

# Von der Scheibe zum Multiversum

## Weltbilder im Wandel der Zeiten – Der Weg weg vom Besonderen

**D**ie Vorstellung davon, was unsere Welt ist, hat sich entsprechend der Erkenntnisfähigkeit der Menschen gewandelt. Dieser Wandel weist eine bemerkenswerte Eigenschaft auf: Bei jedem Schritt ging es von etwas Speziellem zu etwas Allgemeinerem. Das Besondere würde ersetzt durch ein umfassenderes Normales. Stößt man dabei auf Probleme, liegt es an den Fortschritten wissenschaftlichen Arbeitens, diese zu überwinden.

Mit „Welt“ ist nicht einfach nur unsere Erde gemeint. Vielmehr geht es um die Gesamtheit von Raum und Zeit und allem, was darin zu finden ist, um Energie und Materie.

Der ursprüngliche Begriff „Welt“ setzt sich aus den germanischen Wortwurzeln „wer“ (Mann) und „alt“ (seit langer Zeit bestehend) zusammen. Daraus entwickelte sich die Bedeutung „Zeitalter“, aber auch große Menschenansammlungen wurden als „Welt“ bezeichnet; „weltgewandt“ etwa deutet noch darauf hin. Der Plural „Welten“ kam erst im 16. Jahrhundert auf, zu sehen an den Spezifizierungen „jenseitige Welt“ oder auch „Unterwelt“; auch „Weltenkörper“ als Himmelsobjekte wurden benannt.

Schon diese Wortherkunft zeigt, dass die Menschen einfach ihr Umfeld einordnen wollten, mit den ihnen zur Verfügung stehenden Mitteln. Das waren die menschlichen Sinne, vornehmlich der Sehsinn: Soweit das Auge reicht eben. Natürlich spielte auch eine Rolle, wie weit man sein Umfeld erkunden konnte, zu Fuß oder auch mit Pferden und Schiffen. Auch die Kommunikation zwischen den Menschen war entscheidend für ein Weltbild.



Abbildung 1: Die Welt als Scheibe: Rekonstruktion der „Weltkarte des Hekataios von Milet“, 6. Jh. v. Chr.

Schließlich konnte einer weiter gehen, fahren als ein anderer – und dann davon berichten.

Naturgemäß waren all diese Möglichkeiten zu Beginn der menschlichen Evolution begrenzt, und man nahm für unbekannte Bereiche das an, was man selbst erlebte: Die Erde war eine Fläche mit Bergen, umgeben von viel Wasser. Es ist also nicht verwunderlich, dass man sich die Welt als Scheibe vorstellte; man befand sich auf einer flachen Erde.

Im Weltbild der homerischen Epen war die Erde eine von Wasser des Okeanos umflossene Scheibe (Abbildung 1), die von der Halbkugel des Himmels überwölbt ist; man sprach ja auch vom „Himmelszelt“. Oftmals wird auch der Begriff des Erdenkreises verwendet, z.B. auch in der Bibel. Im Koran wird die Erde mit einem Teppich verglichen. Entsprechende Koranverse wurden von Islamsgelehrten gemeinsam mit

der Überzeugung von der Unfehlbarkeit des Koran als Grund verstanden, die Kugelform der Erde abzulehnen. Allerdings ist die Vorstellung, dass das mittelalterliche Weltbild allgemein von einer flachen Erde ausgeht, verbreitet, aber falsch. Tatsächlich lehrte schon Aristoteles die Kugelform der Erde. Dieser griechische Universalgelehrte (384-322 vor unserer Zeitrechnung) galt aber im Hoch- und Spätmittelalter als Autorität in Fragen der Naturwissenschaft.

### Berechnung des Umfangs der Erde

Zudem gelang bereits einem griechischen Gelehrten nur rund 100 Jahre später der Nachweis, dass die Erde eine Kugelform hat: Eratosthenes von Kyrene, geboren zwischen 276 und 273 v. Chr. in Kyrene; gestorben um 194 v. Chr. in Alexandria; er ermittelte erstaunlich genau den

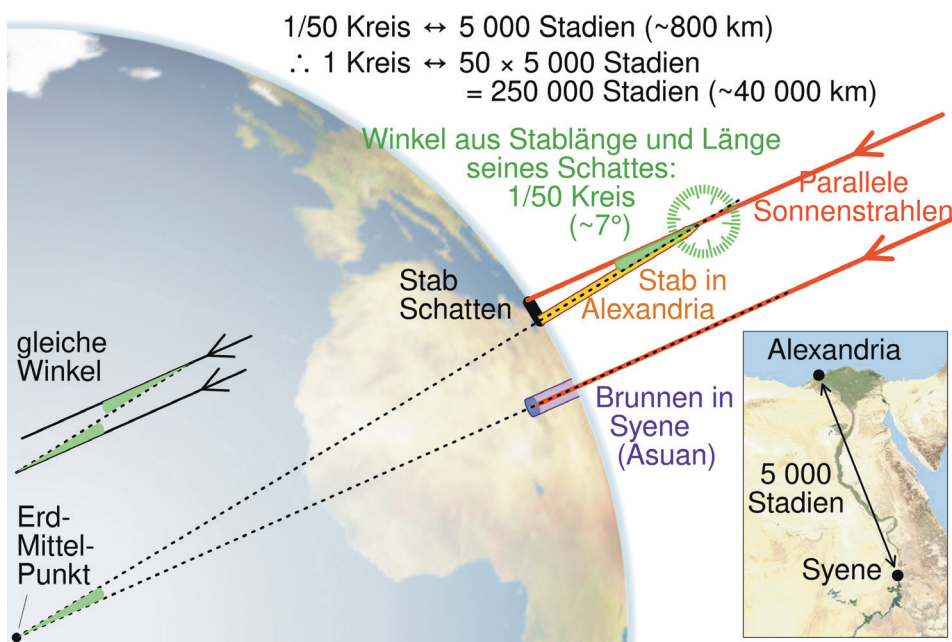


Abbildung 2: Methode des Eratosthenes zur Berechnung des Erdumfangs (Abb.: Wiki / MikeRun CC BY-SA 4.0).

Erdumfang, eben unter der Annahme, dass diese eine Kugel sei. Angestoßen wurde diese herausragende wissenschaftliche Erkenntnis durch eine Beobachtung, und unterstützt durch Mittel der damals Herrschenden.

Die spezielle Beobachtung führte zu landesweiter Bekanntheit der altägyptischen Stadt am Nil, Syene – das heutige Assuan. Es gab dort einen Brunnen, in dem sich am Grunde im Brunnenwasser das Sonnenlicht spiegelte, nicht jedoch die Wände beleuchtet wurden, und zwar nur am Tag der Sommersonnenwende am 21. Juni. Die Sonne stand also direkt über dem Brunnen.

In Alexandria jedoch warf die Sonne zu genau diesem Zeitpunkt einen längeren Schatten eines hohen Obelisken. Eratosthenes arbeitete dort als Direktor der berühmten großen Bibliothek. Seine Idee: Wechselwinkel an Parallelen sind gleich groß. Kennt man den Winkel an der Spitze des Obelisken, gebildet durch die Länge des Obelisken und die seines Schattens, kennt man auch den Mittelpunktswinkel des Kreisbogens von Alexandria nach Syene (Abbildung 2).

Um dann den Erdumfang zu bestimmen, musste man natürlich noch die Entfernung zwischen den beiden Orten ermitteln; sie

beträgt übrigens 835 km. Das geschah wohl durch Unterstützung des Königs Ptolemäus III. Er beauftragte dazu nämlich ausgebildete Spezialisten, Bematen. Das waren Schrittzähler zur Ermittlung von Entfernungen durch Zählen von Schritten. Sie arbeitet so genau, dass man heute annimmt, sie benutzten bereits Hodometer, radartige Geräte zum Messen einer zurückgelegten Entfernung. Solche Geräte wurden von Heron von Alexandria beschrieben.

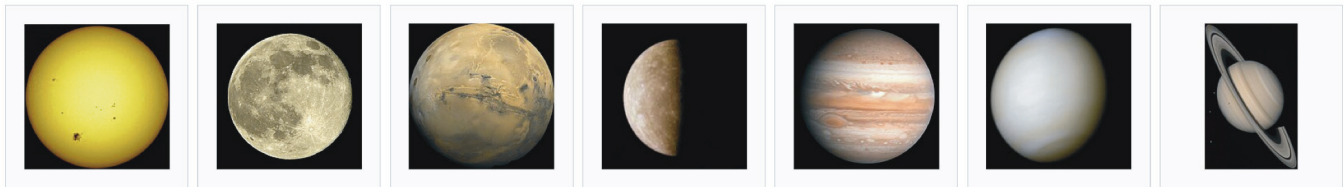
Die ermittelte Länge wurde damals in „Stadien“ angegeben. Als Entfernung Alexandria – Syene wurden 5000 Stadien angegeben. Dummerweise gab es damals mehrere „Stadien“; man kennt die Länge nicht ganz genau; ungefähr betrug sie 160 Meter. Bei allen Annahmen zu Fehlergrenzen – Alexandria und Syene liegen auch nicht wie damals angenommen auf einem Meridian, was auch zu Abweichungen führt, auch die Wendekreislage der Orte war nicht exakt – kommt man allerdings auf dennoch erstaunlich genaue Werte des Erdumfangs. Im günstigsten Fall betrug dieser nach den Berechnungen damals 39 600 km, nur ein Prozent zu wenig, im ungünstigsten Fall sollen es 16 Prozent zuviel gewesen sein. Heute weiß man: Der Erdumfang misst 40 075 km

am Äquator, 40 008 km über die Pole.

## Geozentrisches Weltbild

Die Kugelgestalt der Erde war den Menschen also schon seit langer Zeit bekannt. Sie setzte sich nach und nach durch, was nicht verhindern kann, dass einige Esoteriker und Bibeltreue auch heute noch an dem Modell der flachen Erde festhalten. In den USA vertrat die Flat Earth Society die Lehre einer scheibenförmigen Erde als einzig konform mit der Bibel. Das Bestehen der Organisation ist jedoch seit dem Tod ihres letzten Präsidenten ungewiss. Der Glaube an die flache Erde zählt heute zu den Formen der Wissenschaftsleugnung. Seit etwa 2015 erlebt die These der flachen Erde wieder eine gewisse Verbreitung durch diverse Verschwörungsideologen im Internet. Eine 2018 in den USA durchgeführte Umfrage unter 8000 Menschen ergab, dass etwa ein Sechstel der Bevölkerung nicht völlig von der Kugelform der Erde überzeugt ist [1].

