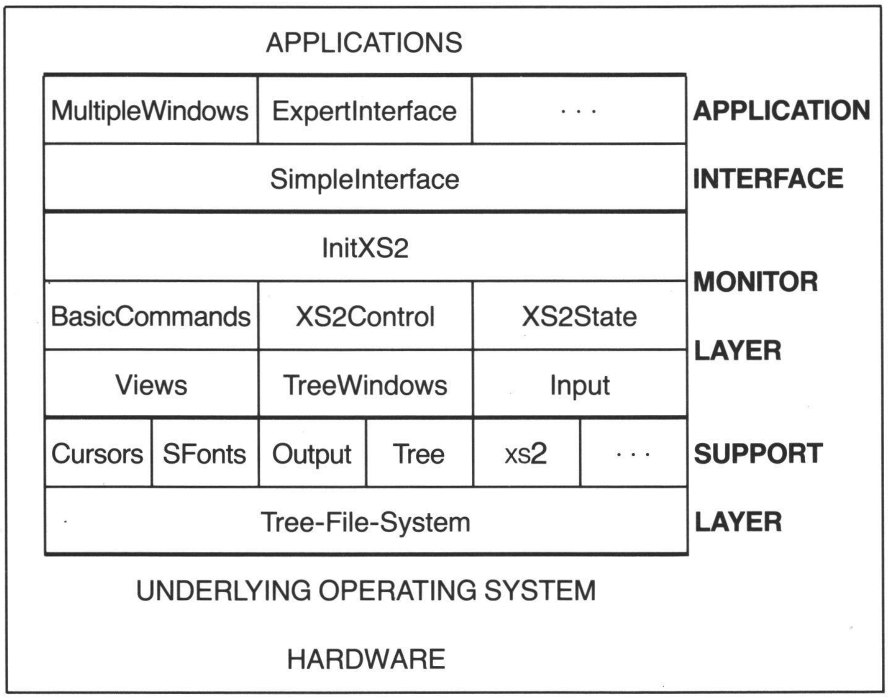

Die Software-Struktur des interaktiven Systems XS-2.

typen klassifiziert die Befehle. «Daher sprechen alle Anwendungsprogramme sowie der Kern des Systems die gleiche Sprache», sagt Jan Stelovsky.
Die ganze Syntax der Befehlssprache ist im Befehlsfenster sichtbar und kann zur Eingabe verwendet werden. Der Benutzer kann die einzelnen, im Kommandofenster sichtbaren Befehle mit der Maus auswählen. Er kann aber auch von einer beliebigen Stelle in XS-2 aus jeden Befehl ausführen, dessen Name oder dessen Abkürzung ihm bekannt ist.
Der Benutzer von XS-2 hat die Möglichkeit, die Befehle eines Anwendungsprogramms ohne Hilfe eines Programmierers auf seine Bedürfnisse zuzuschneiden. Er kann interaktiv im System Befehle umbenennen, in einem Menü anders gruppieren oder in Untermenüs aufspalten. Der Benutzer bestimmt somit selber, wie ein von ihm gebrauchtes Werkzeug beschaffen sein soll. Dadurch lernt er gleichzeitig, Kommandostrukturen für noch nicht bestehende Applikationen zu entwickeln. Ein Skelett des von ihm gewünschten Anwendungsprogramms wird für ihn automatisch erstellt. Zusätzlich können in eine Anwendung mehrere alternative Befehlsstrukturen zu einem Befehl eingefügt werden. Das System kann damit sowohl von ungeübten als auch von erfahrenen Benutzern bedient werden.
XS-2 kann man als eine Dialogmaschine auffassen, die das Betriebssystem erweitert. Ein weiterer Aspekt einer solchen Systemstruktur ist die Definition einer Standardschnittstelle zwischen der Dialogmaschine und den Anwendungsprogrammen: Die Sorge um die konsistente Dialogbehandlung wird den Anwendungsprogrammen weitgehend abgenommen. Dies erleichtert auch die Portabilität: Es genügt, die Dialogmaschine zu übertragen, um alle Anwendungsprogramme an einen neuen Standard in der Dialogführung anzupassen. Auf diese Art wurden an der ETH Zürich Werkzeuge zur Software-Entwicklung als Anwendungen unter XS-2 entwickelt, dann auf die an den Lilith-Rechnern übliche Dialogführung angepasst und schliesslich auf Macintosh-Personalcomputer übertragen.

Adresse der Verfasserin:
Valérie Kistler
Asylstrasse 92, CH-8032 Zürich

Über die Rotation der Erde

I. Bauersima

Diese Arbeit erscheint in drei Teilen, von denen der vorliegende der erste ist. Sie befasst sich in allgemein verständlicher Form mit der Rotation der Erde als einem Problem, das mit unseren Vorstellungen über den Raum und die Zeit eng verknüpft ist. In diesem Sinne nämlich werden die astronomischen und physikalischen Aspekte der Rotation der Erde erläutert. Dies geschieht historisierend, wie aus dem Inhaltsverzeichnis ersichtlich.

Ce travail paraîtra en trois parties, dont ce qui suit constitue la première. Il traite sous une forme accessible à tous de la rotation de la terre, considérée comme un problème qui est étroitement lié à l'image que nous nous faisons de l'espace et du temps. C'est dans ce sens aussi que sont abordés les aspects astronomiques et physiques de la rotation terrestre. Le tout est décrit dans son déroulement historique, ainsi que le montre la table des matières.

