen ableiten lassen: „Dass der Himmel im Menschen etwas tue, sieht man klar genug; was er aber in specie tue, bleibt verborgen.“ In einer Analogie

ausgedrückt: Die Wirkung der Sterne „vergleicht sich dem Bildnis der Sonne in einem rauschenden Wasser: Darin sieht man zwar einen sehr klaren Glanz gegen die Sonne weit und breit; aber keine Figur oder Bildnis der Sonne kann man daran erkennen, weil das Wasser untereinander geht.“ Er versucht immer wieder, diesen Unterschied an konkreten Beispielen zu erläutern, zum Beispiel in öffentlichen Dingen: „Es bezeugen alle Historien (...), dass, wenn Sonne und Mond am Himmel (...) verfinstert, (...) in nächst folgenden Jahren Könige und Fürsten entweder durch Abfall der Untertanen oder feindliche Gewalt oder den zeitlichen Tod von ihrer Regierung hinweggestoßen, gute Ordnung zu Boden gerissen, Polizei verstört, Religion verändert oder angefochten worden. (...) So das nicht geschehen, so hat doch zum wenigsten eine solche große Verfinsternung der Sonne übermäßige Hitze und dabei Erdbeben, an anderen Orten langwieriges Regenwetter, daneben Verhinderung der Früchte und Teuerung, auch pestilenzische Seuchen zu bedeuten gehabt. Wo aber und mit welcher Person sich dergleichen zutragen werde, das kann ein Sternseher aus dem bloßen Anblick der Finsternisse nicht namhaft machen.“ Oder, mit einem Augenzwinkern und unter Verweis auf das Menschlich-Allzumenschliche, im privaten Bereich: „Wenn ich sehe, dass in einer Nativität viel schöner Aspekte sind, also beschaffen, dass keine Melancholie oder Fehl der Vernunft, sondern vielmehr eine freudige Natur erscheint, wenn auch der Mensch schon sein ziemliches Alter hat, ledigen Standes und in einem Land ist, da man nicht viel ewige Keuschheit gelobt: So mag ich, die Ehe betreffend, wohl sagen, ein solcher werde nach keiner geringen Kondition stehen und also ein reiches Weib erlangen. Denn wenn man es bedenkt, so habe ich hiermit nichts specialiter prognostiziert, (...) sondern mein unfehlbares Fundament ist ganz allgemein, dass es eine gute, vernünftige Natur sei, die sich wissen werde, wohl zu betten. (...) Hingegen aber so sind dies ganz und gar nichtige, grundlose, abergläubische, wahrsagerische Vorhersagungen, dass des Geborenen Gemahl werde aus diesem oder jenem Land gebürtig sein, am Leib einen verborgenen Fehl haben, dass sie bei ihrem Mann nicht werde fromm bleiben, so oder so viele Kinder und der Geborene zwei, drei



Titelblatt aus Keplers Schrift 'Tertius interveniens' Frankfurt am Main 1610. Bayerische Staatsbibliothek München, bsb10874358

bleiben, wenn sie diese ihre närrische Tochter nicht hätte? (...) Es sind sonst der Mathematiker Gehälter so selten und gering, dass die Mutter gewiss Hunger leiden müsste, wenn die Tochter nichts erwürbe.“ Doch damit meint er tatsächlich nur die konventionelle Astrologie der Horoskopsteller und Prognostikanten. Ihr gilt – wie gesehen – seine ganze und grundsätzliche Ablehnung, die er oftmals und in drastischen Formulierungen geäußert hat: „Der an geometrische Beweisführung gewohnte Geist leistet, wenn er die Fehlerhaftigkeit der Grundlagen betrachtet, lange, lange Widerstand, wie ein störrisches Lasttier, bis er, durch Schläge und Scheltworte gezwungen, seinen Fuß in diesen Tümpel setzt.“

Es ist bezeichnend für Keplers Unvoreingenommenheit beim Denken und Forschen, dass er an dieser Stelle nicht einfach stehen blieb oder umkehrte, sondern selbst im ‚Tümpel‘ nach Erkenntnisgewinn suchte. Und dies, wie er bald erkannte, nicht ohne Erfolg: „Es soll (...) niemand für unglaublich halten, dass aus der astrologischen Narrheit und Gottlosigkeit nicht auch ein nützliches Wissen und Heiligtum, (...) aus einem übelriechenden Mist nicht auch etwa von einer emsigen Henne ein gutes Körnlein, ja ein Perllein oder Goldkorn hervorgescharrt und gefunden werden könnte.“ Den gefundenen Schatz galt es zu bergen und zu bewahren: „Wenn auch ein großer Teil der Regeln in dieser arabischen Kunst ins Nichts aufgeht, so ist doch all das, was darin an Geheimnissen der Natur enthalten ist, kein Nichts und darf daher nicht mit Nichtigkeiten weggeworfen werden. Man muss vielmehr die Edelsteine aus dem Mist herauslesen.“ Was ihm dabei half, war – trotz aller Vorbehalte – eine gewisse Wertschätzung für die Astrologie aufgrund ihrer historischen Dimension. Erstaunlich: Kepler, der Wissenschaftler, war auch schon in der Lage, in Kategorien der Wissenschaftsgeschichte zu denken. Und er erkannte klar die Rolle, die die Astrologie beim Entstehen der Astronomie gespielt hatte. Hier lag bekanntlich seine wahre Leidenschaft, und entsprechend leidenschaftlich äußerte er sich auch: „Wenn zuvor niemand so töricht gewesen wäre, dass er aus dem Himmel künftige Dinge zu erlernen Hoffnung geschöpft hätte, so wärest auch Du, Astronom, so witzig nie geworden, dass Du daran



gedacht hättest, dass des Himmels Lauf (...) zu erkunden sei, ja, Du hättest von des Himmels Lauf gar nichts gewusst. Wahrlich, nicht aus der Heiligen Schrift, sondern aus der abergläubischen Chaldäer Bücher hast Du gelernt, die fünf Planeten von anderen Sternen zu erkennen.“ Und er zieht die Schlussfolgerung: „Wenn wir zu der Naturkundigung anders nicht gelangen könnten denn durch lauter Verstand und Weisheit, würden wir wohl nimmermehr dazu gelangen. Aller Fürwitz und alle Verwunderung ist in der Erste nichts als lauter Torheit; aber doch zupft uns diese Torheit bei den Ohren und führt uns auf den Kreuzweg, der zur Rechten nach der Philosophie geht.“

Horoskop mit Vorhersagen einer Sintflut für das Jahr 1524. Aus: Reynmann, Leonhard: Practica vber die grossen und manigfaltigen Coniunction der Planeten, die im jar M.D.XXIII. erscheinen, un ungezweifelt vil wunderparlicher ding gesperen werden. Nürnberg 1523. Foto: Lydia Pokoj, Deutsche Fotothek

Auf den Punkt gebracht: Kepler gelang es, zumindest für sich selbst, auch die Astrologie in seine umfassende Harmonielehre und damit in das Gesamtgebäude seiner Naturphilosophie zu integrieren. Der Singularität seiner Vorgehensweise war er sich bewusst: „Bin ich denn der Einzige, der die Astrologen Philosophie lehrt?“, fragt er einmal und erläutert auch gleich, welche philosophischen Fragestellungen für ihn in der Astrologie enthalten sind: „Was bin ich denn für ein Mensch; woher komme ich?“ Keplers Astrologie ist nicht Sternendeutung im herkömmlichen Sinn; sie ist Philosophie und Psychologie in einem. In ihrem Zentrum stehen, genau betrachtet, nicht die Sterne, sondern steht der Mensch mit allen seinen vielfältigen Potentialen und Optionen. Dies verleiht Keplers Astrologie etwas zutiefst Humanes: Sie macht den Menschen nicht klein angesichts unausweichlicher Schicksale und unerbittlicher Determination, sondern groß, indem sie seine Freiheit und Selbstverantwortung herausstellt. In einer besonders kritischen Zeit, nach dem Ausbruch des Dreißigjährigen Kriegs, findet er in seinen ‚Prognostiken‘ für das Jahr 1619 diesbezüglich deutliche, ja berührende Worte, wenn er sagt: „Es hat der Zunder im verflossenen Mai Feuer gefangen, inmaßen ich davor und sonderlich auf den Mai gewarnt. Demnach es nun in allen Gassen brennend worden, steht mancher mit aufgesperstem Maul, fragend und wartend, was uns der Himmel aufs künftige

Jahr gutes Neues bringe. (...) Aber, liebe Leute, so wenig man ein angezündetes Feuer wiederum in den Feuerstein hineinschlagen kann, ob man es wohl anfänglich herausgeschlagen, so wenig wird der Himmel wehren können, dass die Brunst nicht überhandnehme, sintemal er auch anfangs nicht mehr dabei getan denn einer, der Feuer schlägt: Wäre auf Erden kein Pulver gezettelt gewesen, so hätte er nicht angezündet. Darum wehre, wer da kann und wem es gebührt; denn Himmels halben wird die Brunst wohl um sich fressen mögen, soweit Holz und Stroh reicht. (...) Warnen kann bisweilen ein Prognostikum, wenn natürliche Antriebe zur Erhitzung der Gemüter vorhanden; wenn es aber geschehen, so kann kein Prognostikum helfen.“

Man kann es nicht anders sagen: Eine Astrologie, wie Kepler sie auffasst und unternimmt, ist es wohl wert, dass man sich mit ihr beschäftigt. Man sollte tatsächlich Keplers eigenen Ratschlag beherzigen und „nicht das Kind mit dem Bad ausschütten“. Es lohnt sich! ♦



MATTHIAS FREITAG, M. A. studierte Geschichte und Romanistik an der Universität Regensburg. Er arbeitet für die Museen der Stadt Regensburg und hat dort viele Jahre das Kepler-Gedächtnishaus betreut. Außerdem ist er als Stadtführer und Buchautor tätig. Foto: Stefan Fleischmann, Regensburg

Kepler und der Buchdruck

FRIEDRICH SECK

Der Beitrag zeigt an typischen Beispielen, drei großen Werken und zwei Wohnorten, wie Kepler seine wissenschaftlichen Werke zum Druck brachte. Ein Stoßseufzer aus einem Brief an Matthias Bernegger zeigt die Schwierigkeit: „Die Buchdrucker sagen, sie hätten Dank verdient, wenn sie ein mathematisches Buch zum Verlag annehmen, und geben 30 Exemplare für die Mühe.“

Mysterium cosmographicum 1596 (Caspar 6)

Keplers erstes Buch war das ‚Mysterium cosmographicum‘ (Geheimnis des Kosmos), in dem er das Planetensystem geometrisch erklärte (Näheres im Beitrag ‚Freunde und Weggefährten‘ unter Michael Mästlin). Die Idee faßte er im Juli 1595, Ende Januar 1696 reiste er mit dem Manuskript nach Tübingen zum Druck durch Georg Gruppenbach, der Erfahrung im Druck und Verlag astronomischer Werke besaß. Davor war noch eine Hürde zu nehmen: die Zensur durch die Universität, konkret: den Rektor und die vier Dekane. Der Druck wurde nach einem begeisterten Gutachten Mästlins unter Glückwünschen genehmigt. Aber Kepler hatte gleich am Anfang des Manuskripts für die Vereinbarkeit des kopernikanischen Systems mit der Bibel plädiert. Dagegen riet, mehr im Namen seiner Fakultätskollegen als im eigenen, der befreundete Theologe Matthias Hafenreffer (auch über ihn im eingangs genannten Beitrag), diesen Passus wegzulassen. So geschah es.

Kepler hatte seinen auf zwei Monate gewährten Urlaub längst überschritten und mußte nach Graz zurückkehren. Das fertige Manuskript ließ er bei Mästlin zurück, der nun für den Druck verantwortlich war. Er nahm diese Mühe gern auf sich, die dadurch erleichtert wurde, daß sich Gruppenbachs Druckerei neben Mästlins Haus auf dem Schloßberg stand. Aber Keplers Manuskript war im technischen Sinn nicht druckreif. Es enthielt Tabellen, die so kein Setzer setzen konnte: Mästlin mußte sie also selbst setzen, „dann es hats kein Setzer zu setzen gewißt“ (Mästlin schob öfters deutsche Satzteile in seine Briefe ein). Er mußte

auch viele Figuren neu zeichnen, weil man sie nach der Vorlage nicht „reißen“ konnte, eine Figur hatte Kepler rot und schwarz gezeichnet. Im März war der Druck beendet. Mit diesem Werk war Kepler als Astronom etabliert. Zugleich aber war es für ihn ein Lehrstück, wie das Manuskript eines astronomischen Buches auszusehen hat.

Wie stand es um die Finanzierung? Kepler mußte 200 Exemplare abnehmen und dafür 33 Gulden zahlen. Allein die Landschaft Steiermark, der das Werk gewidmet war, bewilligte eine „Ergötzlichkeit“ von 200 Talern gleich 250 Gulden. Dies geschah allerdings erst, als Keplers Ausweisung aus Graz bevorstand, auch aus Opposition wider die gegenreformatorischen Maßnahmen Erzherzog Ferdinands.

Astronomia nova 1609 (Caspar 31)

Grundlage der Erneuerung der Astronomie waren Tycho Brahes Beobachtungen. Hinzu kamen Keplers auf die Tübinger Studienzeit zurückgehenden philosophischen Überzeugungen von der Sonne als Quelle aller Bewegungen der Planeten. Zunächst aber galt es, ihre Bahnen zu verstehen. Brahe übertrug Kepler die Erforschung der Marsbahn. Diese weist, abgesehen vom wegen seiner Sonnennähe schwer zu beobachtenden Merkur, die größte Exzentrizität auf. Kepler hielt Brahes Entscheidung für einen Glücksfall und schrieb, er habe die Erkenntnisse über die Planetenbahnen nur anhand der Marsbeobachtungen gewinnen können. Anscheinend schon im Dezember 1601 entdeckte er den Flächensatz, den wir als zweites Keplersches



Bücherschätze
Foto: Patrick Pfeiffer

Gesetz kennen: Der Fahrstrahl des Mars – die jeweilige Entfernung des Planeten vom Mittelpunkt der Sonne – überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen. Nach langem Probieren fand er 1605 auch das erste Gesetz, nach dem sich der Mars auf einer Ellipse um die Sonne bewegt. Diese Erkenntnisse kosteten Kepler unendliche Rechnungen und unendliche Mühen. Er erarbeitete eine Theorie der Kräfte, die zwischen Sonne und Planeten wirken, zeigt auch Ansätze zu einer Theorie der Gravitation, die er aber nicht weiter verfolgt. Stattdessen erklärt er die Planetenbewegung mit dem Magnetismus, über den der Londoner Arzt William Gilbert mit seinem Buch ‚De magnete‘, London 1600, eine grundlegende Untersuchung vorgelegt und schon auf dem Titelblatt die Erde als großen Magneten bezeichnet hatte. Das ist zwar richtig, aber die Übertragung auf die Sonne und die anderen Planeten war nur spe-

kulativ. Im Marswerk zeigt Kepler nicht bloße Ergebnisse, sondern auch die Wege, auf denen er zu ihnen gelangt ist, mit allen Um- und Irrwegen.

Das Manuskript der ‚Astronomia nova‘ war Ende 1606 fertig. Nun waren noch drei Probleme zu lösen: das Einspruchsrecht, das Brahes Erben, vertreten durch den Schwiegersohn Franz Gansneb Tengel, bei Verwendung der Beobachtungen zustand, die Finanzierung und die Wahl des Druckers. Die beiden ersten suchte Kepler durch einen Befehl des Kaisers zu lösen. Mit einer Eingabe vom 4. Dezember 1606 bittet er Kaiser Rudolf unter Hinweis auf seine Krankheiten, die Bedeutung seiner Erkenntnisse und seine endliche Lebenszeit um Unterstützung, „damit jch nit allain an notdürfftiger verlag des werckhs, sondern auch sonsten durch jemandes einreden, deren jch mich bey aigenwilliger publicierung des wercks zubefahren het-

te, gehindert vnd aufgehalten werde“. Am 26. Dezember befahl der Kaiser den Druck und bewilligte dafür 400 Gulden, verbunden mit der Auflage, niemandem ohne seine Genehmigung ein Exemplar zu geben.

Kepler legte großen Wert auf die Ausstattung des Werkes. Das Papier sollte gut, die Schrift groß sein. Keplers Wahl fällt auf Gotthard Vögelin, Drucker, Verleger und Buchhändler in Heidelberg. Das Buch erhielt den Titel (übersetzt) ‚Neue ursächlich begründete Astronomie oder Physik des Himmels, behandelt in Kommentaren über die Bewegung des Sterns Mars‘. Tengel mußte sich mit einem kurzen Vorwort an den Leser begnügen. Im September 1609 war das Buch in Frankfurt käuflich. Kepler hielt sich nicht an die Auflage des Kaisers; um sich für ausgebliebene Gehaltszahlungen zu entschädigen, verkaufte er die gesamte Auflage an seinen Verleger Gottfried Tampach.

Der stattliche Folioband ist Keplers schönstes Buch. Viele Figuren sind nicht nüchterne Zeichnungen, sondern in den freien Flächen mit floralen, seltener figürlichen Motiven gefüllt, die aber in den Nachzeichnungen der Gesammelten Werke nicht wiedergegeben werden. Druckort und Drucker durften nicht genannt werden, weil Heidelberg als Hauptstätte des Calvinismus dem Kaiserhof verhaßt war. Sehr wenige Exemplare, so das der Stadtbibliothek Reutlingen, zeigen am Schluß Vögels ganzseitiges Verlagssignet.

Linz 1612 – 1626

Als Kepler im April 1612 von Prag nach Linz zog, gab es dort keinen Drucker. Er mußte sich auswärts Drucker suchen, oft mit Hilfe befreundeter Gelehrter. Gern half ihm Matthias Bernegger, Professor in Straßburg (mehr über ihn im Beitrag ‚Freunde und Weggefährten‘).

Kepler hat sich intensiv mit der Chronologie befaßt und eine unvollendete Weltchronik hinterlassen, die erst 2009 in den Gesammelten Werken vollständig gedruckt wurde. Seine gedruckten Schriften gelten mit einer Ausnahme, den leicht satirischen ‚Canones pueriles‘ (Caspar 64), dem Geburtsjahr Christi, das er 5 Jahre vor unserer Zeitrechnung ansetzt. Vier chronologische Drucke standen in den ersten Linzer Jahren an. Gegen Ende 1612 war Keplers deutsches Buch zu diesem Thema, kurz ‚Bericht vom Geburtsjahr Christi‘ (Caspar 43),

druckreif. Um die Jahreswende 1612/13 schrieb Kepler an Bernegger: Kann das Buch in Straßburg ohne Kosten für Kepler gedruckt werden? Hat Bernegger Zeit und Lust, den Druck zu überwachen? Berneggers schnelle Antwort hat Kepler spät erreicht – die Laufzeit von Briefen war unkalkulierbar –, Kepler schickt das Manuskript am 26. März, sieht im Juli einen Probebogen und erhält seine vollständigen Exemplare erst im Oktober 1613. Das Buch war deutsch geschrieben, weil es sich gegen ein ebenfalls deutsches Buch des Elsässers Helisäus Röslin richtete und denselben Leserkreis ansprechen sollte. Für die Gelehrten schrieb Kepler die ausführlichere lateinische Bearbeitung ‚De vero Anno ...‘ (Caspar 44). Sie wurde 1614 in Frankfurt von Johannes Bringer gedruckt und verlegt.

Noch einmal bemühte Kepler Matthias Bernegger wegen der kleinen Streitschrift ‚Ad Epistolam Sethi Calvisij Chronologi Responsio‘ (Antwort auf den Brief des Chronologen Seth Calvisius; Caspar 45). Calvisius hatte mit Kepler über das Geburtsjahr korrespondiert; er war auch ein bedeutender Komponist und Musiktheoretiker und als Thomaskantor sechster Vorgänger von Johann Sebastian Bach. Die Streitschrift wurde aber nicht in Straßburg gedruckt, sondern erschien ebenfalls 1614 in Frankfurt im Verlag von Tampach.

Die vierte chronologische Schrift sind die ‚Ecolgae Chronica‘ (Caspar 47), Auszüge aus der Korrespondenz mit vier Briefpartnern, darunter Calvisius, über das Geburtsjahr Christi. Sie erschien in Frankfurt 1615 ebenfalls bei Tampach.

Endlich gelang es Kepler, einen Drucker, Johannes Planck, nach Linz zu ziehen. Er begann seine Arbeit wahrscheinlich im Mai 1615. Kepler konnte nun seine Werke am Wohnort drucken lassen, mußte aber Planck beschäftigen, auch wenn er nicht nur für Kepler gedruckt hat. 1615 erschien die ‚Stereometria doliorum‘ (Caspar 48), die Faßrechnung, mit der Kepler die verbreitete Methode untersucht hat, den Inhalt von Fässern mit einer Meßrute festzustellen (siehe Abb. S. 127). Er fand heraus, daß die Rutenmessung hinreichend genau war, und legte quasi nebenbei Grundlagen der Infinitesimalrechnung vor. Eine deutsche Bearbeitung mit weniger Beweisen, aber einem Anhang über Maße und Gewichte unter dem Titel ‚Messekunst Archime-

Der Buchdrucker.



Ich bin geschicket mit der press
So ich aufftrag den Firnisz reiß/
So bald mein dienr den bengel zueht/
So ist ein bogn pappys gedruckt.
Da durch kombt manche Kunst an tag/
Die man leichtlich bekommen mag.
Vor zeiten hat man die bücher gschribn/
Zu Weing die Kunst ward erstlich triebn.
§ iij Der

Der Buchdrucker aus:
Hans Sachs ‚Eygentliche Beschreibung
Aller Stände auff Erden‘
Franckfurt am Mayn
1568. Bayerische Staatsbibliothek München,
MDZ

dis‘ (Caspar 49) folgte 1616. Auf den Titelblättern beider Werke ist Kepler als Verleger genannt. Kleine Drucke wie Kalender, Ephemeriden (zu diesen ist im folgenden Abschnitt mehr gesagt) und die *Funera domestica* (Caspar 50), etwa: ‚Häusliche Trauerfälle‘ mit Gedichten und anderen Texten zum Tode seiner ersten Frau und des Sohnes Friedrich seien kurz erwähnt. Die *‚Harmonice mundi‘* (Caspar 58), die *‚Weltharmonik‘*, wurde 1619 von Planck gedruckt und von Tampach verlegt. Das von Schickard illustrierte Werk war in zwei Jahrzehnten gereift; es umfaßt Keplers Gedanken zur Geometrie, zur Musik, zur Astronomie und Astrologie. Im 3. Kapitel des 5. Buches steht das dritte Keplersche Gesetz: Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich wie die Kuben der großen Halbachsen ihrer Bahnellipsen. Er vermerkt den Tag der Entdeckung: Es war der 15. Mai 1618.

Keplers umfangreichstes Werk war sein Lehrbuch der Astronomie, die *‚Epitome astronomiae Copernicanae‘*. Die Bücher 1-3 und 4 (Caspar 55 bzw. 63) sind 1618 und 1620 von Planck gedruckt, 5-7 (Caspar 66) 1621 in Frankfurt mit Tampach als Verleger. Das Hauptwerk des Kopernikus, die *‚De Revolutionibus‘*, wurde 1616 auf den Index gesetzt. Darüber verfaßte Kepler ein erst nach seinem Tod gedrucktes bitterböses Epigramm. Weil sie den Namen ‚Kopernikus‘ im Titel führt, geriet auch die *Epitome* am 10. Mai 1619 auf den Index, was aber der Verbreitung des Buches nicht schadete.

Auch andere Bücher ließ Kepler nicht in Linz drucken. Hier soll nur ein besonderer Fall genannt werden. Im Jahr 1623 wollte Kepler eine kleine Schrift, sein nur für die Familie bestimmtes Glaubensbekenntnis (Caspar 72), drucken lassen. Weil sie nicht mit der lutherischen Orthodoxie konform ging, sollte die Schrift keineswegs in Linz gedruckt werden. Kepler schickte das Manuskript an Bernegger, legte für die Druckkosten 2 Goldgulden bei und fragte, ob Bernegger den Druck besorgen könne. Weder Verfasser noch Druckort sollten erkennbar sein. Bernegger antwortete am 23. August, er habe gestern den ersten (von 4) Bögen korrigiert, hoffe, in 4 Tagen das Ganze schicken zu können. Weil der Drucker sehr weit entfernt von seiner Wohnung sei, könne er aber keine zweite Korrektur lesen. Kepler dankt am 4. Dezember, bekennt seine Schuld gegenüber Bernegger und vermerkt zwei sinnentstellende Druckfehler.

Rudolphinische Tafeln 1627 (Caspar 79)

Tycho Brahe hatte in jahrzehntelanger Arbeit, mit den besten Instrumenten und einer Schar von Helfern auf der dänischen Insel Hven Tausende genauer Beobachtungen der Sonne, des Mondes und der Planeten gesammelt. Er wollte damit ein besseres Verständnis der Bewegung dieser Gestirne am Sternhimmel und damit genauere Berechnung ihrer Positionen erreichen. Nach Differenzen mit dem dänischen König hatte er sich nach einem Wink Kaiser Rudolfs nach Prag begeben und Kepler dorthin eingeladen. Im September 1601 stellte Brahe in einer Audienz Kepler dem Kaiser vor. Dieser beauftragte Kepler, Brahe bei der Ausar-

beitung seines Tafelwerks zu unterstützen, das bei dieser Gelegenheit in Anlehnung an andere Tafeln wie die *‚Tabulae Alphonsinae‘* den Namen *‚Tabulae Rudolphae‘* erhielt. Damit hatte Brahe, auf dessen Vorschläge der Kaiser die genannten Anordnungen getroffen hatte, Kepler faktisch zu seinem Nachfolger bestimmt und alle anderen Mitarbeiter übergangen. Brahe starb überraschend am 24. Oktober 1601. Zwei Tage danach ernannte Rudolf II. Kepler zum kaiserlichen Mathematiker.

Astronomische Tafeln bilden die Grundlage für die Berechnung der Positionen von Sonne, Mond und Planeten zu jedem beliebigen Zeitpunkt. Aus den Tafelwerken kann man Listen der Positionen und der Stellungen der Planeten zueinander, besonders von Finsternissen, von Tag zu Tag berechnen. Dies geschieht in Ephemeriden. Kepler hat Ephemeriden für die Jahre von 1617 bis 1636 berechnet und drucken lassen.

Brahes Beobachtungen bildeten die Grundlage des Tafelwerks, aber es fehlte die Theorie der Planetenbahnen. Es war Keplers Aufgabe, sie aus den Beobachtungen zu erschließen. Das geschah in der *‚Astronomia nova‘* (1609). Vorher mußte die Lichtbrechung geklärt werden. Darüber schrieb Kepler sein bahnbrechendes, kurz *‚Optik‘* genanntes Werk (1604, Caspar 18), in dem er auch die Wirkungsweise des Auges richtig erklärte. Um das Rechnen mit den astronomischen Tafeln zu erleichtern, erstellte Kepler eine eigene Logarithmentafel (1623/24, Caspar 74 und 75).

Kepler mußte den besonders schwierigen Satz der Tafeln ständig überwachen und sehr genau Korrektur lesen: Ein Satzfehler in Zahlen ist ja, anders als oft in Texten, nicht leicht zu erkennen. Nachdem das Manuskript 1624 fertig war, stellte sich die Frage des Druckorts. Kaiser Ferdinand II. bestand auf dem Druck in Österreich. Keplers Wohnort Linz hätte nahelegen, dorthin hatte ja Kepler den Drucker Johannes Planck gezogen. Aber die Druckerei war klein, Planck hatte wenig Typenmaterial und war selbst sein einziger Setzer. Trotzdem wurde 1626 ein Anfang gemacht. Aber die durch die gegenreformatorischen Maßnahmen des Kaisers verursachten Bauernaufstände um Linz machten die weitere Arbeit unmöglich. Kepler verließ Linz Mitte November 1626 donauaufwärts. Die Familie ließ er mit der beweglichen Habe bei Freunden in Regens-

burg zurück, er selbst fuhr mit dem Manuskript und den Zifferntypen, die er sich vorsorglich zugelegt hatte, nach Ulm, wo er in Jonas Saur einen fähigen und gut ausgestatteten Drucker gefunden hatte. Die *‚Rudolphinischen Tafeln‘* waren im September 1627 ausgedruckt. Nachdem der Kaiser zwar 6200 Gulden für den Druck angewiesen hatte, die aber nicht ausgezahlt wurden, bezahlte Kepler den Druck aus eigener Tasche.

Sagan 1628 – 1630

Nach dem Druck der *‚Rudolphinischen Tafeln‘* stellte sich die Frage nach Keplers Stellung und Wohnort. Nach Linz konnte er wegen der Gegenreformation nicht zurück, seine Aufgabe als Kaiserlicher Mathematiker war nach Vollendung des Tafelwerks erledigt. Kaiser Ferdinand II. hatte sich damals mit seinem Hof für längere Zeit nach Prag begeben. Dorthin reiste Kepler Ende Dezember 1627, um dem Kaiser die ihm gewidmeten *‚Rudolphinischen Tafeln‘* zu überreichen. Er wurde über Erwarten freundlich empfangen, der Kaiser bewilligte als Dank und für die Druckkosten 4000 Gulden – die nie gezahlt wurden. Max Caspar weiß auch von einem *‚verlockenden Angebot‘*, dessen Inhalt wir nicht kennen, mit der Bedingung, Kepler müsse katholisch werden. Das war für Kepler ganz ausgeschlossen.



Die Hofgasse 7 war eine der Wohnstätten Keplers in seiner Linzer Zeit, in der er die Mondfinsternis am 26.8.1616 beobachtete. Foto: Erich Meyer



Der Buchhändler aus der Abbildung der gemeinnützlichen Haupt-Stände von Christoph Weigel, Regensburg 1698

So traf es sich gut, daß auch Wallenstein in Prag weilte. Er war 1625 Herzog von Friedland in Böhmen geworden und hatte 1627 das Herzogtum Sagan in Schlesien gekauft. Wallenstein war astrologiegläubig und von Keplers astronomischen Neuerungen überzeugt. Weil genauere astronomische Daten zuverlässigere Horoskope ermöglichten, hatte er schon 1608, zunächst anonym über einen Mittelsmann, Kepler um ein Horoskop gebeten. So rechnete er sich zur Ehre an, Kepler in seine Dienste zu stellen, und bot ihm einen Wohnsitz in der Stadt Sagen im gleichnamigen Fürstentum an, dazu ein Gehalt von 1000 Gulden im Jahr – das war das höchste Gehalt, das Kepler je hatte – und die Einrichtung einer Druckerei in Keplers Haus auf Wallensteins Kosten. Kepler nahm das großzügige Angebot an und traf am 26. Juli 1628 in Sagan ein. Nachdem zwei Gesellen eingestellt und eine Druckpresse, Schriften und Papier beschafft waren, konnte die Druckerei um die Jahreswende 1629/30 den Betrieb aufnehmen.

Erster Druck war Keplers Kommentar zu einem Brief des Jesuitenpaters und Missionars in China Johannes Terrentius an die Astronomen in Europa (Caspar 82). Zugleich diente die kleine Schrift als Neujahrsgebe an Wallenstein, dem sie auch gewidmet war. Eigentlich wollte Kepler Tycho Brahes Beobachtungen herausgeben. Aber die Fortsetzung der Ephemeriden mit den Angaben der Position von Sonne, Mond und Planeten für jeden Tag des Jahres, stand nun im

Vordergrund. Die Jahrgänge 1617 bis 1620 (Caspar 52) waren schon in Linz erschienen, nun sollten die Jahrgänge 1621 bis 1636 (Caspar 84) berechnet und gedruckt werden. Als Helfer bei den Rechnungen gewann Kepler den jungen Mediziner und Astronomen Jacob Bartsch, der auch seine Tochter Susanna heiratete (Näheres dazu im Beitrag ‚Freunde und Weggefährten‘ unter Matthias Bernegger). Wenn Kepler abwesend war, wurde das ‚Somnium‘ (Caspar 86) gedruckt, Keplers Traum von einer Reise zum Mond, ein Werk, das in Jahrzehnten gewachsen war.

Die Ephemeriden waren zur Leipziger Herbstmesse 1630 ausgedruckt, Tampach ersetzte Kepler die Druckkosten und übernahm damit den Verlag. Am 8. Oktober 1630 begann Kepler eine Reise, die am 15. November mit seinem Tod in Regensburg endete. Das ‚Somnium‘ wurde unter Bartschs Leitung weiter gedruckt, erschien aber erst 1634 in Frankfurt mit einer Widmung von Keplers Sohn Ludwig an Landgraf Philipp von Hessen-Butzbach. Nach Keplers Tod verweigerte Wallenstein jegliche Zahlungen für die Druckerei. Bartsch mußte seine die ‚Tabulae Rudolphinae‘ ergänzenden Schriften auf eigene Kosten drucken. Er starb am 15. August 1632. ♦

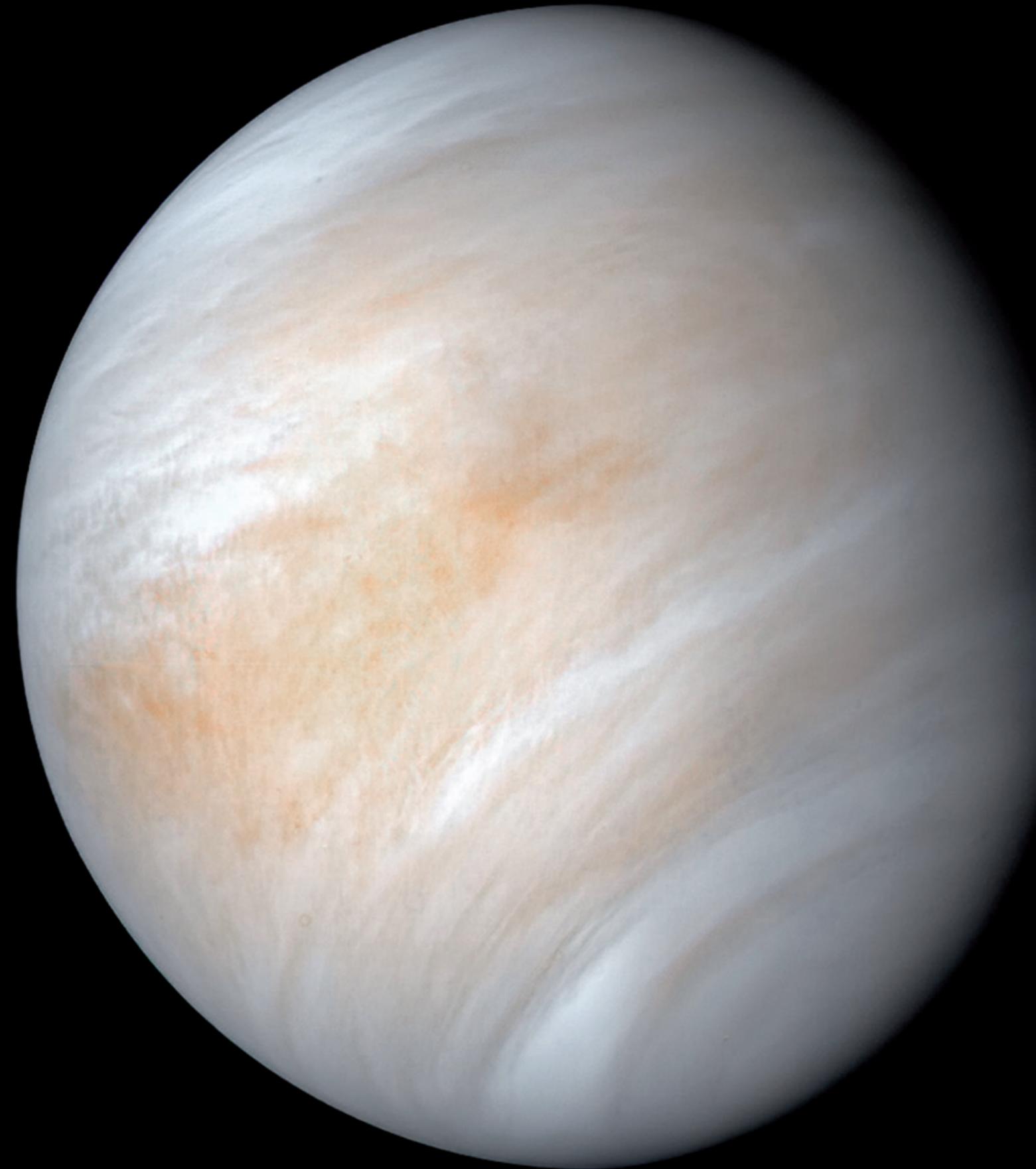
Literatur

- Benzing, Josef*: Die deutschen Verleger des 16. und 17. Jahrhunderts / Josef Benzing. – Neubearbeitung. Frankfurt am Main: Buchhändler-Vereinigung, 1977. – Sp. 1077–1322. – Separatabdr. aus: Archiv für Geschichte des Buchwesens ; 18,5–6.1977
- Caspar, Max*: Bibliographia Kepleriana: ein Führer durch das gedruckte Schrifttum von Johannes Kepler/ im Auftrag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften unter Mitarb. von Ludwig Rothenfelder hrsg. von Max Caspar. – 2. Aufl./ besorgt von Martha List. – München: Beck, 1968. – XIV, 181 S., [42] Bl. – Keplers Schriften sind hier mit den Nummern der Bibliographie zitiert, z. B. (Caspar, 6)
- Reske, Christoph*: Die Buchdrucker des 16. und 17. Jahrhunderts im deutschen Sprachgebiet: auf der Grundlage des gleichnamigen Werkes von Josef Benzing. – 2., überarb. und erw. Aufl. – Wiesbaden: Harrassowitz, 2015. – XXXIV, 1181 S. – (Beiträge zum Buch- und Bibliothekswesen; Bd. 51)
- Seck, Friedrich*: Johannes Kepler und der Buchdruck: zur äußeren Entstehungsgeschichte seiner Werke. – In: Archiv für Geschichte des Buchwesens 11 (1970) 609–726

DR. FRIEDRICH SECK arbeitete als Bibliothekar an der Universitätsbibliothek Tübingen und wirkte an der Ausgabe von Johannes Keplers Gesammelten Werken der Bayerischen Akademie der Wissenschaften mit. Von ihm sind zahlreiche Veröffentlichungen u. a. über Kepler und Schickard sowie das Buch- und Bibliothekswesen erschienen.

Hinweis: Auf Wunsch des Autors erscheint der Text in alter Rechtschreibung.

Weltbilder



VENUS
Bild: NASA/JPL-Caltech

Himmlische Kreise: Weltbilder vor Kepler

BURKHARD KÜMMERER

Der Blick zum Himmel ist so alt wie die Menschheit. Aber hingehen und nachschauen, wie es da oben aussieht, kann man nicht. So blieb viel Raum für Spekulationen, bis im Laufe des 16. und 17. Jahrhunderts genauere Beobachtungen den Vorstellungen vom Aufbau der Welt immer engere Grenzen setzten. Viele Ansichten über die Welt haben auch in Keplers Denken ihre Spuren hinterlassen; sie stehen im Zentrum dieses Überblicks.

Warum ist der Himmel interessant?

Das einzig Sichere auf der Erde ist der Himmel: Tag und Nacht, die Mondphasen und das Jahr, auf sie ist Verlass. Tages- und Jahreszeiten strukturieren die Zeit, Himmelsrichtungen den Raum und aus dem Lauf der Gestirne spricht göttlicher Wille. Daher ist die Astronomie, die ‚Lehre von den Sternen‘, eine der ältesten Wissenschaften und für lange Zeit eng verbunden mit der Erstellung von Kalendern, mit Geographie und mit Astrologie.

Kalender nutzen die Vorgänge am Himmel zur Orientierung im Jahresablauf: Der Auftritt des Sirius am Himmel verkündete im alten Ägypten den Beginn der Nilüberschwemmungen, und das christliche Ostern liegt auf dem ersten Sonntag nach dem ersten Vollmond nach der Frühjahrs-Tagundnachtgleiche. Aber wann ist das?

Die drei periodischen Vorgänge am Himmel, der Tag, der Monat und das Jahr, sind Grundlage fast aller Kalender. Durch langjährige Beobachtungen kannte man deren Länge schon in vorchristlicher Zeit bis auf wenige Minuten genau, aber sie passen so gar nicht zusammen. In Kalendern versuchte man dies durch eingeschobene und wegfallende Tage auszugleichen: Am bekanntesten sind die julianische Kalenderreform durch Julius Caesar im Jahr 47 v. Chr. und die gregorianische Kalenderreform durch Papst Gregor XIII. im Jahr 1582, die bis heute unseren Kalender bestimmt. Da sich Keplers Geburtsdatum (27. Dezember 1571) noch nach dem julianischen Kalender richtet, steht die Erde erst am

6. Januar 2022 zum 450. Mal wie bei Keplers Geburt.

Ohne Himmelsrichtungen ist eine Orientierung kaum vorstellbar: Am Tag unterstützen uns die Sonne, bei Nacht die Sterne („Polarstern“) bei ihrer Bestimmung. Mit astronomischen Grundkenntnissen lässt sich aus der Mittagshöhe der Sonne und aus der Höhe des Polarsterns die geographische Breite bestimmen, die Bestimmung geographischer Längen ist dagegen mühsamer und gelang zunächst nur mithilfe ‚astronomischer Uhren‘ wie Mondfinsternissen oder später der Stellung der Jupitermonde.

In fast allen alten Hochkulturen werden auffallende Himmelskörper mit Göttern in Verbindung gebracht, deren Wille sich durch Beobachtung der Himmelserscheinungen erkunden lässt. Ihre Fortsetzung findet die Vergöttlichung der Himmelskörper in der Astrologie, die den postulierten Einfluss der Gestirnstellungen auf das irdische Geschehen nutzt, um die Zukunft vorherzusagen oder günstige Zeitpunkte für bestimmte Tätigkeiten festzulegen.

Es gab also schon immer gute Gründe, sich für den Lauf der Gestirne zu interessieren und Experten, ‚Astronomen‘, mit deren Erkundung zu beauftragen.

Astronomie zwischen Mythos und Beobachtung in vorgriechischer Zeit

Zeugen für frühe Himmelsbeobachtungen wie Stehenge, die Himmelscheibe von Nebra oder mehrere Goldhüte belegen, dass schon vor weit über 3000 Jahren grundlegende astronomische Kenntnisse zu Jahreslänge, Sonnenwenden und zu weiteren astronomischen Zyklen vorhanden waren und zur

kalendarischen Orientierung herangezogen wurden. Weit fortgeschritten war die babylonische beobachtende Astronomie; ihre Spuren finden sich noch heute: Die Einteilung des Kreises in 360 Grad und unsere Stundenzählung erinnern daran. Die erstaunliche Genauigkeit ihrer Messungen der Längen von Monat und Jahr, aber auch des Umlaufs von Venus und Mars, diente vor allem astrologischen Vorhersagen. Die von ihnen geprägten astrologischen Zuordnungen haben sich im Wesentlichen bis heute erhalten: Der Mond bestimmt Pflanzenwachstum, die Sonne ist Herrin über das Leben, die Venus (wir verwenden die heutigen Namen)



steht für die Liebe, der Planet Mars ist Unglückstern, Jupiter steht für die Schöpfung, Merkur für die Wissenschaften und das Wahrsagen, etc. (vgl. [4]).

Auch die beiden großen astronomischen Zyklen waren schon bekannt: Die gut 18-jährige Sarosperiode, nach ihr wiederholen sich Sonnen- und Mondfinsternisse fast identisch, und die 19-jährige Meton-Periode, sie versöhnt ein wenig den Monat mit dem Jahr, denn 235 Mondmonate entsprechen ziemlich genau 19 Jahren. Benannt ist sie nach dem griechischen Astronomen Meton aus dem 5. Jahrhundert v. Chr., dem Kepler eine Säule auf dem Frontispiz der ‚Rudolphinischen Tafeln‘ zubilligte.

Entgöttlichung der Welt: Thales und Anaximander von Milet

Im 6. Jahrhundert vor Christi Geburt änderte sich an der Ionischen Küste in Kleinasien der Blick auf die Welt grundlegend. Thales von Milet (etwa 624–547 v.

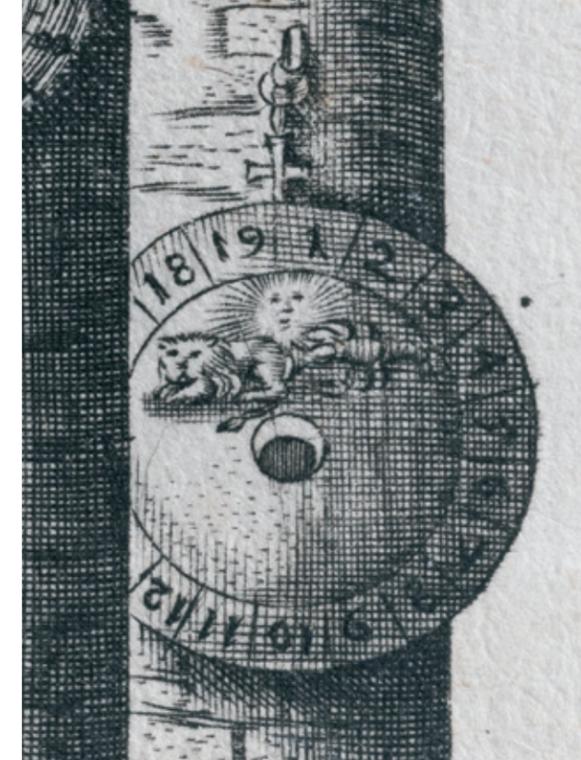


Abb 1. An einer Meton gewidmeten Säule im Frontispiz von Keplers ‚Rudolphinischen Tafeln‘ findet sich dieser Hinweis auf den 19-jährigen Metonzyklus. Dieser und alle folgenden Ausschnitte aus: Johannes Kepler ‚Tabulae Rudolphinae‘, Ulm 1630. Kepler-Museum Weil der Stadt.

Abb 2. (links) Ein Astronom mit einer phrygischen Mütze peilt über Daumen und Zeigefinger nach den Sternen. Er steht in Keplers Frontispiz der Rudolphinischen Tafeln für die vorgriechische Astronomie.

Chr.) erklärte die Nilüberschwemmungen nicht mehr durch Götter, sondern durch plötzlich nachlassende Winde, die das Wasser vorher zurückgehalten haben. Nicht mehr der Gott Poseidon ist für Erdbeben zuständig, sondern die auf dem Wasser schaukelnde Erde und eine Sonnenfinsternis soll Thales ebenfalls vorhergesagt haben, sicherlich mit babylonischem Hintergrundwissen.

Während im alten Ägypten und im Zweistromland die Erde meist als flach vorgestellt wurde, über der sich ein Himmel wölbt, war diese Vorstellung bei dem Seefahrervolk der Griechen nicht haltbar: Nähert sich ein Schiff dem Hafen, sieht man an Land zuerst die Segel, ehe das ganze Schiff sichtbar wird; schon am ‚Schwäbischen Meer‘, dem Bodensee, kann man sich gut davon überzeugen: Die Erde ist nicht flach!

In krasser Abgrenzung von mythischen Vorstellungen entwirft eine halbe Generation später der Vorsokratiker Anaximander von Milet (611–546 v. Chr.) in einer grandiosen Spekulation sein Bild von der Welt (vgl. [9]): Die Erde ist ein Zylinder, dreimal so breit wie hoch und gewölbt; auf einer ihrer Grundflächen leben die Menschen. Die Sonne ist ein hohler Ring, innen brennt Feuer und durch ein Loch, so groß wie die Erde, sehen wir das Feuer; ähnlich der Mond. Verstopft das Loch, entsteht eine Finsternis. Der Kreis der Sonne ist

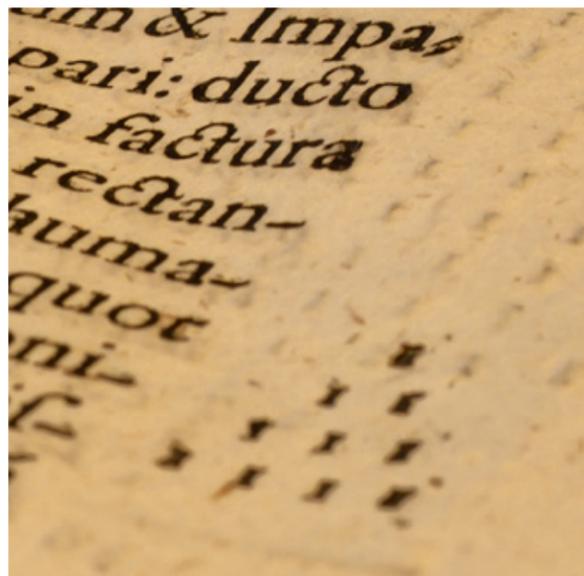


Abb. 3: Das pythagoräische Tetraktys-Symbol.
Aus: Johannes Kepler
'Harmonice Mundi',
Linz 1619. ERB Lindau.

27-mal, der des Mondes 19-mal so groß wie die Erde. Die Fixsterne befinden sich auf einer Kugel um die Erde, ihr Abstand beträgt das Neunfache der Größe der Erde. Und weil die Erde zu allen Rändern den gleichen Abstand hat, bewegt sie sich nicht aus der Mitte heraus: Sie ruht.

Wohl als erster führte Anaximander Zahlenverhältnisse, geometrische Begriffe und (für die ruhende Erde) Symmetrieargumente in die Beschreibung der Welt ein, dabei ist es bis heute geblieben.

Die Geburt der Sphärenharmonie: Pythagoras und die Pythagoräer

Ohne Pythagoras und sein Fortleben bei Platon und im Neuplatonismus ist Keplers Denken nicht vorstellbar. Pythagoras aus Samos (ca. 560–496 v. Chr.), manche sehen ihn als Schüler von Anaximander, gründete in Unteritalien den Geheimbund der Pythagoräer. Dieser Bund war so geheim, dass über das Leben des Pythagoras sowie über seine Anteile an den Überlegungen der Pythagoräer sehr wenig bekannt ist. Daher sprechen wir im Folgenden meist von den Pythagoräern.

Auf die Pythagoräer (oder vielleicht doch auf Pythagoras selbst?) geht das erste mathematisch formulierte Naturgesetz zurück: Der klingende Teil einer fest eingespannten Saite könne durch Abgreifen oder

einen verschiebbaren Steg verkürzt werden wie auf einer Gitarre oder einem Streichinstrument. Die Töne der frei schwingenden Saite und der verkürzten Saite bilden ein Intervall und genügen folgenden Gesetzmäßigkeiten:

Gleiche Längenverhältnisse zwischen ganzer und verkürzter Saite führen zu denselben Intervallen, einfache ganzzahlige Verhältnisse führen zu wohlklingenden, zu ‚harmonischen‘, Intervallen.

Verkürzt man zum Beispiel die Saite auf die Hälfte, so erklingt die Oktave zum Grundton der frei schwingenden Saite, verkürzt man sie um ein Drittel, so erklingt die Quinte etc. (dies ist Ausdruck unserer logarithmischen Tonhöhenwahrnehmung, vgl. [8]). Die Entdeckung dieses Gesetzes wird wohl zu dem (so nicht wörtlich überlieferten) Grundsatz „*Alles ist Zahl*“ der Pythagoräer beigetragen haben.

Die Lehre der Pythagoräer verlangte ‚Liebe zur Erkenntnis‘, ‚Philosophie‘ (eine pythagoräische Wortschöpfung). Gegenstand der Erkenntnis war die Welt als geordnetes Ganzes, der ‚Kosmos‘ (ebenfalls eine pythagoräische Wortschöpfung). In der Welt schließlich herrscht Harmonie, eine bewegte Ordnung. Es galt also, sich Gedanken über den Aufbau der Welt als harmonisches geordnetes Ganzes zu machen.

Die Erde wurde mit den Pythagoräern endgültig zur Kugel und seither zweifelte auch kaum noch jemand daran. Der Grund war wohl zunächst eher philosophischer Natur, ist doch die Kugel die vollkommenste geometrische Form. Bald kamen noch weitere Argumente hinzu: Reist man nach Süden, so steht die Sonne höher und sobald klar war, dass eine Mondfinsternis durch den Erdschatten verursacht wurde, konnte man auch hier wieder die Kugelgestalt der Erde erkennen.

Aber auch der Aufbau des gesamten Kosmos war Gegenstand pythagoräischer Spekulation. Im Zentrum der Welt kann nicht die ‚unvollkommene‘ Erde stehen, stattdessen befindet sich dort das ‚ehrwürdigere‘ Zentralfeuer (das der Orphik nahestehende Pythagoräertum war auch eine Reinigungsreligion). Die Erde kreist um das Zentralfeuer, wir sehen es aber nicht, weil es sich immer auf der Rückseite der Erde befindet. Nach außen folgen nun der Reihe nach die



Abb. 4: Die Musik der Planeten.
Aus: Johannes Kepler
'Harmonice Mundi',
Linz 1619. ERB Lindau.

sieben beweglichen Himmelskörper, Mond, Sonne, Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn. Sie sind an sieben Sphären befestigt und entsprechen den sieben Saiten einer Lyra. Um die den Pythagoräern heilige Zahl 10 (‚Tetraktys‘, zehn ist die Summe der ersten vier Zahlen) voll zu machen, kreist, der Erde immer gegenüber, eine ‚Gegenerde‘ um das Zentralfeuer. Um dieses ganze System dreht sich die Fixsternsphäre, außerhalb befindet sich das ‚große Feuer‘.

Alle Bewegungen erfolgen mit gleichbleibenden Geschwindigkeiten auf Kreisen und zwischen den Umläufen bestehen feste Zahlenverhältnisse, welche die ‚Sphärenharmonie‘ zum Erklingen bringen. Sie konnte, nach der Legende, nur von dem ‚Meister‘ Pythagoras selbst vernommen werden. Wir aber würden sie, so berichtet Aristoteles, nicht hören, weil „der Klang schon bei unserer Geburt da sei, so dass er nicht vor dem Hintergrund ... der Stille wahrnehmbar sei“. ([I], II, 293a, 290b). Die ‚Sphärenharmonie‘ begleitet nun die Astronomie für wenigstens zwei Jahrtausende und erklingt besonders vernehmlich in Keplers ‚Harmonice Mundi‘ nach.

Ein Weltbild für die Ewigkeit: Platon und Aristoteles

Platon (428/7–348/7 v. Chr.) war kein Astronom. Dennoch hat er, anknüpfend an die Pythagoräer, wesentlichen Anteil am Forschungsprogramm der Astronomie für die nächsten fast 2000 Jahre. In den ‚Gesetzen‘, VII, 822a, schreibt Platon (zitiert nach Platon, Werke in acht Bänden, griechisch und

deutsch, Hrsg. Gunther Eigler, Darmstadt 1977): „*Nicht richtig ... ist die Ansicht über den Mond, die Sonne und die übrigen Gestirne, dass sie etwa jemals herumirren, sondern gerade das Gegenteil davon ist der Fall – denn dieselbe Bahn und nicht viele, sondern stets eine einzige durchläuft im Kreis ein jedes von ihnen.*“

Diese Ansicht verfestigte sich zu der Überzeugung, welche in der Folge von Aristoteles und seinen Kommentatoren in Stein gemeißelt wurde: Nur gleichförmige Kreisbewegungen können zur Beschreibung der Bewegungen der Gestirne herangezogen werden. Damit war das ‚Kreisdogma‘ geboren, welches nun die Astronomie beherrschen und ihr größte Probleme bereiten sollte – bis Kepler mit seinen beiden ersten Gesetzen in der ‚Astronomia Nova‘ die Kreise durch Ellipsen ersetzte und die Geschwindigkeiten dem Flächensatz unterwarf.

Aristoteles (383–322 v. Chr.) wurde zu einem prägenden Philosophen auch für das gesamte christliche Mittelalter. Seine Vorstellungen vom Aufbau des Kosmos legte er in seinem Werk ‚De Caelo‘ (‚über den Himmel‘) nieder ([I]). Sie sollten bis weit in die Neuzeit hinein die Vorstellungen vom Aufbau der Welt bestimmen:

Die Erde ist eine Kugel. Da alle schweren Gegenstände dem Mittelpunkt der Welt zustreben, steht die schwere Erde fest in diesem Mittelpunkt. Die Welt wird aufgeteilt in eine sublunare Sphäre (innerhalb der Mondsphäre) und eine supralunare Sphäre (außerhalb der Mondsphäre). In diesen beiden Sphären herrschen jeweils unterschiedliche Gesetzmäßigkei-



Abb. 5: Das Bild von der Welt (Der 7. Schöpfungstag) in der ‚Schedelschen Weltchronik‘ von Hartmann Schedel, Nürnberg 1493. In der Mitte steht die Erde, umgeben von den weiteren Elementen Wasser, Luft und Feuer. Es folgen die Sphären von Mond, Merkur, Venus, Sonne, Mars, Jupiter, Saturn, Firmament, Kristallhimmel und ‚Primum Mobile‘ (‚Erstes Bewegendes‘) und ein christlicher Himmel. Bayerische Staatsbibliothek München, MDZ

ten: Innerhalb der Mondsphäre herrschen die vier Elemente, Erde, Wasser, Luft und Feuer, hier gibt es Werden und Vergehen und irdische Unordnung. Außerhalb dagegen, im Bereich des ‚Äthers‘, des fünften Elementes (‚Quinta Essentia‘), herrschen ewige Ordnung und die vollkommene Harmonie der gleichförmigen Kreisbewegungen. Erst Kepler rüttelte in seiner ‚Astronomia Nova‘ (vgl. [10]) an dieser Zweiteilung und Newton (1642–1726) durchbrach sie endgültig mit seinem universellen Gravitationsgesetz.

Die beweglichen Himmelskörper – sie fallen ja nicht herunter – befinden sich auf durchsichtigen kristallinen Sphären um den Weltmittelpunkt. Im Laufe der Entwicklung hat sich, von innen nach außen, die

Reihenfolge Mond – Merkur – Venus – Sonne – Mars – Jupiter – Saturn eingebürgert; es folgt schließlich die Fixsternsphäre. Die Sphären haben eine Dicke und berühren sich, denn ein Vakuum ist für Aristoteles nicht denkbar – sein berühmter ‚horror vacui‘. Außerhalb der Fixsternsphäre befindet sich das ewige Feuer. Nun muss sich das Ganze noch bewegen: Die Fixsternsphäre wird durch das ‚Erste Bewegte‘ (‚Primum mobile‘) angetrieben, es gibt durch Berührung die Bewegung an die inneren Sphären weiter, die sich nach innen immer langsamer drehen.

Es war entscheidend für den Fortgang der Astronomie, dass die Lehre des heidnischen Aristoteles christlichen Vorstellungen in verschiedener Hinsicht entgegenkommt: Alles ist hierarchisch geordnet und das ‚unedle‘ Irdische ist sauber getrennt vom Himmlichen ‚am anderen Ende der Welt‘, dem Bereich ewiger Harmonie. Im Himmel ist auch genügend Platz für vollkommene himmlische Geschöpfe, und außerhalb der Fixsternsphäre ist Platz für Gott. So können die Himmelskörper auch von Engeln auf ihren Bahnen bewegt werden, eine Vorstellung des Neuplatonikers Pseudo-Dionysios Areopagites (2. Hälfte 5. Jahrh.). Man findet sie auf ungezählten mittelalterlichen Darstellungen.

Damit steht nun das Weltbild bis in die Neuzeit hinein im Wesentlichen fest und hat sich als äußerst stabil gegen Kritik erwiesen. Denn bricht man einen Stein aus diesem Gebäude heraus, so fällt es in sich zusammen und man muss es ganz aufgeben. Solche Steine waren unter anderen eine sich bewegende Erde, ein erdähnlicher Mond oder eine unendliche Welt (vgl. [15]). Darum haben insbesondere die Kirchen angesichts neu heraufziehender Weltbilder so beharrlich an diesen Vorstellungen festgehalten.

Die erste Vermessung der Welt: Aristarch

Schon in der Antike gab es auch Überlegungen, welche zu einem heliozentrischen Weltmodell führten: In einem kühnen Gedankengang gelang es dem griechischen Astronomen und Mathematiker Aristarch (etwa 310–230 v. Chr.), ohne jedwede technische Hilfsmittel Aufschluss über Aufbau und Größenverhältnisse im Sonnensystem zu erhalten (vgl. z.B. [6] und der Eintrag zu Aristarch in [13]).



Ausgangspunkt ist die Beobachtung, dass bei exaktem Halbmond die drei Himmelskörper Erde, Mond und Sonne ein rechtwinkliges Dreieck bilden mit einem rechten Winkel beim Mond. Der Winkel α zwischen den Richtungen zum Mond und zur Sonne (vgl. Abb. 6) bestimmt die Form dieses Dreiecks schon vollständig, freilich noch nicht seine absolute Größe. Aus der Messung dieses Winkels schloss Aristarch, dass die Sonne 19-mal (statt etwa 400-mal) weiter von der Erde entfernt sei als der Mond. Und da von der Erde aus gesehen Mond und Sonne etwa gleich groß erscheinen, muss die Sonne 19-mal so groß sein wie der Mond. (Dass er für α einen zu kleinen Wert maß und deshalb die Entfernungen unterschätzte, ändert nichts an der prinzipiellen Richtigkeit seiner Überlegung.)

Nun müsste man noch die Größe des Mondes kennen, um die Abstände auch absolut bestimmen zu können. Dazu muss man zunächst auf eine totale Mondfinsternis warten und sieht: Offenbar ist der Erdschatten etwa doppelt so groß wie der Mond, und mit einigen Korrekturen (vgl. die angegebene Literatur) errechnet man, dass der Mond ein gutes Drittel so groß ist wie die Erde. Kennt man nun noch die Größe der Erde, ist man fertig. Die aber hatte Eratosthenes (etwa 275–194 v. Chr.) durch Messungen der Länge des Sonnenschattens in Alexandria und dem heutigen Assuan erstaunlich genau bestimmt (wenn wohl auch mit etwas Glück).

Schon mit den zu kleinen Werten war offensichtlich, dass die Sonne ungleich größer sein müsse als die Erde. Das war wohl der Grund für Aristarchs Überzeugung, dass die Sonne und nicht die Erde im Mittelpunkt der Welt stehen müsse, und postulierte ein heliozentrisches Modell der Welt.

Und die Erde bewegt sich doch nicht!

Trotz der Überlegungen von Aristarch hat sich für fast 2000 Jahre das Bild von der Welt nach Aristoteles mit

einer feststehenden Erde in der Mitte behauptet. In einer Zeit, als Gravitation und Trägheit noch nicht zum Vokabular der Naturbeschreibung gehörten, gab es dafür auch gute Gründe.

Die Erde kann sich nicht um die eigene Achse drehen: Denn erstens müssten dann Gegenstände von der Erde hinausgeschleudert werden wie von einer Drehscheibe. Und zweitens müsste sich die Erde unter einem fallenden Gegenstand hindurch weiterdrehen: in unseren Breiten bei einem freien Fall aus 5 Metern Höhe (er dauert etwa eine Sekunde) um etwa 300 Meter. Die Erde kann sich auch nicht um die Sonne bewegen: Das schlagendste und oft überprüfte Argument ist die scheinbar fehlende Parallaxe: Während des Umlaufs der Erde um die Sonne muss sich die Blickrichtung zu einem Fixstern ändern (‚Parallaxe‘, vgl. Abb. 7). Dies wurde aber nicht beobachtet. In der Tat ist die Parallaxe bei den riesigen Entfernungen zu den Sternen so klein, dass sie erst im 19. Jahrhundert gemessen werden konnte. Solch große Entfernungen und so viel ‚nutzloser‘ leerer Raum aber waren einfach undenkbar. Dass die schwere Erde um die feurige, also leichte Sonne kreisen sollte, war ebenfalls schwer vorstellbar, und schließlich konnte man sich auch auf die Bibel, Josua 10, Vers 12, berufen: Dort wird der Sonne befohlen: ‚Sonne, steh‘ still zu Gibeon ...‘, aber diesem Befehl kann natürlich nur eine bewegte Sonne gehorchen. Es gab also aus damaliger Sicht durchaus gute Argumente für das geozentrische aristotelische Bild von der Welt.

Beobachtungen am Himmel

Etliche Phänomene am Himmel lassen sich im aristotelischen Weltmodell nur mit größter Mühe deuten: Die Jahreszeiten zum Beispiel, sie werden durch die Sonnenwenden und die Tag- und Nachtgleichen bestimmt, sind verschieden lang, und die Existenz ringförmiger Sonnenfinsternisse zeigt, dass die (scheinbare) Größe des Mondes, also seine Entfernung von der Erde, sich etwas ändern kann.

Große Sorgen bereiteten auch die Planeten: Merkur und Venus entfernen sich nie allzu weit von der Sonne, während ihr die anderen Planeten manchmal gegenüberstehen können; auch die Helligkeit der Planeten schwankt. Am irritierendsten aber sind wohl

Abb. 6. (links): Bei Halbmond bilden Erde, Mond und Sonne ein rechtwinkliges Dreieck mit dem rechten Winkel beim Mond.

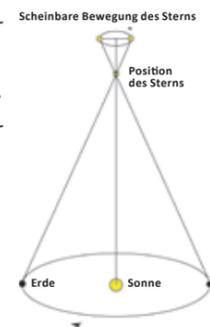


Abb. 7. Entstehung der Parallaxe: Durch den Umlauf der Erde um die Sonne ändert sich die Blickrichtung auf andere Himmelskörper.

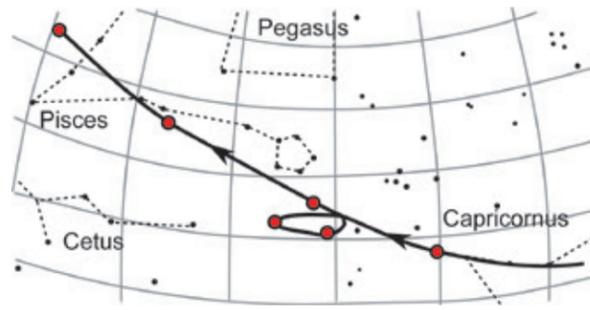
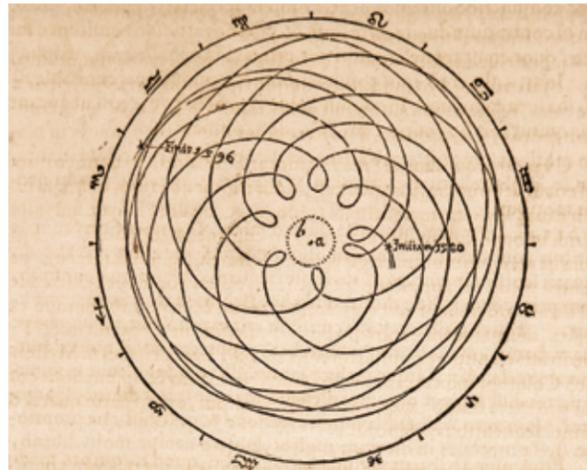


Abb. 8: Ausschnitt aus der Bahn des Mars am Fixsternhimmel mit einer Rückwärtsschleife.

die ‚Rückwärtsschleifen‘ (retrograde Bewegung): Normalerweise bewegen sich die Planeten vor dem Hintergrund des Fixsternhimmels jeden Tag ein Stück vorwärts, einige langsamer, einige schneller, aber ab und zu bewegen sie sich auch in die entgegengesetzte Richtung.

Abb. 9: Die Marsbahn zwischen 1580 und 1596, Erdspektive. Aus: Johannes Kepler ‚Astronomia Nova‘, Heidelberg 1609. ERB Lindau



Eine der berühmten Graphiken aus Keplers ‚Astronomia Nova‘ zeigt die Bahn des Mars am Himmel zwischen 1580 und 1596, wie sie sich aus Erdspektive darbietet: Ein rechtes ‚Kuddelmuddel‘. Gleichmäßig kreisförmige Bewegungen der Planeten wollen so gar nicht dazu passen und es ist offenbar keine leichte Aufgabe, mit ihnen Ordnung in solche Bewegungen zu bringen. Daher bezeichnete schon der große Mathematiker und Astronom Eudoxus (ca. 400–347 v. Chr., wir müssen ihn hier ansonsten übergehen) mit dem Begriff ‚Rettung der Phänomene‘ das Programm, die Beobachtungen am Himmel mit dem Kreisdogma zu

versöhnen. Auf dieser Basis wollte man ja die Positionen des Mars und anderer Gestirne zu einem gegebenen Zeitpunkt berechnen und dafür gibt es gute Gründe.

Drei Hauptaufgaben der quantitativen Himmelsbeobachtung

Die Position eines Himmelskörpers hängt von der Zeit und dem Ort der Beobachtung ab. Sind zwei der drei Größen Position, Zeit oder Ort bekannt, so kann man daraus die dritte bestimmen. Daraus ergeben sich drei Hauptaufgaben der quantitativen Himmelsbeobachtung.

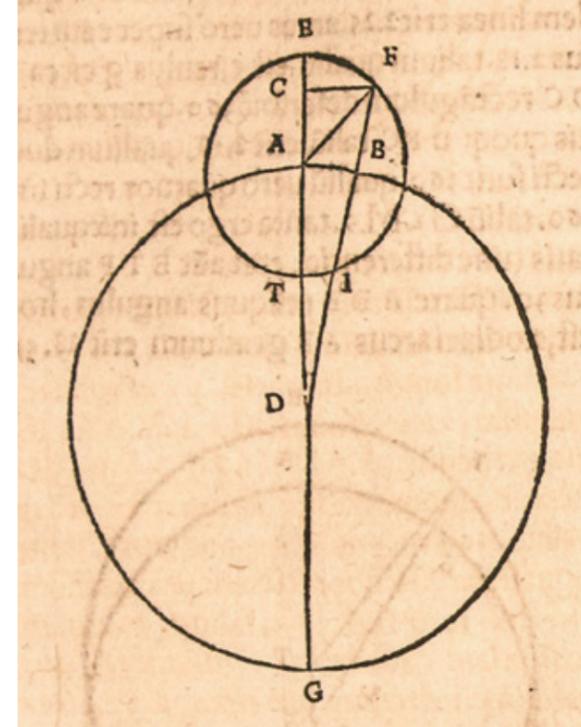
Erste Hauptaufgabe: Bestimmung der Zeit. Aus den Positionen der Himmelskörper kann man auf die Ortszeit schließen, wie zum Beispiel mit einer Sonnenuhr.

Zweite Hauptaufgabe: Astronavigation. Durch Anvisieren der Gestirne am Himmel und aus der Zeit der Beobachtung kann man auf den eigenen Standort auf der Erde schließen.

Dritte Hauptaufgabe: Horoskope: Wo steht wann welcher Himmelskörper? Ein Horoskop analysiert die Positionen von Sonne und Planeten im Tierkreis, die Winkel (Aspekte), in welchen die Planeten zueinanderstehen, und den Himmelsabschnitt (das ‚Haus‘), in welchem ein Tierkreiszeichen oder beweglicher Himmelskörper zu einem bestimmten Zeitpunkt steht. Letzteres hängt auch vom Ort der Beobachtung ab.

Kreise kreisen auf Kreisen: Epizyklen des Apollonius

Setzt man mehrere kreisförmige Bewegungen, auch gleichmäßige, zusammen, so können recht verschlungene Pfade entstehen wie die der Planeten. Wahrscheinlich auf den griechischen Mathematiker Apollonius von Perge (etwa 260–190 v. Chr.) geht die Idee zurück, ‚Epizyklen‘ zur Beschreibung ihrer Bahnen zu benutzen: Ein Punkt rotiert auf einem Kreis, dessen Mittelpunkt seinerseits auf einem ‚Trägerkreis‘, dem ‚Deferenten‘, rotiert (Abb. 10). Auf vielen Volksfesten befinden sich Fahrgeschäfte, in welchen auf einer großen rotierenden Scheibe kleinere rotierende Karussells angebracht sind und das Publikum in Epizyklen bewegt – oder herumschleudert (Abb. 11). Und wie man auf dem Volksfest sehen kann, lassen sich auf diese



Weise auch Rückwärtsbewegungen erzeugen. Mit solchen Epizyklen konnte man also hoffen, aufbauend auf Kreisen die Bewegungen der Planeten wiederzugeben.

Die mathematische Beschreibung der Welt:

Hipparch und Ptolemäus

Hipparch (ungefähr 190–125 v. Chr.) war einer der bedeutendsten Astronomen der Antike, und doch hat sich von ihm nur sehr wenig erhalten. Vieles aber lebt in den Werken von Ptolemäus fort, der sich in großem Umfang auf Hipparch stützte. Hipparch hat wahrscheinlich als Erster mit Epizyklen Positionen von Himmelskörpern berechnet, er erstellte aber auch einen umfangreichen Fixsternkatalog (mit wohl 800 bis 1000 Sternen) und für seine Dreiecksberechnungen die erste Sehnentabelle, eine Version einer Sinustabelle.

Die erste erhaltene konsequente Beschreibung der Bewegungen der sichtbaren Himmelskörper schuf Claudius Ptolemäus (etwa 100–170) in Alexandria mit seinem unter dem Namen ‚Almagest‘ bekannten Werk (vgl. [13]). Im geozentrischen Weltbild entwickelte er das Instrumentarium für dessen mathematische Beschreibung und schuf die Grundlage zur Erstellung von Tabellen mit den Positionen der Himmelskörper, den ‚Ephemeriden‘. Der Bedarf war, wie schon geschildert, groß, und so prägte das Werk fast eineinhalb tausend Jahre das Bild vom Kosmos, das ‚Ptolemäische



Abb. 10 (links): Ein sich drehender Kreis kreist auf einem Kreis – Entstehung eines Epizykels. Aus: Claudius Ptolemäus ‚Almagest‘, Hrsg. Oswald Schreckenfuchs, Basel 1531. ERB Lindau.

Abb. 11 (rechts): Auf vielen Volksfesten werden in Fahrgeschäften Menschen in Epizyklen bewegt, wie hier auf dem Heinerfest in Darmstadt. Foto: Kümmerer

Weltbild‘. Es war in dieser Zeit nach der Bibel und den Elementen des Euklid das am meisten verbreitete Buch. Im Geiste des Kreisdogmas beschrieb Ptolemäus die Bewegungen in der Sprache der Epizyklen, freilich mit einigen zusätzlichen Komplikationen. Manchmal muss auch ein Kreis auf einem Kreis rollen, der selbst wieder auf einem Kreis rollt (‚Epi-Epizyklen‘, vgl. Abb. 14). Auch steht die Erde nicht im Mittelpunkt des Trägerkreises, des Deferenten (der Abstand zum Mittelpunkt bestimmt sich aus der Exzentrizität der Keplerellipse, wie wir nun wissen), und, noch bedenklicher: Die Kreisbewegung selbst ist nicht gleichförmig, sondern erscheint nur aus Sicht eines weiteren Punktes außerhalb des Mittelpunktes, des sogenannten ‚Äquanten‘, gleichförmig (die Winkelgeschwindigkeit ist bezüglich des Äquanten konstant, würden wir heute sagen). Es war vor allem diese letzte Komplikation, die das kopernikanische Fass zum Überlaufen brachte und ihn nach einer neuen Beschreibung suchen ließ. Tatsächlich könnte man, wie man heute weiß, jede (‚quasiperiodische‘) Bewegung auf diese Weise als Überlagerung von gleichförmigen Kreisbewegungen darstellen, allerdings wird diese Beschreibung schnell unübersichtlich.

Legt man die Parameter (Radien, Geschwindigkeiten etc.) geeignet fest, so konnte man mit diesem Modell in den kommenden eineinhalb tausend Jahren die Bewegungen aller Gestirne mit einigermaßen ausreichender Genauigkeit beschreiben. Es blieb jedoch eine offene und immer wieder diskutierte Frage, ob die ptolemäische Beschreibung ein nur fiktives mathema-

Abb. 12 (links): Hipparch im Frontispiz von Keplers ‚Rudolphinischen Tafeln‘.

Abb. 13 (rechts): Ptolemäus im Frontispiz von Keplers ‚Rudolphinischen Tafeln‘.

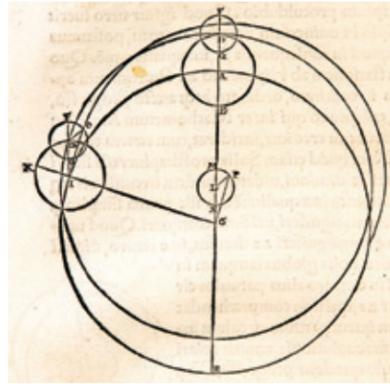


Abb. 14. Diese Abbildung von Kopernikus gibt einen Eindruck von den komplizierten ‚Räderwerken‘, unter anderem mit Epi-Epizyklen, mit denen man die Himmelsbewegungen aus gleichmäßig kreisförmigen Bewegungen zusammengesetzt hat. Aus: Nikolaus Kopernikus ‚De Revolutionibus‘, Nürnberg 1543. ERB Lindau.

tisches Modell wäre (so z.B. Averroës/Ibn Ruschd, 1126 – 1198) oder doch die wahren Bewegungen der Himmelskörper wiedergäbe. Nie wurde jedoch, weder hier noch für alle andere in diesem Artikel beschriebene Weltmodelle, der Versuch gemacht, die Bewegungen physikalisch, also als Ergebnis der Wirkung von Kräften zu erklären. Auch diese Frage erstmals zu stellen blieb Kepler vorbehalten ([5]).

Die ganze ptolemäische Theorie fußt auf trigonometrischen Berechnungen. Für sie erstellte Ptolemäus, wohl aufbauend auf Hipparch aber umfangreicher als bei diesem, im ‚Almagest‘ die ersten überlieferten Sehnentabellen (vgl. auch [8]) – und steht damit am Beginn einer weiteren zweitausendjährigen Geschichte.

Der Titel ‚Almagest‘ wirft auch ein interessantes Licht auf dessen Überlieferungsgeschichte: Der Titel lautete ursprünglich ‚mathematike syntaxis‘ (μαθηματικὴ σύνταξις, ‚mathematische Zusammenstellung‘), wurde aber bald zu ‚he megiste syntaxis‘ (ἡ μέγιστη σύνταξις, ‚die große Zusammenstellung‘), vielleicht zur Unterscheidung von einem Werk von Hipparch. Das Werk fand weite Verbreitung im islamischen Raum und dort wurde aus ‚he megiste‘ im Arabischen ‚al-majisti‘, welches schließlich im Lateinischen zu ‚Almagestum‘ verballhornt wurde.

Die Beschreibung des ‚Almagest‘ wäre unvollständig ohne seine beiden Geschwister: Die Tabellen des ‚Almagest‘ dienten natürlich auch der Astrologie und mit seinem astrologischen Werk ‚Tetrabiblos‘ (‚vier Bücher‘) schuf Ptolemäus die ‚Bibel der Astrologie‘, wie man gerne sagt. Da aber der Ort der Gestirne am Himmel auch vom Ort der Beobachtung auf der Erde abhängt, lieferte Ptolemäus mit seiner ‚Geographie‘ auch noch die erste umfassende Darstellung der damals bekannten Welt. Vielleicht von Hipparch übernommen führte Ptolemäus hier die bis heute gültigen Längen- und Breitengrade ein (nur der Nullmeridian ging bei ihm durch die kanarischen Inseln, so sparte man sich negative Längengrade), um die Orte von Städten beschreiben zu können. Seine Tabellen mit Koordinaten von Städten dienten im gesamten Mittelalter der Erstellung von Landkarten.

Lebendige Astronomie in den islamischen Ländern: al-Battānī und al-Bīrūnī

Vieles kann hier nur erzählt werden, weil das antike Wissen im islamischen Raum mit großem Interesse aufgenommen, gepflegt und weiterentwickelt wurde. Der Koran und die islamischen Glaubensregeln gaben vielfältigen Anlass, sich für Wissenschaft im Allgemei-

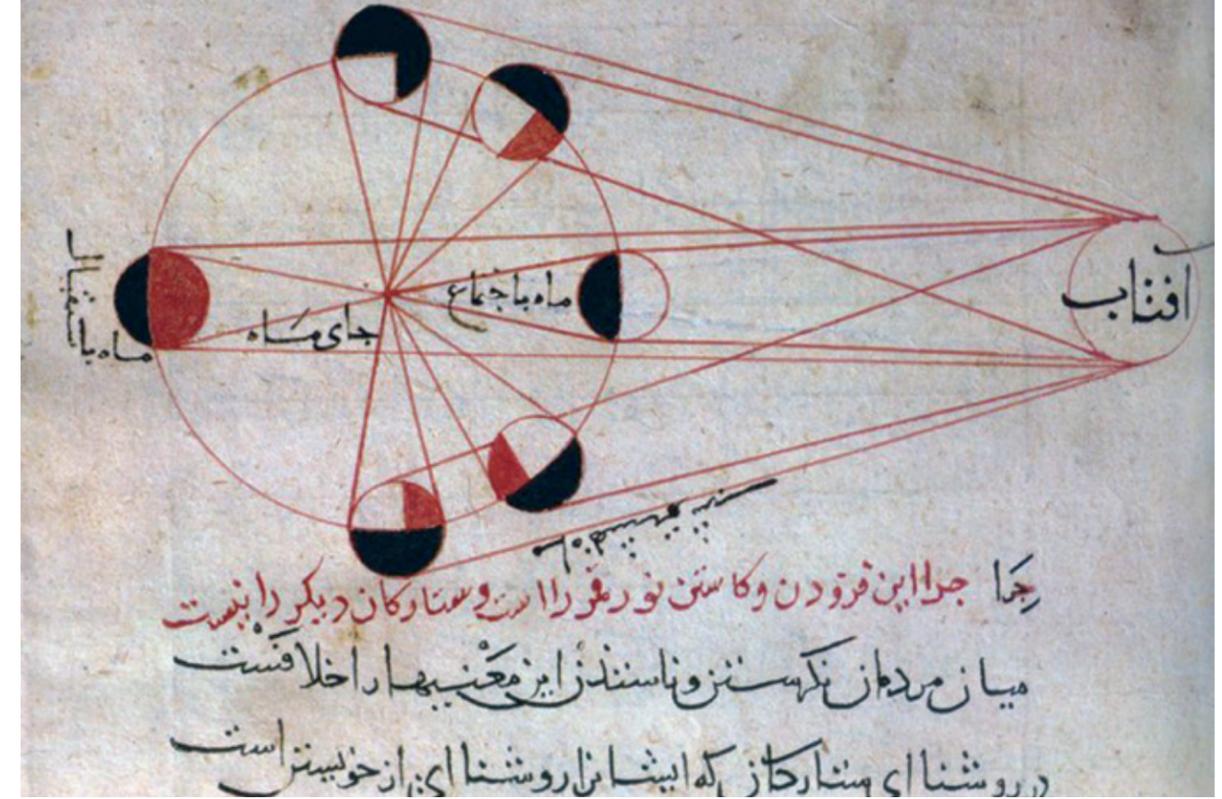


Abb. 15. Al-Bīrūnī erklärt die Phasen des Mondes. Aus: Al-Bīrūnī (973–1048) ‚Kitāb al-Tafhīm‘. Wikimedia Commons.

nen und Astronomie und Geographie im Besonderen zu interessieren: Der Ramadan richtet sich nach den Mondmonaten, die Gebetszeiten nach dem Stand der Sonne und das Gebet muss nach Mekka ausgerichtet sein; und das sind nur einige Anlässe.

Das Haus der Weisheit in Bagdad, gegründet im Jahr 825 vom Kalifen al-Ma'mūn, entwickelte sich schnell zu einer bedeutenden Forschungsstätte. Hier wurde systematisch das griechische Erbe gesammelt, übersetzt und vertieft, vieles wäre sonst nicht auf uns gekommen. In Bagdad erstellte Thabit ibn Qurra (836–901) eine der am weitesten verbreiteten Übersetzungen des ‚Almagest‘, in Syrien und Mesopotamien wirkte einer der bedeutendsten Astronomen der islamischen Welt, al-Battānī (858?–929), der von Kopernikus über 20-mal zitiert wurde (die Angaben schwanken etwas), und in Zentralasien verfasste der Universalgelehrte al-Bīrūnī (973–1048), auch gut bekannt mit Ibn Sīnā bzw. Avicenna (980–1037), neben vielen anderen bedeutenden Werken auch ein Handbuch der Astronomie, in welchem er eine heliozentrische Welt für möglich hält. Viele Sternnamen wie Beteigeuze, Aldebaran oder Deneb, aber auch zentrale Begriffe der Astronomie wie Zenit und Azimut sind arabischen Ursprungs und erinnern uns an diese bedeutende Periode der Astronomie.