Was die Erscheinungen am Himmel anging, ließ die Menschen jedoch lange Zeit ratlos sein. Zunächst konstruierte man das genannte Himmelszelt mit leuchtenden Objekten am Himmel, unterschieden in Mond, Fixsterne und Wandelsterne, von denen man fünf kannte: Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn. Zusammen mit den sich ebenfalls als die gleichförmige Bewegung der Fixsterne drehenden Sonne und Mond waren sie den Menschen so wichtig, dass sie die Wochentage nach ihnen benannten (Abbildung 3). Man erweiterte den Gedanken eines Himmelszelts über einer Scheibe nun entsprechend der Kugelform der Erde hin zu einem Modell von durchsichtigen, kugelförmigen Kristallschalen um die Erde, die mit jeweils einem dieser Himmelskörper besetzt waren und sich um die Erde drehten. Zu jenen Zeiten galten nur Kreise und Kugeln als vollkommen geometrische Figuren, und das Weltall musste eben vollkommen sein;



|                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Der erste Tag galt als Tag der <b>Sonne</b> (dt. <b>Sonntag</b> , engl. Sunday, lat. dies solis); die franz. Bez. dimanche, die italien. Bez. domenica und die span. Bez. domingo (= Tag des Herrn) gehen auf christlichen Einfluss zurück | Der zweite Tag galt als Tag des <b>Mondes</b> (dt. <b>Montag</b> , engl. Monday, lat. dies lunae, franz. lundi, italien. lunedì, span. lunes) | Der dritte Tag galt als Tag des <b>Mars</b> (lat. dies martis, franz. mardi, italien. martedì, span. martes), dessen Gott dem germanischen Gott <b>Tyr</b> oder <b>Ziu</b> entspricht, woher sich dt. <b>Dienstag</b> und engl. Tuesday ableiten. | Der vierte Tag galt als Tag des <b>Merkur</b> (lat. dies Mercuri, franz. mercredi, italien. mercoledì, span. miércoles), dessen Gott dem germanischen Gott <b>Wodan (Odin)</b> gleichgesetzt wurde, woraus sich engl. Wednesday ableitet, die dt. Bezeichnung <b>Mittwoch</b> geht auf christlichen Einfluss zurück. | Der fünfte Tag galt als Tag des <b>Jupiter</b> (lat. dies Iovis, franz. jeudi, italien. giovedì, span. jueves), dessen Gott mit dem germanischen Gott <b>Donar (Thor)</b> gleichgesetzt wurde, woraus sich dt. <b>Donnerstag</b> und engl. Thursday ableiten. | Der sechste Tag galt als Tag der <b>Venus</b> (lat. dies veneris, franz. vendredi, italien. venerdì, span. viernes), die mit der germanischen Göttin <b>Frija (Frigg oder Freyja)</b> gleichgesetzt wurde, woraus sich engl. Friday und dt. <b>Freitag</b> ableiten. | Der siebte Tag galt als Tag des <b>Saturn</b> (lat. dies Saturni, engl. Saturday); die Bezeichnungen <b>Samstag</b> , franz. samedi, italien. sabato und span. sábado gehen dagegen auf den jüdischen <b>Sabbat</b> zurück; die norddt. Bezeichnung <b>Sonabend</b> bezieht sich auf die zeitliche Lage vor dem Sonntag. |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

entsprechend waren die Himmelskörper Kugeln. Das war die Idee des geozentrischen Weltbildes; die Erde war also immer noch etwas Einzigartiges. Dieses Weltbild formte bereits Aristoteles, rund 400 Jahre später auch der griechische Mathematiker und Philosoph Claudius Ptolemäus (ca. 100-160). Seine Kugelschalen beinhalteten Objekte in der folgenden Reihenfolge: Mond, Merkur, Venus, Sonne, Mars, Jupiter und Saturn. Dann folgte noch die Kugelschale der Fixsterne (Abbildung 4).

Dass sich die Himmelskörper um die Erde drehten war damals offensichtlich: Die Erde musste fest stehen, denn warf man beispielsweise einen Stein in den Himmel, landete er an ursprünglicher Stelle auf der Erde. Niemand hatte beobachtet, dass sich die Erde zwischenzeitlich darunter hinweg bewegte. Zudem galt: Alles fällt in Richtung des Zentrums des Universums; das hatte Aristoteles so definiert. Da alles zur Erde fiel, musste diese das Zentrum des Universums sein.

Dumm nur, dass sich mit diesem Weltbild einige Bewegungen der Wandelsterne, der Planeten, nicht erklären ließen. Auch Ptolemäus beobachtete, dass Saturn eine Schleifenbewegung durchführt, so, als würde sich der Planet eine kurze Zeit rückwärts bewegen. Irregularitäten in den Planetenbewegungen versuchte daher bereits der griechische Mathematiker und Philosoph Eudo-

xos von Knidos (ca. 360 v.Chr.) mit einer Reihe von zusätzlichen Sphären zu lösen.

Daher ergänzte er sein Weltbild um Epizykel (Abbildung 4 unten sowie Abbildung 5). Das sind Kreise, deren Mittelpunkte sich auf anderen Kreisen befinden. Damit entstand das Ptolemäus'sche Weltbild, eine verfeinerte Form des geozentrischen Weltbildes. Damit erklärbar wurden auch die Helligkeitsschwankungen der Planeten, die auf Änderung ihrer Entfernung von der Erde schließen lassen.

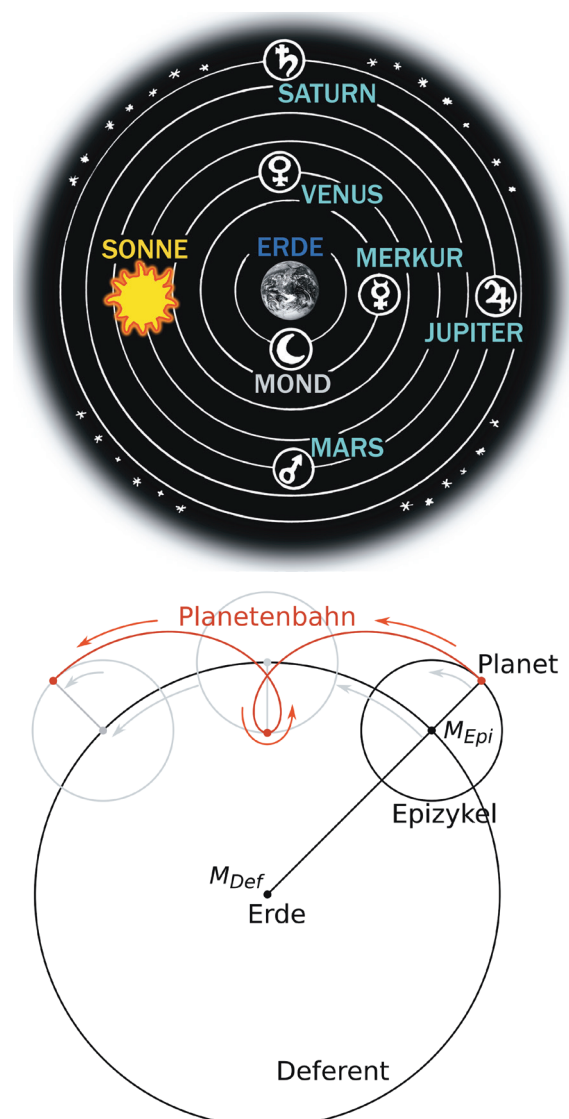
### Heliozentrisches Weltbild

Das ptolemäische Weltbild hatte über tausend Jahre lang Bestand – nicht zuletzt auch, weil es mit den religiösen Überzeugungen in Einklang stand.

Zu einem heliozentrischen Weltbild gab es wohl auch schon im antiken Griechenland Überlegungen; genaues ist nicht bekannt. In Indien hingegen dachte der Astronom und Mathematiker Aryabhata (476–550) sehr fortschrittlich. Er nahm an, dass die Erde sich um ihre eigene Achse dreht, und entdeckte, dass Mond und Planeten das Licht der Sonne reflektieren. Es wird vermutet, dass er ein heliozentrisches Weltbild vertrat, denn in seinem Modell zur Berechnung der Planetenpositionen gab er für Venus und Merkur die Umlaufzeiten um die Sonne an, nicht um die Erde. Er machte auch sehr genaue as-

Abbildung 3: Sonne, Mond und die fünf deutlich sichtbaren Planeten waren Namensgeber für die sieben Wochentage (Abb.: Wikipedia).

Abbildung 4: Das ptolemäische System mit der Erde im Zentrum; ganz unten: Detail des Systems mit Epizykel.



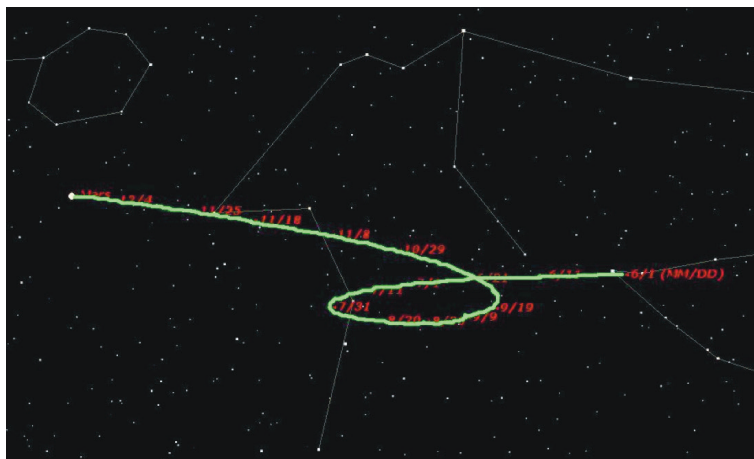


Abbildung 5: Schleifenbahn (grün) des Mars vor den Fixsternen. 1.6. (rechts) - 8.12.2003 (links, weißer Endpunkt), Schleife 20.6. - 10.10. (Abb.: Wiki / Robert J. Ballantyne CC BY-SA 2.5).

tronomische Messungen; letztlich setzten sich seine Erkenntnisse aber nicht durch.

Ein Wechsel im Weltbild bahnte sich erst im 15. Jahrhundert an. Georg von Peurbach (1423-1461) sowie insbesondere sein Schüler Johannes Müller, später lateinisch genannt Regiomontanus (das bedeutet „der Königsberger“; 1436-1476) hinterfragten das geozentrische Weltmodell. Eine treibende Kraft war die genauere Bestimmung von Positionswerten sich bewogender astronomischer Objekte für einen bestimmten Tag. Solche Werte nennt man Ephemeriden.