Inhaltsverzeichnis

Hipparchos

1. Die Rotation der Erde ist ein Phänomen, das wir mit unseren Sinnen nicht unmittelbar empfinden. Denn die Resultante der Gravitations- und Zentrifugalkräfte ist in Bezug auf die Erdoberfläche zeitlich weitgehend konstant, so wie sie es auch sein würde, wenn die Erde nicht rotierte.

Das war offensichtlich auch der Grund dafür, dass der Mensch «am Anfang» keine Notwendigkeit verspürte, die scheinbare tägliche Drehung der Himmelssphäre durch die Rotation der Erde zu erklären. Die Himmelssphäre oder genauer die Sphäre der Fixsterne war es, die sich drehte, und zwar um eine Achse, die zunächst sowohl mit der Erde, als auch mit der Himmelssphäre als fest verknüpft galt.

Diese einfache harmonische Situation wurde etwas «getrübt», als *Hipparchos 130 vor Christus* entdeckte, dass die Himmelssphäre mit der «täglichen Rotationsachse» doch nicht fest verknüpft ist. Auswertung historischer Fixsternbeobachtungen haben nämlich gezeigt, dass die Durchstosspunkte der «täglichen Rotationsachse» durch die Himmelssphäre an derselben sehr langsam wandern. Die erwähnten Schnittpunkte werden – wie bekannt – der nördliche und der südliche *Weltpol* und die durch Hipparchos entdeckte Wanderung dieser Pole die *Präzession* genannt. Die Präzession des nördlichen Weltpols erfolgt entlang eines *Kleinkreises der Himmelssphäre,* dessen Pol identisch mit dem sog. *Ekliptikpol* ist. Dieser ist wiederum identisch mit einem Durchstosspunkt der Normalen zur Ekliptikebene, d.h. der Ebene des Hauptkreises *der Himmelssphäre,* entlang dem die Sonne ihre jährliche Bewegung ausübt. Der zeitlich praktisch konstante Winkel zwischen der täglichen Rotationsachse und der Ekliptikachse heisst die *Ekliptik-Schiefe* und beträgt etwa

$$\varepsilon = 23.5°$$

Das «Hipparch'sche Weltbild» kann also wie folgt zusammengefasst werden:

2. Die Himmelssphäre dreht sich gleichzeitig um zwei Achsen, die einen zeitlich konstanten Winkel von

$$\varepsilon = 23.5°$$

einschliessen. Eine dieser Achsen – die Weltachse – ist mit der Erde und die zweite – die Ekliptikachse – mit der Himmelssphäre (d.h. mit den Fixsternen) fest verknüpft. Die Himmelssphäre dreht um die Weltachse mit einer Periode von

1 Sterntag

und um die Ekkliptikachse mit einer Periode von

26'000 Jahren.

(Der letzte Wert entspricht einer Winkelgeschwindigkeit von etwa 50"/Jahr).

Ptolemäisches Weltbild

3. Die «Ordnung am Himmel» wurde aber schon vor der Hipparch'schen Entdeckung durch andere Erscheinungen getrübt. Als Störenfriede entpuppten sich die Sonne, der Mond und einige ungehorsame «Sterne», die wir heute Planeten nennen. Alle diese Objekte bewegten sich zwischen den Fixsternen innerhalb eines relativ engen Streifens (Tierkreis) ungefähr entlang bestimmter Hauptkreise der Himmelssphäre mit nichtkonstanten Geschwindigkeiten.

Um die bedrohte Harmonie einigermassen zu retten , wies man den erwähnten «Störenfrieden» Bahnen zwischen der Erde und der Himmelssphäre zu und erklärte deren Bewegung an der Himmelssphäre zu scheinbaren, d.h. zu Projektionen reeller Bewegungen auf die Himmelssphäre, die von nun an nur mit Fixsternen besetzt wurde.

Da den alten Griechen nur gleichmässige Kreisbewegungen kosmologisch zusagten, musste die erwähnte scheinbare Bewegung eines jeden «Störenfriedes» durch zusammengesetzte gleichmässige Kreisbewegungen erklärt werden. Der Mittelpunkt des ersten Kreises fiel dabei ins Erdzentrum, und der Mittelpunkt des n-ten ($n > 1$) Kreises auf den (n-1)-ten Kreis. Der Mittelpunkt eines jeden Kreises bewegte sich dabei gleichmässig entlang des vorangehenden Kreises, und im letzten Kreis bewegte sich gleichmässig nur noch der «Störenfried». Die Radii, die Perioden und die Anzahl aller dieser Kreisbewegungen wurden dabei so gewählt, dass sie die scheinbaren Bahnen an der Himmelssphäre mit der damals erreichbaren Beobachtungsgenauigkeit restlos erklärten.

Die Reihenfolge der nun zurechtgewiesenen «Störenfriede», die wir von nun an Sonnensystemkörper nennen werden, war dann – *von der Erde nach aussen* – wie folgt festgelegt: *Mond, Merkur, Venus, Sonne, Mars, Jupiter, und Saturn.* Weit dahinter folgte nur noch die Himmelssphäre.