Könnte die Welt vielleicht unendlich sein?

Nikolaus von Kues und Giordano Bruno

Da wir uns in diesem Beitrag auf Weltbilder konzentrieren, gehen wir an der Überlieferungsgeschichte des ‚Almagest‘ und den vielen astronomischen Tafeln, die in seinem Gefolge entstanden sind, mit einem freundlichen Seitenblick vorüber. Zwei Denker aber sollen Erwähnung finden, die mit theologischen Argumenten am aristotelisch-ptolemäischen Weltbild gekratzt haben.

Für Nikolaus von Kues bzw. Cusanus (1401 bis 1464) steht Gott über jeder Logik, ist überall und ist zugleich das Größte und das Kleinste. Daraus schloss er, dass die Welt keine Grenzen habe (sagt aber vorsichtshalber, sie sei dennoch nicht unendlich). Die Welt könne daher auch keine Mitte besitzen, und daher sei die Erde auch nicht der Mittelpunkt der Welt und müsse sich bewegen (vgl. [14], S. 169 oder [4], S. 41). Als einer der höchsten Kardinäle wusste er jedoch seine Worte vorsichtig zu wählen und vermied somit einen Konflikt mit der Kirche.

Anders erging es Giordano Bruno (1548–1600), der verwandte Gedanken äußerte: Eine endliche Welt sei eines allmächtigen Gottes nicht würdig, so argumentierte er. In einem unendlichen Universum aber

gebe es keinen ausgezeichneten Mittelpunkt für die Erde. Nun ging er noch einen Schritt weiter und erklärte, dass es also viele Mittelpunkte gebe, in welchen Sonnen stünden, um welche Planeten kreisten, auf welchen Menschen und Tiere lebten und die glauben könnten, sie seien der Mittelpunkt, um welchen sich die restliche Welt drehe. Er formulierte weniger vorsichtig als Nikolaus von Kues und wurde, auch wegen seiner pantheistischen Ansichten, zum Tod auf dem Scheiterhaufen verurteilt und am 17. Februar 1600 in Rom auf dem Campo de' Fiori hingerichtet.

Mit alten Prinzipien zur neuen Welt: Kopernikus

Das ptolemäische Weltmodell ist eines nicht: natürlich und einfach. Als sich der astronomisch interessierte Alfons X. (1221–1282), König von Kastilien, das ptolemäische Modell erklären ließ, soll er gesagt haben (vgl. z.B. [2], S. XLV, Anmerkung 81):

„Wenn der Allmächtige mich gefragt hätte, bevor er sich auf die Schöpfung einließ – ich hätte ihm zu etwas Einfachem geraten.“

Schwerer jedoch wog für Nikolaus Kopernikus (1473–1543), dass die Äquanten des Ptolemäus das Kreisdogma auf nicht mehr hinnehmbare Weise verletzten. Daher suchte er, ganz im Sinn der ‚Rettung der Phänomene‘, nach einer Deutung der Bewegungen am Himmel, die sich besser mit dem Kreisdogma vereinbaren ließ und die Sonnennähe von Merkur und Venus sowie die veränderlichen Helligkeiten und Rückwärtsschleifen der Planeten (und einige weitere Beobachtungen) deuten konnten. Astronomische Daten im engeren Sinn spielten für Kopernikus hingegen nur eine untergeordnete Rolle.

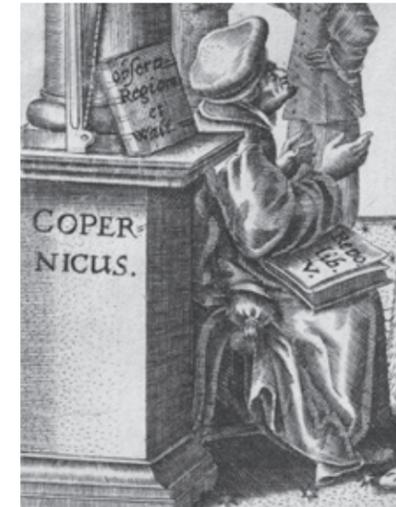
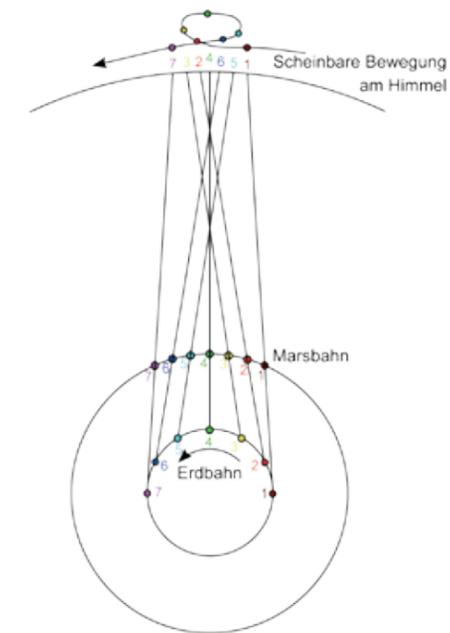
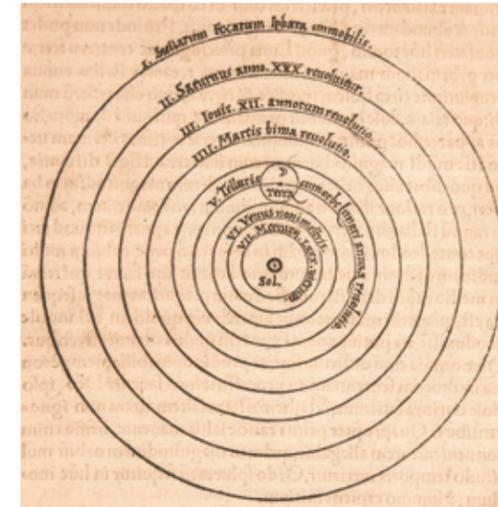
Nikolaus Kopernikus (vgl. insbesondere [2], [3], [6]) wurde im polnischen Thorn (Thorun) geboren und wollte eine kirchliche Laufbahn einschlagen. Während seines Studiums in Krakau und Bologna kam er auch mit pythagoräischem Gedankengut und unorthodoxen Ansichten über die Erdbewegung in Kontakt und vertiefte seine mathematischen und astronomischen Kenntnisse. Anschließend studierte er Medizin in Padua (und war später auch als Arzt tätig), ehe er in Ferrara in Kirchenrecht promovierte. Schon während seines Studiums wurde er Domherr, eine Art kirchlicher

Beamter, in Frauenburg, heute Frombork, in Polen, wo Kopernikus den Rest seines Lebens verbrachte.

Seine Vorstellungen von einer bewegten Erde, für welche er sich auf die Pythagoräer und Aristarch berufen konnte, fanden ihren ersten Niederschlag im sogenannten ‚Commentariolus‘ von 1514, einer Skizze seiner Ideen, die schon einige Beachtung fand. In euklidischer Manier beginnt Kopernikus mit sieben Grundsätzen. Die wichtigsten: Alle Bahnkreise führen um die Sonne (3.), und die Bewegungen der Sonne ebenso wie die Rückwärtsschleifen der Planeten sind auf die Bewegungen der Erde zurückzuführen (6. und 7.).

Damit ist das Wesentliche gesagt: Wenn die Bahnen von Merkur und Venus der Sonne näher sind als die Erde, versteht sich aus Erdspektive ihre immerwährende Sonnennähe von selbst, die unterschiedlichen Helligkeiten der Planeten erklären sich zwanglos aus den unterschiedlichen Abständen zur Erde und die Rückwärtsschleifen aus den Überholvorgängen im Planetensystem: Sie sind nur perspektivische Täuschungen (vgl. Abb. 17). Nun fehlt nur noch Mathematik – viel Mathematik.

Kopernikus machte sich – neben seinen vielen Verpflichtungen als Domherr – ans Werk. Er musste ja ein mathematisches Modell ausarbeiten, aus welchem sich wiederum die Positionen der Himmelskörper ableiten lassen. Zwar setzte Kopernikus nun die Sonne (etwa) in die Mitte, aber in anderen Beziehungen blieb er der Tradition verhaftet und hielt weiterhin an kristallinen Sphären und am Kreisdogma fest. Da sich die Planeten aber auch um die Sonne nicht auf Kreisen bewegen, sondern auf keplerschen Ellipsen, musste auch Kopernikus für sein Festhalten am Kreisdogma einen hohen Preis in der Währung der Epizyklen zahlen. Am Ende ist das mathematische Modell des Kopernikus kaum einfacher – und auch nicht genauer – als das des Ptolemäus, aber es ist überzeugender. Seine Vorhersagekraft hängt jedoch wesentlich von der Wahl passender Parameter ab: Kepler hat sich in seiner ‚Astronomia Nova‘ längere Zeit vergeblich bemüht, die Parameter der Epizyklen des Kopernikus an die genaueren Beobachtungsdaten Tycho Brahes anzupassen, bis er sich, fast aus Verzweiflung, zu seinen beiden ersten Gesetzen gedrängt sah (vgl. [10]) und die Epizyklen abschaffte.



Die mathematische Ausarbeitung und Abstimmung auf Beobachtungsdaten zogen sich hin und Kopernikus zögerte wohl auch, sein Werk zu veröffentlichen. Im Jahr 1539 kam Georg Joachim Rheticus (1514–1574) aus dem Umkreis von Philipp Melancthon (1497–1560) zu Kopernikus nach Frauenburg, überzeugte ihn, das Manuskript nun fertigzustellen, und unterstützte ihn bei der Vorbereitung des Drucks. Nach der Publikation eines Vorabberichts, der ‚Narratio Prima‘, gab er schließlich das Manuskript 1541 bei Johannes Petreius (1497–1559) in Nürnberg zum Druck. An dessen Haus unterhalb der Burg erinnert heute eine Tafel an dieses Ereignis.

An seinem letzten Lebenstag erhielt Kopernikus auf seinem Sterbebett ein gedrucktes Exemplar seines Lebenswerkes ‚De Revolutionibus Orbium Caelestium‘. Er hat es wohl nicht mehr wahrgenommen: Dem Titel waren die beiden letzten Wörter zugefügt und das Werk war um ein Vorwort erweitert worden, welches Kopernikus weder geschrieben noch gutgeheißen hätte: Rheticus hatte die Beaufsichtigung des Druckes dem Nürnberger Humanisten Andreas Osiander (1498–1552) übergeben, der, wohl durchaus in guter Absicht, aber anonym, ein unautorisiertes Vorwort zugefügt hatte. Der entscheidende Satz lautet (vgl. [2]):

„Es ist nämlich gar nicht notwendig, dass diese Hypothesen wahr sein müssen, nicht einmal, dass sie wahrscheinlich sind, sondern es reicht allein, wenn sie eine mit

den Beobachtungen zusammenpassende Berechnung aufzeigen.“

Öffentlich bekannt machte diesen ‚Betrug‘ Johannes Kepler an prominenter Stelle zu Beginn seiner ‚Astronomia Nova‘, denn das Vorwort verstieß, wie gut es auch immer gemeint war, in seinen Augen gegen die wissenschaftliche Redlichkeit (zur Geschichte der Aufdeckung vgl. [3]).

Gerne wird die Veröffentlichung von ‚De Revolutionibus‘ zu den Ereignissen gerechnet, welche den Beginn der Neuzeit markieren. Aber so schnell ändern sich Weltbilder nicht. Kopernikus verstand sein Werk nicht umstürzlerisch, und das Vorwort Osianders mag das seinige dazu beigetragen haben, dass die Brisanz für das Selbstverständnis der Menschen erst langsam erkannt wurde. Auch der Kirche kamen neuere astronomische Berechnungen in ihren Bestrebungen zu einer Kalenderreform nicht ungelegen und erst im Jahr 1616 bestand sie auf Änderungen: Sie betonten im Sinne des Vorworts von Osiander, es handele sich nur um ein mathematisches Modell, nicht aber um eine Beschreibung der Wirklichkeit. Verboten wurde das Werk nie und nördlich der Alpen wurden auch die Änderungen kaum wirksam. Der wirkliche Bruch mit antiken Vorstellungen von Kreisen, Epizyklen und Kristallsphären kam erst mit Johannes Kepler. Daher sprechen manche Autoren lieber von der ‚Keplerschen Wende‘ als von der ‚Kopernikanischen Wende‘ (zum Beispiel [11]).

Abb. 16, links: Aufbau der Welt bei Kopernikus. Die Sonne steht in der Mitte, um sie kreisen die Planeten und um die Erde zusätzlich der Mond. Außen befindet sich die unbewegliche Sphäre der Fixsterne. in grauer Schrift Aus: Nikolaus Kopernikus ‚De Revolutionibus‘, Nürnberg 1543. ERB Lindau.

Abb. 17, Mitte: Wenn die Erde den Mars überholt: Entstehung der Rückwärtsschleife des Mars aus Erdspektive im heliozentrischen System.

Abb. 18, rechts: Kopernikus im Frontispiz von Keplers ‚Rudolphinischen Tafeln‘; auf seinem Schoß ‚De Revolutionibus‘.

Abb. 19. Die Insel Hven im Frontispiz von Keplers ‚Rudolphinischen Tafeln‘



Abb. 20. Tycho Brahe im Frontispiz von Keplers ‚Rudolphinischen Tafeln‘



Kometen sprengen die kristallinen Sphären: Tycho Brahe

Zwei Ereignisse fügten dem aristotelischen Weltbild schweren Schaden zu: Eine Supernova – ein neuer Stern – im Jahr 1572 und ein Komet im Jahr 1577. Beide hat Tycho Brahe beobachtet und vermessen. Tycho Brahe (1546–1601) war Hofastronom des dänischen Königs Friedrich II. Dieser hatte ihm für seine astronomischen Beobachtungen eine wahrhaft königliche Ausstattung, eine ‚Großforschungseinrichtung‘, auf der damals dänischen Insel Hven zur Verfügung gestellt. Mit seinen Instrumenten trieb Brahe die Genauigkeit seiner Beobachtungen auf bisher nicht dagewesene ein bis zwei Bogenminuten (die Breite des Vollmonds entspricht etwa 30 Bogenminuten): Niemand hat vor der Erfindung des Fernrohrs genauer beobachtet. Seine Parallaxenmessungen zeigten jedoch: Der neue und langsam wieder verschwindende Stern schien überhaupt keine Parallaxe aufzuweisen, er musste sich also mindestens in der Nähe der Fixsternsphäre befinden, und auch der Komet war eindeutig außerhalb der Mondsphäre anzusiedeln: Beide Erscheinungen widerlegten also das aristotelische Dogma von der Unveränderlichkeit der Welt außerhalb der Mondsphäre.

Schlimmer noch: Der Komet kreuzte Planetenbahnen, durchstieß also deren Kristallsphären.

Brahe sah sich genötigt, die aristotelischen Vorstellungen vom Aufbau der Welt aufzugeben. Das kopernikanische Modell aber widersprach aus seiner Sicht zu sehr dem kirchlichen Standpunkt. So fand er zu einem Kompromissmodell, einer Variante des wohl schon in der Antike entstandenen aber wenig beachteten ‚ägyptischen‘ Modells (es wird manchmal Herakleides von Pontikos (390–322 v. Chr.) zugeschrieben): Die Erde steht fest in der Mitte der Welt. Um die Erde kreist nach dem Mond die Sonne. Alle anderen Planeten kreisen um die Sonne, Merkur und Venus in engeren Bahnen, Mars, Jupiter und Saturn in Bahnen, welche die Erdbahn umfassen. Auch dieses ‚Tychonische Modell‘ erklärt zwanglos die Sonnennähe von Merkur und Venus sowie die veränderlichen Helligkeiten und Rückwärtsschleifen der Planeten; sogar die erst um 1610 von Galilei (und anderen) mit dem Fernrohr entdeckten Phasen der Venus können auch in diesem Modell leicht gedeutet werden. Daher wurde das tychonische Modell vor allem in kirchlichen Kreisen bis weit ins 17. Jahrhundert hinein präferiert (vgl. auch Abb. 21 von Giovanni Riccioli (1598–1671) aus dem Jahr 1651).



Abb. 21. Frontispiz aus Giovanni Ricciolis ‚Almagestum Novum‘ (Neuer Almagest) Bologna 1651. In diesem allegorienreichen Bild liegt das ptolemäische Weltmodell unten rechts am Boden und das kopernikanische Modell der Welt wird gegenüber einer Variante des tychonischen für zu leicht befunden ERB Lindau. Foto: Patrick Pfeiffer

Das Verhältnis zwischen Brahe und dem dänischen Königshaus verschlechterte sich, und so ging er schließlich 1599 als kaiserlicher Hofmathematiker nach Prag. Brahe war ein glänzender Beobachter, aber nicht gleichermaßen Mathematiker. Johannes Kepler dagegen hatte sich gerade durch sein ‚Mysterium‘ als junger ausgezeichneter Mathematiker empfohlen. Daher holte ihn Tycho Brahe nach Prag und gab ihm den Auftrag, anhand der Daten der Marsbahn das Tychonische Bild vom Planetensystem zu bestätigen. Es kam anders. ♦

Literatur

1. *Aristoteles Werke in deutscher Übersetzung*, herausgegeben von Hellmut Flashar, Band 12, Teil III, Über den Himmel. Akademie Verlag, Berlin 2009.
2. *Nicolaus Copernicus. Das Neue Weltbild*, Lateinisch-Deutsch, übersetzt und herausgegeben von Hans Günter Zekl. Meiner Verlag, Hamburg 2006.
3. *Owen Gingerich: Copernicus. A Very Short Introduction*. Oxford University Press, Oxford 2016.
4. *Jürgen Hamel: Geschichte der Astronomie*. In Texten von Hesiod bis Hubble. Magnus Verlag, Essen 2004.
5. *Martin Holder: Keplers Überlegungen zur Schwerkraft*. In diesem Band.
6. *Thomas S. Kuhn: Die kopernikanische Revolution*. Vieweg, Braunschweig 1981.
7. *Burkhard Kümmerer: Dem Bauplan Gottes auf der Spur*. Katalog zur gleichnamigen Ausstellung in der Ehemals Reichsstädtischen Bibliothek Lindau (ERB), Lindau 2016.
8. *Burkhard Kümmerer: Logarithmen verdoppeln die Lebenszeit der Astronomen*. In diesem Band.
9. *Die Vorsokratiker I, II Griechisch/Deutsch*. Reclam, Stuttgart 1999.
10. *Erich Meyer: Astronomia Nova und Keplers Entdeckung der Planetenbewegung*. In diesem Band.
11. *Jürgen Mittelstrass: Kopernikanische oder Keplersche Wende? – Keplers Kosmologie, Philosophie und Methodologie*. In: Vierteljahrschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich 134 (1989), 197–215.
12. *Jürgen Mittelstrass (Hrg.) Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie*. J. B. Metzler, Stuttgart 2004.
13. *Olaf Pedersen: A Survey of the Almagest*. Springer, New York 2011.
14. *Károly Simony: Eine Kulturgeschichte der Physik*. Harri Deutsch, Frankfurt 2001.



PROF. DR. BURKHARD KÜMMERER hatte bis 2019 an der TU Darmstadt eine Professur für Mathematik mit Schwerpunkten in der Quantenstochastik und in der Lehramtsausbildung inne und genießt das Privileg, weiterhin aktiv sein zu können. Er erhielt 1993 den Landeslehrpreis des Landes Baden-Württemberg und kuratierte seit 2015 mehrere Ausstellungen, unter anderem zu Johannes Kepler in Lindau.

400 Jahre Epitome Astronomiae Copernicanae – Das erste Lehrbuch auf kopernikanischer Grundlage

VOLKER BIALAS

Die ‚Epitome‘, der ‚Grundriss der kopernikanischen Astronomie‘, ist das umfangreichste Werk von Johannes Kepler, das eine ausführliche und zugleich zusammenfassende Darstellung seines neuen, nach physikalischen und harmonikalischen Prinzipien ausgearbeiteten astronomischen Weltbildes enthält. Das im Oktav-Format mit etwa 1000 Seiten dreigliedrige Werk wurde von Kepler im Jahr 1615 in Linz begonnen und im Jahr 1621, also vor 400 Jahren, in Württemberg während längerer Pausen in dem Prozess gegen seine als Hexe angeklagte Mutter vollendet und gedruckt. Keplers Forschungen, teils nach kausal-ursächlichen, teils nach kausal-finalen oder teleologischen Prinzipien suchend, nahmen ihren Anfang mit seinen Fragen nach den Ursachen für die Anzahl der Planeten und deren Abständen von der Sonne in dem Jugendwerk ‚Mysterium Cosmographicum‘ (1596), wurden tiefgründig fortgesetzt in dem auf Beobachtungen Tycho Brahes aufbauenden astronomischen Schlüsselwerk ‚Astronomia Nova‘ (1609) mit der Erkenntnis des ersten und zweiten Planetengesetzes und fanden einen vorläufigen und doch zugleich krönenden Abschluss in der ‚Harmonice Mundi‘ (1619) mit dem dritten Keplerschen Gesetz.

Die ‚Epitome Astronomiae Copernicanae‘ gliedert sich in drei Teile mit sieben Büchern:

Teil 1: ‚De Doctrina Sphaerica‘ (Sphärik) mit Buch I, II und III von 1618;

Teil 2: ‚Physica Coelestis‘ (Himmelsphysik) mit Buch IV von 1620;

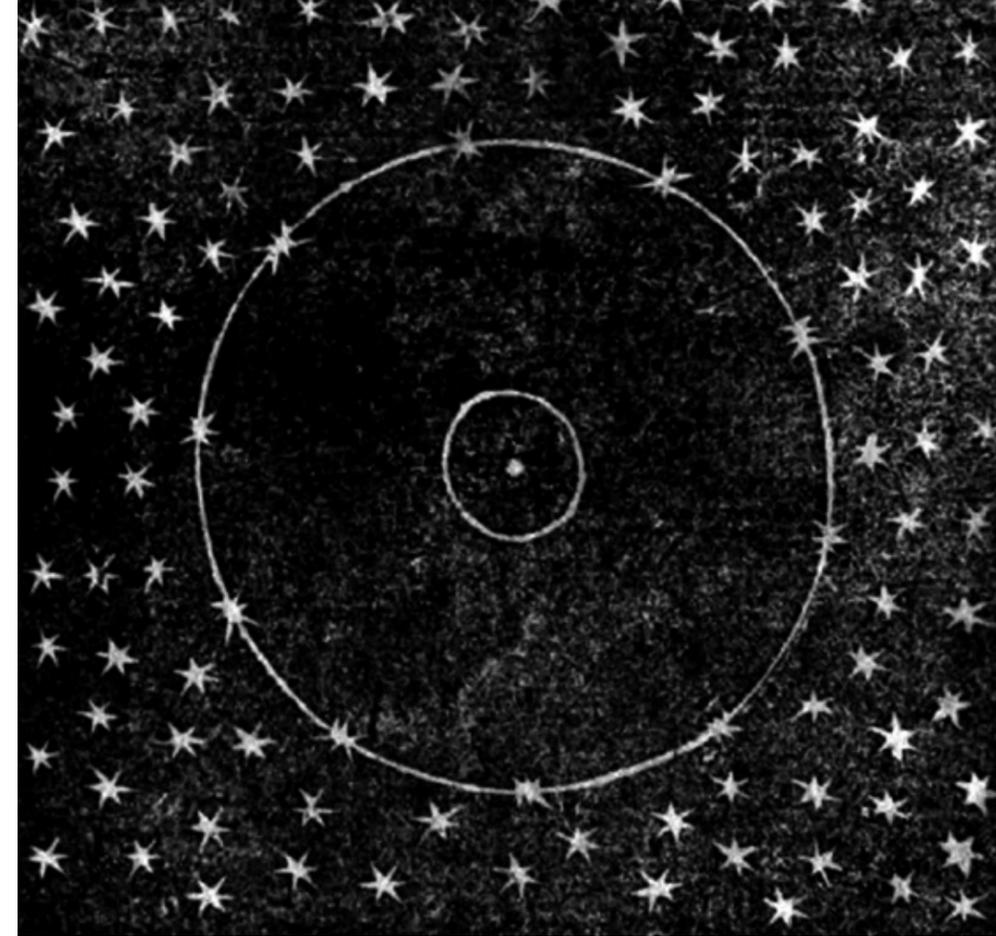
Teil 3: ‚Doctrina Theoretica‘ (Theoretische Lehre) mit Buch V, VI und VII von 1621.

Das ganze Werk enthält in der durchgehenden Darstellung nach der sokratisch-platonischen Frage- und Antwortweise eine verständliche Hinführung des Lesers zu den behandelten astronomischen Themen und Begriffen.

Die ‚Sphärik‘ in Teil 1 behandelt zunächst die tradierten Begriffe und Aufgaben, die mit den Groß-

kreisen an der Himmelssphäre und den Auf- und Untergängen der Gestirne zusammenhängen und damit zum Grundbestand der frühneuzeitlichen Astronomie gehören. Ebenso werden Gestalt, Größe und Ort der Erde in der Welt (‚mundus‘), die in Sonne, Erde mit Planeten und Fixsterne gegliedert wird, erörtert. Doch anders als frühere astronomische Lehrbücher wie das Werk ‚De Sphaera‘ von Sacrobosco (ca. 1200–1256) oder die ‚Epitome Astronomiae‘ von Keplers Lehrer Michael Mästlin (1550–1631), in denen von den scheinbaren Phänomenen, dem täglichen Umlauf des Himmels und der im Zentrum der Welt ruhenden Erde, ausgegangen wird, lässt Kepler die Lehren des Ptolemäus (ca. 100–178) hinter sich. Seinen Ausführungen legt Kepler die kopernikanische Lehre zugrunde, nicht in den astronomischen Details, sondern dem prinzipiellen Systemaufbau nach: Um die zentrale Sonne bewegen sich die Planeten, einschließlich der rotierenden Erde. Weit draußen sind nach Kepler die Fixsterne nicht mehr in einer Himmelssphäre flächenhaft angeordnet, wie noch Nikolaus Kopernikus (1473–1543) angenommen hat, sondern befinden sich in einem kugelförmigen Raum des endlichen, aber gewaltigen Universums. In unserer Region des Kosmos liegt eine dichte Sternenanhäufung, die wie ein großes Gewölbe oder wie eine (schützende) Mauer das Sonnensystem mit der Erde umfasst (Abb.). Damit weist Kepler die Lehren von Giordano Bruno (1548–1600) zurück, der die Unendlichkeit des Universums und zugleich die Vielheit der bewohnten Welten aus theologischen wie auch naturphilosophisch-spekulativen Gründen behauptet hat (KGW VII, S. 42f.).

Kepler nimmt für die Himmelskörper, ja selbst für das endliche Universum – wie bereits Ptolemäus – eine kugelförmige Gestalt an, aus zwei metaphysischen Gründen: als Mathematiker, weil die Kugeloberfläche im Vergleich zu den regulären Körpern einen größtmöglichen Rauminhalt umfasst; und als gläubiger Christ aus Gründen eines trinitarischen Symbolis-



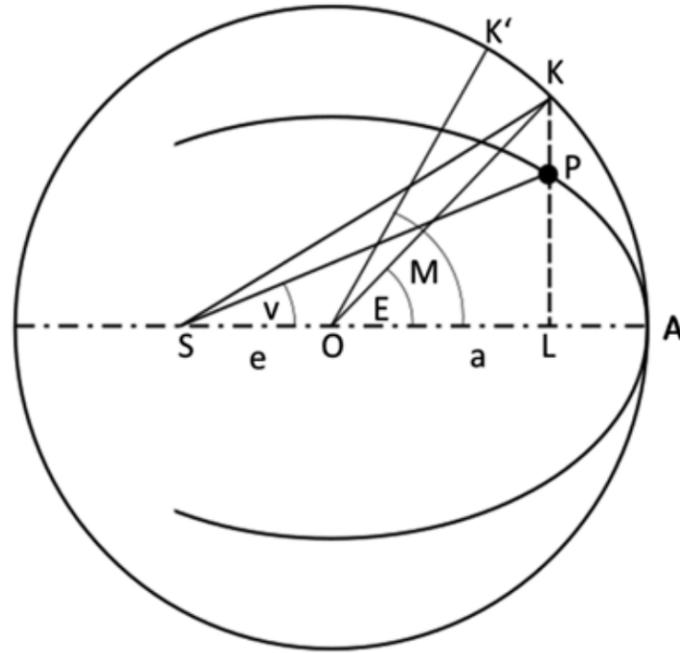
Keplers Vorstellung von der Stellung des Sonnensystems in einem Gewölbe der Fixsterne. Aus: Kepler ‚Epitome Astronomiae Copernicanae‘. MDZ, Bayerische Staatsbibliothek Astr.u. 93 ad

mus, wonach in der Kugelform das Bild der Hl. Trinität enthalten ist: Der unsichtbare Mittelpunkt, gleichsam der Ursprung der Kugelfläche, symbolisiert den Vater; das Ausfließen des Zentrums an unzählig viele Punkte der Oberfläche den Sohn; durch die Gleichheit der Lagebeziehung zwischen Zentrum und Kugeloberfläche den Heiligen Geist.

Für den Raum zwischen Sonne und Fixsternen nimmt Kepler eine Ausfüllung mit einer ätherischen Aura an; ein leerer Raum kann nicht existieren. Raum ist nur als Ort eines Körpers möglich, entsprechend eine Bewegung nur in Bezug auf einen Körper. So bleibt etwa ein an der Erdoberfläche geworfener Körper mit der anziehenden Kraft der rotierenden Erde verbunden. Ebenso ist die Bewegung eines Planeten nicht auf ein masseloses Weltzentrum zu beziehen wie bei Ptolemäus, der das Exzentrum des Grundkreises (Deferenten) der Sonnenbewegung als Bezugspunkt nahm, oder bei Kopernikus, der die Bewegung auf die mittlere Sonne – das Zentrum des Erdkreises – bezog. Erst Kepler bezieht alles auf den Zentralkörper selbst, die wahre Sonne.

Damit ist der Übergang zu Teil 2 der ‚Epitome‘ mit Buch IV, der ‚Physica Coelestis‘, erreicht. Dieses Buch enthält die physikalische Begründung der neuen Astronomie Keplers und führt die Lehre von den Himmelsbewegungen von der Kinematik zu der Dynamik. Damit soll sich dieses Buch, das ursprünglich als erstes der Bücher IV-VII des zusammengehörigen theoretischen Teils der ‚Epitome‘ vorgesehen war, vor allem an die Physiker unter den Lesern wenden. Es ist weniger ein Supplement zum Werk ‚De Coelo‘ von Aristoteles, wie Kepler in seiner bescheidenen Art meint, als vielmehr seine Version einer frühen, von späteren Physikern wie Isaak Newton (1643-1727) aber kaum beachteten Himmelsmechanik.

Im Mittelpunkt von Keplers Überlegungen steht die Frage nach den wirkenden Kräften der Planetenbewegung um die Sonne. Ursache der Bewegung sind die den Planeten und der Sonne innewohnenden natürlichen Kräfte. Die Planeten werden von der bewegend Kraft (‚vis motrix‘) der Sonne herumgeführt, die aufgrund des sensitiven Vermögens ihrer inne-



Veranschaulichung von Parametern der elliptischen Planetenbahn (Skizze vom Verfasser)

wohnenden Seele rotiert und die Planeten herumreißt. Diese Kraft nimmt mit dem Quadrat der Entfernung der Planeten von der Sonne ab (KGW VII, S. 333).

Das Bewegungsmodell selbst wird analog zum Magnetismus weiter ausgeführt. Wie ein Magnet ist der Planet polarisiert und besitzt unveränderliche, im Raum in sich parallele Fibern (oder Fasern), die je nach Lage zur Sonne bald mehr angezogen, bald mehr abgestoßen werden. Die elliptische Bewegung (erstes Keplersches Gesetz) kommt dadurch zustande, dass die beiden Pole der Fibern in den Apsidenpunkten von der Sonne gleich weit entfernt sind, während sie sich in den mittleren Teilen der exzentrischen Bahn um ein kleines Stück auf die Sonne zubewegen (KGW VII, S. 331 u. S. 363-365).

Die so zustande kommende unterschiedliche Bewegung folgt dem Flächensatz (zweites Keplersches Gesetz), dessen nähere Darlegung in Teil V,1 der ‚Epitome‘ erfolgt. Die auch einem Planeten innewohnende Seele lässt ihn rotieren und seine Monde herumbewegen, deren Bewegung, wie Kepler anhand der von Simon Marius (1573–1624) und Galileo Galilei (1564–1642) beobachteten und näher untersuchten Monde des

Jupiters verifiziert, gleichfalls das harmonikale Gesetz der Planetenbewegung (drittes Keplersches Gesetz) erfüllen (KGW, S. 318). Für die Bewegung des Erdmondes bewirkt das Licht der Sonne, das gleichermaßen auf Erde und Mond fällt, einen zusätzlichen Schwung des Mondes, die ‚Variation‘.

Den Teil 3 mit den Büchern V-VII bildet die vor 400 Jahren im Sommer 1621 in Frankfurt/M. gedruckte ‚Doctrina Theoretica‘ mit den mathematischen Ausführungen über die ‚pictura mundi‘, das Bild vom Weltbau. Darin ist für Kepler alles nach Maß und Zahl angeordnet und die himmlischen Bewegungen lassen sich aus der Wirkung natürlicher Kräfte erklären. Die wichtigste Aufgabe der neuen Astronomie besteht darin, aus den Beobachtungen die Planetenbahnen zu bestimmen und diese mit notwendigen Hypothesen oder physikalischen Prinzipien in Übereinstimmung zu bringen (KGW VII, S. 362). Damit hat Kepler seinen früheren, 20 Jahre zuvor konzipierten Hypothesenbegriff (KGW XX,1 S. 18 ff.) um die physikalische Dimension merklich erweitert. Zu Recht ist Kepler von dem Philosophen und Wissenschaftstheoretiker Ernst Cassirer als der Logiker der naturwissenschaftlichen

Hypothese jener Zeit bezeichnet worden (Cassirer 1969, S. 33).

Im Einzelnen enthält Buch V der ‚Doctrina Theoretica‘ u. a. die mathematische Behandlung und physikalische Demonstration des ersten und zweiten Keplersgesetzes sowie die Darstellung des Kepler-Problems oder der transzendenten Kepler-Gleichung der Form $M = E + e \cdot \sin E$, mit S die Sonne, O Mittelpunkt des Umkreises, P ein Planetenort, A Aphel der Planetenbahn sowie $M =$ mittlere Anomalie, $E =$ exzentrische Anomalie, $e =$ Exzentrizität der elliptischen Planetenbahn und mit der Aufgabe, E (damit P) zu bestimmen, wenn e und M (der Zeitpunkt, von A aus gerechnet, = Verhältnis der Fläche ASP zur ganzen Ellipsenfläche) gegeben sind (vgl. Abb.).

Kepler selbst benutzt noch nicht die algebraische Schreibweise und kann die Gleichung nur durch fortgesetztes Probieren lösen (KGW VII, S. 393 u. 599f.). In Buch VI werden die Bahnörter der Planeten der Länge und Breite nach auf die sich bewegende Erde umgerechnet, also quasi geozentrisch betrachtet, des Weite-

ren die Mondbewegung sowie die Konfigurationen und Aspekte der Planeten und die Finsternisse. Das sind etliche astronomische Einzelheiten, die für die Berechnung der Ephemeriden – für die Jahre 1617-1636 (KGW XI,1) – wie auch für Keplers großes astronomisches Tafelwerk, die ‚Tabulae Rudolphinae‘ von 1627 (KGW X), zu den astronomischen Grundlagen gehören.

Das gilt ebenso für das abschließende, knapp gehaltene Buch VII, das u. a. die verschiedenen astronomischen Jahreslängen sowie säkulare Änderungen astronomischer Parameter wie etwa der Schiefe der Ekliptik enthält, die besonders für die Berechnung der Planetenbewegung und der Finsternisse in Keplers astronomischen Tafeln und Ephemeriden bedeutsam gewesen sind. Abschließend sei noch darauf hingewiesen: Die Akademie-Ausgabe der ‚Epitome‘ (KGW VII) enthält einen vorzüglichen Kommentar von Max Caspar (1869-1956); gleichwohl ist dieses höchst anschaulich geschriebene Werk von Johannes Kepler in seiner wissenschaftlichen wie philosophischen Tiefe noch nicht ganz ausgelotet. ♦

Literatur

- Bialas, Volker: Vom Himmelsmythos zum Weltgesetz. Eine Kulturgeschichte der Astronomie. Wien: Ibero-Verlag 1998.
- Cassirer, Ernst: Die Antike und die Entstehung der exakten Wissenschaft 1932), wieder abgedruckt in: Wilhelm Krampf (Hrsg.), Ernst Cassirer, Philosophie und exakte Wissenschaft. Kleine Schriften, Frankfurt/ M 1969.
- Johannes Kepler: Kurze Darstellung der copernicischen Astronomie. Übersetzung von KGW VII. Hrsg. von Eberhard Knobloch. Würzburg: Verlag Königshausen u. Neumann 2010.
- KGW VII = Johannes Kepler Gesammelte Werke Bd. VII: Epitome Astronomiae Copernicanae. Hrsg. von Max Caspar (1953). 2. unveränderte Auflage, München 1991.
- KGW XX,1 = J. Kepler Ges. Werke Bd. XX, 1: Manuscripta Astronomica (I). Bearbeitet von Volker Bialas unter Mitwirkung von Friederike Boockmann, München 1988.

PROF. DR. VOLKER BIALAS

Wissenschaftlicher Leiter der Kepler-Edition (1986-2003) und apl. Professor an der Technischen Universität München

Keplers Werk



DIE ERDE
Bild: NASA/GSFC, Reto Stockli et al.

Die Rudolphinischen Tafeln

JÜRGEN REICHERT

Der Beitrag beschreibt die mit erheblichen Schwierigkeiten verbundene Entstehung der Rudolphinischen Tafeln. Er geht dann auf das berühmte Frontispiz und das zugehörige, erklärende Gedicht – das Idyllion – ein und den Grund für die verschiedenen Versionen der ersten Seiten. Keplers schwierige und etwas umständliche Rechenweise wird erklärt und die Bedeutung der Tafeln für die astronomische Vorhersage. Schließlich wird die Genauigkeit der Tafeln über die Jahrhunderte betrachtet.

Historischer Abriss

„**M**ein astronomisches hauptwerckh, Tabulae Rudolphi genennet“, so urteilt Kepler über sein Opus in einem Brief an den Rat der Stadt Esslingen vom 2. November 1627. Diese Bemerkung zeigt, welche Bedeutung Kepler gerade diesem von seinen vielen Werken beimisst, an dem er auch, wie er in der Widmung an den Kaiser schreibt, „über 26 Jahre geschwitzt“ hat.

Die ‚Rudolphinischen Tafeln‘ entstanden aus dem dringenden Bedürfnis heraus, wieder zuverlässige Grundlagen für die Herausgabe von Jahreskalendern zum Gebrauch in der Landwirtschaft und in der Seefahrt, vor allem mit den Mondphasen, aber auch den Bewegungen von Sonne und Planeten und den Finsternissen zu bekommen. Wesentliche Vorgänger waren die ‚Toledaner Tafeln‘, die aus dem 11. Jahrhundert stammten und noch von arabischen Gelehrten (al-Battani) berechnet worden waren, und die ‚Tabulae Alphonsinae‘ (‚Alphonsinische Tafeln‘), die etwa um 1252 bis 1270 auf Anordnung Alphons X. von Kastilien und León unter Leitung der jüdischen Gelehrten Jehuda Ben Mose und Isaak Ben Sid in Toledo zusammengestellt wurden. Dieses Werk war ursprünglich in Spanisch geschrieben und wurde später ins Lateinische übersetzt. Es wurde das einflussreichste astronomische Werk in Europa, bis es im 16. Jahrhundert durch die ‚Prutenischen (Preußischen) Tafeln‘ des Erasmus Reinhold 1551 abgelöst wurde, die schon auf dem damals noch nicht überall anerkannten heliozen-

trischen System von Nikolaus Kopernikus beruhten. Kepler schreibt selbst in der ‚Praefatio‘ (Vorwort) ausführlich, welche Probleme es mit diesen Tafeln gab.

Tycho Brahe hatte mit seinen genauen Beobachtungen die Grundlage für die Tafeln gelegt und erhielt im September 1601 von Kaiser Rudolph II. in Prag den Auftrag, neue Tafeln herauszugeben, die Brahe nach seinem Förderer und Geldgeber ‚Rudolphinische Tafeln‘ benannte. Er starb jedoch schon im Oktober 1601 und der Auftrag ging auf Kepler über, den Brahe schon vorher zur Unterstützung herangezogen hatte. Kepler wurde kaiserlicher Mathematiker.

Es dauert dann noch 26 Jahre, bis die Tafeln endlich erschienen, obwohl Kepler von den Erben Brahes und auch vom Hof des Kaisers manches Mal zur Arbeit an den Tafeln gedrängt wurde. Kepler war aber nicht untätig, wie ihm vorgeworfen wurde, sondern ihm lag sehr viel daran, die Tafeln auf ein solides wissenschaftliches, sprich physikalisches Fundament zu stellen. Er veröffentlicht fundamentale Werke, die seine Theorien untermauern: Die ‚Astronomiae Pars Optica‘ (1604) und ‚Dioptrice‘ (1611), in denen er das von ihm erfundene keplersche Fernrohr beschreibt und versucht, der Lichtbrechung auf die Spur zu kommen, die ‚Astronomia Nova‘ (1609), mit dem Untertitel: Neue, ursächlich begründete Astronomie, in der er die ersten zwei seiner Gesetze ableitet, die ‚Harmonices Mundi Libri V‘ (1619) mit dem 3. Gesetz und besonders die ‚Epitome (Handbuch) Astronomiae Copernicanae‘ (1618), die eigentliche astronomische Grundlage der Tafeln, die daher auch sehr häufig zitiert wird. Außer-

dem stellt er zur Erleichterung des Rechnens die Tafeln auf Logarithmen um. Er erklärt 1616, dass die Tafeln „in praxi fertig“ seien, sieht aber 1617 zum ersten Mal die Logarithmen Nepers. In einem Brief an Joh. Remus Quietanus in Wien im Dezember 1618 schreibt er von den Logarithmen als „foelix calamitas“ das „glückliche Unglück“ für seine ‚Rudolphinischen Tafeln‘, die entweder ganz umzustellen oder aber aufzugeben seien. Man kann sich die Arbeit kaum vorstellen, die damit verbunden war: Berechnung der Logarithmentafeln eigens für diesen Zweck, Umschreiben der ‚Praecepta‘ (Anleitungen) und Neuberechnen der vielen Beispiele. Darin liegt sicher auch ein Grund für die vielen Fehler, die in den Beispielen zu finden sind; man möge sie Kepler nachsehen: Er musste alles selbst berechnen, da er sich wegen der ausbleibenden kaiserlichen Besoldung keinen dauerhaften Gehilfen leisten konnte. Hinzu kamen die unsäglichen Schwierigkeiten, die die Erben Brahes Kepler in den Weg legten, um möglichst viel Geld aus den Beobachtungen Brahes zu schlagen. Manch einer hätte längst die Flinte ins Korn geworfen, wenn ihm z.B. 1604 Tengnagel, ein Schwiegersohn Brahes, als Herausgeber der Tafeln vor die Nase gesetzt und Kepler praktisch zum Gehilfen degradiert wird. Für Kepler steht aber das Ziel an erster Stelle und so nimmt er alle Unbill in Kauf, um schließlich die Tafeln zu vollenden. Auch mit der Finanzierung der Tafeln, den Kosten für das Papier und den Druck hatte Kepler erhebliche Probleme, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann. Letztendlich bezahlte er die Druckkosten aus eigener Tasche. Wie er das zuwege brachte, bleibt sein Geheimnis. Vermutlich hat hier das „narrische Töchterlein“, die Astrologie, ihrer „weisen aber armseligen Mutter“ Astronomie den Dienst erwiesen. Ein i-Tüpfelchen auf dieser traurigen Finanzierungsgeschichte ist noch die Tatsache, dass Kepler von den 2000 Gulden, die ihm 1628 bei der Übergabe eines Widmungsexemplares an Kaiser Ferdinand II. bewilligt wurden, nie auch nur einen Heller gesehen hat. Kepler erreicht jedoch sein vorläufiges Ziel, zur Herbstmesse in Frankfurt fertig zu sein und reist am 15. September 1627 mit einigen noch unfertigen Exemplaren nach Frankfurt.

Titel, Frontispiz und Idyllion

Diese überhastet fertiggestellte Ausgabe sollte sich für Kepler noch als sehr unbequem herausstellen. Musste er doch die Widmung der Brahe-Erben ganz vorne einfügen, die Brahe-Erben forderten aber noch andere Änderungen am bestehenden Text. In der Titelseite verwendete Kepler das Wort ‚emendare‘, was ‚verbessern‘ bedeutet, bezogen auf die Verarbeitung der Beobachtungen Tychos als Grundlage der Tafeln. Auch in Keplers Widmung und in dem Gedicht ‚Idyllion‘ musste der Text geändert werden. Die Braheaner wollten unbedingt den Alleinanspruch Tychos auf die Konzeption der Tafeln wahren, Kepler sollte nur als Anwender und Vollender, also als Nutznießer dastehen. Kepler musste – sicher zähneknirschend – diesen Forderungen nachgeben, er war vertraglich dazu verpflichtet. Wegen der schlechten Druckqualität der von den Braheanern gelieferten ersten Bögen, die Kepler neu setzen und drucken ließ, entstanden so drei verschiedene Versionen der ersten Seiten der Rudolphinischen Tafeln.

Der ‚Tempel der Astronomie‘ ist wohl das bekannteste Titeltkupfer oder Frontispiz, er konnte aber auch erst mit der zweiten Ausgabe endgültig eingefügt werden. Ein eigenes Gedicht, genannt ‚Idyllion‘, in Hexametern geschrieben von Keplers Freund Johann Baptist Hebenstreit, einem Gymnasiallehrer aus Ulm, beschreibt den Tempel in allen Einzelheiten. Offenbar von Kepler selbst sind einige erklärende Bemerkungen dazu am Rand des Gedichtes zu lesen.

Mathematische Grundlagen und Probleme

Die Mathematik war zu Keplers Zeiten weit entfernt von dem, was heute gehobenes Allgemeinwissen ist. Dezimalzahlen waren nicht in Gebrauch, die Algebra war weitgehend unbekannt (Bürgi hat mit Kepler eine Einführung in die Algebra geschrieben, die ‚Coss‘, die jedoch wegen dem Widerstand Bürgis nicht veröffentlicht wurde). Auch der Gebrauch von Gleichungen im heutigen Sinn war nicht bekannt. Kepler rechnet also in den ‚Rudolphinischen Tafeln‘ im sexagesimalen, dem 60er-System, das von den alten Babyloniern stammt und heute bei uns noch bei den Stunden, Minuten und Sekunden in Gebrauch ist. Das Addieren großer sexagesimaler Zahlen ist noch einfach, das Subtrahieren

Frontispiz der Rudolphinischen Tafeln, Ulm 1627. Das nach Ideen von Kepler entworfene Frontispiz wurde vom Nürnberger Kupferstecher Georg Cöler, wie im Sockel rechts zu lesen, ausgeführt. Foto: Nicolas Zuber, Kepler-Museum Weil der Stadt



T A B U L Æ
RUDOLPHINÆ,

QUIBUS ASTRONOMICÆ SCIENTIÆ, TEMPO-
 rum longinquitate collapsæ RESTAURATIO continetur;

A Phœnice illo Astronomorum

T Y C H O N E

Ex Illustri & Generosa BRAHEORUM in Regno Danie
 familiâ oriundo Equite,

PRIMUM ANIMO CONCEPTA ET DESTINATA ANNO
 CHRISTI MDLXIV: EXINDE OBSERVATIONIBUS SIDERUM ACCURA-
 TISSIMIS, POST ANNUM PRÆCIPUE MDLXXII, QUO SIDUS IN CASSIOPEJÆ
 CONSTELLATIONE NOVUM EFFULSIT, SERIÒ AFFECTATA; VARIISQUE OPERIBUS, CUM ME-
 chanicis, tum librariis, impensò patrimonio amplissimo, accedentibus etiam subsidiis FRIDERICI II. DANIÆ
 REGIS, regali magnificentia dignis, tracta per annos XXV, potissimum in Insula freti SUNDICI HÛEN-
 NA, & atque URANIBURGO, in hos usus à fundamentis extructâ:

TANDEM TRADUCTA IN GERMANIAM, INQUE AVLAM ET
 Nomen RUDOLPHI IMP. anno M D IIC.

TABULAS IPSAS, JAM ET NUNCUPATAS, ET AFFECTAS, SED
 MORTE AUTHORIS SUI ANNO MDCI DESERTAS,

JUSSU ET STIPENDIIS FRETUS TRIUM IMPPPP.

RUDOLPHI, MATTHIÆ, FERDINANDI,

ANNITENTIBUS HEREDIBUS BRAHEANIS; EX FUNDAMENTIS
 observationum reliatarum; ad exemplum serè partium jam extructarum; continuis multorum annorum se-
 culationibus, & computationibus, primùm PRAGÆ Bohemorum continuavit; deinde LINCII,
 superioris Austriæ Metropoli, subsidiis etiam Ill. Provincialium adjutus, emendavit, per-
 fecit, absolvit; adq; causarum & calculi perennis formulam traduxit

IOANNES KEPLERUS,

TYCHONI primùm à RUDOLPHO II. Imp. adjunctus calculi minister; indeq;
 trium ordine Impppp. Mathematicus:

Qui idem de speciali mandato FERDINANDI II. IMP.
 perentibus instantibusq; Heredibus,

Opus hoc ad usus presentium & posteritatis, typis, numericis propriis, cæteris & prelo
 JONÆ SAURII, Reip. Ulmanæ Typographi, in publicum extulit, &
 Typographicis operis ULMÆ curator affuit.



Cum Privilegiis, IMP. & Regum Rerumq; publ. vivo TYCHONI ejusq; Heredibus,
 & speciali Imperatorio, ipsi KEPLERO concessò, ad annos XXX.

ANNO M. D. C. XXVII.

Hebenstreits Gedicht 'Idyllion' in den Rudolphinischen Tafeln. Nicolas Zuber, Kepler-Museum Weil der Stadt

ASTRO-POECILO-PYRGIUM KEPLERIANUM, ASTRONOMIAE ORTUM, PROGRESSUMQUE USQUE AD NOSTRAM AETATEM; NOVUMQUE ADEO, JANDIU DESIDERATUM, AC INCOMPARABILE TABULARUM OPUS, depictum exhibens; JOH. BAPTISTAE HEBENSTREITTI, AUGUST. IDYLLION.

Quid Apellei primo stet margine cinni In LIBRO KEPLERIANAE, dic, Diva sororum Amidum princeps, caelo quae nomen ab ipso Duxisti, Uranie! quod si sublimia tanti Illat theatra facis, quae turba quiesca Deorum Incolit; unde sua veniunt mortalibus agris Quaeq; vices operum: non sit docuisse puero Tantarum rerum strictis imitamina formis. Atq; adeo ecce tibi terra mirator, & orbis Aetherei! Cernisne novo surgentia cultu Tempula Deum, quae cura hominum diversa priorum Extulit, & nostrum polianda remisit in arvum? Hac tibi, si nimirum forsitan miranda videntur, Obtutusq; haeret tacite defixus in uno, Nunc retegā, pandente Dea, si sufficit aures, Cuncta obscura velut facibus clarescere Phœbi Aspicies. VIDEN' ut bissex suffulta Columnis Tecta nitent, totidē signis noscenda? Columnas Ut sua fulcra tenent quinis ornata tabellis? Cerno, inquis: sed quid sibi vult prepesteris ordo? Aethereo quae cumq; Cavo defixa videntur Lumina in excelsis aliis stationibus, illa Arte pavimento nunc sunt insculpta: polsrne Mixtus humo? cessitq; suis sedibus aethra? Quisquis es, ista rogans: manet immutabile Caelum: Apellis, At Vatū ingenio, & docti moderamine Et lege Astronomi sublimibus ista columnis Limina sunt subjecta, velut fundamenta sacrae Dictatorū artis. Basis ergo tibi exhibet astra, Area quod strata est duodenis undiq; Signis. Haud alio potuere modo deducere Olympum Pervigiles oculi: aut solerti indagine miras Vestigare vias Erronum, & compita, septem. Felices animae! quarū labor improbus Orbē Stelliferum, atque ipsas dispescuit ordine servationis, flammās, Et varias pinxit formas rerūq; hominumq; Has inter quid, Arate, lates post terga Columnae? Non satis est, quod Pierio modulamine Caeli Distinxisse plagas laudari, & orbibus orbes Implicuisse? tuone deest fortuna labori? Num plus Hipparchi Pharijs sudavit in orbi Virtus? non eadem sortimur munera cunctis? Mille hominū species: industria discolor: ipsa Lex sati variat: nec in uno tempore vires Ingenijs summa: meliorq; Hipparchus Arato (Graci ambo) Danū meliorē est passus oriri, Hæredē captorum operū. Sedem ecce! Deorū Signatus legat tabulis, fundamenta si quis Maturo annorum lapsu meliora reponat. Exactā tandem seclorum ambage, quod isti Horridius sparsere, TICHO collegit, & usus In certos erexit, ut area tota nitescat Splendidiūs, monstrēq; suos jū doctiūs ignes, Dispositos studio ingenti per lustra serē octo. Tanta molis erant spaciū discernere corpus Divinum, certōq; situ palantia quondam Agmina stellarum exacto componere mensū! Quando igitur sortita sua sunt singula scēdē Sidera, tunc tectum attollunt sua fulcra, C O L U M N A E Rectius, & celsi firmant fastigia templi, Has quid dicā aliud, nisi mente recocta sagaci OBSERVATA, arte quando experientia fecit? Ut ne praeferent, quem discendi calor urget, Quae Mundi facies: eademne manere coacta, Anne sua: sibi quisq; dies ex ordine partes Sustineat, mutetq; aliquid, diu mobilis annus

Fixatur in loco?

Sphaera K-rati armillari. Sphaera P-xarum Hipparchi.

Tycho Catalogum fixarum perfectum.

Columna significans Objectionem.

Com.

IDYLLION.

Epocha. Complereit cursum, textumve notabile longi Mominis. Hic etiam imparibus procedere metis Res caeli Artificumq; solet, hinc ipse columnis Est aliisq; alisque decor. Viden', illa, Braheus Quā nixus, renitens pretiosa pelle, recumbit, Ut cultum ostentet, perfectaq; artis honorem: Vtq; Corinthiaco scapi caput extet acantho Conspicuum? Viden' ut de fulvo fusa metallo Instrumēta micēt, monimēta aeterna Tychonis? His scalis magnū Mundi & versatile templum Conscendit, memores visis scriptisq; Tabellas Aucturus samamq; suam sparsurus in arvum Posterior, meritis pro tantis Danide terrā Egredium, Rudolphe fovet, superisq; vacare Latius, ac magnis conatibus addere finem, Augustaq; inbes matum succrescere in Aula. Ex parte adversa COPERNICUS eminet, De meliore nota (quanquam superesse Tychoni Plura scias) hic mira & vulgo incognita sensa Prodidit: unde parum diversus abire Braheus Cernitur, & proprio primas adscribere scito. Corripit ergo Borusius, & talib' increpat vltro: QUIDSISACINON una via est ad carula caeli Tempula: quid, ex nostris si nobiliore repertū Tramite progressus propiori jungat Olympo? Ille, xeluctantū haud dispar, immobilis haeret, Vssiq; adeo, vacitius Tellerū pondera verti In gremio vult, atq; suam dimittere mentem. Ergo sedet, sicut usq; sua suspensa columnā Organa dilatat, cruciformem nempē bacillā, Tignaq; juncta, quibus calorū ostentia redactū In veros veniunt, et si distantia nostra Lumina ludifcet fallatq; incantior error. Hinc illinc reliqua ornatū diversa videre est Fulcimenta adis, quadrato condita saxo, Sed rimis plena, & nuda a ferrumine calcis. Hac est antiqui non prava insensitū moris, Cum condidit nostra calleret certius artis Dogma vel Hipparchus, vel carminis author Aratus, Aut alii, inter quos olim Ptolemaus honore Emicuit vultu, supera ac terrena resingens. Hic quoq; mirificum struxit sidentior Orbē Retibus insignem: trāsversa vbi prodit annis Incessum Phæbi par usq; foraminis or Ineruailla soli gradibus distinguit, & astra Plurag, contendit miracula pandere Divum. Ecce laborifera depingit sehemata dextra, Atq; caput patria rectū diademate, cycli, Lincolis rectas, non futilis, arcibus aptat, Per quas quod curvū est, & per se respuit omnē Mensuram, numeri ac mensura sub iuga ducat. Pone reclinata est pulchra cum dote Tabella, Subsidium optatum scrutanti errantia septem Corpora, si possunt sparsis in fornice stellis Supremo, ad certam sociari deniq; partem, Sive ea jam signata sunt, signandave porro Postgenitis. O ingenii praevidit artes! Hinc in vicinis dependet machina fixis, Cecropius quondam reperit quā doctus Athenis, Arte Meton. Hac circuitu deno atq; noveno Ostendit, Magnus qui exsurgat gētibus Annus: Quōd via in Phæbi, foret haud aliena, sororis Anfractu Phæbes, medium si dividat orbem Libra umbris lucig, & portitor aureus Helles: Aut si solstitiis dirimatur bruma vel aestas. Hac inventa suos plausus reperere: quod antē Seducta in varios certassent pectora curas, Cum nondum caeli species, redeuntibus astris, Percepta integris pareret finibus anni: Quamlibet e Tenedo cōmenta Lepostratus apta Quareret: haec commenta tamen (quasi saxea dit camenis moles Ingeniū immanis que ipsa strue plena pericli, Quando aliis alia incumbunt camenta, levi que Contactu se extrema fricant, intrita nec vlla, Vt nec arenatum nutantia labra coegit Succidua rupis,) non clara merentur haberi. Deniq; sylvæ etiam dat sustentacula nostris Culminibus ramos anno se scilicet orni, Sacratag, lovi quercus, heu! lignea summa Adjumenta Deas si non scilicet plane, Vos quoq; surrigitis truncos, Teclig, coronam Impositam fulcit: at hoc ut cing, feramus: Stipitiū, quoq; feriar honos, quos docta dolabra Nondum in concinnam formavit rite figuram. Atq; ecce, ut rigeat nodo, intractabile lignum! Vt se extollat, neq; dum laquearia tangat, Sed brevior modo suspiret ad aethra septem Errantum! Et certe generali afferre ruinam Possenti cunus spacia oppleat intersertis Officiosa manus, qualis Kepleria. Sed quis Obscurus pater ille, extendens brachia longe? Pollicis an spacio extensi, simul indicis, astra Audet metiri? Lignis qui proximus, idem, Quae ruditate alio inspecta notavit olympo, Comprobat, huc ergo referas edicta professos Horridiora quidem, magna Babylonis alumno: Non spernenda tamen: primis debetur & ausis Gloria, quale dedit specimen Tyrintinus heros, Nondum heras, quando pauidum-trepidante Alcmena Corripuit teneris praegrandia guttura palmis, Et quamvis teneris pressos, tellure, dracones, Illi sit, quod si plura adjumenta fuissent Chaldaei, nostras polissent pulcherrimas artes. Sed iam concessum est TICHO. Tectum o-mnia late Complexū est, quae, Diva, tuis sunt vssibus apta, Uranie: nec enim poterant Nova structa peccati Sola explere animi votum & firmamina Tecti regna. Plena

Idyllion ad praeteritū & futura tempora. Metonius Cy-clius Decem-novennalis, concilians lunarium annuum canō Tropico.

Alia colum-na plani rudi-camēnis.

Columna lignea & caudicibus.

Chaldaei mox rudis observandi astra.

TICTUM vocatum columnam.

Obstru-ctum naru-um.

schon unbequemer, das Multiplizieren wird nur noch mit ‚Canones‘ (Rechentafeln) praktisch durchführbar und das Dividieren ist fast unmöglich. Kein Wunder, dass Kepler sofort nach deren Bekanntwerden auf die Neperschen Logarithmen zugreift (vgl. dazu den Beitrag von Burkhard Kümmerer, ‚Logarithmen verdoppeln die Lebenszeit der Astronomen‘) und die ‚Rudolphinischen Tafeln‘ damit neu berechnet. Sein größtes Problem aber ist die Berechnung der Planeten auf der Ellipse. Sie wird heute durch die Kepler-Gleichung beschrieben:

$$E = M + e \cdot \sin E$$

Darin ist E die sogenannte Exzentrische Anomalie mit deren Hilfe Kepler geometrisch den wahren Ort des Planeten auf seiner Bahn ableitet, M ist bekannt, es ist die Mittlere Anomalie, die fiktive gleichmäßige Bewegung des Planeten auf einem Kreis, die man mit der gewünschten Zeit aus den Tabellen entnimmt, e ist die Exzentrizität der Bahn. Das heutige geschulte Auge sieht gleich, dass diese Gleichung so nicht lösbar ist, sie ist sogar transzendent und nur numerisch mit Hilfe der Iteration lösbar. Obwohl Kepler dieser Formalismus unbekannt ist, erkennt er den richtigen Weg zur Lösung des Problems. Er formt die Gleichung um in:

$$M = E - e \cdot \sin E$$

Man sieht sofort, dass diese Gleichung lösbar ist und Kepler entwirft eine Tabelle in der man durch eine komplizierte Rück-Interpolation aus einem gegebenen M das zugehörige E und gleich auch die wahre Anomalie v findet. Das ist natürlich sehr umständlich und stellt das größte Problem für den praktischen Gebrauch der ‚Rudolphinischen Tafeln‘ dar. Kepler hat großes Vertrauen in die Genauigkeit der Beobachtungen, er beschreibt die Planetenbewegungen vom Jahre 3999 vor Christus bis zum Jahr 2100 nach Christus.

Zeitgenössische und weiterführende Bedeutung

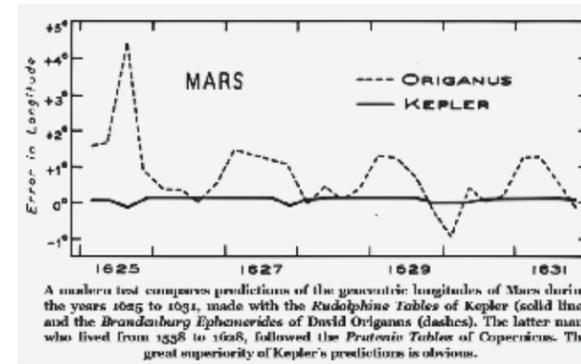
Der Siegeszug der ‚Tabulae Rudolphinae‘ setzt allerdings erst nach Keplers Tod ein. Die Genauigkeit der Tafeln bestätigt die Theorie der elliptischen Planetenbahnen. Sie tragen maßgeblich zur Verbreitung des heliozentrischen Weltbilds bei. Keplers letztes Hauptwerk macht somit das kopernikanische Weltbild unumkehrbar. Sogar im fernen China spricht sich

der Wert der Tafeln herum. Jesuitenmönche wollen dort mit präzisen astronomischen Voraussagen die Überlegenheit des Christentums demonstrieren und vollenden damit 1635 die Arbeiten an der chinesischen Kalenderreform. In Europa beruhten alle astronomischen Aus- und Vorhersagen über die Bewegungen von Sonne, Mond und Planeten etwa ein Jahrhundert lang auf den ‚Rudolphinischen Tafeln‘. Mit der steigenden Genauigkeit der astronomischen Beobachtungen durch den Einsatz des 1609 erfundenen Fernrohrs wurden sie dann im 18. Jahrhundert sukzessive von den Astronomischen Jahrbüchern (‚Nautical Almanac‘, ‚Connaissance des Temps‘, ‚Berliner Astronomisches Jahrbuch‘ usw.) abgelöst.

Der wichtigste Einfluss der Keplerschen Werke, die ihren Ausdruck und Gipfel in den ‚Rudolphinischen Tafeln‘ fanden, ist jedoch die Zurückführung der himmlischen Phänomene auf natürliche, physikalisch erklärable Ursachen. Kepler ist der Erste, der von den ‚gottgegebenen‘ perfekten Kreisen, auf denen bisher alle Himmelsbewegungen ablaufen mussten und die auch exakt berechenbar waren, abkam und die ‚unperfekte‘ Ellipse einführte. Gedanklich war Kepler seiner Zeit weit voraus. Er war nahe an der Formulierung des Gravitationsgesetzes, aber dazu fehlten ihm noch einige physikalische und mathematische Grundlagen. So blieb dieser entscheidende Schritt der Naturwissenschaften Newton vorbehalten.

Genauigkeit einst und heute

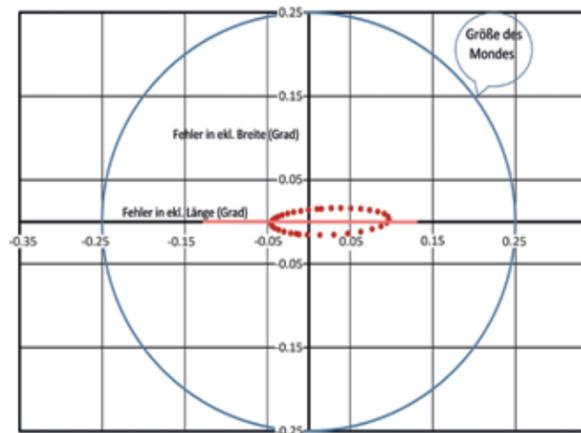
Die Beobachtungen Tycho Brahes übertrafen zwar alle vorangegangenen Messungen an Genauigkeit, man spricht heute davon, dass er eine Messgenauigkeit von etwa 1 Bogenminute (1') erreichte. Dies war aber nicht der Normalfall, die mittlere Genauigkeit seiner Messungen dürfte eher bei 5' – 10' liegen. Der Wert seiner Beobachtungen liegt aber in der Menge und dem langen Zeitraum, über den er Aufzeichnungen machte; der mittlere Fehler wird dadurch geringer. Das große Vertrauen, das Kepler in die Beobachtungsgrundlage setzt, zeigt sich schon darin, dass er, wie oben bereits erwähnt, den Gültigkeitsbereich auf 6000 Jahre ausdehnt. Doch wie steht es nun wirklich um die Genauigkeit der ‚Rudolphinischen Tafeln‘? Der Erste, der



sich damit befasste, war der amerikanische Historiker Owen Gingerich, der in ‚Sky and Telescope‘ 1971 einen Vergleich der Prutenischen (in der Form der ‚Brandenburger Ephemeride‘ von Origanus) mit den Rudolphinischen Tafeln herausbrachte, aber nur für den Mars und die Jahre 1625 bis 1631.

Der Vergleich zeigt die Verbesserung der Keplerschen Werte gegenüber den früheren, besonders zeigt er die sog. Marskatastrophe von 1625, in der der Mars fast 5° von der Ephemeride abkam. Jürgen Reichert hat dann 2018 eine umfangreiche Untersuchung der Genauigkeit durchgeführt.

Als Vergleich mit der Untersuchung Gingerichs sei daraus die Abweichung des Mars von einer modernen Ephemeride (DE405) für einen Umlauf in den Jahren 1629/1630 gezeigt. Der maximale Fehler in Länge beträgt nur knapp 6 Bogenminuten. Den Vergleich der Fehler mit dem Monddurchmesser zeigt die folgende Abbildung:



Soweit also die Fehler zur Zeit Keplers, wobei man berücksichtigen muss, dass man damals nur mit dem bloßen Auge beobachten konnte und damit die Fehler am Himmel kaum auffallen. Nur bei besonderen Ereignissen, wie z.B. Konjunktionen oder Finsternissen spielten diese Abweichungen eine Rolle. Stellt man dieselbe Untersuchung für die heutige Zeit an, so ergibt sich das erstaunliche Ergebnis, dass zum Auffinden der Planeten mit bloßem Auge (vielleicht außer dem Merkur) auch heute noch die Rudolphinischen Tafeln benutzt werden könnten. ♦

Quellen

Band 10 der Kepler-Gesamtausgabe im Beck-Verlag, München
 Die Rudolphinischen Tafeln, Herausgegeben von Jürgen Reichert, Deutsche Übersetzung, Verlag Königshausen&Neumann, Würzburg 2014
 Zur Genauigkeit der Tafeln:
 Vortrag von Jürgen Reichert am 12.03.2018 bei der Astronomischen Vereinigung Karlsruhe, ein Mitschnitt ist auf YouTube zu sehen: <https://www.youtube.com/watch?v=9GEu2ZKzovI>
 DE405: JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405, Rechtwinklige Koordinaten der Planeten für die Jahre 1600 bis 2100.
 Nach Berechnungen des Jet Propulsion Laboratory (1997) <https://ssd.jpl.nasa.gov/>



JÜRGEN REICHERT, geb. 03.05.1939 ist Dipl.-Physiker und arbeitete bis 2002 beim Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung auf dem Gebiet Solartechnik und Energieeinsparung. Seit dem Beginn des Ruhestandes kann er sich ausschließlich seinem lebenslangen Hobby, der Astronomie, widmen und hier der Himmelsmechanik und deren Geschichte.

Fehler in heliozentrischer Länge und Breite [°] des Mars 1629-1630. Jürgen Reichert

Meilensteine der Astronomie – von Johannes Kepler bis zum Beginn der Weltraumfahrt

HANS-ULRICH KELLER

Zu Beginn des 17. Jahrhunderts sah man Hexen noch als Realität an. Sie wurden verfolgt, angeklagt, verurteilt und verbrannt. Auch Katharina Kepler, Mutter von Johannes Kepler, wurde der Hexerei bezichtigt und vor Gericht gestellt. Nur ihr damals schon als kaiserlicher Mathematicus berühmter Sohn konnte sie vor dem Feuertod retten. Zu jenen Zeiten begann aber auch der grandiose Aufschwung der naturwissenschaftlichen Forschung, insbesondere der Astronomie, durch die Beiträge in Beobachtung und Theorie von Johannes KEPLER (1571–1630), Tycho BRAHE (1546–1601), Galileo GALILEI (1564–1642), Thomas HARRIOT (1560–1621), Simon MARIUS (1573–1624) und Isaac NEWTON (1643–1727). Mit der Erfindung des Teleskops durch Hans LIPPERHEY 1608 wurde das Tor zu den Tiefen des Universums aufgestoßen. Die Beobachtungsmethoden erreichten eine immer höhere Perfektion und die theoretischen Grundlagen wurden enorm verbessert. Kepler wagte den revolutionären Paradigmenwechsel von den Kreisbahnen zu den Ellipsen. Newton ermöglichte mit seiner Gravitationstheorie die Dynamik der Himmelskörper zu verstehen.

GALILEI, David FABRICIUS (1564–1617) und Christoph SCHEINER (1575–1630) entdeckten unabhängig voneinander die Sonnenflecken, wobei es zu einem heftigen Prioritätsstreit kam. Die Theologen jedoch erklärten, die Sonne sei als ‚rosa ursina immaculata‘ eine unbefleckte, göttliche Erscheinung. Flecken entstünden im Teleskop, das eindeutig ein Werkzeug des Teufels sei. Denn in der dritten Versuchung von Jesus Christus führte ihn der Teufel auf einen hohen Berg und zeigte ihm die ganze Welt. „Wenn du vor mir niederfällst und mich anbetest, soll dir die ganze Welt gehören!“ Wie konnte der Teufel Jesus die ganze Welt zeigen? Natürlich mit einem Fernrohr, wie denn sonst!

Fernrohrbeobachter sahen die zahlreichen Krater und Ringgebirge auf dem Mond sowie die vier hellen Jupitermonde. Nicht nur Galilei, sondern auch

Harriot und Marius entdeckten die vier großen Trabanten des Jupiters, die auf Vorschlag von Kepler nach den Gespielinnen und dem Mundschenk des Göttervaters Io, Europa, Ganymed und Kallisto benannt wurden.

Simon Marius kam durch Zufall zu einem Teleskop. Er war fürstlicher Hofastronom des Markgrafen Joachim Ernst von Brandenburg zu Ansbach. Der Artillerieoberst Fuchs von Bimbach besichtigte 1608 auf der Frankfurter Messe ein Fernrohr, das kurz zuvor in den Niederlanden erfunden worden war. Der Markgraf erkannte sofort die militärische Bedeutung eines Teleskops. Trotz des hohen Preises erstand Oberst Fuchs von Bimbach das Fernrohr, nachdem Nürnberger Glasschleifer vergeblich versucht hatten, das Fernrohr nachzubauen. Während man tagsüber mit dem Fernrohr nach Feinden Ausschau halten konnte, so war es nachts militärisch gesehen nutzlos. Deshalb ließ er das wertvolle Instrument Marius, der damit den Sternenhimmel beobachtete und die vier Begleiter von Jupiter entdeckte. Während Galilei seine Entdeckung der Jupitermonde bereits 1610 in seinem ‚Nuncius Sidereus‘, dem ‚Sternenboten‘, publizierte, gab Marius seine Entdeckung erst in seinem im Februar 1614 erschienen Werk ‚Mundus Iovialis‘, die ‚Welt des Jupiters‘, bekannt. Galilei beschuldigte daraufhin Marius des Plagiats. Marius hatte aber die Jupitermonde unabhängig von Galilei selbst entdeckt. Simon Marius wird seither als fränkischer Galilei bezeichnet.

Christian HUYGENS (1629–1695) erkannte erstmals die wahre Natur des Saturnrings: „Annulo cingitur, tenui plano, nusquam cohaerente, ad eclipticam inclinato“ (von einem Ring umgeben, dünn und flach, nirgends [mit Saturn] zusammenhängend und gegen die Ekliptik geneigt). Huygens entdeckte auch 1655 Titan, den Riesenmond des Saturn und zweitgrößten Mond im Sonnensystem.

Giovanni Domenico CASSINI (1625–1712), erster Direktor der Pariser Sternwarte, erkannte die Trennung des Saturnrings in einen inneren und einen

äußeren Teil. Die Lücke heißt heute ‚Cassini Teilung‘. Ferner fand er die vier Saturnmonde Tethys, Dione, Rhea und Japetus.

Hatte schon Tycho Brahe durch Parallaxenmessungen noch ohne Teleskop festgestellt, dass Kometen weiter als der Mond entfernt sind und somit keine Erscheinungen in der Erdatmosphäre, so erkannte Edmond HALLEY (1656–1742), als 1682 ein heller Komet auftauchte, dass die von Kepler beschriebene Kometenerscheinung von 1607 und der von Petrus Apianus (Peter Bienewitz) 1531 beobachtete Komet gleiche Bahnelemente aufweisen.

Sechs Bahnelemente beschreiben Größe, Form, räumliche Lage einer Kepler-Bahn sowie die Position eines Himmelskörpers in der Bahn zu einem bestimmten Zeitpunkt.

Aus dem Vergleich der Bahnelemente schloss Halley richtig, dass alle drei Kometenerscheinungen auf ein und denselben Kometen zurückzuführen sind. Er sagte daher die Wiederkehr dieses Kometen für 1758 voraus. Tatsächlich erschien dieser Komet wie prophezeit wieder, weshalb er fortan als Komet Halley bekannt wurde. Letztmals tauchte er 1986 wieder auf, wobei eine Armada irdischer Raumsonden ihn untersuchte. Die europäische Raumsonde Giotto flog in nur 600 km Distanz an Halleys Kern vorbei. Im Juli 2061 wird P1/Halley abermals sein Perihel durchlaufen und für eine imposante Kometenerscheinung sorgen.

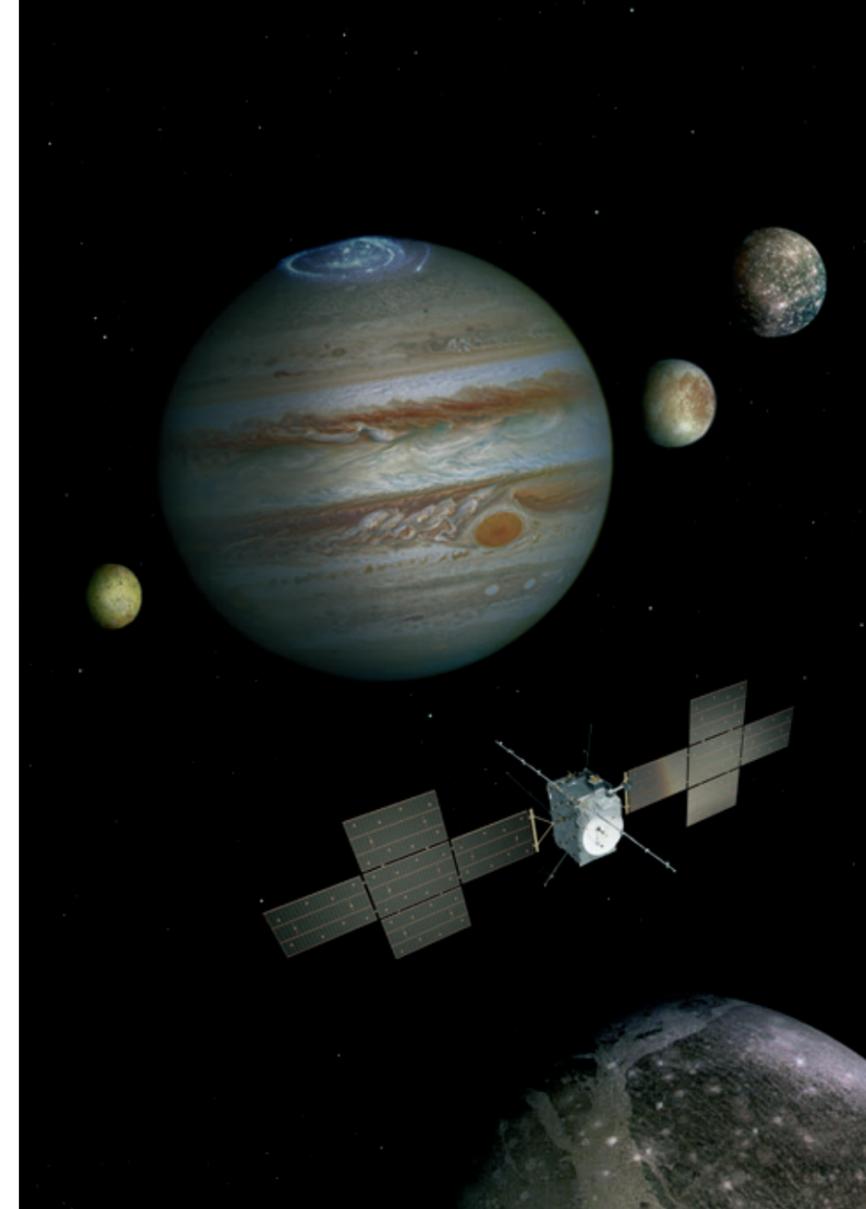
Auf der Suche nach Fixsternparallaxen entdeckte James BRADLEY (1693–1762) die Aberration der Sterne – ein eindeutiger physikalischer Beweis für die Wanderung der Erde um die Sonne. Als ‚Aberration‘, zu Deutsch ‚Abirrung‘, bezeichnet man die Erscheinung, dass die Sterne kleine Ortsveränderungen in der Größenordnung von 20 Bogensekunden gegenüber ihrem wahren Ort am Firmament zeigen. Sie beschreiben im Laufe eines Jahres kleine Ellipsen. Ursache für die Aberration ist die endliche Vakuumlichtgeschwindigkeit von knapp 300 000 Kilometer pro Sekunde und der Lauf der Erde um die Sonne mit einer Geschwindigkeit von rund 30 Kilometer pro Sekunde.

Analoges Beispiel: Wenn Regentropfen senkrecht zur Erde fallen, so muss eine schnelle Fußgängerin den Regenschirm vorneigen, um nicht in die

Regentropfen hineinzulaufen. Für sie scheinen die Regentropfen nicht senkrecht von oben, sondern von schräg oben zu kommen.

Neben der Messung der Aberrationsellipse von γ Draconis im Jahre 1728 fand Bradley auch die Nutation der Erdachse. Die Nutation ist eine Schwankung der Erdachse, gewissermaßen ein Nicken, die der Präzessionsbewegung überlagert ist. Ursache der Nutation ist der Rücklauf der Mondbahnknoten (Schnittpunkte der Mondbahn mit der Ekliptik) mit einer Periode von 18,61 Jahren.

Die erste Fixsternparallaxe wurde erst über hundert Jahre später, nämlich 1838, von Friedrich Wil-



Künstlerische Impression der Juice-Mission, die Jupiter mit seinen Monden erforscht. Spacecraft: ESA/ATG medialab; Jupiter: NASA/ESA/J. Nichols (University of Leicester); Ganymed: NASA/JPL; Io: NASA/JPL/University of Arizona; Callisto und Europa: NASA/JPL/DLR



Der Halleysche Komet bei seinem letzten Besuch in Sonnennähe im Jahr 1986. ESO

helm BESSEL (1784–1846), erster Direktor der Sternwarte zu Königsberg, am Stern 61 Cygni zu $0^{\circ},31$ gemessen. Dies entspricht einer Entfernung von fast elf Lichtjahren. Bessel erreichte eine bis dahin unerreichte Genauigkeit in der Positionsbestimmung der Sternörter.

Bessel hatte keine akademische Ausbildung. Nach acht Schuljahren begann er auf Wunsch seines Vaters eine Kaufmannslehre. Aber schon früh zeigte sich seine Begabung für Mathematik und sein Interesse an der Astronomie.

Nach seiner Tagesarbeit studierte er ab 21 Uhr bis weit nach Mitternacht als Autodidakt. Im Jahre 1801 legte er eine Prüfung als Steuermann ab und war danach kaufmännischer Begleiter von Handelsschiffen. Seine astronomischen Arbeiten legte er Wilhelm Olbers in Bremen vor, der ihn zu weiteren Arbeiten ermunterte. Alexander von Humboldt sorgte für seine Berufung zum ersten Direktor der neugegründeten

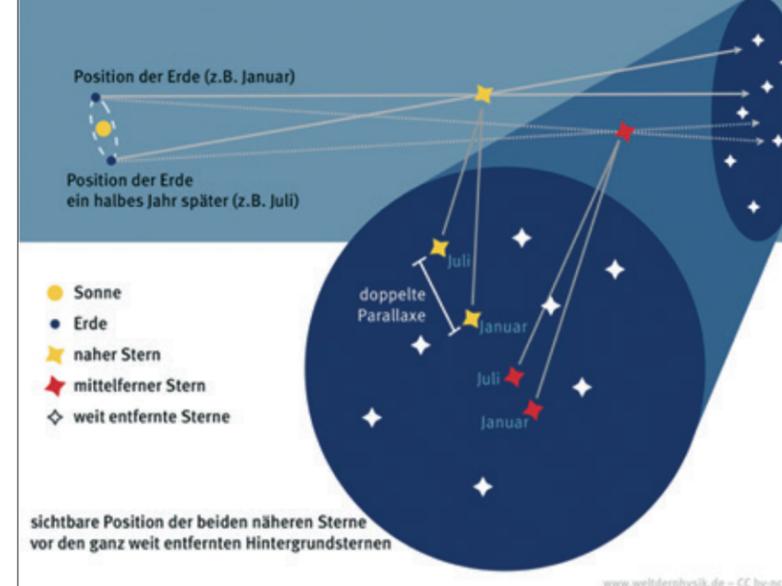
Sternwarte in Königsberg (heute Kaliningrad). Bessel litt an Darmkrebs. Nach seinem Tod 1846 wurde er auf dem neben der Sternwarte liegenden Friedhof beerdigt. Im gleichen Grab fand auch seine Ehefrau Johanna ihre letzte Ruhestätte. Sie überlebte ihn fast 40 Jahre.

