

Zur illustrierten Erschließung des Himmels

Beobachtungen eines Praktikers

Abstract

Farbige und komplexe Bilder des Universums sind ein wesentlicher Bestandteil der modernen Berichterstattung über wissenschaftliche Fortschritte in der Astronomie. Unter den verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen ist die Astronomie in der beneidenswerten Lage, die breite Öffentlichkeit durch die Darstellung von Primärdaten zu begeistern; dies war jedoch nicht schon immer der Fall. Die ersten astronomischen Drucke der frühen Neuzeit waren noch fast ausschließlich Texte ohne Bilder. Dieses Kapitel betrachtet frühe wissenschaftliche Illustrationen anhand einiger subjektiv ausgewählter astronomischer Fragestellungen. Es ist davon auszugehen, dass bereits im 17. Jahrhundert die Aneignung dessen, was heute als Informationskompetenz bezeichnet wird, hilfreich war, um die Gültigkeit der in Holz geschnittenen oder in Kupfer gestochenen Informationen zu hinterfragen.

Astronomie ist eine beobachtende Wissenschaft. Die Grundlage allen Verstehens ist die Kenntnisnahme räumlicher und zeitlicher Muster. Somit ist das – auch zeitweise planlos anmutende – Sammeln von Beobachtungen eine unverzichtbare Grundlage dieser Wissenschaft. Am Himmel erscheinende räumliche Muster verändern ihre Position im Laufe einer Nacht (Erddrotation), über das Jahr (Umlauf der Erde um die Sonne), wie auch über Jahrhunderte hinweg (Präzession der Erddrotationsachse). Zeitliche Muster, etwa die durch die Bewegung der Planeten um die Sonne hervorgerufenen werden, sind oft erst nach Jahren oder gar erst nach vielen Jahrzehnten erkennbar. Hinzu kommen transiente Phänomene, deren Erscheinungen und bestenfalls Erscheinungsmuster auch in moderner Zeit langlebige Rätsel aufgeben können. Es versteht sich somit von selbst, dass die Astronomie nichts für Gemüter mit kurzer Aufmerksamkeitsspanne ist. Dementsprechend war das Bild der beobachtenden Astronomie im «hoch culturellen Westen» lange das eines Hauses bewohnt von langweiligen Buchhaltern oder bestenfalls das eines höchst unnützen Völkchens¹.

Nach unumgänglich langwierigem Sammeln von Beobachtungen stellt sich für Archivierung und Vermittlung des Gesehenen die Frage nach adäquater Form. Diese Aufgabe bedarf einer Zeitmessung, mindestens in der Form eines

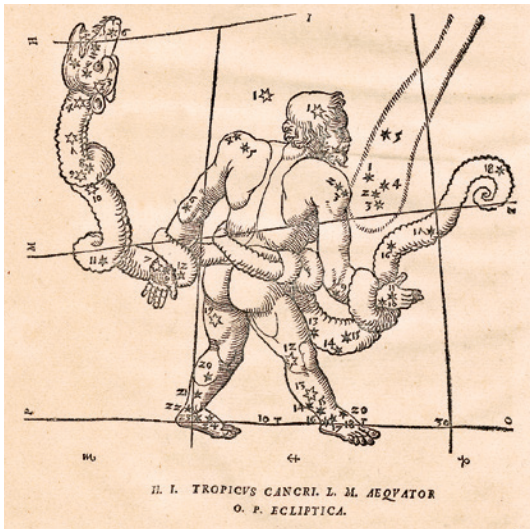
Kalenders und einer Methode, den Ort am Himmel zu benennen, also einer Art Himmelskartografie. Blickt man zurück auf Himmelsbeobachtungen im alten Mesopotamien, das als Wiege der noch heute weitgehend gebräuchlichen «Himmelsgeografie» gilt, so stellt man fest, dass von Anfang an die Tabelle, das heißt die Ziffer und das Wort, *vor* dem Bild stand. Tausende Keilschrifttafeln zeugen noch heute, zum Teil fünftausend Jahre später, von akribisch protokollierten Beobachtungen damaliger Himmelsphänomene entlang des Zodiaks.

Den Arabern, die sich im frühen Mittelalter der Wissenschaften annahmen, verdanken wir die Überlieferung griechischer Weiterentwicklungen der Astronomie, unter anderem der Konzepte der Geometrie auf der Kugel. Vielen griechischen Gelehrten schien das Philosophieren nähergelegen zu haben als die kontinuierlich detaillierte Beobachtung des nächtlichen Himmels. Im wichtigsten Werk jener Zeit, der «Mathematike Syntaxis» (bei uns kurz als «Almagest» bekannt) von Claudius Ptolemäus, worin sich das astronomische Wissen der damaligen Zeit zusammengestellt findet, wurde selbst der fundamentale Sternkatalog nur in tabellarischer und verbal umschreibender Form weitergegeben.

Zu den frühesten astronomischen Illustrationen gehörten schließlich arabische Sternkarten, typischerweise Sternbilder, denen nebst mythischen Figuren auch die zugehörigen Sterne gemäß der ptolemäischen Beschreibung im «Almagest» beigefügt waren. In Al-Sufis «Beschreibung der Fixsterne» aus dem 10. Jahrhundert war sowohl die antike Darstellung wie auf Sterngloben verwendet als auch diejenige, die sich dem irdischen Himmelsbetrachter direkt darbietet. Zu den Umschreibungen im Sternkatalog kamen somit Bilder mit hinterlegten Sternen solcherart hinzu, dass sie für Lesende am Himmel einfach identifizierbar wurden. Auf diesem Basismaterial baute die abendländische Astronomie auf. Da der Weg vieler arabischer Texte über das islamische Andalusien entlang einer Reihe von Klöstern ins Innere Europas führte, war anfänglich das Interesse an der Astronomie verständlicherweise meist auf liturgische Belange beschränkt, nämlich auf solche, die der Zeitmessung und des Kalenderwesens bedurften.

Erst in der Renaissance begannen die Objekte der Natur selbst Gegenstand des Interesses und der Erforschung zu werden. Beispielhaft für die Veränderung auch der Bebilderung der Forschungsobjekte sind etwa das nach 1400 in Padua naturalistisch illustrierte «Carrara Herbarium» und etwas später die Zeichnungen turbulenter Wasserströmungen und menschlicher Anatomie von Leonardo da Vinci. Albrecht Dürers schon fast hyperrealistische Bilder, wie dasjenige des Hasen oder des großen Rasenstücks, sind künstlerische Zeugen des nördlichen Naturalismus, der schließlich auch auf Dürers berühmte Sternkarten des gesamten Himmels von 1515 abfärbte.

In der Ausgabe von 1569, der latinisierten – ursprünglich jedoch griechischen – poetischen Astronomie des Aratus² in Hexameterform sind, eher



1 Grafische Anreicherung des astronomischen Lehrgedichtes des Aratus; hier als Beispiel das Sternbild des Schlangenträgers (Ophiuchus)

den Aratus-Illustrationen zusätzliche Koordinatenhilfslinien hinzugefügt. Die vertikalen Linien in Abbildung 1 zeigen die Grenzen der Tierkreiszeichen entlang der Ekliptik an und stehen daher senkrecht auf der untersten horizontalen Linie (OP) – der Ekliptik. Der Himmelsäquator wird durch die mittlere Linie (LM) angedeutet. Die Linie HI schließlich bezeichnet den nördlichen Wendekreis und verläuft somit parallel zur Äquatorlinie. Beobachtete man also im 16. Jahrhundert etwas Bemerkenswertes am Nachthimmel, so wären (bis auf die Erschwernis der Links-Rechts-Vertauschung) Sternkarten wie in Abbildung 1 wiedergegeben schon gut genug gewesen, solche Vorkommnisse wissenschaftlich nachhaltig zu protokollieren, sozusagen mit relevanten Metadaten anzureichern.

Ganz offensichtlich scheint der Schlangenträger in Abbildung 1 auf der Ekliptik zu balancieren: Beide Füße (d.h. die durch relativ helle Sterne sie anzeigenden) liegen auf oder gar etwas unter der Linie OP. Damit qualifiziert sich das Sternbild eigentlich, in den Reigen der «Tierkreiszeichen» aufgenommen zu werden, was jedoch nie passierte. Die Erweiterung des Tierkreises auf 13 Sternbilder hätte nämlich das vereinfachende Rechnen im schon in Mesopotamien gepflegten sexagesimalen Zahlensystem zerstört. Da das benachbarte Sternbild des Skorpions am Himmel erheblich beeindruckender leuchtet und sich über eine vergleichbare ekliptikale Länge wie der Schlangenträger erstreckt, wurde letzterer schlussendlich ignoriert. Der arithmetische Gewinn überwiegt die astronomische Diskriminierung allemal. Für reine Hand- und Kopfrechnerei ist die Zahl 60, wie sie in der geometrischen Gradunterteilung wie auch in der Zeitählung bis heute überlebt hat, von nicht zu unterschätzender Relevanz. Die Zahl 60 ist mit ihren zwölf ganzzahligen Divisoren höchst zusammengesetzt; das sind so viele Teiler wie bei keiner kleineren Zahl. Bis 100 besitzt dann auch keine weitere Zahl mehr als zwölf Teiler. In einer Zeit ohne technische Rechen-

zur weiteren künstlerischen Untermalung der beschriebenen Sternbilder, diese praktisch identisch zu den Darstellungen Dürers von 1515 beigelegt (wie etwa in Abb. 1).

Das in Abbildung 1 dargestellte mnemonisch motivierte Sternbild des Schlangenträgers ist, verglichen zur direkten Himmelsbeobachtung, seitenverkehrt dargestellt. Die dazugehörigen Sterne sind gemäß dem Katalog im Almagest durchnummeriert. Diesbezüglich wurde also schon bei Dürer eine möglichst naturalistische Abbildung der Sterne auf die Himmelskugel angestrebt und vom Illustrator der Ausgabe des Aratus von 1569 auch so übernommen. Im Gegensatz zur Dürer-Karte von 1515 wurden

helfen erlaubte somit das Sexagesimalsystem Teilungen (Divisionen) vergleichsweise genau wie auch effizient auszuführen.

Die Illustrationen von Kometenerscheinungen und von «neuen Sternen» dienten schon früh einer präzisen Dokumentation und wurden daher möglichst genau in Sternkarten eingetragen, um damit der Natur des Phänomens näherzukommen. Dennoch blieben bis weit ins 16. Jahrhundert die meisten frühen astronomischen Drucke auf geometrische Illustrationen beschränkt. Und falls doch einmal eine Himmelserscheinung illustriert wurde, dann blieben diese Bilder für den modernen Leser im wörtlichen Sinne holzschnittartig grob.

Die Entwicklung der Qualität astronomischer Illustrationen war somit keineswegs ausschließlich steigend. Die heute noch verehrten Meisterwerke sind diejenigen, die unter der Ägide von Forschern mit künstlerischem oder zumindest kunsthandwerklichem Flair entstanden und die bei der Erstellung von Illustrationen zuweilen auch selbst Hand anlegten. Der mehrheitliche Rest verschwand im Laufe der Zeit in den hinteren Regalen der Bibliotheken oder ganz und gar.

Im Sinne des klassischen Triviums verblieb die Qualität, Naturphänomene zu erörtern und zu verstehen, lange Zeit bei den Fertigkeiten von Dialektik und Rhetorik der Ausführungen. Mit dem Quadrivium wurde auch die Mathematik mit dem Studium von Arithmetik, Geometrie, Astronomie und Musik(theorie) im Werkzeugkasten der Gelehrten kodifiziert. Dennoch scheinen Naturdarstellungen weiterhin, zumindest in der Astronomie, dem geschriebenen Wort nicht ebenbürtig gewesen zu sein. Exaktheit und somit Qualität lag im Wort, nicht im Bild, das als solches eben immer nur eine *Skizze* der Realität darstellte und somit kein ernst zu nehmendes Glied in der naturphilosophischen Argumentationskette zu bilden schien.

Grosse Veränderungen in der astronomischen Forschung sind erfahrungsgemäß oft mit der Einführung technologischer Neuerungen verbunden. Obwohl für die wissenschaftliche Illustration auch eine andere Geschichte denkbar wäre, so korreliert die detaillierte Dokumentation der himmlischen Natur zu Beginn des 17. Jahrhunderts mit dem Aufkommen und der Verwendung des Fernrohres in der Astronomie. Anhand drei astronomischer Themen soll im Folgenden die Entwicklung der entsprechenden wissenschaftlichen Illustration kommentiert, ihre Qualitäten hervorgehoben, aber auch gelegentlich die Frage nach ihrer Glaubwürdigkeit gestellt werden.

Kometen

In der Klasse der transienten Himmelsphänomene gehören Kometen zu den spektakulärsten Erscheinungen. Die Ergründung der Natur der Schweifsterne

beschäftigte die Naturforscher Jahrhunderte und ist selbst heute noch nicht vollumfänglich abgeschlossen. Phänomenologisch besteht ein Komet aus einem diffus leuchtenden Kometenkopf (der Koma), der Ausgangspunkt des wiederum diffusen, aber potenziell spektakulären Kometenschweifs ist, dessen Länge und Ausrichtung im Laufe der Sonnenannäherung stark variieren.

Ein bis zwei Mal pro Jahrhundert kommt die Menschheit in den Genuss eines Kometen, der so hell wird und einen weit über den Himmel reichenden geraden und/oder gekrümmten Schweif entwickelt, dass er von niemandem mehr übersehen oder ignoriert werden kann. Den etwas himmelsaffineren Zeitgenossen zeigen sich dagegen sogar ein bis zwei Dutzend schwächere, aber immer noch ohne optische Hilfsmittel auffindbare Kometen pro Jahrhundert. Die Chancen, dass während eines Menschenlebens ein eindrücklicher Komet am Himmel erscheint, stehen also nicht schlecht. Nichtsdestotrotz bleibt ein heller Komet eine himmlische Ausnahmeerscheinung.

Die die Strahlung eines Kometen in Sonnennähe dominierende Koma ist nichts anderes als der von einer Sublimationswolke umhüllte feste Kometenkörper. Auch nur in Sonnennähe entwickeln Kometen aus der Koma heraus ihre Schweife, von denen es zwei Arten gibt. Der mehr oder weniger gerade Schweif besteht aus Ionen des sublimierten Materials des Kometenkerns. Da das Kometenmaterial auch staubartige Bestandteile besitzt, werden diese im inneren Sonnensystem bei der Verdampfung als Abfall liegen gelassen. Diese hinterlassenen Schmutzschleier sind die Quellen der über das Jahr hinweg verteilt auftretenden Meteorströme, die die Menschen als Sternschnuppen immer wieder zu erfreuen pflegen. Von all dem wussten aber weder die alten Naturphilosophen noch die späteren Astronomen etwas. Der Weg zum heutigen tieferen Verständnis war steinig und vollständig zu Ende gegangen ist er immer noch nicht.

Es waren die Ansichten um den Peripatetiker Aristoteles des 4. vorchristlichen Jahrhunderts, die im hochmittelalterlichen Europa bis in die frühe Neuzeit hinein die Natur der Kometen falsch interpretieren ließen. Im Gegensatz dazu waren etwa die chinesischen Astronomen mit ihren detaillierten Himmelsbeobachtungen, damals schon über mehr als 22 Jahrhunderte hinweg mit über 300 dokumentierten Kometen, den Europa beeinflussenden Kulturkreisen weit voraus: In China betrachtete man schon zu jener Zeit die Kometen als den «Wandelsternen» zugehörig. All dies entschlüsselte man in Europa aber erst viel später.

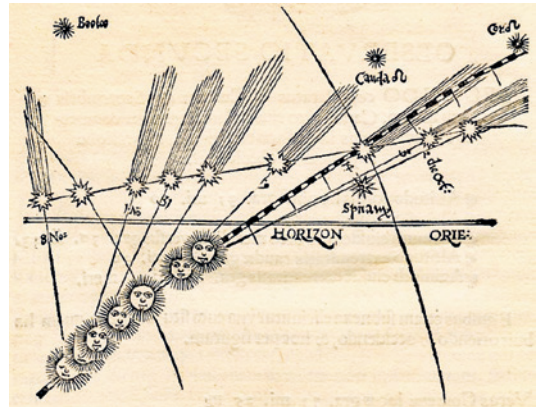
Gemäß Aristoteles sind die Kometen irdischen Ursprungs, eine Manifestation in der Erdatmosphäre, hervorgerufen durch aufsteigende Dämpfe aus Sümpfen und Höhlen, die sich entzünden und schließlich von Winden umhergetrieben werden (Abb. 2). Aber selbst in der griechischen Antike gab es schon die aus heutiger Sicht korrekte Interpretation der Kometenerscheinungen als

astronomisches, sprich himmlisches Phänomen: Apollonius von Myndos (um 100 v. Chr.) etwa hielt die Kometen für eine eigene Art von Planeten, die bahnbedingt jedoch nur selten von der Erde aus sichtbar waren.

Viel zu lange wurde bei den Scholastikern Europas dem Buchwissen der zentralen Figur der Naturphilosophie – Aristoteles – vertraut, statt die Naturereignisse selbst kritisch zu beobachten und deren Interpretationen zu hinterfragen. Gegenstimmen zur kanonischen Lehrmeinung gab es zwar immer wieder, dennoch vermochten sie sich nicht durchzusetzen. Selbst Seneca scheiterte, als er in seinen «Quaestiones VII» feststellte, dass Kometen am täglichen Lauf der Gestirne teilnehmen (daher kaum atmosphärische Phänomene sind) und bemerkte, dass «Comae radios Solis effugiunt [...]» (das Haar entkommt den Sonnenstrahlen), was als *der Schweif ist von der Sonne weggerichtet* interpretiert wird. Letzteres wurde

später noch einmal verbal von Fracastoro (1538) betont und schließlich erstmals 1540, nach Beobachtungen von Peter Apian in seinem «Astronomicum Caesareum»³ illustriert: Der Schweif weist immer von der Sonne weg (siehe Abb. 3).

Abbildung 3 zeigt einen Holzschnitt mit Apians Diskussion seiner acht Beobachtungen des Kometen von 1532 in der Morgendämmerung im Oktober und November jenes Jahres. Die Position des Kometen (wahrscheinlich gemessen bei dessen Kopf) wie auch Ausrichtung und Länge des Schweifes waren direkte Beobachtungsgrößen, die in eine Sternkarte eingetragen wurden. Eine Triangulation am Himmel war möglich etwa mittels der als Bootes (wahrscheinlich Arktur), Spica und Cauda Leo (*Schwanz des Löwen*, also Denebola) und Cor. Leo (Regulus) bezeichneten hellen Sternen. In der Natur bilden Arktur, Spica und Cauda Leo grob ein gleichseitiges Dreieck am Himmel. Die Darstellung dieser Sterne in Abbildung 3 ist jedoch weit davon entfernt. Somit sind die Längenandeutungen des Schweifs (an und für sich schon schwierig, da diffus am Himmel erscheinend und in Horizontnähe sowieso von der atmosphärischen Transparenz beeinflusst) wahrscheinlich nicht wirklich belastbar. Für die Kernbotschaft der Figur ist das dennoch nicht weiter problematisch, es geht dabei schließlich um die Ausrichtung des Schweifes relativ zur Sonne, die aber zur Beobachtungszeit immer unter dem Horizont stand. Die horizontale Doppellinie im Holzschnitt deutet den mathematischen Horizont an. Die Ver-



2 Titelbild in Johannes Schöners Pamphlet zum Kometen von 1531. Der Komet wird als atmosphärisches Phänomen der Erdhülle dargestellt

3 Zeitliche Veränderung der Kometenerscheinung von 1532 relativ zur Sonne, aus «Caesareum Astronomicum»

bindung der einzelnen Kometenbeobachtungen ergibt seine scheinbare, gebogene Bahn am Himmel über etwa fünf Wochen hinweg. Mithilfe der Sternkoordinaten konnte Apian die Lage der Ekliptik, der scheinbaren Sonnenbahn, in die Karte eintragen. Aus Rechnungen (schon damals in Tabellen nachschlagbar) lässt sich die jeweils nicht einsehbare Lage der Sonne unterhalb des Horizontes zu den Kalenderdaten der Kometenbeobachtungen bestimmen und einzeichnen. Auch wenn die relative Größe des Sonnensymbols im Verhältnis zum Rest der Figur übertrieben ist, so deuten die Verbindungslinien Sonne – Kometenkopf zu den entsprechenden Beobachtungsepochen an, dass der Kometenschweif immer sonnenabgewandt ist. Die zusätzlichen steilen, nach rechts gekrümmten beiden Linien sollen wohl spezielle Begebenheiten markieren: Die Bedeutung der rechten Linie ist klar, sie verzeichnet den Verlauf des Großkreises auf der Himmelskugel, der die Epoche markiert, als die Kometenbahn die Ekliptik kreuzte. Der Nutzen der linken Linie bleibt unklar.

Plinius der Ältere (1. Jh. n. Chr.) ging gar über die Fantastereien des Aristoteles hinaus und stempelte in seiner «*Historia Naturalis*» die Kometen zu Wunderzeichen, deren Bedeutung sich aus Farbe und Form erschließen lasse. Diese von Rudolf Wolf als «Kometenschwindel» betitelten Interpretationen lebten bis um 1680 herum fort. Ganz im Sinne der auch heute gepflegten Aufmerksamkeitsökonomie schlechter Nachrichten frönten schon die alten Chroniken ausgiebig dem Korrelation-ist-Kausalität-Schabernack. Somit ist es nicht verwunderlich, dass sich dies auch in der Art und Weise der Kometenillustrationen niederschlagen pflegte (siehe etwa Abb. 5).

Nach 1500 begannen in Europa Kometenverzeichnisse (nicht nur zeitgenössischer Kometen) zu zirkulieren; eine phänomenologische Bestandsaufnahme, zum Teil mit Wunschdenken und Überinterpretation garniert, wenn diese Himmelserscheinungen mit bevorzugt negativen irdischen Begebenheiten in Verbindung gebracht wurden. Ein illustres Beispiel aus der Ära der Kometenverzeichnisse ist das Werk «*Theatrum Cometicum*» von Stanisław Lubieniecki⁴. Das aus drei Teilen bestehende Gesamtwerk umfasst über 1700 teilweise schwer verdauliche Seiten, vor allem wenn sie in lyrische Huldigungen von Geistesgrößen und Adelshäusern abgleiten. Grob tausend Seiten sind den Briefwechseln des Autors mit einer Reihe bekannter europäischer Astronomen und Gelehrten zu den beiden Kometen von 1664 und 1665 gewidmet. Nur wenige Karten illustrieren hingegen dabei ausgetauschte Beobachtungen. Wissenschaftlich interessant ist die Himmelkarte der Tafel 40 des Werkes, die als eine Art *Metastudie* verstanden werden kann. In diese Karte sind die von mehreren Astronomen übermittelten Positionsdaten des Kometen von 1664 eingetragen (rechter Teil von Abb. 4). Damit lässt sich auf unkomplizierte Weise ein objektiverer Eindruck der erreichten astrometrischen Messgenauigkeit verschiedener Beobachter gewinnen.