So herrschte wieder einmal für längere Zeit Ordnung im kosmischen Haus. Gesorgt dafür haben die griechischen Astronomen Appolonius, Hipparchus (3. bis 2. Jahrhundert vor Chr.) und Ptolemäus (2. Jahrhundert nach Chr.).

Aristarch'sches Weltbild; Kopernikus

4. Aber schon damals gab es auch Ketzer unter den Astronomen. Ein solcher war der Grieche namens Aristarchus (2. Jahrhundert vor Chr.). Dieser überlegte etwa wie folgt: Wenn schon die Bahnen der Sonnensystemkörper an der Himmelssphäre nur durch Projektionen von der Erde aus entstehen, warum soll dann der Erde nicht erlaubt werden, auch ein Sonnensystemkörper zu sein, oder mit anderen Worten, warum soll nicht erlaubt werden, dass das Zentrum des Universums anderswo als im Mittelpunkt der Erde liege. Und wenn es schon der Fall sein sollte, dann soll die Reihenfolge der Bahnen der Sonnensystemkörper von diesem Zentrum nach aussen so festgelegt werden, dass die scheinbaren Bahnen durch ein Minimum von Epizyklen (so heissen nämlich die ptolemäischen Kreise, deren jeder Mittelpunkt an den vorangehenden Bahnkreis «angehängt» wurde) erklärt werden könnten.

So hat sich dann herausgestellt, dass die Sonne das Zentrum des Universums ist und zwischen dieser und der Himmelssphäre sich die Planeten – inklusive der Erde – in Kreisbahnen bewegen. Die Reihenfolge der Planeten *von der Sonne nach aussen* wurde dabei wie folgt festgelegt: *Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter und Saturn.* Weit aussen folgte nur noch die Himmelssphäre.

In diesem Bild musste dem Mond allerdings ein Sonderstatus zugebilligt werden.

Wo lag nun das «ketzerische» im Aristarch'schen Weltbild? Bestimmt in der Verbannung der Erde aus dem Zentrum des Universums. So etwas musste doch ein Unbehagen auslösen. Dieser war aber nicht der ausschlaggebende Grund dafür, warum das Aristarch'sche Weltbild für 17 Jahrhunderte aus der Weltbühne verschwand, bis es von Kopernicus im 16. Jahrhundert neu entdeckt wurde. Es gab auch rationelle – heute würden wir eher sagen ästhetische – Gründe für die Verwerfung des Aristarch'schen Weltbildes. Diese betrafen den schon erwähnten Sonderstatus des Mondes und die Tatsache, dass die Epizyklen – wie sich später zeigte – doch nicht voll zum Verschwinden gebracht werden konnten und sich somit als etwas prinzipiell notwendiges erwiesen.

Tycho Brahes Mars-Beobachtungen

5. Die heliozentrische Theorie von Kopernicus hat einen starken Eindruck auf Johannes Kepler (1571-1630) ausgeübt. Dieser widmete in der Folge buchstäblich sein ganzes Leben den – am Schluss erfolgreichen – Versuchen, die Kopernicanische Theorie den astrometischen Beobachtungen – ohne Verwendung der Epizyklen – anzupassen. Zum Glück standen ihm die umfangreichen und für die damalige Zeit sehr genauen (± 2') Marsbeobachtungen des grossen dänischen Astronoms Tycho Brahe (1546-1601) zur Verfügung. Diese Beobachtungen wurden mit einem Mauerquadranten in Uranienburg (DK) durchgeführt. Brahe berief später Kepler nach Prag zu seinem Gehilfen.

Eine vollständige astrometrische Beobachtung eines Planeten liefert den folgenden Datensatz:

a) zwei Winkelkoordinaten und
b) die diesen Koordinaten entsprechende Zeit.

Die Winkelkoordinaten geben die Richtung zum Planeten an und die Zeit parametrisiert diese Richtung.

Die zwei Winkelkoordinaten können in einem erdfesten – oder in einem *mit der Himmelssphäre fest verbundenem* sphärischen *Koordinatensystem* gemessen werden. Der letzte Fall kommt nur indirekt zustande, indem die Winkelkoordinaten des *Planeten* durch einen Anschluss an die *Fixsterne* gewonnen (siehe 7) und die diesen Beobachtungen entsprechenden Zeiten registriert werden (siehe 8).

6. Die astrometrischen Beobachtungen eines Planeten sind somit als ein Abbildungsverfahren anzusehen, durch das dem beobachteten Planeten eindeutig eine (durch Zeit) *parametrisierte Kurve an der Himmelssphäre* zugeordnet wird. Wichtig ist dabei die Tatsache, dass die Himmelssphäre kein abstraktes Gebilde ist, sondern durch die Abbilder der Fixsterne – die für alle Zeiten a priori Punkte sind – materialisiert wird. Denn erst diese Tatsache erlaubt es, eine *operative*

Definition der erwähnten Abbildung zu geben.

7. In der Tat:
Die Positionen der Fixsterne in einem mit der Himmelssphäre fest verbundenen äquatorialen Koordinatensystem konnten *unabhängig von Zeitmessungen* mit Hilfe einer armillaren Sphäre (heute würden wir sagen – äquatorialen Montierung mit zwei unabhängigen Deklinationsachsen und zwei Fernrohren [zwei Beobachter]) oder eines azimutalen Doppelquadranten (heute würden wir sagen – eines Theodoliten mit zwei unabhängigen Horizontalachsen und Fernrohren [zwei Beobachter]) bestimmt werden. Das himmelsfeste Koordinatensystem ist dann durch die Fixsterne als beobachtbare Objekteund durch das Verzeichnis der äquatorialen Koordinaten (Sternkatolog) materialisiert (festgelegt) worden.