Hier tat sich Regiomontanus als einer der Ersten hervor. Sein *Calendarium* für die Zeit von 1475 bis 1531 mit neu berechneten Positionsangaben von Sonne und Mond, einschließlich präzisen Zeitbestimmungstabellen, sowie die *Ephemerides astronomicae* ab anno 1475–1506 wurden für die Seefahrer seiner Zeit unverzichtbare Hilfsmittel – auch wegen der Zuverlässigkeit seiner Berechnun-

gen und der Druckqualität. Seine Ephemeriden haben durch die verbesserten Navigationsmöglichkeiten die Entdeckungsfahrten von Seefahrern wie Christoph Columbus oder Vasco da Gama erheblich erleichtert. Regiomontanus war ein typischer Vertreter des Renaissance-Humanismus: Eigene Beobachtung und Vergleich mit den Ergebnissen der antiken Wissenschaft nach Aristoteles sollten die Astronomie erneuern. Mit dieser Haltung wurde er der wesentliche Wegbereiter des kopernikanischen Weltbildes.

## Nikolaus Kopernikus: Noch den Kreisbahnen verhaftet

Dies folgte dann eben mit Nikolaus Kopernikus (1473-1543). Er war Domherr des Fürstbistums Ermland in Preußen sowie Astronom und Arzt, der sich auch der Mathematik und Kartographie widmete. In seinem Hauptwerk *De revolutionibus orbium coelestium* von 1543 beschreibt er ein heliozentrisches Weltbild, nach dem die Erde ein Planet sei, sich um ihre eigene Achse drehe und sich zudem wie die anderen Planeten um die Sonne bewege. Auch stand darin eine Erklärung der Präzession des Frühlingspunktes durch eine langsame Bewegung der Erdachse. Die Rezeption der Werke führte zu dem Umbruch, den man als „kopernikanische Wende“ bezeichnet.

Es war tatsächlich eine Wende hin zu einem allgemeineren Denken hinsichtlich der Bedeutung der Erde: Sie wurde ein Planet neben anderen. Antrieb für die Überlegungen von Kopernikus war jedoch vorwiegend der Wunsch, das ziemlich komplizierte Sphärengebilde von Ptolemaeus mit seinen vielen Epizykel zu vereinfachen. Kopernikus ließ also die Planeten die Sonne umkreisen, bemaß der Erde Eigenrotation zu. Er betonte die „Harmonie“ des Weltbilds, da die Planeten die Sonne auf einfachen Kreisbahnen umlaufen. Dieses sei „leichter begreiflich“, als die Bewegungen der Himmelskörper wie bisher in eine „fast endlose Menge von Kreisen zersplittert“ zu sehen.

Allerdings machte der preußische Astronom keine ganze Sache; er war immer noch der Auffassung, dass die kosmische Ordnung zugleich eine moralische Ordnung darstellt. Dementsprechend bewegten sich auch in seinem Modell die Planeten auf perfekten Kreisbahnen. Das hatte zur Folge, dass Unstimmigkeiten mit den Beobachtungen weiterhin durch Epizykel erklärt werden mussten. Kopernikus verwendete in seinem Weltsystem immer noch 48 Epizykel. Tatsächlich war das ptolemäische Weltbild in der Genauigkeit seiner Bahnvorhersage dem heliozentrischen Weltbild des Nikolaus Kopernikus überlegen.

## Johannes Kepler: Ellipsen

Abhilfe und wirkliche Vereinfachung schaffte erst der deutsche Astronom und Philosoph Johannes Kepler (1571-1630). Seine Entdeckung, dass die Planeten auf Ellipsen um die Sonne laufen, führte dann zu einem damals ausreichend genauen und unter Astronomen allgemein akzeptierten Modell des kopernikanischen Weltbildes.

Kepler formulierte drei Gesetze:

1. Die Bahn eines jeden Planeten ist eine Ellipse, wobei die Son-

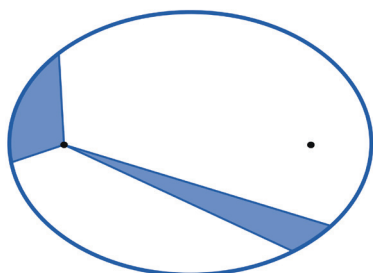


Abbildung 6: Grafische Darstellung des 2. Keplerschen Gesetzes.

ne in einem der beiden Brennpunkte steht.

2. Die Geschwindigkeit der Planeten auf ihrer Bahnellipse ist nicht konstant, sondern variiert so, dass ein von der Sonne zum Planeten gezogener Fahrstrahl in gleichen Zeiten gleich große Flächen überstreicht (Abbildung 6).
3. Die Quadrate der Umlaufzeiten je zweier Planeten verhalten sich zueinander wie die Kuben (die dritten Potenzen) der großen Halbachsen ihrer Bahnellipsen.

Diese Gesetze sind insofern besonders bemerkenswert, als dass der englische Gelehrte Isaac Newton (1643-1727) erst über einhundert Jahre später – 1687 – sein Gravitationsgesetz veröffentlichte, nach dem jeder Massenpunkt auf jeden anderen Massenpunkt mit einer anziehenden Gravitationskraft einwirkt. Kepler kannte demnach nicht die Theorie der Gravitation, die die Planeten in ihrer Umlaufbahn hält. Stattdessen spekulierte er, dass von der Sonne eine sich strahlenförmig ausbreitende, magnetartige Wirkung ausging, die Anima motrix. Kepler distanziert sich damit als erster vom aristotelischen Konzept des sogenannten ersten Bewegers, den Urgrund, der alle Sphären des Kosmos durchströmt, und überall gleich wirkt. Das war ein fundamentaler Schritt weg von aristotelisch-metaphysischen Konzepten der Seele hin zu dem der Kräftelehre. Kepler blieb allerdings – obwohl er die quadratische Proportionalität der Anziehung der Planeten erkannte – die Masseabhängigkeit verborgen.

### Entdeckung der Milchstraße

Für die nächste Verallgemeinerung ist die Entwicklung der Technik maßgeblich. Der Grund: Erst die Erfindung des Fernrohrs brachte den Weltraum den Menschen näher; heute sind es riesige Teleskope (Abbildung 7). Bei den Fernrohren haben übrigens

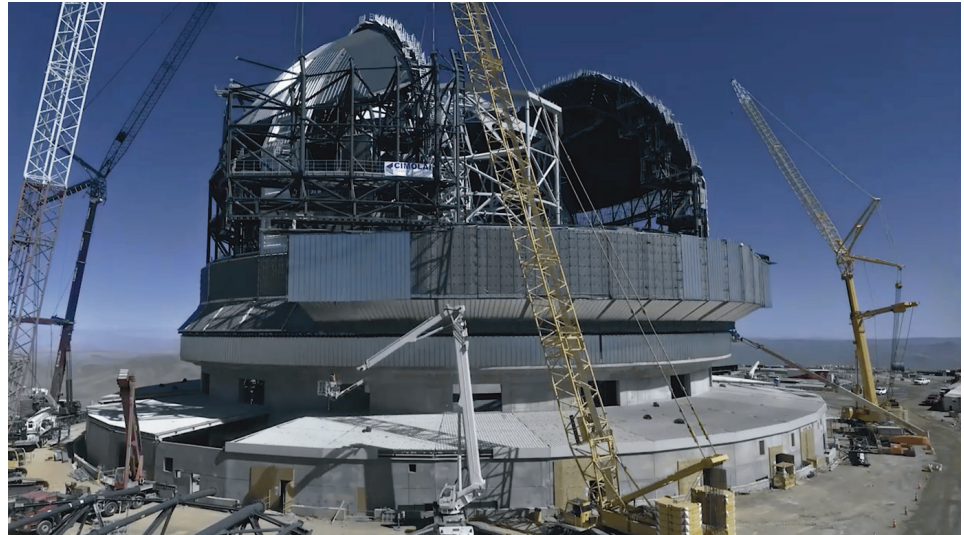


Abbildung 7: Seit dem Galilei-Fernrohr mit seiner 20-fachen Vergrößerung erschloss man nicht nur andere Frequenzbereiche und Signalquellen zur Erkundung des Universums, etwa Infrarot-Teleskope, Radioteleskope oder sogar Gravitationswellendetektoren, sondern man verbesserte auch die optischen Teleskope. Bald gibt es von ihnen einen neuen Rekordhalter: Das Extremely Large Telescope, ELT. Es erhält einen Hauptspiegel mit 39 Metern Durchmesser, der aus 798 sechseckigen Spiegelementen zusammengesetzt sein wird. Es entsteht auf Cerro Armazones, ein Berg mit 3060 m Höhe in der chilenischen Atacamawüste. Im März 2029 soll es in Betrieb gehen. Das Foto zeigt den Bau am 24. Februar dieses Jahres (Abb.: ESO).

sowohl Kepler als auch der italienische Astronom und Physiker Galileo Galilei (1564-1642) mitgemischt. Demnach erfanden bzw. entwickelten beide bestimmte Fernrohre weiter (Galilei- bzw. Kepler-Fernrohr). Beide Entwicklungen starteten zu Beginn des 17. Jahrhunderts (Galilei-Fernrohr 1608, Kepler-Fernrohr 1611).

Die Erfindung des Fernrohrs machte Verifizierungen kosmologischer Vorstellungen möglich, die zuvor als Spinnerei oder auch Gotteslästerung abgetan wurden. So endete das Leben des italienischen Priesters und Philosophen Giordano Bruno (geb. 1548) am 17. Februar 1600 in Rom auf dem Scheiterhaufen, von der Inquisition der Ketzerei und Magie für schuldig befunden; warum? Seine kosmologischen Vorstellungen erweiterten das damals neue kopernikanische Modell gedanklich. Er verwarf das noch bei Kopernikus vorhandene Bild der konzentrischen Sphären eines ja bereits heliozentrischen Modells, auf denen dennoch alle Himmelskörper angeordnet sind, wobei die äußerste Sphäre alle Fixsterne trägt und die Welt vom Reich Gottes und der Seligen abgrenzt. Bruno lehrte da-

gegen, dass die Fixsterne unterschiedlich weit entfernte Sonnen sind, die von eigenen Planeten umkreist werden, und dass auf diesen Planeten eigenes Leben möglich sei, auch menschliches. Bruno war von der räumlichen und zeitlichen Unendlichkeit der Welt überzeugt, die deshalb auch kein Zentrum haben könne.