Als Spiegelbild des Erdumlaufes um die Sonne beschreiben die Sterne im Laufe eines Jahres winzige kleine Ellipsen am Firmament. Eine Fixsternparallaxe ist der Winkel, unter dem der Erdbahnradius (= mittlere Entfernung Erde – Sonne, eine Astronomische Einheit) von einem Stern erscheint. Je kleiner der Parallaxenwinkel, desto weiter ist der Stern entfernt (siehe auch Beitrag von U. Bastian und S. Jordan, Die Vermessung der Milchstraße mit der Gaia-Mission).

Bessel stellte auch die schlangenförmige Eigenbewegung von Sirius mit einer Periode von fünfzig Jahren fest und schloss daraus auf einen unsichtbaren Begleiter. Erstmals gesehen wurde der Sirius-Begleiter von Alvan Graham CLARK (1832–1897) beim Test eines Linsenobjektives im Jahre 1862. Sirius B ist der erste Weiße Zwerg, der entdeckt wurde. Clark fertigte ferner das mit 102 cm Durchmesser bis heute größte Linsenobjektiv der Welt für den Yerkes-Refraktor in Williams Bay im Norden von Chicago.

Ernst Florens Friedrich CHLADNI (1756 – 1827) aus Wittenberg wurde berühmt, als er die physikalischen Grundlagen der Akustik entwickelte. Er behauptete auch als Erster 1794, Meteorite seien vom Himmel gefallene Steine, also kosmischen Ursprungs. Für seine Hypothese erntete er Spott und Widerspruch. Als ein Eisenmeteorit 1751 nahe Zagreb eingeschlagen war, wurde er als Auswurf eines Vulkans erklärt. Ein Gutachten von 1790, das der Direktor des k. und k. Naturalienkabinetts in Wien erstellte, enthält die Textpassage: „Mögen manche damals geglaubt haben, das Eisen sei vom Himmel gefallen, so ist es unverzeihlich in unserer Zeit, solchen Märchen Glauben zu schenken oder auch nur für möglich zu halten...“. In seinem Buch ‚Über Feuermeteorite und über die mit denselben herabgefallenen Massen‘, das 1819 in Wien erschien, erklärt Chladni eindeutig die Natur von Meteoriten, die gefunden wurden, als außerirdisch. Sie stammen ursprünglich aus dem Weltall.

Erst allmählich setzte sich die Erkenntnis

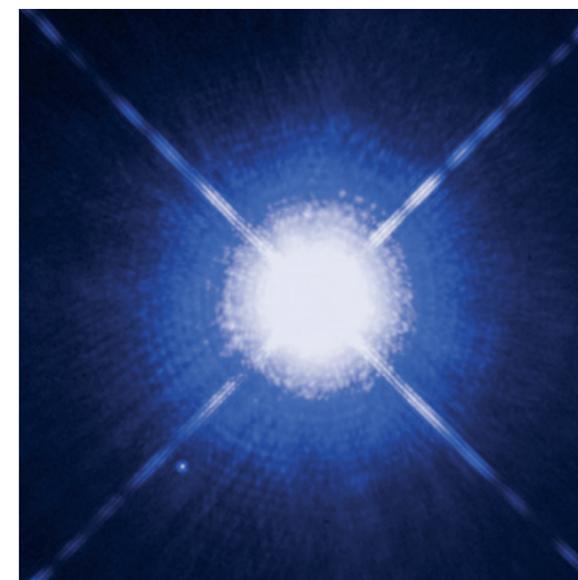


durch, dass Meteorite aus dem Weltall kommen und nicht von Vulkanen ausgeschleuderte Steine sind.

Friedrich Wilhelm HERSCHEL (1738–1822) entdeckte mit einem selbst gefertigten Spiegelteleskop 1781 im Sternbild Zwillinge den Planeten Uranus. Damit wurde die Grenze des Sonnensystems fast um das Doppelte hinausgeschoben. Herschel erkannte die physikalische Natur echter Doppelsterne und entwickelte die Grundzüge der Stellarstatistik, um den Aufbau des Milchstraßensystems zu erforschen.

Charles MESSIER (1730 – 1817) publizierte 1784 einen Katalog mit 103 nebelartigen Objekten (posthum auf 110 erweitert), unter ihnen offene und kugelförmige Sternhaufen, galaktische Gas- und Staubbenebel sowie extragalaktische Sternsysteme. Sein Katalog wird heute noch benutzt. Die Messier-Nummern sind allen Amateurastronomen geläufig. Messier stellte seinen Katalog auf, um nicht bei der Suche nach neuen Kometen von stellaren Objekten genarrt zu werden. Napoleon nannte Messier sein Kometenfrettchen.

Johannes BAYER (1572–1625) hat in seinem 1603 in Augsburg erschienenen Sternbilder-Atlas URANOMETRIA die helleren Sterne mit griechischen Buchstaben versehen. Die 24 griechischen Buchstaben reichen nicht aus, um alle Sterne in einem Sternbild zu bezeichnen. John FLAMSTEED (1646–1719) hat in seinem Sternkatalog ‚Historia Coelestis Britannica‘ die Sterne mit Nummern und Sternbildnamen versehen. Flamsteeds Katalog enthält 2866 Sterne. Sein ‚Atlas Coelestis‘ erschien 1729 posthum mit 28 einzelnen Sternkarten. Flamsteed war Gründungsdirektor



Entfernungsbestimmung mithilfe der Parallaxe. Klaas de Boer, Jens Kube/Welt der Physik

Die Aufnahme des Hubble-Weltraumteleskops zeigt Sirius A mit seinem winzigen, schwach leuchtenden Begleiter (unten links), dem Weißen Zwerg, Sirius B. NASA, ESA, H. Bond (STScI), and M. Barstow (University of Leicester)

bessert hatte, war die Sonne bereits zu nahe an den Stier gerückt. Ceres wechselte auf den Taghimmel und ward danach zunächst verschollen. Carl Friedrich GAUSS (1777–1855) entwickelte eine neue Methode zur Bahnbestimmung, um aus dem kurzen, von Piazzi beobachteten Bahnstück die Ceresbahn zu berechnen. Tatsächlich wurde Ceres im Dezember 1801 wiedergefunden.

Bald darauf fand der Augenarzt und Amateurastronom Wilhelm Heinrich OLBERS (1758–1840) in Bremen den zweiten Planetoiden, die Pallas (1802). Es folgte die Entdeckung von Juno (1804) durch Karl Ludwig HARDING (1765–1834). Der vierte Kleinplanet, die

Vesta, wurde 1807 abermals von Olbers aufgespürt. Alle vier Planetoiden laufen zwischen der Mars- und der Jupiterbahn um die Sonne. Erst 1845 wurde vom Postmeister Karl Ludwig HENCKE (1793–1866) der fünfte Planetoid, die Astraea, entdeckt.



Kleinplanet Ceres
NASA, JPL-Caltech,
UCLA, MPS, DLR,
IDA, Justin Cowart

Danach stieg die Zahl der Kleinplanetenfunde rasch an, insbesondere nach Einführung der Astrofotografie durch Max WOLF (1863–1932) bei der Fahndung nach Planetoiden auf der Heidelberger Sternwarte auf dem Königstuhl. Wolf war der Gründer der Heidelberger Sternwarte.

Bis 1900 waren von 463 Planetoiden die Bahnen bekannt. Im Jahre 2000 waren bereits 38 240 Kleinplaneten katalogisiert. Inzwischen sind einige Hunderttausend Planetoiden bekannt.

Pierre Simon de LAPLACE (1749–1827) publizierte 1796 sein Hauptwerk ‚Mécanique Céleste‘ in fünf Bänden. Er gilt als Gründer der modernen Himmelsmechanik. LAPLACE bewies die Stabilität des Planetensystems, indem er nachwies, dass die großen Halbachsen der Planetenbahnen und deren numerische Exzentrizitäten nur periodischen, aber keinen säkularen Variationen unterliegen.

Die numerische Exzentrizität einer Ellipse gibt ihre Form an. Sie ist eine dimensionslose Zahl. Ellipsen mit numerischen Exzentrizitäten nahe Null sind

kreisähnlich wie die meisten Planetenbahnen. Sind sie nahe Eins, so sind die Bahnen parabelähnlich wie fast alle Kometenbahnen. Ein Kreis hat die numerische Exzentrizität gleich Null, eine Parabel eine gleich Eins.

Zu seinem ehemaligen Schüler Napoleon Bonaparte meinte er auf die Frage, wo Gott bei seinen Kalkulationen bliebe: „Je n'avais pas besoin de cette hypothèse-la (ich brauchte diese Hypothese nicht)“. Denn vor Laplace meinte man, alle paar tausend Jahre müsse ein ‚Deus ex machina‘ durch einen Schubs das Zusammenfallen des Planetensystems verhindern. Laplace wurde daraufhin als Atheist bezeichnet. So geht es, wenn man Zitate aus dem Zusammenhang reißt.

Aufgrund von Bahnabweichungen des Uranus, die mit den Störtermen von Jupiter und Saturn nicht zu erklären waren, errechneten John Couch ADAMS (1819–1892) in England und Urbain Jean Joseph LEVERRIER (1811–1877) in Paris die Position eines hypothetischen Planeten außerhalb der Uranusbahn. Leverrier sandte seine Ergebnisse an Johann Gottfried GALE (1812–1910), der an der Berliner Sternwarte mit seinem Assistenten Heinrich Louis d'ARREST (1822–1875) am 23. September 1846 den Planeten Neptun im Sternbild Wassermann nahe der errechneten Position aufspürte – ein Triumph der theoretischen Astronomie. Noch im gleichen Jahr wurde Triton, der größte Neptunmond, gefunden.

Friedrich Wilhelm ARGELANDER (1799–1875), ein Schüler von Bessel in Königsberg, erstellte in seiner 38 Jahre langen Tätigkeit als Direktor der Sternwarte Bonn von 1837 bis 1875 einen Sternkatalog samt Sternkarten, der 477 857 Sterne enthält, das sind fast alle bis zur 9. und teils 10. Größenklasse vom Nordpol bis zur Deklinationszone -23° . Dieses Werk als ‚Bonner Durchmusterung‘ bekannt, war für lange Zeit der fundamentale Sternkatalog. Die Bonner Durchmusterung erschien erstmals 1862.

Als 1863 die Astronomische Gesellschaft in Heidelberg gegründet wurde, war Argelander ihr erster Vorsitzender, der das Zonenunternehmen der AG initiierte. Die internationale Gemeinschaft der Astronomen war dabei bemüht, von allen Sternen der Bonner Durchmusterung präzise Orte nach einem einheitlichen Fundamentalsystem zu ermitteln.

Schon John HERSCHEL (1792–1871) erkannte, dass zahlreiche im Teleskop als Doppelsterne erscheinenden Sternpaare gravitativ aneinandergebunden sind. Ihre Eigenbewegungen verraten, dass sie einander umkreisen. Friedrich Wilhelm STRUVE (1793–1864) in Dorpat beobachtete von vielen Doppelsternen die Bahnen und kalkulierte die Umlaufzeiten der Komponenten. Einer der aktivsten Doppelsternbeobachter war Sherburne Weseley BURNHAM (1838–1921). Bis 1900 waren einige Hundert physische Doppelsterne ausgemacht. Aus ihren Bahnbewegungen lassen sich die Massen der umlaufenden Sterne ableiten.

Burnhams Katalog der Doppelsterne wurde von Robert Grant AITKEN (1864–1951) auf der Lick-Sternwarte bei St. José (Kalifornien) überarbeitet, ergänzt und als neuer Katalog publiziert. Die Doppelsterne des tiefen Südhimmels wurden von Robert INNES (1861–1933) entdeckt und katalogisiert. Mit Thorvald Nicolai THIELE (1838–1910) entwickelte Innes eine Methode zur Bestimmung der wahren Bahnen der Komponenten eines Doppelsterns aus den beobachteten scheinbaren Bahnen (Thiele-Innes-Verfahren). Bei engen Doppelsternen, die sich auch in großen Teleskopen nicht in Einzelbilder auflösen lassen, erkennt man aus der periodischen Aufspaltung oder Verbreiterung der Spektrallinien infolge des Dopplereffektes, der bei einer Bahnbewegung auftritt, die Doppelsternnatur. Solche spektroskopischen Doppelsterne sind sehr häufig.

Der nach dem österreichischen Physiker Christian Johann DOPPLER (1803–1853) benannte Effekt tritt auf, wenn sich Sender und Empfänger relativ zueinander bewegen. Nähert sich ein Stern dem Beobachter, so werden seine Spektrallinien zu kürzeren Wellenlängen, also nach Blau verschoben. Entfernt sich hingegen ein Stern, so findet die Verschiebung zu längeren Wellen und somit nach dem roten Ende des Spektrums statt.

Im Jahre 1866 führte Angelo SECCHI (1818–1878) eine erste Klassifizierung von Sternspektren durch. Hermann Carl VOGEL (1841–1907) und Edward Charles PICKERING (1846–1919) ergänzten und verbesserten die Spektralklassifikation. In den Jahren 1918–1924 wird auf dem Harvard-Observatorium in Cambridge (Massachusetts) der Henry-Draper-Katalog erstellt. Er enthält die Spektralklassen von 225 000 Sternen.



Am Henry-Draper-Katalog wirkten viele Frauen mit, neben Henrietta Leavitt und Annie Cannon u. a. Williamina Fleming (5. von li. im Bild) Harvard University Archiv W289693_1

Ejnar HERTZSPRUNG (1873–1967) und Henry Norris RUSSELL (1877–1957) entwickelten 1911 das nach ihnen benannte Diagramm, in dem die absoluten Helligkeiten (Leuchtkräfte) der Sterne gegen ihre Oberflächentemperaturen aufgetragen sind. Das Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) gilt als Zentralsdiagramm der Astrophysik. Werden scheinbare Helligkeiten gegenüber Spektralklassen eingetragen, so erhält man das Farben-Helligkeits-Diagramm (FHD). Durch Einpassen des FHD eines Sternhaufens in das HRD (ZAMS-fitting) lässt sich sein Entfernungsmodul ermitteln. Kennt man die wahre Leuchtkraft eines Sternes, so kann man aus der beobachteten scheinbaren Helligkeit auf seine Entfernung schließen. Die Differenz zwischen scheinbarer Helligkeit eines Sternes und seiner wahren Leuchtkraft wird als Entfernungsmodul bezeichnet. Er ist ein Maß für die Entfernung eines Sternes. Kennt man wiederum die Entfernung eines Sternes, so kann man seine wahre Leuchtkraft bestimmen, indem man seine scheinbare Helligkeit misst.

Neben der Entfernung von Sternhaufen gibt das HRD auch deren Alter zu erkennen. Ferner lassen sich die Entwicklungswege von Sternen im HRD nachvollziehen.

Henrietta Swan LEAVITT (1868–1921) war eine amerikanische Astronomin am renommierten Harvard College Observatory. Sie entdeckte 1912 bei Beobachtungen von veränderlichen Sternen in der Kleinen Magellanschen Wolke die Perioden-Leuchtkraft-Relation der Delta-Cephei-Sterne. Diese gelten inzwischen als Leuchttürme des Kosmos. Da aus den Helligkeitsperioden dieser Sterne die absoluten Leuchtkräfte folgen, ergibt sich aus der gemessenen scheinbaren Helligkeit unmittelbar der Entfernungsmodul.

Miss Leavitt litt schon in jungen Jahren an einem unerklärlichen Hörverlust, der schließlich zur Taubheit führte. Schon früh zeigte sie ein ausgeprägtes Interesse an der Himmelskunde. Am Harvard-Observatorium widmete sie sich mit großem Engagement der photographischen Photometrie. Sie wurde bald vom Direktor des Observatoriums, Edward Charles Pickering, zur Abteilungsleiterin befördert. Er erhöhte dabei ihren Stundenlohn. Sie war für die Auswertung aller photometrischen Aufnahmen verantwortlich. Ihre Kolleginnen und Kollegen nannten sie ob ihres Fleißes und unermüdlichen Einsatzes ‚Sternenfanatikerin‘. Ein Mitglied der Schwedischen Akademie der Wissenschaften schlug sie für den Physik-Nobelpreis 1925 vor, ohne zu wissen, dass Miss Leavitt bereits 1921 mit 53 Jahren an einer Krebserkrankung verstorben war.

Karl SCHWARZSCHILD (1873–1916) löste als Erster 1916 die Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) Albert Einsteins und formulierte die Bedingungen, unter denen es zu einem Gravitationskollaps einer Masse kommen kann. Er berechnete den Radius einer Masse, bei der die Entweichgeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit wird. Er wird Schwarzschildradius genannt. Erst 1968 führte John Archibald WHEELER (1911–2008), Nachfolger von Albert Einstein auf dem Lehrstuhl für Physik in Princeton (New Jersey), den populären Begriff ‚Black Hole‘ (Schwarzes Loch) ein. Die ART gibt Aufschluss über die zusätzliche Drehung der Apsidenlinie der Merkurbahn (zusätzliches Vorrücken des Merkurperihels um 43“ pro Jahrhundert), die mit der Newtonschen Gravitationstheorie nicht zu erklären ist. Ferner beschreibt die ART die Lichtablenkung im Schwerfeld beispielsweise

der Sonne und die gravitationsbedingte Rotverschiebung der Spektrallinien, erstmals beobachtet bei Weißen Zwergen, sowie den Gravitationslinseneffekt und die Entstehung von Gravitationswellen.

Harlow SHAPLEY (1885–1972) bestimmte 1917/18 die Entfernungen der Kugelhaufen und schloss aus deren räumlicher Verteilung auf die Größe der Galaxis. Auch erkannte er die Position unserer Sonne weit außerhalb des Milchstraßenzentrums aus der Verteilung der Kugelsternhaufen im galaktischen Halo. Mit Heber Doust COURTIS (1872–1942), Direktor des Allegheny Observatoriums in Pittsburgh (Pennsylvania) kam es am 26. April 1920 in der National Academy of Sciences in Washington D.C. zu einer hitzigen Debatte mit Shapley über die Größe der Galaxis und die Entfernungen der Kugelhaufen.

Arthur Stanley EDDINGTON (1882–1944) vermutete 1920 die Energiequellen der Sterne in der Fusion von Wasserstoffatomkernen zu Heliumatomkernen (Alpha-Teilchen).

Im Jahre 1925 gelang es Edwin Powell HUBBLE (1889–1955) und Milton Lasell HUMASON (1891–1972) mit dem 2,5 m-Reflektor des Mt. Wilson Observatoriums in Kalifornien, dem damals größten Teleskop der Welt, die Spiralarme von M 31 (Andromedanebel) und M 33 (Triangulum-Nebel) in einzelne Sterne aufzulösen. Er identifizierte unter ihnen Delta-Cephei-Sterne. Damit wurden ihre extragalaktischen Distanzen nachgewiesen. Hubble klassifizierte ferner die Galaxien nach ihren morphologischen Strukturen (elliptische Galaxien, Spiralen und Balkenspiralen sowie irreguläre Systeme). In den Jahren 1926 bis 1929 entdeckte Hubble die ‚Flucht der Nebel‘ und damit die Expansion des Universums. Je weiter eine Galaxie von uns entfernt ist, desto schneller entfernt sie sich von uns.

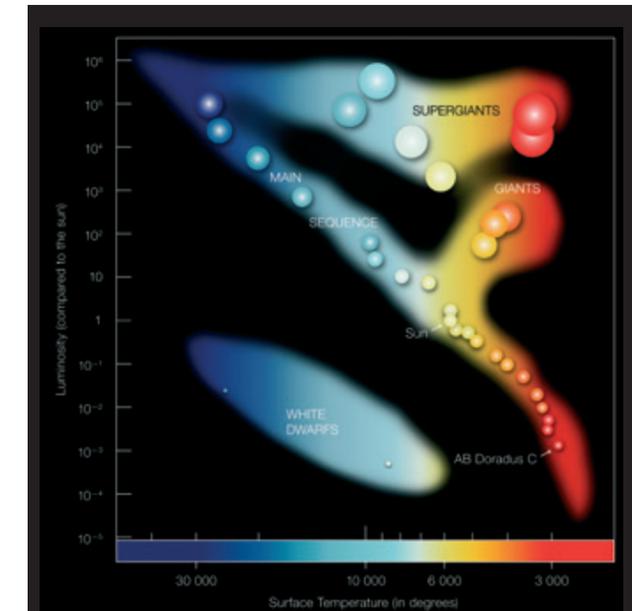
Hubble studierte zunächst Jura. Zufällig geriet er in eine Astronomie-Vorlesung, die ihn so faszinierte, dass er die Juristerei an den Nagel hängte und beschloss, Astronom zu werden. Er studierte bei dem damals jungen Professor George Ellery HALE (1868–1938) an der Universität von Chicago. Seine Kommilitonen schätzten ihn als ausgezeichneten Leichtathleten und Basketballspieler. Auch soll er ein guter Amateurboxer gewesen sein.



Das Galaxienklassifizierungsschema nach Hubble. ESO, Zooniverse



Edwin Hubble am Teleskop des Mount Wilson Observatoriums in Kalifornien. Edwin P. Hubble Papers, Huntington Library, San Marino, California



Hertzsprung-Russell-Diagramm ESO

Seine erste berufliche Station war das Yerkes-Observatorium in Williams Bay nahe Chicago. Nach Fertigstellung des 2,5-m-Hooker Reflektors auf dem Mt. Wilson siedelte Hubble nach Kalifornien um, wo er sich der Galaxienforschung widmete.

Im Jahre 1930 findet Clyde William TOMBAUGH (1906–1997) den neunten Planeten, Pluto genannt, auf der Lowell-Sternwarte in Flagstaff (Arizona). Tombaugh war Farmer in Kansas. Als Amateurastronom fertigte er zahlreiche Zeichnungen von Mars und Jupiter, die er Vesto SLIPHER, Direktor des Lowell Observatoriums in Flagstaff (Arizona) sandte. Slipher erkannte die Qualität seiner Arbeiten. Tombaugh erhielt 1928 eine Stelle am Lowell-Observatorium. Da er keine akademische Ausbildung hatte, wurde er zunächst als Gärtner eingestellt. Daneben verglich er photographische Aufnahmen, die mit dem 13-Zoll Lawrence-Lowell-Refraktor gewonnen wurden, mit dem Blinkkomparator. In einem Blinkkomparator werden zwei Aufnahmen der gleichen Himmelsgegend eingespannt. Ein schwenkbares Prisma bringt zunächst die eine, dann die andere Aufnahme ins Gesichtsfeld. Veränderliche Sterne verateten sich durch Blinken, bewegliche Objekte springen hin und her. Im Februar 1930 wurde Tombaugh fündig. In den Zwillingen fand er ein Objekt, das sich offensichtlich bewegt hatte – allerdings viel zu wenig für einen Planetoiden im Gürtel zwischen der Mars- und der Jupiterbahn. 2006 wird Pluto in die eigens für ihn neu geschaffene Kategorie der Zwergplaneten aufgenommen. Die Raumsonde ‚New Horizons‘ beförderte ein paar Gramm Asche von Tombaugh zu Pluto, an dem sie am 14. Juli 2015 vorbeiflog.

Erstmals besuchte damit ein Astronom posthum seinen von ihm selbst gefundenen Himmelskörper. Der belgische Theologe Georges LEMAÎTRE (1894–1966) schließt aus den Gleichungen der ART auf die Expansion des Universums und erklärt die Entstehung des Universums aus einem extrem heißen und superdichten Uratom (primeval atom).

Einstein bezweifelte zunächst Lemaitres Theorie. Auf einer gemeinsamen Reise konnte Lemaitre jedoch Einstein davon überzeugen, dass das Universum expandieren muss. Papst Pius XII. akzeptierte die Urknalltheorie in einem Vortrag vor der Päpstli-

chen Akademie der Wissenschaften im November 1951, indem er erklärte, der ‚Big Bang‘ sei der göttliche Schöpfungsakt.

Die IAU beschloss auf ihrer Generalversammlung im August 2018 in Wien, das Hubble-Expansionsgesetz in Hubble-Lemaître-Gesetz umzubenennen.

Karl Guthe JANSKY (1905–1950) entdeckt 1932 die kosmische Radiostrahlung aus Richtung des Sternbildes Schütze. Mit Einsatz der Parabolantenne von Grote REBER (1911–2002) schlägt die Geburtsstunde der Radioastronomie (1940).

Jan Hendrik OORT (1900–1992), Frank John KERR (1918–2000) und Gart WESTERHOUT (1927–2012) gelingt es 1954 mit Hilfe der 21 cm-Radiostrahlung des neutralen Wasserstoffs (H I), die Spiralstruktur der Galaxis nachzuweisen.

Mit Start von Sputnik I am 4. Oktober 1957 beginnt ein neues Zeitalter in der Erforschung des Universums und seiner Sterne, das Zeitalter der Weltraumfahrt. Man kann ab da die Körper des Sonnensystems aus nächster Nähe untersuchen, knapp an ihnen vorbeifliegen, sie permanent als künstliche Satelliten umkreisen oder auf ihnen landen und Materialproben zur Erde bringen. Ohne absorbierende Wirkung der irdischen Atmosphäre steht den Astronomen nun die gesamte Bandbreite elektromagnetischer Strahlung für ihre Untersuchungen zur Verfügung. Selbst die von Einstein postulierten Gravitationswellen konnten inzwischen nachgewiesen werden. In nie gekanntem Ausmaß hat sich unser Wissen vom Universum vermehrt. Wie sagte einst Catherine Cesarsky, ehemalige Präsidentin der Internationalen Astronomischen Union: „We are living now in the golden age of astronomy“.



PROF. DR. HANS-ULRICH KELLER ist Gründungsdirektor des Carl-Zeiss-Planetariums Stuttgart, Professor für Astronomie an der Universität Stuttgart und Leiter der Sternwarte Welzheim. Seit mehr als vierzig Jahren gibt er das astronomische Jahrbuch HIMMELSAHR heraus.



Die unterschiedlichen Farben des Mondes rühren von unterschiedlichen Mineralien her. Das ist keine Falschfarbenaufnahme, sondern nur eine Farbverstärkung. Aufnahme vom 23.03.2021 (Zeissrefraktor der Sternwarte; Kamera ZWO 533C (Videobilder gestackt und nachbearbeitet in Photoshop) Foto: Jörg Dubiel, Kepler-Sternwarte Weil der Stadt

Logarithmen verdoppeln die Lebenszeit der Astronomen

BURKHARD KÜMMERER

Die Überschrift zitiert einen Satz des großen Mathematikers und Astronomen Pierre Simon Laplace (1749-1827) aus dem Jahr 1796 ([8]). Er lässt den ungeheuren Fortschritt erahnen, den die Erfindung der Logarithmen Anfang des 17. Jahrhunderts für die Astronomie bedeutete und die Kepler nötigte, die fast schon fertig geglaubten Rudolphinischen Tafeln grundlegend zu überarbeiten. Warum er kaum anders konnte, soll dieser Beitrag deutlich machen.

Was ist das Problem?

Wo steht wann welches Gestirn am Himmel? Die Beantwortung dieser Frage ernährt von jeher die Astronomen. Sie ist nicht nur zentral für die Erstellung von Kalendern, sondern ebenso für die Orientierung auf hoher See – und für die Erstellung von Horoskopen. Die Antworten werden auf Grundlage astronomischer Tafeln errechnet und in den Tabellen der Ephemeriden niedergelegt. So begleiteten die Ephemeriden von Regiomontanus (1436-1476) auch Christoph Kolumbus (1451-1506) auf seinen Reisen nach Westen und retteten ihm durch die Vorhersage einer Mondfinsternis wohl das Leben. Jedoch konnten noch im 16. Jahrhundert die berechneten Positionen der Gestirne leicht um mehrere Grad von ihren wahren Positionen abweichen (ein Grad am Himmel entspricht etwa zwei Vollmondbreiten), vgl. auch den Beitrag [10] in diesem Band. Dies hatte nicht nur unzählige Schiffbrüche zur Folge, sondern wurde auch als Ursache für falsche Vorhersagen von Horoskopen angesehen. Der Bedarf an zuverlässigen astronomischen Berechnungen stieg – und sicherte auch weiterhin das Einkommen der Astronomen.

Diese Berechnungen machten ausgiebig Gebrauch von Sinus und Kosinus, deren Werte, wenn auch nicht in der heute geläufigen Form, seit der Antike mit wachsender Genauigkeit in Tabellen vorlagen: Sie war im 16. Jahrhundert auf sieben bis zehn, ja sogar bis zu 15 gültigen Ziffern angewachsen (vgl. z.B. [14]).

Und hier kommt das Problem: Die Berechnungen erfordern ständig Multiplikationen und Divisionen

dieser Zahlen, und diese mussten zu hunderten ausgeführt werden. Nun erfordert die Multiplikation schon zweier 7-stelliger Zahlen $49 (= 7 \cdot 7)$ die Multiplikation zweier 10-stelliger Zahlen 100 Mal die Benutzung des kleinen Einmaleins. Das ist mühsam und fehleranfällig. Daher lagen ab Ende des 16. Jahrhunderts Bemühungen in der Luft, diese Rechnungen zu vereinfachen.

Offenbar sind Additionen sehr viel einfacher als Multiplikationen. Könnte man nicht irgendwie Multiplikationen durch Additionen ersetzen und so die mühseligen Rechnungen erheblich vereinfachen? Ja, man kann!

Wie man Multiplikationen zu Additionen macht

Der erste große Schritt in diese Richtung trägt den eindrucksvollen Namen ‚Prosthaphairesis‘. Diese Methode, sie beruht auf Additionstheoremen für Sinus und Kosinus, wurde ausgiebig von Tycho Brahe (1546–1601) und seinen Mitarbeitern genutzt. Von hier gelangte sie sowohl zu Jost Bürgi (1552–1632) als auch zu John Napier (oder Neper) (1550–1617) und führte beide am Ende zur Erfindung der Logarithmen.

Die grundlegende Idee der Logarithmen ist sehr einfach: Was ist $1\ 000 \cdot 100\ 000$? Nun: $1\ 000$ hat drei Nullen, $100\ 000$ hat fünf Nullen, also hat das Produkt drei plus fünf gleich acht Nullen, das Ergebnis ist also $100\ 000\ 000$ (hundert Millionen). In Potenzschreibweise (sie wurde aber erst von R. Descartes (1596-1650) eingeführt) sieht das noch etwas übersichtlicher aus: $10^3 \cdot 10^5 = 10^{3+5} = 10^8$. Man kann also die Multiplikation dieser Zahlen auf die Addition der Zahl ihrer Nullen zurückführen.

Den entscheidenden Anstoß für die Erfindung der Logarithmen gab schließlich eine ganz ähnliche Tabelle von Michael Stifel (1487–1567) in seinem Buch ‚Arithmetica Integra‘ aus dem Jahr 1544:

0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	2	4	8	16	32	64	128	256

Er stellt fest: Hat man einmal diese Tabelle, so braucht man nicht mehr die Zahlen in der unteren Zeile miteinander zu multiplizieren, sondern man kann stattdessen die entsprechenden Zahlen in der oberen Zeile addieren: Unterhalb von zum Beispiel 3 steht ja $8 = 2 \cdot 2 \cdot 2 = 2^3$, unterhalb von 4 steht $16 = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 2^4$ etc. Will man also etwa 8×32 rechnen, so schaut man in der Tabelle nach: Oberhalb von 8 steht 3, oberhalb von 32 steht 5, nun addiert man $3 + 5 = 8$ und sieht, dass in der Tabelle unterhalb von 8 die Zahl 256 steht. In der Tat ist $8 \times 32 = 256$, denn es ist ja – und darauf beruht dieser Trick – $8 \cdot 32 = 2^3 \cdot 2^5 = 2^{3+5} = 2^8 = 256$. Statt die Zahlen zu multiplizieren, müssen wir nur deren Exponenten addieren und die Tabelle benutzen. (‚Exponenten‘ sind die kleinen hochgestellten Zahlen, das Wort hat Stifel mit diesem Buch in die Mathematik eingeführt.) Kurze Zeit später schreibt Stifel dann: „Man könnte hier ein ganzes neues Buch über die Wunder der Zahlen schreiben, aber hier muss ich darauf verzichten und mit geschlossenen Augen vorübergehen“.

Daher hat Stifel die Logarithmen nicht erfunden. Aber er hat beide, Jost Bürgi und John Napier, mit dieser Tabelle zu deren Erfindung angeregt, und damit einen der großen Fortschritte der Mathematik ausgelöst (vgl. z.B. [13] oder die entsprechenden Einträge in [2]). Denn rückblickend hat Stifel eine kleine Tafel der Logarithmen zur Basis 2 erstellt: In der unteren Zeile die ‚Numeri‘, die Zahlen, die man miteinander multiplizieren möchte, in der oberen Zeile ihre ‚Logarithmen‘, die man nur noch addieren muss.

Mit mehr Zahlen zu Logarithmen

Natürlich möchte man auch andere Zahlen miteinander multiplizieren, man braucht also größere Tabellen. Man müsste ja ‚nur‘ dafür sorgen, dass die Zahlen, die

man miteinander multiplizieren möchte – die Numeri – näher beieinander liegen als 1, 2, 4, 8, 16, Genau das haben Jost Bürgi und John Napier getan und wieder ist ihr Grundgedanke recht einfach: Sie berechneten nicht die Potenzen von 2, sondern von einer Zahl ganz nah bei 1, und schrieben die Ergebnisse in eine Tabelle. Mit ihr kann man jetzt genauso rechnen wie mit der Tabelle von Stifel.

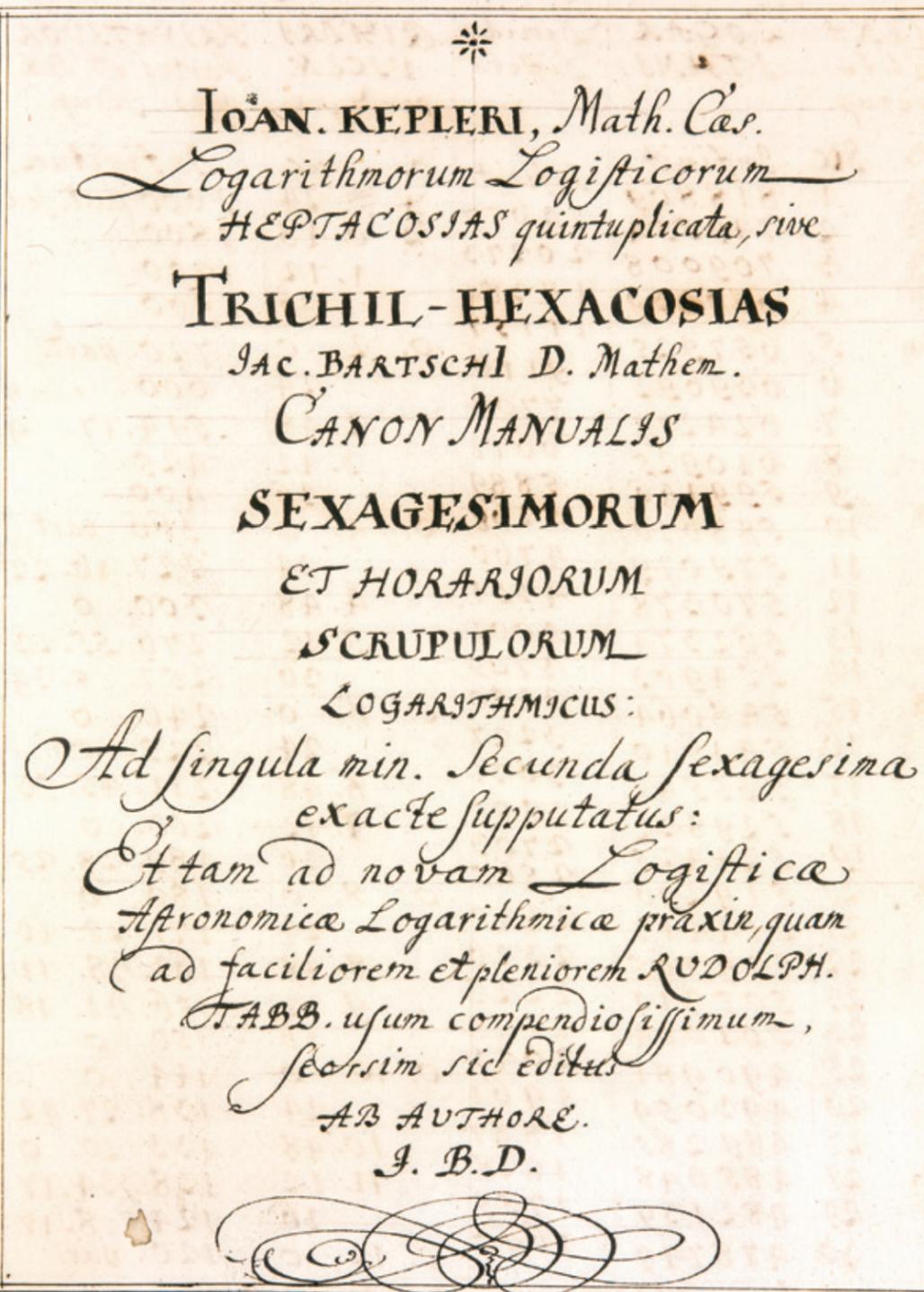


Man darf aber nicht übersehen: Die Erstellung einer genügend reichhaltigen Logarithmen-Tabelle war mit einem ungeheuren Rechenaufwand verbunden: Napier rechnete 20 Jahre – wir können uns das heute kaum mehr vorstellen. Ein paar Jahrzehnte später stellten Potenzreihen zwar schnellere Verfahren zur Berechnung von Logarithmen zur Verfügung, aber zu diesem Zeitpunkt war die Hauptarbeit zur Berechnung von Logarithmentafeln für den Alltag der Astronomen schon geleistet.

Eine Logarithmentafel multipliziert für uns

Eine Logarithmentafel ist eine Tabelle, in welcher man für möglichst viele Zahlen deren Logarithmen nachschlagen kann. Mit ihrer Hilfe kann man für zwei Zahlen mit einer gewissen Genauigkeit deren Produkt bestimmen: Möchte man zwei Zahlen x und y (wir betrachten

Die Ausgabe aus dem Jahr 1700 der Logarithmen von Johannes Kepler und Jakob Bartsch (Hrsg. Joh. Caspar Eisenschmid) wurde – wahrscheinlich von dem Lindauer Pfarrer und Astronomen Johannes Gaupp (1667-1738) – von Hand abgeschrieben: Es war immer noch leichter, eine ganze Logarithmentafel von Hand abzuschreiben als ohne Logarithmen zu rechnen. ERB Lindau, Foto: Patrick Pfeiffer



Titelblatt einer handschriftlichen Kopie von ,Joh. Kepleri, Mathem. Cas. & Jacobi Bartschii Tabulae Manuales Logarithmorum ...', Herausgegeben von Joh. Casp. Eisenschmid, Straßburg 1700. ERB Lindau.

nur positive Zahlen) miteinander multiplizieren, so schlägt man in der Tabelle ihre Logarithmen nach, nennen wir sie $L(x)$ und $L(y)$, man berechnet deren Summe $L(x) + L(y)$ und nun liest man die Tabelle in der Rückrichtung und sucht nach einer Zahl, deren Logarithmus gerade gleich der errechneten Summe $L(x)+L(y)$ ist. Sie ist das gesuchte Produkt. Das ist doch erheblich bequemer, als das Produkt ‚von Hand‘ auszurechnen – und verdoppelt die Lebenszeit der Astronomen. Das obige Vorgehen kann man zu $L(x \cdot y) = L(x) + L(y)$ zusammenfassen. Insbesondere ergibt sich daraus, wenn y zu einer festen Zahl c wird:

Prinzip des logarithmischen Zuwachses.

Wenn man Zahlen x mit immer derselben festen Zahl c multipliziert, so vergrößert (oder verkleinert) sich deren Logarithmus um immer denselben festen Summanden $L(c)$. Dieses Prinzip steht oft im Hintergrund, wenn uns Logarithmen im Alltag begegnen (vgl. die Beispiele im letzten Abschnitt).

Kepler begegnet den Logarithmen ...

Kepler wählte sich kurz vor der Fertigstellung seiner Rudolphinischen Tafeln. Als er 1617 kurz einen Blick in Napiers Logarithmen ‚Mirifici logarithmorum canonis descriptio‘ warf, erkannte er wohl noch nicht in vollem Umfang den Wert dieser Tabellen. Eigentlich hätte Kepler deren Grundgedanken schon kennen können, denn er arbeitete von 1605 bis 1612 in Prag auch mit Bürgi zusammen und der hatte in dieser Zeit schon lange über seine Logarithmen nachgedacht (sie aber erst 1620 unter dem Titel ‚Arithmetische und Geometrische Progress Tabulen‘ ohne mathematische Hintergründe veröffentlicht). Es spricht jedoch vieles dafür, dass Bürgi ihn nicht voll eingeweiht hatte.

So wurde Kepler erst im Jahr 1619 die volle Bedeutung der Logarithmen bewusst, als er eine gekürzte Ausgabe von Benjamin Ursinus und dann auch Napiers Logarithmentafel ‚Mirifici logarithmorum canonis descriptio‘ (etwa ‚Beschreibung des wundervollen Kanons der Logarithmen‘) studieren konnte (hier taucht zum ersten Mal das Wort ‚Logarithmus‘ auf). Zwar enthielten diese Werke nur die Tabellen, nicht aber die Hintergründe ihrer Berechnung, aber Kepler sah nun, dass er seine Rudolphinischen

Tafeln nicht ohne die neue und zeitsparende Methode der Logarithmen würde veröffentlichen können. Die Rudolphinischen Tafeln waren ja keine fertig gerechneten Ephemeridentafeln, sondern sie sollten andere in die Lage versetzen, selbst solche Rechnungen auf gesicherter Basis vorzunehmen (vgl. den Beitrag [10] in diesem Band).

Voller Begeisterung schrieb Kepler einen Brief an Napier – der aber schon zwei Jahre vorher gestorben war. Der Brief erschien schließlich in Form einer Widmung, datiert vom 28.7.1619, zu Beginn seiner Ephemeriden 1620 (vergleiche den übersetzten Auszug in [11]).

Kepler zählte einige Gründe auf, warum sich die schon lange erwartete Publikation der Rudolphinischen Tafeln immer wieder verzögert habe (Kepler wurde deswegen von vielen Seiten schon bedrängt), nun sei aber völlig unerwartet ein ‚glückliches Unglück‘ (‚foelix calamitas‘ schreibt Kepler) dazugekommen, welches einen Teil der Tafeln betraf, der schon lange fertig gewesen sei. Ohne Zweifel würden die Logarithmen Teil der Rudolphinischen Tafeln werden, daher würden die ‚Professoren der Astronomie‘ erfreut sein (er schreibt: ‚sich gratulieren‘) über sein [Keplers] Vorgehen (gemeint ist die weitere Verzögerung der Publikation der Rudolphinischen Tafeln). Am Ende äußert Kepler die Bitte, ihm so bald wie möglich alles, was er Nützlich habe, zugänglich zu machen, sodass die Methode seines Vorgehens öffentlich bekannt werde.

... und muss sie doch selbst ausrechnen

Nun war Napier aber gestorben und alle bisher verfügbaren Ausgaben der Logarithmen enthielten die Zahlen, nicht aber die theoretischen Hintergründe. Das war ein Problem. Mit seinen Zweifeln, ob er die Logarithmen dennoch verwenden könnte, wandte er sich an seinen ehemaligen Lehrer Michael Mästlin (1550 – 1631), der (im März 1620) antwortete (zitiert nach [6], Band IX, S. 463):

„Ich halte es für unwürdig eines Mathematikers, mit fremden Augen sehen zu wollen und sich auf Beweise zu stützen oder als solche auszugeben, die er nicht verstehen kann ... Deshalb mache ich mir einen Kalkül nicht zu eigen, von dem ich glaube oder annehme, dass er bewiesen sei, sondern nur einen, von dem ich das weiß.“

Für rund 350 Jahre waren Logarithmen auf jedem Rechenschieber überall präsent. Mit ihm konnte man auf der Basis von Logarithmen im Handumdrehen bis auf etwa 3 Stellen genau multiplizieren – und viele weitere Rechnungen durchführen.

Foto: Pixabay



Sofort machte sich Kepler an die Arbeit. Er entwickelte seine eigene Theorie der Logarithmen und stellte deren Berechnung auf eine sichere Basis, die Proportionenlehre von Eudoxus aus Euklids Elementen. Auf dieser Grundlage berechnete Kepler nun seine Tafeln und korrigierte auch einige Ungenauigkeiten bei Napier. Voller Stolz umgab er im Frontispiz der Rudolphinischen Tafeln die „Logarithmica“ mit den Ziffern seiner nun verbesserten Berechnung des Logarithmus von 2. Dennoch wird seine Begeisterung Grenzen gekannt haben, wusste - oder ahnte - er doch, dass auch Jost Bürgi über Logarithmen verfügte. Man kann wohl annehmen, dass Kepler gerne darauf zurückgegriffen hätte, es hätte ihm viel Arbeit erspart. Jedenfalls schreibt er im Vorwort der Rudolphinischen Tafeln über Bürgi und dessen Logarithmen ([6], Band IX, S. 462): „*Allerdings hat der Zauderer und Geheimtuer das neugeborene Kind verkommen lassen, statt es zum allgemeinen Nutzen groß zu ziehen*“.

Im Winter 1621/22 verfasste Kepler nun seine ‚Chilias Logarithmorum‘, seinen ‚Tausender der Logarithmen‘, dessen Tabellen in der Tat Logarithmen für 1.000 Zahlen enthalten. Er widmete es dem Landgrafen Philipp von Hessen-Butzbach, mit dem Kepler schon über Logarithmen korrespondiert hatte. Das Buch sollte eigentlich in Keplers alter Heimat Tübingen erscheinen und Kepler schickte das Manuskript an Mästlin. Aber Mästlin – vielleicht mochte er die Logarithmen noch immer nicht – blieb tatenlos. Kepler überließ daraufhin die Publikation dem Landgrafen und hörte lange nichts mehr, bis er zu seiner eigenen

Überraschung im Katalog der Frankfurter Herbstmesse 1624 sein Buch angezeigt fand. Landgraf Philipp hatte es kurzerhand in Marburg drucken lassen und schickte Kepler 10 Exemplare und 50 Reichstaler für die Widmung. Eine angepasste Version von Keplers Logarithmen fand schließlich Aufnahme in die Rudolphinischen Tafeln, sie waren ja der Anlass für Keplers Bemühungen.

Keplers Schwiegersohn Jacob Bartsch (1600–1632) besorgte im Jahr 1631 posthum eine zweite Ausgabe der Logarithmen. Diese Edition erfuhr noch im Jahr 1700 eine Neuauflage (vgl. aber die Bemerkung unten).

Einordnung von Keplers Logarithmen

In wenigstens zweierlei Hinsicht waren Keplers Logarithmen schon zur Zeit ihres Erscheinens nicht mehr ‚the state of the art‘: Inzwischen waren schon die ersten Briggschen Logarithmen zur Basis 10 (‚dekadische Logarithmen‘) im Umlauf. Henry Briggs (1561–1631) hatte noch gemeinsam mit Napier mit deren Berechnung begonnen, die für die Zwecke der Naturwissenschaften deutlich geeigneter sind. Kepler sah den Vorteil der dekadischen Logarithmen (vgl. [6], Band IX, S. 466), entschied sich aber am Ende gegen die Umarbeitung seiner schon weit gediehenen Darstellung.

Zweitens verzichtete Kepler, im Unterschied zu Napier, darauf, den Logarithmen des Sinus die Logarithmen des Kosinus gegenüberzustellen. Dies hätte die Tafeln noch ein gutes Stück wertvoller gemacht, weil man damit auch sofort die Logarithmen von Tangens und Kotangens durch Differenzbildung hätte ablesen können.

Keplers mathematische Fundierung der Logarithmen war aber weit solider als die 1620 posthum erschienene ‚dynamische‘ Begründung von Napier, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann (vgl. [5], [11], [13]). Sie ist zwar wunderschön, aber mathematisch stand sie zu dieser Zeit auf recht wackeligen Beinen. Bürgi hat keine mathematischen Hintergründe zu seinen Logarithmen publiziert.

Die herausragende Bedeutung der Rudolphinischen Tafeln führte dazu, dass man sich noch über Jahrzehnte der eigentlich veralteten Keplerschen Logarithmen bedienen musste und noch im Jahr 1700 „nur



mit Rücksicht auf die Benutzung der Rudolphinischen Tafeln“ ([6], Band IX, S. 467) eine (verschlechterte) Neuauflage herausgegeben wurde, herausgegeben wurde, welche auch hier abgebildet ist.

Diskussion

Obwohl die Details der Rechnungen und der erstellten Tabellen hier nicht näher erläutert werden können (dazu ausführlicher zum Beispiel in [14], [13], [11], [4] oder in den entsprechenden Einträgen in [2]), soll im Folgenden auf einige Fragen eingegangen werden, die sich vielleicht stellen.

Logarithmen ohne Dezimalschreibweise.

Zu Beginn des 17. Jahrhunderts hatte sich die Schreibweise von Dezimalbrüchen, die von dem Belgier Simon Stevin (1548 - 1620) in seinem kleinen Buch „De Thiende“ („Der Zehnte“) systematisch eingeführt wurde, noch nicht allgemein durchgesetzt. Sie war Napier, Bürgi, Briggs und Kepler zwar wohlvertraut, um aber die Adressaten ihrer Tabellen nicht zu irritieren, erreichten sie durch Multiplikation mit einer geeignet großen Zehnerpotenz wie 10.000.000, dass man die Tabellen auch ohne Vertrautheit mit der damals noch neuen Dezimalschreibweise benutzen konnte. Dies erklärt die großen Zahlen in den frühen Tabellen. Allerdings musste man die Rechnungen mit Logarithmen dafür leicht modifizieren.



Es gibt zu viele Zahlen. Daher kann keine Tabelle die Logarithmen aller Zahlen enthalten. Zum Glück erlauben es aber die Gesetze der Logarithmen, die Tabellen auf die Zahlen in einem geeignet gewählten Intervall zu beschränken. Aber in einem Intervall liegen immer noch unendlich viele Zahlen, daher wird jede Tabelle Lücken aufweisen. Findet man aber eine gesuchte Zahl nicht in der Tabelle, so kann man deren Logarithmus mit geeigneten Interpolationsverfahren aus den Logarithmen der benachbarten Zahlen recht gut näherungsweise bestimmen. Jost Bürgi hat im Zusammenhang mit seinen Sinustabellen – hier steht man natürlich vor demselben Problem – ein raffiniertes Interpolationsverfahren entwickelt aber nicht publiziert, es wurde erst kürzlich wiederentdeckt und entschlüsselt ([3], [9]).

Logarithmen sind fast immer ungenau.

Logarithmen sind in aller Regel irrationale Zahlen und lassen sich in Dezimalschreibweise nur näherungsweise angeben, je nach Anzahl der berücksichtigten Stellen (bei Napier 8 Stellen, bei Briggs 14, bei Bürgi 9, bei Kepler 8). Man muss aber auch nicht immer ganz genau rechnen: Mit einem Näherungswert von $\pi \sim 3,1415927$ (7 Stellen hinter dem Komma) ergibt sich aus dem Äquatordurchmesser der (kugelförmig gedachten) Erde von 12.756,27 km die Länge des Äquators noch immer bis auf etwa einen Meter genau. Mit sieben gültigen Stellen kommt man also schon weit!

Warum rechnen Computer nicht schneller mit Logarithmen? Wenn das Multiplizieren mit Logarithmen so einfach sein soll, warum setzt man diese

Auch die Natur kennt Logarithmen. Links: Ein Nautilus hat die Form einer logarithmischen Spirale, rechts die Galaxie Messier 51. Nautilus: Chris 73, Wikipedia Commons. Galaxie Messier 51: NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

Methode nicht auch bei Rechnungen auf Computern ein und spart so teure Rechenzeit? Da sich im Verlauf von längeren Rechnungen kleine Ungenauigkeiten leicht zu großen Fehlern aufschaukeln, muss man hier von Beginn an mit deutlich höherer Genauigkeit rechnen. Schon ein kleiner Taschenrechner zeigt typischerweise 10 Ziffern an. Er bräuchte also eine Logarithmentafel mit wenigstens $10^{10} = 10.000.000.000$ Einträgen, und Computer rechnen noch viel genauer. Das übersteigt also sehr schnell die Kapazität von Speichern mit schnellem Zugriff, denn aufsuchen muss man die Logarithmen ja auch noch. Daher sind auch auf modernen Computern Multiplikationen aufwändiger und teurer als Additionen, und die Entwicklung schnellerer Verfahren zur Multiplikation ist bis heute Gegenstand der Forschung.

Logarithmen leben

Logarithmen sind auch heute allgegenwärtig, daran sollen abschließend einige Beispiele erinnern.

- Die Exponentialfunktion, sie ist aktuell sicher berühmter als die Logarithmusfunktion, ist ein Kind der Logarithmen und aus ihnen (durch Umkehrung) entstanden.

- Schon Mitte des 17. Jahrhunderts konstruierte man Rechenschieber, deren logarithmische Skalen ein müheloses Multiplizieren mit einer Genauigkeit von etwa drei gültigen Ziffern ermöglichen. Sie gehörten bis in die 70er Jahre des letzten Jahrhunderts zum unverzichtbaren Instrumentarium (und Erkennungszeichen) von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren: Man trug sie stets griffbereit (und gut sichtbar) in der Brusttasche – bis sie vom Taschenrechner abgelöst wurden. Viele ältere Filme zeugen noch heute davon.

- Wo immer man mit Zahlen über viele Zehnerpotenzen hinweg hantiert, erleichtert es den Überblick, wenn man stattdessen ihre Logarithmen benutzt. So zum Beispiel beim pH-Wert, dem negativen dekadischen Logarithmus der Konzentration der H_3O^+ -Ionen. Oder fast täglich in der Zeitung bei Graphiken mit logarithmischer Skala: Wenn der Abstand zwischen 10 und 100 so groß ist wie der Abstand zwischen 100 und 1000, dann ist die Skala logarithmisch (vergleiche oben das Prinzip des logarithmischen Zuwachses).

- Die Natur weiß das alles schon lange: Unser Auge kann Helligkeiten über viele Zehnerpotenzen hinweg wahrnehmen; fast noch leistungsfähiger ist unser Ohr. Wie macht die Natur das? Wir nehmen logarithmisch wahr! Wächst die Helligkeit - oder auch die Lautstärke – um einen festen Faktor, so wächst der wahrgenommene Reiz um einen festen Summanden. Die Natur verwirklicht also das Prinzip des logarithmischen Zuwachses. Im Kontext von Sinneswahrnehmungen ist dieses Prinzip unter dem Namen *Weber-Fechnersches Gesetz* bekannt.

- Die logarithmische Wahrnehmung spiegelt sich entsprechend in vielen Skalen wider. So werden nicht nur Sterngrößen oder Erdbebenstärken logarithmisch gemessen, sondern zum Beispiel auch Lautstärken in der logarithmischen Einheit Dezibel (dB): Eine Verdoppelung der Schallintensität entspricht jeweils einem Zuwachs von etwa 3 dB, genauer $10 \cdot \log_{10}(2) \approx 3.01$ dB, getreu dem Prinzip des logarithmischen Zuwachses. Übrigens heißt die entsprechende Einheit auf Basis der natürlichen Logarithmen - Neper, zu Ehren von John Napier oder Neper!

- Auch die Wahrnehmung von Tonhöhen folgt dem Prinzip des logarithmischen Zuwachses. Multipliziert man die Frequenz eines beliebigen Tones mit dem Faktor 2, so hören wir den Ton stets eine Oktave höher. Multipliziert man die Frequenz mit dem Faktor $3/2$, so erhöht sich die wahrgenommene Tonhöhe um eine Quinte etc. Dieses erste mathematisch formulierte Naturgesetz stand am Beginn der Sphärenharmonie (vgl. [7]).

- Zu guter Letzt: Wir sind von Logarithmen umgeben, sobald wir den Computer einschalten: Claude Shannon (1916–2001) hat in seiner epochemachenden Arbeit das Bit eingeführt als die Information, die durch die Benennung einer von zwei gleich wahrscheinlichen Alternativen gewonnen wird - und damit ein neues Zeitalter begründet. Damit beträgt die Information, die durch Benennung einer von 2^n gleich wahrscheinlichen Alternativen gewonnen wird, 2^n Bit, denn 2^n Ja-Nein-Entscheidungen reichen aus. Nun ist aber 2^n der Zweierlogarithmus von $2n$ – und wir sind wieder zurück am Ausgangspunkt, bei Michael Stifel.



Unsere Tonhöhenwahrnehmung ist logarithmisch: Greift man auf der Saite eines Streichinstrumentes (hier die D-Saite einer Bratsche) mit dem Finger ein Drittel der Saite ab und regt mit dem Bogen die verbleibenden zwei Drittel der Saite zum Schwingen an, so erhöht sich die Tonhöhe um eine Quinte.
Foto: Kümmerer

Literatur

1. M. Caspar: *Johannes Kepler*. Kohlhammer-Verlag, Stuttgart 1948.
2. C.C. Gillispie (Ed.): *Biographical Dictionary of Mathematicians*. Charles Scribner's Sons, New York 1970ff.
3. M. Folkerts: *Eine bisher unbekannte Schrift von Jost Bürgi zur Trigonometrie*. In: R. Gebhardt (Hrsg.) *Arithmetik, Geometrie und Algebra der frühen Neuzeit*. Adam-Ries-Bund, Annaberg-Buchholz 2015, S. 107–114.
4. E. A. González-Velasco: *Journey through Mathematics, Creative Episodes in Its History*. Springer, New York 2011.
5. V. Katz: *A History of Mathematics*. HarperCollins, New York 1993.
6. *Franz Hammer (Hrsg.): Johannes Kepler Gesammelte Werke*. C.H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München.
7. B. Kümmerer: *Himmliche Kreise*. In diesem Band.
8. P. S. Laplace: *Exposition du syst'eme du monde*. Cercle-Social, 1796, Buch 5, Kapitel 4.
9. D. Launert: *Bürgis Kunstweg im Fundamentum Astronomiae – Entschlüsselung seines Rätsels*. Bayerische Akademie der Wissenschaften, Nova Kepleriana Neue Folge 141, München 2015.
10. J. Reichert: *Die Rudolphinischen Tafeln*, in diesem Band.
11. B. Rice, E. E. González-Velasco, A. Corrigan: *The Live and Works of John Napier*. Springer 2017.
12. C. Shannon: *A Mathematical Theory of Communication*. Bell System Technical Journal 27 (3) (1948), 379 - 423.
13. T. Sonar: *3000 Jahre Analysis*. Springer, Berlin 2011.
14. E. Voellmy: *Jost Bürgi und die Logarithmen*. Beiheft Nr. 5 zur Zeitschrift 'Elemente der Mathematik', Verlag Birkhäuser, Basel 1948.



PROF. DR. BURKHARD KÜMMERER hatte bis 2019 an der TU Darmstadt eine Professur für Mathematik mit Schwerpunkten in der Quantenstochastik und in der Lehramtsausbildung inne und genießt das Privileg, weiterhin aktiv sein zu können. Er erhielt 1993 den Landeslehrpreis des Landes Baden-Württemberg und kuratierte seit 2015 mehrere Ausstellungen, unter anderem zu Johannes Kepler in Lindau.

In Vino Veritas

Mit einem Fass Wein zu dem Mathematiker und Menschen Johannes Kepler

BURKHARD KÜMMERER

Kepler ist neuvermählt und voller Tatendrang, als ihn der Kauf von Weinfässern zu seiner berühmten ‚Fassrechnung‘ anregt. Sie ist Keplers bedeutendster Beitrag zur Mathematik: Sein Umgang mit dem unendlich Kleinen weist der Mathematik neue Wege und führt sie schließlich zur Differential- und Integralrechnung. Kepler lässt uns aber auch, wie nur ganz wenige, an seinen Gedanken teilhaben und so können wir im Folgenden nicht nur seine mathematischen Ideen verfolgen, sondern auch der Person Keplers näherkommen.

Jede neue Mathematik hat einen Anlass. Dies ist wohl einer der nettesten der Mathematikgeschichte und machte Kepler zum Vordenker des Infinitesimalkalküls: Kepler heiratete nach dem Tod seiner ersten Frau am 30. Oktober 1613 seine zweite Frau, Susanne Reuttinger, nachdem er sie aus elf Kandidatinnen ausgewählt hatte, und gründete in Linz einen Hausstand. Am besten lassen wir ihn nun selbst berichten [7]:

„Als ich im November des letzten Jahres (1613) meine Wiedervermählung feierte, zu einer Zeit, da an den Donauufer bei Linz die aus Niederösterreich herbeigeführten Weinfässer nach einer reichlichen Lese aufgestapelt und zu einem annehmbaren Preise zu kaufen waren, da war es die Pflicht des neuen Gatten und sorglichen Familienvaters, für sein Haus den nötigen Trunk zu besorgen. Als einige Fässer eingekellert waren, kam am 4. Tag der Verkäufer mit der Messrute, mit der er alle Fässer, ohne Rücksicht auf ihre Form, ohne jede weitere Überlegung oder Rechnung ihrem Inhalt nach bestimmte. Die Visierrute wurde mit ihrer metallenen Spitze durch das Spundloch quer bis zu den Rändern der beiden Böden eingeführt, und als die beiden Längen gleich gefunden worden waren, ergab die Marke am Spundloch die Zahl der Eimer im Fasse. Ich wunderte mich, dass die Querlinie durch die Fasshälfte ein Maß für den Inhalt abgeben könne, und bezweifelte die Richtigkeit der Methode, denn ein sehr niedriges Fass mit etwas breiteren Böden und daher sehr viel kleinerem Inhalt könnte dieselbe Visierlänge besitzen. Es schien mir als Neuvermähltem nicht unzumutbar, ein neues Prinzip mathematischer Arbeiten, nämlich die Genauigkeit dieser bequemen und allgemein wich-

tigen Bestimmung nach geometrischen Grundsätzen zu erforschen und die etwa vorhandenen Gesetze ans Licht zu bringen.“

Neues Lebensglück nach einer sehr schweren Zeit scheint aus diesen Zeilen zu sprechen. Kepler wollte ‚als sorglicher Familienvater‘ nun doch mal nachrechnen, ob es mit dem Preis so seine Richtigkeit habe. Schließlich waren ja sehr verschiedene Fassformen im Umlauf und die ‚Visierkunst‘, die Bestimmung des Fassinhalts mittels einer Visierrute, galt damals als große Herausforderung [2]. Kepler konnte also durchaus hoffen, einen wertvollen Beitrag zu dieser Kunst zu leisten.

Das Ergebnis: Ein Manuskript und zwei Bücher zur Fassrechnung

Also machte sich Kepler an die Arbeit und nach wenigen Tagen hatte er ein sechsseitiges Manuskript verfasst. Gedacht als Neujahrsgabe versah Kepler das kleine Werk (leider ist es verloren) mit einer Widmung an Fürst Maximilian von Liechtenstein und Freiherr Helmhard Jörger, datiert auf den 17. 12. 1613 (für hier und das Folgende vergleiche insbesondere [5], Band IX, zu den Adressaten der Widmung auch [10] und [13]). Nun schickte er das kleine ‚Visierbüchlein‘ zum Druck nach Augsburg – und erhielt eine Absage (datiert vom 11. Februar 1614):

„Eure Fassrechnung habe ich dieser Tage richtig erhalten und wegen der Herausgabe sofort mit unserem Buchhändler Krüger verhandelt. Auf keine Weise gelang es mir jedoch, ihn dazu zu bringen, den Verlag auf seine Kosten zu übernehmen. Obschon er zugeben musste,



daß der Name Kepler bei allen wissenschaftlich Gebildeten in Gunst und hohem Ansehen stehe, so behauptete er doch, der Gegenstand des Buches finde keinen Anklang und schein ihm nicht verkäuflich, zumal in lateinischer Sprache.“

Für die Geschichte der Mathematik, und am Ende wohl auch für Kepler, war dies ein großes Glück. Durch den Tod des Verlegers Krüger verzögerte sich der Druck um weitere 16 Monate, bis Kepler, inzwischen recht unzufrieden mit dem ersten Text, im Sommer 1615 ein bis auf die Widmung vollständig neues und weit umfangreicheres Buch in seiner neuen Heimatstadt Linz auf eigene Kosten drucken ließ: Die ‚Nova Stereometria Doliorum‘ [6] („Neue Stereometrie der Fässer“; das Wort ‚Stereometrie‘ steht für dreidimensionale Geometrie). Die Stände von Oberösterreich waren wohl von diesem Ausflug in die Mathematik nicht sonderlich angetan, denn dafür wurde er nicht

bezahlt. Kepler schreibt dazu ([5], Band XVII, S. 173): „... das die Löbl: Stände vil lieber sehen, das Ich dergleichen arbeits einstellen, und die wüchtigere sachen, darauß Ich fürnemlich bestellet seye, als die Tabulas Rudolphinas und die Landmappam zu völligem werckh richten solte.“

Ein Bestseller würde wohl auch dieses in Latein abgefasste und sehr mathematische Werk nicht werden. So ließ sich Kepler durch die Mahnungen nicht beirren und schob nach fünf Monaten weiterer Arbeit eine deutsche Fassung nach: ‚Auszug aus der uralten Messekunst Archimedis ... Erklärung unnd bestättigung der Oesterreichischen Weinvisier-Ruthen ...‘. Mit Datum vom 1. Januar 1616 widmet er das Buch nun den Ständen und erhält von ihnen dafür 150 Gulden. Hier verzichtet er auf allzu ausführliche mathematische Erläuterungen, schreibt etwas praxisnäher und fügt einen Anhang über österreichische und andere Maße und Gewichte an. Es schlägt einen Bogen zu seinem Aufenthalt in Ulm 1626/27: Während er dort den Druck der ‚Rudolphinischen Tafeln‘ beaufsichtigte, erhielt er vom Ulmer Rat den Auftrag, ein neues Eichsystem für Ulm zu erstellen. Das Ergebnis war der berühmte ‚Ulmer Kessel‘, der im Ulmer Museum zu besichtigen ist (vgl. [1], auch [5], Band IX).

In einem zweiseitigen Anhang ‚Erklärung der gebrauchten Geometrischen Wörter und Terminorum‘ kommt ein weiteres Anliegen Keplers zum Vorschein: Mathematik ist eine Sprache und braucht Vokabeln. Zu Keplers Zeiten (und noch lange danach) war Latein die Sprache der Mathematik und hier standen die einschlägigen Vokabeln zur Verfügung. Kepler hat sich wiederholt bemüht, auch eine deutsche Wissenschaftssprache zu etablieren und stellt hier die lateinischen Fachtermini der Geometrie den in seinem Buch benutzten deutschen Übersetzungen gegenüber. Etliche sind von ihm selbst ausgedacht, viele heute nicht in allgemeiner Benutzung (z.B. ‚Anstreicher‘ für Tangens, ‚Schnitz‘ für Segment, ‚Ablenger Circkel‘ für Ellipse, etc.), aber einige „gehören heute zum festen Bestand der mathematischen Sprache“ (das deutsche Wort ‚Brennpunkt‘ geht auf Kepler zurück) und so „bleibt die ‚Messekunst‘ ein bedeutsames Glied in der Geschichte der deutschen mathematischen Fachsprache“ ([5], Band IX, S. 460).

Abb. 1 Bestimmung des Fassinhalts mit einer kubischen Visierrute (die Messpunkte werden nach oben hin enger), wie sie auch für Keplers Fässer benutzt wurde. Aus: Heinrich Schreiber: ‚Ein new künstlich ... Rechenbüchlein‘. Erfurdt 1523. Bayerische Staatsbibliothek München, MDZ

Kepler auf den Schultern von Archimedes

Doch zurück zur ‚Stereometria Doliorum‘. Kepler will das Volumen von Fässern bestimmen und herausfinden, wie man es mit Visierruten messen kann. Nun ist ein Fass nicht einfach ein Zylinder, dessen Volumen sich leicht bestimmen ließe – Bodenfläche mal Höhe –, sondern es hat einen Bauch und das macht die Sache schwierig.

Kepler sucht nun Rat bei Archimedes (287–212 v. Chr.), unbestritten einem der größten Mathematiker aller Zeiten. Er hat die Inhalte etlicher krummlinig berandeter Flächen und Volumina bestimmen können, darunter auch etlicher sogenannter Rotationskörper. Die waren für Kepler besonders spannend, denn ein Fass ist ein solcher.

Dreht man diese Figur um die vertikale Achse, so entsteht die Oberfläche eines stehenden Fasses! Im Allgemeinen ist ein Rotationskörper ein Körper, dessen Oberfläche durch Rotation einer ebenen Kurve um eine Achse entsteht, die beide, Kurve und Achse, wie hier in derselben Ebene liegen.

Kepler stellt nun in seiner ‚Stereometria Doliorum‘ zunächst, mit Berufung auf Archimedes, etliche Sätze der antiken Mathematik vor, die er später brauchen wird. Meist gibt er keinen Beweis, aber ein Argument werden wir gleich genauer kennenlernen. Im Anschluss wendet er sich Rotationskörpern zu, und wenn schon, dann gründlich: 92 Rotationskörper, sorgfältig in Klassen eingeteilt, studiert Kepler unter der Überschrift ‚Ergänzungen zu Archimedes‘. Nach diesen ‚Vorarbeiten‘ konzentriert er sich im zweiten Teil auf die ‚Stereometrie des österreichischen Fasses im besonderen‘; im dritten Teil kommt er auf seine Ausgangsfrage zurück und behandelt die Messung mit Visierruten.

Kepler bringt das unendlich Kleine in die Mathematik

Mit seiner Fassrechnung öffnet Kepler der Mathematik das Tor zum unendlich Kleinen und wird damit zu einem Wegbereiter des Infinitesimalkalküls, der Differential- und Integralrechnung. Wir wollen in diesem Abschnitt seine neue Denkweise am einfachen Beispiel der Kreisfläche ein wenig genauer verfolgen. Archime-

des hat in seiner berühmten ‚Kreismessung‘ folgendes Folgendes bewiesen:

Die Fläche eines Kreises ist gleich der Fläche des rechtwinkligen Dreiecks, dessen eine Kathete durch den Radius (in Abbildungen 3 und 4 die vertikale Strecke), die andere durch den Kreisumfang (in Abbildung 3 die horizontale Strecke bc) gebildet wird (vergleiche Abbildung 2 mit dem Radius R und dem Kreisumfang U).

Der Beweis von Archimedes ist nicht leicht zugänglich, denn er zeigt die Behauptung mit einem doppelten Widerspruchsbeweis (vgl. [12]). Kepler kommentiert diesen Beweis mit den Worten ([5], Band IX, S. 438): „Die strengen und bis ins Kleinste durchgearbeiteten Beweise möge man in den Büchern von Archimedes selbst nachlesen, wenn man nicht vor der dornenvollen Lektüre zurückschreckt.“

Immerhin hat Archimedes auf diesem Weg seine berühmte Abschätzung für das Verhältnis von Kreisumfang zu Kreisdurchmesser – wir nennen es heute π – erhalten: Es ist größer als $3 + \frac{10}{71}$ und kleiner als $3 + \frac{10}{70} = \frac{22}{7}$.

Kepler will nun aber ein unmittelbar einleuchtendes Argument finden. Dies tut er mithilfe der berühmten Figur Abbildung 3 und schreibt dazu (zitiert nach [7]): „Der Umfang des Kreises BG hat so viele Teile als Punkte, nämlich unendlich viele; jedes Teilchen kann angesehen werden als Basis eines gleichschenkligen Dreiecks mit den Schenkeln AB, sodass in der Kreisfläche unendlich viele Dreiecke liegen, die sämtlich mit ihren Scheiteln im Mittelpunkt A zusammenstoßen. Es werde nun der Kreisumfang zu einer Geraden BC ausgestreckt. So werden also die Grundlinien jener unendlich vielen Dreiecke oder Sektoren sämtlich auf der einen Geraden BC abgebildet und nebeneinander angeordnet.“

Die Idee ist also folgende: Man zerlegt den Kreis in viele kleine Kreisabschnitte (in der Skizze unten sind ‚viele‘ 12, in Keplers Skizze wahrscheinlich 24, Archimedes benutzte 96 für seine Abschätzung von π). Nun rollt man den Kreis (nach rechts) ab, so dass die Kreisabschnitte auf den Kreisbögen stehen bleiben. In einem ersten Schritt kann man die Spitzen nach oben



Abb 2: Durch Drehen entsteht ein Fass

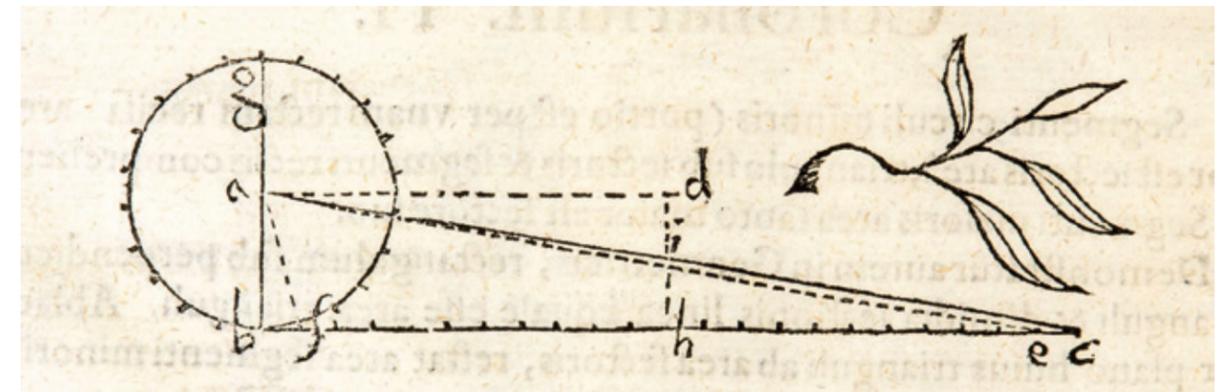
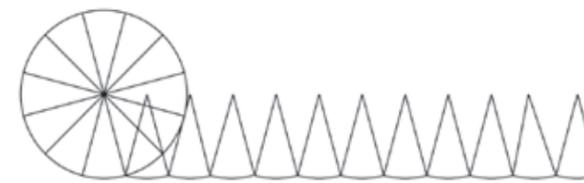
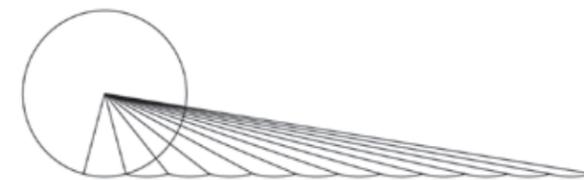


Abb 3: Bestimmung der Kreisfläche in Keplers ‚Nova Stereometria Doliorum‘. Anders als in Keplers Zitat werden hier die Teile der Figur mit kleinen Buchstaben bezeichnet. ERB Lindau

ragen lassen wie in der Skizze. Natürlich ist die Fläche des Kreises gleich der Fläche aller dieser Kreisabschnitte (diesen Schritt überspringt Kepler).



Man kann aber auch die Spitzen wieder horizontal in den Kreismittelpunkt verschieben (man führt also eine Scherung durch), das ändert die Flächen nicht und führt auf die nächste Figur:



Spätestens jetzt sieht man: Zerlegt man den Kreis tatsächlich in unendlich viele unendlich kleine solcher Kreisabschnitte (‚Infinitesimale‘), so werden sie zu Dreiecken und man erhält die Abbildung 4, in welcher die Kreisfläche in ein flächengleiches Dreieck mit dem Kreisumfang U als Basis und dem Kreisradius R als Höhe übergeht:

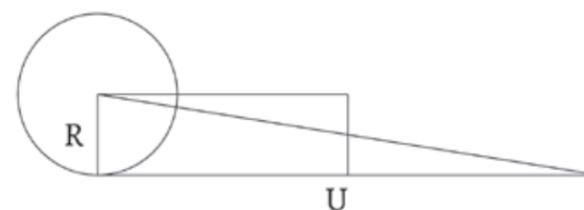
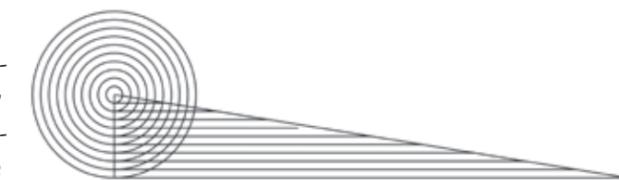


Abb 4: Kreisfläche mit flächengleichem Dreieck und Rechteck.

Also ist die Kreisfläche gleich $\frac{\text{Umfang} \times \text{Radius}}{2} = \frac{1}{2} U \cdot R$, und somit gleich der Fläche des auch bei Kepler (Abbildung 3) eingezeichneten Rechtecks. Weil aber in heutiger Darstellung (das Symbol π gab es damals noch nicht) $U = 2\pi R$ ist, ergibt sich daraus für die Kreisfläche das vertraute πR^2 .

Die Zerlegung einer Fläche in unendlich kleine Dreiecke ist für Kepler nicht neu: Er hat dieses Werkzeug schon für die ‚Astronomia Nova‘ entwickelt zur Herleitung des zweiten Keplerschen Gesetzes, des ‚Flächensatzes‘ (vgl. [11] oder [14], S. 181ff). Dort ist es ein Ellipsensektor, den er in unendlich kleine Dreiecke zerlegt und so dessen Fläche bestimmt.

Kepler entwickelt im nächsten Abschnitt seines Buches noch einen weiteren anschaulichen Zugang zur Inhaltsbestimmung. Auch er wurde wegweisend und kann ebenfalls am Beispiel des Kreises demonstriert werden. Wieder springt dessen Fläche geradezu ins Auge:

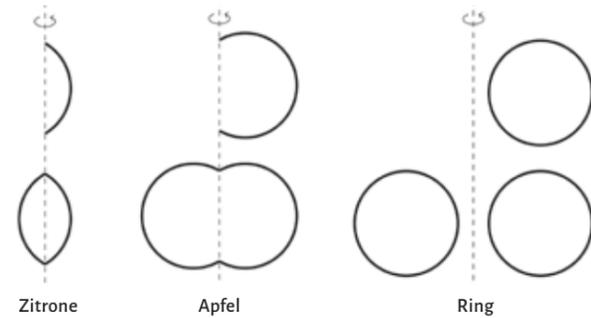


Die Kreisfläche besteht aus allen kleineren Kreislinien mit demselben Mittelpunkt. Nun wird jede Kreislinie, ausgehend von ihrem tiefsten Punkt, zu einer Geraden nach rechts horizontal ‚ausgestreckt‘ oder ausgerollt, sodass sie ihre Länge beibehält. Die ‚ausgestreckten‘ Geraden füllen das eingezeichnete Dreieck (die Länge einer Kreislinie ist proportional zum Radius) vollständig aus. Wieder hat das Dreieck eine Basis von der Länge

des Kreisumfangs und den Radius als Höhe, wie oben. In dieser Überlegung wird eine Fläche in Linien, also in Gebilde niedrigerer Dimension, zerlegt. Daher spricht man hier von der Methode der ‚Indivisiblen‘, der ‚Untheilbaren‘ (vgl. z.B. [4], [15]).

Rotationskörper: Ein Teller voller Obst

Kepler wendet sich nun mit denselben Methoden Rotationskörpern zu, es soll ja schließlich um Fässer gehen. Da Fässer aber einen Bauch haben, muss er nun Annahmen über deren Bauch machen: Er konzentriert sich auf Rotationskörper, die durch Drehung eines Stückchens eines Kegelschnitts entstehen, also von Kreis, Ellipse, Parabel oder Hyperbel. Diese waren seit der Antike bestens studiert, allen voran von Apollonius von Perga, und Kepler kannte sich durch seine optischen Schriften und die ‚Astronomia Nova‘ gut mit ihnen aus. So entstehen durch Drehung von Kreisen oder Kreisbögen zum Beispiel folgende Rotationskörper:



Statt Teilen eines Kreises lässt Kepler nun auf dieselbe Weise Ellipsen-, Parabel-, und Hyperbelstückchen rotieren und erhält auf diese Weise 92 Rotationskörper, denen er nicht ohne Humor Namen wie Apfel, Zitrone, Quitte, Olive, etc. gibt: So erhält er an einer Stelle durch Drehung einer Ellipse eine Birne, „... die natürlich zu den Äpfeln, Quitten und Pflaumen gehört, damit der Nachtisch vollständig wird.“ ([7], S. 13/14).

Kepler hält diese Bezeichnungen konsequent durch. Im Text wimmelt es daher nur so von abgestumpften Oliven, elliptischen und dicken Pflaumen oder Nüssen – und das hat Methode: In der ‚Dissertatio cum Nuncio Sidereo‘ hatte Kepler einige Jahre früher geschrieben (vgl. [5], Band IX, S. 459):

„Es gibt Leute, die ihre Wissenschaft mit gestrenger Miene vortragen, um dadurch ihren Behauptungen Gewicht zu verleihen; dabei machen sie sich aber oft genug nur lächerlich, ohne es zu wollen. Mir scheint, dass ich von Natur dafür geschaffen bin, die schwere Mühe wissenschaftlicher Arbeit durch aufgelockerte Darstellung zu mildern.“

Zur Volumenbestimmung geht Kepler nun analog vor wie oben im Fall des Kreises, aber nun alles eine Dimension höher: Statt einen Kreis in Linien zerlegt er jetzt ein Volumen auf sehr geschickte Weise in Flächen und berechnet mit solchen Ansätzen die Volumina von Drehkörpern. So zerlegt er einen ‚Apfel‘ in Flächen, man kann sich darunter auch Blätter (dieser Name hat sich in der modernen Mathematik für solche Zerlegungen eingebürgert) oder Bänder vorstellen, welche die Drehachse in kreisförmigen Streifen umgeben, glättet sie und erhält einen Teil eines Zylinders, dessen Volumen er bestimmen kann. Die Texte Keplers sind mit unseren Augen nicht sehr leicht zu lesen, da er die Ansätze zur Formelsprache, die sich gerade entwickelt, auf Abstand hält, und lieber im Stil der antiken Mathematiker argumentiert. Mit entsprechenden Hilfestellungen aber wie zum Beispiel in [8] oder [14] (S. 19off) ist es ein Vergnügen, den Gedanken Keplers zu folgen, vielleicht kann dieser Text ein wenig Lust machen. Besonders die Volumenbestimmungen seines ‚Apfels‘ und ‚Ringes‘ sind berühmt und zum Genießen.

Zum besten Fass mit funktionalem Denken

Auch noch in eine andere Richtung wird Kepler zu einem Wegbereiter der Analysis: „Bestimme das Maximum (oder Minimum) einer Funktion“ ist eine der am häufigsten gestellten Aufgaben der Analysis. Generationen von Schülerinnen und Schülern können ein Lied davon singen. Kepler ist auch hier Vordenker: Nachdem er sich mit vielen Formen von Fässern (und Nichtfässern) herumgeschlagen hat, fragt er sich: Was ist eigentlich die optimale Form eines Fasses? ‚Optimal‘ heißt für den ‚sorglichen Familienvater‘: Welches Fass enthält bei gegebener Länge der Visierrute den meisten Wein? Da mit derselben Visierrute alle möglichen Fässer gemessen wurden, ist diese Frage durchaus angemessen.

Kepler hat Glück, dass die österreichischen Fässer nicht sehr bauchig sind und daher näherungs-

weise recht gut als Zylinder angesehen werden können. Es ist nun klar, dass bei gegebener Länge der Visierrute manche Fässer weniger Wein enthalten, manche mehr, wie die folgenden Querschnittsbilder liegender Fässer illustrieren (die Fassböden befinden sich also rechts und links):



Die angedeuteten Visierruten (nur die Teile im Fass sind relevant und gezeichnet) haben alle dieselbe Länge, das linke und das rechte Fass haben aber offenbar ein kleineres Volumen als das mittlere. Das beste Fass liegt also irgendwo in der Mitte (tatsächlich ist es das in der Mitte gezeichnete). Kepler gelingt es nun, die optimale Fassgröße zu bestimmen: Hat die Visierrute die Länge L so hat das Fass horizontal die Länge $L \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}$ und der (hier senkrecht gezeichnete) Boden hat den Durchmesser $L \cdot \frac{\sqrt{3}}{3}$ (Stereometria, Teil 2, Lehrsatz V).