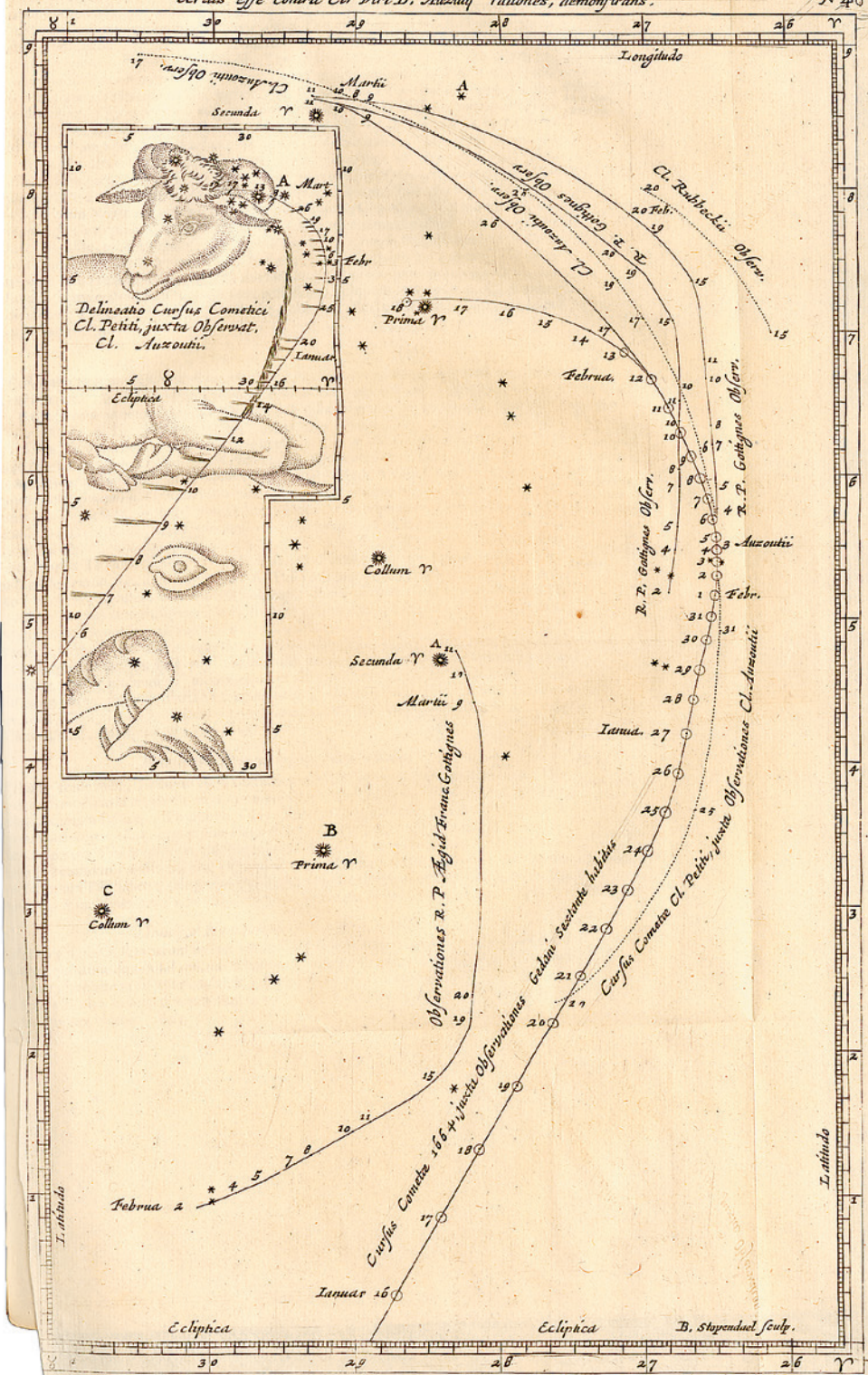
Die kleinere Einschubdarstellung in Tafel 40 zeigt den Weg des Kometen zwischen Januar und frühem März 1665 durch den angedeuteten Kopf des Wals (Cetus) und den Westteil des Widders (Aries), dies gemäß Beobachtungen des Astronomen Auzout in Paris. Zusätzlich sind darin Richtung und Länge des Schweifes für dasselbe Zeitfenster vermerkt. Aus der zeitlichen Entwicklung des Bewegungspfades am Himmel ist ersichtlich, dass sich der Komet auf der Karte von links unten nach rechts oben bewegte und erst nach dem Periheldurchgang am Abendhimmel beobachtbar wurde. Interessanter ist hier jedoch der Rest der Figur. Der rechte Teil von Tafel 40 zeigt die Vergrößerung des oberen Teils (positive ekliptikale Breite) der Teilfigur mit den Sternbildern. In der Vergrößerung sind die von *verschiedenen* Astronomen gemessenen Positionsdaten eingezeichnet. Die Streuung der gemessenen Positionen am Himmel ist beträchtlich. Mit Abweichungen von der Größenordnung eines Grades (immerhin zwei Vollmonddurchmesser), vor allem in der ekliptikalen Länge, musste damals offenbar gerechnet werden. Die späten Beobachtungen von Hevelius im Speziellen liegen selbst in den ekliptikalen Breiten *systematisch* merklich tiefer, als was andere Beobachter notierten. Wenn also auch einzelne veröffentlichte Kometenbahnen glatt und in sich konsistent ausgesehen haben mögen, so war es durchaus möglich, dass sie systematisch und signifikant von anderen Resultaten abwichen. Bei der unten links auf Tafel 40 eingezeichneten Kometenbahn schließlich, basierend auf den Beobachtungsdaten von Godinium in Rom vom Januar 1665, bleibt gänzlich schleierhaft, was er wirklich gesehen haben mag.

Nach der Abhandlung der Kometen von 1664 und 1665 (heute als C/1664 W1 und C/1665 F1 katalogisiert) präsentiert der zweite Teil des «Theatrum Cometicum» Beschreibungen von 415 historischen, das heißt vor 1664 erschienen Kometen. Der älteste Erwähnte wird dem Jahre 2312 vor Christi Geburt, nach damaliger Vorstellung 1657 Jahre nach Entstehung der «Welt» zugeordnet. Zusammengetragen wurden die Kometenbeschreibungen aus Chroniken und vielfach transkribierten Legenden von entsprechender Zuverlässigkeit und somit vernachlässigbarer astronomischer Relevanz.

Im dritten und letzten, 83 Seiten umfassenden Teil des «Theatrum Cometicum» wandte sich Lubieniecki schließlich noch dem Astrologischen zu. Dabei zählte er wichtige Ereignisse in Bezug auf die menschliche Zivilisation auf, die mit Kometenerscheinungen korrelierten; fairerweise erwähnte er neben Negativem auch Positives. Schlussendlich fand er in seiner Sammlung, dass sich während Kometenerscheinungen Gutes wie Schlechtes in etwa die Waage hielt. Daraus schloss der Autor, dass wohl kein Grund bestehe, sich vor Kometen fürchten zu müssen. Das Absterben von Aberglauben ist jedoch bestenfalls ein langsamer Prozess, genauso wie die Akzeptanz neuer Theorien. Meistens verläuft dies nicht über rationale Überzeugung von Zweiflern, sondern durch

► 4 Tafel 40 in «Theatrum Cometicum», eine Metastudie zum Kometen von 1664–1665 zusammengeführte Beobachtungen verschiedener Astronomen

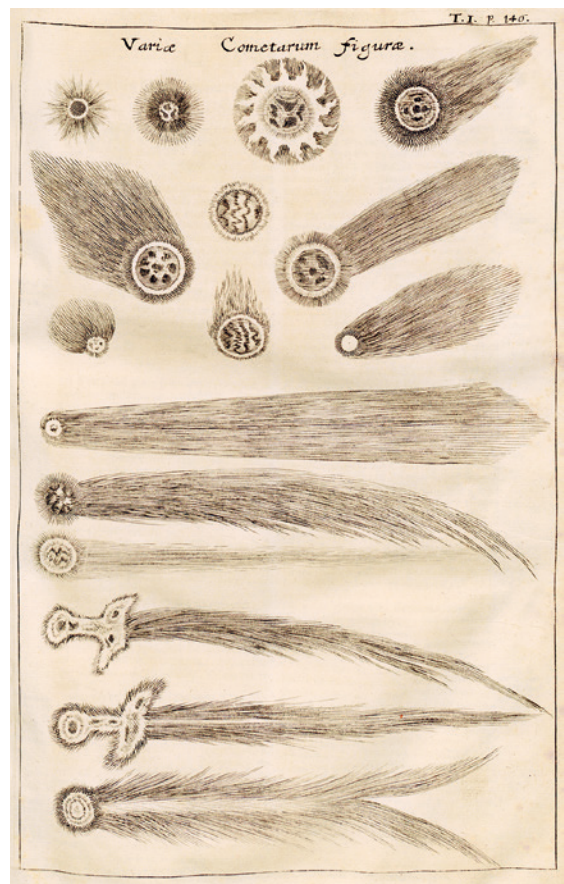
Tabula, observationes Comete hyemalis 1664 et 1665, ab Amphiss. et Cl. Viro D. Ioan. Hevelio factas
certas esse contra Cl. Viri D. Auzoutii rationes, demonstrans. N^o 4^o

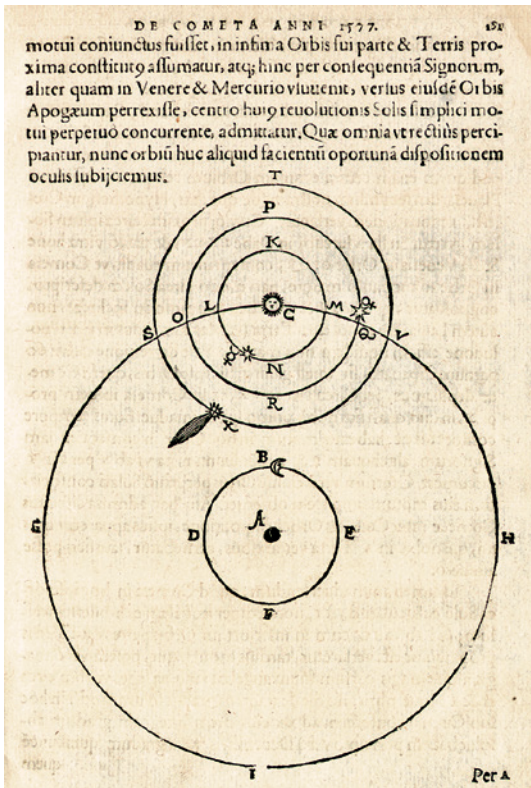


deren Wegsterben im Laufe der Jahre. Diesbezüglich beachtlich sind dennoch die noch spät erschienenen fantasiereichen Illustrationen von Kometen, deren Koma Strukturen zeigen, die so sicher nicht gesehen werden konnten, wie auch deren fallweise an Schwerter erinnernde Schweife. Alles also immer noch so konnotiert, dass Kometen Unglück und Schrecken auf die Erde bringen.

Das Werk von Johannes Zahn⁵ aus dem Jahre 1696 enthält Kometenzeichnungen der soeben erwähnten Art. Ganz offensichtlich sollten die Kupferstiche erheblich mehr insinuieren, als was Feldskizzen realistischerweise zu bieten haben. Der obere Teil von Abbildung 5 konzentriert sich auf Strukturen innerhalb des Kometenkopfes. Selbst in Fernrohren erscheint die Koma jedoch lediglich als ein ausgewaschener, gewöhnlich strukturloser Fleck. Es ist möglich, dass bei einem eher seltenen geysirartigen Ausbruch im Kometenkern asymmetrische oder zusätzliche Schweifstrukturen entstehen. Auf keinen Fall beobachtbar sind jedoch sternartige Muster, so wie illustriert. Verständlich wäre bestenfalls noch ein szintillationsartiges, dennoch unregelmäßiges Funkeln heller kompakter Kometenköpfe in der unruhigen Atmosphäre, über Hausdächern und allgemein in der Nähe des Horizontes. Regelmäßige sternartige Muster sind aber weder zu erwarten noch so zu beobachten. Die unteren fünf Kometenillustrationen mit ausgeprägten Schweifen werden von oben ausgehend gegen unten hin immer fantastischer. Der oberste lange gerade Schweif entspricht etwa dem, was von Ionenschweif beobachtet wird. Der zweite Fall mit gekrümmtem Schweif ist repräsentativ für Staubschweife, deren Krümmung die Spur der Orbitalbewegung des Kometen nachzeichnet. Fall drei erinnert an Fall eins, den Kometen mit einem – hier jedoch nicht sonderlich reichen – Ionenschweif. Die untersten beiden schwertartigen Kometendarstellungen gehören dagegen gänzlich ins Reich der Fantasie, nicht aber zu objektiver Naturbeobachtung. In den beiden letzten Beispielen scheint die astrologische Interpretation der Kometen als unheilbringende Feuerschwerter des Himmels den Stachel des Illustrators geleitet zu haben. Die Wahl der Illustrationsmethode via Kupferstich oder gar Holzschnitt ist für Kometen

5 Fantasiervolle Illustration aus dem Jahr 1696 von gesammelten Erscheinungsformen und -strukturen von Kometen





6 Brahes astronomische Interpretation seiner Kometenbeobachtungen von 1577–1578: Kometen sind keine Erscheinungen in der Atmosphäre der Erde (A). Kometen kreisen jenseits der Mondbahn (BD FE) um die Sonne (C)

Ende 1577 am Nachthimmel erschienen Kometen. Von speziellem Interesse war für Brahe bei seinen Beobachtungen die Bestimmung der Parallaxe des Kometen, um anhand derer entscheiden zu können, ob Kometen sublunar (also näher als der Mond) und damit potenziell ein irdisches Phänomen oder supralunar (weiter weg als der Mond) und somit astronomische Körper sind.

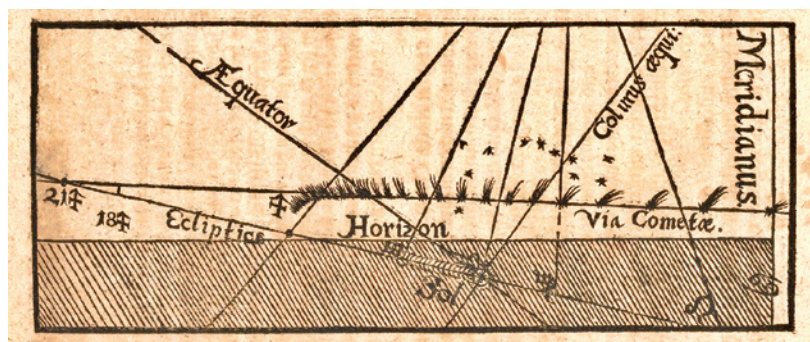
Die Parallaxe eines Objektes misst den Sprung, den es relativ zu einem noch viel weiter entfernten Referenzsystem macht, wenn das nächststehende Objekt aus unterschiedlichen Richtungen betrachtet wird (das klassische Schulbeispiel ist die Veränderung der Lage eines Kirchturms relativ zu weit entfernten Bergen während einer Eisenbahnfahrt). Im astronomischen Umfeld kann zum Beispiel ausgenutzt werden, dass sich die Erde um ihre Achse dreht und (falls ein vor dem Sternhintergrund sich befindendes Himmelsobjekt lange genug über dem lokalen Horizont steht) eine Positionsmessung relativ zum Sternhintergrund bei Aufgang und eine bei Untergang vorgenommen wird. Im Fall von Kometen ist dieses Unterfangen wenig erfolgversprechend, da sich helle, gut sichtbare Kometen oft schon in Sonnennähe befinden, also zu Zeiten der Dämmerung schon horizontnah stehen und sie sich im Laufe einer Nacht erst noch merklich entlang ihrer Bahn bewegen; dies in Sonnennähe erst noch besonders schnell. Interessanter ist der Ansatz, gleichzeitig von zwei möglichst

nicht optimal. Diese Methoden lassen die meist ephemeren Kometenerscheinungen im Druck viel strukturierter und schärfer erscheinen und werden dem tatsächlich beobachtbaren Phänomen am Himmel nicht gerecht. Die nebulöse Erscheinung von Kometen am dunklen Himmel fängt am ehesten noch ein Aquarell oder eine Lithografie ein.

Spätestens mit Regiomontan (wenn auch seine Beobachtungen des Kometen von 1472 nicht grafisch illustriert, dennoch genügend genau vermessen und textlich wie numerisch der Nachwelt hinterlassen wurden) erzeugten die Himmelsbeobachter auch in Europa für die Jahrhunderte später arbeitenden Kometenbahnrechner unabdingbares und zuverlässiges Datenmaterial, um auf dessen Grundlage weiterführende Muster in der Erscheinungsphänomenologie der Kometen zu finden. Quantitativ auf eine neue Ebene der Messgenauigkeit in der Astronomie brachten es Tycho Brahes Beobachtungen des hellen,

weit entfernten Beobachtungsorten dasselbe Objekt gegen die Hintergrundsterne zu vermessen. Ebendieser Ansatz erwies sich im Falle des Kometen von 1577 denn auch als erfolgreich: Am 30. November 1577 maß Brahe im dänischen Uraniborg die Position des Kometen relativ zum hellsten Stern im Sternbild Adler. Seine Daten konnte Brahe wenig später mit den am gleichen Abend in Prag vom dortigen Astronomen und Leibarzt des Kaisers Hagecius gewonnenen vergleichen und feststellen, dass die Parallaxe kleiner als die des Mondes ist, somit der Komet sich weiter entfernt befinden muss als der Erdtrabant. Etwas vereinfacht könnte man polemisieren, dass mithilfe *einer* sorgfältig geplanten und ausgeführten Beobachtung in *einer* Nacht ein über tausend Jahre perpetuierter Glaubenssatz vom Sockel gestossen wurde. Auch wenn dies gelang, so waren die Schlussfolgerungen Tycho Brahes in seinem Werk «De mundi aetherei recentioribus phaenomenis»⁶, erstmals 1588 in Uraniborg gedruckt, noch nicht korrekt. Brahe lebte kosmologisch in zwei Welten: Er konnte die ptolemäische Kosmologie nicht ganz loslassen und kam nie vollständig im kopernikanischen Heliozentrismus an. In seinem hybriden Kosmos (Abb. 6) steht noch immer die Erde im Zentrum. Der Mond (bei B) und die Sonne (bei C) umkreisen die Erde. Die inneren Planeten, Merkur (auf Bahn K) und Venus (auf P), umkreisen die Sonne wie auch die äußeren Planeten, die aber in der konzeptionellen Illustration in Abbildung 6 nicht eingezeichnet wurden. Gemäß Brahe gehören auch die Kometen in die Klasse der die Sonne umkreisenden Himmelskörper, illustriert ist dies in Abbildung 6 mit einem angedeuteten Kometen (X) auf Bahn T. Im Weltmodell Brahes konnten die Kometen also supralunar gemacht werden. Mit der Platzierung der Kometenbahnen etwas außerhalb der Venus wurde sowohl die relative Nähe zur Sonne gewährleistet wie auch der wiederholten Beobachtung genüge getan, dass spektakuläre Kometen meist in der Dämmerung und hin und wieder auch unweit von Merkur oder Venus gesichtet wurden. Dennoch: Dieser Ansatz kann die während eines Großteils der Nacht am Himmel sichtbaren Kometen nicht erklären, außer der Bahnradius eines solchen Kometen ist so groß, dass er den Abstand von Erde plus Abstand Erde – Mond übersteigt.

Nachdem die Kometen also schließlich auch in Europa den Wandelsternen zugewiesen wurden, verloren sie damit ihr Recht auf durch die Winde der Erdatmosphäre induzierte gesetzlose Bewegung. Als Gestirne hatten sie wohldefinierten Bahnen zu folgen. Die Natur der Kometenbahnen blieb dennoch noch eine ganze Weile ungeklärt. Für einige Jahre wurde die gerade Linie als Bahnkurve bevorzugt. In einem Pamphlet über den Kometen von 1607 veröffentlichte Kepler⁷ seine Einzelbeobachtungen des Kometen, die keiner geraden Linie folgen; dennoch approximierte er die Bahn durch eine solche. In Abbildung 7 trifft diese Bahn die Ekliptik bei 21° im Schützen (siehe 21I). Das Hauptaugenmerk des keplerschen Textes liegt jedoch auf der Natur des Schweifes und etwas Astrologie durfte in der kurzen Veröffentlichung natürlich auch nicht fehlen.



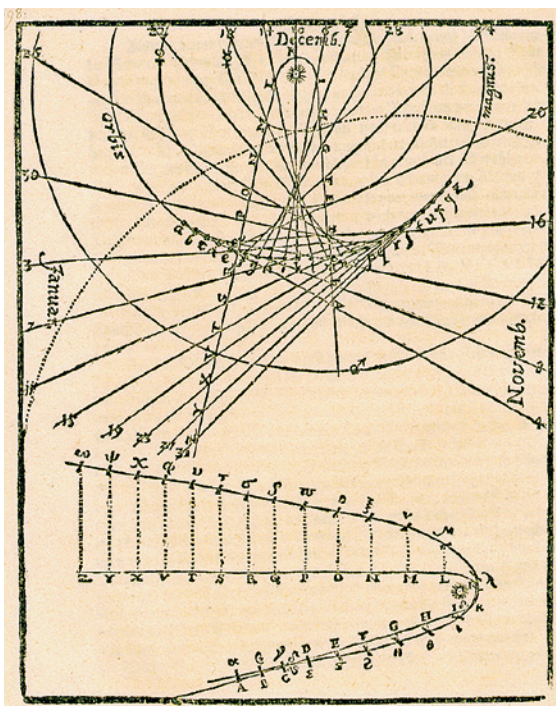
Die Illustration in Abbildung 7 weicht konzeptionell nicht sehr von der apianschen in Abbildung 3 ab. Der Horizont erscheint als horizontale Linie, die die schraffierte Erdoberfläche begrenzt. Der Komet wurde über den Beobachtungszeitraum hinweg, in der Abenddämmerung, nur knapp über dem Westhorizont beobachtet. Wie schon bei Apian sind die Sonnenstände im Beobachtungszeitraum entlang der Ekliptik eingezeichnet, sodass wiederum betont werden kann, dass der Kometenschweif immer von der Sonne weggerichtet ist. Die Lage und der Schnittpunkt des Himmelsäquators mit der Ekliptik (das Herbst-Äquinoktium definierend) bieten Orientierung. Die Situation am Sternhimmel ist mit dem vermerkten Sternbild des großen Bären nur skizzenartig angedeutet und astrometrisch für potenzielle Nachnutzer unbrauchbar. Die zusätzlichen Linien, der Großkreis durch den Herbstpunkt und die auf der Ekliptik startenden, wahrscheinlich die Grenzen der Tierkreiszeichen markierenden Linien sind bestenfalls Orientierungshilfen, da genauere Positionen des Kometen nicht mitgeteilt wurden. Das Hauptthema des Kepler-Pamphlets liegt auf der Interpretation des Schweifs. Er diskutiert die Schweifbildung mithilfe der in jener Zeit favorisierten optischen Theorie, wonach der Kometenkopf eine materielle, transparente Kondensation im Äther sei – als glas- oder gallertartige Kugel vorstellbar –, in der das Licht der Sonne oder gar der hellen inneren Planeten gebrochen wird und die hinter dem Kometenkopf wie bei einer Kautik zu einem schweifartigen Lichtkegel im Äther führt. In Keplers Hauptwerk zu den Kometen, «De Cometis» von 1619, werden die am Himmel beobachteten gekrümmten Bahnen schließlich damit erklärt, dass sich die Kometen entlang gerader Linien bewegen, sich aber gleichzeitig auch die Erde, von wo aus die Beobachtungen ja gemacht werden, auf ihrer Bahn um die Sonne weiterbewegt. Die Kombination dieser beiden Bewegungen führt dann, gemäß Kepler, zu einer scheinbar gekrümmten Bahn am Himmel.

Die hellen Kometen von 1664 und 1665 belebten die Forschungen zu den Kometen erneut: Der französische Astronom Pierre Petit kam bei seinen Analysen im Jahre 1665 sozusagen vom geraden Weg ab und postulierte, dass Ko-

meten auf langgestreckten Ellipsen um die Sonne liefen und somit periodisch wiederkehrende Himmelskörper seien⁸. Darauf aufbauend behauptete er auch gleich, dass der Komet von 1664 derjenige sei, der schon 1618 erschienen war, und sagte auch gleich seine Wiederkehr für das Jahr 1710 voraus. Die Prognose war, wie so manche, falsch und leider waren die Kometen von 1618 und 1664 auch nicht dieselben; das stellte sich aber erst erheblich später mit mehr Kenntnis in Himmelsmechanik heraus. Nicht immer ist aber *absence of evidence* auch *evidence of absence*: Petit machte zwar keine korrekte Vorhersage, dennoch war er mit seiner Hypothese zur Natur der Kometenkinematik näher an der Wahrheit als der große Kepler, der Mann, der die Elliptizität der Planetenbahnen proklamierte. Hevelius, der sich in seinem Werk⁹ von 1666 auch mit den Beobachtungsdaten des hellen Kometen von 1664 auseinandersetzte, ging weniger weit als der Franzose Petit. Dennoch befand er, dass Kometen sich auf krummlinigen Bahnen bewegen würden. Er spielte mit Hyperbeln, Parabeln wie auch Spiralen; sie alle sollten von geraden Linien nur schwach abweichen, aber immer so, dass die konkave Seite gegen die Sonne gerichtet sei. Den hevelschen Ansatz könnte man also der Schule der mathematischen Modellierung zuweisen, in der beobachtete Daten mathematisch formalisiert werden und damit schlussendlich auch Vorhersagen erlauben, dies jedoch noch ohne Kenntnis der zugrunde liegenden physikalischen Natur des Phänomens.

