

Sphärenmusik vor dem Hintergrund des heutigen physikalischen Weltbilds

Bruno Binggeli

Beitrag zur SYMBOLON-Tagung *Klang und Kosmos*, Erfurt, 8.-10. April 2016

Erscheint 2018 in leicht redigierter Form im *Symbolon Jahrbuch Band 21*

- 1 Einleitung
 - 2 Harmonik im Sonnensystem?
 - 3 Mikrokosmos
 - 4 Helioseismologie
 - 5 Gravitationswellen
 - 6 Big Bang-Akustik
 - 7 Symbolische Wiederkehr der Sphärenmusik?
-

1 Einleitung

Am 11. Februar 2016 war es soweit: der lang ersehnte, erstmalige direkte Nachweis von Gravitationswellen aus dem Weltall konnte endlich bekannt gegeben werden. An der Pressekonferenz in Washington, die ein weltweites Medienecho auslöste, sagte die Sprecherin der wissenschaftlichen Kollaboration dazu wörtlich: *We can hear gravitational waves, we can hear the universe... We are not only going to be seeing the universe, we are going to listen to it!*¹ Eine jahrzehntelange Forschungstätigkeit, die Milliardensummen verschlungen und Tausende von Physikern und Ingenieuren vieler Nationen dazu angetrieben hatte, die ausgeklügeltesten Messverfahren und theoretischen Modelle zu entwickeln, um mit riesigen Instrumenten, sogenannten Interferometern, unvorstellbar schwache Signale empfangen und damit eine 100 Jahre alte Vorhersage von Albert Einstein bestätigen zu können – diese ganze Big-Science-Unternehmung schien so in einem enthusiastisch begrüßten Klangerlebnis zu gipfeln!

Was es mit diesen Gravitationswellen auf sich hat, wird weiter unten erläutert. Hier soll zunächst einfach die erstaunliche Vitalität und Popularität der kosmischen Klangmetapher bis zum heutigen Tag festgestellt werden. Gravitationswellen sind dabei nur das jüngste Beispiel einer langen Reihe von akustisch aufgefassten oder ins Akustische übertragbaren Vorgängen im Weltraum. Schon den „Radioteleskopen“, welche riesigen, zuweilen ohrenförmigen Schüsseln gleichen, wurde poetisch nachgesagt, sie würden in den tiefen Kosmos hinein *lauschen*; vielleicht einfach weil Radioapparat und Musik zusammengehören, obwohl es sich doch um elektromagnetische und nicht um Schallwellen handelt. Auch die Sonne, seitdem wir um die komplexen Schwingungsmuster ihrer seismischen Tätigkeit wissen, *singt* wieder und *tönt nach alter Weise*. Und so trillern die Pulsare und brummen die Schwarzen Löcher, – ganz zu schweigen vom „Urknall“! Jede rythmische Bewegung und Schwingung, eigentlich jede erdenkliche Struktur lässt sich durch geeignete Transformation und Transposition hörbar machen. Die sogenannte *Sonifikation* wissenschaftlicher Daten, sei es als Hilfsmittel zur schnelleren und umfassenderen Registrierung bestimmter Ereignisse (man denke etwa an den Geigerzähler) oder zur Popularisierung wissenschaftlicher Erkenntnisse, ja zuweilen auch als Grundlage musikalischer

¹ Die Pressekonferenz in voller Länge, mit dem „Klang“ der Gravitationswellen:
<https://www.ligo.caltech.edu/video/ligo20160211v11>