Heute ist die Bestimmung des optimalen Fasses eine leichtere Aufgabe für den Mathematikunterricht der Oberstufe. Daher stellt sich die Frage: Was ist das Besondere an Keplers Überlegungen?

Schon die Formulierung einer solchen Aufgabe setzt ein gewisses, wir würden heute sagen ‚funktionales Denken‘ voraus. Die Idee der Funktion war noch nicht wirklich geboren, denn die Vorstellung, dass eine Größe in Abhängigkeit von einer anderen variiert, konnte erst ihre volle Kraft entfalten, nachdem R. Descartes (1596–1650) Zahlen mit Punkten auf dem Zahlenstrahl identifiziert hat. Nun erst kann man die unabhängige Variable (bei Kepler der Durchmesser des Fassbodens) kontinuierlich auf dem Zahlenstrahl hin- und herwandern lassen und sich fragen, an welcher Stelle eine davon abhängige Größe, eine Funktion (bei Kepler das Fassvolumen bei vorgegebener Länge der Visierrute), ihr Maximum annimmt. Eine solche Überlegung setzt also schon eine Form von funktionalem Denken voraus. Das aber war damals erst vorsichtig im Entstehen begriffen, nicht zuletzt durch die die Anstöße, die Kepler und Galilei mit ihren Bewegungsgesetzen gegeben haben. Heute ist der Begriff der

Funktion, man kann fast sagen, der zentrale Begriff der Mathematik.

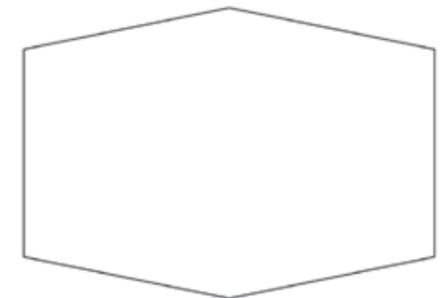
Das ‚Funktionale‘ in Keplers Denken wird noch deutlicher, wenn man ein wenig weiter liest: Die österreichischen Fässer waren ja nicht wirklich Zylinder. Daher musste Kepler darüber nachdenken, wie schlimm das eigentlich sei. Er schreibt dazu im Folgesatz 2 (nach [7]): „Das einem größten Wert auf beiden Seiten Benachbarte zeigt nämlich am Anfang nur unmerkliche Abnahme.“

Kepler hat hier offenbar das Maximum einer Funktion vor Augen, welche sich nach links und rechts fortsetzt, denn er spricht von ‚beiden Seiten‘, also von rechts und links des Maximums. In seiner Formulierung nimmt er das Prinzip vorweg, welches üblicherweise P. Fermat (1607–1665) zugeschrieben wird: Eine ‚vernünftige‘ Funktion ändert sich in der Umgebung eines Maximums oder Minimums zunächst nur sehr wenig:



Wir sagen heute: An der Stelle eines Maximums verschwindet die Änderungsrate (‚Ableitung‘ einer in einer Umgebung differenzierbaren Funktion), in der Nähe des Maximums bleibt die Änderungsrate klein. Kepler hat also schon die aus heutiger Sicht richtige Vorstellung, aber er hat noch nicht die mathematische Sprache zur Verfügung, diese auch in präzise Worte zu fassen oder gar zu beweisen.

Im Anschluss an die Diskussion des Zylinderfasses wendet sich Kepler nun komplizierteren Fassformen zu, insbesondere Fässern, die aus zwei Kegelschümpfen zusammengesetzt sind, also Querschnitte der folgenden Form haben:



Wir werden hier nicht mehr weiter seinen mathematischen Gedankengängen folgen, sondern werfen wieder einen kurzen Blick auf die Person Keplers. Es wurde schon berichtet, dass er sein Publikum, wie nur wenige, an seinen Wegen und Irrwegen teilhaben ließ in der Hoffnung, andere vor Trugschlüssen zu bewahren. Auch die ‚Astronomia Nova‘ (vgl. [11]) ist fast ein wissenschaftliches Tagebuch und konzentriert sich beileibe nicht nur auf die Präsentation der finalen Ergebnisse, sondern berichtet auch über Irrwege. Ehe sich Kepler allgemeineren Fässern zuwendet, schiebt er eine ‚Ermahnung‘ ein, in welcher er bekennt, dass er lange Zeit überzeugt war, seine Regel für optimale Fässer wäre auch für Fässer aus zwei Kegelstümpfen anwendbar. Er schreibt ([7]): „Auch ich habe dies während anderthalb Jahren geglaubt ... So habe ich es der Lässigkeit des jetzigen Druckers zu verdanken, dass die Geometrie hier den Herausgeber am Ohr zupfte und mir gewissermaßen zur Vermehrung des Anhangs zu Archimedes die folgenden Lehrsätze darbot.“

Keplers Fassregel

Nun folgt eine tiefgründige Analyse von Fässern aus Kegelstümpfen und von anderen Fässern. Im Laufe dieser Überlegungen entwickelt Kepler auch eine Näherung für die Fläche unter dem Bauch eines Fasses, welche im deutschen Sprachraum als ‚Keplersche Fassregel‘ bekannt ist. Im englischen Sprachraum wird sie dagegen meist als ‚Simpson's Rule‘ nach Thomas Simpson (1710–1761) bezeichnet. Der Vollständigkeit halber sei sie hier formuliert: Ist f eine stetige positive Funktion auf einem Intervall $[a, b]$ mit Mittelpunkt m , so ist die Fläche unter dieser Funktion näherungsweise gegeben durch $\frac{b-a}{6} (f(a) + 4f(m) + f(b))$.

Bei Kepler kann man sich unter der Funktion f den Bauch des Fasses vorstellen. Es kam Kepler entgegen, dass diese Näherung für Parabeln sogar exakt ist (denn die Fassformel ersetzt die Funktion durch eine geeignete Parabel), welche den Bauch eines Fasses recht gut annähern können. Auch wenn die Keplersche Fassformel berühmt ist: Sie ist weder die zentrale Erkenntnis noch das zentrale Anliegen von Keplers Fassrechnung. Ihre Bedeutung für die Entwicklung der Mathematik reicht entschieden weiter.

Rückblick und Ausblicke

Wenigstens drei wichtige Impulse hat Kepler der bald entstehenden Analysis gegeben: Unendlich kleine Größen, ‚Indivisible‘ sowie funktionales Denken und Kriterien für Maxima.

Unendlich kleine Größen. Auf der Suche nach einem anschaulichen Argument hat Kepler die Kreisfläche aus unendlich vielen unendlich kleinen Kreis-sektoren, ‚Infinitesimalen‘, zusammengesetzt. Dann aber wird ein Kreissektor zum Dreieck und damit lässt sich leichter umgehen. Das Denken in unendlich kleinen Größen (Ansätze finden sich zum Beispiel auch schon bei Nikolaus von Kues, 1401–1464), wird nun für 200 Jahre die Analysis beherrschen. Da es aber trotz großer Bemühungen in dieser Zeit nicht gelungen war, ihnen ein sicheres mathematisches Fundament zu geben, wurden sie Anfang des 19. Jahrhunderts mit der Einführung des Limesbegriffs überflüssig gemacht. Erst in den 60-er Jahren des 20. Jahrhunderts gelang es der ‚Nichtstandard-Analysis‘, den infinitesimalen Größen eine solide Grundlage zu geben. Man hoffte auch, mit ihnen die Analysis wieder anschaulicher werden zu lassen, ganz im Sinne von Kepler, aber inzwischen war die Mathematik auf ganz anderen Wegen unterwegs und unendlich kleine Größen fanden nicht zurück ins Zentrum der Mathematik.

Indivisible. Wie oben die Kreisfläche mit Kreislinien hat Kepler seine ‚Obst-Körper‘ mit Flächen ausgefüllt. Mit einer sehr guten Intuition kann man auf diese Weise Inhalte von Flächen und Körpern plausibel bestimmen. Dennoch ist diese Methode wegen des Wechsels der Dimension heikel. Wie heikel, kann man spüren: Wie kommt eine Strecke (der Dimension 1) zu ihrer Länge, wenn sie doch aus Punkten (der Dimension 0) besteht, die ja alle keine Länge besitzen? Es kann einem schwindelig werden. Dieselbe Frage stellt sich natürlich in höheren Dimensionen entsprechend. Und genau genommen hat die Mathematik dieses Problem mit Hilfe der modernen Mengenlehre und Maßtheorie eher sehr elegant umgangen als wirklich gelöst. Auch wenn Keplers Argumente nicht gut begründet waren, und dessen war er sich auch bewusst, ist die Methode doch sehr wirksam und so anschaulich, dass sie auf viele ähnliche Situationen übertragen werden konnte.

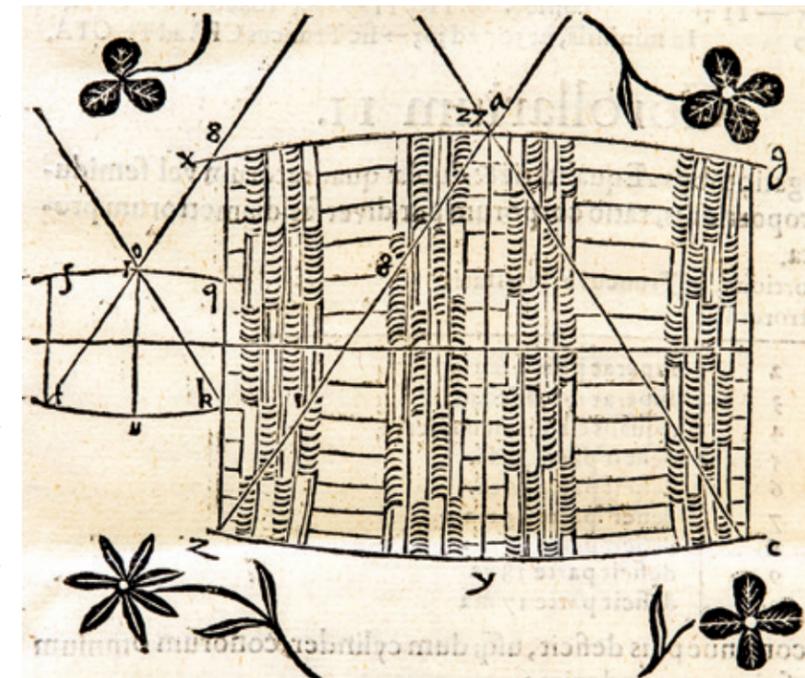
Die Idee der ‚Indivisiblen‘ wurde in der Folge vor allem von Bonaventura Cavalieri (1598–1647), einem Schüler Galileis, aufgenommen und weiterentwickelt. Das ‚Prinzip von Cavalieri‘ hat wichtige Anregungen zur Entwicklung der Integralrechnung gegeben, auch wenn es durchaus kritisierbar war und kritisiert wurde, insbesondere von Paul Guldin (1577–1643). Es war in der Tat nicht leicht, den Gültigkeitsbereich dieses Prinzips genau festzulegen, bis es schließlich aufgegangen ist im Satz von Fubini der ‚Maßtheorie‘ aus dem Jahr 1907.

Funktionales Denken und Geometrie von Extrema. Mit seiner Vorstellung von Funktionen beschreitet Kepler einen Weg, der in wenigen Jahrzehnten über R. Descartes, P. Fermat und anderen zur Analysis von I. Newton (1643–1727) und G. W. Leibniz (1646–1716) führte. Keplers Weg zur geometrischen Charakterisierung des Maximums einer Funktion wurde 15 Jahre später von P. Fermat weitergegangen und ausgebaut. Er führte zu einem Standardverfahren des Differentialkalküls, ist heute Schulstoff und wird oft nach Fermat benannt. Eine Wiederbelebung fanden die geometrischen Ideen von Kepler und Fermat auch wieder in der Mechanik, wenn Gleichgewichtslagen durch das Verschwinden der ‚virtuellen Arbeit‘ bei einer ‚virtuellen Verrückung‘ charakterisiert werden.

Das Ende der Geschichte

Die Geschichte geht gut aus: Keplers Rechnungen ergaben, dass gerade das österreichische Fass im obigen Sinn (fast) das beste Fass sei und dass darüber hinaus für diese Fässer die Messung mit der verwendeten Messrute wenigstens für volle Fässer das korrekte Ergebnis lieferte, beruhigend für den Familienvater. An der Frage, wie man den Inhalt von nur teilweise gefüllten Fässern bestimmen könnte, biss sich Kepler noch eine Weile die Zähne aus. Zum Grund seines Bemühens schreibt er ([7], S. 95): „Soweit mir bekannt, ist diese Untersuchung bisher noch ausstehend, die doch auch für Familienväter zur Entdeckung und Verhütung von Diebstählen nötig ist, wenn schon Bacchus seine Schätze aus dem Bereich der Thetis brachte und ihr den Zutritt verbot.“

Die für Familienväter so wichtige Untersuchung erscheint erst in Keplers deutschem ‚Auszug aus



der uralten Messekunst Archimedis‘. Kepler schließt seine ‚Stereometria‘ mit den Worten: „Wir wollen die erlangten Vorteile verwenden und beten, dass uns unsere geistigen und leiblichen Güter erhalten bleiben und dass der trinkbare Stoff in reichlicher Menge vorhanden sein möge“

Abb 5: Österreichisches Fass aus Keplers ‚Nova Stereometria Doliorum‘
ERB Lindau



Abb. 6: Ausschnitt aus ‚Arithmeticae logisticae popularis. Das Vierdte Buch‘ Johan Rudolff von Graffenried, Bern 1619. ETH Zürich <https://doi.org/10.3931/e-rara-3500>



PROF. DR. BURKHARD KÜMMERER hatte bis 2019 an der TU Darmstadt eine Professur für Mathematik mit Schwerpunkten in der Quantenstochastik und in der Lehramtsausbildung inne und genießt das Privileg, weiterhin aktiv sein zu können. Er erhielt 1993 den Landeslehrpreis des Landes Baden-Württemberg und kuratierte seit 2015 mehrere Ausstellungen, unter anderem zu Johannes Kepler in Lindau.

Literatur

1. Hans-Joachim Albinus, Detlef Suckrau: Reminiscenzen an Johannes Keplers Aufenthalt in Ulm 1626–1627; Neues, Merkwürdiges und ungelöste Rätsel. In: Ulm und Oberschwaben, Zeitschrift für Geschichte, Kunst und Kultur, Band 61 (2019), 175 – 211.
2. Menso Folkerts: Die Entwicklung und Bedeutung der Visierkunst als Beispiel der praktischen Mathematik der frühen Neuzeit. In: Humanismus und Technik, Bd. 18 (1974), S. 1-41.
3. C.C. Gillispie (Ed.): Biographical Dictionary of Mathematicians. Charles Scribner's Sons, New York 1970ff.
4. Victor Katz: A History of Mathematics. HarperCollins, New York 1993.
5. Franz Hammer (Hrg.): Johannes Kepler Gesammelte Werke. C.H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München.
6. Johannes Kepler: Nova Stereometria Doliorum. Linz 1615.
7. Johannes Kepler: Neue Stereometrie der Fässer. Aus dem Lateinischen übersetzt und herausgegeben von R. Klug. Ostwalds Klassiker der exakten Naturwissenschaften 165. Verlag von Wilhelm Engelmann, Leipzig 1908.
8. Eberhard Knobloch: Nova Stereometria Doliorum Vinariorum. Zur Fassrechnung Johannes Keplers. Manuskript, http://www.sur-gmbh.ch/private/burki/Studies/kepler_stereometria.pdf, letztmalig abgerufen am 20.08.2021.
9. Burkhard Kümmerer: Logarithmen vordoppeln die Lebenszeit der Astronomen, in diesem Band.
10. Erich Meyer: Auf den Spuren Johannes Keplers, zu seinem 450. Geburtstag. tredition, Hamburg 2021.
11. Erich Meyer: Astronomia Nova und Keplers Entdeckung der Gesetze der Planetenbewegung. In diesem Band.
12. Ivo Schneider: Archimedes: Ingenieur, Naturwissenschaftler, Mathematiker. Springer Spektrum, Heidelberg 2016.
13. Fritz Staudacher: Jost Bürgi, Kepler und der Kaiser. NZZ Libro, Zürich 2018.
14. Thomas Sonar: 3000 Jahre Analysis. Springer, Berlin 2011.

Die Bewegungsgleichungen der Planeten

MARTIN HOLDER

Die drei Keplerschen Gesetze sind wohlbekannt:

1. Die Planeten bewegen sich in Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.
2. Der Fahrstrahl des Planeten überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.
3. Die Quadrate der Umlaufzeiten verhalten sich wie die dritten Potenzen der mittleren Entfernungen.

Die Bahnen liegen nun aber nicht fest – es gibt keine Schienen. Kepler stellt sich die Frage: Wie kann ein Planet seine Bahn finden, wenn er nur die Richtung zur Sonne und seine eigene Bewegungsrichtung kennt? Er weiß, d. h. er vermutet, dass von der Sonne eine Kraft ausgeht, die mit zunehmender Entfernung kleiner wird, und er weiß, in welcher Richtung das Aphel, der sonnenfernste Punkt seiner Bahn, liegt. Aus der Analyse der Tychonischen Beobachtungen des Mars ergab sich die Ellipsenform der Bahnen und der Flächensatz. Um ihn anwenden zu können, muss man die Entfernung des Planeten von der Sonne kennen. Der Astronom in seinem Stübchen mit der Ellipsenbahn vor sich auf dem Papier hat da kein Problem. Der Flächensatz lässt sich leicht mit Hilfe des Winkels β (der sog. exzentrischen Anomalie) der entsprechenden Kreisbahn ausdrücken (Abb.1, links).

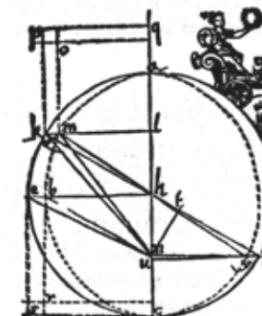
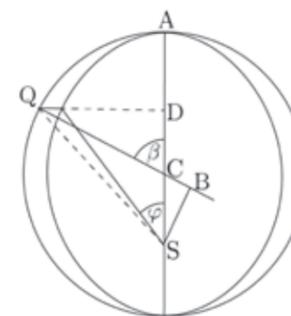


Abbildung 1: Links: Bahnellipse eines Planeten in P um die Sonne in S. Rechts: Skizze aus Keplers ‚Astronomia Nova‘.

Die Ellipse entsteht aus einem Kreis durch Verkürzung aller zur Hauptachse CA senkrechten Distanzen, jeweils um den Faktor $(1-e^2)^{1/2}$, wobei e die Exzentrizität der Ellipse ist. Sei CA=1. Die Sonne steht im Brennpunkt S, der vom Mittelpunkt C die Entfernung e hat. Die kleine Achse der Ellipse hat also die Größe $(1-e^2)^{1/2}$. Will man nun die Fläche berechnen, die der Fahrstrahl PS des Planeten auf seinem Weg vom Punkt A nach P überstreicht, so geht dies am einfachsten, indem man zuerst die Fläche ins Auge fasst, die der entsprechende Punkt Q auf dem Kreis überstreicht. Diese Fläche ist nämlich gleich der Größe des Kreissektors ACQ plus der Fläche des Dreiecks QCS, also gleich $(\beta + e \sin \beta)/2$. Die Fläche, die der Planet P auf der Ellipse überstreicht, ist jeweils um den gleichen Faktor $(1-e^2)^{1/2}$ kleiner. Nach der Umlaufzeit T mit $\beta = 2\pi$ ist auf dem Kreis die Fläche π überstrichen. In der Zeit dt ändert sich der Winkel um $d\beta$ und die Fläche um $\frac{1}{2}(d\beta + e \cos \beta d\beta)$. Für die Flächenstücke gilt also $dT/t = (1 + e \cos \beta) d\beta/2\pi$ oder $\frac{2\pi}{T} dt = (1 + e \cos \beta) d\beta$.

Der Flächensatz besagt, dass diese Gleichung unabhängig von der Zeit t immer gilt. Aus Abb. 1 folgt noch eine weitere Beziehung, indem man die rechtwinkligen Dreiecke QBS (mit dem rechten Winkel bei B) und PDS betrachtet und den Satz des Pythagoras anwendet, nämlich $PS = r = QB = 1 + e \cos \beta$.

Der Planet selbst ist aber nicht in der glücklichen Lage des Astronomen. Er bewegt sich um die Sonne durch eine Änderung des Winkels φ (der sog. ausgeglichenen Anomalie) und muss eine Vorschrift haben, wie er dementsprechend seinen Abstand r ändern soll. Diese Sichtweise des Problems markiert

den Unterschied zwischen Neuzeit und Antike. Kepler war sich der bahnbrechenden Bedeutung seiner Auffassung durchaus bewusst. Wir geben deshalb seine Argumente in vollem Wortlaut wieder [1, 2].

„Es genügt nämlich nicht, dass der Planet weiß, wie weit er von der Sonne entfernt sein sollte, er muss auch wissen, was er tun soll, um den richtigen Abstand zu bekommen. Wen also die Annahme einer vollkommenen Kreisbahn dahin gebracht hat, dass er eine Intelligenz im Planeten annimmt, die diese Abstandsänderungen regelt, der kann nicht anders sagen, als dass diese Intelligenz auf die Zu- und Abnahme des Sonnendurchmessers achtet und daraus erkennt, welchen Abstand von der Sonne er zu einer beliebigen Zeit einnimmt. Wie die Seeleute nicht aus dem Meer selbst erfahren können, welchen Weg sie zurückgelegt haben, weil auf diesem Weg keine Markierungen sind, sondern entweder aus der Zeitdauer der Seereise, wenn Wind und Wellen beständig sind und das Schiff niemals ruht, oder aus der Windrichtung und den verschiedenen Polhöhen oder aus der Verbindung all dieser Informationen oder, wenn es den Göttern gefällt, aus der Umdrehung eines Systems von Rädchen, das, mit Flossen versehen, in die Wellen herabgelassen wird. Eine solche Empfehlung geben törichte Mechaniker, welche die Ruhe des Festlands auf die Fluten des Ozeans übertragen. Ebenso kann der Planet seinen Ort oder die Strecke, die er zur Sonne hin zurücklegt, von sich aus nicht messen, weil nur der Äther um ihn ist, ohne Markierungen. Sondern er benutzt entweder die Zeit bzw. ein ihr äquivalentes Maß, was oben schon widerlegt wurde, oder eine mechanische Vorrichtung, was zum Lachen ist (denn wir stellen uns die Gestirne rund vor, nach dem Beispiel von Sonne und Mond, wie es denn auch wahrscheinlich ist, dass sich das ganze Ätherfeld zusammen mit dem Planeten bewegt) oder endlich geeignete Zeichen, die sich mit dem Abstand des Planeten von der Sonne verändern, von denen aber außer dem variablen scheinbaren Sonnendurchmesser keines übrigbleibt.

Man soll mir nicht einwenden, dieser Sonnendurchmesser und seine Änderung seien äußerst klein, so dass er nicht als Maßstab dienen kann. Es steht aber fest, dass er für keinen Planeten völlig verschwindet. Wenn er nämlich auf der Erde 30' beträgt, so sind es auf dem Mars 20', auf dem Jupiter 7', auf dem Saturn 3', auf der Venus jedoch 40', auf Merkur 80' und bis zu 120'. Aber nicht über die Kleinheit dieses Körpers, sondern über die Grobheit der dazu ungeeig-

neten menschlichen Sinne sollte man sich beklagen, die solch kleinen Größen nicht folgen können. Sieh doch, wie die Sonne, so klein oder groß sie auch sein mag, doch in der Lage ist, so weit entfernte Körper im Kreis herumzuführen, was ich an den oberen Planeten bewiesen habe. Von der Beleuchtung der Welt durch ein solches Körperchen wissen wir alle. Es ist daher wohl zu glauben, wenn jene Beweger der Planeten die Fähigkeit besitzen, den Sonnendurchmesser zu betrachten, dass diese ihre Fähigkeit unseren Augen umso mehr überlegen ist als ihre Aufgabe und die ewige Dauer der Bewegung beständiger sind als unsere turbulenten und konfusen Geschäfte.

Aber willst Du den Planeten jedem zwei Augen verpassen, Kepler? Keineswegs. Es ist auch gar nicht nötig. Denn sie brauchen auch keine Füße und Flügel, um sich bewegen zu können. Die festen Bahnen hat schon Brahe verworfen. Auch erschöpft unsere Phantasie nicht alle Schätze der Natur, so dass wissenschaftlich feststeht, wie viele Sinne es geben kann.“

Zwei Augen, möchte man ergänzen, wären nötig, um den Sonnenabstand durch den Stereoeffekt zu messen; ein Auge genügt zur Messung der Größe der Sonnenscheibe.

Bleibt also die Frage: Wie soll der Planet seinen Weg finden? Die scheinbare Größe der Sonnenscheibe ist proportional zu $1/r$. Aus Abb. 1 entnehmen wir die Beziehung zwischen den Winkeln β und φ :

$$r \cos \varphi = e + \cos \beta.$$

Ersetzt man darin $\cos \beta$ aus (2), so ergibt sich

$$\frac{1}{r} = \frac{1 - e \cos \varphi}{1 - e^2}$$

und für die Änderung von $1/r$:

$$d\left(\frac{1}{r}\right) = \frac{e}{1 - e^2} \sin \varphi d\varphi.$$

Mit dem Ergebnis ist Kepler zufrieden. Die Änderung des Sonnendurchmessers ist proportional zu der Änderung des Winkels φ mit dem Faktor $\sin \varphi$. Es ist – heutiger Sprechweise – die Differentialgleichung eines Kegelschnitts, also z. B. einer Ellipse. Wenn der Planet diese Beziehung einhält, ergibt seine Bahn automatisch



Kepler gibt der ‚Doctrina Triangulorum (Trigonometrie) einen Platz auf dem Dach seines Tempels der Astronomie, dem Frontispiz zu den Rudolphinischen Tafeln. Auf der Tafel stehen Keplers Berechnung der Bahnellipsen mithilfe der exzentrischen Anomalie. Foto: Nicolas Zuber/ Kepler-Museum Weil der Stadt

eine Ellipse, ohne dass irgendwelche Schienen vorhanden sind.

Kepler fasst die verschiedenen Betrachtungsweisen nochmal zusammen [1, 2]:

„Aus diesen Gründen bestreite ich, dass der sinus versus (das ist $1 - \cos$) der exzentrischen Anomalie dem Planeten das Maß für seine Abstandsänderung liefern kann, nicht, weil er etwa dieses Maß nicht wäre, sondern weil er, obwohl er das Maß ist, nicht vom Planeten wahrgenommen werden kann.“

Aber, wenn wir dem Planeten den zu vergrößern oder zu verkleinern den Sonnendurchmesser als Mittel oder Stütze setzen, durch die er selbst zu seinen richtigen und an sich nicht wahrnehmbaren Abständen gelangt, und der Änderung dieses Sonnendurchmessers nach dem eben geführten Beweis als Maß die vom Planeten wahrnehmbare ausgeglichene Anomalie setzen, dann liegen wir schon richtiger. Denn beide sind wahrnehmbar, was die Abstandsänderung betrifft, die wachsende oder abnehmende Größe des Sonnendurchmessers, was das Maß angeht oder den Winkel, drei Punkte, die mit Körpern ausgestattet sind. Denn einer ist die Sonne, der andere der Planet selbst, und der dritte ein Fixstern am Ort des Aphels.“

Vielleicht ist es nicht fehl am Platz, hier eine Bemerkung Einsteins aus einem Artikel über Newton zu zitieren. Er schreibt: „Das Differentialgesetz ist diejenige Form, die allein das Kausalitätsbedürfnis des modernen Physikers voll befriedigt. Die klare Konzeption des Differentialgesetzes ist eine der größten geistigen Taten Newtons.“

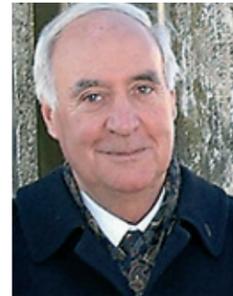
Einstein bewunderte Kepler wegen seiner Benutzung des Mars als zweiten Leuchtturm neben der Sonne zur Auffindung der Erdbahn, aber er hat vermutlich die oben genannten Überlegungen Keplers nicht gekannt, wie eigentlich alle Welt, wohl Leibniz eingeschlossen, einmal, da sie ohne die später entwickelte mathematische Formelsprache, sondern nur in Worten, dargestellt sind, und zum andern, weil sie in Keplers vergeblichen Versuchen, die von der Sonne ausgehende Kraft zu verstehen, versteckt sind. Vergeblich, weil der zuerst von Galilei gefundene Zusammenhang zwischen Kraft und Beschleunigung noch nicht entdeckt war, und daher auch die Konzeption einer Fliehkraft fehlte. Wir müssen Keplers Leistung umso

mehr bewundern, als er ohne diese Kenntnisse auf der Notwendigkeit eines Differentialgesetzes bestand – 70 Jahre vor Newton! –, und dieses auch gefunden hat. Natürlich ist es von da bis zur Anwendung auf grundsätzlich alle Bewegungen noch ein weiter Weg, aber Keplers Argumentation enthält das wesentliche Element, dass die zukünftige Entwicklung nicht festliegt, sondern sich aus den augenblicklichen Bedingungen an Ort und Stelle ergeben muss.

Dass sein Beitrag so lange wenig beachtet geblieben ist und erst jetzt mit quasi archäologischen Methoden herausgearbeitet werden muss, ist eine handfeste Blamage für die Wissenschaft. Wir Wissenschaftler sollten uns vor Kepler schämen. ♦

Literatur

- [1] Johannes Kepler, *Astronomia Nova*, Heidelberg 1609, Gesammelte Werke, Band III. C.H. Beck, München, seit 1937, Teil III, Kap. 39, p.260, Zeile 11 ff. und Teil IV, Kap. 57, p.359, Zeile 16–28 Neue Astronomie, übersetzt und eingeleitet von Max Caspar, R. Oldenbourg Verlag, München 1990, p.260 und p.243 f.
- [2] M. Holder, *Die Kepler-Ellipse*. Eine alte Geschichte neu erzählt, Universitätsverlag Siegen.



PROF. DR. MARTIN HOLDER lehrte bis 2003 Experimentalphysik an der Universität Siegen. Seit seiner Emeritierung widmet er sich der Geschichte der Astronomie.

Die Keplersche Vermutung

MARTIN HENK & JÖRG M. WILLS

1. Vom Aufbau der Materie ...

Im Jahre 1611 veröffentlicht Johannes Kepler ein Büchlein mit dem Titel ‚Vom sechseckigen Schnee‘ [6], das er seinem Freund und Mentor, dem Prager Hofrat Johann Matthäus Wacker von Wackenfels, als Neujahrsgabe widmet. Er entwickelt darin kühne Ideen zum Aufbau der Materie und untersucht unter anderem verschiedene in der Natur auftretende Formen und Muster, wie z. B. von Schneeflocken oder die Anordnung der Kerne von Granatäpfeln. Er erklärt die beobachteten Formen durch optimale Packungen ihrer bestehenden Teile und beschreibt damit die heutige wissenschaftliche Grundlage der Kristallographie.

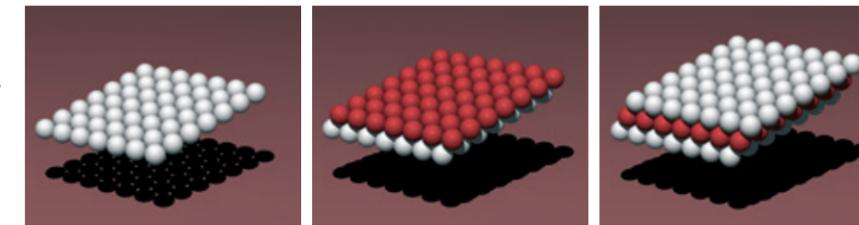
Bei den Granatäpfeln stellt er zum Beispiel fest, dass sehr viele Kerne auf sehr kleinen Raum gepackt sind. Dies führt ihn zur Betrachtung verschiedener Anordnungen sich nicht überlappender, kongruenter (gleich großer) Kugeln im 3-dimensionalen Raum. Eine solche Anordnung bezeichnet man als Kugelpackung. Kepler war nun an einer Kugelpackung interessiert, so dass die Dichte der Kugelpackung, d. h. der Anteil des von den Kugeln überdeckten Raumes, möglichst groß ist. Eine solche Kugelpackung nennen wir optimale Kugelpackung.

Eine von ihm untersuchte Kugelpackung ist heute als die flächenzentrierte kubische (fcc-) Packung bekannt. Sie ist die natürlichste Anordnung von Kugeln, die man sich vorstellen kann, und man findet sie an jedem Obststand, an dem Orangen und Äpfel gestapelt sind (siehe Abb. 1 rechts). Auch viele Kristalle wie Gold, Silber, Aluminium kristallisieren gemäß dieser Anordnung. Mathematisch lässt sie sich folgendermaßen beschreiben (siehe Abb. 2): Zunächst wird eine Grundschicht von Kugeln konstruiert, in der jede Kugel von sechs anderen Kugeln berührt wird. Dadurch entsteht eine sogenannte hexagonale Packung. Anschließend



wird eine Kopie dieser Schicht auf die Grundschicht gelegt, so dass die Kugeln in die Lücken der Grundschicht fallen. Die zweite Schicht entsteht also durch Verschiebung der Grundschicht um einen gewissen Vektor t .

Abb. 1: Kerne in einem Granatapfel [8] und Ausschnitte aus der fcc-Packung



Es werden nun weitere Kopien der Grundschicht nach unten und oben gestapelt, so dass jede Schicht durch Translation um ein Vielfaches des Vektors t aus der Grundschicht entsteht. Berechnet man die Dichte dieser fcc-Packung, so ergibt sich ein Wert von $\pi/\sqrt{18} \sim 0,74048\dots$ d. h. ca. 75 % des Raumes wird durch die Kugeln dieser Packung überdeckt.

Kepler war davon überzeugt, dass es besser/dichter nicht geht, und damit war die Keplersche Vermutung geboren.

Abb. 2: Hexagonaler Aufbau der fcc-Packung

Keplersche Vermutung, 1611:

Die Dichte einer optimalen Kugelpackung in Dimension 3 beträgt $\pi/\sqrt{18}$.

Obwohl dieses Problem sehr viel Aufmerksamkeit auf sich gezogen und es sehr viele Lösungsversuche gegeben hat, ist es erst nach fast 400 Jahren von Thomas C. Hales mit computerunterstützter Mathematik gelöst worden – und in der Tat, besser als die fcc-Packung geht es nicht. Hales hat seinen Beweis 1998 als Preprint veröffentlicht, aber aufgrund des massiven Einsatzes numerischer Berechnungen in seinem Beweis zog sich der Begutachtungsprozess über viele Jahre hin. Erst 2005 erfolgte die offizielle Veröffentlichung in den hoch angesehenen ‚Annals of Mathematics‘ [5], allerdings mit einem Vorwort, in dem die Editoren darauf hinweisen, dass sie die Richtigkeit des Beweises nicht mit allerletzter Sicherheit garantieren können. Daraufhin initiierte Hales sein ‚fyspeck-Projekt‘ [4] mit dem Ziel, einen formalen Beweis mit einem automatisierten Theorembeweiser zu geben. Dieses Projekt wurde 2014 erfolgreich abgeschlossen. Für mehr Informationen über die spannende und zum Teil kontroverse Geschichte der Lösung der Keplerschen Vermutung verweisen wir auf das Buch [7].

Warum hat ein Beweis dieser offensichtlich richtigen Vermutung so lange auf sich warten lassen? Ein Grund liegt darin, dass es unendlich viele Kugelpackungen mit der Dichte $\pi/\sqrt{18}$ gibt: So kann man z. B. endlich viele Kugeln aus einer fcc-Packung weglassen und die Dichte bleibt gleich, oder man legt die bereits beschriebenen hexagonalen Schichten versetzt auf eine untere Schicht und nicht stets entlang eines Vektors t . Diese Vielzahl optimaler mathematischer Lösungen in den Griff zu bekommen, ist schwer.

Anders verhält es sich – zumindest in Dimension 3 – wenn wir fordern, dass die Mittelpunkte der Kugeln eine reguläre Struktur, ein sogenanntes Gitter bilden müssen. Mathematisch ist ein Gitter (in Dimension 3) die Menge aller ganzzahligen Linearkombinationen von drei linear unabhängigen Vektoren, z.B. ist $\Lambda_{fcc} = \{z_1(2,0,0)^T + z_2(1,\sqrt{3},0)^T + z_3(1,1/\sqrt{3},\sqrt{8/3})^T : z_i \text{ ganzzahlig}\}$ ein Gitter, und setzen wir auf jeden der Punkte von Λ_{fcc} eine (Billard-)Kugel mit Radius 1, so erhalten wir die fcc-Kugelpackung. Kugelpackungen,

deren Kugelmittelpunkte ein Gitter bilden, heißen Gitterpackungen (von Kugeln). Für solche regulären Packungen ist die Keplersche Vermutung bereits von Carl Friedrich Gauß gelöst worden.

Gauß, 1831: Die fcc-Packung ist die beste Gitterpackung von 3-dimensionalen Kugeln. Darüber hinaus ist die fcc-Packung bis auf Skalierungen und Isometrien die eindeutige optimale Gitterpackung.

2. ... bis zu Codes und Krypto

Seit Keplers und erst recht seit Gauß' Zeiten ist die Theorie der Packungen eine eigenständige blühende mathematische Disziplin mit vielfältigen Verbindungen zu anderen wissenschaftlichen Bereichen. Insbesondere Kugelpackungen, und vor allem Gitterpackungen in hohen Dimensionen, sind eng verbunden mit klassischen zahlentheoretischen Problemen, wie auch mit Fragestellungen aus den Materialwissenschaften, der modernen Kodierungstheorie oder auch der (Post-Quanten) Kryptographie [1].

Aber gehen wir erst einmal eine Dimension zurück und betrachten Kreispackungen in der Ebene. Hier ist die offensichtlich optimale Packung die hexagonale Packung, aus der auch die Schichten der fcc-Packungen aufgebaut sind (vgl. linkes Bild in Abb. 2).

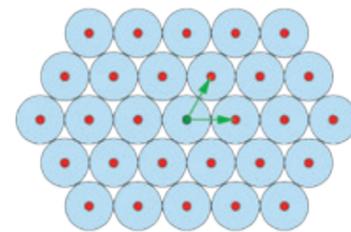


Abb. 3. Die optimale hexagonale Kreispackung in der Ebene

Ihre Dichte beträgt $\pi/\sqrt{12} \sim 0,9068$, und ihre Mittelpunkte bilden das sogenannte hexagonale Gitter $\Lambda_{hex} = \{z_1(2,0)^T + z_2(1,\sqrt{3})^T : z_i \text{ ganzzahlig}\}$. Dass dies in der Tat die dichteste Gitterpackung ist, hat J.-L. Lagrange schon im Jahre 1773 gezeigt. Der Nachweis, dass dies auch insgesamt eine optimale Kreispackung ist, wird A. Thue zugesprochen. Aber auch die Geschichte dieses Beweises ist etwas ungewöhnlich: Thue hat sein Resultat im Jahre 1892 angekündigt, einen Beweis aber erst 1910 vorgelegt, der allerdings

als lückenhaft angesehen wird. Einen vollständigen Beweis einer sogar allgemeineren Aussage haben L. Fejes Toth und C.A. Rogers 1950/51 gegeben.

Betrachtet man den Übergang von Dimension 2 zu Dimension 3, so liegt es nahe zu vermuten, dass die dichteste Gitterpackung in Dimension 4 dadurch entsteht, dass man die fcc-Packung ‚gitterförmig‘ stapelt. Dies ist jedoch nicht der Fall. Dennoch sind die optimalen Gitterpackungen in den Dimensionen 4, 5, 6, 7, 8 aufgrund von Arbeiten von A. N. Korkin und Y. I. Zolotarev (Dimensionen 4 und 5) und H. F. Blichfeldt (Dimensionen 6, 7 und 8) seit fast 100 Jahren bekannt.

Und was ist seitdem passiert? 24! In der Dimension 24 gibt es ein Gitter mit sehr bemerkenswerten Eigenschaften, das nach seinem Entdecker J. Leech als Leech Gitter bezeichnet wird. Es weist eine sehr hohe Packungsdichte auf, nämlich $\pi^{12}/12! \approx 0,0019295\dots$, und 2009 konnten H. Cohn und A. Kumar zeigen, dass das Leech-Gitter in der Tat die dichteste Gitterpackung von Kugeln beschreibt [2]. Für keine andere Dimensionen ist die optimale Gitterpackung (zurzeit) bekannt. Bemerkenswert ist auch, dass bis auf Skalierungen und Isometrien die optimalen Gitterpackungen in den Dimensionen 2,3,4,5,6,7,8, 24 stets eindeutig sind.

In Analogie zu der Keplerschen Vermutung in Dimension 3 und in Anbetracht von Thues 2-dimensionalem Resultat könnte man vermuten, dass optimale Kugelpackungen stets als Gitterpackungen zu realisieren sind. Dies erscheint jedoch im Allgemeinen zweifelhaft; zumindest gibt es in Dimension 10 eine irreguläre Packung von Kugeln, die eine höhere Dichte aufweist als alle bekannten Gitterpackungen in Dimension 10.

In den Dimension 8 und 24 ist aber kürzlich gezeigt worden, dass dort die entsprechende Keplersche Vermutung richtig ist. 2017 zeigte M. S. Viazovska [9], dass die sogenannte Gitterpackung E8, welche die dichteste Gitterpackung in der Dimension 8 darstellt, optimal ist unter allen Kugelpackungen. In einer im gleichen Jahr gemeinsamen mit H. Cohn, A. Kumar, S. D. Miller und D. Radchenko publizierten Arbeit wurde die analoge Aussage für die Leech-Gitterpackung in der Dimension 24 gezeigt [3]. Beide Beweise sind sehr elegant, basieren auf sogenannten ‚linear programming bounds‘ und kommen gänzlich ohne Computerberechnungen aus.

Somit sind seit Kepler nur die optimalen Kugelpackungen in den Dimensionen 2,3,8,24 bekannt. Natürlich drängt sich die Frage auf: warum 8 und 24, und nicht 4 und 5? Die Antwort liegt in den exzeptionellen Eigenschaften der zugrundeliegenden Gitter E8 und dem Leech-Gitter, die es, vereinfacht ausgedrückt, unmöglich machen, dichter zu werden. In anderen Dimensionen sind solche Gitter nicht bekannt.

Gerade im Hinblick auf die inner- und auch außermathematischen Anwendungen (z. B. Codes und Kryptographie) ist die Frage nach dem Verhalten der Dichte einer optimalen Kugelpackung oder Gitterpackung für (sehr) hohe Dimensionen von Interesse. Jedoch ist auch hier unser Wissen recht bescheiden, und die Diskrepanz zwischen den besten unteren und oberen Schranken ist exponentiell groß in Abhängigkeit von der Dimension.

Die Keplersche Vermutung ist beantwortet, aber sie hat viele weitere Fragen über Kugelpackungen aufgeworfen, von deren Lösung wir noch weit entfernt sind. ♦



PROF. DR. MARTIN HENK ist nach Stationen an der Technischen Universität Wien, der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, seit 2014 an der Technischen Universität Berlin tätig. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich der Konvexen und Diskreten Geometrie, sowie der Geometrie der Zahlen und der Ganzzahligen Optimierung.

PROF. DR. JÖRG M. WILLS promovierte 1965 an der TU Berlin und habilitierte sich 1969 ebenda. Seine Arbeitsgebiete sind Diskrete und Konvexe Geometrie. Die TU Wien verlieh ihm 2003 die Ehrendoktorwürde. Seit 2002 ist er emeritiert.

Literatur

- [1] H. Cohn, Packing, coding, and groundstates, in Mathematics and materials, AMS, Providence, RI, 45–102, 2017.
- [2] H. Cohn und A. Kumar, Optimality and uniqueness of the Leech lattice among lattices, Annals of Mathematics, 170(3), 1003–1050, 2009.
- [3] H. Cohn, A. Kumar, S. D. Miller, D. Radchenko, M. S. Viazovska, The sphere packing problem in dimension 24, Annals of Mathematics, 185(3), 1017–1033, 2017.
- [4] <https://github.com/flyspeck/flyspeck>
- [5] Thomas C. Hales, A proof of the Kepler conjecture, Annals of Mathematics, 162(3), 1065–1185, 2005.
- [6] J. Kepler, Vom sechseckigen Schnee, Strena seu de Nive sexangula, Translated from the Latin and with an introduction and notes by Dorothea Goetz, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G., Leipzig, 1987.
- [7] George G. Szpiro, Die Keplersche Vermutung: Wie Mathematiker ein 400 Jahre altes Rätsel lösten, Springer, 2011.
- [8] Photo by Arjun Kapoor on Unsplash.
- [9] Viazovska, M.S., The sphere packing problem in dimension 8, Annals of Mathematics, 185(3), 991–1015, 2017. Technische Universität Berlin, Institut für Mathematik, Sekr. MA4-1, Strasse des 17. Juni 136, Berlin

Keplers Überlegungen zur Schwerkraft

MARTIN HOLDER

Bei der Suche nach einer Kraft, die von der Sonne ausgeht und auf die Planeten wirkt, zeigt Kepler, dass die von Aristoteles übernommene Theorie der Schwerkraft, dass nämlich alle Körper zum Mittelpunkt der Welt streben, aus physikalischen Gründen nicht haltbar ist, und schlägt stattdessen eine andere Theorie vor. Sie ist heute unter dem Namen Newtonsche Theorie der Schwerkraft bekannt, weil erst Newton nachgewiesen hat, dass sie den Umlauf der Planeten um die Sonne richtig wiedergibt.

Das Problem mit der Lehre des Aristoteles ist auch Anderen aufgefallen, z.B. Galilei. Kepler aber ist der Einzige, der die richtige Lösung dazu vorgeschlagen hat, nämlich eine allen Körpern zukommende gegenseitige Anziehungskraft. Er fühlte sich bestätigt durch die damit erklärbare Erscheinung von Ebbe und Flut. Wir geben seine Überlegungen wegen ihrer historischen Bedeutung im Wesentlichen ungekürzt wieder. Kepler hatte auch die bis heute gültige Vermutung, dass die Schwerkraft zweier Körper sich mit ihrem Abstand r wie $1/r^2$ ändert. Dies kann nicht bis zu beliebig kleinen Abständen ($r \rightarrow 0$) richtig sein. Eine Lösung dieses Problems (die Quantentheorie der Schwerkraft) ist bis heute nicht gefunden.

Keplers Vermutung hat nun keineswegs gleich einhellige Zustimmung gefunden. Galilei äußert sich dazu in seinem ‚Dialog über die Weltsysteme‘ am Ende des vierten Tages [1]: „Von allen bedeutenden Männern aber, die dieser Naturerscheinung (d.h. Ebbe und Flut) ihr Nachdenken gewidmet haben, wundere ich mich zumeist über Kepler, mehr als über jeden Anderen. Wie konnte er bei seiner freien Gesinnung und seinem durchdringenden Scharfblick, wo er die Lehre von der Erdbewegung in Händen hatte, Dinge anhören und billigen, wie die Herrschaft des Mondes über das Wasser, die verborgenen Qualitäten und was der Kindereien mehr sind?“

Kepler schreibt in der ‚Astronomia Nova‘ [2, 3]: „Viele hindert die Bewegung der schweren Körper, daran zu glauben, dass die Erde sich, vermöge einer

Art Willenskraft oder vielmehr magnetischen Kraft, bewegt. Sie mögen folgende Argumente erwägen:

Ein mathematischer Punkt, sei er das Zentrum der Welt oder nicht, kann keine schweren Körper bewegen, weder effektiv noch objektiv, so, dass sie auf ihn zu fallen. Sollen die Physiker beweisen, dass einem Punkt, der weder ein Körper ist noch in anderer Weise als durch reine Überlegung existiert, eine solche Kraft zukomme. Es ist nicht möglich, dass die Gestalt eines Steins, wenn sie seinen Körper bewegt, einen mathematischen Punkt oder das Zentrum der Welt anstrebt, ohne Rücksicht auf den Körper, in dem dieser Punkt liegt. Sollen die Physiker beweisen, die natürlichen Dinge haben eine Affinität zu etwas, was nichts ist.

Auch streben die schweren Körper zum Zentrum der Welt nicht aus dem Grund, dass sie von den Grenzen der runden Welt abgestoßen werden. Denn das Stück, das sie vom Zentrum der Welt entfernt sind, ist unmerklich und macht nichts aus im Vergleich zur Entfernung von den Grenzen der Welt. Und welchen Grund hätte diese Abstoßung? Mit welcher Kraft, mit welcher Weisheit müssten die schweren Körper ausgestattet sein, um so präzise vor einem allseits umgebenden Feind fliehen zu können? Und welche Geschicklichkeit müssten die Grenzen der Welt besitzen, um einen Feind so peinlich genau verfolgen zu können?

All diese Gegenargumente sind absurd. Die gewöhnliche Lehre von der Schwerkraft erweist sich also als falsch. Die wahre Lehre von der Schwerkraft stützt sich auf folgende Axiome:

Jede körperliche Substanz ist, insofern sie körperlich ist, so beschaffen, dass sie an jedem Ort, an den sie gestellt wird, außerhalb der Reichweite der Kraft eines verwandten Körpers, in Ruhe verharret.

Die Schwere ist ein wechselseitiges Bestreben verwandter Körper zur Vereinigung oder zum Zusammenschluss (zu diesen Dingen gehört auch die Magnetkraft); um vieles mehr zieht die Erde einen Stein an als der Stein die Erde.



Kepler brachte als Verursacher von Ebbe und Flut als erster den Mond ins Spiel. Foto: Nhelia, Pixabay

Die schweren Körper (insbesondere, wenn wir die Erde im Zentrum der Welt ansiedeln) werden nicht zum Zentrum der Welt gezogen, als Zentrum der Welt, sondern als Mittelpunkt eines verwandten Körpers, nämlich der Erde. Deshalb, wohin wir auch die Erde stellen, bzw. wohin sie durch ihre Willenskraft transportiert wird, werden die schweren Körper immer zu ihr hingezogen. Wäre die Erde nicht rund, so würden die schweren Körper nicht überall gerade auf ihren Mittelpunkt hin gezogen, sondern auf verschiedene Punkte an verschiedenen Stellen.

Wenn zwei Steine an irgendeinem Ort der Welt nahe beieinander aufgestellt würden, außerhalb der Reichweite der Kraft eines dritten verwandten Körpers, so würden diese Steine, ähnlich wie zwei Magnete, an einem zwischen ihnen gelegenen Ort zusammenkommen, und zwar jeder in einem Abstand zum andern, der der Masse des andern im Verhältnis entspricht. Wenn der Mond und die Erde nicht durch eine Willenskraft oder eine andere ihr gleichwertige Kraft, jeder in seiner Bahn, gehalten würden, so würde die Erde zum Mond den 54. Teil ihres Abstands emporsteigen, und der Mond etwa 53 Teile des Abstands zur Erde herabsteigen; dort würden sie sich treffen, vorausgesetzt beider Substanz hat dieselbe Dichte.

Wenn die Erde aufhören würde, ihre Gewässer anzuziehen, so würden die Meere alle emporgehoben und auf den Mond fließen. Der Bereich der Anziehungskraft des Mondes erstreckt sich bis zur Erde und

zieht die Wasser in der heißen Zone an, wo immer er bei seinem Lauf im höchsten Punkt steht, unmerklich in geschlossenen Gewässern, aber merklich dort, wo die Buchten des Ozeans sehr weit sind und entsprechend frei die Gewässer. Dadurch werden die Küsten der angrenzenden Zonen und Klimagebiete entleert, und auch in der heißen Zone bewirkt das Zurückweichen des benachbarten Ozeans eine lokale Erhebung des Wassers. So kann es geschehen, wenn das Wasser in die weiten Räume des Ozeans hineinfließt, dass in seinen engeren Buchten, sofern sie nicht zu sehr abgeschlossen sind, die Wasser auch vor dem Mond zurückzuweichen scheinen; sie senken sich, weil draußen die Wassermenge zurückgeht.

Da die Wasser nicht so schnell folgen können, wenn der Mond schnell durch den höchsten Punkt seiner Bahn geht, entsteht in den heißen Zonen eine Strömung nach Westen, bis sie an die gegenüber liegenden Küsten stößt und von ihnen abgelenkt wird. Beim Weggang des Mondes löst sich die Vereinigung der Gewässer auf oder auch das Meer, das auf dem Marsch in die heiße Zone ist, weil der ursprüngliche Antrieb wegfällt. Mit dem erhaltenen Schwung fließt es, wie in Wassergefäßen, zurück und bespült die eigenen Küsten und bedeckt sie. Dieser Schwung erfährt durch die Abwesenheit des Mondes eine andere Richtung. Sobald der Mond zurückkommt, wird der Schwung abgebremst und gemäßigt und schließt sich dem Umlauf des Mondes an. So werden gleichermaßen offene Kü-

ten alle zu gleichen Zeiten bespült, zurückliegende aber später, und manche zu anderen Zeiten wegen der Verschiedenheit der Zugänge zum Meer.“

Wenn auch von allen Körpern eine Schwerkraft ausgeht, die, wie Kepler annimmt, so wie die von einer Lichtquelle ausgehende Beleuchtung mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt, so vermutet Kepler doch bei der Sonne noch eine andere Kraft. Die Planeten stürzen ja nicht in die Sonne, aber sie müssen sich nach Aristoteles in Richtung der Kraft bewegen, die auf sie wirkt. Also muss es eine Kraft geben, die tangential an die Bahn wirkt. Diesen Trugschluss hat erst Galilei beseitigt, indem er durch seine Fallversuche nachwies, dass die Kraft nicht zur Geschwindigkeit, sondern zur Beschleunigung proportional ist.

Auf dieser Erkenntnis beruhen alle späteren Überlegungen zur Berechnung einer Bewegung, insbesondere der von der Schwerkraft hervorgerufenen Bewegung einer Pendeluhr, mit der die Beschleunigung auf der Erdoberfläche gemessen werden kann. Newton zitiert dafür eine berühmt gewordene Arbeit von Huygens, und gibt selbst eine einfache Erklärung für die Beschleunigung auf einer Kreisbahn, so dass dann aus der Umlaufzeit des Mondes, seiner Entfernung von der Erde und dem Erdradius die Entfernungsabhängigkeit der Schwerkraft (mit $1/r^2$) abgeleitet werden kann. Man versteht dann auch das dritte Keplersche Gesetz (aus Keplers ‚Harmonice mundi‘), das Newton auch zitiert. Allerdings geht Newton in seinem Hauptwerk ‚Philosophiae Naturalis Principia Mathematica‘ nirgends auf Keplers ‚Astronomia Nova‘ ein. Die Ellipsenbahnen erklärt er als Folge der $1/r^2$ -Abhängigkeit der Schwerkraft, so wie es umgekehrt leicht zu sehen ist, dass bei einer Bewegung auf einer Ellipse nach dem Flächensatz eine auf die Sonne gerichtete Beschleunigung auftritt, die proportional $1/r^2$ ist.

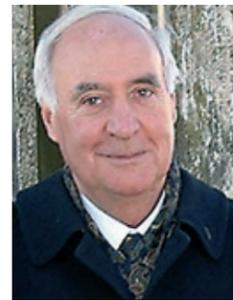
Ein denkwürdiger Streit unter den Mitgliedern Robert Hooke, Edmund Halley und Christopher Wren der Royal Academy of Science im Jahr 1684 war der Anlass für Newtons Abfassung seiner ‚Principia‘. Hooke erklärte dem Astronomen Halley, er habe aus dem Keplerschen Ellipsengesetz den Beweis erbracht, dass es sich bei der Sonnenkraft um die Schwerkraft handle, wolle den Beweis aber nicht mitteilen, bevor

er ihn publiziert habe. Bei seiner Rückkehr nach Cambridge wandte sich Halley an Newton mit der Frage, welche Bahnen die Planeten hätten, wenn die Kraft von der Sonne mit $1/r^2$ ginge. Newton antwortete etwas gereizt, die Bahnen wären dann Ellipsen, das habe er sich schon lange überlegt. Er wurde hierauf zur Abfassung seiner Arbeiten aufgefordert.

Diese Vorgeschichte ist mittlerweile so gut wie vergessen zugunsten einer Geschichte, die Voltaire in seinen ‚Lettres philosophiques‘ aus England berichtet, dass nämlich Newton ein Apfel auf den Kopf gefallen sei und ihn damit auf das Gravitationsgesetz gebracht habe. *Se non è vero, è ben trovato.* ♦

Literatur

- [1] G. Galilei, Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das ptolemäische und das kopernikanische. Aus dem Italienischen übersetzt und erläutert von Emil Strauss, herausgegeben von Roman Sexl und Karl von Meyenn. B.G.Teubner, Stuttgart 1982, p.483.
- [2] Joh. Kepler, Astronomia Nova, Heidelberg 1609, Gesammelte Werke, Band III. C.H.Beck, München, seit 1937, Introductio p. 24 ff. Neue Astronomie, übersetzt und eingeleitet von Max Caspar, R. Oldenbourg Verlag, München 1990, p 25 ff.
- [3] M. Holder, Die Kepler-Ellipse. Eine alte Geschichte neu erzählt, Universitätsverlag Siegen.



PROF. DR. MARTIN HOLDER lehrte bis 2003 Experimentalphysik an der Universität Siegen. Seit seiner Emeritierung widmet er sich der Geschichte der Astronomie.

Das Auge als Instrument

Keplers ‚Ergänzungen zu Witelo‘ und die Wende in der Optik um 1600

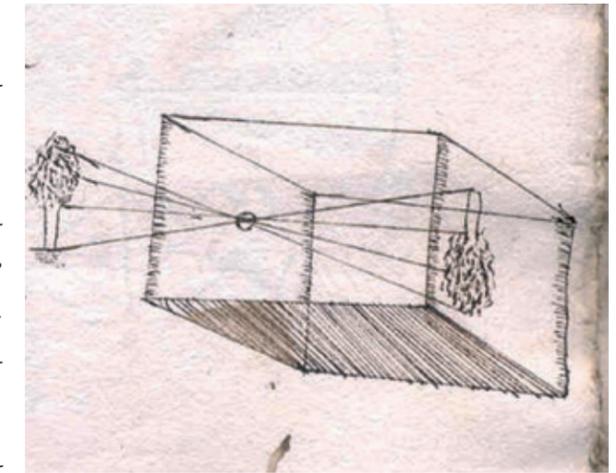
OLIVER MORSCH

Für Johannes Kepler war die Optik eine wichtige Voraussetzung für eine wissenschaftlich fundierte Astronomie. Mit seinen Erklärungen des Auges als ‚camera obscura‘, des Prinzips der Lochkamera und des Fernrohrs leitete er in den ‚Ergänzungen zu Witelo‘ und der ‚Dioptrice‘ zwischen 1604 und 1611 eine Wende in der Optik ein.

Die 1560 vom Kurfürst August von Sachsen im Dresdner Residenzschloss eingerichtete Kunstkammer beherbergte nicht nur prächtige Gemälde und Skulpturen, sondern war auch eine Art Technikmuseum. Besucher konnten dort unter anderem Goldschmiedewerkzeuge und wissenschaftliche Instrumente bestaunen. Eine weitere Attraktion war ein abgedunkeltes ‚Finstergemach‘, in das nur durch eine in einem Fenster angebrachte Glaslinse Licht fiel. Wie von Zauberhand erschien auf der gegenüberliegenden Wand ein auf dem Kopf stehendes Bild der Außenwelt mit Bäumen, Wolken und vorbeifliegenden Vögeln. Um das Jahr 1600 besuchte auch Johannes Kepler diese ‚camera obscura‘. Seine Eindrücke von dem ‚experimentum‘ in Dresden schilderte er in den 1604 erschienenen ‚Ergänzungen zu Witelo‘ (lat. ‚Ad Vitellionem Paralipomena‘) [1].

Das optische Fundament der Astronomie

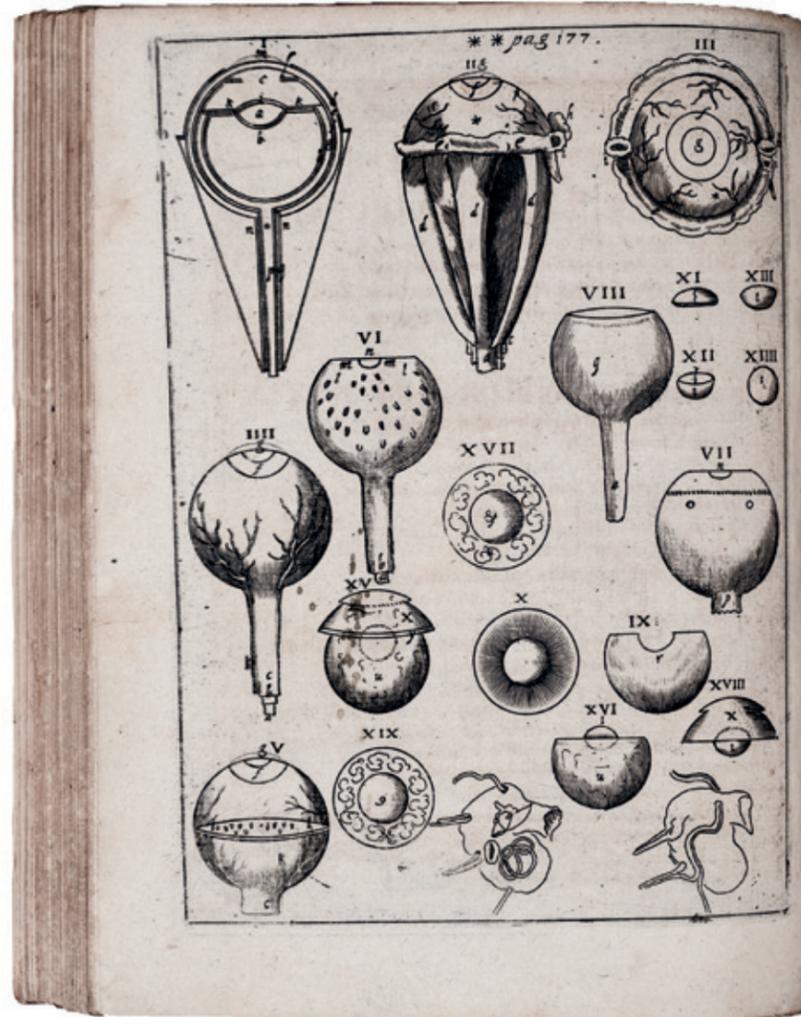
Der Inhalt dieses Werkes wird im Untertitel deutlicher, wonach „der optische Teil der Astronomie fortgeführt wird“ (lat. „quibus astronomiae pars optica traditur“). Dass der Astronom Kepler ein großes Interesse an der Optik hatte, kam nicht von ungefähr. Vereinfacht könnte man sagen: Er traute seinen, oder besser, den Augen nicht – und zwar zuerst im allgemeinen, wissenschaftlichen Sinn. Für Kepler war klar, dass Astronomen oft mehr oder weniger gravierenden optischen Täuschungen erlegen waren [2]. Positionsbestimmungen von Sternen und Planeten wurden durch die Brechung des Lichts in der Erdatmosphäre verfälscht und helle Objekte wurden stets grösser eingeschätzt als dunkle.



Auf dem Kopf stehendes Bild in einer ‚camera obscura‘. Federzeichnung am Rand eines Vorlesungsmanuskripts über die Principia Optices; 17. Jh. Ex Bibliotheca Gymnasii Altonani. Public domain

Auch seinen eigenen Augen konnte Kepler tatsächlich nicht trauen: Er war stark kurzsichtig und litt am Mehrfachsehen (Polyopie), was er auf das jahrelange Studium von astronomischen Tabellen zurückführte; in Wirklichkeit war dies wohl angeboren oder eine Folge seiner Pockenerkrankung im Alter von vier Jahren.

In den ‚Ergänzungen zu Witelo‘ hatte es sich Kepler zur Aufgabe gemacht, die Astronomie als beobachtende Wissenschaft auf ein solides Fundament zu stellen. Dazu musste er die möglichen Fehler, die sich bei Himmelsbeobachtungen einschleichen konnten, durch eine gründliche Untersuchung der ihnen zugrundeliegenden optischen Phänomene zunächst erklären und dann Möglichkeiten finden, diese zu korrigieren oder zumindest die durch sie verursachten Messfehler abzuschätzen [3]. Im Titel seines Buches bezog sich Kepler dabei auf den schlesischen Philoso-



Anatomische Studien des Auges (aus Keplers 'Ergänzungen zu Witelo' 1604). Smithsonian Libraries SIL-SIL7-193-01

phen, Theologen und Astronomen Witelo. Dieser hatte um 1270 in seiner 'Perspectiva' das damalige Wissen zu optischen Themen zusammengetragen. Zu Keplers Zeiten war Witelos Lehrbuch ein wissenschaftliches Standardwerk.

Die Wissenschaft vom Sehen

Witelo selbst konnte bereits auf eine jahrhundertelange Geschichte der Optik zurückblicken. Die Optik leitet sich vom griechischen ὤψ (Auge) bzw. ὀπτικός (zum Sehen gehörig) her und ist in ihren Ursprüngen die Wissenschaft vom Sehen. Bereits im 5. vorchristlichen Jahrhundert formulierte der aus Agrigent in Sizilien stammende Empedokles eine Theorie des Sehens, der

zufolge vom Auge Strahlen ausgesendet werden, die ständig die Umgebung abtasten [4]. Plato verfeinerte diese Erklärung und fügte den vom „Feuer im Innern des Auges“ ausgehenden Strahlen das Tageslicht hinzu. Beide zusammen erlaubten es demnach dem Menschen, seine Umwelt wahrzunehmen. Platons Schüler Aristoteles dagegen nahm an, dass das Auge eher passiv äußerliche Einflüsse aufnimmt und nicht selbst Strahlen erzeugt.

In den folgenden Jahrhunderten entstanden weitere solcher Theorien, denen zufolge das Auge entweder ein Sender von ‚Sehstrahlen‘ (Extramission) oder aber ein Empfänger von (Licht-)Strahlen aus der Umwelt (Intramission) ist [5]. Epikur etwa, der auch für seine ‚Philosophie des Glückes‘ bekannt ist, vertrat die Theorie der εἰδῶλα. Diese sind Abbilder von sichtbaren Objekten, die durch unablässiges Ausströmen von Teilchen entstehen, welche die Eigenschaften der Objekte an das Auge übermitteln. Etwa zur gleichen Zeit, also um 300 v. Chr., beschäftigte sich auch der große Mathematiker Euklid mit dem Sehen und vor allem mit der Geometrie des Sehstrahls. Er formulierte sieben Postulate, von denen eines besagt, dass die Sehstrahlen diskret sind und in kegelförmigen Bündeln aus dem Auge austreten. Das hat unter anderem zur Folge, dass ein Objekt nur sichtbar ist, wenn es von einem dieser Sehstrahlen berührt wird, andernfalls bleibt es unsichtbar – zum Beispiel, wenn es zu weit entfernt ist.

Während viele Philosophen sich mit mehr oder weniger tiefgründigen Erklärungen des Sehens befassten, erfanden andere, eher praktisch ausgerichtete Gelehrte der Antike bereits optische Apparate, mit denen Lichterscheinungen manipuliert werden konnten. Hero von Alexandrien etwa benutzte im ersten Jahrhundert n. Chr. speziell angeordnete Spiegel, um damit verblüffende optische Effekte zu erzeugen. Nach Heros Ansicht breitete sich Licht dabei in Form kleiner Projektile mit hoher Geschwindigkeit und geradlinig aus - weil, so Hero, die Natur „nichts umsonst“ tut, also immer die kürzeste Strecke wählt.

Etwa hundert Jahre nach Hero argumentierte der aus Pergamon in der heutigen Westtürkei stammende Arzt und Anatom Galen wieder mit der Intelli-

genz der Natur, diesmal, um den perfekten Aufbau des menschlichen Auges zu erklären. Den Ort, an dem der Seheindruck entsteht, vermutete er in der Augenlinse, und die Wahrnehmung fand ihm zufolge im Gehirn statt, während Aristoteles diese im Herzen verortet hatte. In der Frage „aus dem Auge oder in das Auge“ hielt Galen es allerdings noch mit Plato und vertrat eine Extramissionstheorie des Sehens.

Ganz anders sah dies der arabische Gelehrte Al-Hasan Ibn Al-Haytham, auch bekannt als Alhazen, um das Jahr 1030 in seinem ‚Schatz der Optik‘ (arab. ‚Kitāb al Manāzīr‘, lat. ‚De aspectibus‘). Er argumentierte, dass vermeintlich vom Auge ausgesandte Strahlen ja ohnehin von einem Objekt zurückgeworfen und dann vom Auge empfangen werden müssen. Dies sei unnötig und verschwenderisch und daher nicht im Sinne der Natur. Alhazens Werk stellte in vieler Hinsicht einen Meilenstein in der Entwicklung der Optik dar. Zum ersten Mal wurden hier mit einer wissenschaftlichen Methode detailliert optische Phänomene untersucht, wie etwa die Brechung von Licht und dessen Spiegelung an flachen oder gekrümmten Oberflächen. Alhazen forderte die Leser sogar dazu auf, seine Experimente zu wiederholen und so zu bestätigen.

Das Auge als ‚camera obscura‘

Als Kepler um 1600 Witelos ‚Perspectiva‘ las, in der unter anderem Alhazens Entdeckungen wiedergegeben und kommentiert wurden, lag die Funktionsweise des Auges noch immer im Dunkeln [6]. Zwar hatte einige Jahre zuvor der Schweizer Arzt Felix Platter als Erster klar zwischen den Aufgaben der Linse und der Netzhaut unterschieden – die Linse als einfaches Brechglas, die Netzhaut dagegen als das eigentlich lichtempfindliche Organ. Wie genau ein Abbild der Umwelt auf der Netzhaut entsteht, konnte aber auch Platter nicht erklären.

Keplers revolutionäre Einsicht war es, das Auge einer ‚camera obscura‘ gleichzusetzen, wie er sie in Dresden gesehen hatte (die heute geläufige Bezeichnung stammt von Kepler, das Phänomen selbst war allerdings schon viel früher beobachtet worden, unter anderem von dem chinesischen Gelehrten Mo Tzu um 400 v. Chr.). Die Augenlinse, die wie eine mit Wasser

gefüllte Glaskugel das von außen einfallende Licht bündelt, projiziert ein auf dem Kopf stehendes Bild auf die Netzhaut. Dort entsteht der Seheindruck, der wiederum an das Gehirn weitergegeben wird. Von nun an war das menschliche Sehorgan ein optisches Instrument wie alle anderen, und daher ließen sich die Überlegungen, die Kepler über die Zuverlässigkeit optischer Beobachtungsinstrumente anstellte, auch auf das Auge anwenden (und umgekehrt) [3].

Unter anderem konnte damit erklärt werden, wie Brillen eine Fehlsichtigkeit korrigieren. Linsen gab es in verschiedenen Formen bereits seit der Antike, doch primitive Brillen kamen erst gegen Ende des 13. Jahrhunderts in der Toskana auf. Aus einer geblasenen Glaskugel geschnitten oder mit einfachen Drehbänken geschliffen, erlaubten es die Linsen dieser anfangs mit einer Hand vor die Augen zu haltenden Sehhilfen vor allem Menschen mit Altersweitsichtigkeit, Bücher zu lesen oder filigrane Arbeiten auszuführen. Wie Brillen aber genau wirken, war über lange Zeit unklar. Einige Gelehrte vermuteten zum Beispiel, dass bei Fehlsichtigkeit im Auge nicht genug ‚Sehgeist‘ produziert wird und dass eine konvexe Linse dies durch eine Vergrößerung des Seh winkels kompensiert (auf konkave Linsen war diese Argumentation natürlich nicht anwendbar) [5].

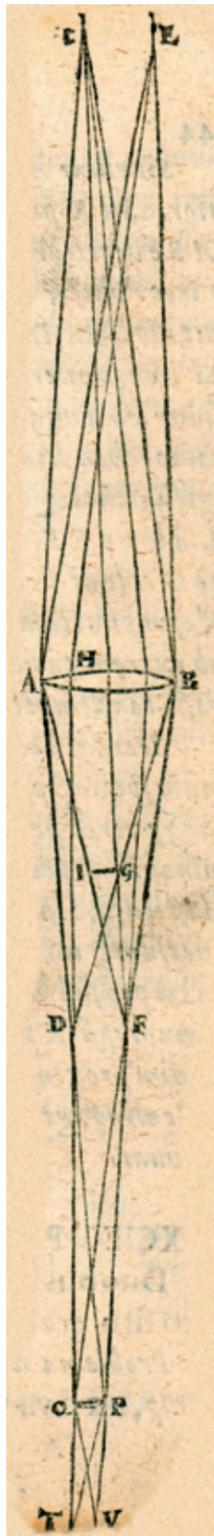
Mithilfe von Keplers Theorie des Auges war die Funktionsweise einer Brille nun leicht zu verstehen. Eine Fehlsichtigkeit bedeutet, dass die Augenlinse das Bild entweder vor oder hinter der Netzhaut fokussiert, so dass es unscharf ist. Die Brillenlinse korrigiert dies, indem sie die Lichtstrahlen stärker bündelt (konvexe Linse) oder divergieren lässt (konkave Linse) und so den Brennpunkt wieder auf die Netzhaut verschiebt. Anstatt wie zuvor die Brillenstärke einfach nach Alter festzulegen - in Florenz zum Beispiel gab es um 1500 Brillen zu kaufen, die in Fünfjahresschritten gestaffelt waren -, konnte man jetzt Linsen gezielt so einsetzen, dass das Grundproblem (etwa ein zu langer Augapfel bei Kurzsichtigkeit) durch ihre Brechkraft kompensiert wurde [5].

Keplers Hauptinteresse galt, wie erwähnt, der Anwendung optischer Prinzipien auf astronomische Beobachtungen, und so beschäftigte er sich in den ‚Ergänzungen zu Witelo‘ ausführlich mit der einfachs-



Abb. links: Entstehung eines Bildes in einer Lochkamera (aus Keplers ‚Ergänzungen zu Witelo‘ 1604). Landesbibliothek Oberösterreich, AT-OOeLB-6597750

Abb. rechts: Prinzip des Kepler-Fernrohrs mit zwei konvexen Linsen (aus Keplers ‚Dioptrice‘ 1611). Kepler-Museum Weil der Stadt



ten Form der ‚camera obscura‘, der Lochkamera, die von vielen Astronomen für astronomische Beobachtungen benutzt wurde. In der Lochkamera sah man auf einem Schirm in einiger Entfernung von einer mit einem kleinen Loch versehenen Blende das Bild der Sonne oder des Mondes und konnte so zum Beispiel deren scheinbaren Durchmesser bestimmen. Kepler selbst benutzte eine solche Lochkamera unter anderem, um die Sonnenfinsternis in Graz am 10. Juli 1600 zu beobachten.

Lichtstrahlen in der Lochkamera

Um genauer zu verstehen, wie in einer Lochkamera ein Bild entsteht, simulierte Kepler die Lichtstrahlen mit dünnen Fäden. Von einer Ecke eines Buches, das er „an einen hohen Ort“ gestellt hatte [3], spannte er einen Faden durch eine eckige Öffnung in einem Tablett bis zum Boden, wobei der Faden eine Ecke des Loches berührte. Dies wiederholte er mit allen Ecken des Buches und allen Ecken der Öffnung, sodass aus den Auftreffpunkten der Fäden auf dem Boden, die er mit Kreide markierte, ein seitenverkehrtes Abbild der Buchecken entstand. Wiederholte man diese Prozedur mit jedem beliebig kleinen Punkt auf der Oberfläche des Buches, so sollte ein komplettes Bild des Buches in all seinen Details entstehen.

Kepler zog zwei Schlussfolgerungen aus diesen Beobachtungen. Zum einen sollte bei einer verschwindend kleinen Öffnung das Abbild des Buches praktisch perfekt (wenn auch sehr lichtschwach) sein. Zum anderen erwartete er bei einer sehr großen Öffnung, dass das Bild auf dem Boden nicht mehr die Form des Buches, sondern die der Öffnung haben sollte. Damit hatte er zum einen das Jahrhunderte alte Rätsel um die von Sonnenlicht erzeugten kreisförmigen Erscheinungen hinter kleinen, eckigen Löchern gelöst [2]. Zum anderen konnte er so auch Unstimmigkeiten erklären, die etwa in Tycho Brahes Messungen des Sonnen- und Monddurchmessers auftraten. Eine vollständige Beschreibung der Lochkamera, die auch die Beugung des Lichts an den Kanten der Öffnung beinhaltet, konnte Kepler freilich noch nicht liefern - dazu musste erst mehr als hundert Jahre später die Wellennatur des Lichts entdeckt werden.

Galileos Fernrohr und Keplers ‚Dioptrice‘

Die 1604 erschienenen ‚Ergänzungen zu Witelo‘ waren die letzte große wissenschaftliche Abhandlung über die Optik vor der Erfindung des Fernrohrs durch den deutsch-niederländischen Brillenmacher Hans Lippershey im Jahr 1608. Nachdem Galileo Galilei damit nur ein Jahr später als Erster astronomische Beobachtungen gemacht hatte, entwickelte Kepler in kürzester Zeit eine physikalische Erklärung der Funktionsweise des Fernrohrs, die er 1611 in seinem zweiten großen Werk zur Optik, der ‚Dioptrice‘, veröffentlichte. Darin behandelte Kepler die Brechung von Licht an Linsenkombinationen und schlug auch einen neuen Typus von Fernrohr vor (heute auch als ‚Kepler-Fernrohr‘ bezeichnet), der das konkave Okular, mit dem man in Galileos Fernrohr das vergrößerte Bild eines weit entfernten Objekts sehen kann, durch ein konvexes Okular ersetzte.

Kepler selbst hatte im Übrigen bereits in den ‚Ergänzungen zu Witelo‘ den Gebrauch von Linsen für astronomische Beobachtungen in Erwägung gezogen, diese Idee aber nicht weiterverfolgt [6]. Später gratulierte er Galileo für sein Durchhaltevermögen und seinen festen Glauben an die Nützlichkeit der Linsen.

Die ‚Ergänzungen zu Witelo‘ und ‚Dioptrice‘ stellten einen entscheidenden Bruch mit der Vergangenheit dar und begründeten Keplers Ruf als Vater der modernen Optik. Sie boten Lösungen für fundamentale Probleme, an denen sich Generationen von Gelehrten abgemüht hatten [7]. Gemeinsam bilden diese beiden Werke die Grundlage für das, was wir heute als ‚geometrische‘ Optik bezeichnen – also ohne jene Effekte, die auf der Wellennatur des Lichts beruhen. ♦

Literatur

- [1] Sven Dupré, ‚Inside the ‚Camera Obscura‘: Kepler’s Experiment and Theory of Optical Imagery‘, *Early Science and Medicine*, Bd. 13, Nr. 3 (2008), pp. 219-244
- [2] Giora Hon und Yaakov Zik, ‚Kepler’s Optical Part of Astronomy (1604): Introducing the Ecliptic Instrument‘, *Perspectives on Science*, Bd. 17, Nr. 3 (2009), pp. 307-345
- [3] Ofer Gal und Raz Chen-Morris, ‚Baroque Optics and the Disappearance of the Observer: From Kepler’s Optics to Descartes’ Doubt‘, *Journal of the History of Ideas*, Bd. 71, Nr. 2 (2010), pp. 191-217
- [4] Arthur Zajonc, ‚Catching the Light‘, Oxford University Press (1995)
- [5] A. Mark Smith, ‚From Sight to Light‘, The University of Chicago Press (2015)
- [6] Jiri Marek, ‚Kepler and Optics‘, *Vistas in Astronomy*, Bd. 18 (1975), pp. 849-854
- [7] Antoni Malet, ‚Early Conceptualizations of the Telescope as an Optical Instrument‘, *Early Science and Medicine*, Bd. 10, Nr. 2 (2005), pp. 237-262



OLIVER MORSCH ist Senior Scientist am Istituto Nazionale di Ottica (CNR-INO) und Dozent für Quantentechnologien am Dipartimento di Fisica in Pisa (Italien).

Einstein und Kepler

GÜNTER WUNNER

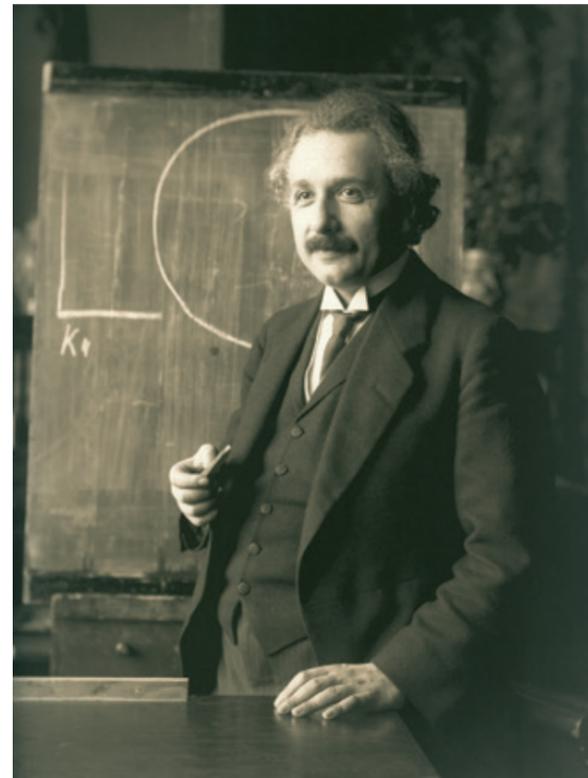
Einstein beschreibt, wie Kepler die Ellipsenform der Planetenbahnen bestimmte. Er selbst sagte die allgemeinrelativistische Drehung der Keplerellipsen voraus, die ich an drei Beispielen erläutere.

1.) Einsteins Huldigung an Kepler und: Die Keplerschen Gesetze

Johannes Kepler verstarb am 15. November 1630. Aus Anlass des 300. Todestages veröffentlichte Albert Einstein in der Frankfurter Zeitung am 9. November 1930 einen Artikel über Kepler, um „eines so großen, stillen Menschen wie Kepler zu gedenken“. Er rühmt Keplers Glauben an die Gesetzlichkeit der Naturabläufe: „Wie groß musste sein Glaube an diese Gesetzlichkeit sein, dass er ihn mit der Kraft zu erfüllen vermochte, der empirischen Erforschung der Planetenbewegung und der mathematischen Gesetzmäßigkeiten dieser Bewegung Jahrzehnte geduldiger schwerer Arbeit zu opfern“.

Mehrere Jahrzehnte vor Kepler hatte Kopernikus gezeigt, wie Einstein schreibt, „dass ein klares Begreifen der scheinbaren Bewegungen der Planeten am Himmel am besten dadurch zu gewinnen sei, dass man diese Bewegungen als Umlaufbewegungen der Planeten um die als ruhend gedachte Sonne auffasste“. Dabei galt es zunächst, die Bahn der Erde um die Sonne zu verstehen. Was wir sehen, ist wie die Sonne im Laufe eines Erdenjahres scheinbar durch den Fixsternhimmelshintergrund wandert. Kepler konnte so erfahren, dass die Verbindungslinie Erde-Sonne im Lauf eines Jahres in einer gegen die Fixsterne festen Ebene rotiert.