In der Geschichte der Astronomie kommt dem großen Kometen von 1680 eine spezielle Rolle zu. Entdeckt wurde er mit dem Fernrohr von Johann Gottfried Kirch am Morgenhimmel des 14. November 1680 in der Nähe des Mondes. Der Komet war erst im Anflug Richtung Sonne, noch ohne ausgeprägten Schweif. Während eines Großteils des Dezembers 1680 blieb der Komet wegen seiner Sonnennähe unsichtbar und erschien erst wieder kurz vor dem Jahreswechsel, um dann einen außergewöhnlich spektakulären Schweif zu entwickeln. Für die meisten dem Himmel genügend Interesse entgegenbringenden Menschen waren diese Kometenerscheinungen einfach zwei helle, aber unterschiedliche Kometen kurz hintereinander. Dies war auch die Meinung des Entdeckers Kirch sowie auch anfänglich die eines Naturphilosophen in Cambridge, der den Kometen auch beobachtete: Isaac Newton.

8 Dörffels Prä-Newton'sche, physikalisch noch nicht untermauerte Interpretation der Bewegung des Kometen von 1680 auf einer parabolischen Bahn



Ein sächsischer Theologe und Amateurastronom, Georg Samuel Dörffel, zeigte sich kreativer als die berufenen Astronomen und beschrieb schon 1681, wie die beiden Kometenerscheinungen Ende 1680 auf ein einziges astronomisches Objekt zurückgeführt werden könnten¹⁰. Auch wenn Dörffel keine Entfernungsdaten zum Kometen hatte, so war er doch in der Lage zu zeigen, dass falls der Komet einer Parabel mit der Sonne im Fokus folgte, der kosmische Besucher zur richtigen Zeit auch wirklich in der beobachteten Himmelsgegend auftauchte. Abbildung 8 zeigt die Konzeptskizze aus Dörffels Werk von 1681. Die obere Konstruktion fokussiert sich auf das innere Sonnensystem, senkrecht auf die Ekliptik schauend. Die Bahnen der Planeten Merkur bis Mars sind als Kreise angedeutet. Für die Erde sind entlang ihrer Umlaufbahn 23 Epochen markiert, gekennzeichnet mit den Punkten *a–z*, zwischen November 1680 und Januar 1681, jeweils im Abstand von vier Tagen. Für dieselben Zeitpunkte wurden entlang der Parabel Punkte *A–Z* so aufgetragen, dass der Sehstrahl von der Erde durch die Projektion des Kometen auf die Ekliptik in diejenige Himmelsgegend zeigt, in der der Komet beobachtet wurde. Bemerkenswert ist, dass für diesen Ansatz die Abstände der Grossbuchstaben zum sonnennächsten Punkt (Perihel) hin merklich größer werden. Das heißt, der Komet bewegt sich nahe dem Perihel schneller als weiter draußen im Sonnensystem; ganz so, wie es auch die Himmelsmechanik für Bewegungen auf Keplerellipsen impliziert. Die untere Illustration in Abbildung 8 ist eine Art von Seitenriss auf die Ekliptikebene. Eine solche Darstellung streicht die Neigung zur Ekliptik und ihre Schnittpunkte mit der Kometenbahn heraus. Die Projektionen der Epochen *A–Z* auf die Ekliptikebene können im unteren Diagramm mittels beobachteter ekliptikaler Breiten in die Raumpositionen α – ω zurücktransformiert werden.

Dörffel war nicht der Erste, der Kegelschnitte als mögliche Bahnkurven für Kometen ins Spiel brachte. Wie schon erwähnt, spielte Johannes Hevelius schon mehr als eine Dekade früher mit Kegelschnitten zur Beschreibung gekrümmter Kometentrajektorien am Himmel. Dörffel seinerseits zitierte ausgiebig das Hauptwerk von Hevelius zu den Kometen, die «Cometographia»¹¹ von 1668 und dies auf Seiten genau. Man darf durchaus loben, dass Dörffels Zitierstil besser ist als der in manch einer modernen wissenschaftlichen Arbeit, da bei Dörffel das Wiederauffinden der zitierten Information effizient möglich ist (wobei zugegebenermaßen zeitgenössische wissenschaftliche Arbeiten sich auch kaum mehr über 900 Seiten erstrecken). Wo Hevelius es ohne weitere Elaborationen bei seinen Kegelschnitt-Spekulationen beließ, führte Dörffel aus, zumindest auf Plausibilitätsebene, dass eine Parabel das Verhalten des Kometen von 1680 auf seinem Weg durch das innere Sonnensystem quantitativ beobachtungskonsistent beschreibt. Ein selbstständiger Schritt vorwärts war seine Vermutung, dass im Fokus der die Kometenbahn beschreibenden Parabel die Sonne stehe. So lieferte auch diese Arbeit ein hilfreiches Mosaiksteinchen zum

Verständnis der wahren Natur der Kometen; immer noch fehlte jedoch das die postulierte Kinematik tragende Fundament – sprich, die Physik dazu. Und genau da betritt der schon erwähnte Naturphilosoph aus Cambridge wieder die Bühne. Anfang der 1680er-Jahre setzte Newton die Bahnen von Kometen zwar noch geradlinig an und blieb damit entsprechend erfolglos bei seinen Versuchen, deren beobachtete Bahnen am Himmel zu modellieren und in seine allgemeingültig zu sein habende Naturphilosophie einzubauen. Nach wissenschaftlichem Austausch mit dem ersten Astronomer Royal, John Flamsteed, und später Edmond Halley, einem Mitglied der Royal Society, schwenkte Newton schließlich auch für Kometen auf eine von einer Zentralkraft bestimmte Orbitalbewegung um. Im November 1684 erhielt Halley schließlich ein Manuskript Newtons, das die Bewegung des großen Kometen von 1680–1681 als Grenzfall einer parabelförmigen Bewegungslinie im Kraftfeld der Sonne beschrieb. Halley erkannte die Qualität und drängte Newton zu einer ausführlicheren Ausarbeitung des Inhalts und der Herausgabe unter der Schirmherrschaft der Royal Society. Zweieinhalb Jahre später erschien schließlich «*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*» (umgangssprachlich bekannt als «die Principia»). Dieses Buch, das Meisterwerk Newtons, erwies sich als tragende Säule der modernen Naturwissenschaft. Halley, dem Schriftführer bei der Royal Society, oblag nicht nur das Lektorat von Newtons Texten, sondern auch das Begleichen der Druckkosten, schlussendlich aus seinem eigenen Vermögen.

Die Kometentheorie, die mit den Lemmata 4–11 und dem Theorem 20 das Buch III der «Principia» abschließt, ist selbst nach Aussagen Newtons der komplizierteste und aufwendigste Teil seines Werkes. Für Newton war der erfolgreiche Einbezug der Kometen in seine für alle materiellen Objekte der Welt zu geltende naturphilosophische Theorie wichtig, sodass er keinen Aufwand scheute, die Bahn des auch von ihm beobachteten hellen Kometen von 1680–1681 erfolgreich und überzeugend zu berechnen.

Die Lage einer Kometenbahn im Raum ist durch sechs Parameter eindeutig beschreibbar. Daher stellte sich Newton die Aufgabe (Problem 21 in Buch III der «Principia»), mittels drei Beobachtungen (mit jeweils zwei Koordinaten) die Bahn eines sich im Zentralfeld der Sonne bewegenden Kometen zu bestimmen. Da Newton von periodischen Kometen noch nichts wusste, setzte er für die komplexe Aufgabe erheblich vereinfachend voraus, dass sich der Komet auf einer Parabelbahn bewege. Mit einer grafischen Methode, im Rahmen derer er auch das noch heute gebräuchliche, nun nach ihm benannte Interpolationsverfahren einführte, bestimmte er schlussendlich die Bahnelemente für den oben erwähnten Kometen. Wie er genau vorging, ist nicht bekannt. Aus Newtons Mitteilungen geht lediglich hervor, dass bei seiner Konstruktionszeichnung der Erdbahnradius etwa 41 Zentimeter maß. Aus seinen schrittweisen erzeugten grafischen Näherungen auf der Zeichnung ergaben sich Resultate, die – ver-

glichen mit mittels moderner Methoden nachgerechneten – eine Ablesegenauigkeit von besser als etwa 0.05 Millimeter bedingt hätte. Schon Kriloff¹² ging 1925 davon aus, dass Newton – ohne es explizit zu erwähnen – für solch hohe Genauigkeit entweder den inneren Teil des Sonnensystems mit erheblich größerem Maßstab geometrisch konstruierte oder dann gleich zu numerischen Hilfsrechnungen übergang, ohne dies aber in der Niederschrift zu erwähnen.

Letzteres war denn auch das, worauf Halley, den die Bahn des Kometen von 1682 interessierte und weswegen er sich ursprünglich an Newton wandte, zurückgriff. Dank seiner redaktionellen Tätigkeit bei der «Principia»-Herausgabe war Halley mit Newtons Überlegungen und Rechenmethoden vertraut. Nach der erfolgreichen Bahnbestimmung des Kometen seines Ursprungsprojektes wandte Halley schließlich die leicht modifizierte Newton-Methode auf 23 weitere, historische Kometen an, für die er mindestens drei verwertbare Beobachtungen finden konnte. In der Veröffentlichung der Resultate im Jahre 1705 in den «Philosophical Transactions of the Royal Society of London» werden die schon erwähnten frühen verwertbaren Beobachtungen von Regiomontanus nur noch von Nicephorus Gregoras in Konstantinopel geschlagen, der für den hellen Kometen von 1337 der Nachwelt nutzbringende Daten hinterließ. Alle Positionsangaben wurden wieder unter der Annahme von Parabelbahnen analysiert und die zugehörigen Bahnelemente gerechnet. Halley fiel auf, dass in seiner Tabelle drei Kometen (einer davon war der von Halley im Jahr 1682 beobachtete) jeweils sehr ähnliche Bahneigenschaften zeigten, sodass er diese als Wiedererscheinungen desselben Himmelskörpers mit einer ungefähren Periode von 76 Jahren interpretierte. Mutig wie er war, sagte er denn auch gleich voraus, dass dieser Komet im Frühling 1756 wiederkehren werde – was er dann auch wirklich tat, und seither mit etwa gleicher Periode auch immer wieder tut. Dieser erste als periodisch erkannte Komet trägt heute die offizielle Bezeichnung 1P/Halley; sein nächster Besuch des inneren Sonnensystems wird für 2061 erwartet.

Nachdem die Kometen erkenntnistheoretisch bei den materiellen Körpern des Sonnensystems angekommen waren, also angesiedelt bei den Himmelskörpern, die sich nach den gleichen Gesetzen wie die Planeten und Monde in einem Zentralkraftfeld bewegen, brach der Kometenaberglaube regelrecht zusammen. Nicht dass sich die Menschheit danach aber geläutert hätte. Die weggefallenen, hauptsächlich schreckverbreitenden Omina wurden einfach durch andere Ängste ersetzt, etwa durch solche vor Naturgefahren wie Zusammenstößen von Kometen mit der Erde oder der Angst vor todbringenden Gasen der Kometenschweife bei einem nahen Vorbeigang an der Erde. Somit entwickelte sich die effiziente und genaue Berechnung von Kometenbahnen zu einer legitimen und scheinbar sogar nützlichen Aufgabe für die menschliche Gesellschaft.

Die Frühphase der Bestimmung von Kometenbahnen ist, wie vorgängig gesehen, eng mit den Namen Newton und Halley verbunden; später dann griffen selbst große Mathematiker wie Euler, Lagrange oder Gauss ins Geschehen ein, um mit immer komplexeren Methoden und weniger restriktiven Annahmen an die Beobachtungszeitpunkte entlang der Kometenbahn zunehmend genauere Bewegungselemente und zuverlässigere Prognosen für das Wiedererscheinen periodischer Kometen beziehungsweise irgendwelcher sich im Sonnensystem bewegend Körper zu berechnen.

Rudolf Wolf, der erste Astronomieprofessor am Polytechnikum Zürich, kommentierte 1872 in seinem enzyklopädischen «Handbuch der Astronomie»¹³ Halleys doch gewagte Konsequenz aus seiner Tabelle in der Publikation von 1705 mit «[...] unbekümmert um das Achselzucken seiner meisten Zeitgenossen, die Wiederkehr des Kometen auf Ende 1758 oder Anfang 1759 voraussanzukündigen.». Schon zu Beginn erkannte Halley, dass die Umlaufzeit des proklamierten periodischen Kometen nicht exakt war und über die Beobachtungsungenauigkeit hinaus variierte. Er vermutete schon damals den gravitativen Einfluss der massereichen Planeten Jupiter und Saturn als Ursache für die Schwankung der Periodenlänge. Die mathematische Behandlung eines damit verbundenen Mehrkörperproblems lag am Anfang des 18. Jahrhunderts jedoch noch außerhalb des machbaren. Fünfzig Jahre später sah die Situation jedoch anders aus: Astronomen in Paris nahmen sich der genauen Vorhersagen für die erwartete erste posthalleysche (Edmond Halley starb 1742 in Greenwich) Wiederkehr des nach ihm benannten Kometen an. Es war eine Parforceleistung und das erste große Himmelsmechanik-Projekt in der Geschichte der Astronomie.

Unter Anwendung arithmetisch aufwendiger Störtheorie zur Behandlung des Einflusses von Jupiter und Saturn auf den Halleyschen Kometen wurde von Clairaut, Lalande und Lepaute in Paris die Vorhersage von Edmond Halley überprüft. Nicole-Reine Lepaute (1723–1788) war in ihrer Zeit eine bekannte und angesehene französische, heute würde man sagen angewandte Mathematikerin. Sie lieferte Beiträge zur astronomischen Ephemeridenrechnung, berechnete aber auch komplizierte Uhrwerke, für deren Bau wiederum ihr Ehemann berühmt war. Die Bahnberechnungen für die Wiederkehr des Halleyschen Kometen wurden 1757 gestartet und zogen sich über mehr als ein Jahr hin. Das Vorgehen bedingte die Berechnung von Position und Geschwindigkeit des Kometen im Abstand weniger Tage über dessen Orbit hinweg. Dazu mussten jeweils auch die Abstände der störenden Planeten mit gleicher Zeitauflösung mitgerechnet werden. Zu Beginn des Projektes «Halley 1759» nahm Lalande fälschlicherweise an, den Störeinfluss von Jupiter und Saturn nur mitrechnen zu müssen, wenn sich der Komet in deren Nähe befand, dies stellte sich aber als falsch heraus. Die Störeinflüsse waren über den ganzen Halley-Orbit mit-

einzu beziehen. Um zu überprüfen, ob der neue Ansatz gut genug war, wurden schließlich zwei Orbits des Halleyschen Kometen gerechnet und die schon vergangenen sonnennahen Phasen mit alten Beobachtungen verglichen und letztlich als befriedigend akzeptiert. Insgesamt wurden rechnerisch 150 Jahre abgedeckt; dabei wurden schlussendlich über 700 Kometenpositionen und -geschwindigkeiten wie auch die dabei wirkenden Störkräfte ausgerechnet. Lalande versicherte, dass die Arbeit dermaßen aufwendig und anstrengend war, dass sie ohne die maßgebliche Unterstützung durch die Autodidaktin Lepaute nicht erfolgreich hätte abgeschlossen werden können. Lalande selbst hatte sich immer noch so in die Rechenarbeit hineinzuhängen, dass er darob ernsthaft erkrankte.

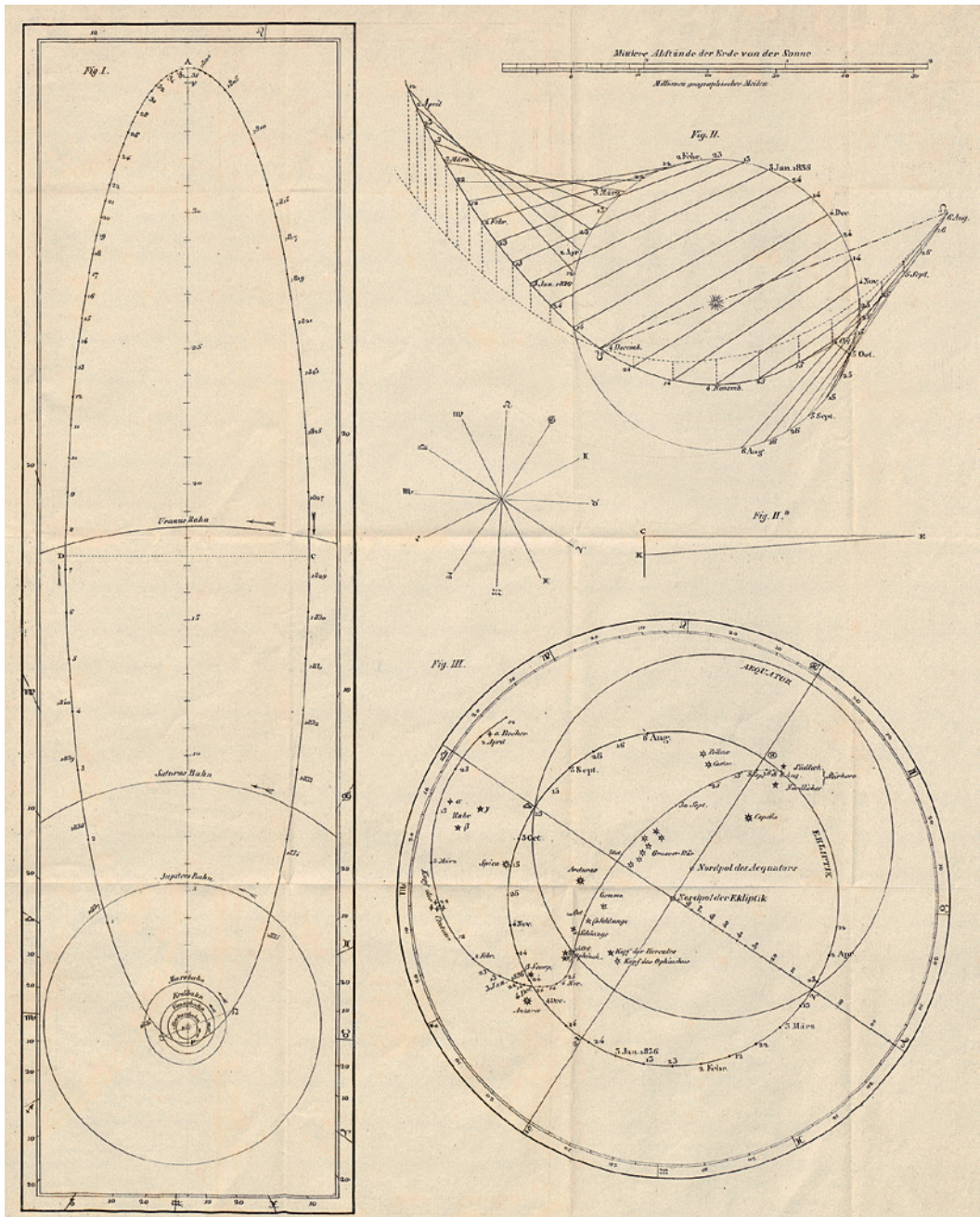
Die Präsentation der Resultate erfolgte am 14. November 1758 in einer Versammlung der Pariser Akademie. Aus den Rechnungen ergab sich ein zu erwartender Periheldurchgang am 13. April 1759 $\pm$ 1 Monat. Durch die Positionsberechnungen konnte das erwartete Auftauchen am Sternenhimmel vorhergesagt werden, sodass das Suchgebiet für den auf das Thema angesetzten beobachtenden Astronomen stark eingeschränkt werden konnte. Schlechtes Wetter behinderte jedoch Messier, den Beobachter am Observatorium in Paris, gegen Ende 1758 bei seinen Versuchen, den Kometen aufzuspüren. Schließlich dann doch: Am 21. Januar 1759 entdeckte Messier den vorhergesagten Kometen 50 Tage vor dem vorhergesagten Periheldurchgang (erheblich früher als die erwartete erste Sichtbarkeit 25 bis 35 Tage vor Perihel, wie dies Delisle, der Vorgesetzte von Messier, prognostizierte). Vorerst verbot wohl aus politischen Gründen Delisle Messier, seine Entdeckung bekannt zu geben, sodass letzterer den Kometen während 13 Nächten sozusagen im Geheimen weiter beobachtete, bis dieser nach dem 14. Februar in der Abenddämmerung verschwand und erst wieder um den 1. April – dann schon mit bloßem Auge sichtbar – in der Morgendämmerung erneut erschien. An jenem 1. April erhielt Delisle offenbar einen Brief aus Heidelberg, datiert am 20. Februar, worin ihm mitgeteilt wurde, dass am vergangenen Weihnachtstag in Sachsen ein Komet entdeckt worden sei. Nun musste alles schnell gehen: Endlich durfte Messier mit Delisle nach Versailles reisen, um dem König die französische astronomische Entdeckung persönlich mitzuteilen. Am 7. April erfolgte die offizielle Mitteilung der Wiederentdeckung des Halleyschen Kometen in einer außerordentlichen Zusammenkunft der Pariser Akademie. Der Brief aus Heidelberg bezog sich auf einen deutschen Amateurastronomen, der den Kometen schon etwa einen Monat vor Messier aufgespürt hatte. Völlig unbeeinflusst von (forschungs)politischem Geplänkel entdeckte bei Dresden der Bauer und Autodidakt Johann Georg Palitzsch (damals in der Gegend auch als «Bauernprofessor und Sterngücker» bekannt), explizit danach suchend, den Kometen am Weihnachtstag 1758, dies auch ohne himmelsmechanisch vorgeplügte Himmelskarten. Aus seinen Be-

obachtungen bestimmte er dann auch gleich noch die zu erwartende Periheldurchgangszeit: der 12. März 1759.

Aus der Zusammenführung aller Beobachtungen des Halleyschen Kometen vor und nach der Sonnenannäherung ergab sich schließlich *post festum* der 13. März 1759 als Perihel epoche. Neidlos ein großer Erfolg für die Himmelsmechanik. Getrost konnte danach die nächste Halley-Wiederkehr im Jahr 1835 rechnerisch vorbereitet werden. Was folgte, war eine stetige Verfeinerung der Berechnungsmethoden, die Einbeziehung weiterer Störkräfte und die genauere Bestimmung der in die Modellierung der Bahnen eingehenden störenden Planetenmassen.

Vor der zweiten Wiederkehr nach Halleys epochaler Einsicht zum Wesen des von ihm beobachteten Kometen veröffentlichte Möbius¹⁴ ein kleines allgemeinverständliches Bändchen mit Erläuterungen zur Kometenbewegung, speziell für die Zeit, während der sich der Komet im inneren Sonnensystem aufhalten sollte. Die in Abbildung 9 eingezeichneten Daten basieren auf 1832 von Demoiseau veröffentlichten Resultaten von am Pariser Observatorium ausgeführten Rechnungen. Die linke Figur (I) in Abbildung 9 zeigt die Situation des Sonnensystems mit den vollständigen Bahnen, bis Jupiter und zumindest Ausschnitten davon für die beiden noch weiter entfernt liegenden, damals bekannten Gasplaneten. Der Blick fällt dabei senkrecht auf die Ekliptik. Die Bahn des Kometen Halley ist die einer langgezogenen Ellipse. Darauf vermerkt sind im Jahresabstand Positionen über einen Sonnenumlauf hinweg. An den Daten erkennt man, dass die Kometenbahn rückläufig ist: Der Komet umrundet die Sonne im Uhrzeigersinn, die Planeten dagegen in Gegenrichtung; die Bahnebene des Kometen ist dabei um 18 Grad gegen die Ekliptik geneigt. Die Schnittlinie der Kometenbahn mit der Ekliptik ist mit der gestrichelten Linie, i S g verbindend, angedeutet und gibt damit Auskunft über die gegenseitige Lage der beiden zugehörigen Ebenen. Aus dem Möbius'schen Begleittext geht hervor, dass die Ellipse der Kometenbahn nicht wirklich die Projektion auf die Ekliptik ist, sondern die um die Knotenlinie auf die Ekliptik gedrehte wahre Ellipse, sodass das Verhältnis der großen und der kleinen Halbachse dem in der Natur vorherrschenden entspricht.