Kompositionen, ist inzwischen weit verbreitet.² In der Astronomie ist die Sonifikation kosmischer Vorgänge bzw. die Benutzung der Klangmetapher freilich besonders stark verwurzelt, denn hier wird ein alter Mythos bedient – es ist der Mythos der Klangschöpfung der Welt, der sich in vielen Kulturen der Welt findet, sowie das mythische Konzept der griechisch-antiken Sphärenmusik, auch Sphärenharmonie genannt.³ Der „klingende Kosmos“ ist anscheinend nicht bloss eine schöne Metapher, die man bewusst wählt. Vielmehr drängt sich die Vermutung auf, dass wir es hier mit einer mächtigen, tiefen *Symbolik* zu tun haben (durchaus im Sinne C. G. Jungs), die den Menschen – unbewusst – danach streben lässt, mit dem (göttlichen) Kosmos in *Einklang* zu kommen. Die archetypische Vorstellung einer „himmlischen Musik“ bedarf als Anregung von aussen offenbar einzig der Anwesenheit des Himmels und seiner „tanzenden“ Gestirne. Durch seine Unerreichbarkeit und Unbegrenztheit, seine Unvergänglichkeit und Macht entspricht der Himmel schon immer einem Bild, einem Symbol der Transzendenz. Der bedeutende Religionswissenschaftler Mircea Eliade entwickelte daraus die plausible These, dass Religion in allen Kulturen ihren Ursprung letztlich im Himmel hat.⁴ Sphärenmusik (wie auch die Klangschöpfung) wäre dann der akustische Aspekt dieser Hierophanie vom Himmel her – hörbar nur mit dem inneren, geistigen Ohr.

Eine Verbindung mit der realen, physisch hörbaren Musik ergab sich aber doch – über die Zahl. Das ist die grossartige Entdeckung, die man gemeinhin den Pythagoreern zuschreibt: Harmonisch empfundene, „konsonante“ Tonintervalle (wie die Oktave, die Quinte und Quarte) entsprechen den einfachsten Verhältnissen ganzer Zahlen (1:2, 2:3, 3:4), wenn diese Verhältnisse beispielsweise auf Saitenlängen übertragen werden. „Alles ist Harmonie und Zahl“ – so lautete ein zentraler Weisheitsspruch der Pythagoreer. In Ermangelung einer Kenntnis der wahren Distanz- und Bewegungsverhältnisse der Gestirne mag sich daraus ganz natürlich, sozusagen als Präzisierung oder Weiterentwicklung der himmlischen Transzendenz, die Vorstellung eines harmonischen, zahlenmässig wohlproportionierten Aufbaus des Kosmos ergeben haben, in Form eben einer Sphärenharmonie – bei Platon im Kleid einer harmonisch strukturierten Weltseele (*anima mundi*), welche die menschliche Seele kraft ihrer analogen Strukturierung – „wie oben so unten“ nach hermetischer Sprechweise – überhaupt erst wahrnehmen konnte. Diese Wahrnehmung bedeutete eine geistige „Anhörnung“ (*akróasis*) der kosmischen Ordnung und sollte durch das Prinzip der Nachahmung bzw. der Erinnerung laut Platon eine heilende Wirkung auf die Seele ausüben.⁵

Es gab in der Antike also durchaus einen – nicht wissenschaftlich begründeten, aber philosophisch, nach dem Vorbild der musikalischen Harmonien *konstruierten* – aussenweltlichen Gegenpart zur urtümlichen, rein innerlich empfundenen „himmlischen Musik“. Daneben fand sich allerdings noch eine andere, dem Scheine nach wissenschaftlichere Auffassung von Sphärenmusik, nennen wir sie die *naturalistische*, in Abgrenzung zur *mystischen*, pythagoräisch-platonischen Sichtweise. Sie geht auf Aristoteles zurück, der sie aber sogleich verwarf. Er argumentierte, dass so riesige und in rasanter

² Beispielsweise wurde die Entdeckung des Higgs-Teilchens am CERN sonifiziert und musikalisch bearbeitet.

³ Zur Klangschöpfung: Schneider, Marius: *Singende Steine. Rhythmus-Studien an drei romanischen Kreuzgängen*, Kassel, Basel 1955; Niklaus, Hans-Georg: *Die Maschine des Himmels. Zur Kosmologie und Ästhetik des Klangs*, München 1994. Zur Sphärenharmonie: Schavernoeh, Hans: *Die Harmonie der Sphären. Die Geschichte der Idee des Welteneinklangs und der Seelenstimmung*, Freiburg i.Br. 1981; Zipp, Friedrich: *Vom Urklang zur Weltharmonie. Werden und Wirken der Idee der Sphärenmusik*, Kassel 1985.