Einstein stellt dann die Frage: „Aber wie nun die wahre Gestalt der Erdbahn ermitteln?“ Er denkt sich eine in der Ebene der Erdbahn liegende „hell leuchtende Laterne M“, die weiter weg sei von der Sonne als die Erde, und stellt sich den Zeitpunkt vor, an dem die Erde E genau auf der Verbindungslinie von der Sonne zur Laterne M liegt. „Visiert man zu diesem



Albert Einstein während einer Vorlesung in Wien 1921. Foto: F. Schmutzer, Wikimedia

Zeitpunkt von der Erde E aus nach der Laterne M, so ist diese Richtung zugleich die Richtung SM (Sonne - Laterne). Letztere denke man sich am Himmelsgewölbe montiert.“

Einstein denkt sich dann die Erde an einem anderen Ort und zu einer anderen Zeit auf ihrer Bahn. Die Erde liegt dann nicht mehr auf der Verbindungslinie SM, sondern bildet mit S und M ein Dreieck. Da

man von der Erde aus sowohl die Position der Sonne S als auch die der Laterne M relativ zum Fixsternhimmelshintergrund sehen könnte, wäre im Dreieck SEM der Winkel bei E bekannt. Man kennt aber auch den Winkel, um den sich die Verbindungslinie Erde-Sonne gegenüber der vorher ein für alle Mal festgelegten Standlinie SM am Fixsternhimmel verdreht hat. Mit diesen beiden Winkeln kann man das Dreieck SEM konstruieren. Diese Konstruktion wiederhole man häufig während des Jahres und erhält so empirisch die Erdbahn gegenüber der festgehaltenen Standlinie SM.

Einstein: „Aber – werdet Ihr sagen – woher nahm Kepler die Laterne M? Diese lieferte ihm sein Genie und die gütige Natur“. Als Laterne diente ihm der Mars. Nehmen wir an, der Mars steht in Opposition zur Sonne, die Erde liegt also genau auf der Verbindungslinie Sonne-Mars. Dieser Marsort wiederholt sich nach jedem Marsjahr, bildet also mit SM dieselbe Standlinie, während die Erde an einem anderen Ort ihrer Bahn steht. Diese Messung wiederholte Kepler an etwa 40 Punkten. Die astronomischen Daten entnahm er dabei den umfangreichen Tabellen der sehr genauen Planeten- und Sonnenbeobachtungen von Tycho Brahe, seinem Vorgänger als Kaiserlicher Hofmathematiker in Prag.

Mit dem für ihn typischen Humor fügt Einstein hinzu: „So fand Kepler die wahre Gestalt der Erdbahn und die Art, wie diese durchlaufen wird, und wir später geborenen Menschen, Europäer, Deutsche und gar noch Schwaben, dürfen ihn darob wohl bewundern und preisen.“

Auf diese Weise bestimmte Kepler auch die Bahnen der anderen Planeten und fand 1609 so die beiden ersten Keplerschen Gesetze: Die Planeten bewegen sich auf Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht. Die Verbindungslinie Sonne - Planet überstreicht in gleichen Zeiten dieselbe Fläche.

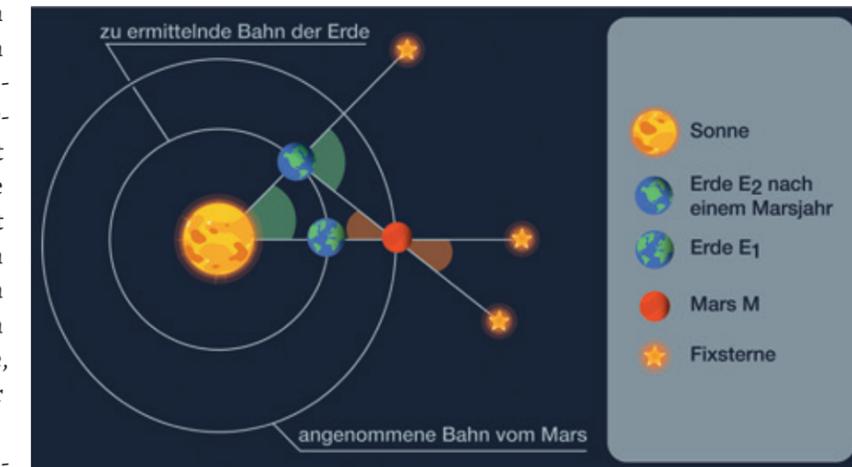


Abb. 2: Die Deutsche Bundespost veröffentlichte 2009 die Briefmarke ‚400 Jahre Keplersche Gesetze‘, welche die beiden Gesetze grafisch darstellt. Foto: Kepler-Gesellschaft e. V.

2.) Drehung der Kepler-Ellipsen

a) Die Periheldrehung des Merkur

Eine reine Keplerellipse wird nur in einem exakten $1/r$ Gravitationspotential durchlaufen. Jede Störung dieses Potentials führt zu einer kleinen Präzession der Keplerellipse, der Planet bewegt sich auf einer Rosettenbahn. Zwar verspürt der Planet dominant das Gravitationspotential der Sonne, die anderen Planeten üben aber gegenseitig ebenfalls Anziehungskräfte auf sich aus. Der französische Astronom Urbain Le Verrier (1811 – 1877), Direktor des Pariser Observatoriums, hat-



te im Jahr 1859 durch sorgfältige Analyse von zum Teil jahrhundertalten Beobachtungen herausgefunden, dass der Merkur, der sonnennächste Planet, sich nicht entsprechend dem 1. Keplerschen Gesetz auf einer elliptischen Bahn, sondern auf einer solchen Rosettenbahn um die Sonne bewegt. Himmelsmechanische Störungsrechnungen führten für Merkur zu einer Vorwärtswanderung des sonnennächsten Punktes, dem Perihel, auf einen Wert von $531,5 \pm 0,3$ Bogensekunden pro Jahrhundert. Die langjährigen Beobachtungen lieferten aber $574,3 \pm 0,4$ Bogensekunden!

Es wurden erfolglos verschiedene Erklärungen vorgeschlagen, um die Differenz von $42,7 \pm 0,5$ Bogensekunden zu erklären. Beispielsweise postulierte Le Verrier einen Planeten-Vulkan innerhalb der Merkurbahn, der für die Abweichung verantwortlich sein sollte. Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie

Abb. 1: Die Standlinie Sonne, Erde E₁ und Mars M relativ zum Himmelsgewölbe wird bei der Oppositionsstellung des Mars ein für alle Mal festgelegt. Nach einem Marsjahr bilden Sonne, Erde E₂, und Mars M ein Dreieck, das aus dem Winkel $\angle SE_1M$ und dem Winkel $\angle SE_2M$ relativ zur Standlinie konstruiert werden kann. Illustration: Celina Brandes

lieferte ohne jede Annahme eine Periheldrehung von 43,02 Bogensekunden pro Jahrhundert, also eine hervorragende Übereinstimmung mit den Beobachtungen. Wie sehr diese Erkenntnis Einstein erfasst haben muss, kann man einer Passage aus einem Brief an den holländischen Physiker und Freund Paul Ehrenfest vom 17. Januar 1916 entnehmen: „Ich war einige Tage fassungslos vor freudiger Erregung.“

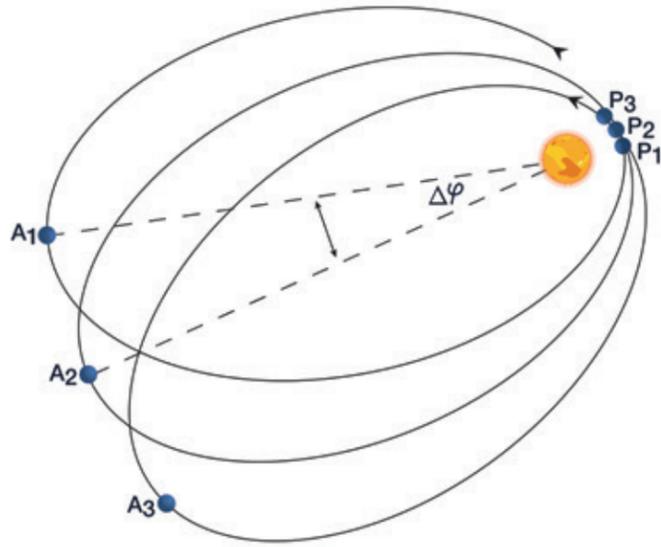


Abb. 3: Effekt der Periheldrehung: Durch Abweichung vom $1/r$ -Potential ist die Bahnkurve des Planeten nicht geschlossen. Die Punkte P_i sind die aufeinander folgenden sonnennächsten Punkte (Perihel), die Punkte A_i die sonnenfernsten (Aphel).

Abb. 5 (rechts): Die relativistische Drehung der Keplerellipsen bei PSR 1913+16. Illustration: Celina Brandes

b) Der Doppelpulsar PSR 1913+16
Eine weitaus größere Drehung der Bahnellipse wurde beim Doppelpulsar PSR 1913+16 gemessen. Es handelt sich dabei um zwei Neutronensterne von jeweils etwa 1,4 Sonnenmassen, die sich auf Keplerellipsen mit einer auf die Sichtlinie projizierten großen Halbachse von 700 000 km in knapp 8 Stunden um ihren gemeinsamen Schwerpunkt bewegen. Von einem der beiden Neutronensterne können Radioimpulse auf der Erde mit großen Radioteleskopen gemessen werden, nämlich etwa 16 pro Sekunde.

Die relativistische Periastrondrehung, d.h. das Weiterwandern des Punktes auf der Bahnellipse, der dem Schwerpunkt am nächsten liegt, beträgt sage und schreibe $4^{\circ},226$ pro Jahr, das entspricht 43 Bogensekunden an einem Tag, also so viel wie beim Merkur in 100 Jahren.

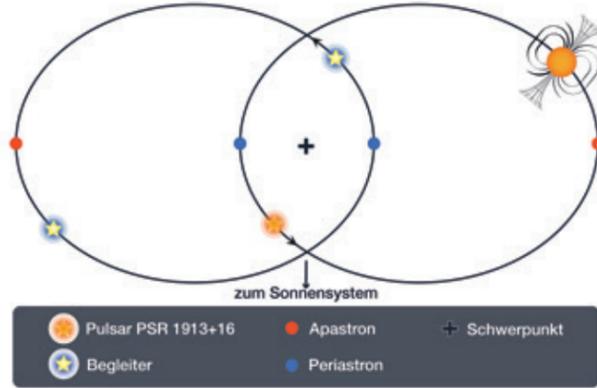
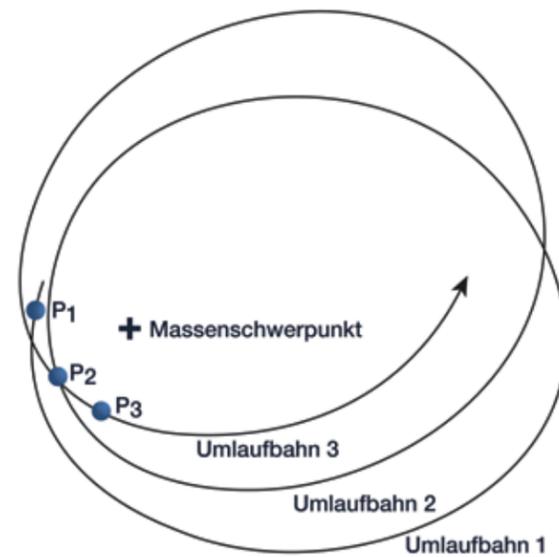


Abb. 4: Die Keplerellipsen der beiden Neutronensterne
Illustration: Celina Brandes

Das Doppelpulsarsystem wurde seit 1974 mit großer Präzision beobachtet. Unter anderem konnte aufgrund des Schrumpfens des Bahnradius von 3,1 mm pro Umlauf bzw. 3,5 m pro Jahr erstmals auch auf die Abstrahlung der von Einstein vorhergesagten Gravitationswellen geschlossen werden. Russel Hulse und Joseph Taylor erhielten für diese Entdeckung im Jahre 1993 den Nobelpreis für Physik. In ca. 300 Millionen Jahren werden die beiden Neutronensterne verschmelzen und ein starkes direktes Gravitationswellensignal aussenden.



c) Keplerellipsen um das Zentrum der Milchstraße
Die vielleicht spektakulärsten Keplerellipsen, die in der Milchstraße beobachtet werden, sind die von Sternen um das Zentrum der Milchstraße (vgl. auch den Beitrag von S. Gillessen ‚Mit den Keplerschen Gesetzen auf der Suche nach Schwarzen Löchern‘). Zwei Beobachtungsgruppen, die eine geführt von Reinhard Genzel, die andere von Andrea Ghez, haben seit 1994 diese Bahnen im Detail vermessen und dadurch nicht nur die Existenz eines Schwarzen Lochs von ca. 4 Millionen Sonnenmassen im Zentrum der Milchstraße nachgewiesen, sondern auch die Entfernung von 26670 Lichtjahren genau bestimmen können. Für diese Entdeckungen teilten sich Genzel und Ghez je eine Hälfte des Nobelpreises für Physik 2020.

Einer der über die Jahre verfolgten Sterne (von Genzels Gruppe mit S2 bezeichnet), ragt unter allen anderen heraus. Seine Umlaufzeit um das im Sternbild Schütze gelegene Zentrum (von den Astronomen auch mit Sgr* bezeichnet) beträgt knapp unter 16 Jahren. Zum Vergleich: Für eine volle Bahn um das Galaktische Zentrum benötigt die Sonne 200 Millionen Jahre. Der Stern S2 bewegt sich auf einer hochelliptischen Keplerellipse mit einer Exzentrizität von $\epsilon = 0,88$. Zweimal konnte die Passage von S2 durch den Punkt auf der Keplerellipse, die dem Galaktischen Zentrum am nächsten liegt, dem sogenannten Perizentrum, gemessen werden, nämlich 2002 und besonders genau im Mai 2018. Der Abstand im Perizentrum zu Sgr* betrug nur 17 Lichtstunden (das ist 120 Mal der mittlere Abstand der Erde von der Sonne).

Bei der Annäherung an das Perizentrum ist S2 zunehmend dem starken Schwerfeld des Galaktischen Schwarzen Lochs ausgesetzt. In der Tat konnte 2020 nachgewiesen werden, dass das Perizentrum von S2 pro Umlauf um 12 Bogensekunden weiterwandert. Dies ist genau der Wert, den man in Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie bei der gegebenen Masse von etwa 4 Millionen Sonnenmassen erwartet.

So finden wir über die durch Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie bedingte Drehung der Keplerellipsen nicht nur im Sonnensystem, sondern auch auf galaktischen Dimensionen, zu guter Letzt wieder einen Konnex zwischen Einstein und Kepler. ♦

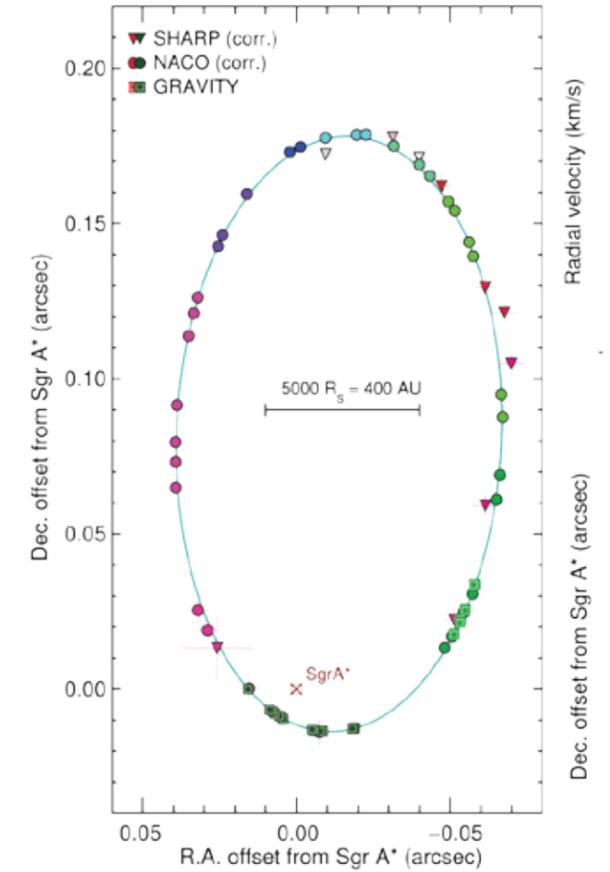


Abb. 6: Ergebnisse von 26 Jahren Beobachtung der Keplerellipse von S2 um Sgr*A. Grafik: GRAVITY collaboration, ESO



PROF. DR. GÜNTER leitete von 1997 bis 2018 das 1. Institut für Theoretische Physik der Universität Stuttgart. Zu seinen Forschungsinteressen zählen nichtlineare Dynamik und Quantenphysik, nicht-hermitesche Quantenmechanik sowie Atom- und Astrophysik. Er liest bis heute die bei den Studierenden beliebte Wahfachvorlesung Astrophysik.

Kepler in der Musik

Johannes Kepler ist die Hauptfigur in zwei abendfüllenden Musiktheaterwerken des 20./21. Jahrhunderts. Es handelt sich dabei zum einen um Paul Hindemiths Oper ‚Die Harmonie der Welt‘ (1957, Uraufführung in München, seither sieben weitere Produktionen in Bremen, Wien, Wuppertal, Gelsenkirchen, Berlin, Linz), zum anderen um Philip Glass’ Bühnenwerk ‚Kepler‘ (2009, Uraufführung in Linz, eine weitere Produktion in Charleston 2012). Beide Opern zeigen Stationen aus Keplers Leben auf jeweils unterschiedliche Weise.

Hindemiths Oper spielt zwischen den Jahren 1608 und 1630 an verschiedenen Orten und beleuchtet schlaglichtartig – zum Teil simultan – Szenen aus Keplers Leben, nach dessen Werk ‚Harmonice mundi‘ die Oper benannt ist. Hindemith zeichnet Personen aus dem Umkreis Keplers, die sein wissenschaftliches Streben mit unterschiedlichen – politischen, theologischen und persönlichen – Ambitionen begleiten. Glass arbeitete mit der Autorin Martina Winkel zusammen. Winkels Libretto verwendet biografische Aussagen Keplers, Gedanken aus dessen Schriften auf Deutsch und Latein sowie Gedichte des Barockdichters Andreas Gryphius und stellt sich damit in eine Tradition assoziativen Collagierens, die Glass bereits in früheren Bühnenwerken anwandte (Einstein on the beach, Satyagraha u.a.). Bezüglich der Gegenüberstellung von Kepler und Gryphius ist anzumerken, dass es sich um eine ahistorische Konstellation handelt, da Gryphius (1616–1664) 45 Jahre jünger war als Kepler (1571–1630), also mit seinem literarischen Wirken in eine andere Zeit fiel als Kepler. Während Kepler nicht zuletzt im Kontext der Forschungen von Kopernikus und Galilei (über den Philip Glass 2001 ebenfalls eine Minimal-Oper geschrieben hatte) als Autor einer veränderten Zukunft gesehen werden kann, steht Gryphius mit seinem literarischen Schaffen für die Vanitas des Barock, in der das Leben auf der Erde als ein Jammertal gesehen

MATTHIAS HERMANN

wird. In seinem Sonett ‚Tränen in schwerer Krankheit‘ schreibt Gryphius:

„Was bilden wir uns ein, was wünschen wir zu haben? Itzt sind wir hoch und groß, und morgen schon vergraben; Itzt Blumen, morgen Kot. Wir sind ein Wind, ein Schaum, Ein Nebel und ein Bach, ein Reif, ein Tau, ein Schatten; Itzt was und morgen nichts. Und was sind unsre Taten Als ein mit herber Angst durchmischter Traum.“

Eine ausführliche Darstellung von Hindemiths sinfonischem Vorläufer zu seiner Oper, ebenfalls unter dem Titel ‚Die Harmonie der Welt‘, hat Michael Heinemann vorgelegt¹.

Im Kontext einer Ausstellung zu Johannes Kepler wäre es zu kurz gegriffen, würde man sich auf einen mehr oder weniger belletristischen Umgang mit Keplers Leben und dessen musikdramatische Umsetzung beschränken. Von eigentlich musikalischem Interesse könnte vielmehr die Frage sein, inwieweit sich Komponisten mit Keplers Denken kompositionstechnisch auseinandersetzen bzw. inwieweit sich mathematisch begründete Regeln in kompositorischen Verfahren wiederfinden lassen.

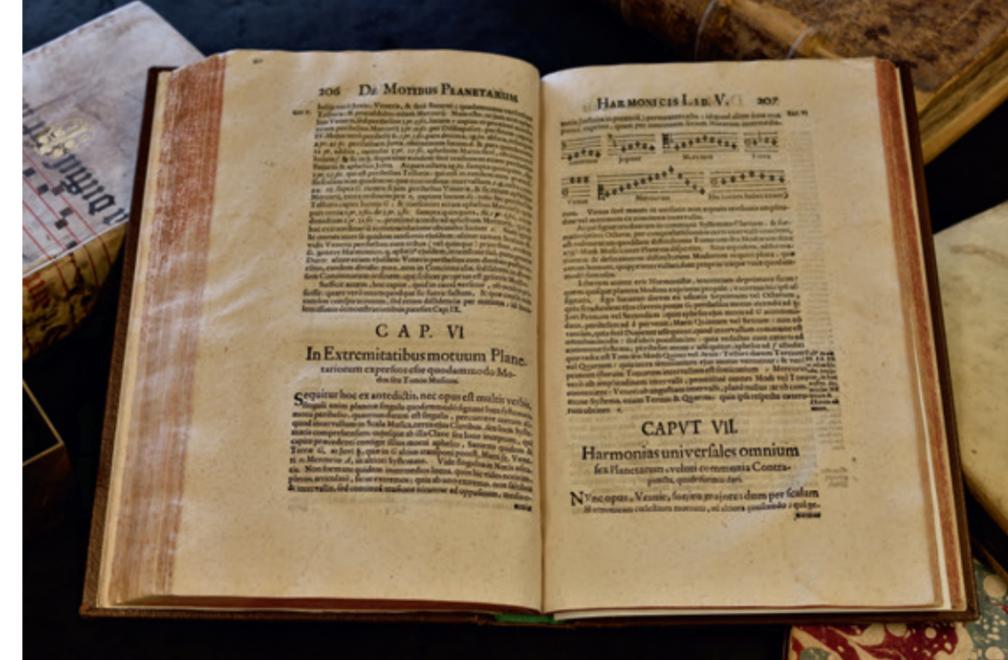
Kepler sprach von einer himmlischen Harmonie und sah ein göttliches Wirken in der Konstellation der von ihm beschriebenen Planeten. In Anlehnung an Livios² Antinomie des Erfindens oder Entdeckens wäre Kepler hier klar ein Vertreter des Entdeckens (mathematischer Ordnungen in [gott]gegebenen Konstellationen).

Aber gibt es so etwas auch im Bereich der Musik? Eine himmlische Harmonie als eine vorgegebene Ordnung, die von den Komponisten ‚gefunden‘ wird? Heinrich Christoph Koch beschreibt in seinem Musikalischen Lexikon 1804 die himmlische Harmonie als philosophisches, nicht akustisch-musikalisches Phänomen: „Musik der Sphären oder Harmonie der

Sphären. Die alte philosophische Schule der Pythagoräer glaubte, dass, weil die Himmelskörper sich nach bestimmten Gesetzen bewegen, so müssen sie unter sich auch notwendig eine gewisse Art von musikalischer Harmonie hervorbringen, die sie die Harmonie der Sphären nannten; daher bedienten sich die Dichter dieses Ausdrucks noch heutzutage, zwar nicht als eine Art von Musik, wohl aber die genaue Übereinstimmung und Ordnung des Weltalls zu bezeichnen.“³

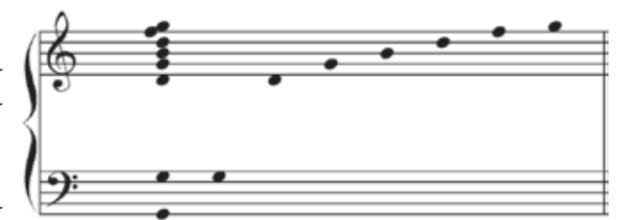
Da Kepler bestimmte Größen in mathematische Zusammenhänge setzt und eine Ordnung feststellt, die er als Harmonie beschreibt, wäre eine der möglichen Fragestellungen aus musikalischer Sicht diejenige nach der Harmonie in der Musik beziehungsweise nach dem, was Harmonie in der Musik auszumachen scheint.

Eine grundlegende Diskrepanz zwischen mathematisch stimmiger Harmonie im Sinne ‚richtiger‘ Proportionen und musikalisch als stimmig erlebter Harmonie liegt in unserer Gewöhnung an bestimmte Tonsysteme, je nachdem in welchem Kulturkreis wir aufwachsen. Gemeinhin wird Bachs ‚Wohltemperiertes Klavier‘ als eines der frühen großen Werke genannt, das sich mit der heute etablierten, temperierten Stimmung assoziieren lässt. Die temperierte, gleichschwebende Stimmung löste verschiedene mitteltönige Stimmungen ab, die durch ‚bessere‘ und ‚schlechtere‘ Klänge charakterisiert waren. Unterschiedliche, durch



Johannes Kepler errechnete Harmonien aus den Bewegungen und Entfernungen der Planeten. Seine Sphärenmusik erscheint 1619 in seinem Werk ‚Harmonices Mundi‘. ERB Lindau. Foto: Patrick Pfeiffer

eine Hierarchie unterschiedlicher Schwebungen in bestimmten Tonarten ausgeprägte Stimmungen wurden durch ein Stimmungssystem abgelöst, das im Versuch, diese Hierarchien aufzuheben, ‚gleichschwebend‘ sein wollte. Und dieses System wurde so erfolgreich implementiert, dass es im europäischen Kulturkreis bis heute angewandt wird. Da man elementare Proportionen in einer Obertonreihe abbildet (angelehnt an Schwingungsverhältnisse zwischen Teiltönen), hat man mit einer temperiert notierten Obertonreihe gleichermaßen Gelingen und Scheitern dargestellt:



Hier sind die ersten acht Obertöne über dem Grundton G in temperierter Stimmung dargestellt.

Die erste Generation von Komponisten, die sich mit den ‚richtigen‘ Obertönen auseinandergesetzt hat, war die Gruppe der sogenannten Spektralisten in Paris (Grisey, Levinas, Dufourt, Tessier). Auch Karlheinz Stockhausen hat sich in seinen Studien I und II mit Klängen beschäftigt, die mathematisch ‚saubere‘ Proportionen aufwiesen.

1 Michael Heinemann: Ad fontes. Zu Paul Hindemiths Sinfonie ‚Die Harmonie der Welt‘, in Ulrich Tadday (Hg.) Musik-Konzepte Neue Folge Heft 125/126, München 2004 (S. 123-136)
2 Mario Livio: Ist Gott ein Mathematiker? München 62010

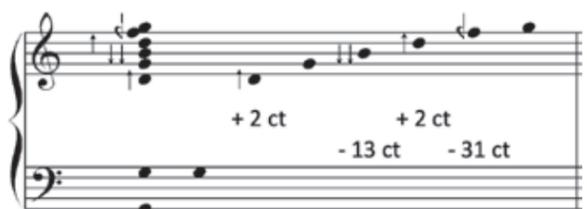
3 Heinrich Christoph Koch: Musikalisches Lexikon, Frankfurt/Main 1802 – Koch nennt für die Dichter keine Beispiele

Es gibt nun zwei weitere mögliche Darstellungen der Obertonreihe im musikalischen Gebrauch. Da heute zahlreiche Musiker*innen mit mikrotonaler Notation vertraut sind, werden kleinere Abweichungen als Halbtöne mit Viertelnoten (hier durch das ‚verkehrte‘ b) oder noch kleineren Abständen (hier durch Pfeile) notiert:



Diese Notation führt zu einer – immer noch intuitiven – Annäherung an tatsächliche Obertöne im Sinne einer spektralen Anordnung.

Die physikalisch gemessenen Abweichungen von der temperierten Notation werden in Cent (ct)⁴ angegeben, oft in Verbindung mit mikrotonalen Hinweisen:



Es ist sofort einleuchtend, dass auch die Viertel- und Achtelton-Notation nur unwesentlich weniger schlecht sind als die traditionelle chromatische Halbton-Notation. Die cent-genaue Notation hingegen erfasst die mathematisch richtig gerechneten Intervallverhältnisse eines Obertonspektrums über einem Grundton. Hier wäre ein harmonisches Ideal im Sinne einer mathematischen Ordnung adäquat abgebildet. Es ergeben sich aber zwei Probleme: Es ist nahezu unmöglich, auf den heute gebräuchlichen Orchesterinstrumenten verlässlich cent-genau zu spielen. Und wir stellen als Hörer*innen fest, dass die Musik in dieser ‚idealen‘ Harmonik für uns seltsam verstimmt klingt, obwohl die Harmonik als spektral angelegte ‚richtig‘ ist

und vielleicht am ehesten eine musikalische Sprache ermöglicht, die dem Anspruch geordneter Proportionen gerecht wird.

Hindemiths gleichermaßen hermetisches wie esoterisches System taugt für eine ernsthafte Umsetzung keplerscher Ideen ebenso wenig wie die – bei allem Respekt für dramaturgische Feinheiten – recycelten Minimal-Lösungen von Philip Glass. Eine Oper über Johannes Kepler könnte sich mit den Aspekten eines mathematisch orientierten Harmoniekonzepts auseinandersetzen und vielleicht, ausgehend von Keplers Denken, über Musik nachdenken. ♦



MATTHIAS HERMANN ist seit 1991 Professor für Musiktheorie an der HMDK Stuttgart. Er ist auch als Dirigent und Komponist tätig. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich der Analyse zeitgenössischer Musik und der künstlerischen Forschung.

Leitmotive Keplers: Stimmig – Einfach – Ideal

KLAUS HENTSCHEL

Welche Leitmotive hatten Keplers vielfältige Forschungen? Warum hat er sich lebenslang komplexen Problemen der Wissenschaft seiner Zeit hingegeben? Welche Ziele hat er dabei verfolgt? Welcher Heuristiken hat er sich bedient? Das sind die Fragen, um die dieser Beitrag kreist. Kepler hat das noch heute verfolgte Ziel empirischer Stimmigkeit verbunden mit einer platonischen Suche nach idealer Entsprechung seiner Theorien mit der Realität. Das Auswahlkriterium der Einfachheit half ihm, zwischen verschiedenen denkbaren Möglichkeiten zu selektieren. Sein Erklärungsoptimismus ließ ihn sogar hoffen, eindeutige Ursachen empirischer Regularitäten zu finden.

Aus heutiger Perspektive erscheint Kepler zunächst als Pionier moderner Naturwissenschaft. In der Optik entwickelte er einen nach ihm benannten Typ von Teleskop und suchte (allerdings vergeblich) nach dem naturgesetzlichen Zusammenhang zwischen Einfallswinkel und Ausfallswinkel der Lichtbrechung (vgl. hier Morsch); in der Astronomie gelang ihm die Auffindung der drei nach ihm benannten Gesetze der Planetenbewegung (vgl. hier Meyer). Diese Sicht auf Kepler als eines vor allem um empirische Stimmigkeit seiner Theorien bemühten Präzisionsfetischisten greift jedoch zu kurz und steht in Kontrast zu seinen eigenen Motiven, seinem eigenen Selbstverständnis als dem eines Entschlüssellers göttlicher Welterschöpfungspläne. Absicht dieses Beitrags ist eine kontextualisierte Verständlichmachung jener selbstgesetzten Ziele und der zu deren Verfolgung eingesetzten Heuristiken.

In seiner ‚Astronomia Nova‘ von 1609 schreibt Kepler selbststilierend: „Uns, denen die göttliche Güte in Tycho Brahe einen allersorgfältigsten Beobachter geschenkt hat, durch dessen Beobachtungen der Fehler der ptolemäischen Rechnung im Betrag von 8‘ ans Licht gebracht wird, geziemt es, mit einem dankbaren Gemüt diese Wohltat Gottes anzunehmen und zu gebrauchen. Wir wollen uns also die Mühe geben, [...] endlich die richtige Form der Himmelsbewegungen zu ergründen. [...] Diese acht Minuten allein haben also den Weg gewiesen zur Erneuerung der ganzen

Astronomie, sie sind der Baustoff für einen großen Teil dieses Werkes geworden.“

Das uns heute noch so vertraute Leitmotiv empirischer Stimmigkeit einer Theorie – bei ihm weit über die Ansprüche seiner Zeitgenossen hinaus bis hin zur Grenze der damaligen vorteleskopischen Beobachtungsgenauigkeit ausgereizt – wird hier verbunden mit einem Anspruch auf fundamentale Richtigkeit und einer Erneuerung der ganzen, nunmehr durch die Angabe eindeutiger Gründe physikalisierten Astronomie. Der dahinterstehende „Erklärungsoptimismus“ (Kamlah 1971: 215) beruht auf einem platonischen Vertrauen in die – wie sein Zeitgenosse Leibniz sagen würde – „prästabilisierte Harmonie“ zwischen Theorie und Empirie, auf einer „felsenfesten Überzeugung von der Erkennbarkeit der Konstruktionsprinzipien des Universums“ (Hübner 1969: 261f.). Naturforschung, Metaphysik und Gottesglaube gehörten für Kepler, der ja 1589-91 in Tübingen Theologie studiert hatte, auf das engste zusammen (vgl. hier Holtz).

Sein Platonismus zeigte sich bereits früher in seinem Erstlingswerk, dem ‚Mysterium Cosmographicum‘ von 1596. Dort hatte er geglaubt, das „Geheimnis der Welterschöpfung“ in einer Ineinanderschachtelung der platonischen Körper gefunden zu haben (zum Folgenden vgl. Field 1988, Stephenson 1994, Martens 2000). Ebenso wie schon Platon im 4. Jh. v. Chr. in seinem naturphilosophischen Dialog ‚Timaios‘ den gerade erst von Theaitet entdeckten regelmäßigen Körpern

⁴ Ein gleichstufiger Halbton wird in 100 ct unterteilt, die Oktave umfasst somit 1200 ct. Weitere Informationen hierzu siehe z.B. unter [https://de.wikipedia.org/wiki/Cent_\(Musik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Cent_(Musik))

eine zentrale Rolle in seinem Weltgebäude gegeben hatte, versuchte nun auch Kepler, die Struktur der damaligen Welt (des Planetensystems) über die platonischen Polyeder zu begründen. Der Kosmos war für ihn ein von Gott als Ganzes in harmonischen Proportionen ideal konzipierter – seine eigene Aufgabe sah er in der Auffindung der zugrundeliegenden mathematisch-konstruktiven Relationen. Systematische Iteration der Ineinanderschachtelung von Tetraeder, Hexaeder und Dodekaeder, Oktaeder und Ikosaeder führte ihn schließlich zu folgendem geometrischen ‚Konstruktionsgeheimnis‘ des Sonnensystems:

„Die Erde ist das Maß für alle anderen Bahnen. Ihr umschreibe einen Zwölfflächner; die diesen umspannende Sphäre wird der Mars sein. Der Marsbahn umschreibe einen Vierflächner; die diesen umspannende Sphäre wird der Jupiter sein. Der Jupiterbahn umschreibe einen Würfel; die diesen umspannende Sphäre wird der Saturn sein. Nun lege in die Erdbahn einen Zwanzigflächner; die diesem einbeschriebene Sphäre wird die Venus sein. In die Venusbahn legen einen Achtfächner; die diesem einbeschriebene Sphäre wird der Merkur sein. Da hast du den Grund für die Anzahl der Planeten.“ (Kepler im Vorwort von ‚Mysterium Cosmographicum‘ von 1596, dt. Übers. v. Max Caspar).

Auch in diese zunächst rein mathematisch und platonisch anmutende Konstruktion fand die Empirie Eingang, denn eine rein geometrische Einpassung jener Körper in rein-geometrische Kugeloberflächen hätte zu nicht ganz korrekten Bahnproportionen geführt. Darum gab Kepler den diversen Kugelschalen eine endliche Dicke. Dieser Fit-Parameter erlaubte es ihm, seine zunächst rein geometrische Konstruktion an die ihm damals verfügbaren astronomischen Daten besser anzupassen. Empirische Stimmigkeit, Einfachheit der zugrunde gelegten geometrisch-regulären Elementarformen und ideale Harmonie in einem Modell des Weltganzen fanden schon hier in idiosynkratischer Kombination zusammen. Gleiches ließe sich auch für Keplers Strukturüberlegungen zum Aufbau von Schneekristallen oder in der geometrischen Strahlenoptik zeigen (Buchdahl 1972).

Nachdem Kepler 1601 Zugang zu weitaus genaueren Beobachtungsdaten von Tycho Brahe erhalten

hatte, wurde klar, dass Kugelschalen bzw. Kreisbahnen der Bewegung des inneren Planeten Mars nicht gerecht wurden. Nun begann eine jahrelange, intensive, ja schon frenetische Suche nach einer empirisch stimmigeren und zugleich auch theoretisch begründbaren alternativen Bahnform (die Details dieser von Kepler 1609 selbst ausführlich geschilderten Suche finden sich diskutiert in Whiteside 1974/75 und Wilson 1968). Nach erfolgloser Austestung von ovalen, mund- und ei-förmigen Orbitalen wurde Kepler 1605 durch mühevollen Arbeit – „paene usque ad insaniam“ – klar, dass eine Ellipse die bestmögliche Näherung an die Bahnkurve des Mars war. Der Weg dorthin war gepflastert von Spekulationen (über mögliche physikalische Ursachen) und gewagten Voraussageschlüssen (von einigen Planeten auf alle, von wenigen Bahnelementen auf die gesamte Bahn usw. (dazu Hübner 1969: S. 272), von groben und dann feiner werdenden Annäherungsmethoden sowie von wildem nächtelangen Rechnen. In vielem ähnelte sein Vorgehen dem bis heute praktizierten empirischen Fitten von Funktionsverläufen an Beobachtungsdaten (sehr pointiert erläutert durch Whiteside 1974/75). Dass die Ellipse eine mathematisch besonders einfache Bahnkurve war, in deren einem Zentrum dann auch noch die Sonne stand, wurde Kepler erst nach und nach klar.

Ausklang

Das Leitideal der Einfachheit (syntaktisch interpretierbar als einfache Struktur der Formeln) wurde von ihm also kombiniert mit dem weiteren (pragmatischen) Leitideal der empirischen Stimmigkeit, das ihn von der einfachsten Bahnform des Kreises ebenso wie von diversen geometrischen Alternativen abgebracht hatte, und mit einem dritten (semantischen) Leitideal: der Unterstellung einer prästabilierten Harmonie von Geist und Materie, von Theorie und Realität. Letzteres erzeugte zum einen den bemerkenswerten Erklärungsoptimismus Keplers, der ihn immer wieder nach den tieferen Gründen für empirische Regularitäten suchen ließ; zum anderen beflügelte es ihn bei seiner Suche nach physikalischen Erklärungen für die von ihm untersuchten Phänomene. In dieser Physikalisierung der Astronomie liegt der größte Unterschied zur Astronomie seiner Vorgänger bis zurück zu Ptolemäus (siehe hier Kümmerer).

Schließlich ging es bei Keplers astronomischen Arbeiten um die Struktur der Welt, um den ‚Plan‘ von Gottes Schöpfung, dessen Erschließung äußerste Genauigkeit, aber auch ein tieferes physikalisches Verständnis erforderte. Die drei Leitmotive von Keplers Methodik griffen eng ineinander und gehörten für ihn zusammen. Astronomie wie auch Naturforschung allgemein waren für ihn eine Art Gottesdienst. Kepler ergänzte das Buch der Bibel um das Buch der Natur (Hübner 2010 sowie hier Bialas), das für ihn – ganz so wie auch für Galilei – in mathematischen Lettern geschrieben war und die Platonischen Ideale der Einfachheit, Güte und Schönheit verkörperte (Koyré 1939, 1973). Gleichzeitig gab ihm dieser Platonismus einen starken ‚Erklärungsoptimismus‘, der ihn sogar hoffen ließ, Gottes Schöpfungsplan bis hin zu den tieferliegenden Ursachen für die diversen empirischen Regelmäßigkeiten zu ergründen, die sich z.B. in der Lichtbrechung oder Planetenbewegung zeigten. Modern erscheint uns Keplers Streben nach höchster Präzision und bester Übereinstimmung zwischen Theorie und Beobachtungen sowie sein Wechselspiel von Hypothese und Empirie, aber vieles andere in seiner Forschungs-

praxis war ausgesprochen vormodern, so etwa seine Sonnenmystik und sein nachtwandlerisches ‚Vertrauen auf die göttliche Gnadenhilfe bei der Erkenntnis des Universums‘ (Koestler 1963, Hübner 1969: 276). Kepler hat das noch heute verfolgte Ziel empirischer Stimmigkeit sowie das Auswahlkriterium der Einfachheit, das ihm zwischen verschiedenen denkbaren Möglichkeiten zu selektieren half, verbunden mit einer platonischen Suche nach idealer Entsprechung seiner Theorien mit der Realität sowie nach den tieferen Gründen für gesetzesartige Zusammenhänge. Während die ersten beiden Leitideale Keplers ihn als Vorläufer heutiger Naturwissenschaft auszuweisen scheinen, sind sein Platonismus sowie sein zutiefst religiös verankertes Selbstverständnis typisch frühneuzeitliche Charakteristika, die Kepler näher an Leibniz, Galilei u. a. Forscher jener Zeit rücken (vgl. Köstler 1963, Koyré 1939, 1968, 1973), aber vom heutigen Wissenschaftsverständnis absetzen. Trotz einiger moderner Züge bleibt Kepler eine „Übergangstyp“ (Aby Warburg), „der noch an Überliefertes glaubt, sich aber aus einer Mischung von Skepsis und Selbstvertrauen der empirischen Erforschung der Natur zuwendet“.

Weiterführende Literatur:

- Horst Bredekamp & Claudia Wedepohl:
Warburg, Cassirer und Einstein im Gespräch:
Kepler als Schlüssel der Moderne, Berlin 2015.
- Gerd Buchdahl: Methodological aspects of Kepler's
theory of refraction, Studies in the History and
Philosophy of Science 3 (1972): 256–298.
- Max Caspar: Johannes Kepler (1571-1630), Nachdruck
der 3. Aufl., ergänzt um ein vollständiges Quellen-
verzeichnis, Stuttgart 1995.
- Judith V. Field: Kepler's Geometrical Cosmology,
Chicago 1988.
- Kurt Hübner: Was zeigt Keplers Astronomia Nova
der modernen Wissenschaftstheorie?,
Philosophia Naturalis 11 (1969): 257-278.
- Nick Jardine: The Birth of History and Philosophy of
Science – Kepler's Defence of Tycho against
Ursus, Cambridge 1988.
- Koyré's Kepler, History of Science 38 (2000): 363-376.
- Andreas Kamlah: Kepler im Lichte der modernen
Wissenschaftstheorie, in: Hans Lenk (Hrsg.)
Neue Aspekte der Wissenschaftstheorie,
Wiesbaden 1971: 205-220.
- Arthur Köstler: Die Nachtwandler. Die Entstehungs-
geschichte unserer Welterkenntnis, Stuttgart 1963.
- Alexandre Koyré: Études galiléennes, 3 Bände. Paris 1939.
– Von der geschlossenen Welt zum unendlichen
Universum, Frankfurt a.M. 1969.
– The Astronomical Revolution: Copernicus –
Kepler – Borelli, Ithaca 1973.

- Rhonda Martens: Kepler's Philosophy and the
New Astronomy, Princeton 2000.
- Jürgen Mittelstraß: Methodological elements of
Keplerian astronomy, Studies in the
History and Philosophy of Science 3 (1972): 203-232.
- Bruce Stephenson: The Music of the Heavens:
Kepler's Harmonic Astronomy, Princeton 1994.
- D. T. Whiteside: Kepler's planetary eggs, laid and unlaid,
1600-1605, Journal of the History of Astronomy 5 (1974): 1-21,
Kurzfassung in: Vistas in Astronomy 18 (1975): 553-555.
- Curtis Wilson: Kepler's derivation of the elliptical path,
Isis 59 (1968): 4-25.
https://de.wikipedia.org/wiki/Platonischer_Körper



PROF. DR. KLAUS HENTSCHEL hat seit 2006 an der Universität Stuttgart den Lehrstuhl für Geschichte der Naturwissenschaft und der Technik. Als Wissenschaftshistoriker hat er sich auf die Geschichte physikalischer Wissenschaften seit der frühen Neuzeit bis ins 20. Jahrhundert spezialisiert. <https://www.hi.uni-stuttgart.de/institut/team/Hentschel/>

„Astronomia Nova“ und Keplers Entdeckung der Gesetze der Planetenbewegung

ERICH MEYER

Mit seinem Buch „Astronomia nova“ revolutionierte Kepler die Astronomie und brach mit einer 1.500-jährigen Tradition – er widerlegte das System der 55 Äthersphären von Aristoteles und die Existenz der „göttlichen Kreisbahnen“. Der Untertitel ‘Physica Coelestis’ (Himmelsmechanik) belegt die Überzeugung Keplers, dass die Planetenbewegungen auf physikalische Ursachen begründet werden können. Kepler war der erste Wissenschaftler, der die irdische Physik auch im Weltall anwandte.

Um Planetenbahnen genau berechnen zu können, ist die exakte Position der Erde zum Zeitpunkt der Beobachtung notwendig. Als Johannes Kepler vom Kaiserlichen Mathematiker Tycho Brahe mit der Berechnung der Marsbahn beauftragt wurde, wollte er zunächst die Exzentrizität der Erdbahn neu vermessen, da dafür seit der Antike unterschiedliche Kenngrößen vorlagen. Die Schwierigkeit dabei bestand darin, dass die dafür notwendigen Beobachtungsdaten nur von der bewegten Erde aus erlangt werden konnten. Keplers Idee, die Pers-

pektive zu wechseln und sich gedanklich auf den Mars zu versetzen, um von dort aus die Erdbahn zu vermessen, war unglaublich einfallsreich. Dazu verwendete er aus Brahens reichem Beobachtungsschatz vier Marspositionen mit exakt gleicher ekliptikaler Länge aus verschiedenen Jahren. Am 5.3.1590, 21.1.1592, 8.12.1593 und 26.10.1595 stand der Mars immer genau an derselben Stelle auf seiner Bahn (siehe Abb. 1). Da sich die Erde jedoch schneller um die Sonne bewegt, befand sich die Erdposition zu den vier gewählten Zeitpunkten immer an einer anderen Stelle und so war es Kepler möglich, mithilfe der Geometrie die Exzentrizität der noch kreisförmig angenommenen Erdbahn mit ausreichender Genauigkeit zu ermitteln (siehe Abb. 1, Strecke C-S). Da Kepler überzeugt war, dass die Sonne als Bezugspunkt vom seit der Antike von Astronomen angenommenen Mittelpunkt der Erdbahn (= mittlere Sonne, Punkt C in Abb. 1) in den gefundenen exzentrischen Punkt (= wahre Sonne, Punkt S in Abb. 1). Diese Vorgangsweise wurde von Giora Horn als Keplers ‚nulltes Gesetz‘ bezeichnet¹.

Nach diesen wichtigen Vorarbeiten bestimmte Kepler auch für die bis dahin als kreisförmig angenommene Marsbahn die exzentrische Lage und prüfte weiter, ob auch der Mars gleich wie die Erde eine unterschiedliche Bahngeschwindigkeit aufweist. Diese Berechnungen führten ihn über den Radiensatz zur Entdeckung des Flächensatzes: Zuerst unterteilte er die Marsbahn in 1°-Schritte und addierte die Radien. Dann stellte er die so errechnete Summe in Beziehung

zur verstrichenen Zeit, die der Mars benötigte, um beispielsweise vom Punkt A zu I (siehe Abb. 2) zu gelangen. Kepler: „Da ich mir bewusst war, dass es unendlich viele Punkte auf dem Exzenter und entsprechend viele Abstände gibt, kam mir der Gedanke, dass in der Fläche des Exzentes alle diese Abstände enthalten seien [...] Denn ich erinnerte mich, dass in derselben Weise einst auch Archimedes den Kreis in unendlich viele Dreiecke zerlegte, als er damals den Umfang zum Durchmesser zu bestimmen suchte.“²

Dieses laut Kepler „Unvollkommene Verfahren“

ekliptikaler Länge fehlerfrei ab. In den Oktanten (O1 bis O4) blieben Fehler von 8 Bogenminuten. Kepler vermutete falsche Bahngeschwindigkeiten in den jeweiligen Segmenten und stellte schließlich fest: „Die Sache ist daher einfach so: Die Planetenbahn ist kein Kreis; sie geht auf beiden Seiten allmählich herein und dann wieder bis zum Umfang des Kreises im Perigäum hinaus. Eine solche Bahnform nennt man ein Oval.“⁵

Zur Lösung dieses Problems stauchte Kepler die Kreisbahn zu einer leichten Hilfsellipse und berechnete neuerlich die ekliptikalen Abweichungen. Die Fehler der Hilfsellipse hatten ähnliche Werte jedoch mit anderen Vorzeichen - die Hilfsellipse war zu schmal (siehe Abb. 4, rechtes Bild). Doch als Kepler die richtige Ellipse zwischen Kreis und Hilfsellipse legte, verschwanden die Restfehler und er erkannte, dass Planetenbahnen Ellipsen sind, in denen die Sonne in einem der beiden Brennpunkte steht. Diese Entdeckung kennen wir heute als 1. Keplersches Gesetz. Kepler: „Es

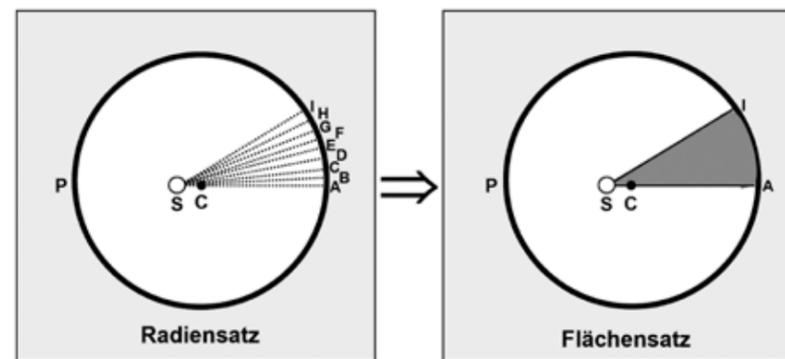


Abb. 2: Keplers Weg vom Radiensatz zum Flächensatz. Grafik: Erich Meyer

stellt eine Vorstufe für die erst später entwickelte „Infinitesimalrechnung“ dar.

Der Flächensatz wurde später als 2. Keplersches Gesetz bezeichnet. Kepler: „Wie sich die Fläche CDE zur halben Umlaufzeit, die wir mit 180° bezeichnen, verhält, so verhält sich die Fläche CAG zu der Zeit, die der Planet auf CG verweilt. So wie die Fläche CGA ein Maß für die Zeit oder die mittlere Anomalie, die dem Exzenterbogen CG entspricht, da die mittlere Anomalie ein Maß für die Zeit ist. [...]“³ (siehe Abb. 3). In seinem Werk „Astronomia Nova“ formulierte Kepler die berühmte transzendente (nur iterativ lösbare) Keplergleichung⁴, auf die hier nicht eingegangen wird (siehe Beitrag „Keplergleichung“ v. Martin Holder). Kepler: „[...] eine Lösung ist a priori nicht möglich.“

Als Kepler den gefundenen Flächensatz auf einen vollen Marsumlauf anwandte, erkannte er periodische Abweichungen (siehe Abb. 4, linkes Bild). Im Aphel (A), im Perihel (P) und in den Quadranten (Q) bildete der Flächensatz die Bewegung des Mars in

ist also klar, dass die Planetenbahn weder ein Kreis ist noch vom Kreis weg auf den Seiten so weit hereingehet wie das Oval, dass sie vielmehr einen mittleren Weg einhält. [...] Da der vollkommene Kreis einen gleich großen entgegengesetzten Fehler macht, so schließen wir daraus mit Recht, dass die Wahrheit in der Mitte zwischen beiden liegt.“⁶ Siehe Abb. 4, rechtes Bild, Ellipse. Kepler: „[...] dass für den Planet keine andere

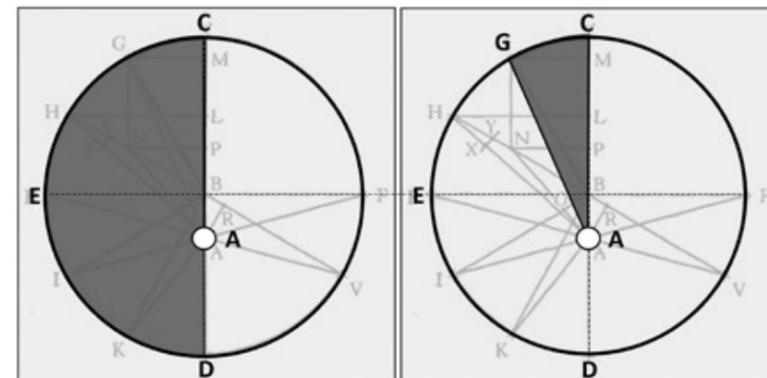


Abb. 3: Keplers Beweis für den Flächensatz = 2. Keplersches Gesetz. D=Perihel, C=Aphel, G=beispielhafte Position des Planeten; Bahnform=Kreis, Basis für Skizze ist Abbildung auf S. 193 in Astronomia Nova. Grafik: Erich Meyer

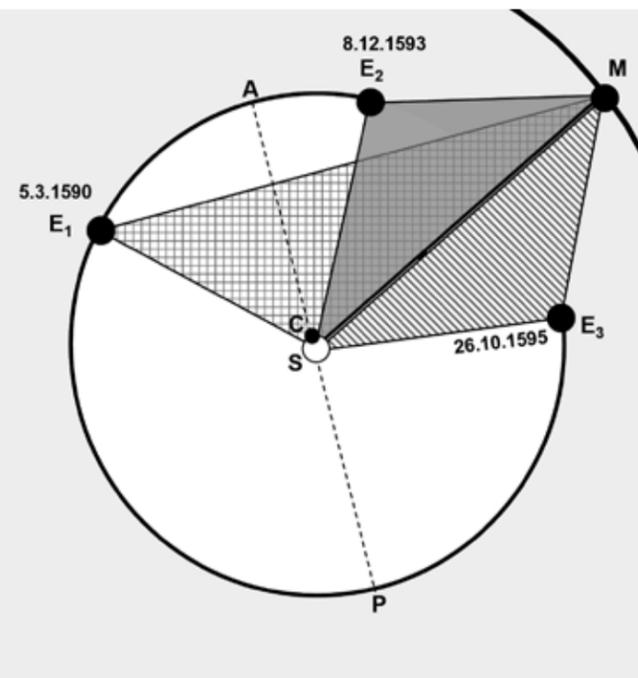


Abb. 1: Erdpositionen E1 – E3, A=Aphel (sonnenfernster Punkt), P=Perihel (sonnennächster Punkt), C=Kreisbahnmittelpunkt, M=Mars, S=Lage der exzentrischen Sonne. Hier sind nur drei Erdpositionen eingezeichnet. C-S beträgt nur 0,9 % des Erdbahndurchmessers! Die Skizze basiert auf der Grafik im Kap. 24, Fig. 29 in „Astronomia Nova“. Grafik: Erich Meyer.

Bahnfigur übrig bleibt als eine vollkommene Ellipse, da hier die aus den physikalischen Prinzipien abgeleiteten Gründe [...] im Einklang stehen.“⁷

Wie der Marsabstand zur Sonne zu einem beliebigen Zeitpunkt bestimmt werden kann, zeigt Kepler in ‚Astronomia nova‘ im Kapitel 56 in Figur 42. Frühere Astronomen waren an dieser Tiefenbewegung der Planeten nicht interessiert, sondern lediglich an deren Positionen am Himmel.

In der Welt der Gelehrten erntete Kepler mit seinen beiden gefundenen Gesetzmäßigkeiten nur Widerspruch. Michael Mästlin beispielsweise riet seinem einstigen Schüler, physikalische Ursachen und

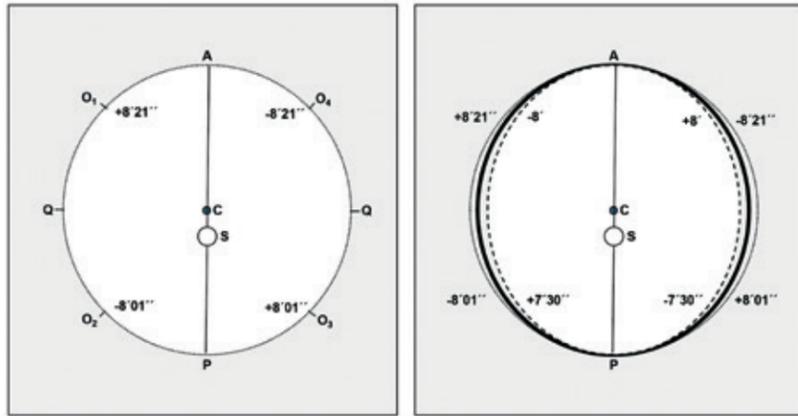


Abb. 4: Keplers Beweis für sein 1. Gesetz (Marsbahn ist eine Ellipse). C=Mittelpunkt des Kreises bzw. der Ellipse, S=Sonne in einem der beiden Brennpunkte der Ellipse. Eingetragene Zahlenwerte (in Bogenminuten) beziehen sich auf die Abweichungen zwischen der wahren Position und der berechneten Position. Linkes Bild: Kreisbahn; rechtes Bild: innen die gestrichelte Hilfsellipse, mittig die wahre Ellipse. Zur Verdeutlichung sind die Hilfs- und die wahre Ellipse übertrieben dargestellt. In der Realität weicht die wahre Ellipse weniger als 5% vom Kreis ab. Grafik: Erich Meyer

Hypothesen ganz aus dem Spiel zu lassen und Astronomisches nur nach astronomischer Methode zu erklären.⁸ Und auch Christian Longomontanus, Keplers Vorgänger als Assistent Brahes, wettete gegen die Ovalbahn: Kepler solle aufhören, die Himmelsphänomene zu verewaltigen; seine Eierbahnen seien ein geradezu böserartiger Anschlag auf die platonische Muse. Er bringe die ganze astronomische Wissenschaft in Verruf.⁹

Sein 3. Gesetz entdeckte Kepler am 15. Mai 1618 in Linz. Versteckt berichtet er in seinem Werk ‚Harmonices Mundi Libri V‘ auf Seite 189: „Am 8. März dieses Jahres [1618, Anm.], wenn man genaue Zeitangaben wünscht, ist sie [die Proportion, Anm.] in meinem Kopf aufgetaucht. Ich hatte aber keine glückliche Hand, als ich sie der Rechnung unterzog, und verwarf sie als falsch. Schließlich kam sie am 15. Mai wieder und besiegte in einem neuen Anlauf die Finsternis meines Geistes, wobei sich zwischen meiner siebzehnjährigen

Arbeit an den Tychonischen Beobachtungen und meiner gegenwärtigen Überlegung eine so treffliche Übereinstimmung ergab, dass ich zuerst glaubte, ich hätte geträumt und das Gesuchte in den Beweisunterlagen vorausgesetzt. Allein, es ist ganz sicher und stimmt vollkommen, dass die Proportionen, die zwischen den Umlaufzeiten irgend zweier Planeten bestehen, genau das Anderthalbe der Proportion (Proportionen ~ Verhältnisse) der mittleren Abstände, d. h. der Sphären [also der Umfänge der Ellipsen, Anm.] selber ist.“¹⁰

Dieses Gesetz ist uns in folgender Schreibweise bekannt: $T^2_1 / T^2_2 = a^3_1 / a^3_2$. Zieht man von dieser Gleichung die Quadratwurzel, erhält man: $T_1 / T_2 = a^{1,5}_1 / a^{1,5}_2$, also exakt Keplers Formulierung.

Der wissenschaftliche Kepler-Nachlass gibt keine Auskunft mehr über die Vorarbeiten zu diesem von Newton und seinen Schülern als ‚aurea regula Kepleri‘ bezeichneten Gesetz. Noch im Jahr 1778 schrieb der Mathematiker Wolfgang Ludwig Krafft aus St. Petersburg an den Nürnberger Gelehrten Christoph Gottlieb Murr, er habe mit besonderem Vergnügen jene Blätter von Keplers Nachlass studiert, in denen dieser das Verhältnis der Umlaufzeiten der Planeten zu ihrer mittleren Entfernung von der Sonne gesucht habe. Diese Blätter sind leider aus dem Nachlass entfernt worden und nicht mehr auffindbar.¹¹

Durch Keplers 3. Gesetz konnten nun mit einfacher Berechnung die relativen Abstände der Planeten von der Sonne präzise ermittelt werden. Dazu waren nur die Umlaufzeiten zweier Planeten nötig, die schon seit Jahrhunderten recht genau bekannt waren. Die wahren Abstände der Planeten von der Sonne konnten erstmals anlässlich der Marsopposition von 1672 mittels der Marsparallaxe genau ermittelt werden.

Drei Anwendungsbeispiele einer Keplerellipse: a) Beim Hohmann-Transfer wird mit geringstem energetischen Aufwand ein Satellit mittels einer Transfer-Ellipse beispielsweise von der Erde zum Mars gebracht, siehe Abbildung 5. b) Mit dem von Newton erweiterten dritten Keplerschen Gesetz ist es möglich, die Masse des riesigen Schwarzen Lochs im Zentrum unserer Galaxie zu berechnen. Mithilfe von Infrarotteleskopen können nämlich die Umlaufzeiten und die Bahnhalbachsen der innersten des Milchstraßenzentrum umkreisenden Sterne bestimmt werden.

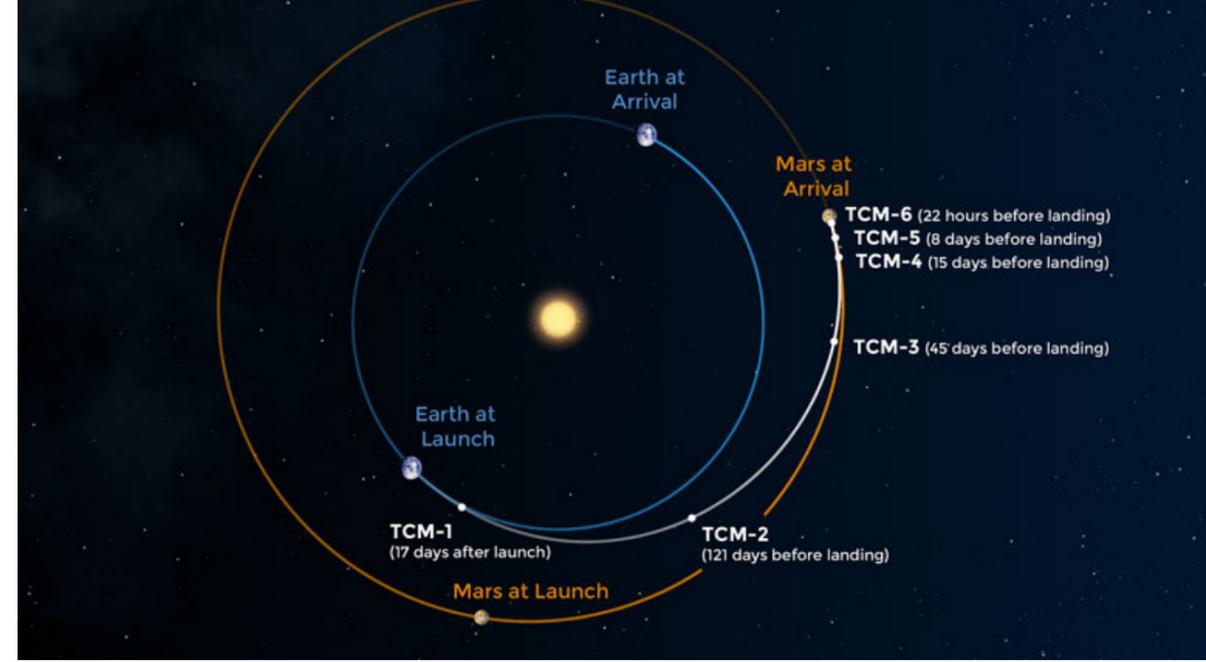


Abb. 5: Mit einer sogenannten Hohmann-Transfer-Ellipse kann ein Satellit mit geringstem Energieaufwand beispielsweise von der Erde zum Mars gebracht werden. NASA/JPL-Caltech

c) 1672 konnten anlässlich der Mars- Opposition mithilfe der präzisen Messung der Marsparallaxe und der Anwendung der Keplerschen Gesetzen erstmals in der Menschheitsgeschichte die wahren Abstände der Planeten von der Sonne ermittelt werden.

Zur Bestimmung der Marsparallaxe vermaßen im September 1672 zwei Beobachtergruppen, Giovanni Domenico Cassini (1625–1712) in Paris und Jean Richer (1630–1696) in Französisch-Guyana, zeitgleich die Marspositionen am Himmel. Aufgrund der mehrere Tausend Kilometer großen Distanz zwischen den beiden Beobachtungsorten konnte die sich daraus ergebende winzige Winkelverschiebung (Parallaxe) der Marsposition gegenüber den Fixsternen präzise vermessen werden. Daraus konnte mithilfe der Keplerschen Gesetze die für die Astronomie fundamentale Distanz Sonne-Erde (a) berechnet werden. Die Rechnungen ergaben den Wert $a = 139$ Mio km (exakter Wert: 149,6 Mio km). Etwa 100 Jahre später gelang anlässlich des Venustransits eine genauere Bestimmung der Entfernung Erde-Sonne.

Die alte Frage, ob die Erde oder die Sonne ruht, konnte James Bradley (1693–1762) 1725 in London mit der Entdeckung der jährlichen Aberration des Lichts beweisen. Etwa 100 Jahre später bewies auch Friedrich Wilhelm Bessel (1784–1846) 1838 mit der extrem genauen Vermessung der Fixsternparallaxe am Stern 51Peg die Richtigkeit des heliozentrischen Systems.¹² ♦



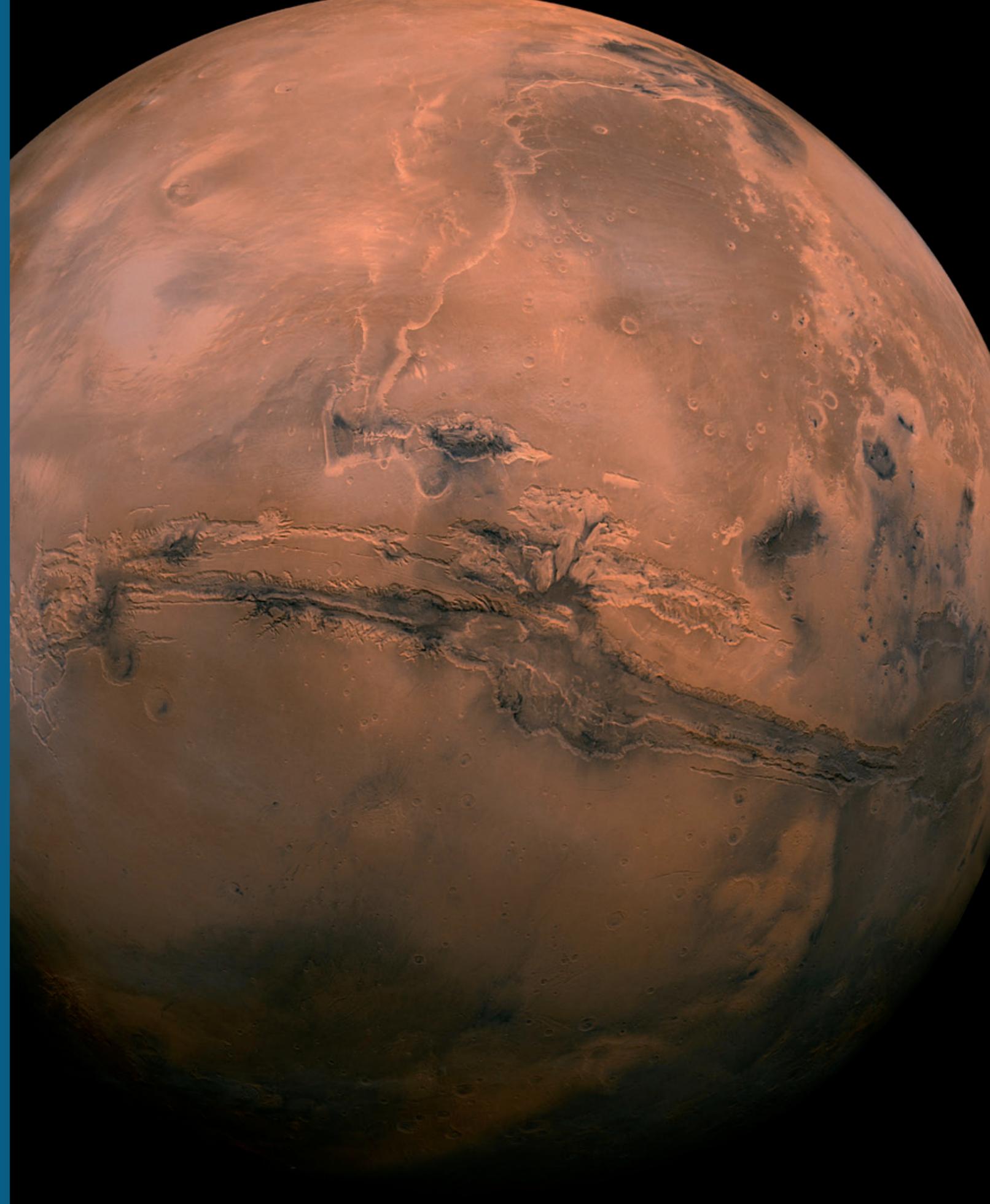
ERICH MEYER war als Elektrotechniker in der Industrie tätig. Über dreißig Jahre lang beobachtete und fotografierte er den Sternenhimmel und erlangte durch die Entdeckung und präzise Vermessung von Asteroiden und Kometen auch in der Fachwelt Anerkennung. Seit seiner Pensionierung widmet er sich der Geschichte der Astronomie und findet in seiner Heimatstadt Linz in der Person von Johannes Kepler ein reiches Betätigungsfeld für seine Forschungen.

1 Vgl. Lemcke, Mechthild: Johannes Kepler. Hamburg: rororo 1995, S. 65.
2 Caspar, Max & Krafft, Fritz: Astronomie Nova. Wiesbaden: marixverlag 2005, S. 347.
3 Ebd., S. 349.
4 Ebd. S. 509.
5 Ebd., S. 377.

6 Ebd., S. 459.
7 Ebd., S. 490.
8 Vgl. Caspar, Max, Johannes Kepler, Berlin A8 Medienservice (5. Auflage) 2019, S. 156.
9 Vgl. Zitelmann, Arnulf: Keplers Welten, Hamburg: Lau-Verlag 2016, S. 492.

10 Kepler, Johannes: Harmonices Mundi Libri V, Linz 1619, S. 189.
11 Bialas, Volker: Johannes Kepler – Astronom und Naturphilosoph. Linz: Trauner Verlag 2013, S. 169.
12 Vgl. Bastian, Ulrich: Die Eroberung der dritten Dimension – Eine kleine Geschichte der Astronomie. In: Spektrum.de (1.2.2020), online.

Kepler heute



Die Aktualität von Keplers Forschungsmethodik

DIETER B. HERRMANN

Wenn wir von einer ‚bedeutenden Entdeckung‘ sprechen, so meinen wir vor allem den Einfluss, den sie auf den Kanon des weiteren wissenschaftlichen Fortschritts ausgeübt hat. In diesem Sinne dürfen wir Johannes Kepler zweifellos als einen der bedeutendsten Wissenschaftler aller Zeiten bezeichnen. Die von ihm gefundenen und heute nach ihm benannten ‚Keplerschen Gesetze‘ waren nicht nur die ersten mathematisch formulierten Regeln für die Bewegung der Planeten, sondern zugleich ein wichtiges Bindeglied zwischen der heliozentrischen Hypothese des Copernicus und der Himmelsmechanik Isaac Newtons. Ihre historische Reichweite erstreckt sich bis in die Raumfahrt unserer Tage.

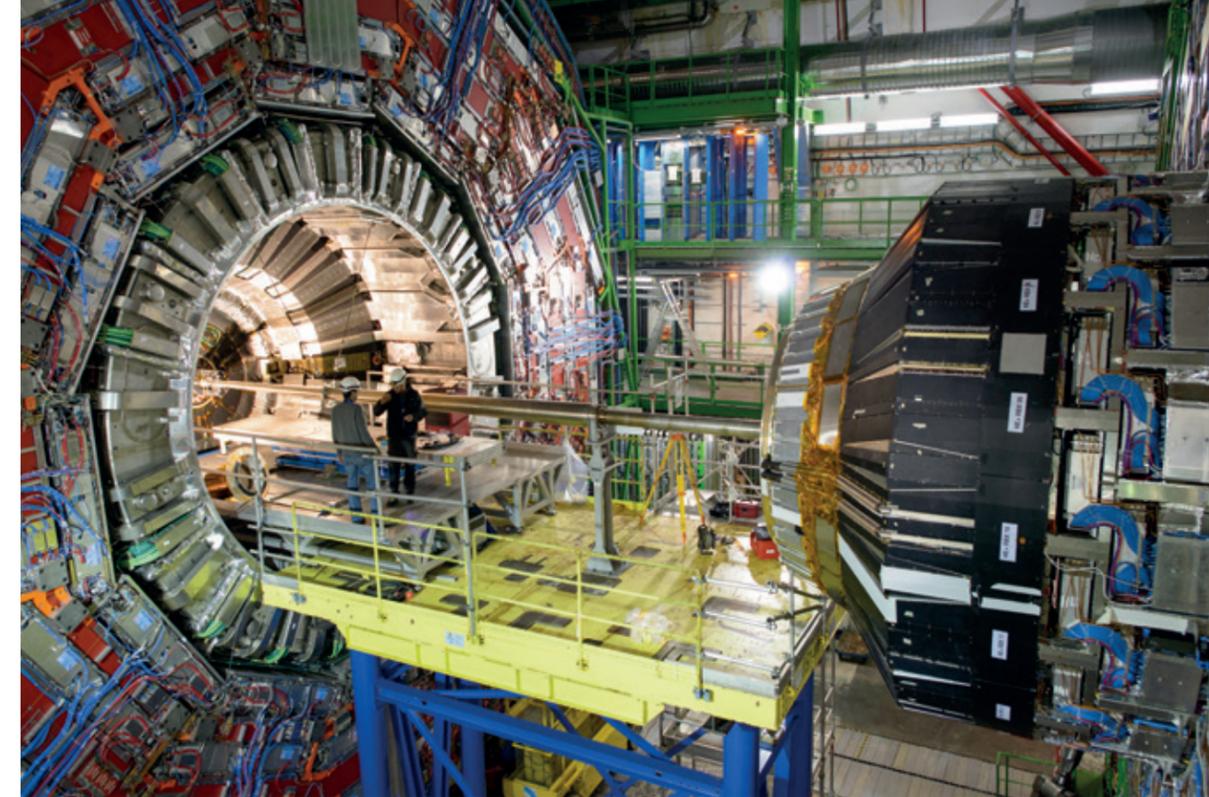
Es ist ein historischer Glücksfall, dass uns Kepler nicht allein seine Forschungsergebnisse überliefert hat, sondern auch die Motive, die ihn leiteten, sowie die Wege und Irrwege, die er dabei beschritten hat. Dadurch ist es uns möglich, einen tiefen Einblick in seine Forschungsmethoden zu gewinnen, was auf so direkte Weise nur sehr selten möglich ist. Doch gerade Keplers Forschungswege wurden zum Gegenstand heftiger Auseinandersetzungen unter den Gelehrten, die bereits zu seinen Lebzeiten begannen und bis heute anhalten.

Schon Keplers Zeitgenosse Galilei hatte erklärt, wir dürften von der Natur nicht verlangen, „sich dem anzubequemen, was wir für die beste Ordnung und Wesensart halten mögen, sondern wir müssen unseren Intellekt an ihren Hervorbringungen ausrichten.“¹ Und der Universalgelehrte Athanasius Kircher hatte Keplers letztes großes Werk, die ‚Rudolphinischen Tafeln‘, mit den Worten kommentiert, dass ein „bloßer Mathematiker falsche Prinzipien als gewisse Grundlagen benutzen könne, um daraus die sichersten Angaben abzuleiten, wenn auch die Sache, die er zugrunde lege die falscheste (falsissima) [...] und in der Natur nicht aufzufinden sei.“² Hier kommt einerseits die kritische Distanz gegenüber dem Harmoniegedanken deutlich zum Ausdruck, wäh-

rend gleichzeitig dessen Bedeutung als heuristisches Prinzip gewürdigt wird. Auch Tycho Brahe hatte den Harmoniegedanken bereits nach dem Erscheinen des ‚Mysterium Cosmographicum‘ abgelehnt - nicht Kepler selbst gegenüber, sondern in einem Brief an dessen Lehrer Michael Mästlin. Eine Verbesserung der Astronomie sei nicht durch ‚reguläre Körper‘ zu erreichen, sondern ausschließlich durch exakte Beobachtungen.

Als im 18. Jahrhundert die Diskussionen über ein Abstandsgesetz für die Planeten des Sonnensystems, die sog. Titius-Bodesche Reihe, begannen, flammten die Kritiken an Keplers Forschungsmethodik erneut auf.³ So schrieb der Direktor der Sternwarte Gotha, Franz Xaver von Zach: „Man hat Ursache, mit analogischen Schlüssen umso mehr auf seiner Hut zu sein, da uns selbst das merkwürdige Beispiel unsers großen Meisters zur Warnung dienen muss, dass man einer zu geschäftigen Einbildungskraft nicht zu viel trauen darf. Man kann wohl ihr Spiel Dichtern erlauben, aber einer gewissen Gattung von Naturforschern muss man es verargen, welche die Natur auf dem Glatteis des Mystizismus zu ertappen gedenken [...]“⁴ Und dann direkt auf Kepler bezogen: Dieser habe sich an astronomischen Träumereien öfters ergötzt und seiner „feurigen Einbildungskraft zügellosen Lauf“ gelassen, doch für den 1781 entdeckten Uranus ebenso wie für den neuen Planeten zwischen Mars und Jupiter hätten Euklid und die Natur keinen regulären Körper übrig gelassen, wodurch „auf einmal Keplers sinnreiches Ideal ganz zernichtet“ worden wäre.⁵ Besonders drastisch äußerte sich der berühmte französische Mathematiker und Astronom Jérôme Lalande zu Keplers Forschungsmethodik. Es sei „betäubend für den menschlichen Geist, zu sehen, wie selbst dieser große Mann in seinen Werken sich in fantastischen Spekulationen gefällt und sie gleichsam als das Wesen und die Seele der Astronomie betrachtet.“⁶

Doch im 19. Jahrhundert wendete sich das Blatt. Der Leipziger Astrophysiker Karl Friedrich Zöllner führte all diese kritischen Einwände auf einen



Am Teilchenbeschleuniger LHC (Large Hadron Collider) an der europäischen Großforschungseinrichtung CERN in Genf versuchen Forscherinnen und Forscher mit Detektoren supersymmetrische Teilchen nachzuweisen. Bild: CERN

Mangel an Kenntnis der Grundprinzipien der Erkenntnistheorie bei der Mehrzahl unter den Vertretern der exakten Wissenschaften zurück.⁷ In seinen ‚Beiträgen zur Geschichte und Theorie der Erkenntnis‘ meinte er daher, es sei an der Zeit, Kepler „als ein Phänomen in seiner Totalität begreifen zu lernen.“⁸ Und dann folgt eine Erkenntnis, die uns unmittelbar in die heute aktuelle Forschungssituation führt. Zöllner stellt nämlich fest: „Wenn in der Tat die so entschiedene Neigung und der so überwältigende Hang zur Spekulation einen der hervorstechendsten Charakterzüge Keplers bildet, so werden wir wohl gezwungen sein, zwischen dieser Eigenschaft und seiner intellektuellen Leistungsfähigkeit ein Kausalverhältnis vorauszusetzen.“⁹ Auch William Whewell ergriff Partei für Kepler, indem er feststellte, „dass große Entdeckungen gewöhnlich nicht ohne Wagnis des kühnen Entdeckers aufzutreten pflegen“. In der Tat sind heuristische Prinzipien unverzichtbar, denn sie leiten den Forscher zu Mutmaßungen, die dann an der Realität überprüft werden müssen. Und weil Kepler ungeachtet seiner heuristischen Vorannahmen niemals den Tatsachensinn des exakten Wissenschaftlers aus den Augen verlor, halte ich es auch für völlig unzutreffend, ihn als einen ‚pythagoreischen Mystiker‘ zu bezeichnen.¹⁰

Auch heute ist die Majorität bedeutender Physiker vom harmonischen Urgrund des Universums überzeugt, meist in Form vorherrschender Symmetrieprinzipien. Sie stellen ein wesentliches Leitprinzip ihrer Forschungen dar. Die bedeutendsten Erkenntnisse der jüngeren Vergangenheit, z. B. die Entdeckung der Antiteilchen, die Relativitätstheorien Einsteins oder die subatomare Materiestruktur, d. h. die Entdeckung der Quarks, sind eindrucksvolle Belege für die Fruchtbarkeit dieser Vorgehensweise. Einstein ist ein herausragendes Beispiel. Er hat in einem Text anlässlich des 300. Todestages von Kepler im Jahre 1930 seine Bewunderung für diesen ‚herrlichen Mann‘ - wie er ihn nennt - bekenntnishaft dargelegt. Doch er sprach in diesem Zusammenhang auch von einem Gefühl der Bewunderung und Ehrfurcht für die „rätselhafte Harmonie der Natur, in die wir hineingeboren sind. Die Menschen erdachten schon im Altertum Linien denkbar einfachster Gesetzmäßigkeit. Darunter waren neben der geraden Linie und dem Kreise in erster Linie Ellipse (auch Hyperbel). Diese letzteren Formen sehen wir in den Bahnen der Himmelskörper realisiert) [...]. Es scheint, dass die menschliche Vernunft die Formen erst selbständig konstruieren muss, ehe wir sie in den Dingen nachweisen können.“¹¹ Auch die gerade



Abb. 1 Der Wittenberger Physiker Johann Daniel Titius stellte die Abstände der Planeten unseres Sonnensystems 1766 in einer empirisch gefundenen Reihe dar, die später durch Johann Elert Bode bekannt gemacht wurde und heute Titius-Bodesche Reihe genannt wird. Portrait von Johann Samuel Ludwig Halle nach einem Gemälde von Benjamin Calau, 1770. Wikipedia Commons

Abb. 2 Franz Xaver von Zach, Direktor der Sternwarte Gotha, sah in der 1801 erfolgten Entdeckung des Kleinplaneten Ceres die Reihe als bestätigt an und polemisierte in scharfen Worten gegen den jungen Hegel, der eine andere Reihe vorgeschlagen hatte. In diesem Zusammenhang kritisierte er auch Keplers spekulative Denkweise. Bild aus Monatl. Correspondenz 1800, Wikipedia Commons

Abb. 3 Karl Friedrich Zöllner führte einen Umschwung in der Bewertung von Keplers Forschungsmethodik herbei und setzte sich für die Anwendung heuristischer Verfahren in der Forschung ein. Wikipedia Commons

aktuelle Suche nach supersymmetrischen Teilchen verweist auf diesen von den Forschern geradezu leidenschaftlich benutzten ‚Kompass‘. Andererseits zeigt gerade das Beispiel Keplers, dass solche a-priori-Annahmen zwar als Leitprinzipien erfolgreich sein können, aber dennoch nicht richtig sein müssen. In ihrem Buch ‚Das hässliche Universum‘¹² hat die Physikerin Sabine Hossenfelder deshalb auch den sog. ‚ästhetischen Wahrheitskriterien‘ den Kampf angesagt.¹³ Allerdings ist ihr Diktum von der Unbrauchbarkeit symmetrischer Prinzipien für die Forschung selbst nur eine These, weil die tatsächlichen Konstruktionsprinzipien der Natur, wie sie in den heuristischen Annahmen der Protagonisten vorausgesetzt werden, gar nicht bekannt sind.

So provoziert Keplers Forschungsmethodik auch heute noch eine Fülle aktueller philosophischer erkenntnistheoretischer Diskurse, bis hin zu der Frage nach archetypischen Vorstellungen, die uns Menschen vielleicht bereits eingeboren sind.

Die Geschichte der Wissenschaften aber lehrt uns: die Wege der Erkenntnis sind wundersam. Ratio allein hat selten etwas und oft gar nichts bewirkt. Ohne Intuition und leitende Vorannahmen ist wohl noch keine einzige bedeutende wissenschaftliche Entdeckung gelungen. Keplers Aphorismus „Mir kommen die Wege, auf denen die Menschen zur Erkenntnis der himmlischen Dinge gelangen, fast ebenso bewunderungswürdig vor wie die Natur der Dinge selbst“¹⁴, ist heute so zutreffend wie zu jener Zeit, als Kepler ihn niederschrieb. ♦



PROF. DR. DIETER B. HERRMANN war bis 2004 Direktor der Archenhold-Sternwarte in Berlin und ist Gründungsdirektor des Zeiss-Großplanetariums Berlin.