8. Tycho Brahe konnte somit das Fixsternsystem auch in Funktion eines «Uhren-Zifferblattes» benützen. Die Rolle des «Uhrzeigers» spielte die südliche Halbebene des örtlichewn Meridians. Dieser enthält bekanntlich die tägliche Rotationsachse der Himmelssphäre (Erde) und die örtliche Lotrichtung (Lotrichtung am Beobachtungsort). Auf diese Weise wurde der durch die Eigenrotation der Himmelssphäre (Erde) wachsende – und von der südlichen Halbebene des örtlichen Meridians gemessene Phasenwinkel (= Stundenwinkel) eines bestimmten Fixsterns zum Zeitmass postuliert. Dieser Winkel konnte direkt mit der armillaren Sphäre gemessen werden. Die auf diese Weise gemessene Zeit werden wir die *Rotationszeit* nennen.

Kepler'sches Weltbild

9. Wie schon einmal erwähnt: das Resultat Tycho Brahe's Marsbeobachtungen ist eine – durch Zeit parametrisierte – Kurve an der Himmelssphäre.
Kepler analysierte diese Kurve unter den folgenden Annahmen:
a) Die Sonne und die Himmelssphäre stehen still (= operative Definition eines ruhenden – des sog. heliozentrischen – Bezugssystems).
b) der Planet Mars und die Erde bewegen sich und
c) der den Parameterwert t tragende Punkt M' der erwähnten scheinbaren Marsbahn entsteht als Projektion des den gleichen Parameterwert t tragenden Punktes M der wahren Marsbahn von der Erde E aus zum Augenblick t.
Da die parameterisierte scheinbare Marsbahn auch von der Bewegung der Erde abhängig ist, musste Kepler in seine Analyse auch die parameterisierte Bahn der Erde miteinbeziehen. Diese stand in Form der scheinbaren Bahn der Sonne als Resultat Tycho Brahe's Beobachtungen ebenfalls zur Verfügung.

10. Die Leitidee der Kepler'schen Analyse der mit der *Rotationszeit* (s. 8) parametrisierten scheinbaren Bahnen des Planeten Mars und der Sonne zwecks Bestimmung der wahren Mars- und Erdbahn im heliozentrischen Bezugssystem (s. 9a) bestand nun in den folgenden zwei Hypothesen:
1) Die mathematische Darstellung der wahren Mars- und der Erdbahn sind formal gleich. Der einzige Unterschied besteht nur in den Konstanten oder den sog. Bahnelementen der erwähnten mathematischen Darstellungen, nicht aber in deren Form.
2) Die Bewegungen sind zeitlich periodisch, falls die wahren Bahnkurven geschlossen sind.

11. Die Analyse der Tycho Brahe'schen Beobachtungsdaten unter der letzterwähnten Leitidee hätte aber logischerweise auch die Bestimmung der Gangschwankungen der Tycho Brahe'schen Uhr (s. 8), d.h. der Unregelmässigkeiten der Rotation der Erde, wie wir heute sagen werden, miteinbeziehen müssen. Dass Kepeler auch ohne diese – eigentlich logisch notwendigen – Verallgemeinerung seiner Analyse das gesteckte Ziel erreichte, hatte er nur dem glücklichen Umstand zu verdanken, dass die Tycho Brahe'sche Uhr, d.h. die Rotationszeit (s. 8), gleichmässig lief.
Was heisst das aber «eine Uhr läuft gleichmässig»? Fragt man genauer – gegenüber welcher Uhr läuft sie denn gleichmässig, und gegenüber welcher Uhr läuft die Vergleichsuhr gleichmässig, usw., stellen wir fest, dass wir die Antwort nur in Form einer Definition des gleichmässigen Uhrenganges, d.h. der Zeit schlechthin, aussprechen können, nämlich:

12. Die Zeit t ist jener Parameter, für den die mathematischen Formen der Planetenbahnen – als mit dieser Zeit t parametrisierten Kurven – für alle Planeten gleich sind *und* durch die drei Kepler-Gesetze vollständig beschrieben werden.
Diese lauten:
1) Die Planetenbahnen sind Ellipsen (also ebene Kurven), in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.
2) Der heliozentrische Radiusvektor r (Nullpunkt = Sonne) eines Planeten überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen. (Die pro Zeiteinheit durch r überstrichene Fläche heisst die Flächengeschwindigkeit. Sie ist also für jeden Planeten konstant, aber für verschiedene Planeten im allgemeinen verschieden). Hieraus folgt speziell, dass die Umlaufzeiten U_i der Planeten konstant sind. Dies ist eine Folge der Forderung 10.2).
3) Die zweiten Potenzen der Umlaufszeiten U_i stehen im gleichen Verhältnis zueinander wie die dritten Potenzen der grossen Halbachsen a_i der entsprechendenBahnellipsen. Also:

$$U_1^2 : U_2^2 : \ldots = a_1^3 : a_2^3 : \ldots$$

14. Die ersten zwei Gesetze veröffentlichte Kepler 1610 in «ASTRONOMIA NOVA». Durch diese ist die Bewegung eines Planeten in seiner Bahnellipse vollständig beschrieben.
Wenn für einen Planeten die grosse Halbachse und die Umlaufszeit bekannt sind, sind damit auch alle anderen Bahnhalbachsen gegeben, wenn nur die entsprechenden Umlaufszeiten bekannt sind. Dies ist eine direkte Folge des 3. Gesetzes, das Kepler 1619 in «HARMONIA MUNDI» veröffentlichte.