Figur II in Abbildung 9 soll die räumliche Situation bei der Bewegung des Kometen durch das innere Sonnensystem illustrieren. Wieder liegt die Ekliptik in der Papierebene. Die Erdbahn ist als Kreis dargestellt, entlang derer wurden die Positionen der Erde für die Zeit der erwarteten Sichtbarkeit des Kometen vermerkt. Dieselben Daten sind ebenfalls auf einer die Kometenbahn beschreibende durchgezogenen Kurve markiert und mit den entsprechenden Kalenderdaten auf der Erdbahn verbunden. Diese resultierende gekrümmte Kurve ergibt somit die Projektion der Kometenbahn auf die Ekliptik. Die davon abgehenden gestrichelten vertikalen Linien beschreiben Parallelprojektionen der Höhen des Kometen unter beziehungsweise über der Ekliptik.



9 Drei unterschiedliche Darstellungen der Bewegung des Kometen Halley auf seiner Bahn und am Himmel, berechnet für die Rückkehr in das innere Sonnensystem im Jahre 1835

Die Figur III in Abbildung 9 zeigt schließlich die stereoskopische Projektion der Kometenbahn an den Nachthimmel, also eine Himmelskarte – auf der zur Orientierung nur die hellsten Sterne eingezeichnet wurden – mit dem

scheinbaren Weg des Kometen Halley zwischen August 1835 und Anfang April 1836. Zur weiteren Orientierung ist die Lage der Ekliptik vermerkt. Das Zentrum der Karte zeigt, wie damals häufig, zum Ekliptikpol; gegen diesen nach links oben versetzt findet sich der projizierte Nordpol der Erdrotation und die zugehörige Äquatorlinie.

Moderne grafische Darstellungen zu Kometenerscheinungen enthalten die gleichen Informationen wie die für Abbildung 9 in Kupfer gestochenen. Der grafische Stil hat sich etwas verändert, alles ist heute computergeneriert und meistens auch noch farblich etwas herausgeputzt.

Die Methoden der Himmelsmechanik der Kometen im Speziellen und der Dynamik im Sonnensystem im Allgemeinen sind unterdessen so weit perfektioniert, dass Ephemeriden – die Raum-Zeit-Koordinaten – von Himmelskörpern im Sonnensystem so genau berechenbar sind, dass Kometenkerne, die eine Ausdehnung in einer Größenordnung von zehn Kilometern haben, von interplanetaren Raumsonden nach einigen Milliarden Reisekilometern nach Jahren zielsicher aufgefunden werden, sodass sie auf einen Orbit um den Kometenkern eingebremst werden können, um schließlich auch noch kleine Landemodule für In-situ-Untersuchungen auf dem Kometenkern abzusetzen: so großteils erfolgreich geschehen etwa bei der 2016 nach zwölf Jahren abgeschlossenen ESA-Mission Rosetta/Philae zum Kometen Tschurjumow-Gerassimenko.

Tycho Brahes Sternkatalog und der astronomische Sextant

Um astronomische Beobachtungen gut und zuverlässig dokumentieren zu können, sind – wie schon im vorhergehenden Thema klar wurde – zuverlässige Sternkarten unverzichtbar. Die Erstellung solcher Datenkataloge ist aber aufwendig, langwierig und wenig spektakulär, dennoch technologisch und konzeptionell sehr interessant. Bis in die frühe Neuzeit, über grob 1500 Jahre hinweg, diente der Katalog von Claudius Ptolemäus, umgangssprachlich «der Almagest», als Datengrundlage. Schon aufgrund der Präzession der Erdatmosphäre müssen die Koordinaten der Sterne immer wieder nachkorrigiert werden. Auch der berühmte adelige dänische Astronom Tycho Brahe erkannte unter anderem bei seinen Beobachtungen des «neuen Sterns» von 1572 im Sternbild Cassiopeia und bei späteren hellen Kometen, dass die systemische Genauigkeit der alten Daten im Almagest seinen Ansprüchen nicht mehr genügten und dass etwas dagegen zu unternehmen sei. Auch für ihn war die Zeit reif, systematisch den Himmel genauer zu vermessen, um endlich einen genaueren Sternkatalog zu erstellen.

Nach Wanderjahren in denen Brahe vielerorts in Europa sowohl technisches Know-how als auch wissenschaftliche Anregung sammelte, eröffnete ihm

dank einflussreicher Fürsprache des Landgrafen in Kassel der dänische König Friedrich II. die Möglichkeit, auf einer eigenen Insel, sogar frei von finanziellen Sorgen, seine eigene Forschungsstation zu erbauen. Das erste und zentrale Gebäude war Uraniborg, erbaut zwischen 1576 und 1580. Das 1598 erschienene Werk «*Astronomiæ Instauratæ Mechanica*» (nachfolgend als «*Mechanica*» bezeichnet)¹⁵ beschreibt die Arbeitsumgebung auf der Insel Hven und speziell den dortigen Gerätepark.

Das wohl populärste Bild in der «*Mechanica*», selbst heute noch gern als Sujet für Reproduktionen benutzt, ist die Illustration des großen Mauerquadranten in der Uraniborg (Abb. 10). Obwohl es künstlerisch wie inhaltlich ein eher sonderbares Bild ist, lässt sich einiges über Brahe und sein astronomisches Unternehmen ablesen. Der Kupferstich ist in drei Ebenen unterteilbar. Mittig steht der große aus Messing gefertigte Mauerquadrant, ein Viertelkreis mit Gradunterteilung und Messvorrichtungen, ausgerichtet im Meridian von Uraniborg. Der Vordergrund zeigt die für Messungen notwendigen drei Mitarbeiter. Um die Wand, an der der Messingquadrant montiert war, nicht ungenutzt zu lassen, ließ Brahe dort eine ihn huldigende Wandmalerei anbringen, die nicht nur ihn, sondern auch den wissenschaftlichen Haushalt in Uraniborg verewigte.

Künstlerisch wenig ansprechend ist der Kupferstich aufgrund der nicht überzeugenden Größenverhältnisse von Gerätschaft und Beobachtern wie auch der Zentralperspektiven mit mehreren stark unterschiedlichen Fluchtpunkten in der Höhe.

Die Bestandteile der Illustration, inklusive der Schmuckelemente, sind mit Zahlen oder Buchstaben versehen, sodass man unweigerlich an moderne Betriebsanleitungen technischer Geräte erinnert wird. In den Bildbeschreibungen der «*Mechanica*» wurden all diese mit Buchstaben versehenen Elemente ausführlich motiviert und beschrieben, gerne auch wiederholt mit dem Verweis darauf, dass für deren Herstellung weder Kosten noch Aufwand gescheut wurden.

Der Mauerquadrant geht mit seiner bildergeschichtsartigen Wandmalerei weit über die rationalen Bedürfnisse eines wissenschaftlichen Messgerätes hinaus und hat schon dadurch den Hauch eines Saloninstrumentes. Das ist nicht so abwegig, wenn man bedenkt, dass in Uraniborg offenbar auch Gästezimmer für noble Besuche geführt wurden, dies wohl als Entgegenkommen Brahes an den Hofstaat, von dem ungefähr ein Prozent der Einkünfte über zwanzig Jahre hinweg nach Uraniborg geflossen sein sollen. Nach der Bildbeschreibung in «*Mechanica*» wurde der Hintergrund des Wandgemäldes von drei verschiedenen Künstlern ausgeführt. Im Fresko wurden die Räumlichkeiten der Sternwarte vom Architekten Hans van Steenwinckel illustriert. Die dahinterliegende Landschaft mit dem etwas gar gebirgigen Sonnenaufgang oder -untergang für eine Insel im Öresund stammte von Hans Knieper. Alle künst-

lerischen Beiträge wurden vom Auftraggeber aufs Höchste gelobt, speziell hervorgehoben wurde das anscheinend ausnehmend gut geglückte Porträt, gemalt von Tobias Gemperlin, mit dem das Fresko dominierenden Sternwartendirektor, der sich auf dem Bild offenbar gemüßigt fühlt, seine Mitarbeiter darauf hinzuweisen, wo die Gestirne zu beobachten sind. So könnte es zumindest gewirkt haben, hatte man unter dieser Wandmalerei zu arbeiten.

Einen interessanten Einblick in das Leben bietet im Fresko der gemalte Querschnitt durch das Uraniborg-Gebäude. Der dreistöckige Bau zeigt die Unterteilung der verschiedenen Aktivitäten im Hause Brahe. Zuoberst, auf den Dachterrassen, sind Instrumente zur Himmelsbeobachtung aufgestellt. Durch den Rundbogen oben links sind bei den jeweiligen Zahlen ein Himmelsquadrant, möglicherweise der bekannte «große Quadrant» von Uraniborg (1) und eine Äquatorial-Armillarsphäre (2) abgebildet. Für die maximalen Abmessungen von 1.5 bzw. 1.2 Metern der beiden Instrumente erscheint jedoch die beigeigte Person erheblich zu klein. Der Rundbogen oben rechts gibt den Blick frei auf ein parallaktisches Lineal zur Distanzmessung in Zenitnähe (3) und einen großen astronomischen Sextanten (4), dem weiter unten noch mehr Aufmerksamkeit geschenkt wird. Das Erdgeschoss des Hauptgebäudes, die mittlere Zeile also, zeigt hinter den Rundbögen links und rechts an Tischen mehrere Menschen mit Blättern/Büchern arbeiten. Nach Brahes eigenen Angaben beschäftigte er über fast zwanzig Jahre hinweg zu jeder Zeit zwischen einem halben bis einem Dutzend immer wieder wechselnder Mitarbeiter aus ganz Europa. Somit diente Uraniborg auch als wichtige Ausbildungsstätte und Netzwerkzentrum für eine Generation von Astronomen auf dem Kontinent. Das umfangreiche Beobachtungsprogramm Brahes verlangte sowohl ausgeklügelte Vorbereitung der Beobachtungen bei Nacht wie auch deren aufwendige Nachbearbeitung und Katalogisierung, sodass Mehrfachbeobachtungen gleicher Himmelsobjekte mit unterschiedlichen Geräten korrekt verbucht und sicher in die Fehleranalysen eingebunden werden konnten. Wie dieses Prozedere im Detail funktionierte, wurde der Nachwelt leider nicht überliefert. Heute wären solche Aufgaben prädestiniert für Datenbanken und Tabellenkalkulationen. In der alten analogen Welt mag deshalb der hinter der zentralen Säule halbverdeckte, große Himmelsglobus eine wichtige Rolle gespielt haben. Wahrscheinlich handelt es sich bei dem Gezeigten um den großen Messingglobus mit einem Durchmesser von knapp 1.5 Metern. Auf diese große Kugeloberfläche wurden nach und nach schon sicher vermessene Sterne ziseliert. Der so entstehende Himmelsglobus lieferte damit effiziente Einsicht in noch nicht oder schlecht vermessene Himmelsgebiete wie auch gleich Angaben zu deren Sichtbarkeit und damit Randbedingungen bezüglich ihrer Beobachtbarkeit.

Das Kellergeschoss hinter Hund und Bein des zum Beobachtungsspalt weisenden Meisters gibt den Blick frei auf ein nicht-astronomisches Interesse Brahes,

► 10 Die wohl populärste Illustration aus dem Werk «Mechanica», die nebst der Darstellung des grossen Mauerquadranten auch Einblicke in die Organisation von Uraniborg gibt

QVADRANS MVRALIS SIVE TICHONICUS.



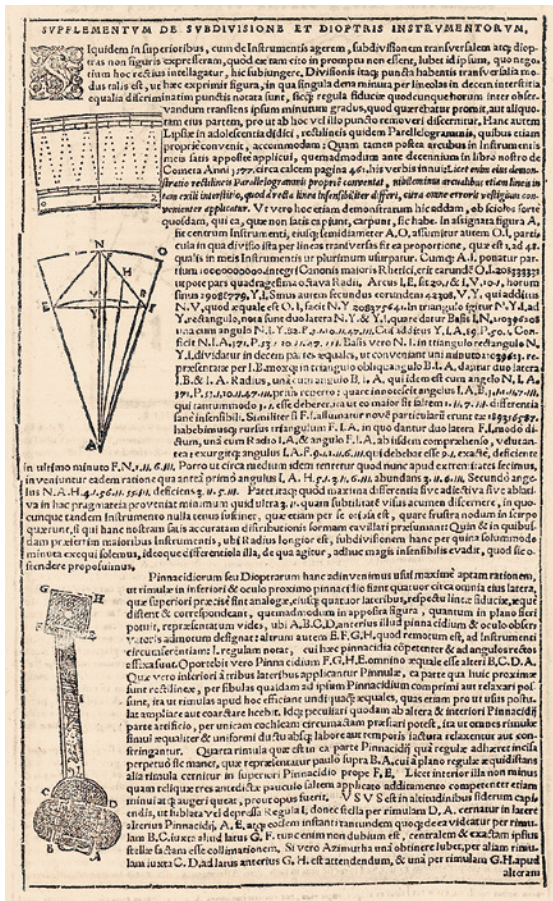
EXPLI-

nämlich die Alchemie; grafisch repräsentiert durch auf Öfen platzierte Destillieranlagen. Wie schon andernorts moniert, sind auch im Keller die Größenverhältnisse wohl cum grano salis zu lesen. In pythagoräischer Tradition entwickelte Brahe schon in jungen Jahren medizinisch-chemisches Interesse an Metallen als Heilmittel, wobei die Eigenschaften der Metalle in astro-alchemischer Vorstellung den Planeten zugeordnet wurden. Brahe fühlte sich stets nicht nur zur Welt der *Urania* (der himmlischen Astronomie), sondern auch zur *Chymia* (der terrestrischen Astronomie) hingezogen.

Der Hund, dessen Weisheit und Treue in der «Mechanica» unter Punkt 12 gar wohlwollend hervorgehoben wurde, muss Brahe so sehr ans Herz gewachsen sein, dass zumindest im Kupferstich dem Tier sogar menschliche Gesichtszüge attestiert wurden. Dem streitbaren Exzentriker Brahe wäre andererseits auch zuzutrauen, dass der devot dem Herrn zu Füßen liegende, etwas träge erscheinende Hund einen in Ungnade gefallenen Zeitgenossen karikiert. Ob das originale Wandbild denn auch wirklich Vergleichbares darstellte, ist unbekannt. Uraniborg überlebte nach dem Wegzug Brahes im Jahre 1597 nicht lange. Lediglich von der benachbarten, 1586 erbauten Beobachtungsstation Stjerneborg wurden Mitte des 20. Jahrhunderts zumindest wieder Grundmauern freigelegt.

Die Lage des Mauerquadranten mit seinem 90-Grad-Messkreis und die Position des dank Brahes Fingerzeig nicht zu verfehlenden Beobachtungsschlitzes in der Wand implizieren, dass wir als Betrachter des Bildes von Osten gegen Westen auf das Treiben in der Sternwarte schauen. Ein fest installierter Quadrant macht nur für die Messung von Kulminationsdurchgängen durch den lokalen Meridian Sinn; das heißt für die Feststellung der Passage von Himmelskörpern durch die örtliche Nord-Süd-Linie. Solche Beobachtungen liefern zwei Messgrößen: die Kulminationshöhe des Himmelsobjektes über dem Horizont, abzulesen von der Winkelangabe auf dem Quadranten wie durch den Beobachter (F) hinter der Uhr angedeutet. Wenn dieser Höhenmesser den Moment seiner Ablesung ansagt, kann der Assistent bei der Uhr (H) die zugehörige Zeit ablesen. Die von einem dritten Nachtassistenten (am Tisch G) in einen Messrodel eingetragenen Höhen und Zeiten genügen dann im Prinzip, um Gestirnen in eindeutiger Weise Koordinaten am Himmel zuzuweisen.

Der Ring des Mauerquadranten mit einem Radius von 194 Zentimetern war aus Messing gegossen und aufpoliert. Selbst verglichen mit dem übergroßen Brahe auf dem Wandbild, und mehr noch mit den am Gerät arbeitenden Astronomen, ist im Kupferstich das Ausmaß des Mauerquadranten übertrieben. Die radiale Ausdehnung des Kreisbogens von etwa 12 Zentimetern erlaubte die Gravur einer sehr feinen Winkelmessung. In der «Mechanica» schreibt Brahe, dass die radialen Markierungen einzelner Bogenminuten noch mittels Transversalskala (siehe Abb. 11) in sechs Teile unterteilt werden konnten. Mit gewissem Stolz wurde gar vermeldet, dass Positionen auf fünf Bogensekunden



11 Messtechnik bei Brahe, wie in der «Mechanica» dargelegt: oben das Konzept der Transversalen mit der geometrischen Konstruktion in einem «Beweis» der Gültigkeit des Verfahrens. Unten eine Alhidade, wie an kleineren winkelmessenden Instrumenten mit Diopteraufbau verwendet

löchern, wie sie an den Alhidaden (den Messlinealen) von Astrolaben verwendet wurden, zu unpraktisch und schlussendlich zu ungenau waren, um Gestirne am Himmel effizient aufzufinden und mit seinen Genauigkeitsanforderungen zu vermessen. Wurden im Gegenzug die Löcher größer gebohrt, handelte man sich beim Einmitten wieder zu große Messfehler ein.

In der Folge entwickelte Brahe sein eigenes Visiersystem, wie es in Abbildung 11 unten links, an einer Alhidade montiert, erklärt wird. Es handelt sich um eine Form von Kimme-Korn-System. Die Platte mit Schlitz bei ABCD liegt am Auge des Beobachters. Am anderen Ende der Alhidade ist eine quadratische Platte mit Schlitz bei EFGH mit den gleichen Abmessungen wie die der Kimmeplatte. Ein Himmelsobjekt galt als eingemittet, wenn es links und rechts (bzw. oben und unten) gleichzeitig verschwand, wenn das gleiche Auge des Beobachters zwischen den Spalten der Kimme hin und her sprang. Wurde die Messapparatur auch für die Sonnenbeobachtung eingesetzt, musste das unmögliche direkte Anvisieren des Tagesgestirns umgangen werden. Durch eine Lochblende in der Mitte der Kornplatte (sichtbar als Loch in der Mitte der

hätten geschätzt werden können. In der Abbildung 10 ist das Konzept der Transversalunterteilung illustrationslimitiert jedoch lediglich auf dem Niveau von ganzen Graden eingeflossen. In diesem Fall wäre gemäß Zeichnung die Ablesung eines Winkels auf zehn Bogenminuten genau möglich gewesen. Brahes Ambitionen lagen jedoch auf der zuverlässigen Messung einer Bogenminute oder gar besser. Dazu muss man sich vor Augen halten, dass seit Ptolemäus und bis Kopernikus die Genauigkeit von Positionsmessungen von der Größenordnung eines Vollmonddurchmessers lag, der ungefähr 30 Bogenminuten entspricht.

Die Höhe eines Himmelsobjekts über Horizont wurde mithilfe eines auf dem Kreisring laufenden Schlittens gemessen. Auf diesem Schlitten montiert war die mit Spalten versehene Visiervorrichtung (Pinnacidium). Soll mit einer Genauigkeit von Bogenminuten gemessen werden, muss das anvisierte Ziel frei von Messparallaxen sein. Schon früh in seiner astronomischen Karriere realisierte Brahe, dass ein Messverfahren mittels Visier-

Platte EFGH in der unteren Illustration von Abbildung 11) wurde das Sonnenbild auf die Rückseite der Kimmplatte projiziert. Bei korrekter Ausrichtung des Gerätes auf die Sonne sollte dann ein Kreis auf der Rückseite von ABCD gleichmäßig ausgeleuchtet sein. Dass damit die Sonnenposition auf Bogenminuten genau gemessen werden konnte, ist dennoch a priori schwer vorstellbar.

In der «Mechanica» weist Brahe darauf hin, dass bei gewissen Instrumenten, so auch beim Mauerquadranten, die Kornplatte durch einen Zylinder ersetzt wurde. Der Abstand des Spaltes AD von BC in der Kimmplatte musste dabei dem Durchmesser des Zylinders entsprechen. Beim Mauerquadranten war der Zylinder im Beobachtungsschlitz in der ostwestlichen verlaufenden Wand so montiert, dass die Zylinderachse horizontal verlief und die Position dieser Achse das Kreiszentrum des Messingquadranten bildete. In Abbildung 10 ist die Lage des Kornzylinders leider nicht ersichtlich. Der Beschreibungstext der Figur in der «Mechanica» besagt lediglich, dass der Zylinder im Spalt beim (schwer lesbaren) Buchstaben A montiert gewesen sei. Den Zylinder durch das Pinnacidium (bei E) in der Nacht anzuvisieren, kann nicht einfach gewesen sein. Bei der ersten Lektüre der «Mechanica» wirkt der Verweis, dass der Zylinder mit Gold verkleidet gewesen sei, erst einmal etwas protzig, da ja Brahe gerne und oft darauf hinwies, wie viel Geld und Aufwand seinerseits in der Infrastruktur steckte. In diesem speziellen Fall hingegen scheint die Vergoldung operativ sinnvoll gewesen zu sein. Ständig feuchter Luft ausgesetztes Messing oxidiert schnell und stumpft ab. Gold hingegen widersteht solchen äußeren Einflüssen besser. Unter schwacher indirekter Beleuchtung reflektieren zudem goldene Oberflächen dezent und stören so die Adaption der Augen der Beobachter an die Dunkelheit kaum. Gemäß Abbildung 10 führt am scheinbar dreibeinigen Tisch links unten ein scheinbar einbeiniger Nachtassistent das Beobachtungsprotokoll; seine Kerzenbeleuchtung wie auch die des Uhrenablesers (bei H, K) mögen ausgereicht haben, den vergoldeten Visierzylinder im Mauerspalt für den Beobachter am Diopter zielsicher anpeilbar gemacht zu haben.

Brahes Bildbeschreibung des Mauerquadranten führt aus, dass der den Himmel zugänglich machenden Beobachtungsspalt in der Ostwestwand *quadratisch* war. Dieser Vorgabe kam der Kupferstecher offensichtlich nicht nach, denn in der Projektion müsste der Beobachtungsspalt in Zeichnungen praktisch ausnahmslos höher als breit erscheinen. Über die Abmessungen des Spaltes selbst ist nichts bekannt und Architekturzeichnungen der Uraniborg klären die Situation auch nicht. Aus den noch existierenden Beobachtungsaufzeichnungen geht jedoch hervor, dass am 14. Januar 1585 die Kulminationshöhe des Sterns alpha Geminorum (Castor, der zweithellste Stern im Sternzeichen der Zwillinge) mit dem Mauerquadranten zu knapp 67° Höhe bestimmt wurde. Ohne Details der physischen Abmessung und Platzierung des Kornzylinders in Betracht zu ziehen, lässt sich aus der Kulminationshöhe von Castor abschätzen,

dass das Verhältnis von Höhe des Beobachtungsspalt zur Dicke der Mauer circa 5:2 gewesen sein muss. Architekturzeichnungen von Uraniborg weisen auf Mauerdicken von 90 bis 140 Zentimetern hin. Dies bedingt eine Höhe (und eine Breite) des Beobachtungsspalt von etwa 2.5 Metern. Solche Abmessungen erscheinen denn auch nicht unrealistisch und würden in Fensterfronten eines schlossartigen Gebäudes kaum auffallen. Zudem gestattet ein 2.5 Meter breites Beobachtungsfenster mit über 50° freier Himmelssicht genügend Orientierungshilfe, um die richtigen relevanten Sterne im Vorfeld zu identifizieren und sich auf deren Kulminationsmessung vorzubereiten. Um den Kreis zu schließen, stellen wir einmal mehr fest, dass die Zuverlässigkeit der Illustration in Abbildung 10 bescheiden ist: Die Höhe des Spaltes müsste auf jeden Fall die Körpergröße der Nachtassistenten und sogar den Radius des Quadranten selbst übertreffen.