1 Zit. nach Albrecht Fölsing, Galileo Galilei, München-Zürich 1983, S. 299
2 Zit. nach Fritz Krafft, Die Keplerschen Gesetze im Urteil des 17. Jahrhunderts, In: Rudolf Haase (Hrsg.), Kepler-Symposium. Zu Johannes Keplers 350. Todestag, Linz 1981, S. 81
3 Vgl. Dieter B. Herrmann, Die Harmonie des Universums, Stuttgart 2017, S. 126 ff.
4 Freyherr von Zach, Über einen zwischen den Planeten Mars und Jupiter längst vermutheten nun wahrscheinlich entdeckten neuen Hauptplaneten unseres Sonnen-Systems, Monatliche Correspondenz zur Beförderung der Erd- und Himmelskunde 1801, (Sonderdruck, S. 8)
5 Ebd., S. 9

6 Zitiert nach J. C. F. Zöllner, Über die Natur der Cometen, Leipzig 1872, S. XVI
7 Johann Carl Friedrich Zöllner, Über die Natur der Cometen, Leipzig 1872 S.VIII
8 Ebd., S. XVIII
9 Ebd.
10 https://de.wikipedia.org/wiki/Johannes_Kepler#Grundlegende_Ansichten
11 Albert Einstein über Kepler, Frankfurter Zeitung, 9. November 1930.
12 Sabine Hossenfelder, Das hässliche Universum, Frankfurt/M. 2018
13 Ebd., S. 32 f.
14 Johannes Kepler, Astronomie Nova (1609), Übersetzung von Max Caspar, Keplers Gesammelte Werke, Bd. III, S.

Vom Somnium bis in die Zukunft der Raumfahrt

GÜNTHER HASINGER

Somnium, oder ‚Der Traum vom Mond‘, ist eine in lateinischer Sprache verfasste utopische Geschichte von Johannes Kepler, in der er sehr realistisch die Mondfahrt zu einer lunaren Zivilisation beschreibt und detailliert die Astronomie auf diesem Himmelskörper diskutiert. Bestärkt wurde Kepler dabei durch die Beobachtungen seines Zeitgenossen Galileo Galilei, der den Erdtrabanten zum ersten Mal mit einem Fernrohr untersucht und dabei eine eigene Welt mit Kratern, Gebirgen und Tiefen entdeckt hatte. Somnium wurde um das Jahr 1609 begonnen und erst 1634 posthum von Keplers Sohn Ludwig veröffentlicht. Detailliert beschreibt Kepler den Weg zu dem Himmelskörper, der „Fünzig Tausend deutsche Meilen weit im Aether liegt“ und nur zur Zeit einer Mondfinsternis mit Hilfe außerirdischer Geister angetreten werden kann. „Der ganze Weg, so lang er ist, wird in einer Zeit von höchstens 4 Stunden zurückgelegt. [...]“ Scharenweise stürzen sich Geister auf ‚den Auserwählten‘ Raumfahrer, „unterstützen ihn alle und heben ihn schnell empor. Diese Anfangsbewegung ist für ihn die schlimmste, denn er wird gerade so emporgeschleudert, als wenn er durch die Kraft des Pulvers gesprengt über Berge und Meere dahinflöge. Deshalb muss er zuvor durch Opiate betäubt und seine Glieder sorgfältig verwahrt werden, damit sie ihm nicht vom Leibe gerissen, vielmehr die Gewalt des Rückschlages in den einzelnen Körpertheilen vertheilt bleibt. Sodann treffen ihn neue Schwierigkeiten: ungeheure Kälte sowie Athemnoth; gegen jene schützt uns unsere (die der Geister, Anmerkung des Verfassers) angeborene Kraft, gegen diese ein vor Nase und Mund gehaltener feuchter Schwamm.“¹ Mit erstaunlicher Klarheit sieht Kepler die Herausforderungen der astronautischen Raumfahrt voraus, und die physikalischen Randbedingungen auf der Mondoberfläche, zum Beispiel die riesigen Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht, das Zwielicht in den Polarregionen und die Tatsache, dass man von der Rückseite des Mondes aus niemals die Erde sehen kann. Jegliches Leben auf dem Mond müsste tief unter der Oberfläche verborgen sein.

Kepler war natürlich noch nicht klar, dass Jahrhunderte später sämtliche Raumfahrt auf der Anwendung seiner physikalischen Gesetze beruhen würde. Die ersten Schritte zur Verwirklichung von Keplers Traum hatten 1959, kurz nach dem Sputnik-Schock, die Sowjets mit ihren Luna-Sonden gemacht. Die dritte Mondsonde, Luna 3, war mit einer Masse von etwa 280 kg viel größer als jedes andere Raumschiff der damaligen Zeit und sollte die ersten Bilder von der Rückseite des Mondes auf die Erde bringen. Dazu mussten die sowjetischen Ingenieure eine ganze Reihe phantastischer neuer Technologien entwickeln. Um scharfe Fotos zu bekommen, mussten sie das Raumschiff in drei Achsen stabilisieren und entwickelten dazu die heute gängige Drallrad-Lageregelung, die in einer Entfernung von 6.200 km von der Mondoberfläche aktiviert wurde. Dann wurden insgesamt 29 Fotos auf temperaturbeständigen, strahlungsgehärteten Filmen aufgenommen². Diese Bilder wurden noch an Bord in einem kleinen Chemie-Labor entwickelt. Danach wurden die Fotos in einen Scanner übertragen, der sie mithilfe einer Kathodenstrahlröhre in elektrische Signale umwandelte. Zu diesem Zeitpunkt war Luna 3 aber zu weit von der Erde entfernt, um die Signale direkt zu übertragen. Deshalb musste die Sonde irgendwie zur Erde zurückkehren, was bisher kein Raumschiff vom Mond aus versucht hatte. Hier kommt wieder Kepler ins Spiel. Um zurück zur Erde zu fliegen, führte Luna 3 das erste Schwerkraft-Schleudermanöver eines von Menschenhand gebauten Fahrzeugs durch. Die Flugbahn und die Umlaufbahn von Luna 3 wurden durch die Schwerkraft des Mondes gerade so weit angepasst, dass die Raumsonde über die nördliche Hemisphäre an der Erde vorbeifliegen und sowjetische Bodenstationen passieren würde. Während dieser Zeit übermittelte das Raumfahrzeug 17 Fotos zum Boden – die ersten, noch relativ unscharfen Bilder von der Rückseite des Mondes. Wenige Tage später ging der Kontakt zur Sonde verloren.

1 Aus der Übersetzung von Ludwig Günther, 1898 <http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/volltextserver/15537/1/traum.pdf>

2 Einem Internet-Kommentar habe ich entnommen, dass die Sowjetunion damals nicht in der Lage war, selbst strahlungsgehärteten Film zu produzieren, der die Anforderungen für die Luna 3 Mission erfüllte. Sie mussten diesen deshalb aus einem der abgeschossenen amerikanischen Spionageballons des Projects Genetrix entnehmen.

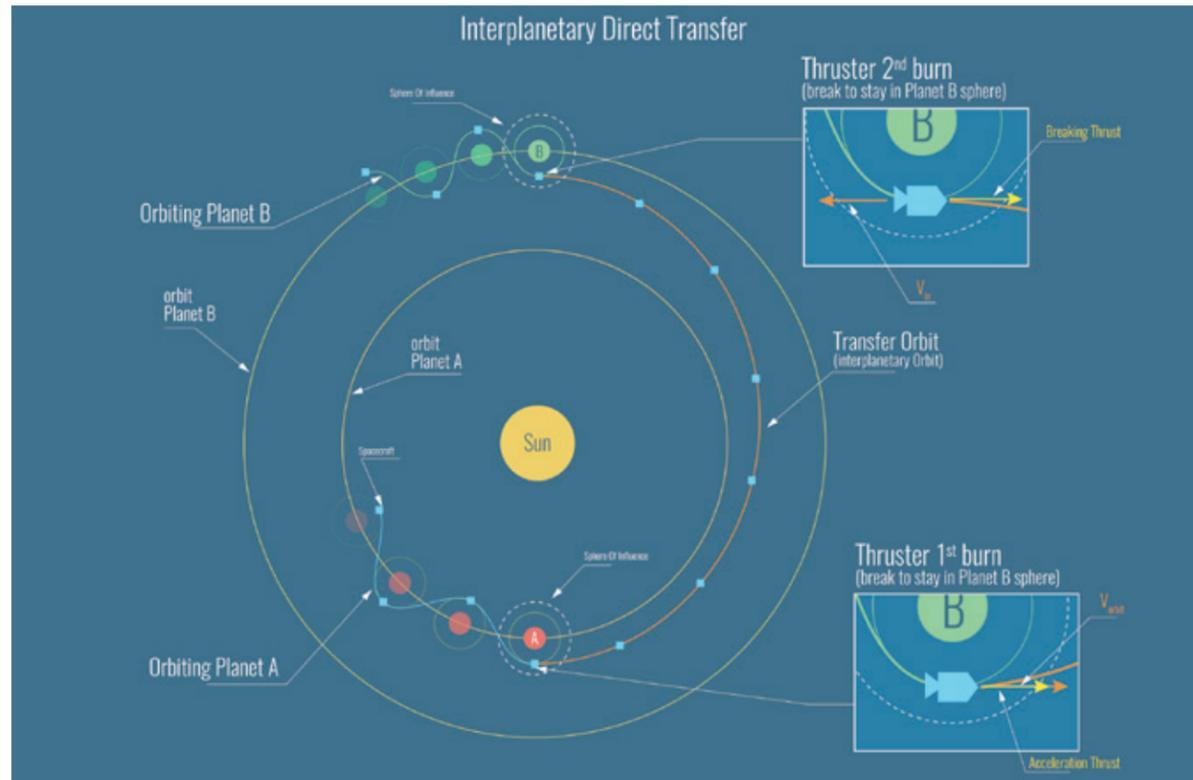


Abb. 1: Direkter Transfer eines Raumflugkörpers zwischen zwei Planeten. ESA

Interplanetare Kreuzfahrt³

Himmelsmechanik und Raumschiffnavigation sind im Grunde eine Frage der Energie unter Anwendung der Kepler'schen Gesetze. Tatsächlich ist das Gleichgewicht zwischen der Anziehung der Körper (dem Gravitationspotential) und den Geschwindigkeiten des Raumfahrzeugs (der kinetischen Energie) der entscheidende Punkt, um eine Flugbahn im Weltraum zu definieren. Nichts steht still, alles bewegt sich. Unsere Sonne kreist um das Zentrum der Galaxie (unsere Milchstraße) und folgt so diesem Prinzip. Planeten finden ihr eigenes Gleichgewicht, wenn sie um die Sonne kreisen, und dasselbe gilt für die Monde, die ein Gleichgewicht mit ihren Mutterplaneten finden. In ähnlicher Weise bewegt sich ein Raumfahrzeug im Weltraum und folgt der durch dieses Gleichgewicht beschriebenen Flugbahn. Aber die Schwerkraft der weiter entfernten Körper verschwindet nicht, wenn sich die Sonde einem anderen nähert. Wenn wir uns also mit der Anziehungskraft mehrerer Körper befassen, können wir die-

ses Problem dadurch angehen, dass wir den massereichsten Körper als den zentralen Gravitationskörper und die anderen als Störungen betrachten. Wir nennen den Einflussbereich eines Körpers den Teil des Raumes, in dem die dominierende Anziehungskraft von diesem Körper selbst stammt. Für die Erde hat diese Sphäre einen Radius von etwa 1 Million km und ist definiert als die Region, in der die Anziehungskraft der Erde größer ist als die der Sonne.

Ein direkter Transfer einer Sonde zwischen zwei Planeten kann mit Hilfe eines Triebwerks erreicht werden. Diese Technik wird heute regelmäßig zum Beispiel bei Mars-Missionen angewandt. Ein Triebwerk kann die kinetische Energie des Raumfahrzeugs ändern, damit es auf seinem Weg näher oder weiter entfernt von dem anziehenden Körper bewegt werden kann. Die Verwendung von Triebwerken erfordert jedoch große Mengen an Treibstoff, wodurch die Gesamtmasse des Raumfahrzeugs deutlich erhöht wird. Der zweite Hauptsatz der Mechanik besagt aber

³ Mit wichtigen Beiträgen von Johannes Benkhoff, dem Projektwissenschaftler von BepiColombo

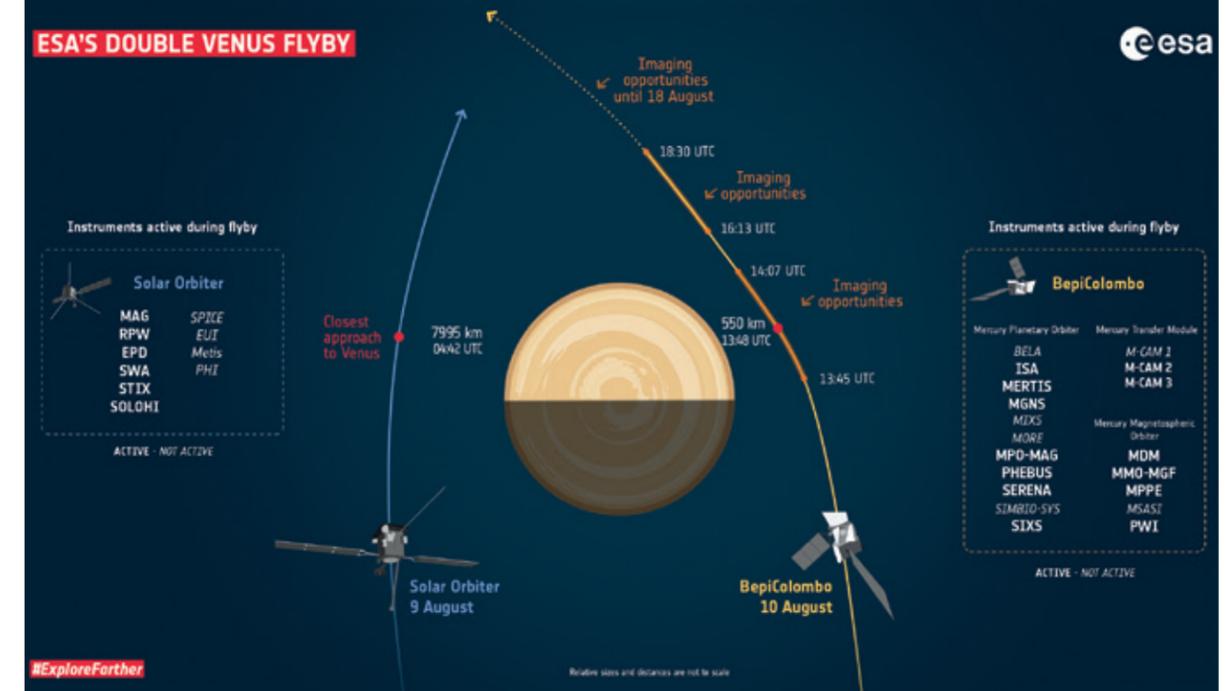


Abb. 2: Doppelter Vorbeiflug der Sonden SolarOrbiter und BepiColombo an der Venus im August 2021. ESA

auch, dass je größer die Masse eines Körpers ist, desto mehr Kraft wird benötigt, um seine Geschwindigkeit zu ändern. Dies bedeutet, dass der Treibstoffverbrauch minimiert werden muss. Das Flugdynamikteam der ESA ist dafür verantwortlich, die optimalen Flugbahnen zu finden, die es einem Raumfahrzeug mit einer bestimmten Masse und Geschwindigkeit ermöglicht, sich von einem Punkt A zu einem Punkt B im Weltraum zu bewegen, zum Beispiel von der Erde zum Mars (siehe Abbildung 1).

Auf dem Weg in das innere Sonnensystem ist der direkte Transfer nur bedingt möglich, so dass wir auf die Technik des Schwerkraft-Schleudermanövers zurückgreifen müssen, um Treibstoff zu sparen. Das Konzept des planetaren Vorbeiflugs zur Gravitationsunterstützung stammt von dem italienischen Ingenieur und Mathematiker Giuseppe 'Bepi' Colombo. Im Jahr 1970 wurde Colombo, damals Professor in Padua, zu einer Konferenz im Jet Propulsion Laboratory der NASA in Pasadena, Kalifornien, eingeladen, um die Mission Mariner 10 zum Merkur vorzubereiten. Als er den ursprünglichen Missionsplan sah, stellte er fest, dass die Umlaufdauer der Raumsonde nach dem ersten Vorbeiflug an Merkur sehr nahe an der doppelten Umlaufperiode des Planeten liegen würde und dass, mit präzise gewählten Bahnparametern während des ersten Vorbeifluges zur Gravitationsunterstützung, zwei weitere Vorbeiflüge am Merkur ermöglicht wer-

den könnten – letztendlich eine ähnliche Überlegung wie bei Luna 3. Die aktuelle europäisch-japanische Mission zum Merkur, deren Flugbahn auf multiplen Vorbeiflügen an mehreren Planeten beruht, wurde ihm zu Ehren 'BepiColombo' benannt. Die Sonde Solar Orbiter baut ebenfalls auf Planeten-Schleudern für ihre Trajektorie. Im August 2021 fliegen beide Sonden in kurzem Abstand an der Venus vorbei (siehe Abbildung 2).

Da ein Raumfahrzeug beim Start in Bezug auf die Masse eingeschränkt ist, kann es nicht mehr als eine bestimmte Menge an Treibstoff aufnehmen. Im Allgemeinen erfordert das Überbrücken der Entfernungen zwischen den Planeten eine riesige Menge Treibstoff. Dies ist der Grund, warum die Verwendung der planetarischen Vorbeiflüge eine sehr intelligente Lösung ist, um die unvermeidlichen Massenbeschränkungen beim Start auszugleichen. Wenn ein Raumfahrzeug einen planetarischen Einflussbereich betritt und verlässt, ändert sich seine Energie in Bezug auf den Planeten nicht, während sie sich in Bezug auf die Sonne ändert. Tatsächlich findet während des Anflugs ein Energieaustausch mit dem Planeten statt: Die kinetische Energie des Raumfahrzeugs steigt schrittweise bis zu einem Maximum an, während gleichzeitig die potentielle Gravitationsenergie abnimmt. Das Gegenteil passiert, wenn das Raumschiff den Planeten verlässt. Die Geschwindigkeit des Raumfahrzeugs

relativ zum Planeten ist jedoch bei Ankunft und Abflug gleich; während die Geschwindigkeit des Raumfahrzeugs relativ zur Sonne in Abhängigkeit von der Geometrie des Anflugs erhöht oder verringert wird. Natürlich gilt weiterhin der Energieerhaltungssatz: Daher geht die vom Raumfahrzeug während des Vorbeiflugs gewonnene kinetische Energie dem Planeten verloren, da seine Geschwindigkeit während des Vorbeiflugs in Bezug auf die Sonne verringert wird (aber da die Masse des Planeten um den Faktor 1021 größer ist als die des Satelliten, ist dieser Energieverlust vollkommen vernachlässigbar).

BepiColombo

BepiColombo, eine in Zusammenarbeit mit Japan durchgeführte ESA-Mission, wird den sonnennächsten Planeten Merkur erforschen. Mit zwei Raumfahrzeugen ist BepiColombo eine große und kostspielige Mission, einer der ‚Eckpfeiler‘ im langfristigen Wissenschaftsprogramm ‚Cosmic Vision‘ der ESA. Die Mission stellt enorme, aber spannende Herausforderungen. Alle bisherigen interplanetaren Missionen der ESA führten in relativ kalte Teile des Sonnensystems. Im Gegensatz dazu entsendet die Agentur mit BepiColombo erstmalig eine Raumsonde in eine Region, die noch heißer ist als die Venus. Merkur ist ein mysteriöser Planet, der uns noch viele Rätsel aufgibt. BepiColombo wird uns wertvolle Informationen liefern, die unser Verständnis des Planeten selbst und der Bildung unseres Sonnensystems deutlich verbessern können. Bisher haben nur zwei Missionen der NASA den Planeten besucht: die Sonde Mariner 10, die 1974 bis 1995 dreimal vorbeiflog und die ersten Nahaufnahmen des Planeten lieferte, und die MESSENGER-Raumsonde, die drei Vorbeiflüge durchführte (zwei im Jahr 2008 und eine im Jahr 2009) und den Planeten dann zwischen 2011 und 2015 aus der Umlaufbahn untersuchte. BepiColombo besteht aus insgesamt drei unabhängigen Einheiten. Die beiden Raumsonden, der ‚Mercury Planetary Orbiter‘ (MPO) der ESA und der ‚Mercury Magnetospheric Orbiter‘ (MMO, auch Mio genannt) der japanischen Raumfahrtbehörde JAXA, sind bestückt mit wissenschaftlichen Instrumenten und reisen als ein zusammengesetztes Raumfahrzeug mit dem ‚Mercury Transfer Module‘ (MTM) zum Merkur, wobei das MTM der ESA für Energie und Antrieb sorgt. Eine große Herausforderung für die Mission ist die enorme Schwerkraft der Sonne, die es schwierig macht, ein Raumschiff in eine stabile Umlaufbahn um den Merkur zu bringen. Hierzu wird mehr Energie benötigt, als eine Mission zum Pluto zu schicken. Nach dem Start und der Flucht aus der „Schwerkraftfalle“ der Erde muss BepiColombo auch ständig die Anziehungskraft der Sonne kompensieren. Mit Xenon angetriebene Ionen-Triebwerke auf dem MTM, mit einer geringeren Kraft, aber einem deutlich höheren Wirkungsgrad als konventionelle Triebwerke, sorgen für den erforderli-

Wenn das Raumfahrzeug schließlich die Zielplanetenumlaufbahn erreicht, kann ein spezifisches Manöver in der Nähe des Planeten die interplanetare Umlaufbahn des Raumfahrzeugs modifizieren, indem einfach kinetische Energie vom/zum Planeten übertragen wird. Vorbeiflüge können in beide Richtungen verwendet werden, um die Geschwindigkeit eines Raumfahrzeugs zu erhöhen oder zu verringern. Energie zu verringern ist eine Möglichkeit, die Halbachse der Bahn zu verringern, das heißt, eine engere Flugbahn um den Zentralkörper zu erreichen. Diese Technik wird bei der Reise in das innere Sonnensystem angewandt. Umgekehrt bedeutet Energie zu gewinnen, die große Halbachse der Bahn zu vergrößern, um sich vom Zentralkörper wegbewegen, also auf Reisen in das äußere Sonnensystem.

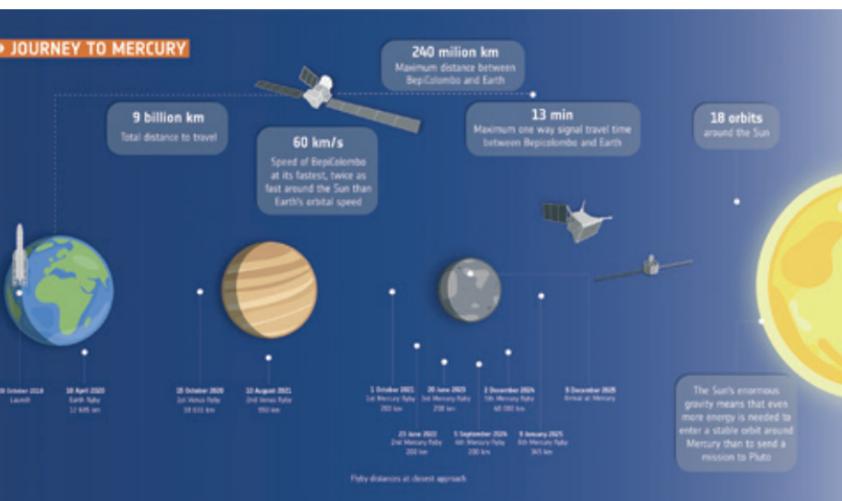
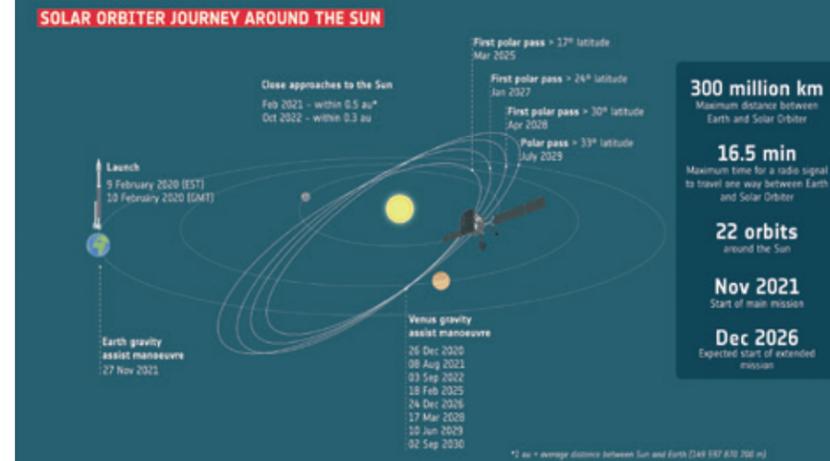


Abb. 3: Trajektorie der Sonde BepiColombo auf ihrer Reise zum Merkur ESA

chen Schub über lange Zeiträume der Reisephase. Der solarelektrische Antrieb zusammen mit der Technik des Schwerkraft-Schleudermanövers sind bei mehreren Vorbeiflügen an Planeten missionsentscheidend für die Reise zum Merkur. Ohne sie wäre es nicht möglich, zwei Raumfahrzeuge der Masse von MPO und MMO mit einer konventionellen Trägerrakete zum Merkur zu bringen. Die Ionentriebwerke auf BepiColombo sammeln den höchsten Gesamtimpuls (Schubwert multipliziert mit Betriebsstunden), der jemals in einer Weltraummission erreicht wurde.

BepiColombo wurde im Oktober 2018 gestartet. Die Sonde wird auf ihrer 9 Milliarden Kilometer langen Reise zum Merkur 9 Vorbeiflüge durchführen (siehe Abbildung 3). Der letzte Vorbeiflug an der Venus fand im August 2021 statt, nur etwas mehr als einen Tag, nachdem Solar Orbiter ebenfalls an der Venus vorbeigeflogen ist (siehe Abbildung 2). Sechs weitere Gravitations-Schleuder-Manöver finden am Merkur statt, bevor die Sonde im Dezember 2025 die endgültige Umlaufbahn um den Merkur erreicht. Bei jedem dieser Vorbeiflüge werden mehrere Kilogramm Xenon-Treibstoff eingespart; ein Mehrfaches des Xenon-Treibstoffvorrates, der für die Elektro-Mobilität im All zur Verfügung steht.

Bei der Annäherung an den Merkur wird sich das Transfermodul trennen und die beiden Raumfahrzeuge, die immer noch zusammen sind, werden in eine polare Umlaufbahn um den Planeten gebracht. Die Orbit-Höhe wird mit den Triebwerken von MPO angepasst, bis die gewünschte elliptische polare Umlaufbahn des Mio von 590 x 11640 km über dem Planeten erreicht ist. Dann werden sich MPO und Mio trennen und MPO wird mit seinen Triebwerken auf eine Umlaufbahn von 480 x 1500 km absinken. Die Feinabstimmung der Umlaufbahnen wird voraussichtlich drei Monate dauern, bis die wissenschaftliche Hauptmission im Frühjahr 2026 beginnen kann. Das MPO wird die Oberfläche und die innere Zusammensetzung des Planeten untersuchen, und Mio wird die Magnetosphäre von Merkur untersuchen, also die Region des Weltraums um den Planeten, die von seinem Magnetfeld beeinflusst wird.



Solar Orbiter

Die Europäische Raumfahrtagentur hat eine beispielhafte Tradition in der Untersuchung der Sonne und der Heliosphäre. Seit Anfang der 1990er Jahre untersuchen sechs speziell für diesen Zweck in Europa entwickelte Raumsonden die Sonne und ihre Auswirkungen auf unseren Planeten: Ulysses, SOHO und Cluster – die letzteren beiden Missionen sind immer noch aktiv! Mit Solar Orbiter gehen wir nun noch einige Schritte weiter, einerseits möglichst nah an die Sonne heran, um schärfere Bilder zu erhalten, andererseits erheben wir uns über die Ekliptik hinaus, um die Sonne von oben zu betrachten. Besonders an den Polen unseres Zentralgestirns erwarten wir neue Aufschlüsse darüber, wie die Sonne ihr Magnetfeld erzeugt und was ihren mysteriösen 11-jährigen Zyklus antreibt. Solar Orbiter soll untersuchen, wie die Sonne die Heliosphäre erzeugt und kontrolliert, diese riesige Blase geladener Teilchen, die vom Sonnenwind in das interstellare Medium getragen wird. Die Raumsonde wird In-situ Messungen und Fernerkundungsbeobachtungen kombinieren, um neue Informationen über den Sonnenwind, das heliosphärische Magnetfeld, solarenergetische Teilchen, vorübergehende interplanetare Störungen und das Magnetfeld der Sonne zu gewinnen. Die am 10. Februar 2020 gestartete Mission wird Nahaufnahmen der Sonne in hohen Breitengraden ermöglichen. Solar Orbiter wird eine stark elliptische Umlaufbahn haben – zwischen 1,2 AU im Aphel und 0,28 AU im Perihel – und benutzt Vorbeiflüge an der Venus, um sukzessive die Neigung der Bahn gegenüber der Ekliptik auf bis zu 33° zu erhöhen und damit eine Sichtlinie auf die Pole der Sonne zu erlangen (siehe Abbildung 4).

Abb. 4: Trajektorie von Solar Orbiter mit Venus-Vorbeiflügen zur Anhebung der Bahn-Inklination ESA/S. Poletti

Solar Orbiter ist eine von der ESA geleitete Mission mit starker Beteiligung der NASA. An Bord befinden sich zehn Instrumente, von denen acht von Forschungsinstitutionen aus nationalen Mitteln der ESA-Mitgliedstaaten bereitgestellt wurden. Ein europäisch geführtes Konsortium, das durch nationale Mittel und ESA-Beiträge unterstützt wurde, stellte ein vollständiges Instrument zur Verfügung, während das verbleibende Instrument und ein zusätzlicher Sensor von der NASA bereitgestellt wurden. Solar Orbiter wurde von Cape Canaveral an Bord einer Atlas V 411-Rakete der NASA gestartet.

Dekade der Venus

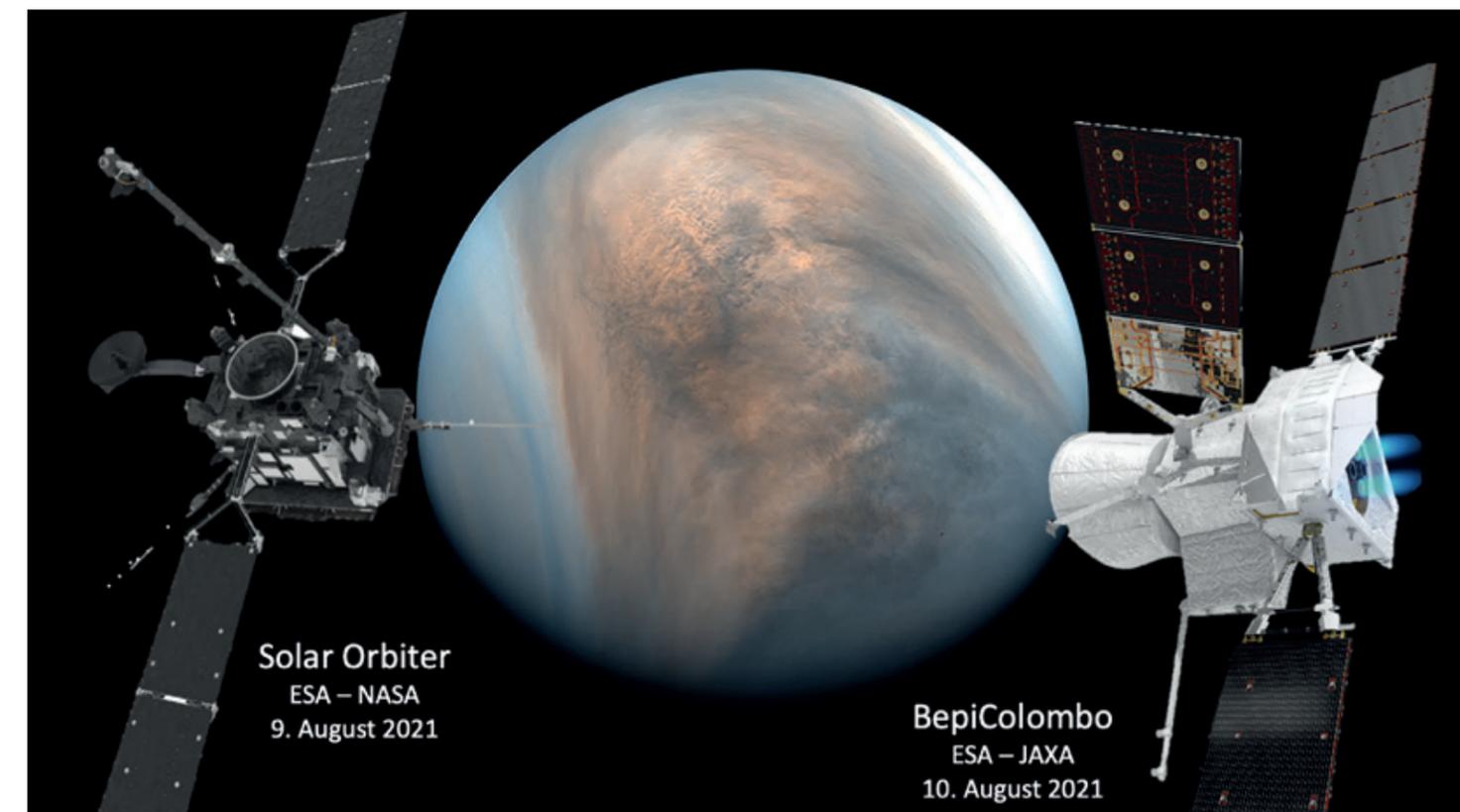
Am 9. August 2021 passierte Solar Orbiter die Venus und etwa 35 Stunden später BepiColombo (siehe Abbildung 5). Zusammen mit der bereits in der Venus-Umlaufbahn kreisenden japanischen Sonde Akatsuki ergab sich damit die einmalige Gelegenheit, Venus aus drei Perspektiven gleichzeitig zu beobachten. Aber im Gegensatz zum Mars, der derzeit von einer internationalen Armada von Raumflugkörpern, Landeeinheiten und Rovern besucht wird, wurde die Venus in den letzten Jahrzehnten etwas stiefmütterlich behandelt. Das hat sich im Frühjahr 2021 dramatisch geändert, als zunächst die NASA die Auswahl gleich zweier neuer Venus-Missionen, VERITAS und DAVINCI+, für ihr Discovery Programm bekannt gab, und kurze Zeit später die ESA EnVision als fünfte M-Mission in ihrem Cosmic Vision Programm auswählte, die in Zusammenarbeit mit der NASA verwirklicht wird. Die drei Missionen, die bis Anfang der nächsten Dekade gestartet werden sollen, sind sehr komplementär zueinander. VERITAS wird eine neue globale hochauflösende Radar-Karte der Venus anlegen. EnVision wird dann insbesondere auf zeitliche Veränderungen der Venus-Oberfläche und damit möglichen Vulkanismus und tektonische Bewegungen abheben, aber auch die Beschaffenheit des Materials unter der Oberfläche und die chemische Zusammensetzung des Bodens und der Atmosphäre im Detail untersuchen. DAVINCI+ ist eine Sonde, die in die Venus-Atmosphäre eintritt und direkt auf der Oberfläche landen soll. Zusammen mit der von der indischen Raumfahrtbehörde ISRO geplanten Mis-

sion Sukrayan-1, die in der zweiten Hälfte dieser Dekade gestartet wird, ergibt sich damit die Chance, ein globales Forschungsprogramm für die Venus zu etablieren. Entsprechende Vereinbarungen zur Zusammenarbeit werden derzeit verhandelt.

Die Eismonde der Gasriesen⁴

Nach der Entdeckung der Galilei'schen Monde des Jupiters im Jahr 1610 durch Galileo blieb das wissenschaftliche Interesse an den Satelliten der Gasriesen dreieinhalb Jahrhunderte lang mäßig. Doch nach den ersten Nahbeobachtungen der Pioneer- und Voyager-Missionen in den 1970er und frühen 1980er Jahren und der überraschenden Entdeckung der Komplexität der Gasriesen-Systeme, einschließlich der extremen Vielfalt ihrer Monde, wuchs das wissenschaftliche Interesse so weit, dass dedizierte Weltraummissionen geplant wurden. Tatsächlich wurden sowohl für die Riesenplaneten als auch für ihre Monde Fragen nach ihrer Entstehung, ihren inneren Strukturen und der Entstehung und Entwicklung der Exosphären und Atmosphären aufgeworfen. Die Wissenschaftler erkannten, dass sie als eigenständige komplexe Systeme betrachtet werden müssen, insbesondere in Bezug auf die Kopplungsprozesse im Zusammenhang mit Gravitations- und elektromagnetischen Wechselwirkungen und ihrer komplexen und dynamischen Plasma-, Gas- und Staubumgebung.

Eine detaillierte Erkundung erfordert Weltraummissionen im Orbit. Abbildung 6 zeigt eine Skizze der Riesenplaneten und ihrer bisherigen Missionen. Die Mission Galileo, die von 1995 bis 2003 den Jupiter umkreiste, erreichte dies, ebenso wie Cassini, der von 2004 bis 2017 den Saturn umkreiste, einschließlich der Huygens-Sonde, die im Januar 2005 auf Saturns größtem Mond Titan landete. Unter den vielen Entdeckungen dieser Explorationsphase waren die überraschendsten Ergebnisse die Entdeckung tiefer Ozeane oder Wasserschichten unter den äußeren Eisschichten der Jupiter-Monde Europa, Ganymed und möglicherweise Callisto und der Saturn-Monde Enceladus und Titan. In diesen zwei Jahrzehnten wurden auch die Exoplaneten entdeckt, und einige Wasserwelten um andere Sterne stellten sich als riesige Nachbildungen der eisigen Monde des Sonnensystems heraus.



Galileo und Cassini ließen trotz der herausragenden wissenschaftlichen Erfolge viele spannende Fragen offen. Um diese ‚ungelösten‘ Fälle klären zu können, ist eine neue Phase der Exploration erforderlich. Eine der auffälligsten Fragen ist die Existenz von tiefen Lebensräumen in den Monden des äußeren Sonnensystems (insbesondere von Enceladus und Europa), ähnlich den schwarzen Rauchern in mittelozeanischen Rücken, die Ende der 1970er Jahre auf der Erde entdeckt wurden. Die vorläufigen Hinweise auf hydrothermale Quellen auf dem Meeresboden von Enceladus, die durch die Cassini-Messung von H₂ nahegelegt wurden, sind ein markantes Beispiel für die Notwendigkeit, das Bewohnbarkeitspotenzial dieser Monde zu untersuchen. Im Kontext des ESA-Strategieprogramms ‚Cosmic Vision‘ beginnt diese Charakterisierung mit der JUICE-Mission, die das Jupiter-System in seiner ganzen Komplexität weiter untersuchen und dann Ganymed als planetarisches Objekt und möglichen Lebens-

raum erforschen wird. JUICE wird der erste Orbiter eines eisigen Mondes sein. In der Zwischenzeit wird die ESA auch eine wichtige Rolle in der internationalen Landschaft stärker fokussierter Missionen wie dem Europa Clipper und der Dragonfly der NASA mit Ziel Europa bzw. Titan spielen.

Jeder Mond ist einzigartig und wirft faszinierende Fragen auf, die innere Zusammensetzung und Strukturen mit der äußeren Umgebung auf eine Weise verbinden, die mit neuester Technologie untersucht werden kann. Ganymed und Callisto, die erst- und drittgrößten Monde des Sonnensystems, besitzen ein sehr komplexes Inneres, möglicherweise mit einer tiefen wasserreichen Flüssigkeitsschicht, die in Struktur und Dynamik noch weitgehend unbekannt ist. Die JUICE-Mission wird beide Monde erkunden. Titan ist besonders aufregend, weil es das einzige Objekt in unserem Sonnensystem mit zwei ausgedehnten Flüssigkeitsschichten ist (ein salziger Ozean unter

Abb 5: Gemeinsamer Vorbeiflug von Solar Orbiter und BepiColombo an der Venus im August 2021. Das Venus-Bild stammt von der japanischen Sonde Akatsuki, die ebenfalls vor Ort ist. Bild: ESA/ATG medialab

⁴ Aus dem ‚Voyage 2050‘ Strategieplan des ESA-Wissenschaftsprogramms (2021)

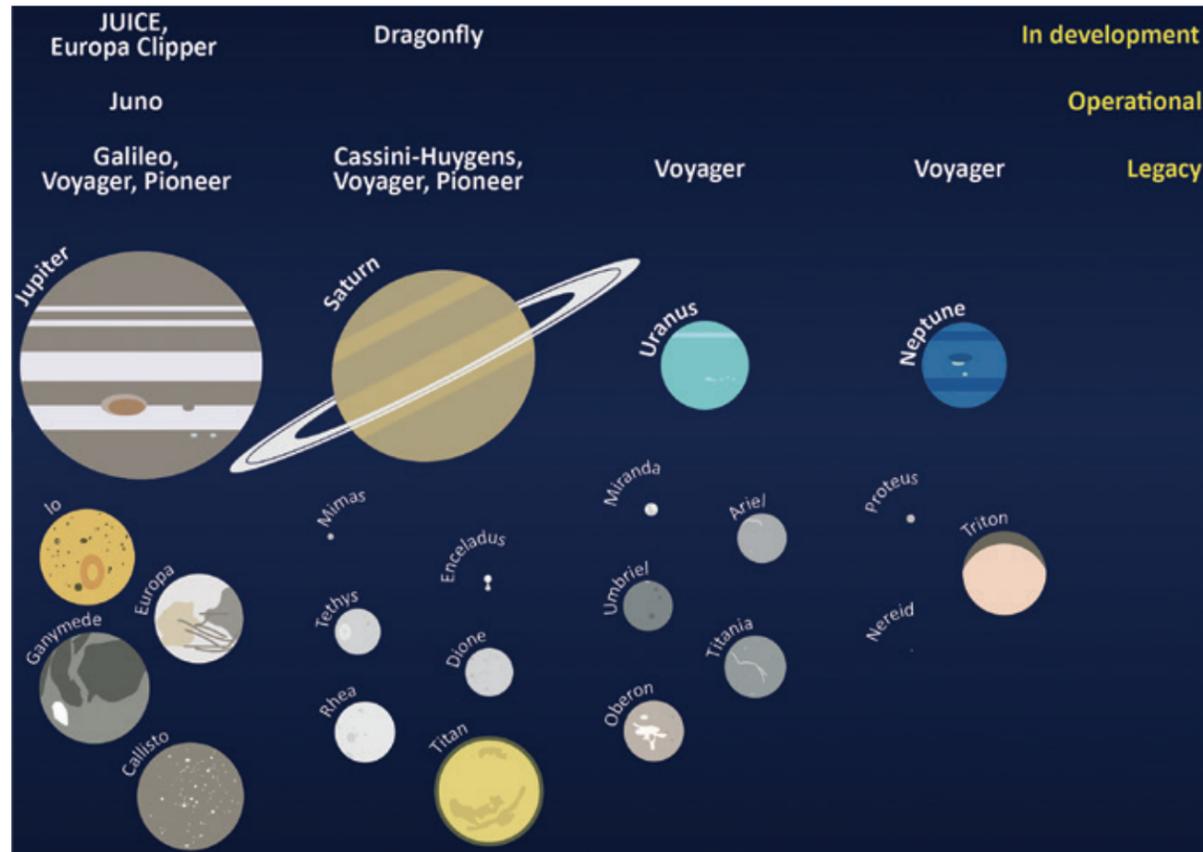


Abb. 6:
Zusammenstellung der Monde der Riesenplaneten zusammen mit den bisherigen, aktuellen und zukünftigen Weltraummissionen für ihre Erforschung.
Bild: Voyage 2050 Senior Report ESA / C.S. Arridge/ O. Grasset / L. Iess

der Oberfläche und Kohlenwasserstoffmeere an der Oberfläche) möglicherweise durch Kryovulkanismus verbunden. Die Einzelheiten und Auswirkungen dieser Verbindung bleiben unklar. Europa und Enceladus sind äußerst attraktiv, weil sie uns durch das in Form von Plumes (Geysiren) ausgestoßene Material in ihre inneren Flüssigkeitsreservoirs blicken lassen. Io ist nicht nur die extremste vulkanische Welt des Sonnensystems, sondern auch ein Schlüsselement des komplexen Jupiter-Magnetosphärensystems.

Der im Jahr 2021 veröffentlichte Strategieplan ‚Voyage 2050‘ des ESA-Wissenschaftsprogramms hat deshalb die Eismonde der Gasriesen als eine der drei wissenschaftlichen Prioritäten der nächsten Dekaden identifiziert. Die nächste L-Klasse-Mission nach LISA könnte deshalb durchaus eine ähnliche Mission wie JUICE werden, allerdings mit neuer Technologie und möglicherweise einem Oberflächenelement. ♦



PROF. DR. GÜNTHER HASINGER ist wissenschaftlicher Direktor der Europäischen Raumfahrtorganisation ESA. Sein Forschungsgebiet ist die Röntgen-Astronomie. Er erforscht die Entstehung und Entwicklung weit entfernter Galaxien sowie die Rolle von Schwarzen Löchern als Galaxien-Kern.

Supernovae – von Kepler bis zur Gegenwart

HANS-THOMAS JANKA

Schon Astronomen des Altertums hinterließen detaillierte Berichte über stellae novae, „neue Sterne“, deren unerwartetes und vorübergehendes Auftauchen als himmlische Botschaft galt. In der Neuzeit der Astronomie erschütterten Tycho Brahes neuer Stern von 1572 und die nach Johannes Kepler benannte verwandte Erscheinung von 1604 den Glauben an eine ewig unveränderliche Fixsternsphäre. Erst im 20. Jahrhundert jedoch erlaubten die Erkenntnisse der modernen Physik, die zugrundeliegenden Abläufe als explosive Todesereignisse von Sternen zu begreifen. Diese werden als Supernovae bezeichnet und sind bis heute im Brennpunkt reger Forschung.

Seltene Sichtungen trotz häufigem Vorkommen

Johannes Kepler wurde nur 32 Jahre nach Tycho Brahe Zeuge einer Supernova und nutzte die Gelegenheit, um seine Beobachtungen ausführlich in einem Buch von 1606 mit dem Titel ‚De stella nova in pede serpentarii ...‘ (Vom neuen Stern im Fuße des Schlangenträgers ...) zu dokumentieren. Dies erscheint in der Rückschau als unglaublich glücklicher Zufall, denn abgesehen von einer nicht eindeutig zuzuordnenden Sichtung des Astronomen John Flamsteed im Jahr 1680 gab es bis heute keine weitere direkt beobachtete Sternexplosion in unserer Milchstraße. Erst mit der berühmten Supernova 1987A wurde ein solches Ereignis am 24. Februar 1987 wieder mit bloßem Auge gesichtet, weil sich dieser Sterntod einen Tag zuvor in der Großen Magellanschen Wolke ereignet hatte, einer nur knapp 170.000 Lichtjahre entfernten kleinen Begleiterin unserer Milchstraße.

Supernovae in unserer Heimatgalaxie und ihrer direkten kosmischen Nachbarschaft sind also sehr seltene Phänomene, die im Durchschnitt nur ein- bis zweimal pro Jahrhundert erwartet werden. Dennoch hat die Milchstraße seit ihrer Entstehung vor zehn Milliarden Jahren bereits etliche 100 Millionen solcher Sterntode erlebt, von denen knapp 300 gasförmige Überreste bekannt sind. Im gesamten Universum mit seinen vielen Milliarden Galaxien, jede mit mehreren 100 Milliarden Sternen, sind Supernovae aber keineswegs rare Erscheinungen. Von den geschätzten ein bis zehn Sternexplosionen, die sich pro Sekunde

irgendwo im Weltall ereignen, spüren Astronomen mit speziellen Suchkampagnen heute mehrere Tausend pro Jahr auf, die meisten davon in vielen Milliarden Lichtjahren entfernten Sterneninseln.

Frühe Einsichten

Mit der Entdeckung einer Supernova in Andromeda im Jahr 1885 und der ersten Entfernungsbestimmung dieser Nachbargalaxie durch Knut Emil Lundmark 1919 wurde klar, dass solche Ereignisse keine gewöhnlichen, allgemein als Novae bezeichneten Helligkeitsausbrüche von vorher unsichtbaren Sternen sein konnten. Stattdessen entwickeln sie 1000-fach höhere Leuchtkräfte und können im Strahlungsmaximum die Helligkeit aller Sterne einer Galaxie zusammen erreichen. Wenige Jahre später prägten dann der Schweizer Astronom Fritz Zwicky und sein deutscher Kollege Walter Baade für diese gewaltigen Erscheinungen den Begriff Super-Nova. Wie beide bereits schätzten, übertrifft die Bewegungsenergie der ausgeschleuderten Gase des zerstörten Sterns die insgesamt als Strahlung freigesetzte Energie noch um das Hundertfache und ist damit vergleichbar der Energie, die unsere Sonne im Lauf von zehn Milliarden Jahren produzieren wird. Fritz Zwicky betrieb auch die erste systematische Suche und spürte mehr als 120 dieser Supernovae über einen Zeitraum von rund 50 Jahren auf.

Das Wissen seiner Zeit bot Johannes Kepler keine Möglichkeit, die Natur des von ihm beobachteten neuen Sterns zu verstehen. Erst im Laufe des 20. Jahrhunderts entstanden die Quantentheorie, Relativitäts-

theorie, Kern- und Teilchenphysik, die dafür den Weg öffneten. So waren es abermals Fritz Zwicky und Walter Baade, die in visionären Arbeiten in den 1930er Jahren erstmals die Hypothese äußerten, dass Supernovae nicht das Aufleuchten neuer Sterne sind, sondern im Gegenteil den finalen Übergang von gewöhnlichen Sternen zu Neutronensternen markieren, die in ihrem Endstadium aus extrem dicht zusammengepackten Neutronen bestehen. Genauere Beobachtungen der wachsenden Zahl entdeckter Ereignisse, auch mit spektralen Methoden, motivierten Rudolph Minkowski 1939 zur Einführung einer groben Typisierung. Abhängig vom Vorhandensein oder Fehlen von Spektrallinien des Wasserstoffs im abgestrahlten Licht während der frühen Entwicklungsphase ordnete er Supernovae entweder dem Typ II (Wasserstofflinien sind vorhanden) oder Typ I zu.

Die moderne Sicht

Heute benutzen Astronomen ein viel feineres Typenschema mit diversen Unterkategorien. Und sie mussten ihre Klassifikation bereits mehrfach erweitern, wenn seltene Ereignisse mit neuen Eigenschaften in der stetig wachsenden Zahl astronomischer Transienten auftauchten, die in systematischer und teilweise automatisierter Suche aufgezeichnet werden. Die neuen Supernovatypen haben keinen Einfluss auf die beiden grundsätzlichen Arten, welche die Theorie heute unterscheidet: Thermonukleare Supernovae und Kernkollaps-Supernovae. Bei ersteren handelt es sich um Explosionen massearmer Sterne, sogenannter Weißer Zwerge, die sehr alte Überreste von Sternen mit weniger als zirka neunfacher Masse der Sonne sind. Beobachter bezeichnen solche Ereignisse nun als Supernovae vom Typ Ia. Dagegen sind Kernkollaps-Supernovae Explosionen, die das Leben von Sternen mit mehr als neun Sonnenmassen beenden, wenn diese nur wenige zehn Millionen Jahre nach ihrer Geburt zu Neutronensternen kollabieren.

Fritz Zwicky und Walter Baade hatten diese Zusammenhänge bereits weitsichtig vermutet. Allerdings ahnten sie noch nicht, dass in extremen Fällen sogar stellare Schwarze Löcher entstehen. Sämtliche Beobachtungsvarianten, die Astronomen neben dem Typ Ia heute benutzen, umfassen die Vielfalt der sichtbaren Erscheinungen, die beim Tod massereicher Sterne auftreten können.

Thermonukleare Supernovae

Tycho Brahes und Johannes Keplers Supernovae gehörten zum Typ Ia. Dies lässt sich aus der chemischen Zusammensetzung der Sterntrümmer schließen, die reich an Silizium und Eisen sind und zudem Anteile von Kohlenstoff und Sauerstoff enthalten. Genau dies erwarten Theoretiker, wenn Weiße Zwerge explodieren. Weiße Zwerge sind Sternleichen, die aus Helium,

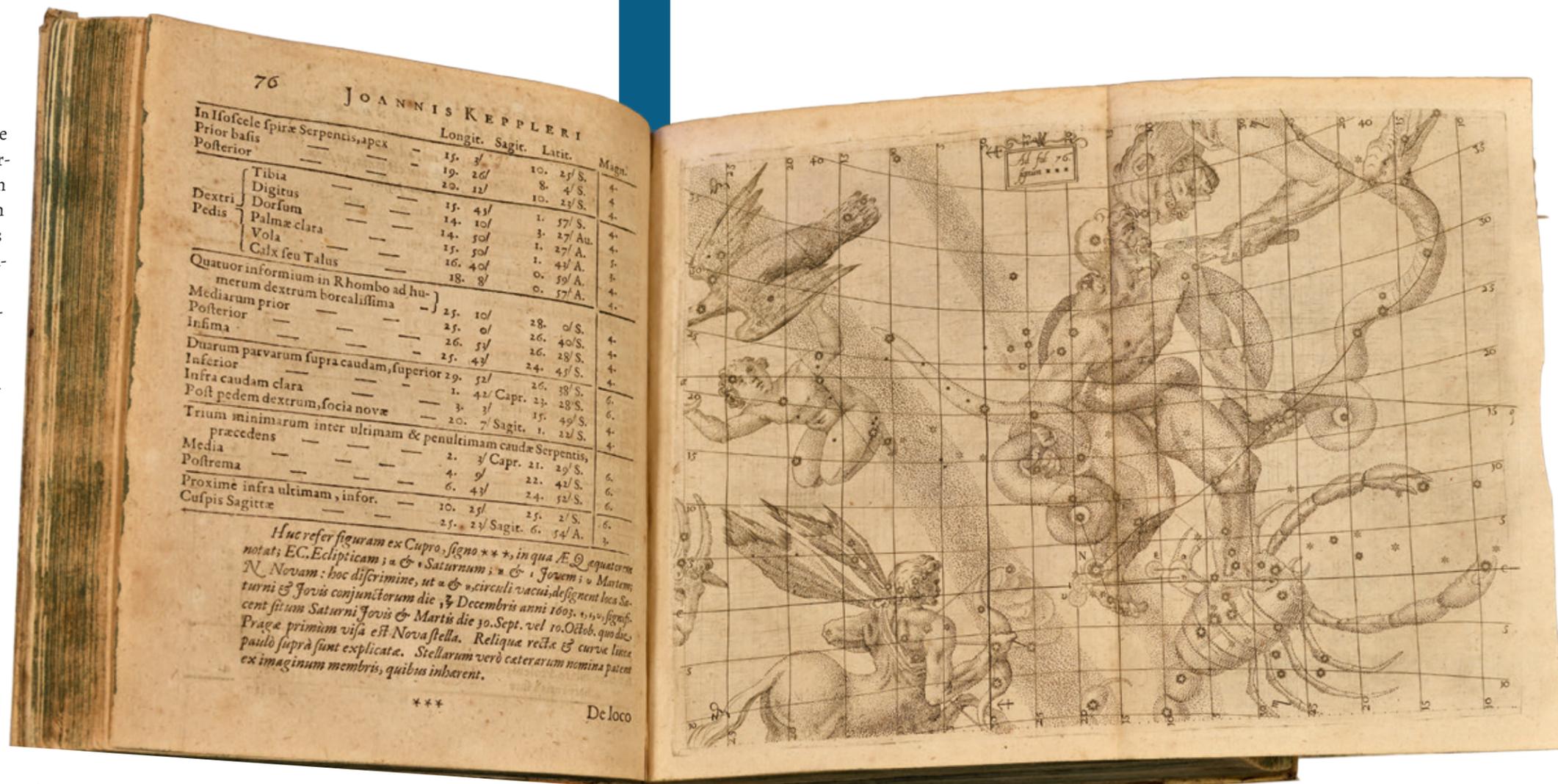


Illustration aus Johannes Keplers 'De Stella nova in pede Serpentarii' Prag 1606. Die Supernova ist in der rechten Ferse des Schlangenträgers mit einem Stern eingetragen. ERB Lindau, Foto: Patrick Pfeiffer

Kohlenstoff, Sauerstoff oder Neon bestehen, die aber zu massearm sind, um Kernfusionsreaktionen zu zünden, welche in massereicheren Sternen Energie erzeugen. Normalerweise kühlen sie daher über Jahrtausenden ab und werden unsichtbar. Ein naher Begleiter in einem Doppelsternsystem kann einen Weißen Zwerg jedoch 'wiederbeleben', wenn er ihn mit Materie 'füttert'. Dies ist durch Gasübertrag möglich oder indem der Weiße Zwerg mit seinem Partner (u. U. auch ein Weißer Zwerg) in einer Kollision verschmilzt. Dabei kann die Temperatur so stark ansteigen, dass thermonukleare Fusionsreaktionen einsetzen, bei denen Kohlenstoff und Sauerstoff vor allem zu Silizium und radioaktivem Nickel 'verbrannt' werden. Dieser Prozess erzeugt gewaltige Energiemengen, wodurch der Weiße Zwerg vollständig zerstört und seine Materie mit mehr

als 10.000 Kilometern pro Sekunde in den umgebenden Raum geschleudert wird. Der radioaktive Zerfall des Nickels zu Kobalt und schließlich zu stabilem Eisen lässt die Supernova für Monate milliardenfach heller strahlen als die Sonne. Solche Supernovaexplosionen haben Tycho Brahe und Johannes Kepler miterleben dürfen, und noch heute können wir die Ausdehnung der heißen Sterntrümmer in wunderschönen Gasnebeln beobachten (siehe Abbildung Folgeseite). Mit Supercomputern berechnen Astrophysiker den Ablauf dieser Sternexplosionen im Detail und erklären so eine Vielzahl beobachteter Eigenschaften mit gutem Erfolg. Dennoch ist eine entscheidende Frage nach wie vor heftig umstritten: Welche Mehrfachsterne mit mindestens einem Weißen Zwerg verursachen die thermonuklearen Supernovae? Sind es Dop-

pelsterne aus zwei Weißen Zwergen oder ist der Begleiter ein gewöhnlicher Stern? Oder sind es vielleicht sogar drei Sterne, die einander umkreisen und sich gegenseitig beeinflussen? Die lichtschwachen Vorläuferobjekte konnten bislang aufgrund ihrer großen Entfernung nicht direkt entdeckt werden. Es ist aber gut möglich, dass alle diskutierten Szenarien ihren Platz haben, denn die wachsende Zahl beobachteter Typ Ia Supernovae zeigt ein breites Spektrum unterschiedlicher Eigenschaften.

Kernkollaps-Supernovae

Die Vorläufer von Kernkollaps-Supernovae sind grundsätzlich bekannt, denn in etlichen Fällen konnten die massereichen Sterne aufgrund ihrer riesigen Leuchtkraft auf Fotos gefunden werden. Außerdem erlauben die expandierenden Explosionswolken gewisse Rückschlüsse. Und wir kennen viele der kompakten Überreste, die beim stellaren Kollaps entstehen, d. h. Neutronensterne und Schwarze Löcher, einige davon sogar in den Gasnebeln ihrer zerstörten Sterne. Aber auch hier gibt es viele ungelöste Fragen, und noch ist es schwierig vorherzusagen, wie ein Stern mit bekannter Masse sein Leben beenden wird, mit welcher Energie er als Supernova explodieren wird oder ob er (fast) unsichtbar in einem Schwarzen Loch verschwinden wird.

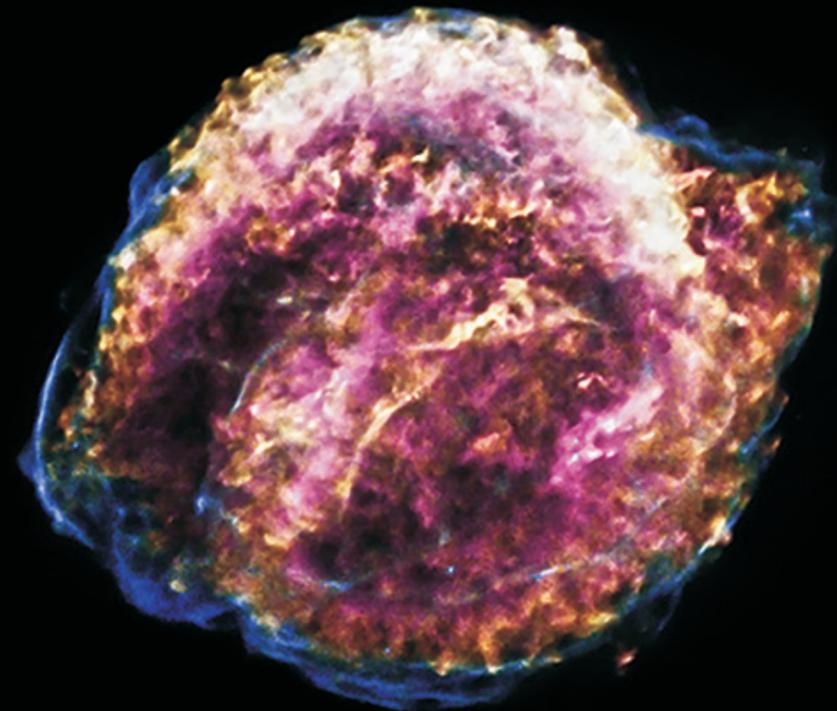
Das Hauptproblem dabei sind die extrem komplexen Abläufe, wenn ein Stern zunächst implodiert, um dann doch in einer Explosion zerrissen zu werden. Die größten verfügbaren Supercomputer sind notwendig, um die Vorgänge in allen Phasen nachzuvollziehen. Innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde stürzt der Kern aus Eisen in einem schweren Stern in sich zusammen und bildet einen Neutronenstern. Bei Dichten bis zu mehrfacher Atomkerndichte und Temperaturen bis über 500 Milliarden Kelvin entstehen gigantische Mengen von Neutrinos durch Elementarteilchenreaktionen. Unter irdischen Bedingungen wechselwirken Neutrinos nur mit winziger Wahrscheinlichkeit, aber im Zentrum eines sterbenden Sterns sind die Bedingungen so extrem, dass die Neutrinos Sekunden brauchen, um sich aus dem Neutronenstern herauszukämpfen und auf ihrem Weg aus dem Stern die Supernovaexplosi-

on zu ‚zünden‘. Möglich ist dies, weil der entstehende Neutronenstern in Neutrinos hundertmal mehr Energie abstrahlt als die Sternexplosion antreibt! Weniger als ein Prozent der Neutrino-Energie verursacht daher die gewaltige Explosion einer Kernkollaps-Supernova!

Doch das reicht nicht aus, um die gigantischsten aller Sternexplosionen zu erklären: Hypernovae, Gammablitz und superhelle Supernovae. Einige dieser extrem seltenen Ereignisse besitzen das bis zu Fünfzigfache an Energie einer normalen Supernova, stoßen Materie in engen Kegeln („Jets“) fast mit Lichtgeschwindigkeit aus oder strahlen zehnmal heller als alle anderen Supernovae! Die Energiequellen dafür sind bislang reine Spekulation. Es könnten schnell rotierende Schwarze Löcher sein, die einen Teil des kollabierenden Sterngases verschlingen, oder schnell rotierende Neutronensterne mit ultrastarken Magnetfeldern, meist (aber nicht korrekt) als ‚Magnetare‘ oder ‚Proto-Magnetare‘ bezeichnet. Wie solche exotischen Phänomene und die vielen entdeckten Varianten von Kernkollaps-Supernovae mit Besonderheiten ihrer massereichen Vorläufersterne zusammenhängen, ist aktuell Gegenstand intensiver Forschung.

Bedeutung und Ausblick

Supernovae sind nicht nur faszinierende kosmische Erscheinungen. Sie spielen auch eine bedeutende Rolle für die Entwicklung des Universums als Ursprungsorte der meisten chemischen Elemente schwerer als Helium und der hochenergetischen kosmischen Teilchenstrahlung. Aufgrund ihrer außerordentlichen Helligkeit dienen sie zur Entfernungsmessung im Weltall. Die nächste Kernkollaps-Supernova in unserer Milchstraße wird wegen ihrer extremen Bedingungen ein fantastisches astrophysikalisches Neutrino- und Teilchenlabor sein. Die Geburt des Neutronensterns wird Raumzeitschwingungen auslösen wie von Albert Einstein vorhergesagt. Diese Gravitationswellen sind neben Neutrinos die einzigen Boten, die Informationen direkt aus dem Zentrum des sterbenden Sterns liefern können. Beide Signale sollen daher mit riesigen Detektoren auf der Erde gemessen werden. Dies wird sicher geschehen, auch wenn niemand weiß, wann. ♦



Gasförmiger Überrest der Keplerschen Supernova von 1604 mit einer Entfernung von rund 20000 Lichtjahren und einem Durchmesser von zirka 22 Lichtjahren. Die Aufnahme zeigt sehr heiße, mit hoher Geschwindigkeit expandierende Sternreste im Röntgenlicht, aufgenommen durch den Chandra-Satelliten. Rot, Gelb, Grün, Blau und Violett entsprechen zunehmend höherfrequenter Strahlung. Im Hintergrund sieht man das Sternfeld im sichtbaren Licht aus dem Digitized Sky Survey.
Bild: Röntgen: NASA/CXC/SAO/D. Patnaude. Optisch: DSS

Weiterführende Literatur

- Stückli, Alfred; Müller, Roland: Fritz Zwicky, Astrophysiker. Genie mit Ecken und Kanten. Verlag Neue Zürcher Zeitung Zürich 2008
- Janka, Hans-Thomas: Supernovae und kosmische Gammablitz. Ursachen und Folgen von Sternexplosionen. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg 2011
- Janka, Hans-Thomas; Müller, Ewald: Wenn Sterne explodieren. Die Theorie von Supernovae. In: Geheimnisvoller Kosmos. Astrophysik und Kosmologie im 21. Jahrhundert. Herausgeber: Thomas Bürke und Roland Wengenmayr. Wiley-VCH Verlag Weinheim (3. Auflage, 2014), S. 102–111
- Janka, Hans-Thomas; Klose, Sylvio; Röpke, Fritz: Supernovae und kosmische Gammablitz. Teil 1: Neue Vielfalt der Erscheinungen. In: Sterne und Weltraum 50, Nr. 3 (2011), S. 30–41
- Janka, Hans-Thomas; Klose, Sylvio; Röpke, Fritz: Supernovae und kosmische Gammablitz. Teil 2: Die allerhellsten Phänomene. In: Sterne und Weltraum 50, Nr. 4 (2011), S. 44–52
- Hillebrandt, Wolfgang; Müller, Andreas: Eine neue Sicht auf Supernovae, Teil 1. In: Sterne und Weltraum 59, Nr. 3 (2020), S. 30–39
- Hillebrandt, Wolfgang; Müller, Andreas: Eine neue Sicht auf Supernovae, Teil 2. In: Sterne und Weltraum 59, Nr. 4 (2020), S. 30–33
- Janka, Hans-Thomas: Magnetare und ihre Magnetfelder. In: Sterne und Weltraum 60, Nr. 4 (2021), S. 18–22



APL. PROF. DR. HANS-THOMAS JANKA leitet am Max-Planck-Institut für Astrophysik (MPA) in Garching eine vorwiegend durch Drittmittel finanzierte Arbeitsgruppe und lehrt an der Technischen Universität München.
Foto: Heinz-Ado Arnolds, MPA

Die Vermessung der Milchstraße mit der Gaia-Mission

ULRICH BASTIAN UND STEFAN JORDAN

Die Gaia-Mission der europäischen Raumfahrtagentur ESA stellt mit extrem präzisen Messungen an rund 2 Milliarden Sternen viele Gebiete der Astronomie auf eine völlig neue Datengrundlage. Insbesondere mit der Messung von Entfernungen und Bewegungen wird derzeit eine völlig neue Sicht auf den Aufbau und die Entstehungsgeschichte des Milchstraßensystems möglich. Aber auch fast jeder andere Zweig der Astronomie wird entscheidend vorangebracht. Dies zeigt sich in rund 6000 wissenschaftlichen Publikationen, die von den Astronomen der Welt in nur vier Jahren aus dem Gaia-Datenschatz hervorgebracht wurden.

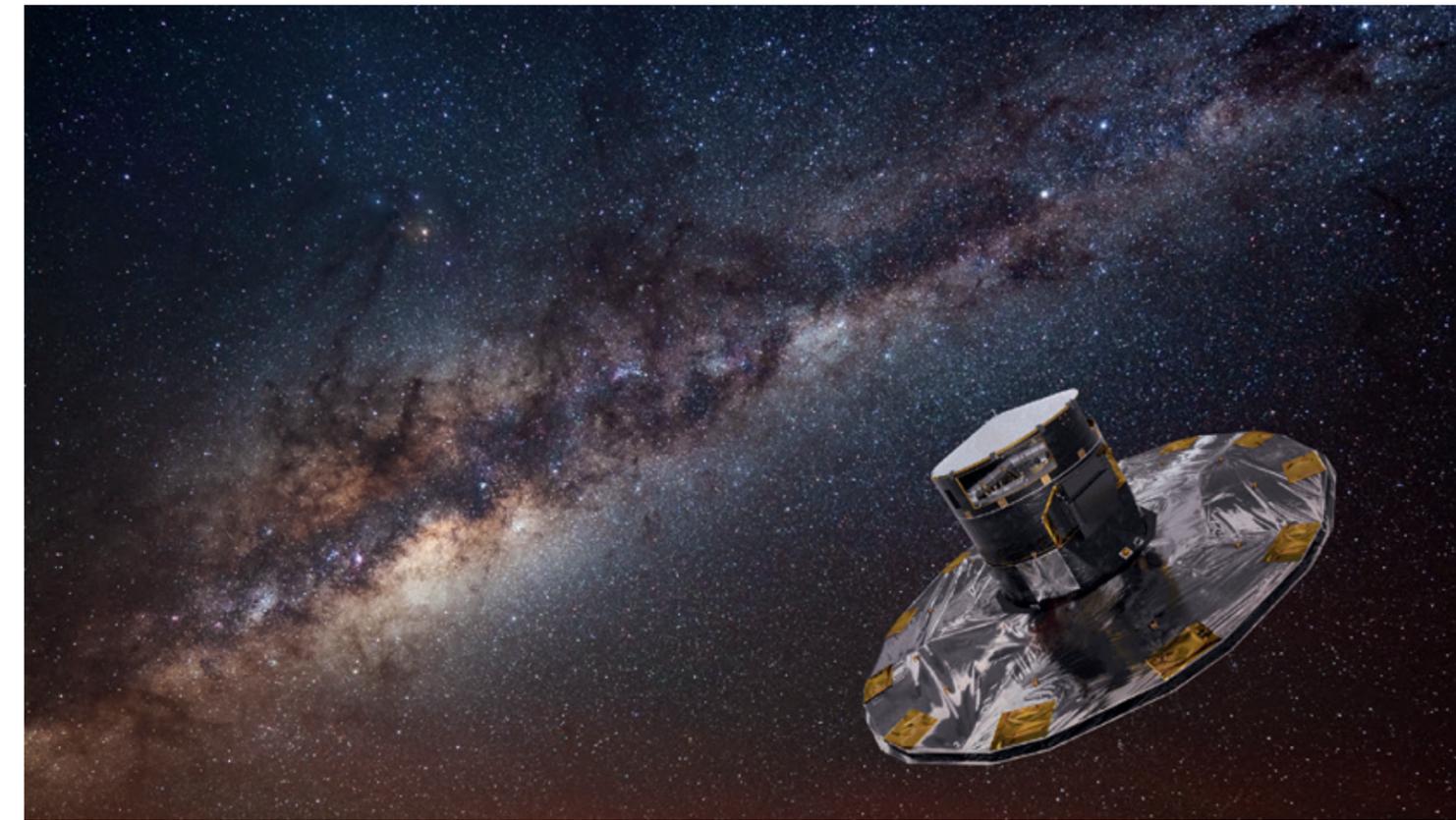
Eine stille wissenschaftliche Revolution, 400 Jahre nach Keplers Gesetzen

Die Gaia-Mission der europäischen Raumfahrtagentur ESA möchte für die Astronomen des 21. Jahrhunderts in Bezug auf die Milchstraße das sein, was Tycho Brahe im 17. Jahrhundert für die Astronomen Johannes Kepler und Isaac Newton in Bezug auf das Sonnensystem war: Die fundamental neue Datenquelle, aus der die vollständige Geometrie und Funktionsweise des Sonnensystems bzw. der Milchstraße – und im letzteren Falle zusätzlich die Entstehungs- und Entwicklungsgeschichte des Systems – erschlossen werden können. In beiden Fällen sind es epochale Durchbrüche in der Genauigkeit und der Menge von Positionsmessungen an der Himmelskugel, die den historischen wissenschaftlichen Zeitenwechsel ermöglichten bzw. derzeit gerade ermöglichen.

Die Milchstraße ist das System aus 200 bis 300 Milliarden Sternen, dem unsere Sonne und ihre Planeten angehören. Sie ist eines von Milliarden ähnlicher Systeme im überschaubaren Universum, die als Galaxien bezeichnet werden. Neben den Sternen bilden große Gas- und Staubmassen und die mysteriöse Dunkle Materie ihre wesentlichen Bestandteile. Die meisten ihrer Sterne ordnen sich in einer flachen rotierenden Scheibe von grob 100 000 Lichtjahren Durchmesser an; nur ein paar Milliarden davon verteilen sich in einer deutlich größeren kugelförmigen Anordnung, dem sogenannten Halo.

Im Laufe des 20. Jahrhunderts haben die Astronomen sehr viel über den Aufbau und die Entwicklung der Milchstraße gelernt. Aber immer noch wird über elementare Eigenschaften – wie zum Beispiel die Zahl der Spiralarme oder die Gesamtmasse – heftig diskutiert. Zwar sind wir uns inzwischen sehr sicher, dass sich die Milchstraße von außen gesehen als typische Scheibengalaxie mit Spiralstruktur und zentralem ‚Balken‘ darstellt. Doch das können wir nur indirekt erschließen (siehe Titelbild dieses Aufsatzes). Durch unseren Standort inmitten des Sternengewimmels sehen wir zwar – im Gegensatz zu anderen, weit entfernten Galaxien – viele Einzelheiten, haben aber Schwierigkeiten, das Gesamtbild zu erkennen.

Verschärfend kommt hinzu, dass die Staubwolken unseren Blick auf die entfernteren Teile der Scheibe, vor allem in Richtung des Zentrums der Milchstraße, stark einschränken. Es ist bis zum heutigen Tag keineswegs offensichtlich, wie sich die zweidimensio-



nale Ansicht, die uns die Milchstraße als knotiges, von dunklen Staubwolken zerzaustes Lichtband am Himmel darbietet, in eine detaillierte dreidimensionale Struktur übersetzt. Ein zentrales Problem besteht darin, dass wir bisher die Entfernungen wichtiger Objekte nicht genau genug kannten. Genau dies ist einer der zentralen Punkte, an denen Gaia ansetzt.

Die einzige Möglichkeit, astronomische Distanzen für eine große Zahl und Vielfalt von Objekten unvoreingenommen und direkt zu bestimmen, besteht darin, die trigonometrischen Parallaxen zu messen. Dieses Messprinzip verwendet die gute alte Triangulation der irdischen Landvermesser: Man peilt einen Zielpunkt – hier einen Stern – von mindestens zwei verschiedenen Standorten aus an, und aus der Differenz der Blickrichtung zum Zielpunkt ergibt sich mit einer simplen Dreiecksberechnung die Entfernung. Je kleiner die Differenz, desto größer die Entfernung. Der Unterschied zur Landvermessung liegt allerdings

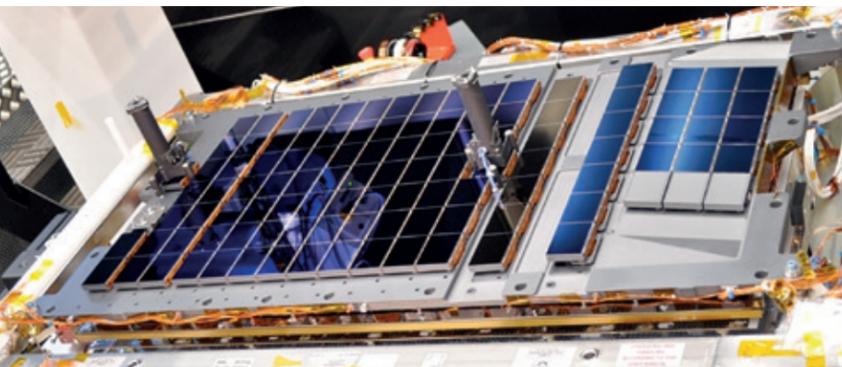
erstens darin, dass hier die sogenannte Basislinie – also der Abstand zwischen den gewählten Standorten – nicht im Bereich von einigen Metern oder Kilometern liegt, sondern 200 bis 300 Millionen Kilometer beträgt. Gaia umkreist zusammen mit der Erde einmal pro Jahr die Sonne, stets im Abstand von ca. 1,5 Millionen km von der Erde, und misst die Sternpositionen von verschiedenen Punkten dieser Umlaufbahn aus. Zweitens sind trotz der gigantischen Basislinie die zu messenden Richtungsänderungen unglaublich winzig. Sie liegen nicht im Bereich von einigen Grad, sondern sind selbst für die allernächsten Sterne kleiner als eine Bogensekunde, und nur für ca. ein Zehntel Promille aller Gaia-Sterne sind sie größer als eine Millibogensekunde. Eine Millibogensekunde, das ist die Größe eines erwachsenen Menschen, wenn man ihn aus der Entfernung des Mondes betrachtet!

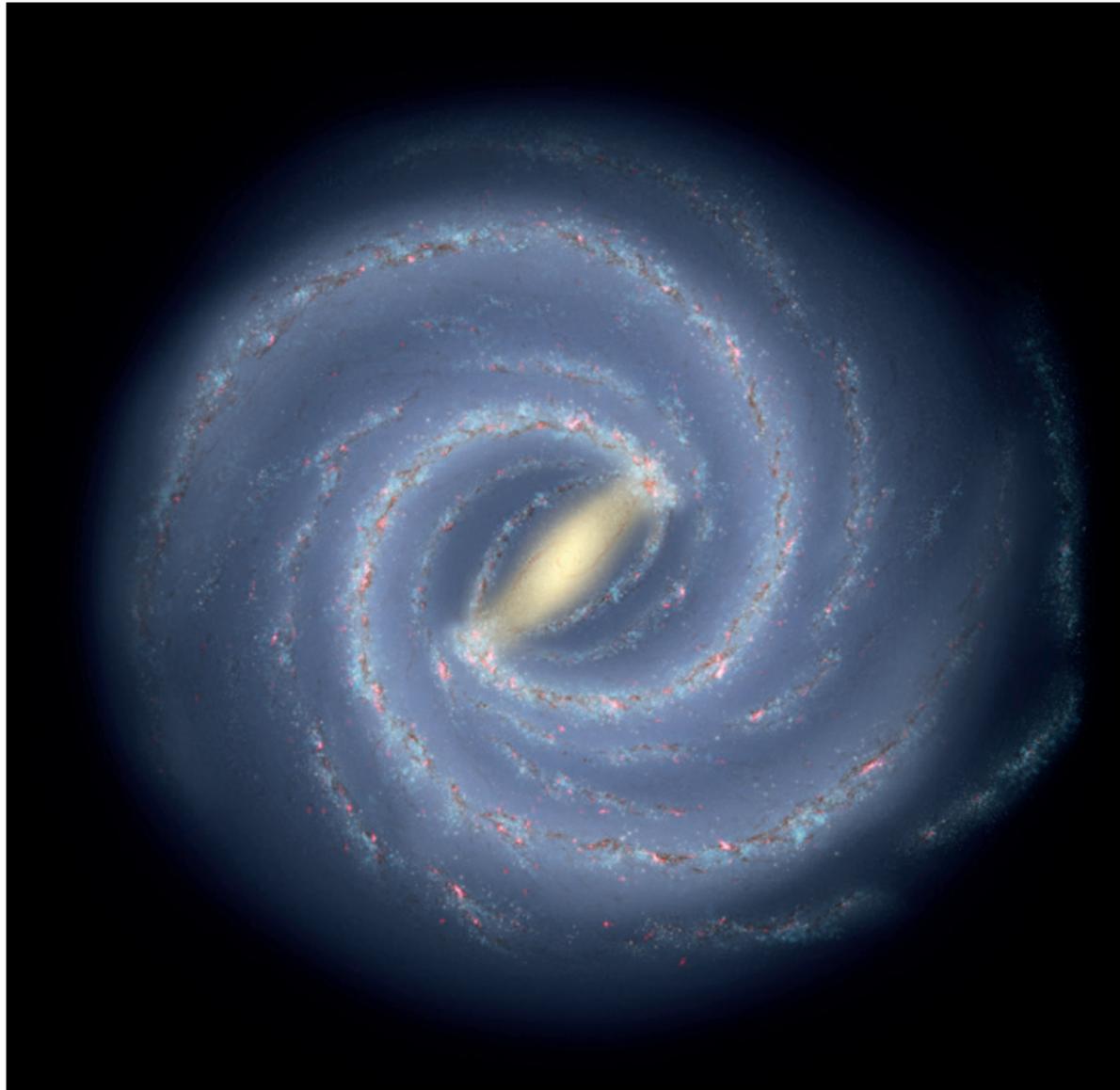
Vor Gaia gab es lediglich 100 000 präzise gemessene Parallaxen (von Gaias Vorgängersatellit Hipparcos,

Schematische Darstellung des Gaia-Satelliten vor dem Hintergrund des echten Milchstraßenbandes am irdischen Himmel. Der zwölfteilige ausklappbare Sonnenschirm besitzt einen Durchmesser von ca. 11 Metern, der Körper des Satelliten ist rund 3 Meter groß.

Bild: Hintergrund ESO/S. Brunler, ESA/Gaia ATG Medialab

Das Herzstück der größten je in den Weltraum geflogenen Digitalkamera: Gaias Fokalebene mit 102 CCD-Detektoren und fast einer Milliarde lichtempfindlicher Pixel sowie zwei aufgesetzten Zusatzoptiken und allerlei Verkabelung. Bild: ESA/Gaia/Astrium





Künstlerische Darstellung der vermutlichen Außenansicht der Milchstraße aus großer Entfernung. Bild: NASA/JPL-Caltech/ESO/R. Hurt

1989–1993) mit einer Genauigkeit von rund einer Millibogensekunde. Bereits jetzt, nach der Auswertung der ersten knapp drei Jahre der Gaia-Messungen, gibt es über 100 Millionen Parallaxen mit der 30-fachen Genauigkeit, also rund 30 Mikrobogensekunden, und fast 1500 Millionen Parallaxen besser als eine Millibogensekunde. Das ist ein enormer Schritt in Richtung einer vollen dreidimensionalen Kartierung der Milchstraße.

Die Milchstraße, unsere Heimatgalaxie, ist ein dynamisches, d. h. von Kräften zwischen seinen Mitgliedern geformtes und aufrecht erhaltenes System. Um es wirklich zu verstehen, müssen wir nicht nur die Lage der Mitglieder im Raum kennen, sondern auch deren Bewegungen. Die auf die Sterne wirkenden Kräfte drücken sich vor allem in der Verteilung ihrer Geschwindigkeiten aus – genau genommen in den Ver-

teilungen der Geschwindigkeiten in unterschiedlichen räumlichen Bereichen des Systems. Das bedeutet, dass wir für möglichst viele einzelne Objekte der Milchstraße außer ihren drei räumlichen Koordinaten (Position und Entfernung) zusätzlich noch drei Geschwindigkeitskoordinaten messen müssen.