Im Zusammenhang mit der Definition 12, 13 der Zeit sollten wir eigentlich nicht einfach den Begriff «Zeit», sondern den Begriff «Kepler'sche Zeit» benützen. Dies aus den folgenden Gründen:
1) Der logische Inhalt des Wortes Zeit ist untrennbar mit der entsprechenden physikalischen Theorie verknüpft (hier mit den drei Kepler-Gesetzen).
2) Die Übereinstimmung oder die Kongruenz der Rotationszeit (s. 8) und der Kepler'schen Zeit (s. 12) ist empirisch festgestellt worden und hat daher keinen Anspruch auf eine absolute Gültigkeit. Es könnte sich durchaus zeigen, dass diese Kongruenz «wieder verschwindet», wenn uns genauere Beobachtungen oder eine verfeinerte physikalische Theorie zur Verfügung stünden. Dies ist auch der Fall, wie sich später zeigte.
3) Jeder Parameter τ, der eine ein-eindeutige Funktion

$$\tau = f(t), \text{ z.B. } \tau = t^2 \, (t, \tau > 0)$$

der Kepler'schen Zeit t ist, erfüllt die in 10 ausgesprochene Forderung *1)*.
Mit einem solchen Zeitparameter τ hätten die drei Kepler'schen Gesetze nur eine andere Form angenommen. Insbesondere aber rotierten dann die Planeten um die Sonne und – im Falle der Kongruenz der Rotationszeit und der Kepler'schen Zeit – bestimmt auch die Erde um ihren Schwerpunkt von einer Umdrehung zur anderen mit verschiedenen Zeitperioden. Das Zifferblatt der Tycho Brahe'schen Arbeitsuhr (s. 8) hätte dann nicht periodisch geteilt werden können. Ein untragbarer Zustand, den Kepler bald korrigiert hätte, indem er nicht τ, sondern

$$t = f^{-1}(\tau),$$

d.h. jenen Parameter, der die Forderung der Periodizität der Bahnbewegungen (s. 10.2.) erfüllt, zum Zeitparameter postulierte.
Wir haben nun zwei unabhängige Definitionen der Zeit, nämlich der Kepler'schen Zeit (s. 12) und der Rotationszeit (s. 8) Diese zwei Zeiten stimmen überein, was allerdings «nur» eine empirische Tatsache ist.
So sind wir wieder bei der Rotation der Erde (Himmelssphäre) – unserem eigentlichen Thema – angelangt.

15. Der aufmerksame Leser wird jetzt aber mit Recht fragen:
Warum mussten wir uns überhaupt mit dem Problem der Planeten-Bewegungen beschäftigen, wenn für das Studium der Rotation der Erde die Himmelssphäre als räumliches Bezugssystem und zugleich als «das Zifferblatt» der Tycho Brahe'schen Uhr (s. 8) ausgereicht hätte?
Hierzu seien gleich zwei Gründe angegeben, die nun – wie ich hoffe – besser verstanden werden, als wenn wir sie bereits am Anfang erwähnt hätten:
1) Heute verfügen wir über Beobachtungsmethoden – wie VLBI – deren Genauigkeit so hoch ist, dass die Modelle der Himmelssphäre und der Erde als starrer «Körper» nicht mehr adäquat sind. Es zeigt sich nämlich, dass die Fixsterne Eigenbewegungen aufweisen, die zum Teil chaotisch und zum Teil stromartig angeordnet sind. Dadurch sind die Begriffe eines ruhenden Bezugssy-

stems und eines «nichtdeformierbaren Zifferblattes und Uhrzeigers» der Tycho Brahe'schen Uhr (s. 8) wieder in Frage gestellt und müssen neu definiert werden. Es zeigt sich aber, dass wir dazu das Sonnensystem (Sonne und Planeten) brauchen werden.

2) Der zweite Grund wehrt zugleich den Einwand ab, wir hätten doch lieber das Thema «Rotation der Erde» von den Fragen sinnvoller Definitionen der Zeit und des ruhenden Bezugssystems abkoppeln sollen, um den Fakten, die die moderne Wissenschaft erbracht hat, mehr Platz einräumen zu können. Dies ist der Einwand der Ungeduldigen. Und diesen möchte ich das folgende sagen:

Der intellektuelle Wert der Fakten liegt nicht in diesen Fakten oder derer Modernität selbst, sondern in dem Weg oder dem Denkprozess, der zu diesen Fakten führt. Ja, dieser Weg macht sogar das Verstehen der Fakten aus. Er widerspiegelt die menschliche Natur und entzieht sich daher nicht der Kommunikation. Dieser Weg ist der tiefere, wenn nicht der einzige Sinn der Wissenschaft.

Wenn man also im Rahmen eines populären Aufsatzes ohnehin auf vieles verzichten muss, dann soll es doch nicht gerade der erkenntnistheoretische Aspekt sein. Der Weg ist wichtiger als sein Ende, denn dieses gibt es vielleicht überhaupt nicht.