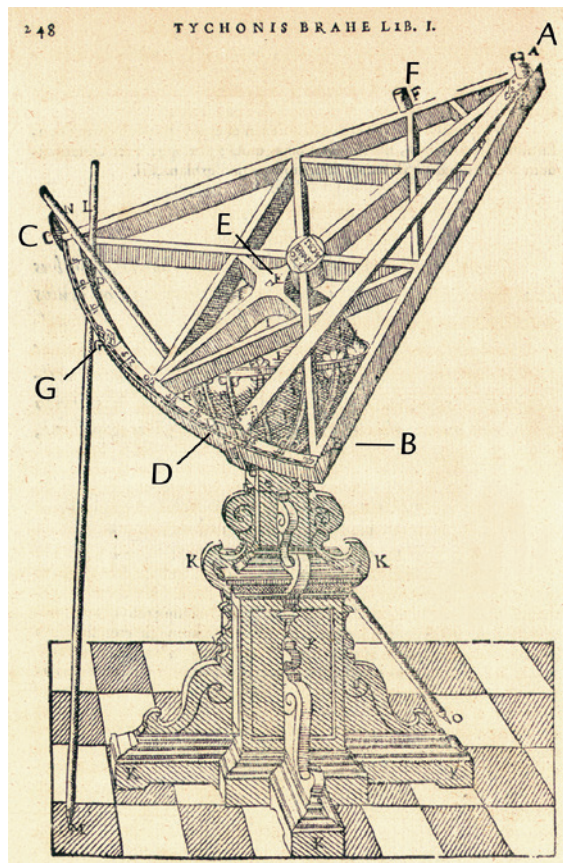
Nachdem nun die Identifizierung und Verfolgung eines Himmelskörpers (Stern, Mond oder Planet) am Quadranten geklärt ist, kommt die Frage auf, was schlussendlich gemessen wurde. Von der Höhe über Horizont im Moment der Kulmination war schon die Rede. Da um die Kulmination herum sich ein Himmelsobjekt jedoch hauptsächlich horizontal bewegt, ist es ohne optische Vergrößerung des Sichtfeldes, allein mit der Konstruktion wie im Mauerquadranten realisiert, schwierig, den genauen Moment der Passage durch die Nord-süddlinie zu bestimmen. Für die zweite, für eine eindeutige Lokalisierung eines Objekts auf einer Kugeloberfläche notwendige Koordinate ist noch eine zusätzliche Messgröße notwendig. Der Vordergrund von Abbildung 10 gibt Aufschluss darüber: Wenn der Beobachter am Diopter die Höhenmessung im Meridian signalisiert, kann die zugehörige Uhrzeit bestimmt werden. Ist die Beobachtungsepoche bekannt, kann im Prinzip der sogenannte Stundenwinkel des Frühlingspunkts, d.h. des Nullpunktes der Rektaszension bestimmt werden, und damit die Länge entlang des Himmelsäquators. Koordinatenwerte in anderen möglicherweise gefälligeren Koordinatensystemen auf der Kugel sind danach eindeutig berechenbar. In Abbildung 10 sind unten rechts in der Tat zwei grosse Uhren abgebildet, je mit drei Zifferblättern. Die Bildbeschreibung in der «Mechanica» streicht heraus, dass die Uhren beim Mauerquadranten in der Lage gewesen seien, selbst Sekunden zu messen. Eine Sekundenmessung war denn auch notwendig, falls auf der Himmelskugel die Koordinaten mit einer Genauigkeit einer Bogenminute zu bestimmen waren. Eine derartige Winkelgenauigkeit bedingt eine Ganggenauigkeit der Uhren von vier Sekunden, und dies mindestens über eine Nacht hinweg (etwa zwischen zwei Kalibrationen mithilfe der Sonne). Um sicherzustellen, dass die Uhren auch wirklich genau liefen, installierte Brahe zwei Uhren, um so immer wieder den gegenseitigen Gangunterschied zu bestimmen. Der Däne war wohl der erste Astronom, der viel Wert auf Fehlerkontrolle bei den Messvorgängen legte und

damit die Arbeitsweise der zukünftigen Astronomie wesentlich beeinflusste. Dies war denn auch einer der Gründe, warum Uraniborg und Stjerneborg einen dermaßen großen Instrumentenpark besaßen. Es war nicht nur der Brahe unterstellte Drang nach Besitztum und Prunk, es war auch sein Ziel, gleiche Messungen am Himmel mit unterschiedlichen Geräten zu wiederholen, um damit systematische, instrumentenbedingte Fehler zu erkennen und zu unterdrücken.

Unglücklicherweise konnten die Uhren auf Hven den an sie gestellten Ansprüchen aber nicht gerecht werden. Mit den meisten Gewichtsuhrer jener Zeit war die Zeitmessung bestenfalls auf einige Minuten genau pro Tag möglich. Damit war klar, dass der prächtige Mauerquadrant lediglich für die Messung der Kulminationshöhe der Gestirne verwendet werden konnte, eine Aufgabe, die zu lösen auch kleinere mobile Geräte in Brahes Instrumentenpark vermochten. Das für reine Messaufgaben in der Nacht sowieso großzügig verzierte Instrument hatte damit gute Voraussetzungen, immerhin noch als Saloninstrument zu dienen. Da es auf Hven im Haupthaus mit seinen Gästezimmern stand, konnte es auch Repräsentationsaufgaben übernehmen, um angereistem dänischen Adel und wichtigen ausländischen Gästen Brahes wenig preiswerte Forschungstätigkeit wie auch seine wissenschaftliche Autorität näherzubringen.

Nachdem sich also der Uhrenansatz für Brahe als hinfällig herausstellte, musste das Vermessungsprojekt auf die altbewährte Methode der Triangulation des Himmels zurückgreifen, dabei werden die Positionen von Gestirnen in Form von Winkeln relativ zueinander vermessen. Brahe und seine Mitarbeiter etablierten hauptsächlich entlang der Ekliptik einen Ring von neun Fundamentalsternen (siehe Abb. 14), deren relative Winkelabstände vielfach und mit möglichst unterschiedlichen Instrumenten auf Hven vermessen wurden. Lediglich am Sommerhimmel, wenn die Ekliptik tief im Süden des Nachthimmels verläuft, musste aufgrund der hohen geografischen Breite der Insel Hven auf Fundamentalsterne nördlich der Ekliptik ausgewichen werden. Somit waren in den kurzen Sommernächten Dänemarks ledig-

12 Illustration des astronomischen Sextanten aus der «Progymnasmata», das vielleicht wichtigste Instrument zur Erstellung des sehr genauen Sternkatalogs von Tycho Brahe. Für den Text relevante Bezeichnungen wurden vergrößert hinzugefügt



lich Primärsterne um den Himmelsäquator oder gar nördlicher davon der Vermessung zugänglich.

Das wichtigste Instrument für effiziente Winkelmessungen in Brahens Ansatz war wahrscheinlich der in Abbildung 12 gezeigte, astronomiegeschichtlich oft nicht speziell hervorgehobene große astronomische Sextant.

Abbildung 12, die sich, zusammen mit dem Begleittext in der «Mechanica», wie eine Gebrauchsanleitung liest, zeigt den großen astronomischen Sextanten mit einer Armlänge (AC und AB) von 155 Zentimetern.¹⁶ Der Kreisbogen BC hat eine Winkelöffnung von 60°; somit bilden ABC ein gleichseitiges Dreieck. Die Konstruktion bestand aus so gefügtem Holz, dass feuchtigkeitsbedingte Formänderungen minimiert wurden. Die Winkelmarkierungen auf dem Kreisbogen waren auf einem Messingblech eingearbeitet. Die verfeinerte Messeinteilung erfolgte mit Transversalen, anhand derer noch Viertelminuten abgelesen werden konnten. Die gitterartige innere Dreiecks konstruktion war mit einem vierkantigen Zapfen in der Mitte (E) der Winkelhalbierenden des Kreissegmentes auf einer frei schwenkbaren mit Kupfer überzogenen Kugel von 52 Zentimetern Durchmesser montiert. Die Kugel selbst lagerte in einer auf einem schweren Holzfuß montierten schalenförmigen Gitterkonstruktion, so dass der mächtige Sextant ohne großen Kraftaufwand frei schwenkbar war.

Die Messung des Winkelabstandes zweier Himmelskörper verlangte zwei Beobachter am Instrument (siehe Abb. 13). Anfänglich wurde der Sextant so ausgerichtet, dass die Ebene gebildet durch ABC in der Verbindungslinie der beiden zu vermessenden Himmelskörper zu liegen kam. Der bei C positionierte Beobachter brachte das in Blickrichtung rechts liegende Objekt am Himmel in die Visierlinie AC. Bei C befand sich, vergleichbar mit dem Mauerquadranten, der Kimmeteil des Diopters mit seinen senkrecht zu ABC verlaufenden Schlitzfenstern, deren Abstand gleich dem Durchmesser des bei A montierten Messingzylinders war. Das Himmelsobjekt wurde in gleicher Weise wie beim Mauerquadranten eingemittet. Die beiden sich bei C kreuzenden Stangen sollten für die Dauer des Messvorgangs die Beibehaltung der Ausrichtung des Sextanten unterstützen. Der zweite, sich bei B befindliche Beobachter versuchte derweil, mit der beweglichen, sich um A drehenden Alhidade DA den in Sichtrichtung links stehenden Himmelskörper gleich wie eben beschrieben anzuvisieren. Waren schließlich beide Beobachter mit der Ausrichtung zufrieden, konnte die Stellung der Alhidade am Kreissegment arretiert und der Winkelabstand entlang BC abgelesen werden.

Zur Messung kleiner Winkelabstände, bei denen in der oben beschriebenen Arbeitsweise die Beobachter sich gegenseitig im Wege gestanden hätten, realisierte Brahe eine scharfsinnige Alternative. Parallel zur Zentrallinie durch AE ließ sich temporär ein Diopter zwischen Zylinder F und Schlitzblende bei G anbringen. Auf diese Weise konnte für kleine Winkelabstände, die aus Sicht

der Beobachter rechts stehende Komponente via FG anvisiert werden, während der Beobachter des am Himmel links stehenden Objekts wie im Falle großer Winkel verfuhr. In diesem Ansatz wird der Winkelabstand lediglich relativ zur Zentrallinie, d.h. relativ zur 30° Marke gemessen.

In der «Mechanica» finden sich zwei Darstellungen, in denen der große astronomische Sextant in Aktion gezeigt wird. In Abbildung 10 zeigt in der Wandmalerei der Querschnitt durch Uraniborg oben rechts in groben Linien skizziert, wie der Sextant von zwei Beobachtern ausgerichtet wird. Grafisch etwas aufwendiger ist die Architekturzeichnung zu Stjerneborg. Der relevante Ausschnitt ist in der Abbildung 13 wiedergegeben. Der Beobachter an der

gemäß Abbildung 12 AC benannten Visierlinie steht oben links. Etwas versteckt sitzt unten rechts der zweite Beobachter an der Visierlinie AD entlang der beweglichen Alhidade. Wie schon in der Abbildung des Mauerquadranten ist auch hier wieder die Größe des Sextanten überzeichnet. Nach allem, was bekannt ist, hatte der größte Sextant in Brahes Besitz, wie schon erwähnt, einen Radius von 155 Zentimetern. Eine Reproduktion dieses imposanten astronomischen Sextanten steht heute im Brahe-Museum auf der Insel Hven.

Da viele astronomische Beobachtungsdaten von Brahe noch heute zugänglich sind, konnten und können die originalen Messresultate für Nachstudien mit zeitgenössischen Ansätzen erneut analysiert werden. Fehlerfortpflanzung und die Vergleiche der mit unterschiedlichen Instrumenten erzielten Messungen deuten darauf hin, dass der Sternkatalog offenbar hierarchisch auf einem System von Fundamentalsternen unterschiedlicher Wichtigkeit aufgebaut war. Der Haupttring der Fundamentalsterne bestand aus neun sehr hellen Sternen möglichst entlang der Ekliptik liegend (da das ekliptikale Koordinatensystem auch für Brahe noch das bevorzugte war). Es folgte eine Erweiterung auf 21 Sterne und schließlich auf 100 Sterne, alle weiter über den Resthimmel verteilt. Insgesamt umfasste das gesamte vermessene Sternnetz über 1 000 Sterne. Während der grob 20 Jahre Arbeit auf Urani- und Stjerneborg wurden daneben auch die Bewegungen der Planeten, des Mondes wie auch der Sonne mit derselben Sorgfalt verfolgt.

Brahes Augenmerk auf die innere Konsistenz der Positionsmessungen, mit anderen Worten dem Vermeiden systematischer, instrumentenbedingter Fehler, führte dazu, dass er sich einen großen – in der Vergangenheit immer wieder als Protz kritisierten – Instrumentenpark leistete. Neue Instrumente wurden aber erst nach ausgiebigen Genauigkeitstests in das langfristige Himmelskatalogprojekt eingebunden. Und nur wenn unterschiedliche Instrumente zu unterschiedlichen Zeiten gemessene Positionsdaten bzw. Winkelabstände



13 Der große astronomische Sextant in Aktion auf der Beobachtungsterrasse von Stjerneborg

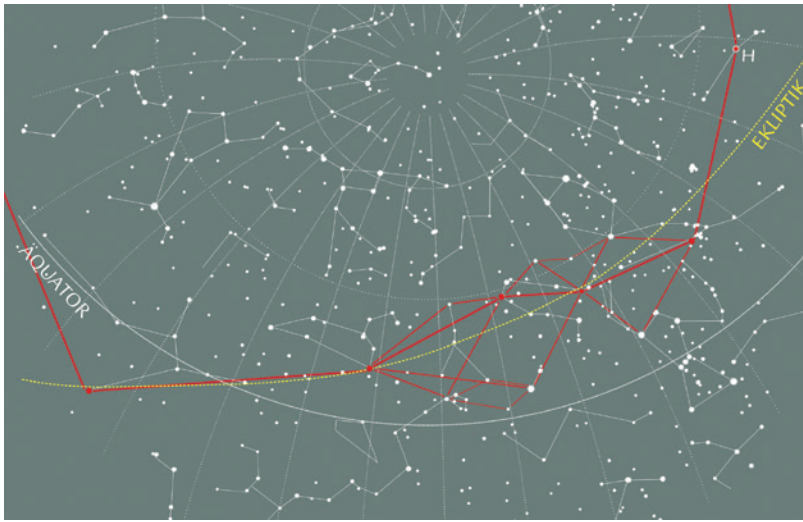
lieferten, die in sich stimmig waren, wurde das Resultat für die Aufnahme in den Sternkatalog in Betracht gezogen.

Nicht nur die genaue technische Kenntnis des Instrumentenparks, auch die Vorbereitung einzelner Beobachtungsnächte war eine anspruchsvolle Aufgabe. Außer der Klärung der Sichtbarkeit der über die Nacht hinweg zu messenden Sterne musste auch darauf geachtet werden, dass sie nicht zu nahe am Horizont gemessen werden, da bis zu 45° über dem Horizont die Refraktion, die Brechung des Sternlichts durch die Erdatmosphäre hindurch, die scheinbare Sternposition um mehr als eine Bogenminute verschiebt. Dieser Brechungseffekt kann zwar nachträglich korrigiert werden und zugehörige Tabellen wurden erstmals von Brahe und Mitarbeitern mittels sachdienlichen Sonnenbeobachtungen erstellt. Dennoch ist es zuverlässiger, falls überhaupt möglich, abzuwarten, bis die Sterne genügend hoch am Himmel stehen, bevor die Messungen ausgeführt werden, oder man wählt die Sternpaare so, dass sie bei der Messung ähnliche Zenitdistanzen haben. Hinzu kommt, dass darauf zu achten ist, dass die Dreiecke, gebildet von zwei bekannten Fundamentalsternen und einem noch einzubindenden Neuling, nicht zu schlank werden, da solche Konstellationen die Fehler in der numerischen Berechnung der relativen Schenkelängen der Kugeldreiecke explodieren lassen können.

Die Kulminationshöhen der Sterne, wie sie etwa mit dem Mauerquadranten oder vergleichbaren Instrumenten messbar waren, lieferten bei Kenntnis der geografischen Breite des Beobachtungsortes direkt die Deklination oder über trigonometrische Rechnungen auf der Kugel die ekliptikale Breite des Gestirns. Eine der gesuchten Koordinaten war also direkt messbar. Die Winkelabstandsmessungen zweier Sterne an der Himmelskugel lieferten die Grunddaten für die zweite Koordinate. Die Wertepaare Kulminationshöhen und Winkelabstand erlaubten sphärische Dreiecke zu konstruieren, für die alle drei Seiten bekannt waren. Damit ließen sich relevante Innenwinkel und somit Längendifferenzen berechnen.

Interessant zu bemerken ist, dass schon die Relativmessungen von Winkelabständen, sagen wir die des primären Fundamentalsternrings, eine Aussage über den Grad der Genauigkeit macht, lange bevor der gesamte Datensatz erarbeitet war. Die Summe der Winkel zwischen den Fundamentalsternen entlang der Ekliptik oder des Himmelsäquators muss sich nämlich schlussendlich auf 360° addieren. Diese Kontrollsumme war somit ein gutes Maß der Messgenauigkeit, die die Astronomen immer im Auge zu behalten hatten.

Es ist bemerkenswert, dass die von Brahe und seinen Mitarbeitenden bestimmte geografische Breite von Uraniborg ($N\ 55^\circ\ 54'\ 30''$) nur zwei Bogensekunden nördlicher liegt als ihr moderner Wert. Das Endresultat ermittelte Brahe aus insgesamt rund 1 500 Einzelbestimmungen. Die atmosphärische Refraktion verschiebt auf der gegebenen Polhöhe Positionen immer noch um



14 Nachhimmelsausschnitt mit von bloßem Auge sichtbaren Sternen. Rote Linien unterschiedlicher Stärke verbinden Fundamentalsterne und darauf aufbauende mögliche Paarungen zum Aufbau eines relativen Vermessungsnetzes

etwa 40 Bogensekunden. Selbst wenn die Refraktionskorrektur also nicht angebracht worden wäre, wäre die Beobachtungsposition auf der Erde immer noch innerhalb der angestrebten Messgenauigkeit einer Bogenminute bestimmbar gewesen. Durch die erstmalige Korrektur der Sternpositionen für die Lichtbrechung in der Erdatmosphäre konnten die Astronomen auf Hven aber die Genauigkeit um einen Faktor 20 verbessern. Zugegebenermaßen ist vom astronomischen Standpunkt aus die geografische Breite relativ einfach zu messen: Man wähle geeignete Zirkumpolarsterne, also Sterne, die am Beobachtungsort um den Himmelspol kreisen, ohne je unter den Horizont zu geraten, und bestimme den Mittelwert der Höhe der oberen und der unteren Kulmination. Eigentlich wäre dies eine natürliche Aufgabe für einen Mauerquadranten. An demjenigen von Uraniborg war diese Messung jedoch nicht möglich, da gemäß Abbildung 10 die Konstruktion nur für Beobachtungen nach Süden ausgelegt war. Die hohe geografische Breite von Hven bietet mit ihren mehr als zwölf Stunden langen Winternächten die Möglichkeit für eine Reihe geeigneter Zirkumpolarsterne, deren obere und untere Kulmination gleich in einer Nacht hätte gemessen werden können. Dieser Vorzug der Lage Hvens mag denn auch für die große Zahl relevanter Einzelmessungen an anderen, wahrscheinlich in Stjernborg aufgestellten Instrumenten verantwortlich sein.

Der Ausschnitt einer Himmelskarte mit Winter- und Frühlingssternbildern in Abbildung 14 enthält in Gelb den Verlauf der Ekliptik und den des Himmelsäquators in Weiß über mit bloßem Auge sichtbaren Sternen, die zum Teil mit dünnen Linien zu gängigen Sternbildern verknüpft sind. Die primären Fundamentalsterne des Himmelsausschnitts sind in der Karte rot eingefärbt. Der vermessungstechnisch primäre Sternring, der hauptsächlich entlang der Ekliptik angelegt wurde, ist mit der stärksten roten Linie hervorgehoben. Davon

ausgehend können mit geschickten Paarungen weitere Sterne eingemessen werden, von denen aus danach weitere Kombinationen möglich werden. Beispielfhaft angedeutet ist dies in Abbildung 14 mit unterschiedlich dicken roten Verbindungslinien. Bei der Wahl der in einer Nacht zu messenden Gestirnsparungen mussten die Astronomen auf Hven darauf achten, dass die Objekte genügend hoch am Himmel standen beziehungsweise nicht allzu unterschiedliche Höhen über dem Horizont hatten, um damit die nicht beeinflussbare Fehlerquelle der Refraktion gering zu halten.

Die Bestimmung des *absoluten* Wertes der Längenkoordinate, einer Größe proportional zum Winkel entlang des Himmelsäquators (Rektaszension) oder in alten Zeiten entlang der Ekliptik (ekliptikale Länge), kann schließlich mithilfe eines einzigen Sterns erfolgen, dessen Position relativ zur Sonne bekannt sein muss. Die absoluten Koordinaten der Sonne sind bekannt, *theoretisch* bekannt, nämlich gemäß eines akzeptierten Sonnenmodells. Bei Brahe kam nichts anderes infrage als sein hybrides Weltmodell, bei dem die Erde noch im Zentrum der Welt steht, die Sonne sich wie in der ptolemäischen Vorstellung um die Erde bewegt, die Planeten aber alle um die Sonne kreisen. Für jedes Datum konnte mittels der angenommenen Sonnentheorie die ekliptikale Länge der Sonne berechnet und dementsprechend aus im voraus erstellten Tabellen abgelesen werden. Das große Problem dieses eleganten Ansatzes liegt darin, dass am Tag zwar die Sonne, aber eben keine Sterne sichtbar sind. Um die Tagkoordinaten mit Objekten der Nacht zu verknüpfen, wurde in Hven ein Übergangsobjekt vermessen, das sowohl am Tag wie auch in der Nacht sichtbar ist. Von den Planeten unseres Sonnensystems wird glücklicherweise die Venus so hell, dass sie auch mit bloßem Auge hin und wieder selbst bei Tag oder zumindest schon früh in der Dämmerungsphase beobachtbar ist. Im ersten Schritt wird also der Winkelabstand der Venus von der Sonne gemessen. Im zweiten Schritt wird bei Dunkelheit dann der Winkel zwischen einem Fundamentalstern und der Venus bestimmt. Je nach Zeitdifferenz zwischen Schritt eins und zwei muss zusätzlich noch der Eigenbewegung von Venus am Himmel Rechnung getragen werden.

Der Ankerstern, dessen absolute Koordinaten via Venus mit der Sonne bestimmt wurden, war bei Brahe Hamal, der hellste Stern im Sternbild des Widlers (in Abbildung 14 oben rechts mit H bezeichnet). Das Kritische dieses Kalibrationsansatzes ist, dass ein bei der Bestimmung der Länge von Hamal gemachter Fehler sich auf den gesamten Katalog überträgt. Somit ist also bei dieser Bestimmung besondere Aufmerksamkeit angesagt. In den Beobachtungsbüchern Brahes finden sich insgesamt 54 Messungen für diese eine Kalibration: 27 Messungen von der Sonne zur Venus und ebenso viele von der Venus zu Hamal. Allein diese Nullpunktmessung konnte sich über Jahre hinweg ziehen, da die Venus am Abend- oder Morgenhimmel geschickt genug stehen musste,

um die Sonne via den zweitinnersten Planeten mit dem geeigneten Stern am Nachthimmel verbinden zu können.