Zu diesem Zweck bestimmt Gaia die jährlichen Positionsänderungen in etwa gleicher Genauigkeit wie die Parallaxen. Wiederum hat Gaia bereits mit den ersten drei Messjahren die Anzahl der zuvor gut bekannten Werte um den Faktor 10 000 und die erreichbare Genauigkeit sogar um den Faktor 50 gesteigert. Um die gemessenen jährlichen Positionsänderungen in echte Geschwindigkeiten (in Kilometern pro Sekunde) umrechnen zu können, ist übrigens wiederum die präzise Kenntnis der Entfernung notwendig.

Die bis jetzt beschriebenen Messwerte – genauer gesagt, deren enorme Anzahl und Genauigkeit am Ende der Mission – sind der Hauptzweck von Gaia. Fast nebenbei werden auch genaue Helligkeiten und Farben der Sterne sowie für rund 10 Prozent der Objekte auch noch weitere physikalische Eigenschaften ermittelt, z. B. einige Aspekte der chemischen Zusammensetzung sowie die Temperaturen und Schwerebeschleunigungen an der Oberfläche.

In drei Veröffentlichungen, den sogenannten Data Releases, hat das wissenschaftliche Gaia-Konsortium vorläufige Mess-Ergebnisse publiziert: 2016, 2018 und 2020, jeweils in zunehmender Menge, Vielfalt und Genauigkeit.

Die weltweite astronomische Forschergemeinde hat sich mit großer Begeisterung an die wissenschaftliche Nutzung dieses Datenschatzes gemacht – und daraus in den letzten vier Jahren rund 6000 wissenschaftliche Veröffentlichungen produziert. Das sind im Durchschnitt fast sechs neue Publikationen pro Werktag. Die Forschungsgegenstände betreffen bei Weitem nicht nur die Milchstraße, sondern nahezu jede Facette der Astronomie – vom Planetensystem über die Physik der Sterne und des interstellaren Gases bis zur Altersbestimmung des gesamten Universums und zu fundamentalen physikalischen Fragen wie den Eigenschaften der mysteriösen Dunklen Materie.

Eine einigermaßen vollständige technische Beschreibung des Gaia-Satelliten, seiner Messinstrumente und Messverfahren würde die vier Seiten dieses Beitrags sprengen und würde auch nicht so recht in dieses Büchlein passen. Deshalb hier nur einige kleine Einblicke: Zu jedem astronomischen Satelliten gehört mindestens ein Teleskop. Bei Gaia sind es zwei, die ihr Licht auf die CCD-Detektoren einer einzigen riesigen elektronischen Kamera werfen. Von dort werden die teleskopischen Bilder der zwei Milliarden Gaia-Objekte ausgelesen und zunächst im Bordcomputer gespeichert. In typischerweise 8 bis 11 Stunden Bodenkontakt pro Tag werden die Messdaten zur Erde übertragen, während die Messungen weiterlaufen. Der Satellit arbeitet praktisch ununterbrochen und vollkommen autonom. Er rotiert langsam in 6 Stunden um eine Achse, die senkrecht zu den Blickrichtungen der beiden Teleskope liegt. Dadurch wird während jeweils einer Umdrehung ein 360 Grad langer und knapp 1 Grad breiter Streifen rund um die Himmelskugel abgetastet. Durch eine ständige kontrollierte Verlagerung der Rotationsachse wird nach und nach der gesamte Himmel nach einem vorgegebenen zeitlichen und räumlichen Muster erfasst.

Diese kurze Beschreibung von Gaia sollte vielleicht nicht ohne eine kleine historische Anmerkung zum Namen der Mission bleiben: Dieser war ursprünglich GAIA (mit Großbuchstaben), als Akronym für 'Global Astrometric Interferometer for Astrophysics', sinngemäß 'Astrometrisches Ganzhimmels-Interferometer für die Astrophysik'. In den Anfangszeiten des Projekts, 1993 bis etwa 1998, war ein interferometrisches Teleskop vorgesehen, weil man damit im Prinzip bei vorgegebenem Durchmesser eine etwas höhere astrometrische Genauigkeit erzielen kann. Aber aus praktischen Gründen wurde diese Idee verworfen und stattdessen wurden zwei im Detail sehr spezielle, im Grundsatz aber relativ normale Teleskope eingebaut. Um keine Verwirrung bezüglich der Projekt-Identität zu schaffen, behielt man den Namen bei, schrieb ihn nun aber mit Kleinbuchstaben, weil er kein Akronym mehr ist. So kam es zu dem Paradoxon, dass diese Mission den griechischen Namen der Erde bzw. der anti-

ken Erdgottheit trägt. Dabei hat sie doch mit der guten Mutter Erde wissenschaftlich absolut nichts im Sinn – und kann sogar deren Nähe so wenig ertragen, dass sie über eine Million Kilometer Abstand davon halten muss, damit die exquisiten Messungen nicht von ihrem Mutterplaneten gestört werden. Aber dieses Paradoxon hält Astronomen nicht davon ab, Wortspiele mit dem Namen Gaia zu treiben. Eine kleine Galaxie ist vor ca. 9 Milliarden Jahren vom Gravitationsfeld der Milchstraße zerrissen worden und danach mit ihr verschmolzen. Ihre Trümmer wurden von einer internationalen Forschergruppe in den Gaia-Daten entdeckt: Es sind viele Millionen Sterne in den Außenbezirken der Milchstraße, deren Bewegungen untereinander ziemlich einheitlich, aber vom Hauptteil der Milchstraßensterne sehr verschieden sind. Diese kleine Galaxie wurde von ihren Entdeckern 'Enceladus' getauft, nach einem der vielen mythologischen Söhne der Erdgöttin Gaia.

Weiterer Lesestoff

Die Gaia-Webseiten der ESA:

<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia>

Projekt Gaia: Die sechsdimensionale Milchstraße, Teil 1:

Warum und wozu Gaia gebaut wird, U. Bastian, Sterne und Weltraum 5/2013, S. 36-44

Projekt Gaia: Die sechsdimensionale Milchstraße, Teil 2:

Wo, wann und wie Gaia arbeiten soll, U. Bastian, Sterne und Weltraum 6/2013, S. 48-55

Gaia in der Testphase, S. Jordan, Sterne und Weltraum 5/2014, S. 28-32

Gaia - der zweite Katalog, U. Bastian, M. Biermann, Sterne und Weltraum 6/2018, S. 40-50

Gaias neueste Vermessung der Milchstraße, S. Jordan, Sterne und Weltraum 1/2021, S. 28-37

Ferne Quasare bewegen sich doch. Das sagen die neuen Messdaten des ESA-Satelliten Gaia, U. Bastian, S. Klöner, Sterne und Weltraum 2/2021, S. 38-46

... und die dort jeweils zitierten weiteren Publikationen

Abschließend soll auf einen engen inneren Zusammenhang zwischen Gaia und Johannes Kepler hingewiesen werden: Die weiter oben erwähnten Kräfte, die das System Milchstraße in seine heutige Form gebracht haben und weiterhin zusammenhalten, sind zuvörderst Gravitationskräfte. In anderen Worten: Die physikalische Interpretation der räumlichen Anordnung und der Bewegungen der Sterne, die Gaia derzeit den Astronomen der Welt zur Verfügung stellt, beruht zu einem ganz entscheidenden Teil auf Newtons Gravitationsgesetz. Dieses wiederum folgte gegen Ende des 17. Jahrhunderts direkt aus den drei Keplerschen Gesetzen der Planetenbewegung. Und schließlich wäre das gesamte Messprinzip der Parallaxen nicht möglich, wenn nicht die Erde – wie von Kepler gemutmaßt und erstmals empirisch begründet – auf ihrer kreisähnlichen jährlichen Ellipse um die Sonne laufen und Gaia dabei mitnehmen würde. ♦



DR. ULRICH BASTIAN (li.) war ab dem Jahr 1993 einer der Pioniere und bis zu seinem Renteneintritt im Jahr 2017 einer der führenden Köpfe des Gaia-Projekts, an dem er auch heute noch mitarbeitet. Seit 1994 ist er außerdem der Leserbriefredakteur der Zeitschrift Sterne und Weltraum. Sein Heimatinstitut ist das Astronomische Rechen-Institut am Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg.

APL. PROF. DR. STEFAN JORDAN (re.) arbeitet seit 2004 in verschiedenen Positionen am Gaia-Projekt. Seine aktuellen Aufgaben bestehen vor allem in der Öffentlichkeitsarbeit, Visualisierung der Gaia-Daten und dem Aufbau der Gaia-Datenbanken. Er lehrt als Außerplanmäßiger Professor am Astronomischen Rechen-Institut am Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg.

Von Kepler zu anderen Welten

KATJA POPPENHÄGER

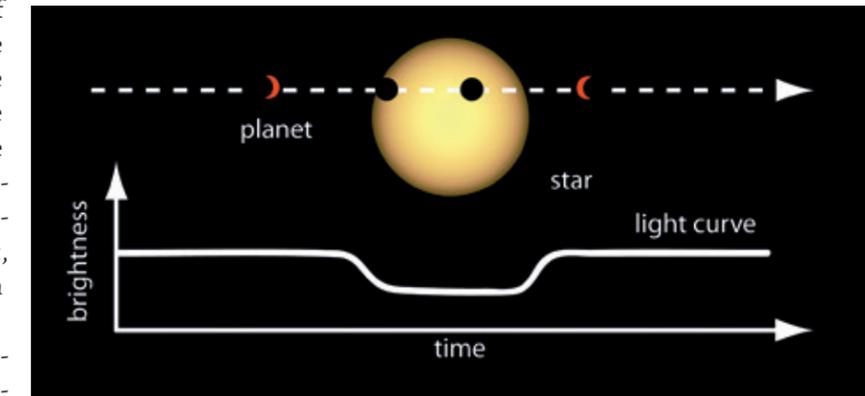
Die Entdeckung von Exoplaneten

Die Keplerschen Gesetze beschreiben, auf welchen Umlaufbahnen unsere Planeten die Sonne umrunden. Doch nicht nur das: Sie beschreiben auch, wie Planeten andere Sterne umkreisen. Dass unsere Sonne wohl nicht der einzige Stern ist, der Planeten besitzt, wurde schon vor hundert Jahren vermutet. So konstatierte der italienische Philosoph Giordano Bruno im 16. Jahrhundert, dass es unendlich viele Welten wie unsere Erde geben müsste.

Jedoch ist es selbst mit den größten Teleskopen schwierig, solche Exoplaneten (von ‚exo‘ = außerhalb) direkt zu sehen, d. h. als zweidimensionales Bild. Ihre Zentralsterne sind so hell, dass die Exoplaneten überstrahlt werden und selbst auf hochauflösenden Bildern meistens nicht zu erkennen sind. Daher sind fast alle bislang bekannten Exoplaneten durch indirekte Methoden nachgewiesen worden.

Zwei Methoden haben sich als besonders erfolgreich erwiesen; beide greifen auf die Keplerschen Gesetze zurück, um die Umlaufbahnen der Exoplaneten zu bestimmen. Die erste Methode benutzt die Rot- und Blauverschiebung des Sternenlichts, wenn der Stern eine kleine Gegenbewegung zum kreisenden Planeten vollführt. Dies ist die sogenannte Radialgeschwindigkeitsmethode, mit der bislang knapp tausend Exoplaneten entdeckt wurden. Die zweite Methode ist noch erfolgreicher mit derzeit über dreitausend entdeckten Exoplaneten: die sogenannte Transitmethode.

Bei einem Transit fallen die Umlaufbahn eines Exoplaneten und unsere eigene Blickrichtung von der Erde ins Universum so günstig zusammen, dass wir beobachten können, wie der Planet sich vor den Stern schiebt. Dies ist ähnlich einer Sonnenfinsternis, nur dass unser Mond typischerweise die komplette Sonnenscheibe verdeckt, während bei Transits von Exoplaneten nur wenige Prozent des Sternenlichts verdeckt



werden. Da wir fast alle Sterne nur als Lichtpunkte und nicht als ausgedehnte Objekte sehen können, sehen wir diese nicht als zweidimensionales Bild, sondern können allein die Helligkeitsschwankung des Sterns über die Zeit beobachten (die sogenannte Lichtkurve). Die kleinen Helligkeits-„Dellen“ von wiederkehrenden Transits haben eine charakteristische Form (siehe Abbildung 1), durch die wir Informationen über die Größe der Exoplaneten und mittels der Keplerschen Gesetze auch über ihre Umlaufbahnen erhalten (Seager & Mallén-Ornelas 2003).

Transits sind zwar prinzipiell von der Erdoberfläche aus mit Teleskopen beobachtbar, allerdings erzeugen dabei Änderungen in unserer eigenen Atmosphäre ein Rauschen in den Helligkeitsmessungen der Sterne. Daher können Transits, insbesondere solche von kleinen, erdähnlichen Planeten, am besten mit Weltraumteleskopen ohne störende Erdatmosphäre beobachtet werden. Ein fantastischer Erfolg war dabei das Weltraumteleskop ‚Kepler‘, das eine bestimmte Stelle am Himmel vier Jahre lang ununterbrochen beobachtet hat, um nach Transits von Exoplaneten zu suchen. Dieses sogenannte ‚Kepler-Feld‘ hat eine Größe am Himmel, die man gerade so mit der ausgestreckten Hand verdecken kann; es entspricht etwa 0.25 % des

Abb.1: Wenn ein Planet vor seinem Stern vorbeizieht, erscheint der Stern dem Beobachter kurzzeitig weniger hell. Aus der Form der Helligkeitsschwankung ziehen Astronomen Rückschlüsse auf den Planeten. Bild: NASA Ames

gesamten Himmels. Vor Beginn der Kepler-Mission waren nur drei Planeten in diesem Himmelsabschnitt bekannt. Nun kann das Kepler-Teleskop nur die Planeten entdecken, die so günstig positioniert sind, dass sie auch einen Transit verursachen – und allein von diesen wurden hunderte gefunden (siehe Abbildung 2). Wenn man dies hochrechnet auf alle Planeten, die es geben muss, die aber keinen Transit verursachen, erhält man das phänomenale Ergebnis, dass im Durchschnitt jeder Stern in unserer Milchstraße etwa einen Planeten besitzt (Dressing & Charbonneau 2013). Unser eigener Planet hat also Milliarden von Geschwistern.

Exoplaneten werden oft in Umlaufbahnen gefunden, die viel kürzer sind als in unserem eigenen Sonnensystem. Wir kennen derzeit nur wenige Transit-Planeten mit Umlaufzeiten von mehreren Jahren. Das liegt daran, dass man für den sicheren Nachweis eines Transit-Planeten typischerweise drei Transits

gekennzeichnet. Dieser Planet ist ähnlich groß wie unser Jupiter, umkreist seinen Zentralstern jedoch in 20-mal näherer Entfernung als der Abstand zwischen Erde und Sonne. Ein ‚Jahr‘ dauert für diesen Planeten daher nur dreieinhalb Tage! Solche Planeten werden ‚heiße Jupiter‘ genannt, da sie wegen der starken Bestrahlung durch ihre Sonne Oberflächentemperaturen von über 1000 Grad Celsius haben.

Eine weitere Kategorie von Planeten, die im Universum sehr häufig sind, aber genau wie die heißen Jupiter in unserem eigenen Sonnensystem nicht vertreten sind, sind die Mini-Neptune. Unser Neptun hat einen Gesteinskern und ist von einer dicken Gashülle umgeben; er hat einen etwa viermal größeren Durchmesser als unsere Erde. Planeten mit einer dazwischenliegenden Größe gibt es bei uns nicht. Um andere Sterne werden viele Mini-Neptune gefunden, die typischerweise nur den doppelten Durchmesser der Erde

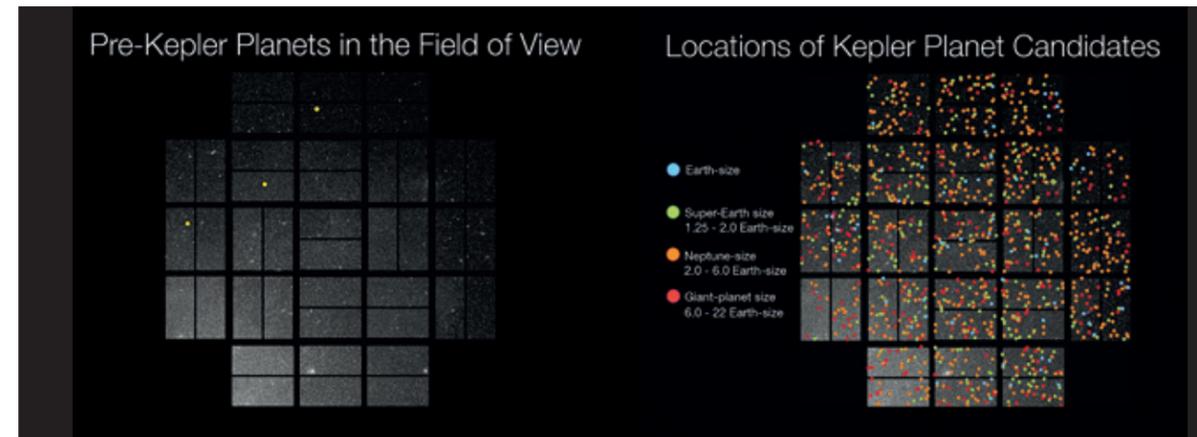


Abb. 2: Ein Himmelsabschnitt so groß wie eine ausgestreckte Hand enthielt im Jahr 2009 drei bekannte Exoplaneten. Das Kepler-Weltraumteleskop durchsuchte diesen Abschnitt vier Jahre lang nach Transits; es wurden dadurch Tausende von Exoplaneten entdeckt.
NASA/W. Stenzel

beobachten möchte: Die ersten beiden verraten einem die Umlaufperiode und der dritte Transit wird zur Bestätigung der Messung verwendet. Ein Planet mit einer neunjährigen Umlaufbahn wie unser Jupiter würde daher verlässliche Transitmessungen über 27 Jahre benötigen – eine technische Herausforderung. Für solche Planeten ist die Radialgeschwindigkeitsmethode besser geeignet. Mit Transits werden daher häufig Planeten in sehr engen Umlaufbahnen gefunden, so zum Beispiel der Planet HD 209458 b (Charbonneau et al. 2000). Dabei bezeichnet HD 209458 den Namen des Zentralsterns; der Planet wird durch das kleine *b*

haben. Sie sind für Forscher besonders interessant, da sie ihre dichte Gasatmosphäre möglicherweise mit der Zeit verlieren und sich in reine Gesteinsplaneten verwandeln (Poppenhaeger et al. 2021).

Die Suche nach Exoplaneten, auf denen Leben entstehen könnte, hat einen besonderen Stellenwert. Leben, wie wir es kennen, benötigt flüssiges Wasser und damit eine Temperatur zwischen 0 und 100°C auf der Planetenoberfläche. Die Oberflächentemperatur wird durch die Helligkeit des Zentralsterns, den Abstand des Exoplaneten zum Stern und mögliche Treibhauseffekte der Planetenoberfläche festgelegt. Bei kleinen



Abb. 3: Wie könnte der Blick in den Himmel von der Oberfläche des Exoplaneten Proxima Cent b aussehen? Die künstlerische Interpretation zeigt den Zwergstern Proxima Centauri über dem Horizont und das Doppelgestirn Alpha Centauri AB rechts darüber.
Bildquelle: ESO/M. Kornmesser

und kühlen Zentralsternen, wie den M-Zwergsternen, liegt diese theoretisch bewohnbare Zone für den Planeten bei einem Abstand, der einer Umlaufzeit von nur etwa zehn bis zwanzig Tagen entspricht. Die wiederkehrenden Transits solcher Planeten können relativ leicht beobachtet werden. Allerdings stellen die magnetischen Eigenschaften von M-Zwergsternen auch ein Risiko für die Planetenatmosphäre dar, denn ihre zufällig auftretenden magnetischen Ausbrüche könnten die Atmosphäre zum Verdampfen bringen. Ob daher ein Exoplanet in der bewohnbaren Zone um einen solchen Stern auch tatsächlich Leben bilden kann, so wie wir es kennen, ist noch unklar. Das in der Entwicklung befindliche Weltraumteleskop PLATO wird nach Planeten in der bewohnbaren Zone von gelben Sternen wie unsere Sonne suchen. Andere Teleskope wie das geplante bodengebundene ‚Extremely Large Telescope‘ werden dann durch Transitbeobachtungen, die nach Wellenlängen des Lichts aufgespalten werden, nach Molekülen in den Atmosphären von erdähnlichen Planeten suchen können. Bereits jetzt gibt es mehr als fünfzig bekannte Exoplaneten, die in den theoretisch bewohnbaren Zonen um ihre Zentralsterne kreisen (siehe Abb. 3). Die nächsten Jahrzehnte werden zeigen, ob wir dort tatsächlich Anzeichen von Leben finden. ♦

Literaturangaben

- Seager, S. & Mallén-Ornelas, G., *The Astrophysical Journal*, Volume 585, Issue 2, pp. 1038-1055 (2003).
Dressing, C. D. & Charbonneau, D., *The Astrophysical Journal*, Volume 767, Issue 1, article id. 95, pp. (2013).
Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., Mayor, M., *The Astrophysical Journal*, Volume 529, Issue 1, pp. L45-L48 (2000).
Poppenhaeger, K., Ketzler, L., Mallonn, M., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 500, Issue 4, pp.4560-4572 (2021).



PROF. DR. KATJA POPPENHÄGER ist Professorin für Sternphysik und Exoplaneten am Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam und der Universität Potsdam. Sie erforscht Planeten in anderen Sonnensystemen durch Beobachtungen mit Großteleskopen. Ihr derzeitiger Lieblingsplanet ist der 25 Millionen Jahre junge Exoplanet AU Mic b.
Foto: AIP/J. Fohlmeister

Das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße

STEFAN GILLESSEN

Im Zentrum der Milchstraße haust ein Schwarzes Loch, das 4 Millionen Mal so schwer ist wie die Sonne. Seine Existenz ist der beste Beweis dafür, dass es die abstrusen Gebilde wirklich gibt, die die Relativitätstheorie vorhergesagt hat. Sein Nachweis war konzeptionell einfach, technisch aber sehr aufwendig. Mit modernen Großteleskopen konnte das Schwerkraftfeld im Milchstraßenzentrum genau vermessen werden. Was die Aufnahmen zeigen ist leicht zu verstehen: Sterne, die sich auf Keplerbahnen bewegen. Das ist das untrügliche Zeichen einer zentralen, kompakten Masse. Seit diesen Aufnahmen wissen wir: Schwarze Löcher sind Realität. Keplers Gesetze waren der Schlüssel zum Nachweis des Massemonsters im Herzen unserer Galaxie.

Der Physik-Nobelpreis 2020

Es ist der 6. Oktober 2020. Der Alltag im Wissenschaftsbetrieb hat sich den Gegebenheiten der globalen Pandemie angepasst. Prof. Reinhard Genzel sitzt an seinem Schreibtisch am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching bei München und nimmt an einem virtuellen Treffen teil. Beinahe schon altmodisch, dass er durch einen Telefonanruf gestört wird. Eine Nummer, die mit +46 beginnt? Mit unverkennbar skandinavischem Akzent tönt es aus dem Hörer „This is Stockholm“. Die schwedische Akademie der Wissenschaften hat gerade beschlossen, den Nobelpreis für Physik zu einer Hälfte an den Theoretiker Roger Penrose und zur anderen Hälfte gemeinsam an die beobachtenden Astrophysiker Andrea Ghez und Reinhard Genzel zu verleihen. Die beiden werden für ihre jahrzehntelange Arbeit geehrt, die die Wissenschaftsgemeinde überzeugt hat, dass im Zentrum unserer eigenen Galaxie ein massereiches Schwarzes Loch sitzt, das etwa 4 Millionen Mal so schwer ist wie die Sonne. Der Nachweis gelang durch die Beobachtungen von Sternbahnen. In den Aufnahmen sieht man die Sterne über die Jahre hinweg um eine dunkle Stelle herumtanzen. Die Bewegung der Sterne folgt dabei extrem genau den Keplerschen Gesetzen – ein untrügliches Zeichen dafür, dass im Zentrum des Systems die Schwerkraft einer kompakten Masse die Sterne auf diese Bahnen zwingt. In diesem Sinne sind Keplers Gesetze also weiterhin hoch-

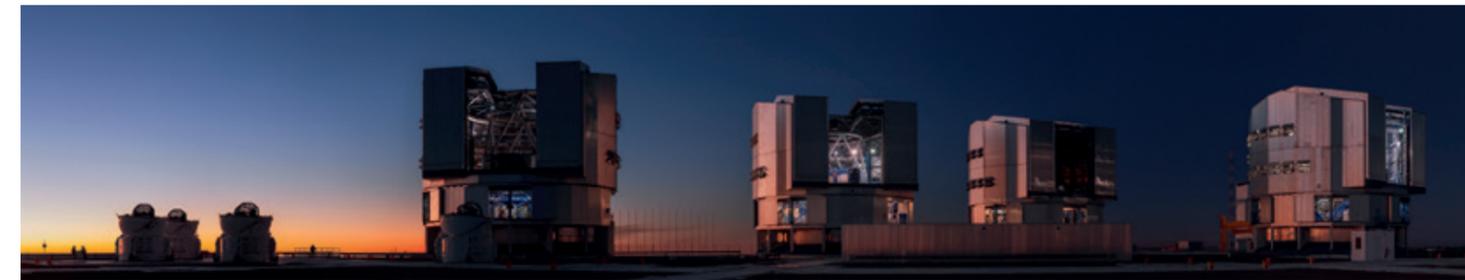


Prof. Reinhard Genzel, Nobelpreis für Physik 2020. Foto: MPE/Jan Greune

aktuell – sie gehören zum Rüstzeug jedes Astronomen und erlauben es, weit entfernte Massen zu messen; sie sind sogar Teil von Nobelpreis-würdigen Messungen [1].

Konzeptionell einfach – aber modernste Teleskop-technik

Hätte Johannes Kepler die Bilder gesehen, die Reinhard Genzel verwendet hat, wäre ihm auch sofort klar gewesen, dass die Sterne im Milchstraßenzentrum um eine deutlich schwerere Masse kreisen und seinen Gesetzen folgen. Trotzdem hatte Kepler keine Chance, das Schwarze Loch im Milchstraßenzentrum zu entdecken, denn das Fernrohr wurde erst zu Keplers Lebzeiten erfunden. Reinhard Genzels Daten basieren hingegen auf modernster Teleskoptechnik.



Was ist ein Schwarzes Loch?

Ebenso hätte Kepler nicht gewusst, was ein Schwarzes Loch ist. Eine solche Idee wurde erstmals 1783 durch den Briten John Michell erwähnt, der sich versuchte vorzustellen, was passieren würde, wenn die Sonne sehr viel größer wäre. Seine Gedanken enden klar in dem Konzept, was wir heute Schwarzes Loch nennen [2]. Die theoretischen Grundlagen schufen aber erst Albert Einstein und Karl Schwarzschild 1916 [3, 4], mit den Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie und einer ihrer Lösungen – eben der Schwarz-Loch-Lösung. Demnach wird ein kompaktes Gebilde zu einem Schwarzen Loch, wenn die Geschwindigkeit, die man bräuchte, um es verlassen zu können, die Lichtgeschwindigkeit von 300.000 km/s übersteigt. Um die Erde zu verlassen, benötigt man nur etwa 12 km/s, bei der Sonne sind es schon 618 km/s. Wäre die Sonne aber nur 3 km groß, könnte das Licht sie nicht mehr verlassen, da die Fluchtgeschwindigkeit dann größer wäre als die Lichtgeschwindigkeit. Die Sonne erschiene also schwarz. Da wir auch wissen, dass Materie nicht schneller als die Lichtgeschwindigkeit sein kann, ist das Gebilde also auch ein Loch: Man kommt hinein, aber nicht wieder hinaus. Aber die Wirkung des Schwarzen Lochs – nämlich seine Schwerkraft –, die kann man sehr wohl von außerhalb messen, und genau das haben die Teams von Reinhard Genzel und Andrea Ghez getan.

Ein Blick hinter einen Staubvorhang

Der Blick quer durch die Milchstraße ist mit sichtbarem Licht nicht möglich. Staubwolken in den Spiralarmen der Galaxie blockieren die Sicht, so dass die Astronomen andere Strahlungsarten verwenden müssen, um ins galaktische Zentrum zu sehen. Ähnlich

wie ein Arzt Röntgenstrahlen verwendet, um in den menschlichen Körper zu blicken, verwendete Reinhard Genzel und sein Team Infrarotlicht, um ins Herz der Galaxis zu blicken. Bei einer Wellenlänge von rund 2 Mikrometern, also viermal langwelliger als sichtbares Licht, kann man durch die Staubwolken hindurchsehen. Da die beiden Wellenlängen sich nur wenig unterscheiden, kann man klassische Teleskope verwenden, und man sieht in etwa auch die gleichen Objekte wie im sichtbaren Licht – nämlich Sterne. Das wäre anders, würde man im Röntgenbereich schauen oder im Radiobereich. Auch hier blickt man durch die Milchstraße, würde aber nur Gas sehen können und keine Sterne. Viele klassische Teleskope sind für den Blick hinter Staubwolken inzwischen mit Infrarotkameras ausgestattet. Die zugehörige Technologie ist allerdings deutlich aufwendiger und teurer, als es normale optische Kameras wären. Das liegt vor allem daran, dass man die Detektoren auf rund -200°C abkühlen, also mit flüssigem Stickstoff kühlen muss. Geeignete Infrarottechnologie gibt es erst seit Beginn der 1990er Jahre.

So nah und doch so fern

Das Zentrum der Milchstraße beherbergt zwar das nächste schwere Schwarze Loch, und der Abstand von rund 25000 Lichtjahren ist aus der kosmischen Perspektive nur ein Katzensprung. Aber es ist trotzdem eine gewaltige Entfernung. Der scheinbare Durchmesser des Schwarzen Lochs entspricht gerade einmal dem einer Münze auf dem Mond oder der Dicke eines Haars aus 1000 km Entfernung. Die Umlaufbahnen der Sterne wären in etwa so groß wie ein Stadion auf dem Mond oder eine Murmel aus 1000 km Distanz betrachtet. Deswegen benötigt man extrem scharfe Bilder, was wiederum den Einsatz von großen Teleskopen nach

Abb. 1: Abendstimmung auf dem Paranal. Die vier Großteleskope der Europäischen Südsternwarte werden für eine lange Nacht vorbereitet. Die einzelnen Teleskopkuppeln messen knapp 30m und beherbergen jeweils ein 8m-Teleskop. Foto: ESO/B. Tafreshi



Abb. 2: Die Milchstraße über Paranal. Die vier Großteleskope der Europäischen Südsternwarte beobachten den extrem dunklen Nachthimmel über der chilenischen Atacama-Wüste.
Foto: John Colosimo/ESO

sich zieht. 8 bis 10 m messen die Spiegel der Teleskope, die Reinhard Genzel auf dem Berg Paranal in Chile und Andrea Ghez auf dem Vulkan Mauna Kea in Hawaii nutzen. Die Spiegelfläche ist in etwa so groß wie eine Zweizimmerwohnung. Es sind die größten Teleskope der Welt.

Die Turbulenz der Lufthülle ausgleichen

Je größer der Spiegeldurchmesser, desto schärfer wird das Bild. Diese Regel gilt jedoch leider nicht uneingeschränkt. In der Praxis ist die Bildschärfe zusätzlich limitiert wegen der Turbulenz in der irdischen Lufthülle, durch die das Sternlicht erst einmal fliegt, kurz bevor es das Teleskop erreicht. Häufig werden die Bilder dann nicht schärfer, als es einem Teleskop von gerade einmal 20 cm Durchmesser entspricht. Warum

lohnensich die großen Spiegel trotzdem? Die Antwort liegt in einer trickreichen Technik, genannt adaptive Optik, mit der man die Turbulenz der Atmosphäre zu einem großen Teil ausgleichen kann. Dazu muss in der Nähe des Objekts, das man sich anschauen will, ein heller Leitstern verfügbar sein. Dessen Licht wird in einem sogenannten Wellenfrontsensor analysiert, der bestimmt, wie die Wellenfront des einfallenden Lichts verbogen ist. Mit dieser Kenntnis kann man dann einen verformbaren Spiegel gerade so verbiegen, dass seine Wirkung die der Erdatmosphäre wieder aufhebt. Dieses Messen und Stellen muss man allerdings nicht nur einmal machen, sondern mehrere Hundert Mal pro Sekunde. Erst mit adaptiver Optik spielen bodengebundene Großteleskope ihre Stärken voll aus – und dann schlagen sie sogar das berühmte Hubble-Weltraumteleskop.

Die Bahn eines Sterns verrät schließlich das Schwarze Loch

Seit 1992 hat Reinhard Genzels Team Sterne im unmittelbaren Zentrum der Milchstraße verfolgt. Drei Jahre später begann auch Andrea Ghez zu messen. In einem wissenschaftlichen Wettrennen gelang es den beiden Gruppen, die Evidenz für das Schwarze Loch immer weiter zu steigern. Vermutet wurde seine Existenz bereits seit 1971 [5], aber die ersten Messungen rund eine Dekade später waren technisch nur in der Lage, Gaswolken zu sehen. Diese bewegten sich zwar mit erstaunlich hohen Geschwindigkeiten, aber einen sicheren Nachweis konnte man damit nicht führen. Erst die Infrarotdetektoren der 1990er Jahre erlaubten es, Sterne zu verfolgen. Gegenüber Gaswolken haben sie einen entscheidenden Vorteil: Die einzige Kraft,

die ihre Bahn verändern kann, ist die Schwerkraft. Sie sind damit ideale Sonden, um ein schweres Schwarzes Loch aufzuspüren. 1996 zeigten die Bilder, dass sich die Sterne sehr schnell bewegten [6], 2000 sogar, dass die Bahnen gekrümmt sind [7] – und damit eine direkte Schwerkraftwirkung haben. 2002 schließlich gelang es, die vollständigen Bahndaten des Sterns S2 zu bestimmen [8] – in diesem Jahr flog er nahe am Massezentrum vorbei und ein großer Teil der Bahn konnte in kurzer Zeit vermessen werden. Das ist genau der Inhalt des zweiten Keplerschen Gesetzes. Die Auswertung brachte dann Spektakuläres ans Licht: Der Stern umläuft eine Masse von 4 Millionen Sonnenmassen alle 16 Jahre auf einer Keplerellipse. Die bei weitem einfachste Erklärung für diese Beobachtungen ist ein Schwarzes Loch. Alles andere, was man sich ausdenken kann, ist

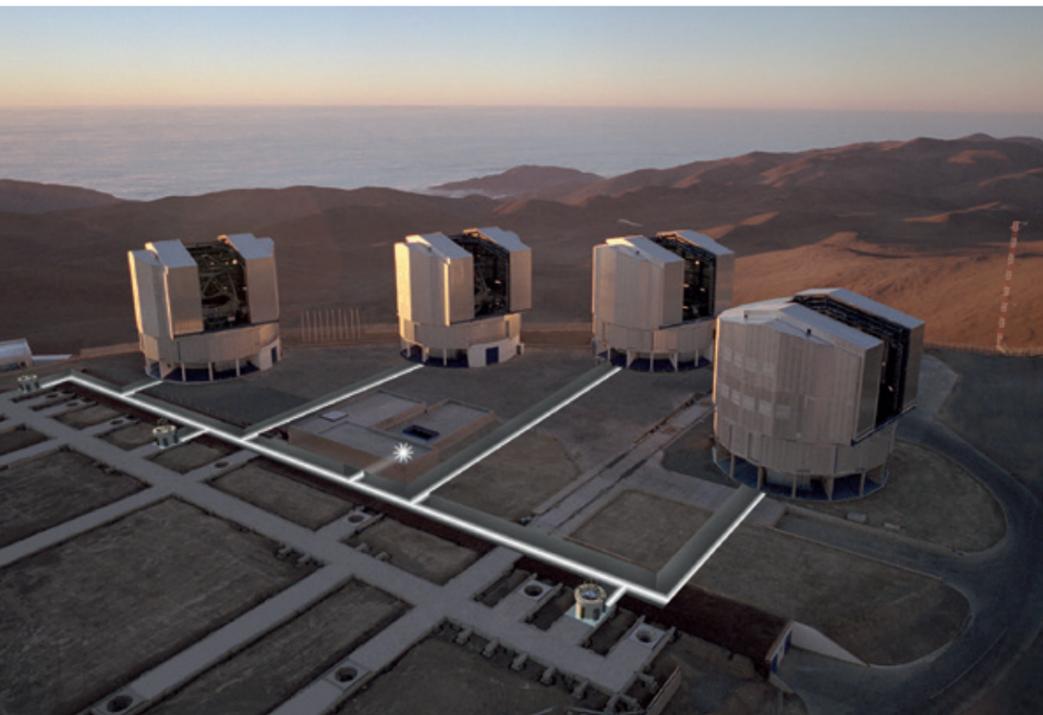


Abb. 3: Drohnenaufnahme der vier Großteleskope der Europäischen Südsternwarte auf dem Berg Paranal. Die weißen Linien deuten an, wie das Licht der Teleskope zu einem Interferometer kombiniert wird. Foto: ESO

wesentlich komplizierter und zudem sehr hypothetisch – es benötigt weitere Annahmen, die durch keine anderen Beobachtungen gedeckt sind. Die Fachwelt akzeptierte die Entdeckung sofort, und 18 Jahre später wurde sie mit dem Nobelpreis geadelt.

Noch näher heran

Reinhard Genzel und sein Team haben nach der Entdeckung des Schwarzen Lochs aber nicht aufgehört, sondern haben sie zum Ansporn genommen, möglichst viel über das Schwarze Loch in Erfahrung zu bringen. Eine Frage, die sich sofort stellt, ist: Gilt denn in der Nähe eines Schwarzen Lochs tatsächlich die Einsteinsche Relativitätstheorie? Diese Theorie liefert ja das mathematische Verständnis, was Schwarze Löcher eigentlich sind. Außerdem sagt sie voraus, dass in dem extremen Schwerfeld die Sternbahnen leicht abweichen müssten von dem, was Kepler gefunden und Isaac Newton später begründet hatte. Doch die Unterschiede sind sehr klein und werden am größten, wenn die Sterne dem Schwarzen Loch besonders nahe sind. Es war also klar: Man würde genauer messen und

noch näher an das Schwarze Loch heranzoomen müssen. Ein größeres Teleskop wäre eine Lösung, doch es gab eine elegante, günstigere und schnellere Möglichkeit: Die Europäische Südsternwarte betreibt nicht nur ein Großteleskop auf dem Paranal, sondern gleich vier. Und wenn man diese interferometrisch zusammenschaltet, kann man danach im Computer Bilder und Positionen synthetisieren, die so scharf und genau sind, wie sie von einem Teleskop stammen würden, das so groß ist wie der Abstand der Teleskope zueinander [9] – stolze 120 m. Ein Interferometer auf dem Paranal erzeugt also de facto Daten wie ein 120-m-Teleskop.

Testen der Relativitätstheorie

Im Jahr 2006 hat das Team mit der Planung und dem Bau eines geeigneten Interferometers begonnen. Ende 2016 war es dann schließlich so weit: Das Interferometer, GRAVITY getauft, blickte das erste Mal zum galaktischen Zentrum, nachdem es mit den vier Großteleskopen der ESO verbunden war. Seit 2017 wird es nun routinemäßig verwendet. Und das war gerade rechtzeitig, denn der Stern S2 durchlief nach 2002 genau

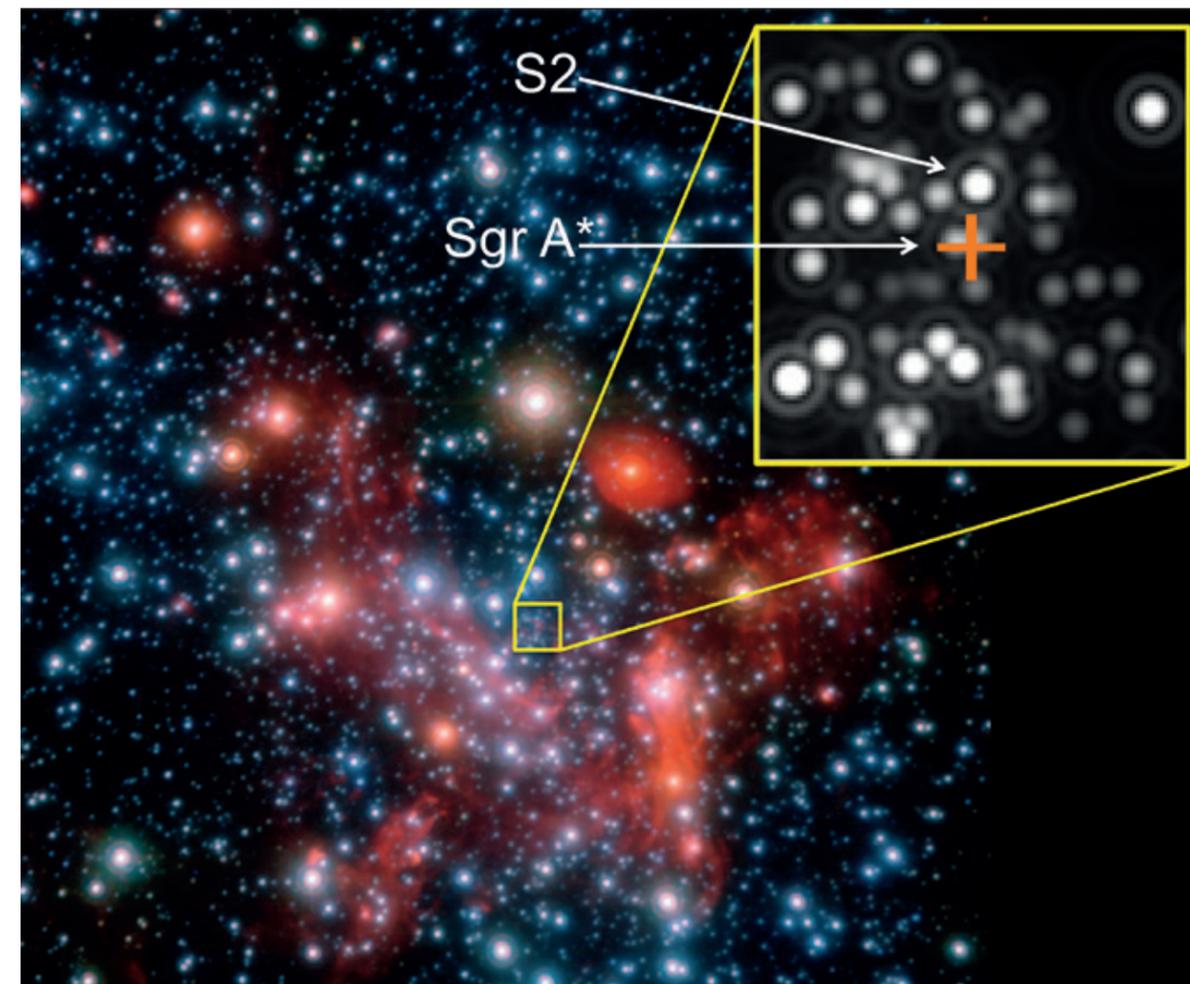


Abbildung 4: Infrarot-Aufnahme des galaktischen Zentrums, gewonnen mit einem der Großteleskope der Europäischen Südsternwarte. Die Position des Schwarzen Lochs ist mit einem roten Kreuz markiert. Der Stern S2 umkreist diesen Punkt alle 16 Jahre einmal. Bild: ESO/MPE/S. Gillessen et al.



Abb. 5 (links): Illustration der Umlaufbahnen dreier Sterne um das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße. Die Sterne bewegen sich auf Keplerellipsen. Bild: ESO/M. Parsa/L. Calçada

Abb. 6: Illustration der Umlaufbahnen der Sterne um das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße. Neben S2 wurden Orbits für rund 50 Sterne gemessen. Alle Sterne bewegen sich auf Keplerellipsen. Bild: ESO/L. Calçada/spaceengine.org

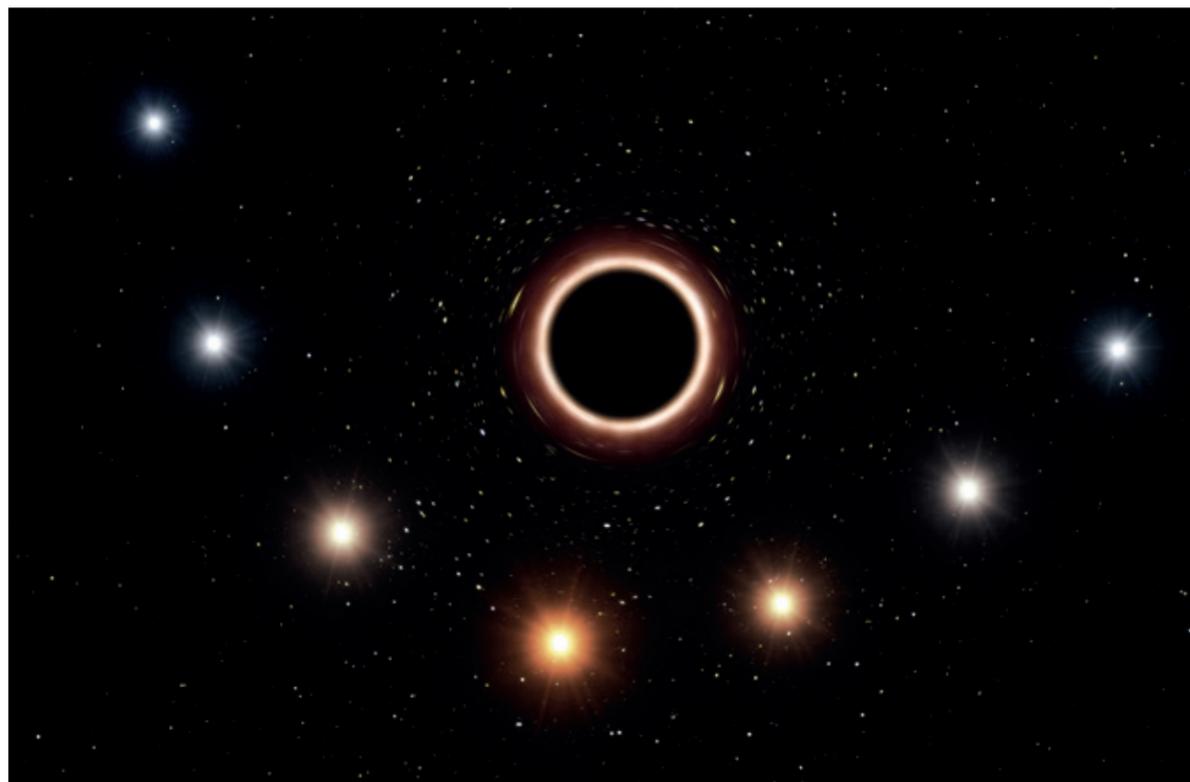


Abb. 7: Illustration der Rotverschiebung des Lichts des Sterns S2, als er 2018 sehr nahe am Schwarzen Loch vorbeiflog. Zum Zeitpunkt der größten Annäherung ist die Licht am stärksten gerötet. Bild: ESO/M. Kornmesser

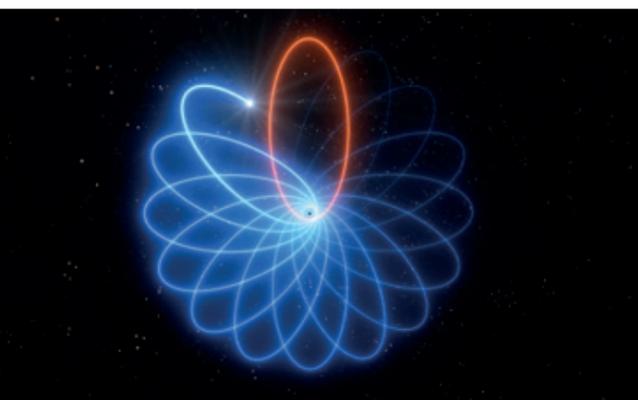


Abb. 8: Illustration der sich nicht schließenden Ellipsenbahnen der allgemeinen Relativitätstheorie. Pro Umlauf verschiebt sich die Ellipse etwas vorwärts in ihrer Ebene, so dass eine Rosettenfigur entsteht. Der Effekt ist hier stark übertrieben, um ihn sichtbar zu machen. Bild: ESO/L. Calçada

16 Jahre später wieder den Punkt der größten Annäherung – also im Jahr 2018. Die interferometrischen Daten sind spektakulär, und die ultragenau Vermessung des schnellen Teils der Bahn hat in kurzer Zeit drei Tests der Relativitätstheorie ermöglicht:

- Das Licht des Sterns erscheint etwas energieärmer, wenn der Stern nahe am Schwarzen Loch steht, da das Sternlicht dann gegen das Schwerkraftfeld des Schwarzen Lochs ankämpfen muss, um zu entkommen. Diese Gravitationsrotverschiebung hat Reinhard Genzels Team im Juni 2018 nachweisen können, wenige Wochen nach dem engsten Vorbeiflug [10]. 2019 hat Andrea Ghez diese Beobachtung bestätigen können. Die Rotverschiebung verhält sich genauso, wie Einsteins Theorie es vorhersagt.

- Ein zweiter Test war, die Rotverschiebung für verschiedene Atomsorten zu vergleichen. Im Licht des Sterns S2 kann man Wasserstoff und Helium nachweisen. Wie nach Einstein erwartet, ist die Rotverschiebung unabhängig von der Atomsorte [11]. Das prüft das sogenannte Äquivalenzprinzip, also die Aussage, dass alle Materie gleich auf ein Schwerkraftfeld reagiert.

- Der dritte Test betrifft die Form des Gravitationsfeldes. Einstein hatte vorhergesagt, dass die Umlaufbahnen keine exakten Ellipsen sind, sondern sich um ein kleines Stück bei jeder Umdrehung weiterdrehen. Für den Planeten Merkur ist der Effekt bereits zu Einsteins Zeiten bekannt gewesen. Im Frühjahr 2020 konnte Reinhard Genzels Team dann zeigen, dass dieses Bewegungsgesetz auch für den Stern S2 um das Schwarze Loch gilt [12]. S2 bewegt sich also anders, als es Kepler vorausgesagt hätte – die Abweichung ist aber klein und zurzeit nur mit der Auflösung von GRAVITY zu sehen.

Die Suche geht weiter

Haben Keplers Gesetze nach diesen Tests ausgedient? Die Antwort ist ein klares Nein. Schon seit über 100 Jahren, nämlich mit Veröffentlichung der allgemeinen Relativitätstheorie, weiß man, dass die Keplerschen Gesetze nur näherungsweise gelten. Daran ändern neuere Messungen auch nichts. Die Unterschiede zwischen den beiden Theorien sind sehr klein, nur schwer zu messen, und deswegen bleiben in der Praxis die Keplergesetze gültig. Und die Grundidee bei den Messungen am Schwarzen Loch bleibt die gleiche, die schon Tycho Brahe und Johannes Kepler verfolgt hatten: Möglichst genaues Vermessen der Bahnen, um so unser physikalisches Weltbild zu prüfen. Denn es ist den Physikern auch klar, dass die Relativitätstheorie nicht die finale Theorie sein kann – sie vernachlässigt Quanteneffekte. Die Suche nach der Weltformel geht weiter, auch am Schwarzen Loch im Zentrum der Milchstraße.



DR. STEFAN GILLESSEN ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Garching. Er erforscht das galaktische Zentrum in Reinhard Genzels Gruppe. Die langjährigen Beobachtungen des Teams haben zum Nachweis geführt, dass sich im Zentrum der Milchstraße ein schwarzes Loch befindet. Die Arbeiten wurden 2020 mit dem Nobelpreis für Physik für Reinhard Genzel geehrt.

Literaturangaben

- [1] *A forty year journey*; Reinhard Genzel 2021; <https://arxiv.org/abs/2102.13000>
- [2] *On the Means of Discovering the Distance, Magnitude, &c. of the Fixed Stars, in Consequence of the Diminution of the Velocity of Their Light, in Case Such a Diminution Should be Found to Take Place in any of Them, and Such Other Data Should be Procured from Observations, as Would be Farther Necessary for That Purpose.* By the Rev. John Michell, B. D. F. R. S. In a Letter to Henry Cavendish, Esq. F. R. S. and A. S.; John Michell 1783; *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 74 (1784), pp. 35-57
- [3] *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*; Albert Einstein 1916; *Annalen der Physik*, vol. 354, Issue 7, pp.769-822
- [4] *On the Gravitational Field of a Mass Point According to Einstein's Theory*; Karl Schwarzschild 1916; *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Phys.-Math. Klasse*, 189-196
- [5] *On quasars, dust and the galactic centre*; Donald Lynden-Bell & Martine Rees 1971; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 152, p. 461
- [6] *Observations of stellar proper motions near the Galactic Centre*; Andreas Eckart et al. 1996; *Nature*, Volume 383, Issue 6599, pp. 415-417
- [7] *The accelerations of stars orbiting the Milky Way's central black hole*; Andrea Ghez et al. 2000; *Nature*, Volume 407, Issue 6802, pp. 349-351
- [8] *A star in a 15.2-year orbit around the supermassive black hole at the centre of the Milky Way*; Rainer Schödel et al. 2002, *Nature*, Volume 419, Issue 6908, pp. 694-696
- [9] *GRAVITY: Observing the Universe in Motion*; Frank Eisenhauer et al. 2011; *The Messenger*, vol. 143, p. 16-24
- [10] *Detection of the gravitational redshift in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole*; GRAVITY coll. 2018; *Astronomy & Astrophysics*, Volume 615, id. L15, 10 pp.
- [11] *Test of the Einstein Equivalence Principle near the Galactic Center Supermassive Black Hole*; GRAVITY coll. 2018; *Physical Review Letters*, Volume 122, Issue 10, id.101102
- [12] *Detection of the Schwarzschild precession in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole*; GRAVITY coll. 2020; *Astronomy & Astrophysics*, Volume 636, id. L5, 14 pp.

Die Harmonie der dunklen Himmelsphären

JENNY WAGNER

Keplers Erkenntnisprozess war geprägt von Daten statt Annahmen. Er entdeckte dadurch neue physikalische Gesetzmäßigkeiten. Mit der gleichen Herangehensweise kann man heute die Strukturen von Dunkler Materie im Universum beschreiben und verstehen.

Wie im Talmud geschrieben, sehen wir die Welt nicht, wie sie ist, sondern wie wir sind. Über 1000 Jahre war die Erde das Zentrum unseres Universums und mythische Wesen hielten die Gestirne auf ihren Bahnen. Die enge Verbindung zwischen Astronomie und Astrologie prägte das Weltbild von Johannes Kepler, obwohl er das heliozentrische Weltbild von Kopernikus favorisierte. 1596 versuchte er die bekannten Planetenbahnen als Kugelschalen um die fünf Platonischen Körper zu beschreiben. Wie bereits Pythagoras hatte Kepler das Ziel, die mathematische Harmonie der Himmelsphären zu vollenden. Doch die ausgezeichneten Beobachtungsdaten, die er von Tycho Brahe erhielt, passten partout nicht in das göttliche Schema.

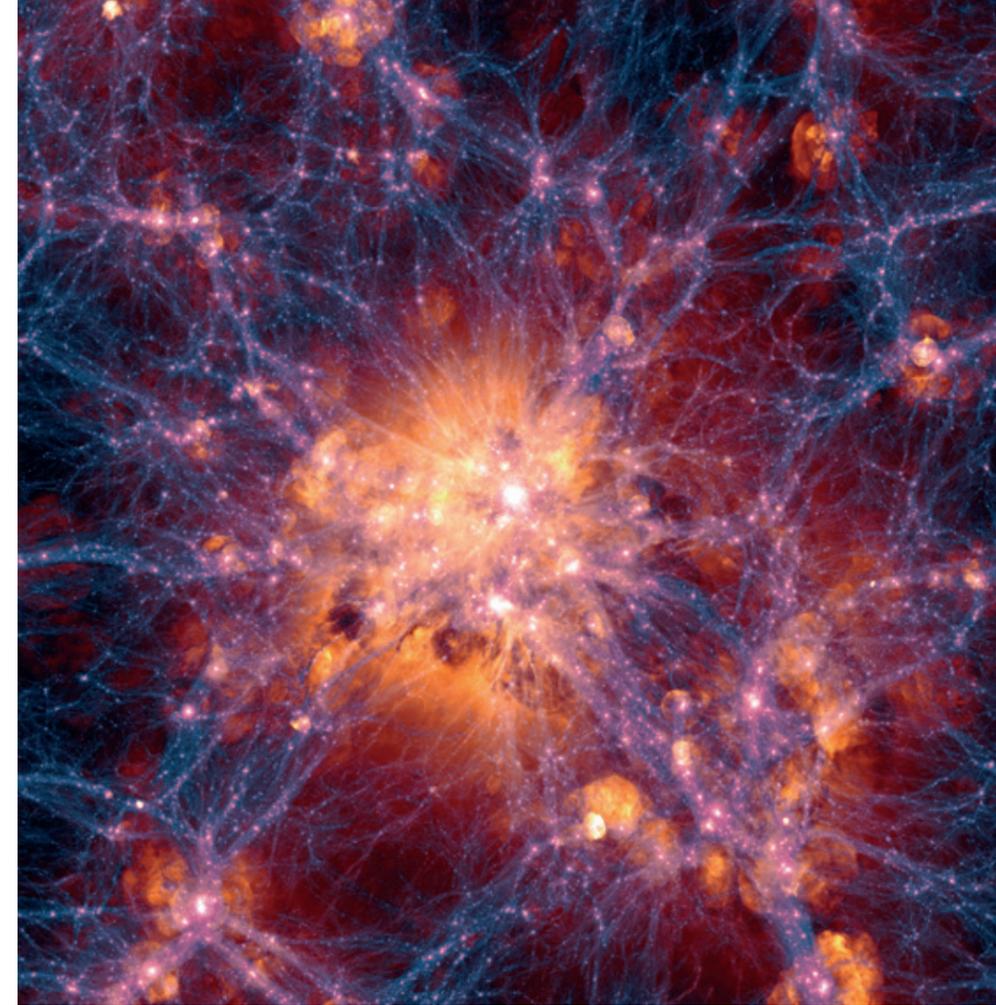
Statt der Natur Epizykel und seinen Willen aufzuzwingen, verwarf Kepler alle Modelle, die nicht empirisch bestätigt waren und machte die Fülle an Messdaten, die Tycho Brahe ihm hinterlassen hatte, zur alleinigen Grundlage seines Erkenntnisgewinns. Er entdeckte so eine völlig neue Harmonik der Himmelsphären und wurde zum Vorreiter der beobachtungsbasierten Wissenschaft.

Seitdem sind über 400 Jahre vergangen, in denen der technische Fortschritt so viele Messdaten erbracht hat, dass ein Mensch sie in seinem Leben nicht mehr auswerten kann. Durch sie wissen wir nun, dass es Myriaden von Sonnensystemen wie unseres gibt und unzählige Galaxien wie unsere Milchstraße. Die Beobachtungen, z. B. die Rotationskurven von Sternen in Galaxien, zeigen auch, dass Materie im Universum zu existieren scheint, die wir mit keinem Teleskop bisher erfassen konnten – die Dunkle Materie.

Computersimulationen gelang es, die Verteilung Dunkler Materie in Galaxien und Galaxienhaufen nachzubilden und mit den indirekten Hinweisen in Beobachtungen zu vergleichen. Alles deutet darauf hin, dass diese mysteriöse Materieart über viele Größenordnungen gleiche Strukturen formt. 30 Jahre zerbrachen sich Wissenschaftler die Köpfe darüber, diese Selbstähnlichkeit aus der Entstehungsgeschichte der beobachteten Galaxien und Galaxienhaufen zu erklären. Die Versuche ähnelten Keplers Streben, die Harmonik der Himmelsphären zu finden. Erst 2019 stellte sich heraus, dass eine einfachere Erklärung dafür existiert, als man sie in minutiös ausbalancierten Gleichgewichtszuständen zwischen Geschwindigkeiten und potenziellen Energien der Dunklen Materieteilchen in ihrem eigenen Schwerkraftfeld suchte.

Zum einen folgt die Schwerkraft für alle Massen dem gleichen Gesetz. Zum anderen bewegen sich Dunkle Materieteilchen so langsam, dass ihre Geschwindigkeit in der Betrachtung kaum eine Rolle spielt. Mit nur diesen beiden Vorgaben lassen sich die Profile von Dunklen Materieansammlungen beschreiben, ohne dass man weitere Annahmen für die Erklärung bemühen muss.

Durch Brahes Messdaten und dessen Ansicht, dass Sein mehr ist als Scheinen, sah Kepler einen Teil der Welt, wie sie wirklich ist. Seine Auffassung „Wage umzudenken“ erfordert bis heute den gleichen Mut, um bestehende Vorstellungen zu revidieren. Doch seine Erfolge zeigen, dass es sich lohnt, seinem Beispiel zu folgen, um tiefere Erkenntnisse über das Universum zu gewinnen. ♦



Computersimulation eines Galaxienhaufens. Bläuliche Farbtöne markieren Ansammlungen Dunkler Materie, gelbliche Regionen sichtbarer Materie. Ein Vergleich zwischen Simulation und Beobachtung (s. Abb. 1) zeigt Eigenschaften der Dunklen Materie auf, insbesondere welche Strukturen sie bildet.
Bild: Illustris Collaboration / Illustris Simulation

Teleskopaufnahme des Galaxienhaufens CLOO24. Durch Beobachtungen des starken Gravitationslinseffekts in diesem Haufen lässt sich die Verteilung der Dunklen Materie in dieser kosmischen Struktur rekonstruieren.
Bild: NASA, ESA, M.J. Jee and H. Ford (Johns Hopkins University)



DR. JENNY WAGNER

Nach einem Diplom in der Teilchenphysik und einer Dissertation in den Lebenswissenschaften erforscht Jenny Wagner seit 2014 die Verteilung Dunkler Materie im Universum. Ihre Arbeiten dazu wurden 2020 mit dem Preis für mutige Wissenschaft ausgezeichnet.



Ein Schwarzes Loch im Fokus

HEINO FALCKE

Wie kann man ein Foto von etwas schießen, das absolut schwarz und dazu noch Millionen von Lichtjahren entfernt ist? Dazu braucht es eine besondere Kamera, bestehend aus 8 der besten Radioteleskope, verteilt über die ganze Welt, und ein Team von über 200 Forscherinnen und Forschern, die das Foto realisieren.

„Mir kommen die Wege, auf denen die Menschen zur Erkenntnis der himmlischen Dinge gelangen, fast ebenso bewundernswürdig vor wie die Natur der Dinge selber“, schreibt Johannes Kepler in seiner Astronomia Nova.

Bewundernswert ist nicht nur dieses erste Bild eines schwarzen Loches, das am 10. April 2019 der Öffentlichkeit präsentiert wurde, sondern auch die jahrzehntelange Arbeit, die Koordination der Zusammenarbeit, die Bewältigung der Datenflut und der enorme technische Aufwand, der dazu nötig war. Und das alles nur, damit wir uns die Wunder des Universums vor Augen führen können? Nein, auch die Wissenschaftler werden noch lange an solchen Aufnahmen forschen, um die Eigenschaften von schwarzen Löchern besser zu verstehen.

Schwarze Löcher und ihre Eigenschaften

Die Existenz Schwarzer Löcher folgt zwar aus der Allgemeinen Relativitätstheorie Albert Einsteins, bleibt aber dennoch lange umstritten. Den glaubwürdigsten Nachweis stellt ein Foto dar. Denn was der Mensch sehen kann, begreift er eher. Aber was hat es nun mit Schwarzen Löchern auf sich?

An seiner Schwerkraftwirkung kann man ein Schwarzes Loch erkennen, aber sehen kann man es nur, wenn es vor hellem Hintergrund als dunkler Schatten erscheint. Ein Schwarzes Loch ist das dunkelste Objekt, das es geben kann.

Ein Schwarzes Loch hat eine riesige Anziehungskraft, so dass Material in seiner Umgebung in einer sogenannten Akkretionsscheibe um das Schwarze Loch rotiert und sich immer mehr annähert. Dabei wird es immer heißer und strahlt Licht ab. Ein Teil der hereinstürzenden Materie wird aufgrund der Magnetfelder um 90 Grad abgelenkt und in zwei gebündelten Strahlen, sogenannten Jets, in die Weiten des Weltalls geschleudert.

Alles andere wird vom Schwarzen Loch verschluckt. Das gilt nicht nur für Materie, sondern sogar für Licht. Daher rührt der Name. Die Entfernung, ab der es kein Entrinnen mehr gibt, nennt man den Ereignishorizont. Dieser Horizont ist eine strikte Grenze

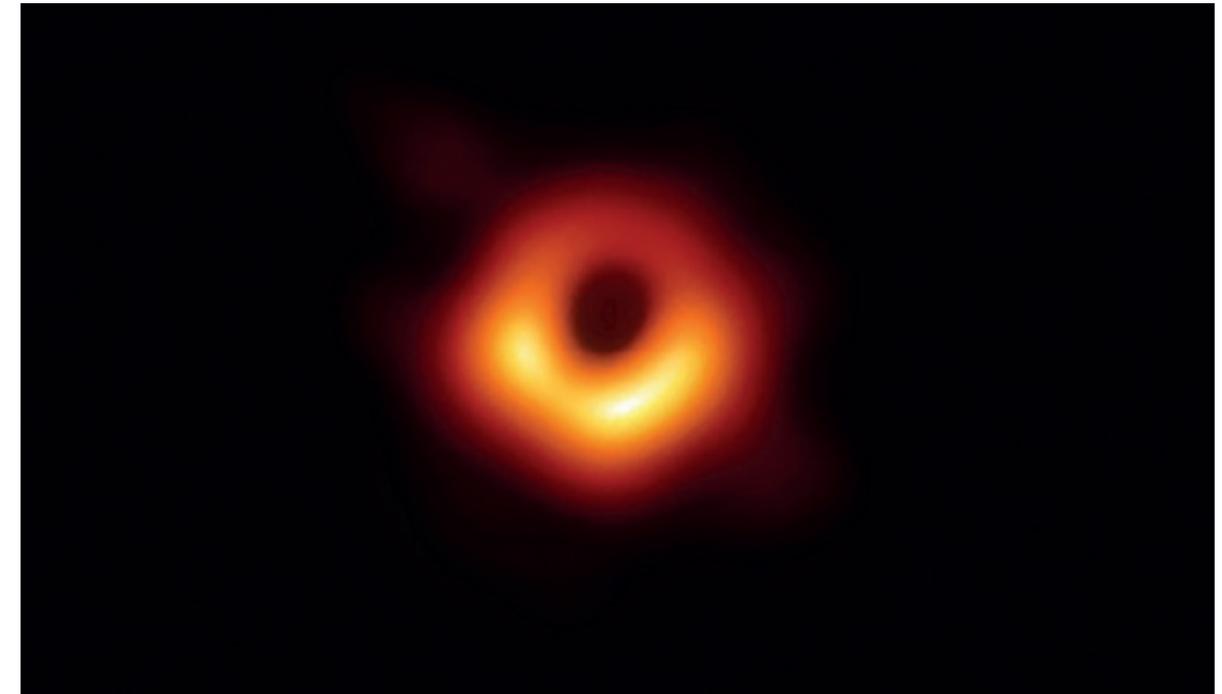


zwischen der Welt im Schwarzen Loch und dem restlichen Universum. Die Materie eines Schwarzen Lochs ist extrem zusammengepresst. Wenn man die Sonne auf 3 km zusammengequetscht, wäre sie ein Schwarzes Loch. Je größer die Masse eines Schwarzen Lochs ist, desto stärker ist die Anziehungskraft und desto größer ist der Ereignishorizont.

Geeignete Fotoobjekte

Im Zentrum von Galaxien befinden sich riesige Schwarze

Die elliptische Riesengalaxie im Sternbild Jungfrau gehört zum Virgo-Galaxienhaufen. Sie ist 55 Millionen Lichtjahre von uns entfernt und viel größer als unsere Milchstraße. Zu erkennen ist ein Jet, der aus dem Zentrum von M87 herausströmt. Bild: NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA). Acknowledgment: P. Cote (Herzberg Institute of Astrophysics) and E. Baltz (Stanford University)



Das erste Bild eines Schwarzen Lochs
Bild: EHT Collaboration

Löcher. Je größer die Galaxie, desto größer ist dieses zentrale Schwarze Loch. Daher gibt es zwei Möglichkeiten für die Aufnahme eines Schwarzen Lochs: das nächstgelegene Schwarze Loch im Zentrum unserer Milchstraße oder ein viel größeres Schwarzes Loch in der größten Galaxie in unserer kosmischen Nähe, der elliptischen Riesengalaxie M87 im Virgohaufen. M87 befindet sich in einer Entfernung von 55 Millionen Lichtjahren. Die Masse des Schwarzen Lochs im Zentrum liegt bei 6,5 Milliarden Sonnenmassen. Dagegen ist das Objekt in unserer Milchstraße, das sich hinter der Bezeichnung Sagittarius A* verbirgt, ein Leichtgewicht von 4 Millionen Sonnenmassen. Dafür beträgt seine Entfernung nur 27 000 Lichtjahre.

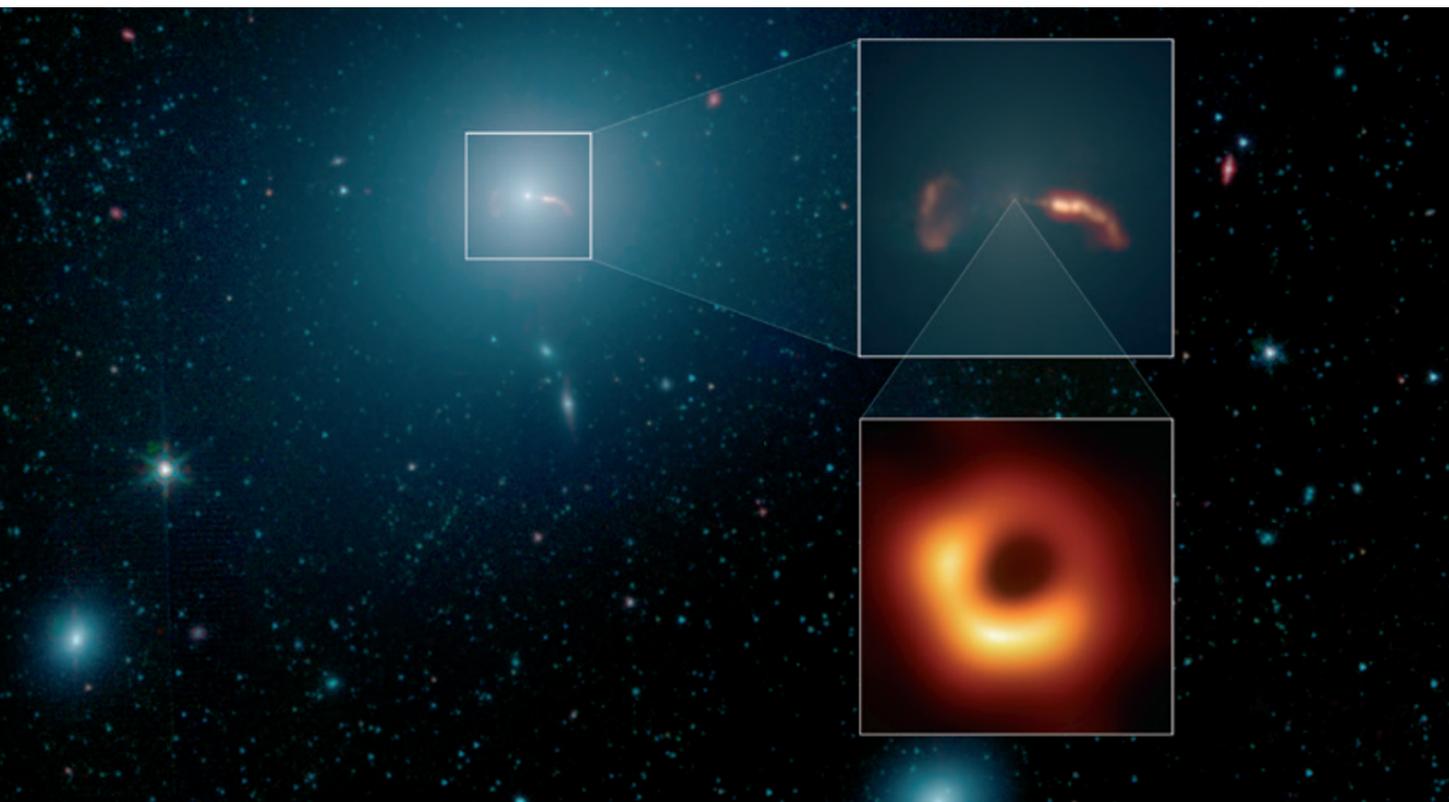
Materie, die in einer Akkretionsscheibe um ein Massenzentrum rotiert, gibt es überall im Universum. Auch unser Planetensystem hat sich aus solch einer Scheibe gebildet. Aber die Gasscheibe im Zentrum von M87 ist von ganz anderer Dimension und vor allem von einer viel höheren Temperatur. Das viele Milliarden Grad heiße Gas ist eine kräftige Lichtquelle, die um das Schwarze Loch einen hell leuchtenden Kranz bildet. Aber auch die Jets strahlen viel Licht ab, die zur Illumi-

nation des Schwarzen Lochs beitragen – im Radiolicht sind sie wohl sogar der dominantere Part.

Das Licht alleine reicht aber noch nicht, um das Schwarze Loch sehen zu können. Erst die Krümmung der Raumzeit durch das starke Gravitationsfeld führt dazu, dass das Schwarze Loch größer erscheint, als es ist. Das liegt daran, dass Licht, das sehr nahe an den Ereignishorizont herankommt, sehr stark abgelenkt wird. Daher kommt es zu einem vergrößernden Linseneffekt.

Das Event Horizon Telescope (EHT)

Um diesen Bereich von M87 abzubilden, benötigt man ein Teleskop, das eine Auflösung von 40 Mikrobogen Sekunden erreicht. Das entspricht der Größe eines Senfkorns in New York von Stuttgart aus gesehen. Für diese Genauigkeit braucht es ein Teleskop, das so groß ist wie die Erde. Das wird erreicht, indem Teleskope, die über die ganze Erde verteilt sind, zusammenschaltet werden mittels Very Long Baseline Interferometry (VLBI). Den Teleskopverbund für das Bild des Schwarzen Lochs nennen die Astronomen das Event Horizon Telescope (EHT). Die Teleskope sind über die ganze Erde verstreut.



Die Aufnahme von M87 im Infraroten Licht stammt vom Spitzer-Teleskop der NASA. M87 erscheint strukturlos. Jedoch ist der relativistische Jet, der aus dem Zentrum strömt, gut zu erkennen. In dem kleinen Bild oben rechts sind Strukturen des Jets zu sehen. Der Jet erstreckt sich über einige tausend Lichtjahre. Der hellere Teil rechts fliegt auf uns zu. Unten rechts ist das Bild des Schwarzen Lochs zu sehen, das den Jet erzeugt.
Bild: Robert Nemiroff (MTU) & Jerry Bonnill (UMCP)

Wie schaltet man aber nun so weit entfernte Teleskope zu einem Superteleskop zusammen? Dazu müssen unzählige wissenschaftliche Vorarbeiten geleistet werden. So werden Computermodelle, die unter anderem Hydrodynamik, Magnetfelder, Lichtabiegung, Absorption und Emission berücksichtigen, gerechnet, um eine Vorstellung zu bekommen, wie das Bild aussieht. Auch die optimale Wellenlänge der Strahlung muss gefunden werden, bei welcher man das leuchtende Gas dicht am Ereignishorizont am besten sehen kann. Das Licht muss auf seiner Reise zu uns Gas- und Staubwolken passieren. Sichtbares Licht wird hier absorbiert, aber Radiostrahlung und Infrarotstrahlung werden nicht sehr beeinflusst. Eine Besonderheit der beiden uns nächsten massereichen Schwarzen Löcher ist, dass sie beide zufällig nahe am Ereignishorizont vor allem Radiowellen mit einer Wellenlänge von 1,3 mm aussenden.

Daher kommen acht der besten Radioteleskope zum Einsatz, die diese Wellenlänge gut empfangen können.

Was wir auf den Bildern sehen, ist eine Darstellung der Intensitätsverteilung der empfangenen Radiostrahlung.

Die Aufnahme

Die Beobachtungen müssen zwischen allen acht Teleskopen synchron laufen, was durch modernste Atomuhren ermöglicht wird. Um sicherzugehen, dass dieser Zusammenschluss der Teleskope wie gewünscht funktioniert, haben die Forscher zunächst Quasare, sogenannte Leuchttürme des Alls, vermessen, um damit ihre Methodik zu kalibrieren. Außerdem muss an allen Teleskopstandorten gleichzeitig gutes Wetter herrschen.

Dies war tatsächlich an vier Tagen im April 2017 der Fall, in denen alle nötigen Daten für das Bild gesammelt werden konnten. Beobachtet wurden das Schwarze Loch in M87 und Sagittarius A*. Die Datenmenge überstieg die Kapazität des Internets bei weitem und so mussten die Daten auf Festplatten gespeichert zu zwei Computerzentren für ihre Auswertung reisen.



Das Bild zeigt die Standorte einiger der Teleskope, aus denen sich das EHT zusammensetzt, sowie die langen Basislinien zwischen den Teleskopen.
Bild: ESO/ L. Calçada

Absicherung

Die Auswertung ist aufwändig. Mit verschiedenen Algorithmen, die unabhängig programmiert wurden, werten mehrere Gruppen, die während dieser Zeit nicht miteinander kommunizieren, die Daten aus. Jeder Gruppe stehen alle Datensätze aus den vier Beobachtungsnächten zur Verfügung.

Auf allen Bildern aller Gruppen sieht man die gleiche Ringstruktur, deren Größe von der Masse des Schwarzen Lochs vorgegeben ist, wie sie schon die Modellrechnungen zeigen. Die grundlegenden Vorhersagen der Relativitätstheorie sind wieder mal bestätigt. Und wir haben ein viel besseres Bild, wie ein Schwarzes Loch und seine Umgebung aussehen.

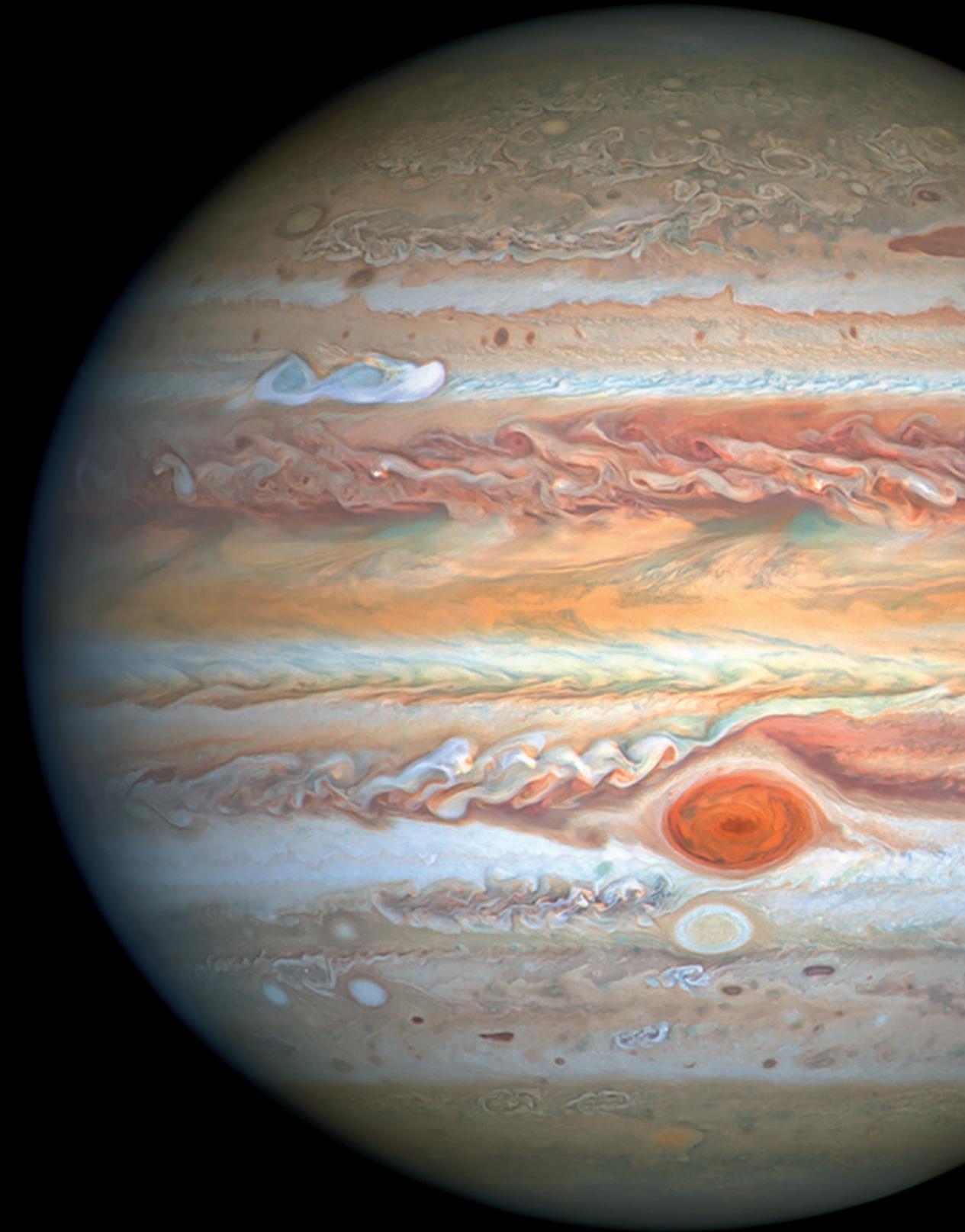
Ausblick

Das Event Horizon Telescope wird noch weitere Aufnahmen liefern und neue Überprüfungen der Allgemeinen Relativitätstheorie ermöglichen. Es kommen weitere Teleskope dazu, die die Bildqualität verbessern helfen. Wir sind gespannt, welche Erkenntnisse uns dieses großartige Teleskop noch präsentieren kann. ♦



HEINO FALCKE ist Professor für Astroteilchenphysik und Radioastronomie an der Radboud Universität in Nimwegen, Niederlande. Er ist Mitglied des Wissenschaftsrats des Event Horizon Teleskops und Träger des Spinoza Preises, der höchsten wissenschaftlichen Auszeichnung in den Niederlanden. Sein Buch 'Licht im Dunkel' erschien 2020 in Deutschland und wurde inzwischen in mehr als 13 Sprachen übersetzt.
Foto: Boris Breuer

Kepler vernetzt



JUPITER
Bild: NASA, ESA, A. Simon (Goddard Space Flight Center), M. H. Wong (University of California, Berkeley) und das OPAL Team.

Freunde und Wegbegleiter

FRIEDRICH SECK

Hier soll Keplers Verhältnis zu sechs Männern beleuchtet werden, die ihm auf verschiedene Weise verbunden waren: dem akademischen Lehrer Michael Mästlin in Tübingen, dem wichtigsten Astronomen seiner Zeit Tycho Brahe, dessen Ernte, jahrzehntelange Planetenbeobachtungen, Kepler in eine neue Astronomie einführen sollte, den württembergischen Theologen Matthias Hafenreffer und Daniel Hitzler, die seine Abweichungen vom strengen Luthertum scharf mißbilligten und ihn vom Abendmahl ausschlossen, denen er aber dennoch freundschaftlich verbunden blieb, und den jüngeren Freunden Matthias Bernegger und Wilhelm Schickard, Professoren in Straßburg und Tübingen, die dem Älteren und Berühmten sich in mancherlei Angelegenheiten nützlich erwiesen.