⁴ Siehe Eliade, Mircea: *Die Religionen und das Heilige. Elemente der Religionsgeschichte*, Salzburg 1954, S. 61-64

⁵ So heisst es im Platonischen Timaios: „... die Harmonie aber [der Sphären], deren Bewegungen mit den Umläufen verwandt sind, die wir in der Seele haben ... ist uns als Helferinnen von den Musen verliehen worden, um den Umlauf unserer Seele, die in Unstimmigkeit geraten ist, wieder in Ordnung und in Einklang mit sich selbst zu bringen.“ Schavernoeh (Anm. 3), S. 73.

Bewegung begriffene Körper wie die Planeten (oder ihre Sphären) mit Sicherheit heftige, noch auf der Erde hörbare Geräusche verursachen sollten. Da man diese nicht hört, sei die Idee ganz abzulehnen. Andere (beispielhaft Cicero in seinem *Somnium Scipionis*) verteidigten die Geräuschtheorie, indem sie zu bedenken gaben, dass der Mensch diesen Klang nicht wahrnehmen könne, da er ununterbrochen erklingt und somit der Kontrast zur Stille fehlt (so ähnlich wie ein Autobahnanwohner sich an einen konstanten Lärmpegel gewöhnt, indem er unbewusst eine Nullpunktsverschiebung seiner Hörempfindung vornimmt), oder auch weil sein Hörsinn für himmlische Musik generell zu schwach sei. Unausweichlich konnte sich die naturalistische Sichtweise der Sphärenmusik nicht weiter halten, sobald klar war, dass es zur Schallübertragung Luft braucht, die es im Weltall nicht gibt. Deswegen wird auch lieber von Sphärenharmonie als von Sphärenmusik gesprochen, denn es geht um Zahlenverhältnisse, um mathematische Strukturen – gleichsam um die Notenschrift, nicht die Musik. Wenn hier weiterhin der Begriff Sphärenmusik synonym zu Sphärenharmonie benutzt, oder diesem sogar vorgezogen wird (wie auch im Titel dieses Essays), so eigentlich der Provokation willen: Harmonikale Strukturen oder rythmische Schwingungsmuster sollen nicht bloss intellektuell (als Sphärenharmonie) verstanden, sondern auch seelisch (als *Sphärenmusik*) *vernommen* werden können.⁶ Anders gesagt: Sphärenmusik betont den *symbolischen* Gehalt der Sphärenharmonie.

Halten wir das nochmals fest, denn die Unterscheidung ist fundamental und gilt auch für heutige Analogien „himmlischer Musik“: Es gibt zwei Arten oder Verständnisweisen von Sphärenmusik: 1. die *mystische* (pythagoräische), die auf *Zahl* und *Proportion* beruht und insofern einer *räumlichen* Struktur entspricht, und 2. die *naturalistische*, die auf *Bewegung*, also einer *zeitlichen* Struktur beruht, – immer natürlich bezogen auf Körper und Vorgänge am „Himmel“ oben oder im Kosmos, im Weltall. Die Zweiteilung lässt sich auch anwenden auf Dinge der irdischen Natur, aber dann würde man nicht von Sphärenmusik sprechen. Wie erwähnt, ist die naturalistische Interpretation eigentlich nicht mehr möglich (wobei sie in gewisser Weise durch die Gravitationswellen wieder lebendig wird, s.u.); insofern wäre auch sie als mystisch zu bezeichnen, wenn etwas „gehört“ werden soll. Wir haben es, objektiv betrachtet, damals wie heute, primär stets mit – symbolfähigen, transponierbaren – *musikalischen Analogien* zu tun: Wohlproportionierte Himmelskörper oder Bahnabstände etc. konnte und kann man sich als riesige, harmonisch klingende Musikinstrumente denken (so wurden z.B. bei den Griechen die sieben Planetensphären mit den sieben Saiten der Lyra analogisiert); rythmisch schwingende Himmelskörper oder periodische Bewegungen aber gleichsam als Musikinstrumente „in Aktion“ (nicht notwendigerweise konsonant, aber tönend).