Die Qualität der Nullpunktseichung hängt natürlich auch vom verwendeten Sonnenmodell ab, das hieß damals von im Voraus aus einer Theorie berechneten Tabellen. Bei dem auf Hven verwendeten tychonischen Modell des Sonnensystems erhält die Sonne eine zu große Exzentrizität, die sich während eines Jahres durch einen Fehler von bis zu acht Bogenminuten in ihrer ekliptikalischen Länge bemerkbar macht. Brahe ließ Hamal über Venus sowohl von Westen (am Abend) wie auch von Osten (am Morgen) her einmessen. Durch diesen glücklichen Umstand mittelte sich bei der Längenkalkulation des primären Fundamentalsterns der systemisch bedingte Fehler der Sonnenlänge zufälligerweise wieder heraus. Selbst große Forscher leben hin und wieder davon, dass eingeschlichene Fehler sich herausmitteln, sodass das Schlussresultat durch glückliche Fügung trotzdem wieder korrekt ist.

Obwohl Brahes Sternkatalog am Ende wie der Almagest grob tausend Sterne beinhaltete, konnte er letzteren nicht vollständig verdrängen. Der Almagest enthält erheblich mehr Sterne im Süden, als was der Himmel über Hven zu messen erlaubt. Es zeigt sich schon bei der Wahl der Fundamentalsterne, dass im Sommer, wenn die Nächte so weit im Norden sowieso schon sehr kurz sind und die Ekliptik sehr tief im Süden liegt, Brahe lediglich wenige Sterne um den Himmelsäquator herum einbeziehen konnte. Zur Kompensation wurden bei etlichen der beobachtbaren Sternbilder, verglichen zum Almagest, zusätzliche, schwächere Sterne hinzugefügt. Wie die Datenvorbereitung und die Datenanalyse auf Hven im Detail abliefen, kann heute nicht mehr rekonstruiert werden. Klar ist, dass die Beobachtungsplanung und das Datenmanagement auch heute noch keine einfachen Aufgaben darstellen. Zwischen 2019 und 2021 reproduzierte der pensionierte NASA-Ingenieur David Skillman den Brahe'schen Sternkatalog mit modernen, dennoch bescheidenen optischen Hilfsmitteln und – wie schon Brahe – ohne im Prozess auf Uhren zurückzugreifen. Dafür entwickelte Skillman unter anderem eine bemerkenswerte technische Neuinterpretation des großen astronomischen Sextanten. Die technische und astronomische Dokumentation des auch heute noch aufwendigen Projektes ist so lesenswert wie lehrreich¹⁷. Wie Skillmann praktisch ausführte, würden wir heute Datenbanken anlegen und Tabellenkalkulationen aufrufen, um Sterne nach sachdienlichen Beobachtungskriterien zu suchen, zu sortieren und um Beobachtungen zusammenzuführen. Für die Berechnung der in den Gleichungen der sphärischen Dreiecksberechnungen auftauchenden trigonometrischen Funktionen greift man heute mindestens auf einen Taschenrechner zurück. Am Ende des 16. Jahrhunderts waren umfangreiche numerische Tabellen für trigonometrische Funktionen das höchste Glück, das den Astronomen als technisches Hilfsmittel zur Verfügung stand. Nebst Tinte und Papier, vielleicht noch ge-

druckten Planisphären, wie sie Anfang des 16. Jahrhunderts mit Dürers Drucken in Umlauf gebracht wurden, war wohl das Gedächtnis vieler unbekannt gebliebener Fleisch-und-Blut-*Computer* für den Erfolg des Projektes verantwortlich. Nach Brahes eigenen Aussagen in der «Mechanica» beschäftigte er in seiner Zeit auf Hven immer zwischen sechs und zwölf Assistenten. Exakte Zahlen existieren zwar nicht, es wird aber geschätzt, dass insgesamt mindestens hundert Assistenten sich auf Hven ihre Sporen abverdienten und dementsprechend dort erworbenes praktisches Wissen danach in Europa weiterverbreiteten.

Der Aufbau von Uraniborg zog sich von 1576 bis 1580 hin. Noch während der Bauphase wurde auf der Baustelle schon astronomisch beobachtet. Die intensive Messphase der Sterne, Planeten und des Mondes erstreckte sich schließlich bis 1597, als der dann volljährige Sohn des im Jahre 1588 verstorbenen Hauptsponsors, König Friedrich II., den Thron bestieg. Brahe nahm zwar die ihm vom König verliehenen Privilegien in Anspruch, vernachlässigte aber seinerseits anscheinend die damit einhergehenden Pflichten, sich um Unterhalt der Güter und das Wohlergehen der auf Hven lebenden Bevölkerung zu kümmern. Ab 1597 wurde der Druck auf Brahes Sonderstellung so gross und die Unterstützung so schwach, dass er sich nur noch durch Wegzug aus Dänemark in der Lage sah, mit seiner astronomischen Arbeit fortzufahren. Zuerst ließ er sich bei einem Freund in der Nähe von Hamburg nieder, wo er die «Mechanica» fertigstellte und diese dort auf seiner aus Dänemark mitumgezogenen Druckpresse in kleiner Menge drucken ließ und taktisch geschickt dem habsburgischen Kaiser Rudolph II. blumig widmete, wohl in der Hoffnung, einen neuen Sponsor an Bord zu holen. Die Huldigungen in der «Mechanica» scheinen in der Tat auf fruchtbaren Boden gefallen zu sein: Im Sommer des Jahres 1599 begann Brahe sein Engagement als Hofmathematiker in der kaiserlichen Residenzstadt Prag, unter anderem auch in der Hoffnung, dort ein Neu-Uraniborg aufzubauen, was jedoch nicht mehr zustande kam. Dagegen stieß für die umfangreichen noch ausstehenden Datenauswertungen ein besonderer Assistent hinzu: Johannes Kepler. Ihm wurde die Lösung des Problems der immer wieder von den Vorhersagen abweichenden Marspositionen zugewiesen.

Ab 1598 zirkulierte der hvensche Sternkatalog mit 1 004 Sternpositionen als Manuskript, das Brahe ausgewählten einflussreichen Persönlichkeiten aus Wissenschaft und Adel zukommen ließ. Im Jahr 1602, ein Jahr nach Brahes Tod, wurde erstmals eine verkürzte Version des Sternkatalogs, mit den 777 am besten vermessenen Sternen, in der «Progymnasmata» abgedruckt. Vollumfänglich erschien der gesamte, leicht revidierte Katalog mit 1 004 Einträgen im Jahre 1627, als dieser schließlich den von Kepler herausgegebenen Rudolphinischen Tafeln angehängt wurde. Dabei ordnete Kepler den Katalog so um, dass die Reihenfolge der Sternbilder gleich der im Almagest war. Einige Sterne erhielten alternative Positionen und Kepler strich drei Sterne aus Brahes

Manuskript, fügte jedoch wieder drei andere von ihm bevorzugte Sterne hinzu. Bei den 1004 Einträgen finden sich auch 14 mehrfach auftauchende Sterne, sodass die Anzahl der unterschiedlichen im Katalog verzeichneten Sterne bei 990 liegt.

Mit Beobachtungen, gewonnen von astrometrischen Weltraummissionen, lassen sich dank ihrer genauen Positions- und Eigenbewegungsdaten für viele Millionen, neuerdings gar von über einer Milliarde Sterne deren Lage am Himmel auch über lange Zeiträume rückwärts rechnen. Somit lässt sich auch eruieren, was Brahe und Mitstreiter Ende des 16. Jahrhunderts hätten sehen müssen. Vergleicht man solche Daten mit dem, was die damaligen Astronomen in ihren Beobachtungsbüchern hinterlassen haben, so zeigen statistische Analysen, dass in Brahens Sternkatalog 85% der gemessenen Sterne einen Positionsfehler von weniger als zehn Bogenminuten haben. Für diese Teilmenge ist der Mittelwert des Positionsfehlers sogar rund zwei Bogenminuten. Somit wurde Brahens Sternkatalog mit seiner gegenüber dem *Almagest* von Ptolemäus (um 170 n.Chr.) und der Neuvermessung durch Ulugh Beg (1437) in Samarkand etwa zehnmal höheren Genauigkeit zum neuen De-facto-Standard.

Wie so oft in der Wissenschaft, und dies galt schon damals: Wenn die Zeit reif ist für Neues, dann sprießen die Triebe oft gar unabhängig an unterschiedlichen Orten. Am Ende wird meistens nur einer der Äste bekannt genug, um die Meinung der Geschichtsschreibung zu bilden und so breiter in Erinnerung zu bleiben. Nicht anders erging es der Entstehung von Brahens Sternkatalog, auch dieser hatte einen Konkurrenten. Einen, der – nach modernen Analysen – sogar etwa um einen Faktor zwei genauer war als das Werk des Dänen. Begonnen wurden die Arbeiten zum Kasseler Katalog schon etwa 15 Jahre, bevor Brahe in dieses Gebiet einstieg an der wohl ersten deutschen Forschungssternwarte, derjenigen des Landgrafen von Hessen in Kassel. Im April 1575 verbrachte der junge Brahe Zeit bei Wilhelm IV., um mit ihm zusammen den Nachthimmel mit dem Kasseler Instrumentarium zu beobachten. Dabei lernte Brahe vom schon routinierten Beobachter Wilhelm IV. und er hörte sicher auch vom schon laufenden Kasseler Beobachtungsprogramm für einen neuen zuverlässigeren und genaueren Sternkatalog, der den *Almagest* ablösen sollte. Als Brahe seine eigene Sternwarte aufgebaut und in Betrieb hatte, setzte erneut ein Briefwechsel zwischen Hven und Kassel ein, dank dem dann auch Wilhelm IV. von den Erfahrungen und Vorstellungen des ambitionierten und talentierten Dänen profitieren konnte. Neue Ideen wurden durch die an der Kasseler Sternwarte angestellten, hervorragenden Instrumentenbauer, Beobachter und Datenanalysten Christoph Rothmann und dem gebürtigen Toggenburger Jost Bürgi dort umgesetzt und adaptiert.

Im Gegensatz zum Projekt auf Hven verließ man sich in Kassel nicht primär auf ein Netz von relativ zueinander (rein geometrisch) am Himmel

vermessener Fundamentalsterne. Der Kasseler Hof-Uhrmacher Jost Bürgi war in der Lage, genügend genau laufende Uhren herzustellen, um die Stundenwinkel der kulminierenden Himmelskörper oft auf den Bruchteil einer Bogenminute genau bestimmen zu können. Leider scheinen keine Dokumente und erst recht keine diesbezüglichen Instrumente mehr zu existieren, die detaillierte Einblicke in die damaligen technischen Fertigkeiten des Uhrmachers erlauben würden. Auf jeden Fall war aber das Vorgehen in Kassel das erste astronomische Projekt, bei dem die Zeit als primäre Messgrösse in ein Beobachtungsprojekt einfluss. Noch heute greifen astrometrische Missionen auf das gleiche Konzept zurück, wenn auch technisch natürlich um vieles aufwendiger.

Die sich beschleunigenden technischen Entwicklungen in der Astronomie, das Teleskop und genau laufende Pendeluhr, führte dazu, dass die Jahrzehnte dauernde Investition in die neuen Sternkataloge sowohl Brahes und damit auch die erheblich verspätete Veröffentlichung des Kasseler Sternkatalogs bald schon im Archiv der Astronomiegeschichte verschwanden. Dieses Muster wiederholt sich in der Wissenschaft immer wieder; dennoch ist dieser Vorgang nicht als Zeichen von Ineffizienz zu verstehen, sondern er illustriert lediglich, dass der *Prozess* der Erarbeitung von Wissen und die dabei entwickelten Methoden und Denkmuster langfristig wichtiger sind als die als Ziel gesetzten Resultate und sogar wichtiger als die involvierten Charaktere, mögen sie noch so illuster oder extravagant gewesen sein.

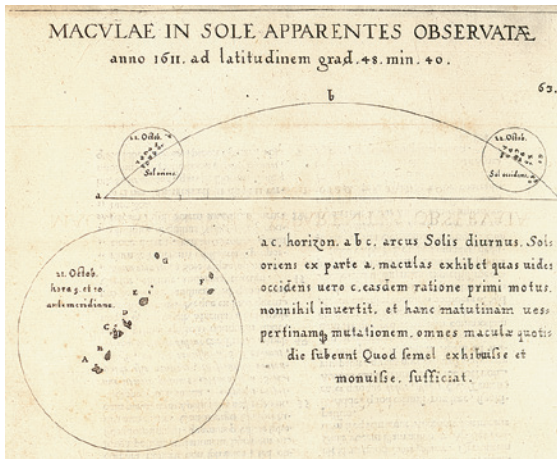
Erst die Sicherheit, sich darauf verlassen zu können, dass Sternpositionen korrekt auf Bogenminuten genau vermessen waren, ermöglichte Kepler, die sich wiederholenden Abweichungen von maximal acht Bogenminuten in der erwarteten ekliptikalen Länge des Mars als tatsächlich in der Natur auftauchenden Effekt zu akzeptieren und diesen als tiefergehendes Problem annzunehmen, das einer Lösung bedurfte. Die langwierige und aufreibende Arbeit, basierend auf den vorzüglichen systematischen Daten aus Hven, führte schließlich also sogar zu einer Revidierung des Weltbildes: Die Planeten umlaufen die Sonne nicht auf Kreisbahnen, sondern auf Ellipsen. Die ursprünglichen Kreisvorstellungen sind zwar mathematisch elegant, physikalisch aber eben nicht korrekt. Einige Jahrzehnte später sollte Newton letztlich den Beweis liefern, dass sich in zentralen Kraftfeldern bewegende Körper dies auf Kegelschnittbahnen tun. Bei gravitativ gebundenen Systemen (wie den Planeten mit der Sonne als Gravitationszentrum) müssen diese Bahnen dann eben Ellipsen sein.

Aus den Beobachtungsprogrammen auf Hven entstand der Sternkatalog als epochale Basis. Für die breitere Gemeinschaft der Gelehrten war aber wohl die viel genauere Beobachtung von Sonne, Mond und der Planeten wichtiger; nicht notwendigerweise, weil damit eine neue Sicht auf die Himmelskinematik eröffnet wurde, sondern weil für diese Himmelskörper genauere Ephemeriden errechnet werden konnten als davor. Niederschlag fanden diese in den schon

erwähnten Rudolphinischen Tafeln, für die der Auftrag ursprünglich von Kaiser Rudolf II. an Brahe erging, aber erst 1627 von Kepler herausgebracht wurden – posthum für Brahe wie für den Kaiser. Die Tafelwerke waren aber nicht nur, vielleicht nicht einmal hauptsächlich für die Astronomen gedacht, wenn auch für diese hilfreich und dort auch oft verwendet; die treibende Kraft der finanziellen Unterstützung galt wohl eher der Hoffnung auf zuverlässigere Horoskope.

Sonnenflecken

Auch wenn es für unsere gelegentliche Wahrnehmung nicht dramatisch erscheint, der Himmel ist ein Ort ständiger Bewegung. Kontemplatives Sitzen, Schauen und Analysieren sind nicht möglich. Objekte am Himmel bewegen sich permanent, wenn auch nicht unvorhersehbar wie etwa die Forschungsgegenstände der Ornithologen. Die einfachste und schnellste dieser systemischen Bewegungen ist der durch die Rotation der Erde verursachte Tag-Nacht-Zyklus. Nebst dem Mond ist die Sonne dernahe liegendste und hellste Himmelskörper, der uns dieses Verhalten vorführt. Ist man versucht, die Sonne genauer zu inspizieren, stellt man schnell fest, dass die direkte Betrachtung der Sonnenscheibe schwierig und bestenfalls nur schmerzhaft ist. Selbst bei abgeschwächtem Licht, sei es in Horizontnähe, bei Nebel oder hinter stark lichtschwächenden Gläsern, wird dem gelegentlichen Beobachter in der Regel eine strukturlose Scheibe vor sein bloßes Auge geführt. Es ist daher nicht weiter verwunderlich, dass die Sonne lange als Beispiel himmlischer Reinheit galt und als solche in alten Naturphilosophien Eingang fand. Dass dieser Eindruck jedoch falsch war, wurde bereits früh, aber nicht überall so erkannt. Im Fernen Osten finden sich seit mindestens 350 v. Chr. gelegentliche Aufzeichnungen zu Flecken auf der Sonne, klein zwar und nur von unbestimmt kurzer Dauer, zudem schien deren Erscheinen keiner Regel zu folgen. Diese Phänomene wurden daher entweder als Kuriositäten abgetan oder möglicherweise nicht mit dem Sonnenkörper in Verbindung gebracht, sondern mit Vorgängen auf dem Weg des Lichts von der Sonne zur Erde. Noch kurz vor dem Einsatz des Fernrohrs in der Astronomie beobachtete Johannes Kepler am 28. Mai 1607 die Sonne mit einer Camera Obscura, einer Lochkamera, die die Sonnenscheibe in ein dunkles Zimmer projizierte. Der Anlass für diese Beobachtung war Keplers Vorhersage eines Merkurdurchgangs vor der Sonne, dessen Bestätigung er mit jener Beobachtung anstrebte. In der Tat stellte er einen dunklen Fleck auf der Sonne fest. Dieser wurde jedoch nicht durch Merkur hervorgerufen, da die Vorhersage Keplers inkorrekt war. Merkur verfehlte bei seiner unteren Konjunktion am 1. Juni 1607 die Sonnenscheibe um mehrere Grad. Dennoch war am Tag



15 Scheinbare Orientierungsänderung der Sonne zwischen Sonnenaufgang (links) und Sonnenuntergang (rechts) relativ zum Horizont. Das große Bild der Sonnenscheibe zeigt den detaillierten Fleckenzustand am 22. Okt. 1611, wie von Scheiner beobachtet

tion in der Astronomie bedeutete eine grundlegende Disruption des Forschungsgebietes. Ab Herbst 1610 wurde das neue Werkzeug auch auf die Sonne – nicht immer mit der notwendigen Sorgfalt den Augen gegenüber – angewendet.

Die in Figur 15 wiedergegebene Skizze der Sonnenscheibe aus dem Werk »Rosa Ursina«¹⁸ von Christoph Scheiner ist ein repräsentatives Bild früher Beobachtungen. Offensichtlich ist die Sonne, wie in der großen Darstellung unten links gezeichnet, nicht fleckenfrei; zur Orientierung und der textuellen Beschreibung des Zustandes im Buch ist die Fleckenreihe mit Buchstaben von A bis G gekennzeichnet. Die beiden den Tageslauf illustrierenden Sonnenscheiben der oberen Skizze zeigen die Orientierung der Sonne bei ihrem Aufgang (links, bei a) und beim Untergang (rechts, bei c) relativ zu ihrem abgelaufenen Tagbogen am 22. Oktober 1611. Bis auf die Fleckengruppe F (bei der Epoche des Sonnenuntergangs unten rechts sichtbar) scheint sich die Fleckenstruktur über den Tag hinweg nicht zu ändern. Schon in diesen frühen Zeichnungen ist ersichtlich, dass die Flecken typischerweise nicht rund sind und keine glatten Ränder aufweisen. Noch wurden nur die Grenzlinien der Flecken, aber keine weiteren Strukturen oder Schattierungen notiert. Der Grund für die sich scheinbar ändernden Ausrichtung der Sonnenscheibe liegt im gewählten Koordinatensystem: hier das Horizontalsystem, in dem die eine Koordinate, das Azimut, als Winkel relativ zu einer frei wählbaren Himmelsrichtung wählbar ist, sowie die Höhe des Objekts über dem mathematischen Horizont, dargestellt durch die horizontale Linie zwischen a und b. Diese Bildfeldrotation kann durch geschickte Wahl der Teleskopaufstellung vermieden werden, so wie etwas später gemäß Abbildung 17 realisiert.

Soweit heute bekannt, war der Engländer Thomas Harriot der früheste Beobachter von Sonnenflecken mit einem Teleskop. Aus seinen noch existierenden Beobachtungsnotizen geht hervor, dass er ab dem 13. Dezember 1610

der Beobachtung ein ausreichend großer, ohne optische Hilfe wahrnehmbarer Fleck auf der Sonne vorhanden, der fälschlicherweise für einen Merkurdurchgang gehalten wurde. Die Ironie der Geschichte besteht aber eigentlich darin, dass selbst wenn Kepler recht gehabt hätte und die Sonne auch noch fleckenfrei gewesen wäre, er trotzdem nichts vom Merkurtransit mitbekommen hätte. Die Grösse Merkurs ist zu gering, als dass wir ihn mit bloßem Auge von der Erde aus vor der Sonnenscheibe sehen können.

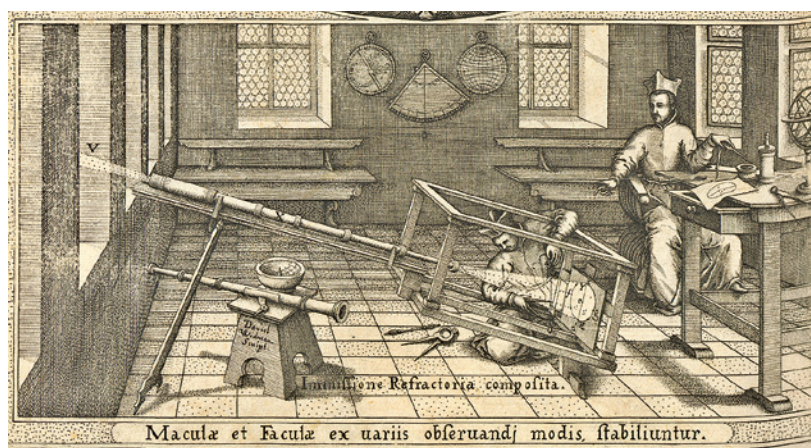
Die Erfindung des Fernrohrs und seine, wenig überraschend, sehr zeitnahe Adop-

meist kurz nach Sonnenaufgang oder kurz vor Sonnenuntergang beobachtete. Er publizierte (nicht nur dazu) nie etwas und ging so mehr oder weniger vergessen. Seine Notizbücher wurden jedoch 1798 wieder aufgefunden und posthum analysiert und nun schließlich digitalisiert. Aus der Frühphase der teleskopischen Sonnenbeobachtung sind von Harriot insgesamt 199 wissenschaftlich relevante Zeichnungen bekannt. Der erste gedruckte Report von gesichteten Sonnenflecken wurde von 1611 Johannes Fabricius in Friesland verfasst. Langfristig stellte sich sein Beitrag aber wissenschaftlich als nicht sonderlich hilfreich heraus, da weder Zeichnungen noch Beobachtungsdaten mitgeteilt wurden. Erst die Veröffentlichung «Prognosticon» für 1615 von David Fabricius, dem Vater von Johannes, quantifizierte die am 9. März 1611 begonnenen Fleckenbeobachtungen. Schon im ersten Sonnenfleckensreport interpretierte Fabricius die dunklen Flecken als der Sonne zugehörig, da sie sich in der Scheibenmitte schneller bewegen als am Rand: ganz wie es durch die Projektion der Bewegung auf einer Kugel zu erwarten ist. Somit war also auch schon einmal der Pflock eingeschlagen, dass die Sonne rotiert. Trotz dieser sehr frühen Interpretation der Ursache der Fleckebewegung wurde noch lange debattiert und gestritten, ob es nicht eher innerhalb von Merkur die Sonne umlaufende Trabanten seien. Und selbst wenn die Flecken ein Phänomen auf der Sonnenoberfläche wären, stritt man sich darüber, ob diese das Resultat ausgestoßener Wolken oder Rauch seien, oder gar Gipfel von Sonnenvulkanen, die gelegentlich durch die wolkenartige Sonnenphotosphäre hindurchdringen würden.

Zu den allerersten Fleckenforschern gehörten auch Simon Marius in Ansbach, Christoph Scheiner und Johann Cysat in Ingoldstadt und natürlich Galileo Galilei in Florenz. Kaum wurde die Sonne mit dem neuesten Spielzeug der Astronomen untersucht, begannen auch schon die kleinlichen, aber nicht minder heftigen und zum Teil langjährigen Streitereien zu wissenschaftlichen «Prioritätsansprüchen». Auch wenn Galilei besonders streitfreudig war, so fiel er 1613 immerhin auch durch die ganz vorzügliche Qualität seiner Sonnenfleckenzzeichnungen und sein deduktives Geschick ihrer Interpretation auf.