Michael Mästlin (1550–1631)

Durch den Besuch der Klosterschulen Adelberg und Maulbronn war Kepler zum Theologen bestimmt. Mit dem Eintritt in das Tübinger Stift am 17. September 1589 begann sein Universitätsstudium. Vor dem Fachstudium in den höheren Fakultäten für Theologie, Jura oder Medizin stand das Studium in der allgemeinbildenden Philosophischen Fakultät mit den Fächern Logik, Ethik, Physik, Rhetorik, Poetik und Mathematik einschließlich Astronomie. Kepler schreibt in seiner Selbstcharakteristik von 1597, er habe die Mathematik mehr als alle anderen Wissenschaften geliebt (*mathemata prae ceteris studiis amavit*). Zu seinem Glück lehrte dieses Fach der vorzügliche Astronom Michael Mästlin, einer der wenigen überzeugten Kopernikaner auf deutschen Lehr-

stühlen. Seinem Lehrbuch ‚*Epitome astronomiae*‘ und seinen Vorlesungen lag zwar das geozentrische System des Ptolemäus zugrunde, weil es so üblich war – auch die philosophischen Fächer wurden nach einem antiken Autor, nämlich Aristoteles, unterrichtet – aber Mästlin ließ es sich nicht nehmen, oft auf Kopernikus und die Vorzüge seines Systems hinzuweisen.



Michael Mästlin (1550–1631). Portrait von Conrad Melberger 1619. Professorengalerie, Museum Universität Tübingen MUT. Foto: Valentin Marquardt

Kepler fing Feuer. Ihn überzeugte die Schönheit des kopernikanischen Systems, in dessen Mitte die licht- und kraftspendende, von sechs Planeten umgebene Sonne stand. Mit der Magisterpromotion am 1. August 1591 begann das Studium der Theologie, daneben betrieb Kepler aber weiterhin astronomische Studien. Ein Problem bestand für den Theologen Kepler: Er hatte eine andere Auffassung des Abendmahls als die lutherische Kirche. Diese lehrte die tatsächliche Anwesenheit Christi beim Abendmahl, die calvinistische Kirche sah Christi Anwesenheit rein geistig. Kepler neigte zu dieser Auffassung und machte dadurch eine Verwendung als Pfarrer schwer möglich. Kurz vor seinem kirchlichen Examen traten die evangelischen Stände der Steiermark an die Universität Tübingen heran, um einen Mathematiklehrer für die evangelische Stiftsschule in Graz zu gewinnen. Die Universität benannte Kepler. Dieser trifft nach dreiwöchiger Reise am 11. April 1594 in Graz ein und ist nun „Einer Ehrsamten Landschaft des Herzogtums Steir Mathematicus“.

Schon länger hatte er sich gefragt: Warum gibt es sechs Planeten, warum haben sie die Abstände wie sie nun einmal sind, warum ihre Bahngeschwindigkeiten? Für die beiden ersten Fragen fand er im Juli 1595 intuitiv eine Lösung: Die sechs zu Kugelschalen erweiterten Planetenbahnen bilden fünf Zwischenräume. Es gibt genau fünf reguläre Polyeder, das sind Körper, die von regelmäßigen Vielecken begrenzt werden: der Würfel von 6 Quadraten, Tetraeder, Oktaeder und Ikosaeder

von 4, 8, 20 gleichseitigen Dreiecken, das Dodekaeder von 12 regelmäßigen Fünfecken. Sollte hier eine Beziehung der sechs Kugelschalen zu den fünf Körpern bestehen? Tatsächlich fand er eine Abfolge, die die wahren Abstandsverhältnisse der Planeten annähernd darstellt, nämlich Merkur – Oktaeder – Venus – Ikosaeder – Erde – Dodekaeder – Mars – Tetraeder – Jupiter – Würfel – Saturn (Abb. S. 158). Damit glaubte Kepler Gottes Schöpfungsplan entdeckt zu haben; er empfand seine Entdeckung als göttliche Eingebung. Er teilte sie Mästlin brieflich mit. Auch Mästlin war begeistert von Keplers Idee und leistete ihm Hilfestellung bei den nun notwendigen astronomischen Berechnungen, mit denen Kepler noch wenig vertraut war. Nach Fertigstellung des Manuskripts seines *Mysterium cosmographicum* (Geheimnis des Kosmos) reiste Kepler nach Württemberg, um den Druck mit dem Tübinger Druckerverleger Gruppenbach zu besprechen, zuvor aber die Druckgenehmigung der Universität einzuholen, die das Zensurrecht hatte. Nach Keplers Rückreise lag der Druck des *Mysterium* ganz in Mästlins Hand, der oft zwei- oder dreimal täglich in das benachbarte Haus des Druckers auf dem Schloßberg ging. Kepler blieb Mästlin immer dankbar, erwähnt ihn oft in seinen Werken, auch mit dem Zusatz „mein Lehrer“ (*praeceptor meus*). Auch Mästlin war stolz auf seinen Schüler, auch wenn er seinen Gedanken nicht immer folgen konnte.

Der alte Mästlin litt unter Depressionen und war in wissenschaftlichen Fragen nicht mehr ansprechbar. Er überlebte Kepler um fast ein Jahr.

Literatur

- Zwischen Copernicus und Kepler*: M. Michael Maestlinus Mathematicus Goeppingensis. 1550–1631. Vorträge auf dem Symposium, veranstaltet in Tübingen vom 11. Bis 13. Oktober 2000 von der Fakultät für Physik der Universität Tübingen / hrsg. von Gerhard Betsch und Jürgen Hamel. – Frankfurt am Main: Deutsch, 2002. – 247 S.
- Seck, Friedrich: Johannes Keplers Studium in Tübingen: ein universitätsgeschichtlicher Streifzug. – In: Bausteine zur Tübinger Universitätsgeschichte: Folge 2. – Tübingen, 1984. – S. 49–67

Tycho Brahe (1546–1601)

Kepler sandte sein *Mysterium* an mehrere Gelehrte und bat sie um ihr Urteil, so auch am 13. Dezember 1597 an Tycho Brahe, den bedeutendsten Astronomen seiner Zeit, für uns überraschend mit der Adresse (übersetzt): Dem Hochadligen und sehr bedeutenden Herrn, Tycho Brahe, Däne, erstem der Mathematiker zu Händen, „In Dennemarck.“ Zu dieser Zeit war Brahe allerdings nicht mehr in Dänemark. Warum? Dazu müssen wir etwas weiter ausholen: Brahe stammte aus dänischem Hochadel. Er studierte zunächst in Kopenhagen, ab Winter 1561 in Leipzig, wo er sich dem einzig standesgemäßen Fach, dem Studium der Rechte, widmen sollte. Stattdessen fesselte ihn die Astronomie. Am 11. November 1572, wieder in Kopenhagen, fiel ihm ein sehr helles Objekt am Himmel auf, am Fixsternhimmel, weil er auch nach mehreren Tagen seine Stellung, gemessen an den Abständen zu Nachbarsternen, nicht veränderte. Eine kleine Druckschrift über diese Entdeckung, die erste Beobachtung einer Nova überhaupt, machte ihn bekannt. Der dänische König Friedrich II. (1534–1588, reg. ab 1559) förderte seine Arbeit, indem er ihm 1576 die im Sund zwischen Dänemark und Schweden gelegene Insel Hven (schwedisch Ven, so in heutigen Atlanten) als Lehen auf Lebenszeit verlieh. Hier baute er sich sein Observatorium Uraniborg, hier konnte er mit den besten Instrumenten und vielen Gehilfen in drei Jahrzehnten einen Schatz astronomischer Beobachtungen anlegen.

Aber Friedrichs Sohn, König Christian IV. (1577–1648, reg. ab 1596) entzog Brahe seine Gunst. Brahe verließ im Oktober 1597 die Insel mit seiner Familie und vielen Mitarbeitern, mit Hausrat, allen nicht ortsfesten Instrumenten und seinen Beobachtungstagebüchern, und begab sich nach Deutschland. Er empfing Keplers Brief und Buch Anfang März in Wandsbek bei Hamburg (1937 eingemeindet), wo er Gast seines



Tycho Brahe (1546–1601). Ölgemälde 1596. Skoklosters slott, Schweden - Public Domain

Freundes Heinrich Rantzau, des dänischen Statthalters, war.

Brahe antwortet am 1. April überaus freundlich: Keplers Buch habe er schon vorher gekannt und gelesen. Er lobt Keplers Scharfsinn und die geistreiche Erfindung, hält aber eine Prüfung anhand seiner Beobachtungen für notwendig. Weil nach seiner Überzeugung die Erde ruhe, hat er ein eigenes Weltsystem entwickelt, wonach die Sonne sich um die Erde bewege, die fünf Planeten um die Sonne. Deshalb lehnt er Keplers Erfindung ab, obwohl er sie bewundert. Er bittet Kepler, sie an seinem, Brahes, Beobachtungsschatz zu prüfen, und lädt Kepler ein, ihn eines Tages (aliquando) zu besuchen – etwas unbestimmt, weil sein Aufenthalt in Wandsbek nicht von Dauer sein wird.

Diese Unsicherheit entfiel, als Kaiser Rudolf II. Brahe an seinen Hof berief. Brahe traf im Juni 1599 in Prag ein. Der Kaiser wies ihm das nahe gelegene Schloß Benatek zu, wo er genügend Platz für seine Familie, die Gehilfen und Instrumente vorfand. Kepler, der davon erfuhr, reiste nach Prag und wurde am 5. Februar 1600 von Brahe sehr freundlich empfangen. Er fühlte sich anscheinend in der Unruhe, die Baumaßnahmen und Brahes Personal in Benatek verursachten, nicht recht wohl. Anfang April kam es zu einem heftigen Streit zwischen Kepler und Brahe, der leicht zum Ende der Beziehung hätte führen können. Aber Kepler bereute seine unbedachten Äußerungen zutiefst, Brahe zeigte sich großzügig und verzieh. Beide wußten, was sie aneinander hatten. Kepler war auf Brahes Beobachtungen für seine bahnbrechenden Erkenntnisse angewiesen, Brahe brauchte den ihm überlegenen Theoretiker, um den Schatz seiner Beobachtungen nicht brachliegen zu lassen. Im August 1600, während Kepler nach Graz verreist war, hob ihn Brahe in einer Audienz beim Kaiser besonders hervor. In einer weiteren Audienz im September 1601 stellte er Kepler dem Kaiser vor. Nun erhielt Kepler vom Kaiser den Auftrag, Brahe bei der Bearbeitung seines geplanten Tafelwerks zu unterstützen, das zugleich den Titel *Tabulae Rudolpheae* (später: *Rudolphinae*) erhielt. Kurz danach erkrankte Brahe an einer Harnverhaltung und starb am 24. Oktober 1601.

Am 26. Oktober wurde Kepler zum kaiserlichen Mathematiker ernannt. Brahes Freund Johannes von Jessen, Professor der Medizin in Wittenberg, hielt

eine Rede bei Tycho Brahes Beerdigung. Ihrem Druck ist ein langes Trauergedicht von Kepler beigelegt. Kepler blieb Brahe Zeit seines Lebens dankbar.

Literatur

Dreyer, John Louis Emil: Tycho Brahe: ein Bild wissenschaftlichen Lebens und Arbeitens im 16. Jahrhundert / von J. L. E. Dreyer. – Unveränd. Neudruck d. Ausg. von 1894. – Vaduz: Sändig, 1992. – XII, 434 S.: Ill.

Thoren, Victor E.: The Lord of Uraniborg: a biography of Tycho Brahe / Victor E. Thoren. With contributions by John R. Christianson. – 1. publ. – Cambridge [u.a.]: Cambridge Univ. Pr., 1990. – XI, 523 S.: Ill., graph. Darst. – ISBN 0-521-35158-8.

Strömgren, Elis: Lehrbuch der Astronomie: Von Elis Strömgren u. Bengt Strömgren. – Berlin: Springer, 1933. – S. 444. – (Die Nova von 1572)

Wieland, Hans: Keplers Elegie In obitum Tychoonis Brahe: Übertragung und Kommentar / von Hans Wieland. – München: Verl. der Bayerischen Akad. der Wiss., 1992. – 45 S. – (Abhandlungen / Bayerische Akademie der Wissenschaften, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse; N. F., 168) (Nova Kepleriana; N. F., 8)

Matthias Hafenerffer (1561–1619)

Kepler studierte seit ungefähr einem Jahr Theologie, als der nur zehn Jahre ältere Matthias Hafenerffer seine Stelle als Professor der Theologie an der Universität Tübingen antrat. Zuletzt war er Hofprediger in Stuttgart gewesen, zu Studienzeiten aber Repetent der Mathematik am Tübinger Stift. Diese Tätigkeit endete mit dem Beginn seines Kirchendienstes als Diakon in Herrenberg am April 1586, am Stift kann er also nicht Lehrer des 1571 geborenen Kepler gewesen sein.

Anscheinend ist zwischen dem Professor und dem Studenten eine Freundschaft entstanden; beider Interesse für die Mathematik mag sie befördert haben. In einem Brief an Kepler in Graz dankt Hafenerffer in sehr freundschaftlicher Weise für den Kalender 1595, den Kepler im Auftrag der steirischen Landschaft verfaßt hatte. Freundschaftlicher Ton herrscht auch vor, wenn – wie allzuoft – theologische Meinungsverschiedenheiten zwischen beiden bestehen.

Unterschiedlicher Meinung waren sie über die Geltung des kopernikanischen Systems. Kepler war überzeugt, daß es die Wirklichkeit zeige, daß also die Sonne in der Mitte der Welt stehe; Hafenerffer ließ es, wie die meisten Gelehrten der Zeit, nur als geistreiche Spekulation und Rechengrundlage gelten. Als Kepler aus Graz nach Tübingen gekommen war, um den Druck des *Mysterium cosmographicum* in die Wege zu leiten, gratulierte ihm der Senat einhellig zu dem Werk. Hafenerffer riet aber dringend, ein Kapitel über die Vereinbarkeit des heliozentrischen Systems mit der Bibel wegzulassen. In einer Predigt über den vierten Tag der Schöpfungsgeschichte (Genesis 1,14–19) äußert sich Hafenerffer darüber sehr deutlich, natürlich ohne Namen zu nennen: „Gott hab die Sonne nit mitten in die Welt, wie ein laternen mitten in einen Saal gehencket“. So schreibt Mästlin an Kepler. Aus der Nachschrift von Martin Crusius erfahren wir das Datum: Es war die Abendpredigt am Sonntag, den 21. August 1597. Kepler gab nach, denn wichtiger war ihm der christliche Glaube. So schrieb er am 1/11. Juni 1598 an Mästlin, anklingend an Matthäus 8,6: (übersetzt) „Die ganze Astronomie ist nicht so viel wert, daß einer der Kleinen Christi daran Ärgernis nähme.“ Das *Mysterium* richtete sich allerdings an Gelehrte, nicht an „die Kleinen“. Künftig verfocht Kepler in seinen Werken stets das kopernikanische System, sein Lehrbuch trägt es sogar im Titel *Epitome astronomiae Copernicanae* in deutlichem Gegensatz zur *Epitome astronomiae* seines Lehrers Mästlin.

Das persönliche Verhältnis zwischen Hafenerffer und Kepler blieb von diesem allen unberührt. Hafenerffer redete Kepler an mit *amice et frater charissime* (liebster Freund und Bruder, ‚Bruder‘ war die Anrede unter Geistlichen). Genau einen Monat nach Tycho Brahes Tod trauert er um ihn, freut sich aber, daß er in Kepler einen Nachfolger gefunden hat. Im Januar 1605 bedankt er sich überschwänglich für die kleine deutsche Schrift über den neuen Stern vom Oktober 1604, Anfang 1607 erwartet er sehnsüchtig das gelehrte Werk zu diesem Phänomen. Darin interessiert ihn besonders die Erörterung über das Geburtsjahr Christi, die Kepler im Jahr 4 vor der üblichen Zeitrechnung ansetzt; er weist Kepler darauf hin, daß Mästlin bereits vor mehreren Jahren zu demselben Ergebnis gekommen war.

Ein grundsätzlicher Konflikt bahnte sich mit Keplers Umzug nach Linz im April 1612 an, als ihn Pfarrer Hitzler vom Abendmahl ausschloß; siehe dazu unten den Abschnitt ‚Daniel Hitzler‘. Kepler hatte sich zunächst an die württembergische Kirche gewandt in der Hoffnung, daß sie Hitzler anweise, ihn zum Abendmahl zuzulassen. Als hier jahrelang nichts geschah, schrieb er Hafenerffer. Aber dieser war am 17. März 1618 zum Kanzler der Universität ernannt worden, mußte seinen Ämtern als Kanzler und erster von drei Professoren der Theologie gerecht werden, konnte also weniger als zuvor als Privatmann schreiben. Die Anrede des ersten von zwei Briefen aus dieser Zeit ist dennoch sehr herzlich: *Clarissime et praestantissime Vir, Domine et Amice singulariter mihi semper honorande et charissime*, deutsch etwa „Hochgelehrter und hervorragender Mann, für mich in besonderer Weise stets zu ehrender und teuerster Herr und Freund“. In der Sache bleibt er unnachgiebig, bedauert in aller Freundschaft Keplers Festhalten an seinem, wie er meint, Irrtum, ruft ihm zu: Was Theologisches anbetrifft, laß davon ab! (*quae Theologica sunt, hic manum de Tabula!*) Am Anfang seines letzten, am 31. Juli 1619 während eines Kuraufenthaltes in Teinach geschriebenen Briefes gibt Hafenerffer zu erkennen, daß er Keplers Angelegenheit der Tübinger Theologischen Fakultät und dem Stuttgarter Konsistorium, das war die württembergische Kirchenleitung, vorgelegt hat. Beide beharrten selbstverständlich auf dem orthodoxen Standpunkt.

Matthias Hafenerffer starb am 22. Oktober 1619 an einem Schlaganfall.

Literatur

Hübner, Jürgen: Die Theologie Johannes Keplers zwischen Orthodoxie und Naturwissenschaft. – Tübingen: Mohr (Siebeck), 1975. – VIII, 334 S. (Beiträge zur historischen Theologie; 50). – Hier besonders S. 43–68.

Seck, Friedrich: Marginalien zum Thema ‚Kepler und Tübingen‘. In: *Attempo* 41/42 (1971) S. 3–19. – S. 10–13: Hafenerffers Predigt.



Matthias Hafenerffer (1561–1619), Portrait eines unbekanntes Malers 1604. Professorengalerie, Museum Universität Tübingen MUT. Foto: Valentin Marquardt

Daniel Hitzler (1576–1635)

Zur Zeit von Keplers Umzug nach Linz im April 1612 war Daniel Hitzler dort Pfarrer. Daß er ihm bei der ersten Begegnung sogleich das Abendmahl verweigerte, macht ihn bei Liebhabern Keplers zum Buhmann. Wir müssen aber versuchen, sein Verhalten aus den gegebenen Verhältnissen zu verstehen.

Hitzler war Württemberger. Er stammte aus Heidenheim an der Brenz, besuchte die Klosterschulen in Blaubeuren und Bebenhausen, wurde am 21. August 1592 in Tübingen immatrikuliert, erwarb am 1. Februar 1597 den Magistergrad, war Pfarrer u. a. in Freudenstadt, dann Dekan in Güglingen, bevor er dem Ruf der Stände der Landschaft Österreichs ob der Enns auf die Pfarrstelle in Linz folgte. Seine Tätigkeit dort ist seit dem 8. August 1611 belegt (Hübner 1975, S. 31). Kepler suchte ihn nach seinem Umzug auf und verschwieg nicht seine Bedenken gegen die lutherische Abendmahlslehre. Danach ist Christus beim Abendmahl leiblich, wenn auch unsichtbar, anwesend,

nach calvinistischer Lehre aber nur geistig (spiritualiter). Abendmahlsverständnis und Prädestination unterschieden die beiden protestantischen Konfessionen, die sich bis aufs Messer bekämpften.

Nach Keplers Erklärung verlangte Hitzler von ihm, die Konkordienformel zu unterschreiben, das war die Essenz der lutherischen Theologie. Alle württembergischen Beamten und Pfarrer waren verpflichtet, sie zu unterschreiben. Jürgen Hübner (1975, S. 32) erklärt den Konflikt so: „Er“ (Hitzler) „mußte dabei auf Grund der Lehre unterstellen, daß derjenige, der das Abendmahl mit Zweifeln an der Wahrheit der reinen Lehre zu sich nähme, es sich selber zum Gericht empfangen könnte. Deshalb konnte er es mit seinem Gewissen nicht vereinbaren, Kepler ohne solche Sinnesänderung das Abendmahl zu reichen. Kepler lehnte die Unterschrift seinerseits aus Gewissensgründen

ab: Der Verdammung der calvinistischen Lehre könne er nicht zustimmen. Hitzler ließ ihn daraufhin zum Abendmahl nicht zu.“ Kepler konnte darauf nicht in Linz, aber in der Umgebung von Linz bei befreundeten Adligen kommunizieren.

Der Ausschluß vom Abendmahl führte nicht zu einem persönlichen Bruch zwischen Kepler und Hitzler. Man ersieht dies aus Briefen an Kepler, die mit Grüßen an Hitzler enden. Solche Bitten setzen ja ein gutes Verhältnis zwischen Kepler und Hitzler voraus, ebenso Keplers Bericht über Hitzlers Beobachtung der Sonnenfinsternis von 21. Mai 1621. Einige Jahre später, nachdem Hitzler wegen der Gegenreformation Oberösterreich hatte verlassen müssen und Abt des Klosters, der Klosterschule, Bebenhausen geworden war, übersandte Kepler ihm aus Ulm mehrmals die frisch gedruckten Bögen der Rudolphinischen Tafeln. 1632 wurde er Propst an der Stuttgarter Stiftskirche, begleitete den achtzehnjährigen Herzog Eberhard III. auf der Flucht nach Straßburg und starb dort am 6. September 1635.

Übrigens hat Kepler, wie Volker Schäfer überraschend fand, einmal doch die Konkordienformel unterschrieben, nämlich in Stuttgart am 5. März 1594 vor seiner Abreise nach Graz.

Literatur

Hübner, Jürgen: Kepler und Daniel Hitzler. In: Johannes Kepler. Werk und Leistung. Ausstellung im Steinernen Saal des Linzer Landhauses 19. Juni bis 29. Aug. 1971. Hrsg. Kepler-Kommission der Hochschule Linz (Katalog des Oö. Landesmuseums; 74, Katalog des Stadtmuseums Linz; 9). [Linz 1971], S. 73–80. – Auch für Nicht-Theologen sehr verständliche Erklärung des konfessionellen Konflikts.

Hübner, Jürgen: Die Theologie Johannes Keplers zwischen Orthodoxie und Naturwissenschaft. – Tübingen: Mohr (Siebeck), 1975. – VIII, 334 S. (Beiträge zur historischen Theologie; 50). – Hier besonders S. 29–37

Schäfer, Volker: Keplers Unterschrift unter die Konkordienformel. In: Blätter für württembergische Kirchengeschichte 108/109 (2008/2009) [erschienen 2010], (siehe Abbildung auf S. 24 hier im Katalog)

Matthias Bernegger (1582–1640)

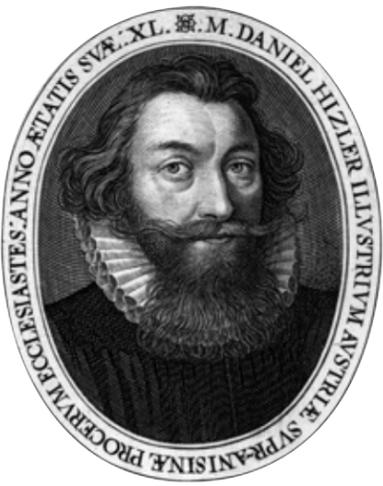
Matthias Bernegger, geboren am 8. Februar 1582 in Hallstatt am Hallstätter See in Oberösterreich, studierte an der universitätsähnlichen Akademie Straßburg die Rechte, befaßte sich aber auch mit Geschichte und besonders mit Astronomie. Seit 1607 unterrichtete er am Gymnasium, 1613 wurde er Professor der Geschichte an der Akademie. Schon in jungen Jahren war er ein Verehrer Keplers. Nachdem er von Keplers Umzug nach Linz erfahren hatte, schrieb er am 2. Juni 1612 an seinen väterlichen Freund Johannes Memhard, den Rektor der Landschaftschule in Linz (übersetzt): „Dieses Mannes [Keplers] höchste Bildung und seine Verdienste um die Wissenschaft bete ich beinahe an. Ich habe ihm vor fünf Jahren einen Brief geschrieben, den ich jedoch nicht abgeschickt habe, von meinen Arbeitgebern abgehalten, die mich an dieser Akademie halten wollten. Darin habe ich ihm meine Hilfsdienste, besonders bei mathematischen Aufgaben, angeboten. Hätte er das angenommen, dann hätte ich mich besonders glücklich geschätzt. Denn in den Universitäten sind solche Männer wie er sehr dünn gesät.“ Dieser Versuch im Jahre 1607 – Kepler wohnte noch in Prag – blieb also unausgeführt. Wenige Wochen später benutzte er vermutlich eine Reise zu seinem Vater und seiner Schwester, die in Ischl lebten, zu einem Besuch bei Kepler am 17. Juli 1612. Keplers Stammbucheintrag von diesem Tag ist überliefert. Darin steht: „für den durchreisenden Matthias Bernegger schreibe ich dies in Linz als Zeichen einer beginnenden Freundschaft“ (Matthiae Perneggero Lincii transeunti adscripsi in amicitiae inchoandae monumentum).

Und wirklich bemühte sich Bernegger, dem neuen Freund zu helfen, wann immer es nötig war. Die Beziehung zwischen Kepler und Bernegger zeigt ihr Briefwechsel, der von Berneggers Sohn Johann Caspar 1672 veröffentlicht wurde. Ihm lagen die vom Vater aufbewahrten Briefe Keplers vor, er hat sie vermutlich nach dem Druck als nutzlos vernichtet. Für die Briefe des Vaters benutzte er dessen Briefausgangsbücher, die aber erst am 24. Februar 1623 einsetzen. In zwei Listen zu Keplers Nachlaß aus den Jahren 1674 und 1713 sind

auch Briefe von Bernegger angegeben, die aber danach entfernt wurden. Deshalb beginnen Keplers Briefe an Bernegger 1612, die Gegenbriefe erst 1623. Bedauerlich ist auch, daß Berneggers Sohn die Briefe redigiert hat. An vielen Stellen finden sich durch etc. angedeutete Auslassungen, aber auch mit weiteren Änderungen ist zu rechnen. Man kann das an dem Briefwechsel Kepler-Schickard kontrollieren, bei dem viele Briefe original erhalten sind.

Doch nun zum Inhalt der Briefe: Sie berühren selbstverständlich auch persönliche Angelegenheiten, erfreuliche wie Keplers zweite Heirat 1613, weniger erfreuliche wie die Notwendigkeit, 1617 Keplers Mutter, die gerade bei ihm ist, in einem Verleumdungsprozeß zu unterstützen. Kepler heiratete Susanna Reuttinger, die als Vollwaise im Haus von Keplers Freund und Gönner, des Barons Erasmus von Starhemberg aufgewachsen war. Zwei Söhne des Barons, 15 und 16 Jahre alt, sollten 1624 in Straßburg studieren, begleitet von einem Erzieher und einem Diener. Kepler bittet Bernegger im Namen des Barons, sie in seinem Haus aufzunehmen oder, wenn das nicht möglich ist, eine andere Unterkunft zu vermitteln. Bernegger würde gern etwas für die seit seiner Jugend hochgeschätzte Familie aus seiner Heimat tun, aber bei ihm wohnt die Witwe des berühmten Juristen Dionysius Gothofredus (Denis Godefroy). Ihrem kriegsbedingt aus Heidelberg vertriebenen Mann hatte Bernegger – er war immer großzügig – kostenlose Wohnung in seinem Haus angeboten; vor anderthalb Jahren sei er in seinem Haus gestorben, nun wäre es rücksichtslos, die „beste der Frauen“ (optimam feminarum) auszuweisen.

Im September 1617 lobt Kepler überschwenglich eine von Bernegger übersandte Straßburger Disputation über den Festungsbau von einem Studenten aus Genf, Jean Gringallet, der ihm schon durch den stud. med. Florian Crusius angekündigt war. Anfang April ist Gringallet bei Kepler, er arbeitet vorzüglich, hilft Kepler bei vielerlei Rechnungen, aber auch bei der Beobachtung der Mondfinsternis vom 20. Dezember



Daniel Hitzler (1576–1635). Stich eines unbekanntenen Künstlers 1616/1637. Wikimedia Commons



Matthias Bernegger (1582–1640). Portrait eines unbekanntenen Malers (17. Jh.). Sammlungen des Kapitels Sankt-Thomas in Straßburg. Wikimedia Commons, Claude Truong-Ngoc

1619. Max Caspar nennt ihn den tüchtigsten unter allen seinen Gehilfen. Er blieb mit einer längeren Unterbrechung bis 1620. Kepler konnte ihn nicht weiter beschäftigen, weil er zur Verteidigung seiner Mutter im Hexenprozeß längere Zeit in Württemberg verbringen mußte. Gringallet begleitet ihn donauaufwärts bis Ingolstadt, reist dann nach Straßburg und überbringt als Geschenk für Bernegger ein Gemälde von Kepler, das einzig authentische Porträt Keplers. Bernegger wird es 1. Januar 1627, mit einer Beschriftung versehen, der Universitätsbibliothek Straßburg schenken. Gringallet wurde Ingenieur seiner Heimatstadt, starb aber schon am 23. Februar 1623.

Bernegger hat auch Bücher von Kepler in Straßburg drucken lassen, siehe dazu den Beitrag über Kepler und den Buchdruck.

Bernegger interessierte sich ja für die Astronomie. Deshalb spornte er im Juli 1624 Kepler, nicht ohne Hinweis auf dessen Sterblichkeit, an, seine Rudolphinischen Tafeln endlich drucken zu lassen. Das war auch Keplers Wunsch; das Werk wurde unter seiner Aufsicht 1627 in Ulm gedruckt. Seine Zelte in Linz hatte er abgebrochen, die Familie und die bewegliche Habe bei einer befreundeten Familie in Regensburg zurückgelassen. Jetzt hoffte er – schrieb er an Bernegger – auf eine Gelegenheit, nach Erscheinen der *Tabulae Rudolphinae* Vorlesungen über das Werk zu halten, am liebsten in Deutschland, zur Not auch anderswo. Bernegger bemühte sich bei den Scholarchen – das waren die städtischen Aufseher über die Universität – um eine solche Möglichkeit, aber dergleichen wird strikt abgewiesen, weil Kepler kein reiner Lutheraner sei.

Das Problem erledigte sich, nachdem Kepler einem Angebot Wallensteins gefolgt war, sich in Sagan, der Hauptstadt des von ihm 1627 gekauften gleichnamigen Fürstentums, niederzulassen.

Hier kommt Jacob Bartsch ins Spiel, Student der Medizin in Straßburg, der sich aber mehr für Astronomie interessierte als für Medizin und von Bernegger hoch geschätzt wurde. Er hatte sich auch Kepler durch seine Leistungen empfohlen und folgte Keplers Einladung, ihm in Sagan bei der Berechnung der Ephemeriden zu helfen. Dafür sprach auch, daß Sagan nur 55 km nördlich von Bartschs Geburtsort Lauban lag, in dem seine Mutter noch lebte. Mehr noch: Kep-

ler hatte eine heiratsfähige Tochter Susanna, die am Hof des Markgrafen Friedrichs V. von Baden-Durlach in Durlach diente. Bartsch war nicht abgeneigt, Bernegger, der Briefe mit Susanna gewechselt und einen sehr guten Eindruck von ihr gewonnen hatte, leistete brieflich Überzeugungsarbeit. Jacob Bartsch wurde am 2./12. März in Straßburg zum Doktor der Medizin promoviert, er und Susanna heirateten am selben Tag. Dabei vertrat Bernegger Vaterstelle Kepler war in Sagan geblieben, ersetzte natürlich Berneggers Auslagen.

Der letzte Brief, den wir von Kepler kennen, ist am 21. Oktober in Leipzig geschrieben und an Bernegger gerichtet. Kepler beschreibt darin die Reise, die weiter nach Regensburg, Linz und zu Wallenstein führen sollte. Er war aber den Strapazen der Reise nicht gewachsen, erkrankte und starb am 15. November in Regensburg.

Bernegger war weiterhin dem jungen Paar behilflich und kümmerte sich um Susannas Bruder Ludwig, der in Basel und Straßburg Medizin studierte. Die Freundschaft hat also bis zu Keplers Tod und darüber hinaus gehalten, obwohl Bernegger und Kepler sich nach dem ersten Treffen nie mehr begegnet sind. Dergleichen war nicht ungewöhnlich. Schickard und Bernegger haben sich nie getroffen, ein Zusammenreffen eher gemieden und waren trotzdem beste Freunde.

Literatur

Kepler, Johannes: *Epistolae J. Kepleri & M. Berneggeri mutuae*. – Argentorati: Sumptibus Josiae Staedelii, 1672. – 166 S.; 120

Bünger, Carl: *Matthias Bernegger: ein Bild aus dem geistigen Leben Strassburgs zur Zeit des Dreissigjährigen Krieges*/ von C. Bünger. – Strassburg: Trübner, 1893. – XI, 401 S.

Wilhelm Schickard (1592–1635)

Kepler schreibt Anfang 1618 an seinen Freund, den kaiserlichen Rat Wacker von Wackenfels über seine Reise nach Tübingen (übersetzt): „Ich bin oft zu Mästlin gekommen und habe über alle Teile der Tafeln mit ihm gesprochen; auch fand ich ein hervorragendes Talent in der Stadt Nürtingen, einen für die Mathematik begeisterten jungen Mann, Wilhelm Schickard, einen fleißigen Mechanicus, der noch dazu die orientalischen Sprachen pflegt.“ Die beiden schlossen Freundschaft. Wer war dieser junge Mann?

Wilhelm Schickard ist am 22. April 1592 als Sohn einer Handwerkerfamilie in Herrenberg geboren. Sein Vater war ‚Werkmeister‘, d. i. Verwalter des städtischen Bauhofs, ein Onkel der Architekt Heinrich Schickhardt. Wilhelms Mutter war Tochter des Gärtringer Pfarrers Wilhelm Gmelin, des Stammvaters einer bedeutenden Gelehrtenfamilie. Zehnjährig verlor Schickard seinen Vater. Nach Aufenthalt bei einem Onkel wurde er 1607 Stipendiat an der Klosterschule Bebenhausen, wurde am 4. Januar 1610 in das Tübinger Stift aufgenommen, am 17. Juli 1611 erhielt er die Magisterwürde. Damit begann das Studium der Theologie. Nach Vikariaten in Herrenberg und Kirchheim unter Teck kehrt er Ende 1613 als repetens Hebraeus an das Stift zurück. Am 16. September, zwei Tage nach dem kirchlichen Examen, wird er Diakon, d. i. zweiter Pfarrer, im nahen Nürtingen.

Das Pfarramt ließ Schickard Zeit für wissenschaftliche Tätigkeit: Er verfaßte ein Werk über Optik, das nie gedruckt wurde, weil Mästlin das ihm zur Prüfung vorgelegte Manuskript nicht zurückgab, lernte Syrisch aus einer syrischen Bibelübersetzung und schrieb kurzerhand zum eigenen Gebrauch eine syrische Grammatik, die in der Universitätsbibliothek Freiburg erhalten ist. Seine künstlerische Ader bewies er durch mehrere graphische Porträts, darunter eines des berühmten, mit ihm und Kepler befreundeten Christoph Besold, Professor der Rechte an der Universität Tübingen. Schon 1614 hatte er das Epitaph des Großvaters, eine Kreuzigung mit einem Porträt des Verstorbenen, in der Dorfkirche zu Gärtringen gemalt. Dort ist es heute noch zu sehen.

Es nimmt nicht wunder, daß Kepler von dem Multitalent Schickard beeindruckt ist, als er den 20 Jahre Jüngeren im Oktober oder November 1617 in Nürtingen besucht. Kepler schenkte ihm eigene Bücher, so das lateinische und das deutsche Buch über die Faßrechnung, die, mit Schenkungsvermerken Schickards versehen, in der Universitätsbibliothek Tübingen erhalten sind. Kepler konnte vieles gut, aber zeichnen konnte er nicht, darum war es ihm hochwillkommen, daß Schickard sich bereitfand, seine Bücher zu illustrieren. Die Figuren der ersten drei Bücher seines astronomischen Lehrbuchs, der *Epitome astronomicae Copernicanae*, 1617 erschienen, sind grobschlächtig, wohl nach Keplers eigenen Skizzen geschnitten. Für die übrigen Bücher, die 1620 und 1621 erschienen sind, lieferte Schickard die Holzschnitte, die Figuren sind um Grade besser und zeigen den Könner. Der Unterschied fällt nur in den Originaldrucken, nicht in den nachgezeichneten Figuren in Band 7 der *Gesammelten Werke* auf. Auch die Holzschnitte und fünf Kupfertafeln zu Keplers *Harmonice mundi* hat Schickard meisterhaft gezeichnet und radiert; das Dodekaeder einer Kupfertafel (KGW 6, S.75) ziert sogar den Einband aller Bände der *Gesammelten Werke*.

Durch Kepler angeregt, befaßte sich Schickard auch wieder mehr mit der Mathematik – Mathematik war, wie nicht genug betont werden kann, damals hauptsächlich Astronomie –, die er eine Zeitlang vernachlässigt hatte. Der Erfolg zeigte sich, als von Oktober bis November drei Kometen erschienen, was noch nie geschehen war. Schickard maß, wenn immer sie sichtbar waren, ihre Stellung am Himmel und stellte ihren Lauf in einem Kupferstich dar. Über Herzogin Ursula, die als Witwe Herzog Ludwigs in Nürtingen lebte und Schickard gewogen war, gelangte ein Exemplar an den regierenden Herzog Johann Friedrich. Dieser war sehr interessiert und beauftragte Schickard mit einer ausführlichen Darstellung der Kometen. Der Auftrag erreichte ihn am 18. Februar 1619. Ergebnis ist die 174 Seiten umfassende und reichlich mit farbigen



Matthias Hafener (1561–1619), Portrait eines unbekanntes Malers 1604. Professorengalerie, Museum Universität Tübingen MUT. Foto: Valentin Marquardt

Illustrationen versehene Quarthandschrift „Cometen Beschreibung“. Ihr erster Teil ist geschriebene Einführung in die Astronomie der Kometen, der zweite behandelt alle historisch faßbaren Kometen, am Schluß auf den Seiten 143 bis 174 die des Jahres 1618. Die Widmungsvorrede an den Herzog ist am 12. April 1619 verfaßt. Während das einzig erhaltene Exemplar des Kupferstichs im Zweiten Weltkrieg verbrannt ist, ist die Cometen-Beschreibung in der Württembergischen Landesbibliothek erhalten und als Digitalisat im Internet zugänglich.

Während Schickard an seinem Kometenbuch arbeitete, gab es an der Universität Überlegungen zur Besetzung des freigewordenen Lehrstuhls für Hebräisch. Drei Kandidaten standen zur Auswahl, der Herzog aber wies die Universität an, Schickard zu berufen. Ihm wäre die Professur der Mathematik lieber gewesen, die aber mit dem alternden Mästlin besetzt war. So konnte man Schickard nur die Anwartschaft zusage. Er stürzte sich nun mächtig auf seine neue Aufgabe, ließ aber die Mathematik nicht links liegen. Im Jahr 1623 war er besonders produktiv. Sein Lehrbuch des Hebräischen, *Horologium Hebraeum*, d. i. ‚Hebräische Uhr‘, so benannt, weil es in 24 Lektionen eingeteilt war, erschien im Februar. Es wurde bis zum Jahr 1727 mehr als vierzigmal aufgelegt und wurde zum bis heute verbreitetsten Lehrbuch des Hebräischen. Im Mai erschien das *Astroscopium*, das ist ein innenseitig mit Sternen und Sternbildern bedruckter flacher Kegel aus Papier, mit dessen Hilfe man den Sternhimmel lernen kann. Das siebzigseitige Beiheft gibt zunächst eine Theorie der Fixsterne, gefolgt von einem zweiten Teil über Gebrauch und Absicht des Astroskops. Wie beliebt diese kleine Schrift war, wird durch 11 Auflagen und Nachahmungen deutlich.

Aus einem Brief vom 20. September 1623 an Kepler erfahren wir von Schickards Rechenmaschine; Genauerer schreibt und zeichnet Schickard am 20. Februar 1624. Er ließ ein zweites Exemplar für Kepler herstellen, das aber halbfertig in der Werkstatt des Mechanikers verbrannte. Auch Schickards eigenes Exemplar ist nicht erhalten. Der Kepler-Herausgeber Franz Hammer hat die Quellen wieder entdeckt, der Tübinger Professor für Philosophie Bruno Baron v.

Freytag Löringhoff, von Haus aus Mathematiker, hat sie rekonstruiert. Exemplare befinden sich in Tübingen, München, Weil der Stadt und andernorts.

Stichwortartig über den Fortgang der Beziehungen (aus Schickards Briefwechsel): Sept. 1620 bis Nov. 1621: Kepler ist zur Verteidigung seiner Mutter in Württemberg. 2.5.1621: Gast bei Schickard, als das Kupferstich-Porträt Keplers von Jakob van der Heyden aus Straßburg eintrifft. Schickard findet es nicht ähnlich. – 1.4.1623: Schickards Experimente zur Lichtbrechung. – 6.6.1624: Schickard hat eine Vermessung Württembergs begonnen (siewird ihn bis zum Lebensende beschäftigen). – Juni 1625: mindestens 10 Tage Schickards Gast. – 1627: Kepler wohnt ohne Familie zum Druck der Rudolphinischen Tafeln in Ulm. Briefthemen: Sohn Ludwig studiert in Tübingen, ist verschwenderisch, Schickard soll ihn beaufsichtigen. – Weltkarte der Rudolphinischen Tafeln. – Mehrmals soll Schickard fertig gedruckte Bögen der Tafeln an Hitzler in Bebenhausen weiterleiten. – Kepler, Prag 23.2.1628: Sohn Ludwig. – Exemplare der *Tabulae Rudolphinae* für die Universität, Mästlin und Schickard sollten über Besold eingetroffen sein.

In einem etwa Juli/August 1629 geschriebenen Brief an den Pfarrer und Astronomen Wolfgang Bachmayer in Mähringen bei Ulm beklagt sich Schickard, daß Kepler ihn ganz vergessen habe. Am 15./25. November 1630 schreibt er an Bernegger (übersetzt): „Was ich dir kaum trockenen Auges berichten kann, berühmter Herr Bernegger, treuester Freund, dennoch nicht verschweigen darf: unser – ach, ehemdem! – gemeinsamer Freund Kepler, dieser Stern erster Größe am Himmel der Mathematiker, ist tot und hat den Horizont der Sterblichkeit am 5/15. November in Regensburg überschritten.“ ♦

Literatur

Wilhelm Schickard: 1592–1635; Astronom, Geograph, Orientalist, Erfinder der Rechenmaschine / hrsg. von Friedrich Seck. – Tübingen: Mohr, 1978. – 422 S.: Ill. + 5 Beil. in Tasche. – (Contubernium; Bd. 25)

DR. FRIEDRICH SECK arbeitete als Bibliothekar an der Universitätsbibliothek Tübingen und wirkte an der Ausgabe von Johannes Keplers Gesammelten Werken der Bayerischen Akademie der Wissenschaften mit. Von ihm sind zahlreiche Veröffentlichungen u. a. über Kepler und Schickard sowie das Buch- und Bibliothekswesen erschienen.

Hinweis: Auf Wunsch des Autors erscheint der Text in alter Rechtschreibung.

Kepler und Galilei

Zwei Persönlichkeiten, zwei Welten, zwei Denkweisen für eine Wissenschaft

WALTER HEHL

„Von allen bedeutenden Männern aber, die ihr Nachdenken dieser wunderbaren Naturerscheinung gewidmet haben, wundere ich mich am meisten über Kepler, mehr als über jeden anderen. Wie konnte er bei seiner freien Gesinnung und seinem durchdringenden Scharfblick, wo er die [kopernikanische] Lehre von der Erdbewegung in Händen hatte, Dinge anhören und billigen wie die Herrschaft des Mondes über das Wasser, die verborgenen Qualitäten und was der Kindereien mehr sind.“

Salviati (d. h. Galilei) im Dialog über die beiden Weltsysteme, 1630, übersetzt von Emil Strauss, 1891

Galilei und Kepler kannten sich über ihren Briefwechsel, der durch ein Geschenk den Anfang nahm: Es ist umstritten, warum Kepler sein Werk *Mysterium Cosmographicum* an den im Jahr 1597 wenig bekannten Mathematiker Galileo Galilei im fernen Padua schickte. Galilei wird erst 1610 publizieren, dann allerdings den ‚Bestseller‘ *Sidereus Nuncius* (Sternenbote, Galilei, 1610). Es war wohl eher der Ruhm der Universität Padua, der Kepler veranlasste, seinem Freund Paul Hamberger (oder Hemberger oder Amberger) zwei druckfrische Exemplare auf dessen Reise nach Italien zum Verteilen in Padua mitzugeben. Galilei erhielt so nahezu aus Zufall ein Exemplar. Er überflog das Vorwort, stellte fest, dass der Autor auch Kopernikaner war und gab dem Boten noch am gleichen Tag eine kurze freundliche Dankes-Antwort mit an den Gleichgesonnenen. Sie beginnt mit „Wie Sie [Kepler], bin ich seit einigen Jahren Kopernikaner und habe dadurch viele Naturerscheinungen verstanden, die man mit den jetzigen Theorien nicht erklären kann.“

Vermutlich denkt Galilei dabei bereits an seine Theorie der Gezeiten, seinen größten Irrtum, der ihn später in den Prozess treiben wird: „Ich habe einiges zu Kopernikus geschrieben, aber ich getraue mich nicht, es zu veröffentlichen wegen des (üblen) Schicksals von Kopernikus.“

Das „üble Schicksal des Kopernikus“ hat nichts mit drohender Inquisition zu tun. Es geht darum, dass so wenige Zeitgenossen Kopernikus anerkennen würden und die große Menge ihn nur geringschätzt, verspottet und entehrt. „Wenn es mehr gäbe wie Euch, dann

würde ich es tun [veröffentlichen].“

Kepler kannte Galilei vorher nicht; er amüsiert sich über den kuriosen Doppelnamen des Absenders des Briefes, auf Latein Galileus Galileus, denn Kepler schreibt in Latein (ein Latein, das Galilei fürchterlich findet).

Galilei schreibt einen freundlichen, kurzen Brief im Stil der Zeit, Kepler schreibt weitschweifig zurück. Seine Antwort ist ein flammender Aufruf für ein ‚Coming out‘ als Kopernikaner, einige Auszüge in eigener Übersetzung:

„Mit Ihren Argumenten [für Kopernikus] würden Sie Ihren Kameraden helfen, die so viele Ungerechtigkeiten aushalten müssen ... Nicht nur Ihre Italiener haben Probleme zu glauben, dass sie sich bewegen, obwohl sie es nicht spüren, auch wir in Deutschland freunden uns nicht leicht mit dieser Idee an. ... Seien Sie guten Muts, Galileo, und kommen Sie heraus. ... Wenn Italien für Ihre Veröffentlichung nicht so günstig ist und es nach Schwierigkeiten aussieht, hätten wir in Deutschland vielleicht mehr Freiheit.“

Galilei wird noch bis 1630 warten, bis er seine (falsche) Erklärung der Naturerscheinung ‚Gezeiten‘ gross publiziert im Dialog der beiden Weltsysteme, den er beinahe sogar nach seiner Gezeitentheorie benannt hätte. Kepler baut zwei Fragen in seinen Brief an Galilei ein als mögliche Fortsetzungen ihres Dialogs. Einmal bittet er um Galileis Meinung zum Buch *Mysterium Cosmographicum* und dann, ob Galilei astronomische Messdaten habe. Aber Galilei interessiert sich vermutlich 1597 noch nicht sehr für Astronomie, und das Buch von Kepler war überhaupt nicht sein Stil.

Auf diesen Brief Keplers und drei weitere wird Galilei nicht antworten – es gibt aus seiner Sicht keinen Sinn für eine Beziehung. Kepler veröffentlicht im Jahr 1609 seine ‚Astronomia Nova‘ mit den Ellipsen als Bahnform der Planeten; es ist der Beginn einer neuen Ära in Physik und Astronomie. Galilei wird dies zeitlessly ignorieren. Für ihn gibt es nur Kreise am Himmel. Hier bleibt er Aristoteliker.

Erst im Jahr 1610 wird sich Galilei wieder an Kepler wenden. Die Erfindung des Teleskops zwei Jahre vorher in den Niederlanden und sein schlichter Bericht von den Entdeckungen am Himmel, dem Sidrius Nuncius oder Sternenboten, hat ihn vom kaum bekannten und schlecht bezahlten Mathematikprofessor zum umstrittenen Weltstar befördert. Seine Hauptentdeckung, „die vier Sterne des Jupiters“, war umstritten. Viele Zeitgenossen zweifelten und sahen das Fernrohr und seine Linsen eher in der Nähe von Taschenspielertricks und nicht als solides wissenschaftliches Werkzeug. Hier war die Unterstützung durch Kepler, den Astronomen des Kaisers, willkommen. Kepler unterdrückte seinen Ärger, dass Galilei so lange nichts hatte von sich hören lassen, und schrieb begeistert und etwas leichtsinnig, er würde ihm helfen gegen „die griesgrämigen Kritiker alles Neuen, denen das Unbekannte ungläubhaft und alles, was jenseits der gewohnten Grenzpfähle der aristotelischen Enge liegt, schädlich und gar frevelhaft vorkommt“.

Es entsteht ein Briefbüchlein von 34 Seiten mit seinen Gedanken zu den Galileischen Entdeckungen (Rosen, 1965). Kepler sieht euphorisch ein neues Zeitalter kommen. Er ruft dazu auf, dass alle Freunde der wahren Philosophie jetzt aufbrechen sollten zu großen Beobachtungen, er hat auch Vorstellungen: „Ich würde gern jetzt auch ein Fernrohr haben und ich würde damit vor Euch die beiden Satelliten des Mars entdecken (die es nach meiner Beziehung geben muss) und sechs oder acht Satelliten vom Saturn, vielleicht je einen bei Venus und Merkur.“

Galilei bedankt sich dafür mit seinem ersten Brief seit 12 Jahren bei Kepler für den Zuspruch. Berühmt ist der Satz von Galilei: „Wie würdest Du lachen, wenn Du hören würdest, was der erste Philosoph der Fakultät von Pisa gegen mich vorgebracht hat.“

Galilei lässt das Büchlein ungefragt selbst in Florenz nachdrucken (es ist ja auf Latein). Die anklagende Antwort von Kepler ist trotzdem – typisch für Kepler – freundlich: Er habe das Büchlein auf eigene Kosten drucken lassen, deshalb sei der florentinische Raubdruck ein Schaden. Aber ein Prozess habe wohl keinen Sinn, wenn es aber doch einen Prozess geben sollte und er ihn gewönne, so würde er sich eine langbrennweitige konvexe Linse von 12 Fuss Krümmungsradius wünschen. Konkave Linsen könne er in Prag bekommen, aber nicht die konvexe. Er habe nicht das Geld, dafür eine Maschine zu bauen und außerdem sei er zu ungeschickt.

Vielleicht hat Kepler erwartet, von Galilei auch ohne Prozess eine Objektiv-Linse zu erhalten. Galilei hatte in einem Brief versichert, er habe kein gutes Instrument mehr. Sein letztes gutes Stück sei beim Großherzog in die Galerie als Ausstellungsstück gekommen „zum ewigen Angedenken“. Aber er werde sobald als möglich Instrumente herstellen und seinen Freunden schicken. Kepler erhielt trotz seiner Bitte kein Instrument von Galilei, nicht einmal eine Linse. Galilei stellte wunderbar geschmückte Teleskope her, die als persönliche Geschenke Galileis oder als toskanische Staatsgeschenke an wichtige Persönlichkeiten verteilt wurden. So hatte der Erzbischof von Köln von Galilei ein Teleskop bekommen. Vom 30. August bis zum 9. September konnte Kepler mit dessen Instrument in Prag die Jupitermonde selbst beobachten und bestätigen. Er tat dies, um alle Zweifel auszuräumen, zusammen mit Zeugen, z. B. mit dem Schweizer Uhrmacher und Astronomen Jost Bürgi.

Aber auch jetzt entsteht kein eigentlicher Briefwechsel. Galilei wird im Jahr 1610 Kepler zweimal über den toskanischen Botschafter in Prag über seine Entdeckungen informieren, allerdings in verschlüsselter Form als Rätsel, von den Phasen der Venus und von der merkwürdigen Gestalt des Saturns. Die Verschlüsselung als Anagramm ist ein Verfahren, sich die Priorität einer Entdeckung zu sichern, ohne sie schon preiszugeben. Kepler als kaiserlicher Hofastronom ist eine geeignete Autorität, um für Galilei das „geistige Eigentum“ zu sichern. In die Wissenschaftsgeschichte



Galileo Galilei um 1635. Bild des flämischen Malers Justus Sustermans (1597–1681) in den Uffizien, Florenz. Eigene Aufnahme.

Die Vorstellung Keplers, dass das Signal von der Netzhaut im Gehirn verarbeitet (und aufgerichtet wird), ist eine konkrete Vorahnung, dass wir neben dem Körper eine informationsverarbeitende Maschine in uns haben, die letztlich zum Bewusstsein führt.

Galilei hat wahrscheinlich keines der Werke Keplers gelesen, weder das Hauptwerk, die Astronomia Nova, noch die Dioptrice. Von der Lehre der Optik wird dies explizit berichtet in einer Anekdote. Der an Astronomie interessierte französische Theologe Jean Tarde besucht Galilei im Jahr 1614. Tarde fragte Galilei, ob er ein Teleskop mit genau vorherbestimmter Vergrößerung machen könne. Galilei antwortete, niemand verstünde diese Wissenschaft, nur der Mathematiker des Kaisers habe ein Buch geschrieben, das sei aber „so dunkel (cosi oscuro), daß wohl noch niemand es verstanden hat, selbst der Verfasser nicht“. Jean Tarde, Tagebuch einer Italienreise, 1614, (Mario Biagioli, 2007).

gehen auch die falschen, aber zukunftsweisenden Lösungsversuche von Kepler ein: Kepler liest heraus, dass der Mars zwei Monde habe und der Jupiter einen roten Fleck – das war 1610 beides falsch, aber wurde 1877 bzw. 1665 kurioserweise astronomische Wahrheit!

Galilei wird auf weitere sechs Briefe von Kepler nicht antworten. Er wird auch jetzt nicht auf die revolutionären theoretischen Arbeiten Keplers eingehen. Aber umgekehrt regt das Fernrohr Kepler zu Gedanken über geometrische Optik an.

Das Ergebnis ist das erste Lehrbuch für Optik, Dioptrice, das Werk, durch das die Optik zur Wissenschaft wird. Schon diese kaum bekannte Dioptrice hätte Kepler zu einem wichtigen Wissenschaftler für die Geschichte gemacht. Er versteht, was passiert, wenn Linsen kombiniert werden, und entwirft das astronomische Fernrohr. Besonders hervorzuheben ist der Gedanke, dass das Auge ein umgekehrtes Bild der Außenwelt erhält und das Gehirn das Bild automatisch aufrichtet. Er schreibt sachlich und poetisch zugleich (Kepler, 1611): „Die Kristallfeuchtigkeit des Auges stellt eine konvexe Linse vor, während die mit geistigem Stoff gefüllte Netzhaut ... gleichsam als Papier steht. Die Netzhaut wird bemalt von den farbigen Strahlen der sichtbaren Welt. ... Sehen heißt, die Reizung der Netzhaut fühlen.“

Kepler schreibt wie ein Wissenschaftler mit einem Hang zur Mystik, Galilei eher wie ein Wissenschaftsjournalist. Vor allem ist Galilei ein begnadeter Selbstvermarkter, aber auch Pädagoge. Er sagt dies selbst in einem schönen Beispiel: Pädagogik ist, wenn man einem Menschen, der noch keine Treppe kennt, einen Turm zeigt, aber ihn mit der Treppe Stufe um Stufe zur Turmspitze hinaufführt (Hehl, 2017). Besonders lesbar ist seine Form des Dialogs mit drei Rollen: dem Meister, dem guten Schüler und dem dummen Schüler. Hinter dem Meister verbirgt sich unverkennbar Galilei selbst, hinter dem dummen Schüler schimmert in einer Episode der Papst hindurch. Galilei schreibt – ganz im Gegensatz zum freundlichen und sachbezogenen Kepler – noch heute gut lesbare Texte. Der große moderne italienische Schriftsteller Italo Calvino hält ihn sogar für den größten italienischen Prosaschriftsteller, trotz Dante und Machiavelli, wegen „seiner Prosa von äußerster Präzision und außergewöhnlichen Eleganz“.

Aber die Sprache Galileis kann auch barock sein und böse. Allerdings nicht gegen Kepler, den Astronomen des Kaisers. Bekannte Opfer Galileis sind etwa der dänische Astronom Tycho Brahe (Hehl, 2017) und der deutsche Astronom Simon Marius (Hehl, 2017).

Tycho Brahe ist unbestritten der beste Astronom mit den genauesten Messungen vor der Erfindung des Fernrohrs. Sein Weltmodell fasst das wissenschaftliche Wissen der Zeit zusammen: Die Planeten kreisen um die Sonne, aber die Sonne um die Erde. Es gibt ja keinen Beweis dafür, dass sich die Erde bewegt, weder für die tägliche Drehung noch für die jährliche. Für den „physikalisch fühlenden“ Galilei ist dieses tychonische Weltbild zu künstlich, aber es ist Stand der Wissenschaft und für die Kirche ein akzeptabler Kompromiss. Galilei hasst sichtbar und lesbar gerade deshalb den größten Astronomen seiner Epoche (Brahe stirbt 1601). Großer Streitpunkt sind die Kometen. Was sind sie? Haben sie eine Bahn unter dem Mond oder jenseits vom Mond wie die Planeten? Das ist eigentlich keine Frage, es ist zuverlässig gemessen worden: Es sind ferne Himmelskörper. Galilei ignoriert zum Entsetzen aller Astronomen die Messungen und erklärt sie zu „meteorologischen Erscheinungen“ (wie Aristoteles) und spricht nur von „den tychonischen Affenplaneten“. Noch mehr „ad hominem“ geht er mit dem jesuitischen Astronomen Orazio Grassi und mit dem bayrischen Astronomen Simon Marius um. Orazio Grassi macht er lächerlich, indem er ihm beweist, dass Sternschnuppen nicht verglühen können, da die Luft ja nur kühlen würde. Natürlich hatte Grassi Recht. Simon Marius hat die Jupitermonde beinahe auf den Tag genau mit Galilei als Satelliten des Jupiters identifiziert und damit Galileis Ruhm als Erstentdecker gefährdet. Galilei bestreitet, dass Marius überhaupt ein Fernrohr gehabt hat.

Kepler war Galilei gegenüber freundlich und offen und sachbezogen (und „Sache“ war für ihn die Wissenschaft). Galilei ist dagegen vor allem Stratege und um seine Ideen und um seine Karriere bemüht. Er betrachtet den Hofastronomen des Kaisers als gefährliche Konkurrenz. So intrigiert er gegen Kepler beim katholischen Großherzog Leopold (Dorn, 2000) „es dürfte nicht sein, dass ein nicht zu unserer Heiligen Kirche Gehörender [als erster] die Richtigkeit des kopernikanischen Systems beweise“.

Galileis Ruhm als Mathematiker beruht vor allem auf seinem Zitat, dass „die Natur in der Sprache der Mathematik geschrieben sei“. Aber er ist eigentlich

kein großer Mathematiker. Während er mit dem Quadratgesetz, mit Dreisatz und Euklidischer Geometrie umgeht, löst Kepler die erste transzendente Gleichung der Mathematik mit Hunderten von Aufgaben mit den neuen Logarithmen, die auf wenige Bogenminuten genau sind, und mit gewagten, nie versuchten Ansätzen für die Planetenbahnen.

Eine Gemeinsamkeit der beiden Größen ist die Ausübung einer Wissenschaft ihrer Zeit, der Astrologie. Heute ist es eine Pseudowissenschaft, im Rahmen der Entwicklung der Wissenschaft der Astronomie war es eine Vorwissenschaft, die exakte astronomische Erkenntnisse förderte. Hier ist der Vergleich zwischen Galilei und Kepler aufschlussreich. Kepler wie Galilei erstellten Horoskope, beide glaubten wohl an ihre eigenen ‚richtigen‘ Horoskope. Galilei beginnt als junger Professor seine Laufbahn sogar als Dozent u. a. für Astrologie (Kollerström, 2004). Er glaubt an die Astrologie, denn er erstellt für seine Töchter Horoskope, auch ohne Bezahlung.

Aufschlussreich ist ihre jeweilige Reaktion nach der Entdeckung der vier Jupitermonde: Galilei ordnet sie Mond für Mond astrologisch direkt Familienmitgliedern der Medicis zu (der Großherzog ist sowieso der Jupiter). Insgesamt verspricht sich Galilei mit den erweiterten Planeten bessere und feinere Horoskope. Kepler dagegen hält die Jupiterwelt für ein eigenes astrologisches System und die neuentdeckten Satelliten bestimmen das Schicksal der vermuteten Jupiterbewohner.

Wie verschieden sind die Lebensumstände der beiden Forscher! Galilei lebt in der florentinisch-venezianischen Welt. So endet sein Dialog der beiden Welt-systeme: „Inzwischen lasst uns wie gewöhnlich ein Stündchen der Abendkühle bei einer Spazierfahrt genießen; die Gondel erwartet uns bereits.“

Den Luxus entbehrt er auch nicht beim Prozess und in der Zeit seines Arrests in einer Villa. Dagegen ist es bei Kepler kaum vorstellbar, wie er angesichts der deprimierenden Kämpfe um sein Überleben (und das seiner Mutter) überhaupt so produktiv sein konnte.

Es ist sehr bedauerlich, dass Galilei Kepler nur als bedrohlichen Konkurrenten betrachtet hat; die beiden hätten sich gut ergänzt. Allerdings war ihre Ein-

stellung zur Wissenschaft recht verschieden, nicht zur Genauigkeit von Messungen, die beide haben wollten, aber zur Realität dahinter. Dadurch, dass Galilei die Ellipsenform der Bahnen ignorierte, befand er sich eigentlich noch in der Antike und der Weg in die moderne Astronomie war ihm versperrt. Das, was Galilei als seine größte Leistung in der Astronomie ansah, war gleichzeitig sein größter Irrtum: Seine Theorie von den Gezeiten ohne den Mond. Das Problem war, dass er, der Experimentator der genialen Fallversuche auf der schiefen Ebene, nicht verstand, dass die Gravitation überall wirkte. Er machte sich über Kepler lustig, wie im Eingangszitat berichtet, und letztlich sich selbst lächerlich. Denn der Einfluss des Mondes auf die Gezeiten ist offensichtlich: Die Tiden verschieben sich mit dem Mond, und es gibt dazu einen zweiten Flutberg auf der abgewandten Erdseite. In die Geschichte der Astronomie geht Galilei durch die wunderbaren Berichte zu seinen Fernrohrbeobachtungen ein und durch seinen Prozess. Es gilt das Bedauern Einsteins, dass er Kepler als Person und in seinen Arbeiten so auf Distanz hielt (Cohen, 1955): „Das – leider – ist Eitelkeit! Man findet sie bei so vielen Wissenschaftlern. Wissen Sie, der Gedanke, dass Galilei das Werk Keplers nicht anerkannt hat, hat mir immer wehgetan.“

Albert Einstein, Brief an I. Bernard Cohen, 1955. ♦

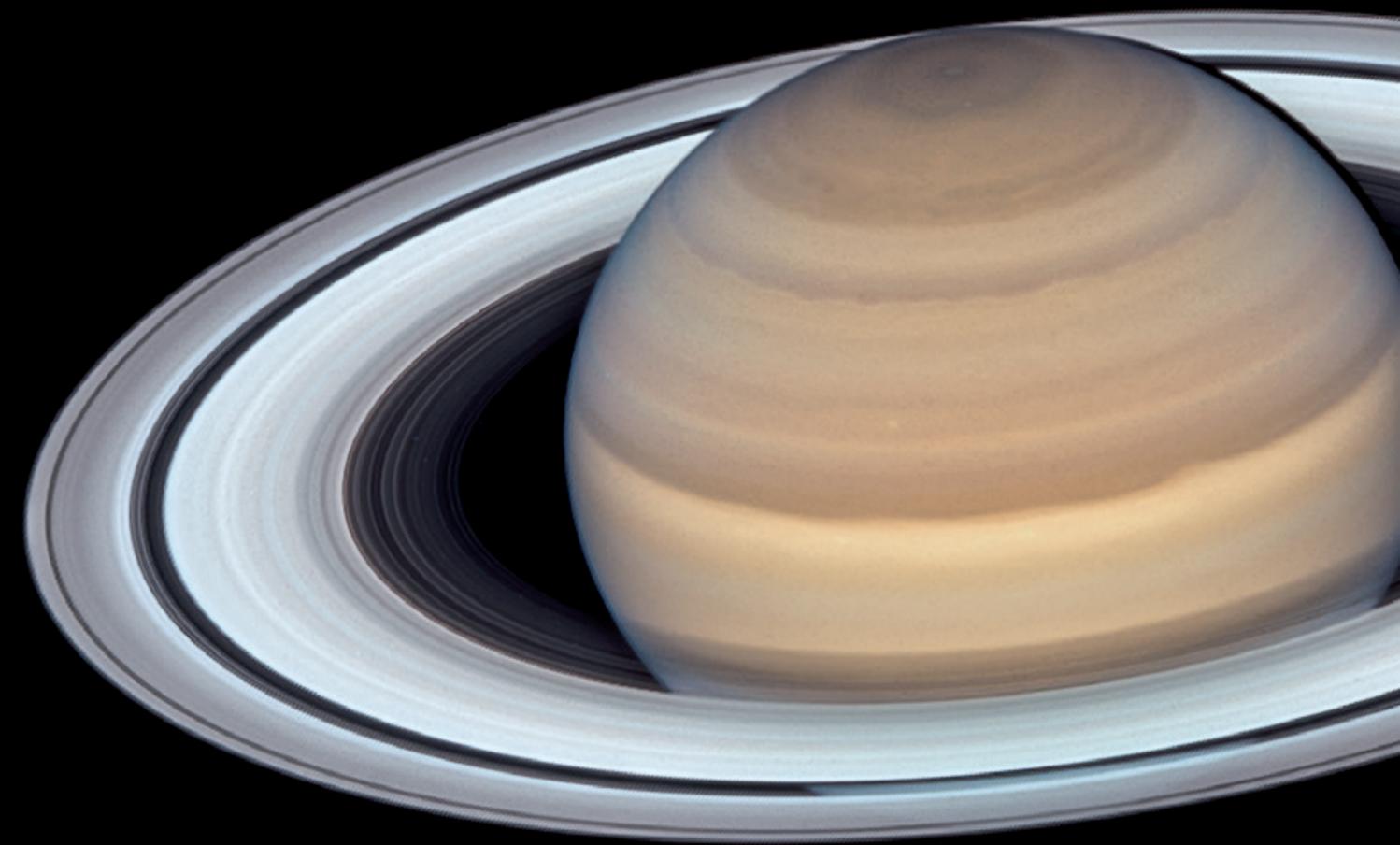


DR. WALTER HEHL war Physiker und Manager in Entwicklung und Forschung bei IBM. Seit seiner Pensionierung 2009 schreibt er Bücher über seine Interessengebiete Physik, Innovation, Informatik und Philosophie. Für sein Buch „Galileo Galilei kontrovers“ wurde er 2019 von der Ellen- und Max-Woitschach-Stiftung für ideologiefreie Wissenschaft mit dem Forschungspreis ausgezeichnet.

Literatur

- Mario Biagioli, 2007. Galileo's Instruments of Credit: Telescopes, Images, Secrecy. Chicago Press, Chicago.
- Cohen, Bernard I., 1955. An Interview with Einstein. Scientific American, Vol. 193 pp. 68 – 73.
- Dorn, Matthias, 2000. Das Problem der Autonomie der Naturwissenschaften bei Galilei. Franz Steiner, Stuttgart.
- Galileo Galilei, 1610. Nuncius Siderius (Englisch), Venedig 1610. <http://people.reed.edu/~wieting/mathematics537/SideriusNuncius.pdf>
- Galilei, Galileo, 1632. Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, übersetzt von Emil Strauss, 1891. <https://archive.org/details/dialogberdiebeoogaliuoft>
- Hehl, Walter, 2017. Galilei kontrovers. Springer, Heidelberg.
- Kepler, Johannes, 1611. Dioptrik. Übersetzung Ferdinand Plehn, 1904. Engelmann Leipzig. <https://archive.org/details/johanneskeplersookeplgoog/page/n2/mode/2up>
- Kollerström, Nick, 2004. Galileo's Astrology. skyscript.co.uk
- Linder, Douglas, 1995. Famous Trials. Galilei – Kepler Correspondence 1597. Famous-trials.com.
- Rosen, Edward, 1965. Kepler's Conversation with the Sideral Messenger, Sources of Science 5. <http://digitalcollections.library.cmu.edu/>

Keplers Nachlass



SATURN
Bild: NASA, ESA, A. Simon (Goddard Space Flight Center), M. H. Wong (University of California, Berkeley) und das OPAL Team.

Keplers gesammelte Werke

PETER SCHENKEL

Die Kepler-Materialien fanden ihren Weg eher zufällig in die Bayerische Akademie der Wissenschaften. Zumindest hat München in Keplers Leben keine Rolle gespielt, vom bayerischen Kanzler Herwart von Hohenburg abgesehen, mit dem Kepler von 1597 bis 1611 im Briefwechsel stand.

Gleich nach seinem Tode 1630 erfuhr Keplers Hinterlassenschaft jenes Schicksal, das für die wissenschaftshistorische Einschätzung seiner Zeit recht typisch war und in den Worten Christian Mayers (1719–1783), weiland Hofastronom in Mannheim, auf charakteristische Weise zum Ausdruck kam. Auf das Ansuchen nach einer Teilveröffentlichung, welches der Nürnberger Astronom Christoph Gottlieb von Murr (1733–1811) an ihn stellte, erwiderte er: Warum solle man das tun, da doch die ganze derzeitige Astronomie nicht mehr auf Kepler, sondern auf Isaac Newton gründe?

Mayer schrieb das um 1770, als die Kepler-Hinterlassenschaft den größten Teil ihrer 140-jährigen Odyssee schon hinter sich hatte, ohne jemals auf größeres Interesse gestoßen zu sein, außer einer 1718 gedruckten Briefsammlung. Da durfte von Murr es für eine glückliche Fügung halten, drei Jahre danach, 1773/74, für seine reichhaltige Sammlung doch noch einen Käufer zu finden, die Zarin Katharina die Große, welche, ihrerseits deutschstämmig und von Leonhard Euler beraten, für die Verbringung der Materialien nach St. Petersburg sorgte. – Der wichtige Vorbesitzer Michael Gottlieb Hansch (1683–1749) hatte sie 1712 in 22 Folio-Bände binden lassen, von denen 18 nach St. Petersburg geschickt wurden. – Gut siebzig Jahre danach (1839) wurden diese in die neugegründete Sternwarte Pulkowo südlich der Stadt ausgelagert, nach welcher sie bis heute in der Kepler-Forschung ‚Pulkowo-Manuskripte‘ heißen, obwohl sie 1937 von dort wieder zurück nach St. Petersburg in das Archiv der Akademie gewandert sind.

Zu einer ersten wissenschaftlichen Ausgabe der Werke Keplers brachte es dann sein schwäbischer Landsmann Christian Frisch (1807–1881), der 1858–1871

eine achtbändige Gesamtausgabe („Opera omnia“) veranstaltete und sich dafür auch um die Hinterlassenschaft in Pulkowo bemühte, die ihm tatsächlich durch Vermittlung des russischen Gesandten am Württembergischen Hof nach Stuttgart bändeweise ausgeliehen wurde. Mit dieser gewaltigen Lebensleistung – Frisch hatte in dreißigjähriger Tätigkeit die Arbeit fast ganz allein bewältigt – hätte es sein Bewenden haben können.

Aber kurz vor dem Ersten Weltkrieg trat mit dem Münchner Gelehrten Walther von Dyck (1856–1934) ein Mann auf den Plan, der die Dinge neu in Bewegung brachte und ohne den die heutige Kepler-Gesamtausgabe undenkbar wäre. Von Dyck hatte Mathematik bei Felix Klein und Alexander Brill studiert, war ab 1884 Professor der Mathematik in München, ordentliches Mitglied der Bayerischen Akademie der Wissenschaften seit 1892 und Sekretär der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse 1924–1934. Keineswegs ein Spezialist für Astronomie oder Kepler, hatte er doch einige von dessen Manuskripten neu aufgefunden, erwärmte sich für Kepler und vertrat die Meinung, Frischs Arbeit sei mit sehr wesentlichen Mängeln behaftet, weshalb eine wesentlich umfangreichere, auf anderen Editionsprinzipien gründende Neuausgabe nötig sei.

Wie schon Christian Frisch war auch von Dyck bestrebt, die Pulkowo-Materialien auszuleihen, wozu er 1913 einen Briefwechsel mit St. Petersburg anspann und die Zusendung zweier Pulkowo-Bände erreichte, ehe der Erste Weltkrieg die guten Beziehungen unterbrach. Aus uns nicht bekannten Gründen dauerte es bis 1927, ehe von Dyck seine Anstrengungen wieder aufnahm, mit recht hochrangigen russischen Stellen korrespondierte und in Folge dieser eine Vereinbarung erreichte. Von 1928 bis 1934 wurden je zwei Bände von

Pulkowo auf diplomatischem Wege nach München transportiert, dort seitenweise abphotographiert und zurückgeschickt.

Nach dieser schönen Grundlegung mit komplett kopierten achtzehn Pulkowo-Bänden wurde 1935 die Kepler-Kommission der Bayerischen Akademie eingerichtet, die sich sogleich um eine vollständige Ablichtung auch der restlichen vier in Wien lagernden (ursprünglich von Hansch besorgten) Folioebände kümmerte und weitere Kepler-Materialien aus mehr als 40 Institutionen zur Stelle schaffte, zum Beispiel aus dem Stuttgarter Staatsarchiv und der Pariser Bibliothèque Nationale.

Alles das ist seinerzeit im Umkehrverfahren – also die Buchstaben und Linien weiß auf schwarzem Hintergrunde zeigend – abphotographiert und auf sehr dickes Papier aufgezogen worden. (Die Negative sind verschollen.) Dieses Papier hat sich zwar im Laufe der Jahrzehnte stark gewellt und erlaubt ein eiliges Durchblättern schon lange nicht mehr, doch die visuelle Präsenz, um die es einzig geht, ist nach wie vor gut, und auf sechs Zweiwochen-Fahrten nach St. Petersburg in den Jahren 1990–2000 hat sich herausgestellt: Die in München bewahrten Weißschwarzkopien sind gelegentlich besser lesbar als die Pulkowo-Originale, insbesondere an den Blatträndern, auf welche in den St. Petersburger Lagerräumen seit Jahrzehnten die Raumfeuchtigkeit einwirkt.

Als Gesamtmenge hat der Münchner Hof-Photograph Arthur Schneider für die Jahre 1928–1933 19.362 Blatt errechnet (für 1934 liegen keine Zahlen vor), die als Seiten zu interpretieren sind, da die Rückseiten ohne Ausnahme leer blieben. Sie sind in 159 sehr stabilen Kartonschachteln untergebracht, die seit dem Frühling 2013, als es nötig wurde, die beiden Zimmer der Kepler-Kommission zu räumen, im Archiv der Akademie in verschließbaren Stahlschränken gelagert werden.

Darüber hinaus ist auch eine umfangreiche (aber sicher nicht vollständige) Sammlung von 1600 Aufsätzen über Johannes Kepler, die von 1767 bis 2004 reichen, mit in die Archivschränke gewandert. Mit Blick auf die nahende Auflösung der Kommission sind nach 2004 weitere Artikel nicht mehr gesammelt worden.



Doch auch so kann man sagen: Für jeden, dem in Sachen Kepler am Augenschein von Manuskripten gelegen ist, gibt es weltweit mit sehr großem Abstand keine andere Institution, die so viel Material wie die Kepler-Kommission zusammengetragen hat, wobei, wie eben angedeutet, sich die in München gebündelt vorhandenen Photokopien mit den weltweit verstreuten Originalen in der technischen Qualität bestens messen können, und schwerlich gibt es irgendwo auf der Welt eine Aufsatzsammlung zu Kepler, die auch nur ansatzweise an 1600 Stück heranreicht.

Den Inhalt der 159 Schachteln hier auch nur grob anzugeben, würde den Rahmen dieses kleinen Aufsatzes sprengen. Zudem ist der Katalog der Kepler-Handschriften im letzten Band von Keplers Gesammelten Werken (XXII, München 2017) auf über 170 Seiten im Detail ausgebreitet. Selbstverständlich wurde seit der Gründung der Kommission mit Hilfe von Übersicht und Groberfassung darauf geachtet, alles des Edierens für wert gehaltene Material in der Hinterlassenschaft früh zu erkennen und in die Gesamtplanung der Werkausgabe einzubeziehen. Da diese nie eine Gesamtausgabe hat werden sollen, sind etliche in Christian Frischs Opera omnia abgedruckte kleine Arbeiten Keplers mit Absicht nicht in die Neuedition mitübernommen worden.

Bayerische Akademie der Wissenschaften in München
Bild: BAdW/Stefan Obermeier

Alle weder in Frischs Opera omnia noch in die Neuedition übernommenen Materialien lassen sich pauschal beschreiben als Vorarbeiten Keplers – also Berechnungen, Tabellen, Figuren, Beobachtungsdaten und Textentwürfe, die in ein vollendetes Werk eingegangen sind oder eingehen hätten sollen oder aber Fragment geblieben sind –, Exzerpte und Abschriften aus anderen Autoren, Einzelrechnungen ohne wahrscheinlichen Bezug zu geplanten Veröffentlichungen, Notizen mit ähnlichem Charakter, Quittungen; im minimalen Umfang Druckvorlagen.

Die Kepler-Kommission ist 2009 (im Sinne der seit Jahrzehnten bekanntermaßen auf 2008 gelegten ‚Schnittlinie‘) inoffiziell aufgelöst worden, womit vor allem ab diesem Zeitpunkt keinerlei Budget mehr zur Verfügung stand. 2017, kurz nach Erscheinen des letzten Bandes (XXII) von Keplers Gesammelten Werken, ließ man dem auch eine offizielle Auflösung folgen.

Dessen ungeachtet ist auch über das Jahr 2009 hinaus bis zum heutigen Tage kontinuierlich dafür Sorge getragen worden, alle zu Kepler einlaufenden Anfragen nach Kräften zu beantworten. Hierfür war auf der Kepler-Netz-Seite (<https://kepler.badw.de/das-projekt.html>) stets eine Adresse angegeben, anfangs die der Kommission selber, seit deren Auflösung die bis heute geltende: forschungsdokumentation@badw.de. Diese Einrichtung wird ab dem 1. Mai 2021 von Dr. Edith Hanke betreut.

Im Laufe der letzten elf Jahre ergaben sich die verschiedensten Anfragen. Etwa Bitten, dieses ‚Schatzhaus‘ einfach nur besichtigen zu dürfen, Bitten um Beihilfe für Fernsehdokumentationen, Sachfragen über den Zustand der Manuskripte, etwa, ob sich auf gewissen Seiten Randzeichnungen Keplers befänden, zweifelnde Anfragen, ob diese oder jene in die gedruckten Bände übernommene Lesart tatsächlich dem Augenschein in den Manuskripten standhalte. Dreht es sich um die Identifizierung von Keplers Handschrift, führt die Fragenden (darunter 2012 ein Münchner Auktionshaus) der Weg fast unfehlbar in unser Archiv. Gewisse Erkundigungen – etwa, ob es von Keplers jahrzehntelangen Wetteraufzeichnungen in den 159 Schachteln Spuren gebe – unterbleiben seit dem Erscheinen von

Band XXII im Frühjahr 2017 natürlich, denn die oben genannten 170 Seiten geben erschöpfend Auskunft (über <https://kepler.badw.de/das-projekt.html> auch digital einzusehen und durchsuchbar).

Immer wieder ist es Teil der Ansuchen, ob man Ablichtungen dieser und jener ausgewählten Manuskriptseiten haben könne, wobei Keplers Wallenstein-Horoskope selbstredend das beliebteste Motiv darstellen. Dem wird stattgegeben, solange die Überlassung nicht zur Wiederverwendung in einem Druckwerk führt, da die Rechte zur Wiedergabe der Originale nicht bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften liegen. Ausnahmen können gemacht werden, wenn das fragliche Stück schon andernorts publiziert worden ist. ♦

Literatur

- Hella Kothmann*: Katalog der Kepler-Handschriften. Einleitung: Überlieferung und Verzeichnisse des Kepler-Nachlasses. In: Johannes Kepler: Gesammelte Werke. Band XXII (München 2017), 520–525.
- Peter Michael Schenkel*: Der Pulkowoer Kepler-Nachlaß und die deutsch-russischen Wissenschaftsbeziehungen. In: Volker Bialas (Hrsg.): Naturgesetzlichkeit und Kosmologie in der Geschichte. Festschrift für Ulrich Grigull (Stuttgart 1992), 66–75.

PETER MICHAEL SCHENKEL, M.A.;
freier Mitarbeiter der 2017
aufgelösten Kepler-Kommission.



Danksagung und Impressum



Begleitband zur Mitmachausstellung ‚himmelwärts‘

Herausgegeben von:
Kepler-Gesellschaft e. V.
Universität Stuttgart
Technische Universität Darmstadt

Grafisches Konzept & Gesamtgestaltung:
Lutz E. Krause
D-78464 Konstanz

Druck:
Esser printSolutions GmbH
Westliche Gewerbestraße 6
D-75015 Bretten

Titelbild Umschlag:
Blick auf das Zentrum der Milchstraße
vom höchsten und trockensten Ort
der Erde in der Atacama Wüste in Chile.
Foto: ESO/P. Horálek

Abbildungen:
Seite 6 ERB Lindau, Foto: Patrick Pfeiffer
Seite 7 Julian Maisch
Seite 9 ‚Little Planet BW‘, Foto: Achim Mende
Seite 10 Staatsministerium Baden-Württemberg
Seite 11 Universität Stuttgart, U. Metz / Universität Tübingen
Seite 12 Wolfram Scheible
Seite 13 Klaus Werner

Abbildung letzte Innenseite:
Menagerie von Galaxien oder
Galaxien so weit die Teleskope reichen
Bild: ESA/Hubble & NASA, F. Pacaud,
D. Coe; CC BY 4.0

Alle weiteren Bildnachweise bei den Abbildungen



Die Mitmachausstellung ‚himmelwärts‘ startet am 14. Januar 2022 mit dem Eröffnungsabend und ist bis zum 26. Februar in Stuttgart im Haus der Wirtschaft zu sehen. Danach geht sie als Wanderausstellung auf Tour.

Die Ausstellung ‚himmelwärts‘ wird Ihnen präsentiert dank der Förderung und Unterstützung von

Für die finanzielle Unterstützung und Mitwirkung bei der Realisierung des Begleitbands zur Ausstellung ‚himmelwärts‘ danken wir

- der Wüstenrot Stiftung
- dem Zentrum für Quantenwissenschaft und -technologie IQST, Stuttgart und Ulm
- allen Autorinnen und Autoren
- unserem Lektor: Prof. Roland Hecker
- Markus Breitwieser, Ehemals Reichsstädtische Bibliothek Lindau, für die Unterstützung beim Fotoshooting
- Celina Brandes, Konrad Groß, Alina Olenberger und Sebastian Schikora für die Unterstützung bei der Grafikerstellung und Bildbearbeitung