Kehren wir nochmals zur geschichtlichen Entwicklung zurück. Nachdem also im Übergang zur Neuzeit der griechische Sphärenkosmos in Scherben lag, hätte eigentlich Schluss sein sollen mit Sphärenmusik oder Sphärenharmonie. Es gab keine kristallene Sphären mehr, deren Bewegung reale Töne oder deren (ohnehin fiktive) harmonische Ordnung (in Analogie) gedachte Töne hätte erzeugen können, ungeachtet einer stets vorhandenen, dunklen, unbewussten Ahnung von einer urtümlichen Himmelsmusik, die immun gegenüber allem Wandel des Weltbilds ist. Da kam Johannes Kepler, glühender Anhänger des kopernikanischen Heliozentrismus und der pythagoräisch-platonischen Geometrie und Harmonik zugleich, und fand nach langem Suchen in den *wahren* Distanzen und Umlaufzeiten der frei schwebenden Planeten einen neuen äusseren, diesmal *realen* Gegenpart zur Himmelsmusik. Jetzt erst schien, zum grossen Entzücken Keplers, dieser uralte Mythos eine rational-wissenschaftliche Grundlage zu erhalten, schienen Mystik und Wissenschaft eine innige Verbindung

⁶ Von seelisch statt psychisch zu reden, ist eine andere Provokation, die dasselbe bezweckt. Psyche und Seele werden hier synonym verwendet. Mit „seelisch vernehmen“ ist wieder ein Hören mit den „inneren“ Ohr gemeint.

einzugehen, es galt bloss, das „Hören“ der Sphärenmusik funktional gleichsam den Augen zu übertragen, als Sphärenharmonie ohne Sphären.⁷ Die schönen Proportionen empfand er, ganz nach seinen antiken Vorbildern, nicht bloss als messbare Quantitäten, sondern auch als seelisch wirksame *Qualitäten*. Für Kepler war die Weltseele Platons noch eine lebendige Wahrheit; in der Sonne sah er ihr Herz und Zentrum sowie den wahren Standpunkt, auf den sich seine neue „Weltharmonik“ ausschliesslich bezog; seine Musik „erklingt“ für die göttliche Sonne, aber der Mensch darf geistig daran teilhaben. Einiges der Keplerschen Weltharmonik bleibt strukturell bis heute bestehen (nicht alles, siehe Kapitel 2). Wenn sie als spirituelles Konzept rasch verblasste, so lag das daran, dass man, schon zu Keplers Zeiten, nicht mehr an die Weltseele glaubte⁸; das Denken in Analogien und Symbolen gegenüber dem nüchternen Begreifen rasch ins Hintertreffen geriet; und auch weil sich bald zeigte, dass das Weltall weit mehr umfasste als das Sonnensystem.

Nach Keplers grossartigem aber vergeblichem Versuch, die Sphärenharmonie zu retten, war es zunächst schwierig, dem mechanistischen Weltgetriebe (man sprach jetzt von *Himmelsmechanik!*) – befördert ausgerechnet durch Keplers Planetengesetze – noch irgendwelche geistigen Töne abzugewinnen. So beklagte sich etwa Novalis in seinem Essay „Die Christenheit oder Europa“, dass *die unendliche schöpferische Musik des Weltalls zum einförmigen Klappern einer ungeheuren Mühle* geworden sei. Überhaupt scheint sich die Sphärenmusik nach Kepler ins Asyl der Dichtung und der Religion, letzteres in Form der überaus populären Engelsmusik, zurückgezogen zu haben, – eine Robustheit, die natürlich wiederum auf die tiefe Symbolik des Konzepts hinweist.