Galilei konnte nun mit seinem Fernrohr diese Thesen zumindest teilweise bestätigen. Er beobachtete, dass es sich bei der Milchstraße nicht um ein nebliges Gebilde handelt, wie es dem bloßen Auge vorkommt, sondern um „nichts anderes als eine Anhäufung zahlloser Sterne“. Diese Entdeckungen und seine Federzeichnung der Mondoberfläche wurden im *Sidereus Nuncius* – einer Schrift, die Galileo Galilei im März 1610 mit einer Auflage von 550 Exemplaren veröffentlichte – dargestellt und machten Galilei auf einen Schlag berühmt. Für seine Beobachtungen verwendete Galilei ein holländisches Fernrohr mit zwanzigfacher Vergrößerung. Galilei berichtet, dass er mindestens zehnmal so viele Sterne mit dem Fernrohr sehen konnte wie mit dem bloßen Auge. Seine

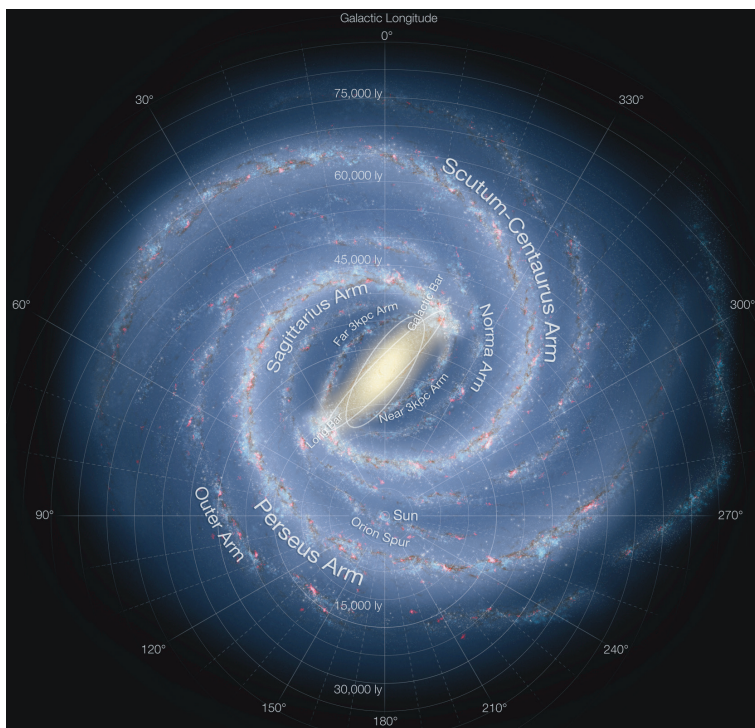


Abbildung 8: Unsere Heimatgalaxie, die Milchstraße. Das Koordinatensystem zeigt Lage und Entfernung ihrer Strukturen relativ zur Sonne an. Diese liegt in einem äußeren Arm der Spirale. Die Abbildung ist kein Foto der Galaxie. Teile von ihr, auch das Zentrum, sind uns durch kosmische Staubwolken verborgen. Mit Infrarot-Teleskopen lassen sich durch diese hindurch jedoch Strukturen ermitteln. Aufgrund solcher und anderer Messdaten wurde diese künstlerische Darstellung erstellt (Abb.: NASA/JPL-Caltech/ESO/R. Hurt).

Sternkarten des Oriongürtels und der Plejaden zeigen einige der neu beobachteten Sterne. Mit bloßem Auge konnten Beobachter nur sechs Sterne im Sternbild des Stiers sehen; mit seinem Fernrohr sah Galilei fünfunddreißig. Er berichtet auch, dass einige im Sternenkatalog des Ptolemäus als „neblig“ bezeichnete Sterne sich aus vielen kleinen Sternen zusammensetzten. Ebenso urteilt er, dass die Milchstraße aus unzähligen Sternen bestehe, die zu klein und entfernt seien, um mit bloßem Auge als solche erkannt zu werden (Abbildung 8).

Die Milchstraße besteht nach heutiger Schätzung aus ca. 100 bis 400 Milliarden Sternen. Durch Untersuchungen zur Verteilung der Kugelsternhaufen im Raum gelangte der US-Astronom Harlow Shapley (1885-1972) 1919 zu realistischen Abschätzungen der Größe des Milchstraßensystems und zu der Erkenntnis, dass die Sonne nicht – wie bis dahin angenommen – im Zentrum der Galaxis

sitzt, sondern eher an deren Rand. Dabei benutzte er die Perioden-Leuchtkraft-Beziehung vom Sternentypus der Cepheiden (Sterne, die periodisch ihre Leuchtkraft ändern), entdeckt von Henrietta Swan Leavitt (1868-1921), für die Abstandsbestimmung. Die amerikanische Astronomin legte damit den Grundstein zur Verwendung der Cepheiden als Standardkerzen (astronomische Objekte, deren Helligkeit durch direkt messbare Parameter ermittelbar ist), um zunächst Entfernungen zu nahe gelegenen Galaxien bestimmen zu können. Die Methode reicht bis zu einer Entfernung von 20 Millionen Lichtjahren. Bevor Leavitt diese Beziehung bemerkte, benutzten Astronomen Parallaxe und Triangulation, die bis zu einigen hundert Lichtjahren benutzt werden können. Die Milchstraße ist aber schon 100 000 Lichtjahre groß.

1915 formulierte Shapley die „Big-Galaxy-Hypothese“, wonach die Milchstraße die einzige Gala-

xie im Universum sei und die bis dahin bekannten Galaxien (oder „Nebel“ nach damaligem Sprachgebrauch) innerhalb der Milchstraße liegen. Die Antithese, die „Weltinseltheorie“, wonach die Milchstraße nur eine von vielen Galaxien sei, wurde von Heber Doust Curtis (1872-1942, ebenfalls US-Astronom) formuliert. Diese Auseinandersetzung wird in der Astronomie als die „große Debatte“ bezeichnet und wurde um 1923 durch den US-Astronomen Edwin Hubble (1889-1953) zugunsten der Weltinseltheorie entschieden.

Shapley ging als Grund für seine Auffassung von einer fehlerhaften Normierung der Perioden-Leuchtkraft-Beziehung von Cepheiden aus, wodurch er die Größe der Milchstraße weit überschätzte (300 000 Lichtjahre statt 100 000 Lichtjahre). Ferner war ihm die Altersdifferenzierung der Sternpopulationen nicht bekannt, so dass er die Entfernung zur Kleinen Magellanschen Wolke – einer Nachbargalaxie ohne Spiralform der Milchstraße – und zum Andromedanebel unterschätzte. Dieser ist mit rund 2,5 Millionen Lichtjahren Entfernung die am nächsten zur Milchstraße gelegene Spiralgalaxie und ähnelt der Milchstraße, ist aber mit 200 000 Lichtjahren Durchmesser deutlich größer.

### Planetensysteme anderer Sterne

Wir haben jetzt zwar gesehen: Es gibt noch viele andere Sonnen. Stellt sich die Frage: Haben die auch Planeten, oder ist unser Sonnensystem darin doch einzigartig? Noch vor wenigen Jahren konnte man darüber nur spekulieren. Im Jahre 1989 wurde die Entdeckung eines Exoplaneten um  $\gamma$  Cephei bekannt gegeben. Das wäre die erste Entdeckung eines solchen Planeten gewesen. Sie wurde jedoch 1992 aus Gründen der Messungenauigkeit widerrufen. 2002 erhärteten neue Messungen dann die Existenz des Planeten. Zwischenzeitlich hatte man be-

reits 1992 drei Planeten um den Pulsar PSR 1257+12 entdeckt.

Die erste definitive Entdeckung eines Exoplaneten in einem Orbit um einen Stern ähnlich der Sonne wurde 1995 gemacht: Der Planet 51 Pegasi b kreist im 4,2-Tage-Takt um den ca. 50 Lichtjahre von der Erde entfernten Stern 51 Pegasi und hat 0,46 Jupitermassen. Mittlerweile sind 7423 Exoplaneten in 5091 Planetensystemen bekannt; davon sind 1037 Systeme mit mehreren Planeten (Stand 14.3.2025). Es befinden sich auch etliche Planeten in habitablen Zonen. Das ist der Abstandsreich, in dem sich ein Planet von seinem Zentralgestirn befinden muss, damit Wasser dauerhaft in flüssiger Form als Voraussetzung für erdähnliches Leben auf der Oberfläche vorliegen kann. Man geht mittlerweile davon aus, dass die Mehrzahl der Sterne auch über einen oder mehrere Planeten verfügt. Mit Hilfe des ELTs (Abbildung 7) sollen u.a. erdähnliche Planeten in der Umgebung anderer Sterne gefunden werden, die erstmalig auch abgebildet werden können.

Bislang konnte man die meisten Exoplaneten nur indirekt nachweisen. Die wichtigsten Methoden sind dabei die Transitmethode und die Radialgeschwindigkeitsmethode. Erstere ist leicht verständlich: Zieht ein Planet aus der Sicht der Erde vor einem Stern vorbei, erzeugen diese Bedeckungen periodische Absenkungen in dessen Helligkeit; diese lassen sich nachweisen.

### **Von der Milchstraße zum Universum**

Wie gerade ausgeführt war Anfang des 20. Jahrhunderts durchaus plausibel, dass unsere Milchstraße das gesamte Universum darstellte. Die Ideen und die technischen Methoden waren kurz danach aber reif, ein Universum mit vielen Galaxien zu erkennen.

So hat vor knapp 102 Jahren der schon erwähnte Astronom Edwin Hubble mit dem 2,5-Meter-Teles-

kop auf dem Mount Wilson den Spiralnebel in der Andromeda beobachtet. Hubble suchte nach Nova-Sternen: Objekten, die plötzlich sehr viel heller leuchten als zuvor. Eine dreiviertel Stunde lang belichtete er eine Photoplatte. Am nächsten Tag vermerkte er bei drei Sternen den Buchstaben N, für Nova.

Doch kurze Zeit später fiel ihm auf, dass eines der drei Objekte seine Helligkeit periodisch veränderte. Es war auch schon auf früheren Aufnahmen mal heller und mal schwächer zu sehen gewesen.