Rüstet man zugunsten genauerer Beobachtungen die technischen Gerätschaften auf, zählt man aber immer auch den Preis größerer Komplexität und damit aufwendigerer Handhabung. Bei der Anwendung der Teleskope für die Sonnenbeobachtung wurde schnell klar, dass die Helligkeit des Bildes für das menschliche Auge gefährlich ist. Somit galt es, die Intensität abzuschwächen, entweder künstlich durch Vorsatzgläser oder günstige atmosphärische Bedingungen abwartend. Das Teleskop musste sachdienlich aufgestellt werden, da durch die optische Vergrößerung nicht gleichzeitig quantitativ sinnvoll skizziert und das Himmelsobjekt freihändig beobachtet werden konnte. War das Teleskop zweckmässig montiert, galt es immer noch, die Erdrotation zu kompensieren, um die Sonnenscheibe im Blickfeld zu behalten. Um gleich am Teleskop

16 Projektion der Sonne auf eine Zeichenebene mit Hilfe eines azimuthal aufgestellten Teleskops



den Sonnenzustand aufzuzeichnen, ohne das Augenlicht zu riskieren, bot sich somit ein Projektionsansatz an, wie er schon bei der Camera Obscura zum Tragen kam. Wie sich dies, zumindest im Prinzip, hätte realisieren lassen, ist in Abbildung 16 wiedergegeben, das in «Rosa Ursina» das Laborumfeld um Scheiner illustriert. In einem Beobachtungsraum ist ein Refraktor azimuthal so ausgerichtet, dass das von links (bei v) durch das Fenster einfallende Sonnenlicht durch den Refraktor geleitet und danach vergrößert auf eine in einem Rahmen montierte Zeichenebene abgebildet wird. Der daneben kniende Beobachter hat die Aufgabe, die Sonnenscheibe auf der Projektionsebene auf einem Blatt Papier nachzuzeichnen und so einen möglichst exakten Schnappschuss des Sonnenzustands jenes Momentes zu erstellen.

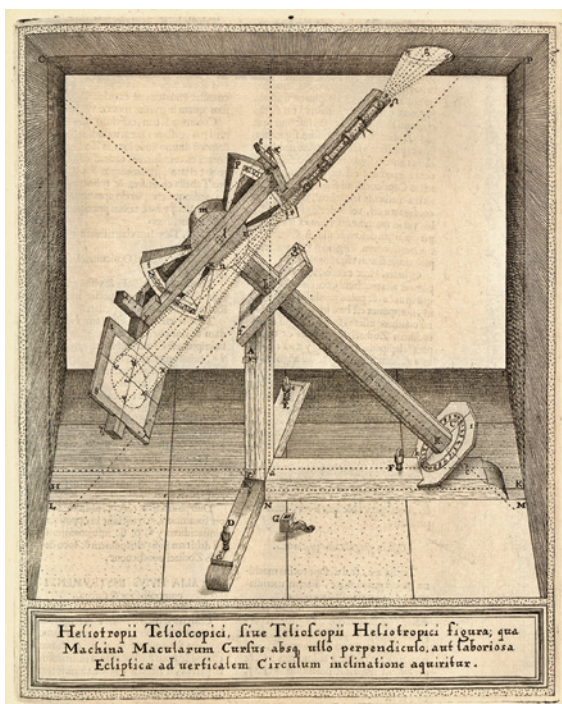
Abbildung 16 stellt jedoch bestenfalls die *Idee* der Okularprojektion dar, kaum aber den Vorgang selbst, dank dessen ein Werk wie «Rosa Ursina» hätte entstehen können. Das projizierte Sonnenbild in der Zeichenebene hatte eine Ausdehnung, die es erlaubte, auch kleine Details auf der Sonnenoberfläche nachzuzeichnen. Dies ist ganz im Einklang mit den sehr detaillierten Kupferstichen in der «Rosa Ursina». Auf der Erde erscheint uns die Sonne mit einem Winkeldurchmesser eines halben Grades und wie schon verschiedentlich erwähnt sind die Himmelskörper aufgrund der Erdrotation immer in Bewegung. In vier Minuten bewegt sich deswegen am Himmel ein Objekt, so auch die Sonne, um ein Grad weiter. Innerhalb von zwei Minuten verschiebt sich also auf der Zeichenebene die Sonne um den eigenen Durchmesser; gemäß Illustration in Abbildung 16 heißt das, die Sonne verlässt in diesem Zeitraum die Projektionsebene, auf der gezeichnet wird. Der kniende Sonnenzeichner hätte also nur wenige Sekunden Zeit, um einen selbst beachtlichen Fleck auf das Blatt Papier zu übertragen, bevor sich das Bild der Sonne maßgeblich verschiebt und dreht. Natürlich kann das azimuthal aufgestellte Teleskop der Sonnenbewegung nachgeführt werden, dafür ist es jedoch in zwei Richtungen zu bewegen, näm-

lich horizontal (d.h. azimutal) sowie in der Höhe. Bei der im Kupferstich wackelig erscheinenden Aufstellung ist das innerhalb von Sekunden und geschweige denn kontinuierlich nicht realisierbar. Selbst wenn es in miraculöser Weise umsetzbar gewesen wäre, ist wieder die Realität Spielverderber. Abbildung 15 illustriert, wie sich in einem Azimutalsystem die Sonnenscheibe entlang ihres Tagbogens scheinbar dreht. Das heißt, die Sonne läuft nicht linear aus dem Bild heraus, sondern sie dreht sich dabei auch ein wenig. Die einzige Ausnahme, während der die Bewegung fast linear verläuft, ist die Zeit um den lokalen Mittag herum: also wenn die Sonne am höchsten steht. Dass es der Künstler, der Abbildung 16 komponierte, mit der Realität nicht so genau nahm, ist nicht nur in den über die ganze Szene verteilten inkonsistenten Schlagschatten zu ersehen. Aus nicht einleuchtenden Gründen zeichnet der Beobachter die Sonnenscheibe im Schatten auf, dies obwohl das Teleskop ohne weitere Vorkehrung direkt auf die Sonne ausgerichtet ist. Bei einer Okularprojektion ist am optischen Gerät vor der Projektionsebene nämlich eine schattenspendende Abschirmung zu montieren. Eine solche ist in Abbildung 16 nicht ersichtlich. Auch wenn der Beobachtungsworkflow nicht erkennbar ist, so bleibt doch immerhin die Okularprojektion als die entscheidende Idee, um ohne Gesundheitsgefährdung und quantitativ zuverlässig den Zustand der Sonnenscheibe zu protokollieren.

Eine entscheidende Verbesserung der Ausrichtung des Beobachtungsgeräts ist zu erreichen, wenn eine seiner Achsen parallel zur Erdrotationsachse verläuft, das heißt, wenn das Gerät *parallaktisch* aufgestellt wird. Diese Lösung, die auf den Jesuiten Christoph Grienberger, einen Zeitgenossen Scheiners, zurückgeht, ist erstmals in «Rosa Ursina» vorgestellt und in Abbildung 17 wiedergegeben. Die von links oben nach rechts unten führende Achse verläuft parallel zu Erdrotationsachse. Die nach links oben verlaufende gestrichelte Linie weist somit in Richtung des geografischen Nordpols der Erde. Die Neigung dieser Achse gegen den Horizont entspricht also der lokalen geografischen Breite. Der in der Bildebene liegende horizontale Fuß der Montierung verläuft somit in der Meridionalebene, aufgespannt durch Nord-, lokale Zenit- und Südrichtung des Beobachtungsorts.

Die korrekte Aufstellung einer parallaktischen Montierung ist selbstredend aufwendiger als die Azimutale, im Gegenzug

17 Parallaktisch aufgestellter Refraktor zur Erstellung von Sonnenfleckenzeichnungen



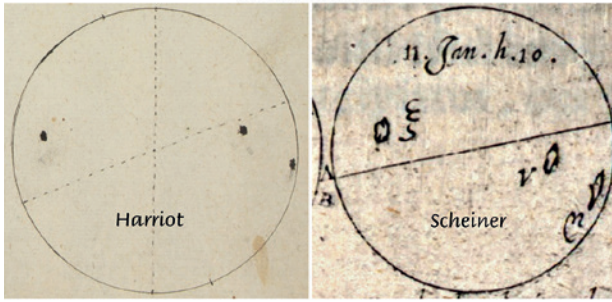
gewinnt man dafür erheblich an Beobachtungskomfort: ie Erdrotation muss nur noch in einer Richtung kompensiert werden und die Bildfeldrotation fällt vollständig weg. Da das Teleskop in Abbildung 17 nur für Sonnenbeobachtung verwendet wird, deswegen auch *heliotropes Teleskop* bzw. *Helioskop* genannt wurde, braucht es in der zur Rotationsache komplementären Richtung nur um ± 23.5 Grad gegen den Äquator neigbar zu sein. Dies reicht, damit das Teleskop den gesamten Erscheinungsbereich der Sonne über ein Jahr hinweg abdeckt. In der Illustration ist diese Einschränkung der Neigung an den beiden sich an den Spitzen treffenden Kreissektoren ersichtlich. Durch das Loch in der Decke des angedeuteten Verschlages wird das Sonnenlicht durch einen Refraktor geleitet, sodass das dabei entstehende vergrößerte Sonnenbild auf die Zeichenebene in der Mitte links projiziert wird. Der Sinn der schachtelähnlichen Hülle um das Teleskop wird die Gewährleistung notwendiger Dunkelheit sein, um darin bei genügend Kontrast die feinen Strukturen der projizierten Sonnenscheibe auf dem eingespannten Papier nachzeichnen zu können. Die in Abbildung 17 dargestellte Aufstellung des heliotropen Teleskops entspricht der Ausrichtung am lokalen Mittag eines Frühlings- oder Herbstanfangs. Hätte die abdunkelnde Kiste oder der Raum mit einem Loch auf der Oberseite wirklich so existiert, dann wäre mit diesem Gerät nur zweimal pro Jahr, wie eben dargestellt, beobachtet worden. Dem wird ja nicht wirklich so gewesen sein, und die in «Rosa Ursina» dokumentierten Fleckenzeichnungen sind Beweis dafür, dass professionell gearbeitet wurde. Das bedeutet dann aber, dass in der Verschaltung der Lichteinlass zum Teleskop so weit offen gewesen sein muss, dass der Innenraum im Gegenzug nicht mehr besonders dunkel sein konnte und damit, wie schon für die azimutale Aufstellung beschrieben, ein der Zeichenebene schattenspendender Schirm hinter dem Refraktor anzubringen war.

Mit einer parallaktischen Aufstellung des Beobachtungsgerätes können ein für alle Mal die Himmelsrichtungen auf der Bildebene festgelegt werden. Äquatorial und ekliptikal sind Ost und West und unter Berücksichtigung der Abbildungseigenschaften des vorgeschalteten Refraktors damit auch Nord und Süd einfach und für ein Gerät immer gleich festlegbar. Bei den Abbildungen 16 und 17 geht man davon aus, dass Scheiner und Mitarbeiter Keplerrefraktoren verwendeten. Das zugrunde liegende optische Konzept wurde von Kepler im Jahre 1611 theoretisch beschrieben, aber nicht von ihm selbst verwendet. Im Gegensatz zum galileischen Fernrohr mit einer Sammellinse und einer Streulinse besteht das Keplerfernrohr aus zwei Sammellinsen, sodass das erzeugte Bild um 180 Grad gegen das Original gedreht wird. Wenn die Optik bekannt ist oder auf den Beobachtungsblättern die Hauptrichtungen (Ekliptik bzw. geografisch Nord oder Süd) eingezeichnet werden, sind wichtige Informationen, heute spricht man von Metadaten, bekannt und erlauben Vergleiche von Resultaten, die von verschiedenen Beobachtern mit unterschiedlichen Geräten gewonnen

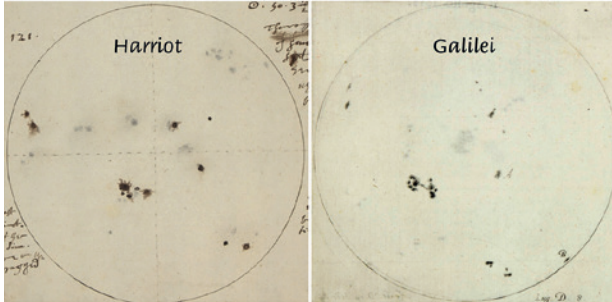
wurden. Zur Quantifizierung der Beobachtungsdaten ist eine kartografische Einbettung der Flecken auf der Sonnenoberfläche hilfreich. Der Verlauf der Ekliptik aus dem projizierten Bild der Sonne ist bei parallaktischer Montierung des Beobachtungsgeräts einfach zu erhalten. Die Ekliptik ist aber lediglich ein geometrisches Konstrukt ohne physikalische Bedeutung für die Sonne. Aufgrund der frühesten Beobachtungen des Fabricius-Gespanns wurde, wie schon erwähnt, vermutet, dass die Sonne rotiert. Die Orientierung der Rotationsachse im Raum und somit relativ zur Erdumlaufbahn blieb jedoch vorerst unbekannt.

Nur wenige der noch existierenden Rohdaten erlauben zu vergleichen, was verschiedene Naturforscher in der Frühphase der Sonnenfleckenbeobachtung zur selben Zeit gesehen haben. Die Reproduzierbarkeit von Resultaten anhand alter Forschungsdaten ist nur noch selten möglich. Dennoch liefern die Fälle, in denen es klappt, die Möglichkeit, ein Gespür für Zuverlässigkeit zu entwickeln. Abbildung 18 stellt die Sonnenzeichnung von Harriot vom 11. Januar 1612 derjenigen gleichentags von Scheiner angefertigten und für den 8. Juli 1612 die Harriot'sche derjenigen von Galilei gegenüber. Harriots Zeichnungen sind Tintenskizzen aus seinen nie veröffentlichten Notizbüchern¹⁹. Die Scheiner'sche Illustration gehört zu einer Serie von 30 Einzelbildern auf Seite 16 von «De maculis solaribus [...]»²⁰ aus dem Jahre 1612 und musste für Abbildung 18 merklich vergrößert werden. Die Zeichnung von Galilei entstammt dem Buch «Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari [...]»²¹ von 1613, in dem er eigene Beobachtungen und Ansichten zu ihm zugesandten Zeichnungen (...) des sich hinter dem Pseudonym Apelles versteckenden Scheiner abdruckte.. Außer bei der Sonnenscheibe oben rechts zeigen sich neben dunkleren Fleckendarstellungen auf den Sonnenscheiben weitere mattgraue fleckige Stellen. Diese sind jedoch lediglich Abfärbungen anderer Illustrationen auf benachbarten Druckseiten. Obwohl Beobachtungstechnik und Erfahrung zu den in Abbildung 18 ausgesuchten Daten noch jung waren, bleibt festzustellen, dass die Flecken und Fleckengruppen von den verschiedenen Beobachtern jeweils gut wiedergegeben wurden. Harriot hat wahrscheinlich direkt am Teleskop skizziert und musste also Lage und Größe von Gesehenem frei auf das Papier übertragen. Die schräg von links unten nach rechts oben verlaufenden Linien der Skizzen in der oberen Reihe deuten wohl den Verlauf der Ekliptik an. Durch die vertikale gestrichelte Linie verrät Harriot dem Leser auch die Richtung zum lokalen Zenit. Wenn bei Scheiner die Zenitrichtung in gleicher Weise vertikal anzusetzen ist, dann ließe sich daraus schließen, dass Scheiner etwas später am Tage als Harriot beobachtete. Abbildung 15 macht klar, dass sich die Lage von Flecken relativ zur jeweiligen Zenitlinie über den Tag hinweg verändert. Konstant bleibt jedoch ihre Lage relativ zur Ekliptiklinie durch den Mittelpunkt der Sonnenscheibe. In den Skizzen für den 11. Januar 1612 stimmen

11. Januar 1612



8. Juli 1612



18 Zu gleichen Zeiten erstellte Fleckenzeichnungen. Vergleich von Harriot, Scheiner und Galilei

cken lassen sich anhand der beiden Zeichnungen nicht eruieren. Der Fleck in der Nähe des rechten Sonnenrandes deutet mit seiner elliptischen Form einen möglichen Projektionseffekt an.

Auch wenn der Fleckenkern (Umbra) auf der Sonnenscheibe dunkel erscheint, so ist er dies nicht in einer Stärke, wie wenn etwa das Sonnenlicht von einem der inneren Planeten bei unterer Konjunktion abgedunkelt wird. Schon die ersten Sonnenfleckbeobachter erkannten dies. Sind Sicht und Teleskop gut genug, erscheinen zudem die Fleckenkerne oft von einem leicht helleren Hof (Penumbra) umrandet zu sein. Am 8. Juli 1612 beobachteten sowohl Harriot in England wie Galilei in Italien Sonnenflecken. Das untere Paar von Sonnenzeichnungen in Abbildung 18 vergleicht die Resultate, links wie von Harriot rapportiert und rechts die Sicht Galileis. Wählt man die dominante Fleckengruppe unterhalb der Sonnenmitte als Ankerpunkt für die relativen Fleckenpositionen, so findet man eine leidlich gute Übereinstimmung. Der Quadrant oben rechts in Harriots Sonnenzeichnung enthält zwei Flecken, von denen aber nur einer bei Galilei vorkommt. Im Gegenzug notierte Galilei in dieser Gegend drei Einzelflecken, die bei Harriot fehlen. Im Quadranten unten rechts von Harriots Sonnenzeichnung fehlt zudem der bei Galilei mit «B» gekennzeichnete Fleck in der Nähe des Sonnenhorizonts. Interessanter ist in den beiden unteren Bildern jedoch, dass sowohl Harriot wie auch Galilei bei den meisten notierten Flecken(gruppen) Penumbren andeuten. Harriot realisierte dies durch eine Art Lavur um die Fleckenkerne herum. Bei Galilei dringt hin-

die Positionen der von Harriot und Scheiner beobachteten drei Sonnenflecken recht gut überein. Bei Scheiner sind die Flecken jedoch erheblich größer. Moderne statistische Analysen der Scheiner'schen Zeichnungen zeigen in der Tat, dass er in der Frühphase seiner Beobachtungen die Flecken systematisch zu groß notierte. Wo Harriot die Fleckenkerne durchgehend dunkel einfärbte, gab Scheiner nur Umrisse an. Falls Scheiner schon mit der Projektionsmethode arbeitete, bei der die Flecken auf dem Papier nachgezeichnet werden, so würde dies erklären, warum die Flecken immer etwas zu groß erschienen, und warum (zumindest anfänglich) nur Umrisse wiedergegeben wurden. Intrinsische Details der Fle-

gegen einmal mehr der Künstler durch: In seinen Kupferstichen werden die unregelmäßigen Fleckenkerne mit detaillierten, fein ziselierten Höfen umrandet, sodass das resultierende Bild in voller Größe schon fast fotorealistisch anmutet.

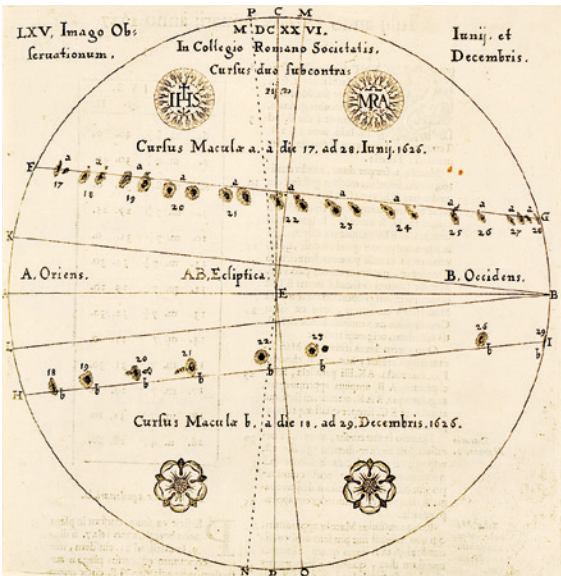
Bei Harriot geht man aufgrund der noch vorhandenen Informationen davon aus, dass er immer direkt durch das Fernrohr beobachtete und Gesehenes frei in sein Beobachtungsbuch zeichnete. Die erheblich bessere Qualität der Zeichnung Galileis ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass er schon im Sommer 1612 mit einer Projektionsmethode arbeitete und damit auf dem Papier direkt das Sonnenbild nachzeichnete. Damit wären also Details und die relative Lage von Fleckengruppen, Flecken und Poren in den Galileibildern erheblich zuverlässiger, als was beim freien Abzeichnen zu erwarten ist.

Sollte Harriot wirklich immer direkt am Fernrohr gezeichnet haben, dann macht in seiner Zeichnung vom 8. Juli 1612 das gestrichelte Kreuz mit seinen praktisch senkrecht aufeinanderstehenden Armen stützig. Falls die senkrechte Linie wie sonst bei ihm üblich die Richtung zum Zenit angibt und die horizontale Linie die Ekliptik markiert, dann ist diese Situation gemäß Abbildung 15 nur am lokalen Mittag möglich. Wenn die Sonne am Mittag am höchsten steht, ist aber eine direkte Beobachtung durch ein unabgeblendetes Fernrohr nicht möglich. Für eine solche Beobachtung muss in irgendeiner Weise die Intensität der Sonnenstrahlung um mindestens einen Faktor 10 000 verringert werden. In natürlicher Weise ist dies, wenn auch nicht ungefährlich, etwa durch eine homogene (cirrenartige) Wolkenschicht oder Nebel möglich. Dadurch wird jedoch auch der Kontrast herabgesetzt, sodass feine Fleckenstrukturen oder selbst Flecken möglicherweise nicht mehr erkennbar sind.

In seiner Zeit war Christoph Scheiner der Astronom mit dem am längsten andauernden Interesse an den Sonnenflecken. Die Erkenntnisse, die aus der ersten längeren Überwachung des solaren Fleckenverhaltens gewonnen wurden, fanden Eingang in sein Opus Magnum, «Rosa Ursina», zwischen 1626 und 1630 zum Druck gebracht. Das darin verarbeitete Datenmaterial bezieht sich jedoch hauptsächlich auf den Beobachtungszeitraum von Dezember 1624 bis März 1627, also eine Spätphase, in der er und seine Mitarbeiter schon viele Jahre an Erfahrung angesammelt hatten.

Abbildung 19 ist repräsentativ für viele der detailreichen Kupferstiche in «Rosa

19 Neigungsänderung der Fleckenbewegung auf der Sonnenscheibe zwischen Juni und Dezember 1626



Ursina». Um die zeitliche Veränderung der Eigenschaften von Sonnenflecken zu illustrieren, wählte Scheiner in Einzelblättern mit Fleckenzeichnungen, wie etwa in Abbildung 18 gezeigt, ein besonders geeignetes Beispiel aus und übertrug für mehrere Tage deren Positionen und ihre Strukturen auf die gleiche Sonnenscheibenvorlage. Dafür wurde ein geeigneter Fleck oder eine geeignete Gruppe aus Zeichnungen verschiedener Tage auf die Ekliptiklinie (Linie AB in Abb. 19) einer ursprünglich leeren Sonnenzeichnung ausgerichtet und durchgepaust. Durch die Sonnenrotation bewegt sich das Fleckengebilde im Laufe der Zeit von links nach rechts über die Sonnenscheibe hinweg. Im Falle von Abbildung 19 bewegte sich oberhalb der Ekliptik ein dipolarer Fleck vom 17. bis zum 28. Juni 1626 über die Sonnenscheibe hinweg und wurde gegen westlichen Sonnenrand hin nicht nur durch die Projektion elliptischer, sondern die Fleckengruppe scheint intrinsisch kleiner zu werden und zu verschmelzen. Für die Fleckenbewegung ein halbes Jahr später wählte Scheiner dann eine Fleckengruppe auf der Südhalbkugel der Sonne aus; diese verfolgte er (mit wetterbedingten Unterbrechungen) vom 18. bis zum 29. Dezember. Somit entspricht die Darstellung in Abbildung 19 einer Mehrfachbelichtung der Sonne, bei der die Horizontale der «Kamera» an der Ekliptik ausgerichtet bleibt. Solche Kupferstiche entstanden aus mehreren Nachbearbeitungsschritten einzelner Zeichnungen, die schlussendlich zu komplexen Visualisierungen zusammengesetzt wurden. Abgesehen von devotionalen Verzierungen hat der Illustrationsstil durchaus etwas Modernes; an der Darstellungsweise hat sich tatsächlich in den nachfolgenden Jahrhunderten nur wenig verändert.