Nun hat sich aber eine neue Situation ergeben: Im physikalischen Weltbild des 20. und 21. Jahrhunderts ist im Prinzip die rein mechanistische Naturauffassung (das „Mühlengeklapper“), besonders durch die Quantenphysik, endgültig überwunden, und es finden sich – über das Sonnensystem hinaus – viele räumliche und zeitliche (harmonikale und rythmische) Strukturen, die sich ganz zwanglos als aussenweltliches Gegenstück, als Analogie zu den mythischen Konzepten einer Sphärenmusik und einer Klangschöpfung anbieten. Damit ergibt sich auch die Möglichkeit einer *symbolischen Wiederkehr der Sphärenmusik*, wie ich das nennen möchte. Dass eine solche *unbewusst* schon vollzogen ist, zeigt sich am eingangs beschriebenen, häufigen, wenn auch mehr spielerischen als ernsthaften Gebrauch der kosmischen Klangmetapher. Ich erachte es als wichtig, sich dieser Symbolik bewusst zu werden und sich ihrer bewusst zu bedienen. Was mit einer symbolischen Sichtweise (oder besser: Hörweise!) gewonnen werden kann, soll im Schlusskapitel erörtert werden. Kurz gesagt, erlaubt oder unterstützt sie, ganz im Sinne von Kepler, aber auch Pauli und Jung⁹, die Wahrnehmung von Qualitäten und von Sinnzusammenhängen. Wir versuchen hier, die Sphärenmusik aus der esoterischen Ecke, aus dem Asyl der Dichtung und Religion herauszuholen bzw. sie mit einer wissenschaftlichen Betrachtungsweise zu versöhnen.

Zunächst geht es darum, in verschiedenen Gebieten der Astrophysik und Kosmologie solche Strukturen ausfindig zu machen, die sphärenharmonische oder sonstwie rythmische, musikalische Aspekte aufweisen. Dabei sollen die bereits bekannten und wichtigsten dieser Strukturen (von denen wir einige genannt haben) der Reihe nach unter diesem Aspekt besprochen werden. In erster Linie hält man, wiederum in der Nachfolge Keplers, nach *harmonikalen* Strukturen periodischer Prozesse Ausschau. „Harmonik“, in Abgrenzung zum rein musiktheoretischen Begriff der „Harmonie“, umfasst generell alle

⁷ Aber auch Kepler liebäugelte noch mit der naturalistischen Verständnisweise, wenn er ausrief: „Gib dem Himmel Luft, und es wird wirklich und wahrhaftig Musik erklingen.“ (an Herwart von Hohenburg, 6. Aug. 1599; aus Johannes Kepler: *Der Mensch und die Sterne. Aus seinen Werken und Briefen*, Wiesbaden 1953, Insel Nr. 576).

⁸ Die Weltseele war ohnehin kein kirchlicher Glaubensartikel und längst durch den Heiligen Geist „ersetzt“.

⁹ Ein Anklang an den Pauli-Jung-Dialog, mehr dazu im Schlusskapitel.