Entdeckungen Galileo Galilei's

16. Während Kepler fleissig sein kinematisches Modell des Sonnensystems entwickelte, führte sein Zeitgenosse Galileo Galilei (1564-1642) erste dynamische Experimente auf der Erde durch. So entdeckte er den sog. Isochronismus des Pendels und die Tatsache, dass der freie Fall für alle Körper mit gleicher Beschleunigung verläuft, um nur die wichtigsten Resultate zu erwähnen.

Galileo Galilei konstruierte auch als einer der ersten ein astronomisches Teleskop. Mit diesem entdeckte er dann

1) die Sonnenflecken und deren Umlaufsperiode auf der Sonnenoberfläche von 27 Tagen,
2) die Berge, Krater und Ebenen auf dem Mond,
3) das scheibenartige Aussehen der Planeten,
4) die Venusphasen,
5) das Ausbleiben der Marsphasen (im Ptolemäischen System folgte nach der Venus die Sonne und dann gleich der Mars),
6) vier Jupitermonde und deren periodische Verfinsterungen,
7) die Librationen des Mondes in Abhängigkeit von dessen Position am Himmel und in seiner Bahn und
8) dass die Milchstrasse aus Einzelsternen besteht.

Es waren insbesondere die Entdeckungen 4) und 5) der Venusphasen und des praktischen Ausfallens von Marsphasen, die Galileo Galilei zum entschiedenen Anhänger des Kopernicanischen (heliozentrischen) Systems gemacht haben. Dadurch geriet er dann in den bekannten Konflikt mit der Kirche.

Die drei Newton'schen Bewegungsgesetze

17. Ein Jahr nach Galileis Tod wurde im englischen Dörfchen Woolsthorpe Isaac Newton geboren (1643-1727).

Dieser, ganz offensichtlich vom axiomatischen Aufbau der Euklidischen Geometrie und von den Resultaten der dynamischen Experimente Galileo Galilei's beeindruckt, postulierte *die Existenz des absoluten Raumes mit Euklidischer Metrik und der absoluten Zeit,* indem er die folgenden drei berühmten Bewegungsgesetze aufstellte (wir geben sie hier nicht wörtlich wieder, sondern in einer didaktisch angepassten Form):

18.1) Es existiert ein sog. Intertialsystem, ein raumzeitliches Bezugssystem, in dem der Raum *physikalisch* homogen und isotrop und die Zeit homogen sind, und in dem die folgenden zwei Gesetze gelten:

2) Ein Körper erfährt im Inertialsystem unter der Wirkung einer äusseren Kraft eine Beschleunigung. Diese Beschleunigung ist der Kraft gleichgerichtet und proportional, der Masse des Körpers dagegen umgekehrt proportional.

3) Die Kräfte, die zwei Körper aufeinander ausüben, sind im Inertialsystem stets gleich gross, weisen jedoch entgegengesetzte Richtungen auf.

19. Im ersten Newton'schen Bewegungsgesetz treten die Begriffe «physikalische Homogenität und Isotropie des Raumes auf» und «physikalische Homogenität der Zeit» auf. Was bedeuten aber genau diese Bgriffe? Hier eine nähere Erläuterung:

20. Der Raum und die Zeit sind in einem bestimmten Bezugssystem *homogen,* wenn der Ausgang eines jeden physikalischen Experimentes in jedem Raum- und Zeitpunkt gleich ausfällt. Der Raum ist in dem erwähnten Bezugssystem dazu noch *isotrop,* wenn es dabei auf die Ausrichtung (Orientierung) der Experimentanordnung nicht ankommt.

21. Aus den ersten zwei Newton'schen Bewegungsgesetzen 18.1) und 18.2) kann sehr einfach das sog. *Trägheitsprinzip* hergeleitet werden. Dieses lautet:

22. Jedes räumliche Bezugssystem, das sich gegenüber dem im ersten Bewegungsgesetz 18.1) postulierten Inertialsystem gleichmässig geradlinig bewegt, ist, zusammen mit der absoluten Zeit, auch ein Inertialsystem.

(Die nachfolgenden Abschnitte 23 bis 27 sind nur für näher interessierte Leser bestimmt.)

Hamilton'sches Prinzip

23. Man kann nun aber auch umgekehrt zeigen, dass die Bewegungsgesetze 18.2) und 18.3) eine logische Folge des ersten Bewegungsgesetzes 18.1) und des Trägheitsprinzips 22 sind, wenn zusätzlich das sog. *Hamilton'sche Prinzip* mitberücksichtigt wird. Dieses lautet:

24. Für jeds geschlossene System von Massenpunkten existiert eine *Funktion* der Koordinaten und geschwindigkeiten dieser Massenpunkte, so, dass ihr *Integral* über ein beliebiges Zeitintervall für die wirklich stattfindende Bewegung dieses Systems minimal wird.

Die hier erwähnten Funktion und das Integral werden *«die Lagrange-Funktion L»* und *«die Wirkung S»* des betreffenden geschlossenen Systems der Massenpunkte genannt.