Weitere Beobachtungen in den folgenden Monaten zeigten, dass es keine Nova war, sondern ein veränderlicher Stern vom Cepheiden-Typ, der alle 31 Tage sein Maximum erreicht. Wie schon berichtet hatte gut zehn Jahre zuvor hatte Henrietta Leavitt, die als Hilfskraft an der Harvard-Sternwarte beschäftigt war, gezeigt, dass sich mit Hilfe der Cepheiden Entfernungen im Weltall bestimmen lassen.

Edwin Hubble ermittelte dank des im Andromeda-Nebel entdeckten Cepheiden-Veränderlichen eine Entfernung von fast einer Million Lichtjahren. Damit war klar, dass es sich nicht um eine Gaswolke in der Milchstraße handelt – sondern dass der Nebel eine eigene Galaxie in großer Entfernung ist. Unsere Milchstraße war plötzlich möglicherweise nur eine Galaxie unter vielen. Mittlerweile weiß man, dass die Andromeda-Galaxie sogar 2,5 Millionen Lichtjahre entfernt ist.

Auch ein russischer Mathematiker und Physiker hatte Gründe anzunehmen, dass das Weltall viel größer ist als nur eine Galaxie. Er näherte sich der Frage aber von einer anderen Seite. Alexander Friedmann (1888-1925) baute auf die Allgemeine Relativitätstheorie auf und fand Lösungen für ein dynamisches Universum mit positiver Raumkrümmung; kurz gesagt: Er erachtete einen Urknall für möglich.

Seine Arbeiten waren zwar Einstein bekannt; die Wissenschaft-

ler führten eine Kommunikation. Bei der Wissenschaftsgemeinschaft wurden sie jedoch nicht allgemein wahrgenommen.

Auf eine ähnliche Idee kam dann bemerkenswerterweise ein Priester. Aufgrund der räumlichen Verteilung anderer Galaxien sowie ihrer im Spektrum u. a. von dem Astronomen Milton Humason (1891-1972) nachgewiesenen Rotverschiebung postulierte der belgische Priester Georges Lemaître (1894-1966) im Juni 1927 die Expansion des Weltalls im Einklang mit Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie. Er beschrieb seine Vorstellungen vom Ursprung des Universums als Uratom, „ein kosmisches Ei, das im Moment der Entstehung des Universums explodierte“. In diesem Uratom soll die gesamte heute im Universum vorhandene Materie zusammengepresst gewesen sein. Er zog dabei unter anderem die Rotverschiebung weit entfernter Galaxien heran. Andere bezeichneten danach die Theorie als Urknalltheorie oder einfach als Big Bang.

Hubble veröffentlichte zwei Jahre später mit zusätzlichen Daten denselben linearen Zusammenhang zwischen der Rotverschiebung und der Verteilung extragalaktischer Nebel, zog jedoch nicht die physikalische Schlussfolgerung einer Expansion des Weltalls und vermutete ein bisher unentdecktes Naturprinzip hinter der Rotverschiebung. Hubble und Humason entdeckten zudem, dass die Spektren verschiedener Galaxien nicht etwa zu gleichen Teilen ins Rote und Blaue verschoben sind, sondern dass es erheblich mehr rotverschobene Spektren gibt.

Interpretiert man die Frequenzverschiebung als Dopplereffekt, so lässt sich ableiten, dass sich fast alle beobachteten Galaxien von uns entfernen. Hubble war auch der erste, der einen direkt proportionalen Zusammenhang zwischen Rotverschiebung und Entfernung der Galaxien aufstellte, was bedeuten würde, dass

sich diese fernen Weltinseln umso schneller von uns fortbewegen, je weiter sie entfernt sind.

## Das Standardmodell des Universums

Aus verschiedenen Messungen heraus gibt man heute als Rahmendaten für das Universum an: Es umfasst nach neuesten Abschätzungen eine Billion ( $10^{12}$ ) Galaxien [2], jede mit im Durchschnitt 100 Milliarden Sternen, das Weltall hätte demnach etwa  $10^{23}$  Sterne, einhundert Trilliarden... Das Alter des Universums beträgt 13,8 Milliarden Jahre; es ging durch einen Urknall hervor. Als Größe des Universums wird typischerweise die Zahl von 92 Milliarden Lichtjahren im Durchmesser angegeben. Das mag erstaunen: Da das Universum 13,8 Milliarden Jahre alt ist, können wir nur Objekte wahrnehmen, die höchstens 13,8 Milliarden Lichtjahre entfernt sind. Dieser Radius (Durchmesser also 27,6 Milliarden Lichtjahre) ist unser beobachtbares Universum. Der Raum hat sich jedoch in diesen knapp 14 Milliarden Jahren selbst stark ausgedehnt; er kann sich durchaus mit Überlichtgeschwindigkeit ausdehnen. Aus der Größe der Rotverschiebung berechnet

man, dass das beobachtbare Universum einen Radius von etwa 46 Milliarden Lichtjahren – also einen Durchmesser von 92 Milliarden Lichtjahren – hat. Und ob es über den beobachtbaren Teil hinaus geht, weiß noch niemand.

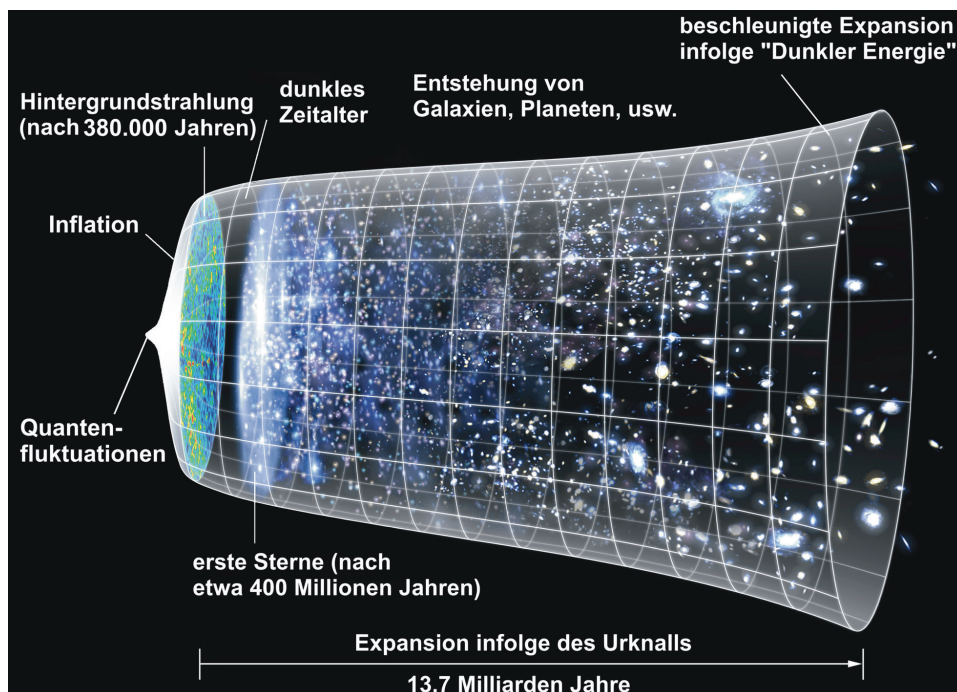
Mittlerweile hat man im Universum bemerkenswerte Beobachtungen gemacht. So sollte eigentlich nach dem 3. Keplerschen Gesetz und dem Gravitationsgesetz die Umlaufgeschwindigkeit der Sterne mit wachsendem Abstand vom Galaxienzentrum, um das sie rotieren, abnehmen, da die sichtbare Materie innen konzentriert ist. Messungen der Doppler-Verschiebung zeigen jedoch, dass sie konstant bleibt oder sogar ansteigt. Dies legt die Vermutung nahe, dass es dort Masse gibt, die nicht in Form von Sternen, Staub oder Gas sichtbar ist. Mangels genauer Kenntnis nennt man sie Dunkle Materie.

Zweitens: Nachdem die Expansion des Universums durch die Beobachtung der Rotverschiebung der Galaxien als etabliert galt, wurden detailliertere Messungen durchgeführt, um die Geschwindigkeit der Expansion und ihre Veränderung über die Lebenszeit des Universums zu bestimmen.

Traditionelle Modelle besagten, dass die Expansion aufgrund der Materie und der durch sie wirkenden Gravitation verlangsamt wird. Die Messungen, die im Wesentlichen auf Entfernungsbestimmungen weit entfernter Supernovae vom Typ Ia basierten – eine weitere Art von „Standardkerzen“ zur Entfernungsmessung im Weltall –, ergaben entgegen den Voraussagen, dass sich die Expansion nicht nur nicht verlangsamt, sondern schneller wird (Abbildung 9). Diese unerwartete Beobachtung wird seither auf eine noch unbestimmte Dunkle Energie zurückgeführt. In dem aus diesen Erkenntnissen heraus entwickelten Modell – das Lambda-CDM-Modell – besteht das Universum zum gegenwärtigen Zeitpunkt, ca. 13,8 Milliarden Jahre nach dem Urknall, zu 68,3 % aus Dunkler Energie, 26,8 % aus Dunkler Materie und zu 4,9 % aus der sichtbaren, baryonischen Materie – im Wesentlichen Atome mit Protonen und Neutronen im Atomkern. Man bezeichnet es auch als Standardmodell der Kosmologie. CDM steht dabei für „kalte Dunkle Materie“, das Lambda steht für die Dunkle Energie. Es bezeichnet eine kosmologische Konstante, die auch als Hubble-Konstante benannt wird. Sie beschreibt die gegenwärtige Rate der Expansion des Universums.

Das Standardmodell beschreibt etliche Eigenschaften unseres Universums gut, etwa seine großräumige Struktur oder seine Ausdehnungsgeschwindigkeit. Allerdings hat sie auch zahlreiche Ungereimtheiten. Insbesondere misst man für die Hubble-Konstante unterschiedliche Werte, je nachdem, wie man sie ermittelt. Ein Weg geht über Standardkerzen und die mit ihnen gemessenen Entfernungen im Universum. Die andere Methode nutzt Messungen von kleinen Unebenheiten in der kosmischen Hintergrundstrahlung (cosmic microwave background, CMB), einer Mikrowellenstrahlung aus

Abbildung 9: Entwicklungsstadien des Universums. Der Hubble-Parameter gibt zu jedem Zeitpunkt die momentane Expansionsrate an (Abb.: NASA/WMAP).



der Zeit kurz nach dem Urknall, die eigentlich ganz regelmäßig verteilt sein sollte. Sie wurde zufällig 1964 durch die Physiker und Astronomen Arno Penzias und Robert Woodrow Wilson beim Test einer neuen empfindlichen Antenne entdeckt, die für Experimente mit künstlichen Erdsatelliten gebaut worden war.