Bereiche der Natur und Kunst, bei denen einfache, naturgesetzliche Zahlenverhältnisse (Proportionen) vorliegen, welche bestimmten Sinnesqualitäten entsprechen (konsonante, „harmonische“, als auch dissonante, „unharmonische“ Intervallempfindungen).¹⁰ Im Kern befasst man sich in der Harmonik mit der „Obertonreihe“ (den Proportionen 1:2:3:4 usw.), auf welcher schliesslich auch unser Tonsystem beruht. Aber auch Schwingungen aller Art unter den Himmelskörpern, die nicht unbedingt harmonikal sein müssen, mag man, wie oben erläutert, im pseudo-naturalistischen Sinn mit „kosmischer Musik“ assoziieren. Wir schliessen als Erstes gleich an Kepler an und fragen, was denn von seiner Weltharmonik im Sonnensystem übrig geblieben sei; ob sich heute noch von einer Harmonik im Sonnensystem sprechen lasse. Dann machen wir einen Ausflug in den Mikrokosmos, denn dort sind, mit der Einführung des Quantenprinzips durch Max Planck, erstmals in der Moderne wieder glasklare harmonikale Strukturen aufgetaucht. Mit der Helioseismologie und neuerdings der Gravitationswellenforschung betreten wir sodann Gebiete, die fast überborden mit kosmischen Klangmetaphern. Die für mich grossartigste, hochsymbolische Klanganalogie im Universum findet sich jedoch in den sogenannten akustischen Peaks im „kosmischen Mikrowellenhintergrund“. Durch die Kopplung von Raum und Zeit über die Lichtgeschwindigkeit verschmelzen hier die mystisch-harmonikale und die naturalistisch-rythmische Verständnisweise der himmlischen Musik, und es verschmelzen die statische Sphärenharmonie und die dynamische Klangschöpfung der Welt in einem Ereignis, das man hässlicherweise, aber vielleicht doch auch treffenderweise „Urknall“ genannt hat. Am Schluss folgt nochmals ein Plädoyer für – Symbolik.

2 Harmonik im Sonnensystem?

Das Konzept der griechischen Sphärenharmonie basierte auf der Annahme, dass die geozentrischen Kugelschalen (= „Sphären“), in denen man sich die Planeten (inklusive Sonne und Mond) sowie zuoberst die Fixsterne eingebettet dachte, in ihren Abständen oder Umschwungsperioden einer ganz bestimmten harmonikalen Abfolge gehorchten, wodurch ein (übersinnlich wahrnehmbarer) göttlicher Zusammenklang, eine *Symphonie* erzeugt würde. Wie diese harmonikale Abfolge genau aussah, darüber konnte nur spekuliert werden; es ergaben sich im Laufe der Geschichte auch ganz verschiedene Ausformungen von Sphärenmusik. Häufig wurden die sieben Planetensphären (Mond, Merkur, Venus, Sonne, Mars, Jupiter, Saturn) mit einer siebenstufigen diatonischen Skala verknüpft, so dass die Spanne Erde-Fixsternhimmel gerade eine Oktave, Erde-Sonne typischerweise eine Quinte (in Tonhöhe nach oben) umfasste.¹¹

Nach der kopernikanischen Wende wurden die fiktiven geozentrischen Sphären durch reale heliozentrische Umlaufbahnen ersetzt. Planeten waren es jetzt nur noch sechs, da Sonne und Mond wegfielen, die Erde dafür hinzukam; Fixsterne blieben ganz weg im „Sonnensystem“, ihre Sphäre hatte sich gleichsam in den dreidimensionalen Umraum entleert. Eine harmonikale Struktur des Sonnensystems müsste sich nun also um die Planetenbahnen ranken. Kepler versuchte schon früh, die relativen Bahnabstände, die sich direkt aus der Geometrie des heliozentrischen Systems ergeben hatten, in eine „schöne“, dem Willen eines Schöpfergottes würdige Ordnung zu bringen. Nach langem

¹⁰ Wir folgen damit der Nomenklatur Hans Kayzers, des Begründers der modernen Harmonik: Kayser, Hans: *Der hörende Mensch. Elemente eines akustischen Weltbilds*, Leipzig 1932 (Neudruck Stuttgart 1993), – *Akróasis. Die Lehre von der Harmonik der Welt*, Basel 1946. Siehe auch Haase, Rudolf: *Der messbare Einklang. Grundzüge einer empirischen Weltharmonik*, Stuttgart 1976.

¹¹ Genauerer bei Schavernoeh (Anm. 3).