25. Der erkenntnistheoretische Wert des Hamilton'schen Prinzips 24 beruht nun darin, dass er ein übergeordnetes – d.h. von unseren momentanen Vorstellungen über die sog. Symmetrien des Raumzeit-Kontinuums unabhängiges Prinzip ist. Die erwähnten Symmetrien des Raumzeit-Kontinuums offenbaren sich in jenen Transformationsgesetzen der Raumzeit-Koordinaten, gegenüber denen die physikalischen Gesetze invariant sind. Die Gruppe aller solcher Transformationen wird die *Symmetriegruppe* der gegebenen physikalischen Theorie genannt.

Man kann zeigen, dass die Form der Lagrange-Funktion L (s. 24) für jenes geschlossene System von Massenpunkten aus dem Hamilton'schen Prinzip 24 selbst und aus der Symmetriegruppe abgeleitet werden kann. Steht einmal die mathematische Form der Lagrange-Funktion L fest, so können die Bewegungsgesetze (oder Bewegungsgleichungen) dieses Systems aus dem Hamilton'schen Prinzip 24 durch Variationsrechnung abgeleitet werden. Denn, 24 gilt genau dann, wenn die Variation δ S der Wirkung S verschwindet, d.h. wenn

$$\delta S = 0$$

Hieraus folgen schon die Bewegungsgleichungen des Systems. Die Frage der Darstellung der im System wirkenden Kräfte als Funktionen der Koordinaten, Geschwindigkeiten und Massen der Massenpunkte bleibt dabei jedoch genau so offen, wie sie es in den Newton'schen Bewegungsgesetzen 18 ist.

26. Eine bestimmte Symmetriegruppe zusammen mit dem Hamilton'schen Prinzip und dem mathematischen Modell der Kraftfunktion macht also eine physikalische – wenn nicht immer passende – Theorie aus.

27. Die *Symmetriegruppe der Newton'schen Mechanik* ist durch die Euklidität des Raumes, durch das Bewegungsgesetz 18.1 und durch das Trägheitsprinzip 22 gegeben. *Sie wird auch die Gruppe der Galileischen Transformation* genannt. Diese haben dann die folgende Form:

$$\boxed{\begin{aligned} \vec{r}' &= \vec{a} + \vec{v}t + Q\vec{r} \\ t' &= t \end{aligned}}$$

Hierbei sind

$\vec{r}$ und $\vec{r}'$ die einem bestimmten Ereignis entsprechenden Spaltenmatrizen der Koordinaten in zwei verschiedenen inertialen kartesischen Koordinatensystemen (0, $\widetilde{K}$) und (0', $\widetilde{K}$'), wobei 0 und 0' deren Nullpunkte und $\widetilde{K}$ und $\widetilde{K}$' deren orthonormalen Basen sind, t und t' — sind die diesem Ereignis – in den zwei erwähnten Inertialsystemen – entsprechende Zeiten,

$\vec{a}$ — ist die im System (0', $\tilde{K}$') gemessene «Verschiebung» 0'0 des Nullpunktes 0 gegenüber dem Nullpunkt 0' im Augenblick t = t' = 0,

$\vec{v}$ — ist die im System (0', $\tilde{K}$') gemessene Geschwindigkeit des Nullpunktes 0 des Systems (0, $\tilde{K}$) und

Q — stellt (als eine Drehmatrix) die konstante Verdrehung der Basis $\tilde{K}$ gegenüber der Basis $\tilde{K}$'dar.

Kontroverse über den absoluten Raum

(Newton, Leibnitz, Mach)

28. Kehren wir aber zu den drei Newton'schen Bewegungsgesetzen 18 zurück. Diese haben gleich am Anfang einen grossen Oponenten gehabt. Es war Leibnitz, ein Zeitgenosse Newtons. Dieser konnte sich aus philosophischen Gründen nicht mit dem Gedanken befreunden, dass ein abstraktes Gebilde wie der absolute Raum am physikalischen Geschehen aktiv teilnehmen könnte. Für Leibnitz war der Raum nichts anderes als eine Menge *möglicher* Positionen *gleichzeitig* existierender Körper. In diesem Sinne kann der Raum nur eine Menge von «Positionsbezeichnern» sein. Als solcher kann er also – isoliert betrachtet – keine physikalische Bedeutung haben. Eine saubere mechanische Theorie sollte daher unabhängig von der *Bewegung des Beobachters* (Bezugssystems) sein. Denn jede solche Bewegung kann nur relativ zu einem fiktiven Koordinatensystem beschrieben werden, das nur die Funktion der Identifikation der Massenpunkte hat. Die Newton'sche Mechanik ist aber nicht unabhängig von der Bewegung des Beobachters. Denn gilt sie für einen, dann gilt sie ganz bestimmt nicht für einen anderen Beobachter, der sich gegenüber dem ersten beschleunigt bewegt. Mit anderen Worten, Leibnitz missfiel der Gedanke, dass verschiedene Beobachter nicht «gleichberechtigt» sind und schuld daran der Raum selbst sein sollte.