Die CMB hat eine herausragende Bedeutung für die physikalische Kosmologie, da sie als Beleg für die Urknalltheorie (Standardmodell) gilt. Die Unterschiede in der CMB sind sehr gering, aber in diesem Fleckenmuster ist praktisch der Aufbau der Welt codiert – und somit auch die Ausdehnung des Kosmos, also die Hubble-Konstante. Deren so ermittelte Werte unterscheiden sich jedoch von denen aus der Entfernungsmessung, konkret 67,4 zu 73,5. Deren Einheit ist Kilometer pro Sekunde pro 3,26 Millionen Lichtjahre, einem Parsec (Parallaxensekunde, ein astronomisches Längenmaß. Es ist die Entfernung, aus welcher der mittlere Erdbahnradius (= 1 AE, Astronomische Einheit), also der mittlere Abstand zwischen Sonne und Erde, unter einem Winkel von einer Bogensekunde erscheint). Je 3,26 Millionen Lichtjahre nimmt also die Geschwindigkeit, mit der sich die Galaxien im All voneinander entfernen, um 67,4 bzw. 73,5 Kilometer pro Sekunde zu. Etliche Wissenschaftler denken, dass sich hinter dieser Diskrepanz eine neue Physik verbirgt. Es gibt aber noch eine Reihe anderer Beobachtungen, die nicht mit dem Standardmodell übereinstimmen. So ist die tatsächlich beobachtbare Menge an Lithium im Universum um den Faktor 3 bis 4 geringer als die nach dem Lambda-CDM-Modell berechnete Menge.

### Anthropisches Prinzip

Das Weltmodell hat sich also in den vergangenen 100 Jahren erheblich erweitert. Die Sonne ist ein Stern von Trilliarden, und Planeten gibt es wohl auch zuhauf, wahrscheinlich auch außerirdische Lebensformen. Von denen

ganz abgesehen stellt sich aber die Frage: Wie kommt es, dass unser Universum so gestaltet ist, das es Menschen hervorgebracht hat? Dafür müssen nämlich ganz bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein. Kohlenstoff muss entstanden sein, es muss Planeten mit flüssigem Wasser geben, und vieles mehr.

Grundlegend für das Entstehen bestimmter Sachverhalte im Universum sind die Naturkonstanten. Beispiele dafür sind die Lichtgeschwindigkeit, die Gravitationskonstante und die elektrische Elementarladung, das Plancksche Wirkungsquantum (das Verhältnis von Energie und Frequenz eines Photons), die Boltzmann-Konstante (ein Umrechnungsfaktor von absoluter Temperatur in Energie), aber auch beispielsweise die Feinstrukturkonstante  $\alpha$ ; sie gibt die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung an. Sie ist mit der ist mit der Elementarladung, der Planck-Konstante, der Lichtgeschwindigkeit und der elektrischen Feldkonstante (gibt das Verhältnis der elektrischen Flussdichte zur elektrischen Feldstärke im Vakuum an) in einer Gleichung verknüpft. Allgemein liest man, es gibt mindestens 37 Naturkonstanten; Wikipedia listet 45 auf – die Variationen gibt es je nach Definition, Ableitung oder gesetzten Rahmenbedingungen.

Die Naturkonstanten lassen eine Frage aufkommen: Sind die Bedingungen für intelligentes Leben auf der Erde so einzigartig, sodass es in unserer Milchstraße, im ganzen Universum gar keine anderen intelligenten Lebewesen geben kann? Diskutiert wird diese Frage unter der Bezeichnung „anthropisches Prinzip“. Das besagt einfach, dass die Beobachtung eines Universums kompatibel mit der Entstehung eines Bewusstseins sein muss, dass diese Beobachtung macht. Es gibt verschiedene Auslegungen des anthropischen Prinzips; über 30 werden gezählt [3]. Neben der hier genannten schwachen Formulierung etwa gibt es auch die starke Auslegung,

das Universum habe so geformt werden müssen, um die Entstehung von Beobachtern in ihm zu erlauben. Diese starke Interpretation setzt also eine Zielrichtung voraus; man spricht von teleologischer Interpretation (telos steht im griechischen für Zweck oder Ziel; logos für Lehre).

Befürworter der teleologischen Interpretation führen eben häufig die genaue Abstimmung der Naturkonstanten an, die notwendig ist, um Leben im Universum zu erlauben; fast könnte man von einer theologischen Interpretation (theos = griechisch für Gott) sprechen. Die Glaubenssache an der starken Auslegung des anthropischen Prinzips liegt darin, dass nur eine geplante, einzigartige Feinabstimmung es ermöglicht hat, dass Intelligenzen im Universum entstehen. Damit geht man jedoch einen Weg der Besonderheit, den man mit dem geozentrischen Weltbild, also der Erde als Mittelpunkt des Universums, schon einmal – nachweislich falsch – gegangen ist.

Ein Punkt, der die Diskussion um Naturkonstanten so wichtig macht: Sollten sie nur minimal andere Werte aufweisen, wäre Leben in unserem Universum nicht möglich, wird argumentiert. Um es kurz zu machen: Die Argumente für das anthropische Prinzip schwinden; so fein muss die Abstimmung wohl gar nicht sein. Der US-amerikanische Physiker Victor J. Stenger kam bereits vor 25 Jahren durch Analysen und Computersimulationen, in denen er vier Konstanten gleichzeitig variieren ließ, zu dem Ergebnis, dass viel größere Schwankungen der Konstanten erlaubt seien [4]. Analysen von hundert Universen, in denen er die Konstanten Elektronenmasse, Protonenmasse, Stärke der elektromagnetischen Kraft sowie Stärke der starken Kraft zufällig in einem Bereich von zehn Größenordnungen ( $10^{10}$ ) schwanken ließ, führten in mehr als der Hälfte der Fälle zu Sternen mit einer Lebensdauer von mehr als einer Milliarde Jahren, eine

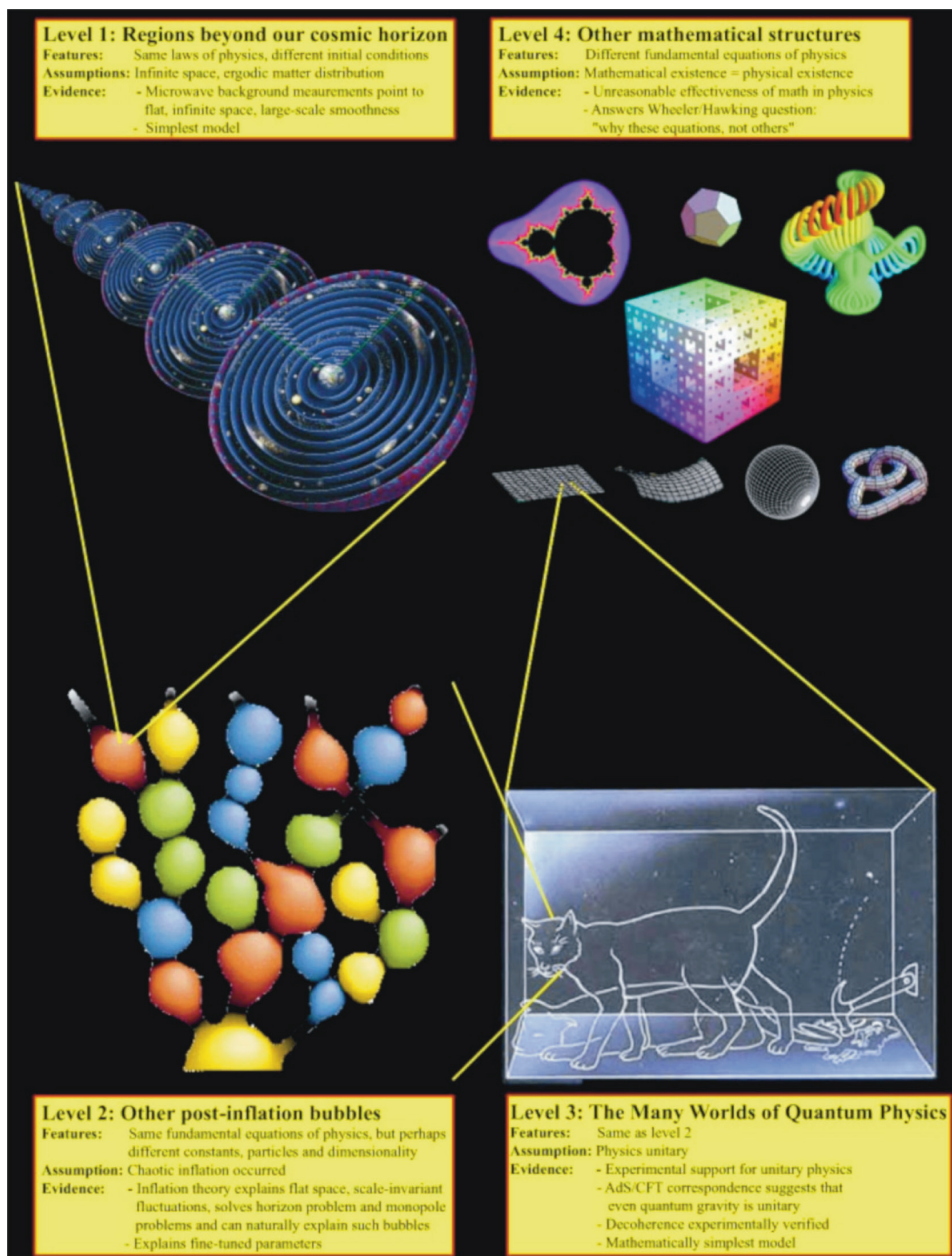


Abbildung 10: Die vier Multiversen nach Max Tegmark (Abb.: Tegmark).

Zeitspanne, die man für die Entwicklung von Leben für notwendig erachtet. Dies könne man, so Stenger, wohl kaum Feinabstimmung nennen.