Herumprobieren fand er, dass die Planetenabstände ziemlich genau einer Folge von ineinander verschachtelten, durch Kugelschalen begrenzten platonischen Körpern entsprachen, von denen es bekanntlich nur fünf verschiedene gibt. Das war die gesuchte Ordnung, die Kepler in seinem Erstlingswerk *Mysterium cosmographicum* (1596) veröffentlichte. Aber diese erste Entdeckerfreude war nicht nachhaltig, denn es ergaben sich zunehmend Ungereimtheiten mit den Planetenbahnen. Durch glückliche Umstände kam Kepler, zunächst als Assistent, dann als Nachfolger von Tycho Brahe am kaiserlichen Hof in Prag, in den Besitz der sehr genauen Marsdaten Brahes. Diese erlaubten ihm nach jahrelanger Rechnerie, die genaue *Form* der Marsbahn zu ermitteln: kein Kreis, sondern eine Ellipse!, mit der Sonne in einem der beiden Brennpunkte; gültig für alle Planetenbahnen. Dieses „erste Keplersche Gesetz“ (wie wir es heute nennen), von Kepler zurecht unter dem Titel *Astronomia nova* (1609) publiziert, schien zunächst eine Abkehr von einer göttlich inspirierten Harmonie zu bedeuten, denn das griechische (platonische) Schönheitsideal der Geometrie hatte Kreis und Kugel über alles gestellt. Warum sollten die Planetenbahnen einer so unvollkommenen Form wie der Ellipse gehorchen? Das war der Stachel, der Kepler nicht ruhen liess, bei allem Triumph über die Marsbahn.

Nun folgt wieder eine lange Phase des Brütens und Grübelns; Kepler ist getrieben von einer unstillbaren Sehnsucht nach kosmischer Harmonie. Umso grösser dann die Erlösung nach erfolgtem Durchbruch, die ihn im Vorwort zum fünften Buch seiner Weltharmonik (*Harmonices mundi*, 1619) ekstatisch ausrufen lässt: *Ich habe die goldenen Gefässe der Ägypter geraubt, um meinem Gott daraus eine heilige Hütte zu bauen...* Was war passiert? Kepler nahm einen konsequent heliozentrischen Standpunkt ein und *analogisierte* die von der Sonne aus berechnete Winkelgeschwindigkeit eines Planeten mit der Frequenz (Höhe) eines Tons. Die schnelle Bewegung eines sonnennahen Planeten (wie Merkur und Venus) würde solcherart einem hohen Ton entsprechen, die langsame Bewegung eines sonnenfernen (wie Jupiter und Saturn) aber einem tiefen, das folgt aus dem „dritten Keplerschen Gesetz“. Mehr noch, auf einer elliptischen Bahn würde, gemäss dem „zweiten Keplerschen Gesetz“, die Winkelgeschwindigkeit eines und desselben Planeten in Sonnennähe grösser und deswegen der entsprechende Ton höher sein als in Sonnenferne – maximal hoch im *Perihel* (dem kleinsten Abstand zur Sonne), maximal tief im *Aphel* (dem grössten Abstand), so dass jeder Planet, ins Hörbare transponiert, abhängig von seiner Bahnexzentrizität, einen sirentartigen Singsang (oder ein Glissando) von sich geben würde. Was Kepler nun entdeckte, war (und ist), dass die Frequenzverhältnisse zwischen Perihel und Aphel für einen bestimmten Planeten, aber auch zwischen Perihel/Aphel von Planet A und Perihel/Aphel von Planet B, oft einem kleinen ganzzahligen Verhältnis entsprechen, wie wir das von der Obertonreihe her kennen. Zum Beispiel stehen das Perihel von Saturn und das Aphel von Jupiter in einem Verhältnis von 1:2 (= Oktave), umgekehrt das Aphel von Saturn und das Perihel von Jupiter in einem solchen von 1:3 (= Duodezime), während Mars zwischen Aphel und Perihel um eine Quinte (2:3) schwankt, u.s.w.¹² Es sind längst nicht alle Verhältnisse so schön harmonikal, und die „harmonikalen“ stimmen auch nicht immer ganz genau. Aber wenn Kepler diese „Untermenge“ der besonderen Verhältnisse nahm und durch Oktavierung in eine Oktave hineinpackte, so erhielt er, je nachdem, eine Durtonleiter oder eine Molltonleiter. Das Planetensystem schien somit – wie vormals in der antiken Welt der Sphären, aber diesmal faktisch begründet! – geradezu das Urbild der irdischen Musik abzugeben, – oder in Keplers eigenen Worten in seiner Weltharmonik: *Es sind also die Himmelsbewegungen nichts anderes als eine fortwährende mehrstimmige Musik (durch den Verstand, nicht das Ohr fassbar)*. Jetzt war ihm endlich