Die wichtige astronomische Erkenntnis aus Abbildung 19 ist, dass offensichtlich die Rotationsachse der Sonne nicht senkrecht auf der Ekliptik steht. Scheiner konnte, unter anderem dank Daten wie in Abbildung 19, quantifizieren, dass die Rotationsachse der Sonne um etwa 7° gegen die Normale der Ekliptik geneigt ist. Da die Bewegung der Flecken im Juni und im Dezember ziemlich gerade über die Sonnenscheibe erfolgt, blicken wir in diesen Monaten etwa senkrecht auf die Rotationsachse. Aus vergleichbaren Bildern, in denen die Krümmung der Fleckenbewegung über die Sonnenscheibe maximal ist, ergibt sich, dass der Sonnennordpol im September am stärksten zur Erde hingeneigt ist, der Sonnensüdpol dagegen im März jeden Jahres.

Die Strukturelemente von Sonnenflecken wurden schon früh von Galilei (siehe Abb. 18 unten rechts) sehr naturnah dargestellt. In Scheiners *Opus Magnum*, der «Rosa Ursina», hat man den Eindruck, Galileis Einfluss im Illustrationsstil zu erkennen. In Abbildung 19 sind etwa die Fleckenkerne der ausgewählten großen Flecken ganz in Schwarz gedruckt, die matter erscheinenden Höfe werden dagegen durch Diagonalschraffuren angedeutet. Bei genügend guter optischer Auflösung an den Fernrohren kann man sogar gegen die Fleckenkerne hin ausgerichtete filamentartige Strahlen in den Penumbren beob-

achten. Zu Scheiners Zeit scheint jedoch die optische Qualität der verwendeten Instrumente solches zu sehen noch nicht erlaubt haben.

Sonnenflecken verändern Größe und Form auf der Zeitskala von Tagen. Für kleine Flecken kann dies sogar ihre gesamte Lebensdauer sein. Große Flecken und entsprechende Fleckengruppen können sich hingegen über mehrere Wochen oder gar Monate hinweg aufrechterhalten. Dadurch ist es denn auch möglich, Flecken, die einmal von der Erde aus gesehen hinter dem Sonnenrand verschwunden sind, erneut zu beobachten, wenn sie am Osthorizont der Sonne wieder erscheinen. Die großen Flecken spielen somit eine zentrale Rolle bei der Bestimmung der Sonnenrotationsdauer und beim Studium möglicher Eigenbewegungen der Flecken auf der Sonnenoberfläche.

Die «Rosa Ursina» zeigt neben Fleckendarstellungen auch gepunktet gezeichnete, wolkenartige Strukturen, die sich oft in der Umgebung von Fleckengebieten finden. Im Text werden solche Gebilde als *Faculae*, also Fackeln bezeichnet. Es handelt sich dabei um helle solare Aktivitätsgebiete, die bis etwa zwei Wochen lang existieren können. In der «Rosa Ursina» sind *Faculae* häufig in der Nähe des Sonnenrandes gezeichnet. Da sich die Helligkeit der Sonnenscheibe vom Zentrum gegen den Rand hin verringert, stechen die helleren Aktivitätsgebiete dort besonders hervor.

Zusammenfassend darf festgehalten werden, dass Scheiner nicht nur die Entdeckung der Neigung der Sonnenrotationsachse zugeschrieben werden kann. Er erkannte auch, dass die Flecken nicht beliebig über die Sonne hinweg verteilt auftreten, sondern dass sie sich auf parallel zum Sonnenäquator verlaufende Zonen im Norden wie im Süden zwischen etwa 35° und 5° heliografischer Breite beschränken. Zudem ermittelte Scheiner die Rotationszeit der Sonne auf etwa 25 Tage.

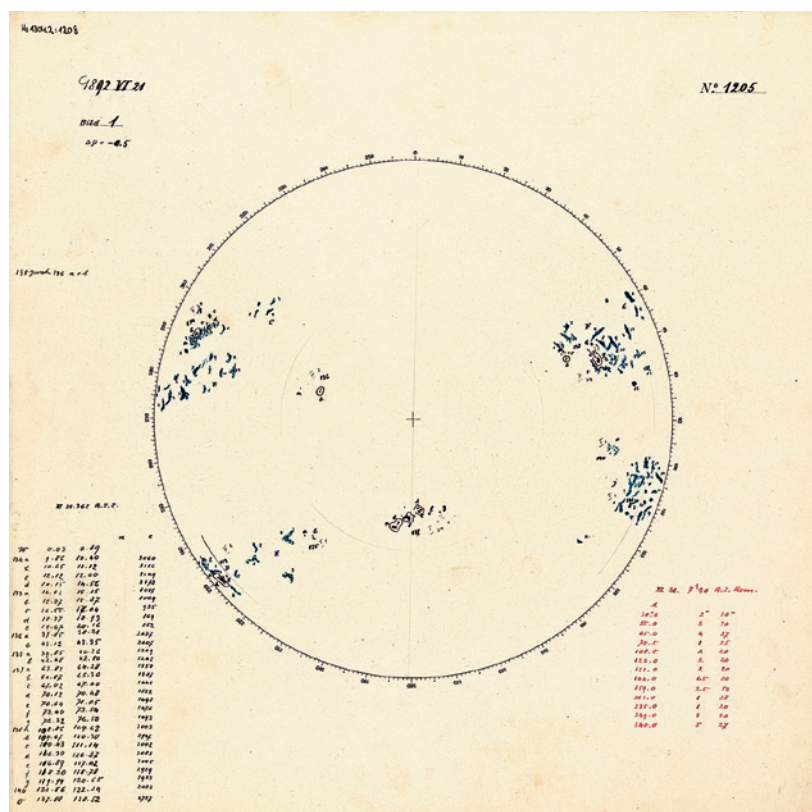
Nach dem Erscheinen der «Rosa Ursina» entwickelte sich die Sonnenfleckenforschung fast 200 Jahre lang nicht substanziell weiter. Vor allem in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts erlahmte das Interesse, entsprechend sind nur wenige und sporadische Beobachtungen aus jener Zeit bekannt. Im Nachhinein kann man dafür ein gewisses Verständnis aufbringen, denn es war dies eine Phase sehr geringer Sonnenaktivität, die heute als Maunder-Minimum bekannt ist. Intensiver wurden die Beobachtungsreihen erst wieder im 18. Jahrhundert, als die solare Fleckenhäufigkeit wieder zunahm. Dennoch zielte die Kritik von Rudolf Wolf in seiner «Geschichte der Astronomie» von 1872 auf die ersten grob 200 Jahre ab: In dieser Zeit wurde zwar beobachtet und aufgezeichnet, anfangs sogar sehr rege und systematisch, aber offenbar wurden dabei keine Übersichten gewonnen, die darauf hingedeutet hätten, dass die Sonnenfleckenhäufigkeit ein zyklisches Phänomen ist.

Samuel Heinrich Schwabe, ein deutscher Apotheker, der sich nach dem Verkauf seines Geschäfts ausschließlich den Naturwissenschaften zuwandte,

hinterließ als Privatforscher sowohl in der Astronomie wie auch der Botanik seine Spuren. Die Botanik bereicherte er durch die 1838 veröffentlichte «Flora Anhaltina», eine wertvolle botanische Bestandesaufnahme seiner Heimat. Von 1825 bis 1867 investierte Schwabe viel Zeit in seine lang angelegte Sonnenüberwachung; ursprünglich zwar nicht um die Sonnenaktivität als Phänomen per se zu protokollieren, sondern weil der befreundete Astronom Karl Ludwig Harding ihm empfahl, nach einem möglichen Planeten innerhalb der Merkurbahn Ausschau zu halten, um damit nach einer Lösung für das Problem der Apsidendrehung der Merkurbahn zu suchen. Die Analysen der über die ersten 17 Jahre hinweg entstandenen Sonnenscheibenzeichnungen mit ihren fluktuierenden Fleckenzahlen veranlassten Schwabe, ein zyklisches Verhalten der Fleckenhäufigkeit mit einer ungefähren Periode von zehn Jahren zu vermuten. Die erste Publikation dazu wurde in der Gemeinde der Berufsastronomen jedoch kaum oder bestenfalls kühl aufgenommen. Ein junger Astronom in Bern mit Interesse an der Sonne und an Geschichte nahm sich hingegen der Sache an. Dieser Astronom, Rudolf Wolf, späterer Professor am 1855 gegründeten Polytechnikum in Zürich, suchte und sammelte – neben systematischen eigenen Sonnenbeobachtungen – so viele alte Beobachtungsdaten, wie er damals aufzuspüren vermochte. Noch als Realschullehrer und Privatdozent in Bern bestätigte Wolf 1852 schließlich die Periodizitätsvermutung Schwabes dank erheblich längerer Zeitbasis und fand dabei für die Variabilität der Sonnenfleckenhäufigkeit zuverlässig die noch heute akzeptierte Periode von etwa 11.1 Jahren.

Da Wolf allem voran an Fleckenzahlen interessiert war, entwickelte er früh ein System, das selbst einen komplexen Fleckenzustand auf der Sonnenoberfläche auf eine einzige Zahl reduzierte. Dieser Index, noch heute Sonnenfleckenzahl oder auch Wolfsche Zahl genannt, sollte ein zuverlässiges Maß für die Sonnenaktivität darstellen. Ab dem Jahr 1850 veröffentlichte Wolf seine eigenen Beobachtungen in diesem System und in dieses System übersetzte er auch alte Beobachtungsblätter und Zeichnungen, die er nach und nach aufspürte, sodass sich schließlich bis in das Jahr 1749 zurück Monatsmittel der Relativzahlen bestimmen ließen.

Als Professor in Zürich beobachtete Wolf die Sonne nicht nur mit seinem schon in Bern benutzten kleinen Refraktor von vier Fuß (110 Zentimeter) Brennweite (was die Kontinuität seiner Relativzahlen garantierte), sondern er war auch die treibende Kraft hinter dem Bau einer Sternwarte am Polytechnikum. Im Jahr 1864 ging schließlich die heute als Semper-Sternwarte bekannte Beobachtungsstation in Betrieb. Unter ihrer großen Kuppel war, und ist seit 2023 wieder, ein 16 Zentimeter Refraktor von Kern/Merz installiert. In der Benennung bezieht sich «Kern» auf die Werkstätte für Präzisionsmechanik in Aarau, die den mechanischen Aufbau verantwortete. Von der weltberühmten Münchner Firma Merz & Söhne stammte dagegen die Refraktoroptik.



20 Zustand der Sonnenscheibe am 21. Juni 1892, beobachtet in der Projektion am Zürcher Kern/Merz-Refraktor, nachgezeichnet von Alfred Wolfer

Eigentlich wurde die Tatsache, dass Sonnenflecken auf verschiedenen heliografischen Breiten unterschiedlich schnell rotieren, überraschend spät erkannt. Auf diese sogenannte differenzielle Rotation der Sonne wies erst der englische Amateurastronom Christopher Harrington hin, der in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts von seiner Privatsternwarte aus die Sonnenaktivität verfolgte. Durchwegs beobachtet man, dass die Sonne in höheren heliografischen Breiten langsamer rotiert als am Äquator. Harrington erkannte schließlich auch noch, dass Sonnenflecken im Laufe eines Aktivitätszyklus zuerst in den mittleren heliografischen Breiten und später zunehmend näher am Sonnenäquator auftreten.

In Zürich wurden auch nach dem Tod von Wolf im Jahr 1893 die täglichen Sonnenbeobachtungen am kleinen Wolf'schen Vierfüßer wie auch am großen Merz/Kern-Refraktor weitergeführt. Der Vierfüßer blieb deswegen wichtig, da mit ihm eine möglichst lange, auch technisch homogene Beobachtungsreihe der Relativzahlen aufrechterhalten werden konnte. Komplementär dazu trieb Alfred Wolfer ab 1880 die heliografische Vermessung von Sonnenflecken voran. Daneben entstanden detaillierte Zeichnungen von Flecken- und Fackelgebieten, die mittels der Projektionsmethode am Kern/Merz-Refraktor auf Papier festgehalten wurden (Abb. 20).

In den Jahren 1883 bis 1995 entstanden insgesamt 29 296 Blätter, auf denen Sonnenflecken und Fackelgebiete eingezeichnet wurden. Ein repräsentatives Beispiel ist in Abbildung 20 dargestellt: Die Sonnenflecken wurden mit Bleistift auf der auf Papier vordruckten, 25 Zentimeter messenden Sonnenscheibe nachgezeichnet. Die Fleckenkerne wurden schwarz ausgemalt, die Penumbren dagegen durch Umrisslinien angedeutet. Helle Sonnenfilamente sind in Abbildung 20 mit blauem Farbstift herausgearbeitet. Von Stil und Inhalt her unterscheiden sich die Zürcher Sonnenzeichnungen nicht wesentlich von den Resultaten aus der Frühphase um Scheiner und Galilei; nun wurde einfach besser aufgelöst und genauer gezeichnet. Im Gegensatz zu Scheiners Zeiten war nämlich beim Zeichnen keine Eile mehr geboten, der Refraktor wurde der scheinbaren Sonnenbewegung automatisch nachgeführt.

Bereits ab etwa 1850 kam auch in der Astronomie die neue Technologie der Fotografie zum Einsatz. Damit begann, zumindest prinzipiell, die letzte Objektivierungsphase des Beobachtungsvorgangs. Nur die Umstellung von analog zu digital vor wenigen Jahrzehnten brachte noch eine finale Optimierung. Die chemische Entwicklung von Glasplatten und später von Filmen war jedoch aufwendig und teuer. Die Aufbewahrung von Beobachtungsmaterial dieser Art konnte schnell zu einer logistischen und finanziellen Herausforderung werden und die langfristige Sicherung der Rohdaten auf Fotoplatten war nicht gewährleistet. Daher blieb die Anfertigung von Sonnenzeichnungen noch viele Jahre lang eine valable und ökonomisch tragbare Alternative, da sie vergleichsweise geringe Anforderungen an die Archivierung stellt. Schließlich aber konnten mit der immer preiswerteren und leistungsfähigeren Digitalisierung Sonnenbilder mit hoher Kadenz aufgenommen und effizient sowie platzsparend auf elektronischen Speichermedien verwahrt werden. Ob diese Rohdaten, wie die auf Papier gezeichneten, jedoch auch in 400 Jahren noch les- und wieder verarbeitbar sein werden, wird sich erst noch weisen müssen.

Das Jahr 1852 markiert eine jener Epochen, in denen plötzlich die Zeit reif zu sein schien, dass nahezu simultan an verschiedenen Orten und unabhängig voneinander eine Erkenntnis fruchtbaren intellektuellen Bodens fand. In Bern fiel Rudolf Wolf auf, dass die Zeitskala der Variabilität des Erdmagnetfeldes mit der der Sonnenflecken korreliert (in England war es Edward Sabine, dem diese gekoppelte Veränderlichkeit auffiel). Heute weiß man, dass es sich nicht nur um eine Korrelation handelt, sondern dass ein kausaler Zusammenhang besteht. Die Erde ist keine isolierte Insel im Sonnensystem, unter anderem wird sie über das interplanetare Magnetfeld direkt von Prozessen auf der Sonnenoberfläche beeinflusst. Diese Kopplung ist von grundlegendem Interesse, um Entwicklungen auf der Erde in ihrem Zusammenhang mit der kosmischen Nachbarschaft zu verstehen. Mit der Problematik des globalen Klimawandels hat in den vergangenen Jahrzehnten die Verbesserung des Verständnisses der

heliosphärischen Einbettung und deren Einfluss auch auf das klimatische Verhalten der Erde an Dringlichkeit gewonnen.

In die Phänomenologie der großen Minima der Fleckenzyklen – das bereits erwähnte Maunder-Minimum und das nach dem englischen Naturwissenschaftler Dalton benannte Minimum zwischen etwa 1790 und 1830 – setzt man Hoffnungen, dadurch die Physik der für die Sonnenvariabilität verantwortlichen magneto-hydrodynamischen Prozesse besser verstehen zu können. Nach wie vor gibt es aber Unsicherheiten, beispielsweise bei der Geschwindigkeit, mit der etwa das Maunder-Minimum eingesetzt hat, und seiner wahren Tiefe. Noch immer wird gehofft, weitere bisher verschollene Beobachtungsnotizen zu finden, um die verbleibenden Datenlücken schliessen zu können. Es scheint jedoch so zu sein, dass nur wenige Astronomen die Sonne in jener langen Zeitspanne intensiv genug beobachteten beziehungsweise nutzbringende Rohdaten dazu noch existieren. Auch wenn nicht alles rosig ist, so ist es dennoch beeindruckend, dass die primären Beobachtungsdaten mehr als 400 Jahre in dieser turbulenten Welt überdauert haben. Somit können moderne Forschungsfragen oder neue Methoden auf die alten Daten angewandt werden, um Probleme zu lösen, die für die damaligen Astronomen außerhalb jeglichen Erkenntnishorizontes lagen.

Wie wohl auch jede andere *beobachtende* Wissenschaft, lebte die Astronomie von jeher von der Mitarbeit oft autodidaktisch gebildeter Dilettanten, von Amateuren – beide Ausdrücke stehen hier in ihrer ursprünglichen positiven Bedeutung als Liebhaber der Wissenschaft, die sich ihren Lebensunterhalt nicht mit ihrem Forschungsgebiet verdienen müssen. Viele solcher Amateure zeichnen sich durch eine lange Aufmerksamkeitsspanne und große Frustrationsresistenz aus; zudem müssen und wollen sie wohl nicht jeder wissenschaftlichen Modewelle hinterherschwimmen. Ohne diese stillen Schaffer wäre viel des damals wie heute noch wertvollen Datenmaterials nicht erhoben worden. Somit ist die intensiv beworbene neue Spezies der Citizen Scientists, wohl nicht nur in der Astronomie, bestenfalls alter Wein in neusprachlichen Schläuchen.

Dieser Essay ist dem Andenken an Rudolf Wolf (1816–1893) gewidmet. Er war Astronom, erster Bibliothekar des Polytechnikums Zürich und passionierter (Wissenschafts-)Historiker. Ohne seine Arbeiten hätten diese Betrachtungen so nicht zusammengestellt werden können. Dank gebührt auch der ETH-Bibliothek, die den ihr vermachten Wolf'schen Nachlass mit wichtigen alten wissenschaftlichen Werken über Jahrzehnte hinweg archivierte, erschloss und schließlich durch Digitalisierung allen Interessierten weltweit frei zur Verfügung stellt.

- 1 Franz Kühnert: Das Kalenderwesen bei den Chinesen. In: Monatsschrift für den Orient, 8 (1888), S. 111.
- 2 Gaius Iulius Hyginus: Arati Solensis Phaenomena et Prognostica interpretibus [...]. Köln 1569. ETH-Bibliothek Zürich, Alte und Seltene Drucke, Rar 238 (<https://doi.org/10.3931/e-rara-53915>).
- 3 Peter Apian: Astronomicum Caesareum. Ingoldstadt 1540. ETH-Bibliothek Zürich, Alte und Seltene Drucke, Rar 4287 (<https://doi.org/10.3931/e-rara-8724>).
- 4 Stanisław Lubieniecki: Theatrum cometicum [...]. Amsterdam 1666. ETH-Bibliothek Zürich, Alte und Seltene Drucke, Rar 9635 (<https://doi.org/10.3931/e-rara-1877>).
- 5 Johannes Zahn: Specula physico-mathematico-historica notabilium ac mirabilium sciendorum, in qua mundi mirabilis oeconomia [...]. Nürnberg 1696. ETH-Bibliothek Zürich, Alte und Seltene Drucke, Rar 2298 (<https://doi.org/10.3931/e-rara-15584>).
- 6 Tycho Brahe: De mundi aetherei recentioribus phaenomenis liber secundus de cometa anni 1577, 2. Aufl. Prag 1603. ETH-Bibliothek Zürich, Alte und Seltene Drucke, Rar 4458 (<https://doi.org/10.3931/e-rara-1303>).
- 7 Johannes Kepler: Außführlicher Bericht Von dem newlich im Monat Septembri vnd Octobri diß 1607. Jahrs erschienenen Haarstern [...]. Halle (Saale) 1608. ZB Zürich (<http://www.e-rara.ch/zuz/13909854>).
- 8 Pierre Petit: Von Bedeutung Der Cometen und des Gestirns. Dresden 1681. SLUB Dresden (<http://digital.slub-dresden.de/id265652588/1>).
- 9 Johannes Hevelius: Prodrum Cometicus, quo historia, cometae anno 1664 exorti cursum [...]. Danzig 1666. ETH-Bibliothek Zürich, Alte und Seltene Drucke, Rar 9472 (<https://doi.org/10.3931/e-rara-332>).
- 10 Georg Samuel Dörffel: Astronomische Betrachtung des Grossen Cometen Welcher Ausgehen den 1680. Und Angehenden 1681. Jahr Höchst Verwunderlich Und Ensetzlich Erschienen. Plauen 1681. Universitäts- und Landesbibliothek Sachsen-Anhalt (<http://dx.doi.org/10.25673/opendata2-29063>).
- 11 Johannes Hevelius: Cometographia, Totam Naturam Cometarum [...]. Danzig 1668. Library of Congress, (<https://lccn.loc.gov/73214228>).
- 12 Aleksei Nikolaevich Kriloff: On Sir Isaac Newton's Method of Determining the Parabolic Orbit of a Comet. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 85 (1925), S. 640.
- 13 Rudolf Wolf: Handbuch der Astronomie. Zürich 1890. ETH-Bibliothek Zürich, Alte und Seltene Drucke, Rar 15138 (<https://doi.org/10.3931/e-rara-332>).
- 14 August Möbius: Die wahre und die scheinbare Bahn des Halley'schen Kometen bei seiner Wiederkunft im Jahr 1835. Leipzig 1834. ETH-Bibliothek, Alte und Seltene Drucke, Rar 10252 (<https://doi.org/10.3931/e-rara-11027>).
- 15 Tycho Brahe: Astronomiæ Instauratæ Mechanica, 2. Aufl. Nürnberg 1602. ETH-Bibliothek, Alte und Seltene Drucke, Rar 1371 (<https://doi.org/10.3931/e-rara-9489>).
- 16 Hans Raeder, Elis Strömgren, Bengt Strömgren: Tycho Brahe's Description of His Instruments and Scientific Work. Copenhagen 1946.
- 17 David Skillman: Reconstructing Tycho. 2024 (<https://sites.google.com/view/reconstructingtycho/home>) (Stand 21.6.2025).
- 18 Christoph Scheiner: Rosa Ursina [...]. Bracciano 1630. ETH-Bibliothek Zürich, Alte und Seltene Drucke, Rar 10152 (<https://doi.org/10.3931/e-rara-556>).
- 19 Thomas Harriot: Harriot Papers, Vol. VIII: Spots on the Sun [HMC 241 VIII]. 1610. Bibliothek des Max-Planck-Instituts, MPIWG:FAYG83FB (<https://echo-old.mpiwg-berlin.mpg.de/ECHOdocu-View?url=/permanent/library/E3FVUFB5/index.meta>) (Stand 21.05.2026) (zuletzt aufgerufen am 21.05.26).
- 20 Christoph Scheiner: De maculis solaribus et stellis circa Iovem errantibus, accuratio disquisitio ad Marcum Velserum [...]. Augsburg 1612. ETH-Bibliothek Zürich, Alte und Seltene Drucke, Rar 5461: 3 (<https://doi.org/10.3931/e-rara-3510>).
- 21 Galileo Galilei: Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti [...]. Roma 1613. Internet Archive (<http://archive.org/details/ita-bnc-pos-00074-001>) (21.06.2025).