Mittlerweile gibt es neuere Arbeiten, die diese Argumentation unterstützen. Der Astrophysiker Fred Adams von der University of Michigan in Ann Arbor beispielsweise sagt, die meisten relevanten Parameter könnten um Größenordnungen variieren. Trotzdem sei es möglich, dass sich im Universum Atome, Sterne, Galaxien bildeten. So wird die Sternentstehung oft als Beispiel für die Empfindlichkeit von Feinabstimmungsparametern angeführt),

und es wird oft angenommen, dass kleine Abweichungen bei der Stärke der Schwerkraft oder der starken Wechselwirkung (verantwortlich für die Bindung zwischen den Quarks in Protonen und Neutronen) eine stabile Sternentstehung unmöglich machen würden. Adams fand jedoch heraus, dass die Stärke der Schwerkraft in einigen Fällen um einen Faktor von einer Milliarde abweichen kann, und seine Berechnungen deuten darauf hin, dass sich trotzdem Sterne bilden werden. Er weist darauf hin, dass Berechnungen zur Feinabstimmung in der Regel nur die Veränderung eines physikalischen Parameters berücksich-

tigen, während andere konstant gehalten werden. Es wird jedoch vermutet, dass die Bedingungen für Leben wieder gegeben sein könnten, wenn mehrere Parameter gleichzeitig angepasst werden.

Von seinen Arbeiten nennt er noch ein Beispiel: Die Feinstrukturkonstante  $\alpha$  hat einen Wert von ziemlich genau  $1/137$ . Wäre es  $1/136$ , wäre das Universum nicht mehr für Leben geeignet. Wird  $\alpha$  größer, stoßen sich zum Beispiel Protonen stärker ab. Dann wird eine Kernfusion in den Sternen nicht mehr möglich, der Sonnenofen erlischt. Adams hat nun den Wert von  $\alpha$  um den Faktor 100 erhöht; bei entsprechenden anderen Anpassungen können die Sterne trotzdem ihre Fusionsprozesse aufrecht erhalten. Der Wissenschaftler sieht sogar Varianten von Naturkonstanten, die zu Universen führen, in denen Leben auf Kohlenstoffbasis noch wahrscheinlicher entsteht als in unserem Universum. Dass solche Erkenntnisse jetzt erfolgen, erklärt Adams durch die enorme Leistung heutiger Computer, die umfangreiche Simulationen nun ermöglichen.

## Das Multiversum

Das anthropische Prinzip verliert vollkommen seine Bedeutung, zieht man die Existenz eines Multiversums in Betracht. Wir leben dann eben in einem Universum, in dem zufällig Leben nach unserer Erkenntnis möglich ist. Es mag viele – womöglich unendlich viele – andere Universen geben, mit anderen Bedingungen, vielleicht sogar anderen physikalischen Gesetzen, mit völlig fremdartigen Lebensformen – oder ohne jedes Leben. Ein Multiversum ist nicht einfach nur eine philosophische Idee, sondern eine mögliche Lösung physikalisch-kosmologischer Gleichungssysteme, die etwa der Stringtheorie zugrunde liegen. In ihr wird versucht, alle Naturkräfte miteinander zu vereinen.

Wir könnten also in einem Multiversum leben, das Univer-

sen umfasst. Dementsprechend steht Multiversum im Singular; viele Multiversen ergibt keinen Sinn mehr. Allerdings gibt es verschiedene Vorstellungen von einem Multiversum. Der schwedisch-US-amerikanische Kosmologe und Physiker Max Tegmark kennzeichnet vier verschiedene Stufen für ein Multiversum (Abbildung 10).

**Stufe I:** Damit beschreibt er eigentlich nichts Neues. Vielmehr sagt er: Unser Universum ist an sich möglicherweise unendlich. D.h. der theoretisch maximal beobachtbare Rand unseres Universums liegt wie oben beschrieben 42 Lichtjahre entfernt. Danach kann es aber noch weitergehen, möglicherweise unendlich weit. Von der Struktur und den Eigenschaften her wäre das Multiversum aber gleich unserem Universums. Aufgrund seiner Unendlichkeit sollten wir aber dort durchaus Doppelgänger von uns finden, sogar unendlich viele. Er gibt an, die kürzeste Entfernung zu solch einem Doppelgänger wären  $10^{10^{29}}$  Meter. Das bringt die Unendlichkeit so mit sich – zusammen mit der zwar riesengroßen, aber dennoch beschränkten Anzahl von Quantenzuständen, die die elementaren Volumenelemente des Universums einnehmen können. Aus einer möglichen Unendlichkeit des Universums zusammen mit den Beschränkungen der Quantentheorie folgt eben zwangsläufig die Existenz von einem mehrfachen Auftreten der kosmischen Objekte [6].

**Stufe II:** Diese Ebene umfasst die Möglichkeit separater Universen innerhalb eines „Multiversums“, die kausal voneinander getrennt sind, was bedeutet, dass Ereignisse in einem Universum keine Auswirkungen auf Ereignisse in einem anderen Universum haben können. Dies könnte der Fall sein, wenn das Universum eine Periode rascher Ausdehnung, die sogenannte kosmische Inflation, durchlau-

fen hat, wodurch voneinander getrennte Raum-Zeit-Bereiche entstanden sein könnten. Die Idee ist, dass unser Multiversum der Stufe I – d.h. unser Universum und die angrenzenden Regionen des Weltraums – eine Blase ist, die in ein noch größeres, aber größtenteils leeres Volumen eingebettet ist. Andere Blasen existieren dort draußen, losgelöst von der unseren. Sie bilden Keime wie Regentropfen in einer Wolke. Während der Keimbildung verleihen Variationen der Quantenfelder jeder Blase Eigenschaften, die sie von anderen Blasen unterscheiden, mit anderen Naturkonstanten.

**Stufe III:** Das ist das Quantenmultiversum. Dabei handelt es sich nicht um ein kosmologisches Modell, sondern um eine mögliche Konsequenz der Quantentheorie – und ist noch viel weniger vorstellbar als die „unendlichen Weiten“ des Kosmos. Quantenmultiversum ist eine Bezeichnung für die Konsequenz der Viele-Welten-Interpretation der Quantenmechanik, die 1957 von Hugh Everett erstmals vorgeschlagen wurde [7]. Ihr Name geht auf den US-Physiker Bryce DeWitt zurück, der als Erster vorschlug, die unterschiedlichen Zustände des Quantensystems nach einer Messung als Welten aufzufassen. Die vielen Welten sind allerdings keine räumlich getrennten Welten, sondern getrennte Zustände im jeweiligen Zustandsraum eines Quantensystems. Anschaulich: Misst man den Weg von Elektronen im Doppelspaltexperiment, entstehen zwei unterschiedliche Welten. Und etwas weiter gefasst: Jede Entscheidung, die wir treffen, führt zu verschiedenen Weltentwicklungen, die aber nicht miteinander in Verbindung kommen können. Zu den populärsten Verfechtern der Viele-Welten-Interpretation gehörte der Heidelberger Physiker Dieter Zeh, der selbst für die Entwicklung der Dekohärenztheorie bekannt ist. Obwohl ein Quantenmultiversum etwas völlig

anderes ist als ein kosmologisches Multiversum, ergibt sich eine bemerkenswerte Übereinstimmung in einer Schlussfolgerung. Dieter Zeh betont, dass die Viele-Welten-Interpretation die Feinabstimmung der Naturkonstanten erklären könne, ohne ein starkes, zielgerichtetes anthropisches Prinzip zu benötigen, den Plan eines Schöpfers. Nach der Viele-Welten-Interpretation ist unser Zweig des Quantenmultiversums mit der Entwicklung seines intelligenten Lebens einfach nur darauf zurückzuführen, dass in den unzähligen vielen anderen lebensfeindlichen Zweigen des Everett'schen Multiversums, die es ebenso gibt, es sich nicht hätten entwickeln können [8].

**Stufe IV:** Das ultimative Multiversum. Diese Stufe schließt die Möglichkeit eines „Multiversums“ ein, das aus allen möglichen mathematischen Strukturen besteht. Das würde bedeuten, dass es für jede mögliche Kombination mathematischer Gesetze und Beziehungen Paralleluniversen gibt, auch wenn sie keiner physikalisch möglichen Realität entsprechen. Universen können sich also nicht nur in ihrer Lage, ihren kosmologischen Eigenschaften oder ihrem Quantenzustand unterscheiden, sondern auch in den Gesetzen der Physik. Da sie außerhalb von Raum und Zeit existieren, ist es unmöglich, sie zu visualisieren; man kann sie sich bestenfalls abstrakt vorstellen, als statische Skulpturen, die die mathematische Struktur der physikalischen Gesetze darstellen, denen sie unterliegen.

### Greift Ockhams Rasiermesser?

Ein Argument gegen ein Multiversum ist „Ockhams Rasiermesser“, das Sparsamkeitsprinzip. Es handelt sich dabei um ein Prinzip, das bei der Bildung von erklärenden Hypothesen und Theorien höchstmögliche Sparsamkeit gebietet. Tegmark argumentiert: Schon beim Multiversum nach Stufe I – eigentlich nur unser

Universum hinter den Grenzen der Sichtbarkeit – hat man es mit unendlich viel Raum, Materie und Energie zu tun. Die Natur verschwendet also nichts, wenn es weitere Universen gibt. Vielmehr könne dies ein Argument für ein Multiversum sein. Er beschreibt: Alle ganzen Zahlen hinzuschreiben sei – so einfach die Aufgabe klingt – unendlich viel Arbeit. Ein kleines Programm, dass diesen Vorgang beschreibt, sei aber überschaubar. Oder: In ähnlicher Weise sei die Menge aller Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen einfacher als eine bestimmte Lösung. Erstere werde durch einige wenige Gleichungen beschrieben, während letztere die Angabe großer Mengen von Anfangsdaten auf einer Hyperfläche erfordere. Die Lehre daraus sei, dass die Komplexität zunimmt, wenn wir unsere Aufmerksamkeit auf ein bestimmtes Element eines Ensembles beschränken und dabei die Symmetrie und Einfachheit verlieren, die der Gesamtheit aller Elemente inhärent war. In diesem Sinne seien Multiversums-Beschreibungen höherer Ebenen einfacher.

## Tests auf ein Multiversum

Die Vorstellung eines Multiversums ist die vorstellbar größtmögliche Erweiterung und Verallgemeinerung eines Weltbildes. Die Erde ist nichts Besonderes, das Planetensystem nicht, unsere Galaxie nicht, nicht einmal das gesamte Universum. Stellt sich die Frage, ob wir je feststellen können, dass wir in einem Multiversum leben, ob wir nachprüfen können, dass es Paralleluniversen gibt. Vom Prinzip dürfte es nahezu unmöglich sein, da solche Universen eben außerhalb unseres eigenen Universums sind. Dennoch macht man Überlegungen in diese Richtung, denkt sogar an Experimente.