29. Newton argumentierte aber mit seinem berühmten «Fassexperiment». Er füllte ein Fass mit Wasser und hängte es axial an einen torsionsmässig vorgespannten Seil auf und liess dann das ganze System frei. Die sich auflösende Torsionsspannung im Seil setzte dann das Fass in eine Rotationsbewegung.
In der ersten Phase drehte sich nur das Fass, und das Wasser stand still. Mit anderen Worten, das Fass drehte sich relativ zum Wasser, und dieses wies eine ebene, d.h. horizontale Oberfläche auf.
In der zweiten Phase der Fassrotation haben die Reibungskräfte zwischen der Fasswand und dem Wasser und im Wasser selbst dieses in eine – mit dem Fass synchrone – Rotationsbewegung versetzt. Mit anderen Worten, das Fass und das Wasser drehten zusammen wie ein fester Körper. Die Wasseroberfläche nahm dabei die Form eines Rotationsparaboloides an.
In der dritten Phase kam das Fass zum Stillstand, während das Wasser seine Rotation fortsetzte. Mit anderen Worten, das Fass drehte sich relativ zum Wasser – wie im ersten Fall – nur hat jetzt die Wasseroberfläche die Form eines Rotationsparaboloids gehabt, währenddem sie im ersten Fall eben war.
Dies zeigte deutlich, dass es nicht die relative Rotation des Fasses und des Wassers, sondern die Rotation des Wassers selbst ist, die die Form der Wasseroberfläche bestimmt. Da die oben beschriebene Detektion der Wasserrotation durch deren Oberflächenform eine Realität ist, und da jede Rotation erst durch das Bezugssystem, in dem sie beobachtet ist, als solche verstanden wird, ist auch die Existenz eines solchen Bezugssystems eine Realität. Diese hat dann Newton «der absolute Raum» benannt.

30. Vor solchem Argument musste auch Leibnitz kapitulieren. Die philosophische Schwäche der Auffassung des absoluten Raumes als einer physikalischen Realität, die beteiligt ist an der Entstehung inertialer Kräfte, wurde damit aber nicht aus der Welt geschafft und wurde des öfteren immer wieder erwähnt.

31. Auch Mach (1883) hat die Frage gestellt, wie kann überhaupt ein abstraktes Gebilde wie Geometrie verantwortlich für Kräfte sein, die z.B. den Zylinder einer Zentrifuge zum Bersten bringen können. Nach seiner Meinung ist es die gesammte im Kosmos vorhandene Masse, die für die Entstehung der Inertialkräfte (z.B. Beschleunigung oder Zentrifugalbeschleunigung) verantwortlich ist. Machs Ideen können grob wie folgt zusammengefasst werden:

32 a) Der Raum ist nicht eine Realität für sich selbst. Er ist nur die Totalität der Entfernungsrealisationen zwischen allen Massenpunkten.
b) Die Trägheit eines Massenpunktes ist nur eine Folge einer – *leider bis heute nicht näher spezifierten* – Wechselwirkung dieses Massenpunktes mit allen übrigen Massen im Weltall.
c) Der lokale Standard der *«Beschleunigung Null»* ist durch einen bestimmten «Mittelwert» der Bewegungen aller Massen im Universum determiniert.
d) Das einzige, woran es in der Mechanik ankommt, ist die *relative* Bewegung *aller* Massen.

33. Nach Mach ist also der Begriff «absoluter Raum» nur ein mystifizierend wirkendes Synonymum für seinen «lokalen Standard der Nullbeschleunigung», der ausschliesslich durch alle kosmischen Massen determiniert ist.
Wir werden daher den kürzeren Begriff «absoluter Raum» in dem zuletzt erwähnten Sinne benützen.

34. Dies alles bietet aber noch kein Rezept dafür, wie der absolute Raum messtechnisch verfügbar gemacht wird. ein solches Rezept brauchen wir, denn die Rotation der Erde relativ zum absoluten Raum muss zunächst gemessen werden, bevor sie modellmässig untersucht werden kann.

35. Ein gegenüber der Erde ruhendes Fass mit Wasser verrät aber die Erdrotation nicht. Denn die Krümmung der Wasseroberfläche ist nicht nur durch die Erdrotation, sondern auch durch die Gravitationskräfte der Erde, des Mondes und der Sonne geprägt. Ausserdem ist die Oberfläche des Wassers im Fass so klein, dass wir kaum imstande wären, eine messbare Krümmung festzustellen. Man müsste schon ein grösseres «Fass» – nämlich die Erde selbst – «einsetzen» und die Krümmung deren Ozeane zur Bestimmung der Erdrotation – oder genauer gesagt – der Winkelgeschwindigkeit der Rotation der Erde verwenden. Abgesehen davon, dass wir ausserstande sind, zum beliebigen Augenblick die Form der Ozeanoberfläche auszumessen, würden wir an der Unkenntnis vieler anderer Faktoren, die die Ozeanoberfläche prägen, scheitern. Es sind dies die Dichteverteilung im Erdinneren (diese prägt das äussere Gravitationsfeld der Erde), die Dichteverteilung im Wasser selbst, die Ozeanströmungen, die Gezeiten, die Erdathmosphäre usw. Mit einem Satz, die Erde ist ein zu kompliziertes physikalisches System, um sich durch *seine* Beobachtung die messtechnische Verfügbarkeit des absoluten Raumes und der absoluten Zeit zu erhoffen.
Wie wir später sehen werden, verfährt man gerade umgekehrt. Man bestimmt mit genauen Methoden die Rotation der Erde und prüft dann, inwiefern sich diese überhaupt wie ein Fass mit dem Wasser verhält, d.h. inwiefern die *gesamte* Erde im hydrostatischen Gleichgewicht ist.

Fortsetzung in der nächsten Ausgabe VPK 4/87