## Himmelsbeobachtungen

Zwei Lösungsmöglichkeiten könnten genaue Himmelsbeobachtungen liefern. Ein erster Hin-

weis auf ein Multiversum ergäbe sich aus der Rotation der Galaxien. Alles dreht sich: Die Erde um sich selbst, die Planeten um die Sonne, das Sonnensystem um das Zentrum unserer Milchstraße... Jetzt gibt es Mutmaßungen, unser gesamtes Universum rotiert. Das stünde im Widerspruch zum Standardmodell des Universums, nach dem das All wie oben schon angesprochen homogen und auch isotrop ist, nach allen Richtungen also die gleichen Eigenschaften hätte. Bei einem rotierenden Universum trifft dies nicht zu. Dennoch gibt es Beobachtungen, die ein solches kosmologisches Modell plausibel erscheinen lassen [9]. Da ein Drehimpuls wie auch die Energie eine Erhaltungsgröße ist und nicht verschwinden kann, ist es vorstellbar, dass ein rotierendes Universum seinen Drehimpuls auf Galaxien überträgt. Und wenn ein Universum rotiert, dann ist es vorstellbar und physikalisch sinnvoll, dass es ein Paralleluniversum gibt, das sich anders herum dreht – um den Gesamtdrehimpuls wiederum auf null zu halten.

Ein anderer Hinweis könnten unerklärliche Massenströme im Universum sein. Heutzutage ist man ja in der Lage, unglaublich große Gruppen von Galaxien zu beschreiben, deren einzelne Galaxien sich alle in eine bestimmte Richtung bewegen. Solche Gruppen nennt man auch Superhaufen. 2008 gab es eine Veröffentlichung, die sogar Hinweise auf eine überraschend kohärente Strömung von ganzen Galaxienhaufen gegeben haben soll, wobei die Geschwindigkeit dieser Bewegung mit der Entfernung zunimmt. Ein solcher Galaxienstrom kann nur durch eine starke Anziehungskraft verursacht werden, für die aber keine Ursache bekannt ist. Das Phänomen hat den Namen „Dunkler Fluss“. Er könnte durch Quantenverschränkungen mit einem Paralleluniversum entstanden sein. Das könnte in dem Falle möglich sein, wenn ein zweites Universum zusammen mit

unserem All aus einem Quantenvakuum hervorging und über diesen gemeinsamen Ursprung noch mit dem unseren quantenverschränkt ist. Nach der Veröffentlichung gab es widersprüchliche Ergebnisse und Diskussionen. Bis heute ist der Dunkle Fluss nicht eindeutig bewiesen.

## Kleinste Teilchen

Nemanja Kaloper (University of California, Davis) und Alexander Westphal (DESY) zeigten neuerdings einen ganz anderen Weg auf [10]. Indem sie die für das Leben notwendigen Anfangsbedingungen im Universum berechnen und diese mit Beobachtungsdaten vergleichen, legen sie nahe, dass Diskrepanzen die Gültigkeit des Prinzips in Frage stellen könnten. Die Forscher schlagen vor, Elemente wie Inflation, Dunkle Materie und Axione zu verwenden, um das anthropische Prinzip zu testen, auch zu entdecken, ob wir in einem Multiversum leben. Ein Axion ist bislang nicht gefunden worden. Es handelt sich theoretisch um ein sehr leichtes Elementarteilchen ohne elektrische Ladung und mit den Spin 0, aus denen die Dunkle Materie bestehen könnte. Wenn es sie nicht gäbe, spräche dies für ein Multiversum. Chancen für eine Überprüfung sehen die Forscher in dem für 2032 vorgesehenen Start des LiteBIRD-Satelliten. Er soll über spezielle Messungen des kosmischen Mikrowellenhintergrunds Erkenntnisse über primordiale Gravitationswellen – solche direkt nach dem Urknall – liefern, die in weiteren Schlussfolgerungen die angesprochene Frage lösen könnten.

## Quantencomputer

Die neuesten Ideen zum Nachweis eines Multiversums stammen aus dem aufstrebenden Gebiet der Quantencomputer. Hier hat Google im Dezember letzten Jahres einen neuen Chip vorgestellt, „Willow“. Von ihm heißt es, er führte in weniger als

fünf Minuten eine Berechnung durch, für die ein Supercomputer von heute zehn Quadrillionen ( $10^{25}$ ) Jahre benötigen würde. Die Berechnung hat zwar keinerlei Anwendungsbezug, aber immerhin... Hartmut Neven, ein deutscher Physiker und nun Gründer von Google Quantum AI, kommentierte dies, dass der Erfolg von Willow „der Vorstellung Glaubwürdigkeit verleiht, dass Quantenberechnungen in vielen parallelen Universen stattfinden, in Übereinstimmung mit der Idee, dass wir in einem Multiversum leben“ – was natürlich nicht unwidersprochen blieb. Nevens Erklärung bezieht sich auf eine Erklärung von David Deutsch. Der israelisch-britische Quantenphysiker aus Oxford erklärt die besondere Leistung der Quantenrechner durch die Viele-Welten-Interpretation, die in Tegmarks Multiversum der Stufe III angesprochen wird. Rechne ein Quantencomputer, nutze er dabei die Vielzahl ihm zur Verfügung stehender Welten: Er rechne parallel in all diesen Welten. Möglich sei dies, solange der Prozess der Dekohärenz nicht abgeschlossen sei: Dann seien die Welten schließlich noch miteinander verbunden und Informationen könnten zwischen ihnen hin und her gelangen. Bewiesen ist das freilich nicht, aber wer weiß, vielleicht hat man so einen Draht zu Paralleluniversen.

### Nachdenkliches

Es galt hier nur, aufzuzeigen, dass ein Nachweis eines Multiversums eventuell doch möglich ist. Weiter lässt sich der Weg vom Besonderen zum Allgemeinen nicht gehen. Die Vergangenheit zeigte allerdings, das solch ein Denken – weg von dem Besonderen – von Erfolg gekrönt war (Abbildung 11). Immer, wenn man etwas Besonderes annimmt – eine besondere Erde, ein besonderes Weltall – stellt sich automatisch die Frage: Warum – von wem – wurde gera-

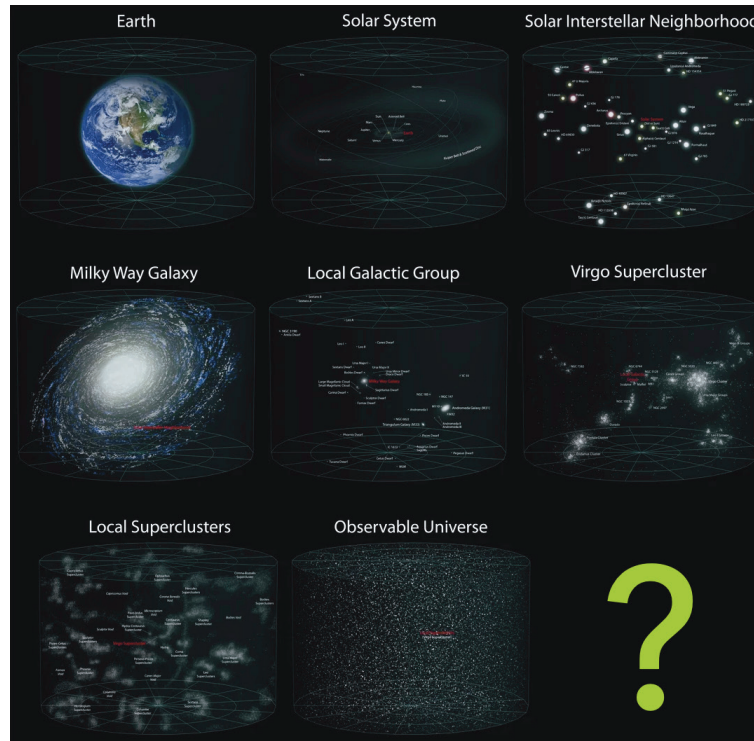


Abbildung 11: Weltbild-Erweiterung von der Erde bis zum Universum.

de dieses erschaffen? Das Wort „heilig“ bezog sich übrigens auch auf etwas Besonderes, einen abgegrenzten Bereich. Im Alten Testament waren vor allem die inneren Bereiche im Tempel abgegrenzt. Ein Multiversum hingegen ist allumfassend. Es entsteht aus Quantenfluktuationen des Vakuums. Wenn es unendlich viele Universen gibt, mag darin auch eine Erklärung liegen, warum es Etwas und nicht Nichts gibt: Letztlich hat es keine Bedeutung, ob hier gerade etwas ist oder nicht; woanders gibt es dieses „Etwas“ gerade doch... Dem Multiversum ist es egal. Wie ich es locker ausdrücke: Das Multiversum ist eine Simulation seiner selbst auf der Suche nach Bedeutung ;-)

*Rolf Kickuth*

### Literatur / Quellen

- [1] <https://today.yougov.com/society/articles/20510-most-flat-earthers-consider-themselves-religious>
- [2] C. J. Conselice, A. Wilkinson, K. Duncan, A. Mortlock : The Evolution of Galaxy Number Density at  $z < 8$  and its Implications; The Astrophysical Journal, 14.10.2016
- [3] <https://www.tagesspiegel.de/wissen/das-exakte-mass-des-all-5641336.html>
- [4] Stenger, Victor: „Natural Explanations for the Anthropic Coincidences“, Philo 3 (2), 2000: 50–67
- [5] F. C. Adams: The degree of fine-tuning in our universe — and others; Physics Reports, vol. 807, pp. 1–111, May 2019
- [6] Max Tegmark: Parallel Universes, in: Science and Ultimate Reality: From Quantum to Cosmos, honoring John Wheeler's 90th birthday; J.D. Barrow, P.C.W. Davies, & C.L. Harper eds.; Cambridge University Press (2003)
- [7] Hugh Everett III: „Relative State“ Formulation of Quantum Mechanics. In: Reviews of modern physics. Vol. 29, 1957, S. 454–462
- [8] H. Dieter Zeh: Wozu braucht man „viele Welten“ in der Quantentheorie? Versuch einer Darstellung auch für interessierte Nicht-Physiker; September 2012; <https://www.thp.uni-koeln.de/gravitation/zeh/Viele-Welten.pdf>
- [9] Rüdiger Vaas: Das Karussell des Universums; Bild der Wissenschaft 1/2016, S. 40-45
- [10] N. Kaloper, A. Westphal : Falsifying anthropics; Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 10 December 2024