¹² Die „schönen“ Verhältnisse unter den Planeten finden sich in Keplers Weltharmonik, Buch V; siehe auch Kayser („Der hörende Mensch“) und Haase, Anm. 10; die übersichtlichste Darstellung in H. Warm, S. 52 (Anm. 13).

auch klar, weshalb die Planetenbahnen Ellipsen sein mussten statt bloss Kreise – : diese Form diente Gott als Werkzeug zur harmonikalen Gestaltung der Welt.

Seit Kepler sind die Daten der Planetenbahnen natürlich sehr viel genauer geworden. Dennoch haben sich die Werte nicht substantiell geändert. Die „schönen“ Verhältnisse, wie sie oben zum Beispiel für Saturn, Jupiter und Mars zitiert wurden, bleiben also auch heute bestehen. Aber wie sicher sind wir denn, dass es sich hier nicht um Zufallstreffer handelt? Bei den vielen möglichen Kombinationen von Bahndaten werden vermutlich immer einige der Verhältnisse recht harmonisch sein. Merkwürdigerweise ist das erst kürzlich durch Hartmut Warm statistisch untersucht worden, und sein Verdikt ist klar: Keplers Weltharmonik ist nicht signifikant von einem Zufallssystem verschieden, wenn das *Ganze* betrachtet wird; die meisten Intervalle sind eben doch zu „unrein“.¹³

Ohnehin hat sich die Diskussion um ein wohlgeordnetes Sonnensystem nach Kepler in eine etwas andere Richtung verschoben, sie hat gewissermassen einen anderen Kristallisationskeim gefunden: das sog. *Titius-Bode-Gesetz*. Das Gesetz, formuliert von J. D. Titius und J. E. Bode in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts, ist eine einfache Zahlenfolge, welche die Abstände der Planeten von der Sonne erstaunlich gut wiedergibt; ihre genaue Form tut hier nichts zur Sache (erwähnenswerterweise enthält sie aber die Oktavfolge 2^n). Sie wurde deswegen populär, weil der 1781 entdeckte Planet Uranus so gut hinein passte und die ab 1801 entdeckten Asteroiden so schön die Lücke zwischen Mars und Jupiter füllten, dort wo ein Planet zu „fehlen“ schien. Obwohl Neptun (1846 entdeckt) später deutlich aus der Reihe tanzte, sah das Ganze nach einem physikalischen Gesetz aus. Doch ist bis heute keins gefunden, auch wenn viel darüber spekuliert wurde. Eine statistische Untersuchung zeigt ohnehin, dass eine Folge von dieser Art statistisch zufällig erwartet werden kann.

Exakte Zahlenverhältnisse, reine Intervalle (musikalisch interpretiert) gibt es im Sonnensystem aber doch, und diese haben ganz physikalisch mit sog. *Resonanzen* zu tun. Betrachten wir zuerst die Asteroiden, wo dies am augenfälligsten ist. Asteroiden, auch Planetoiden genannt, sind jene Myriaden von Kleinkörpern, die meist zwischen Mars und Jupiter die Sonne umkreisen. Viele sind nichts als lose Schutthaufen von wenigen hundert Metern Durchmesser, die knapp durch ihre äusserst schwache Eigengravitation zusammengehalten werden (Abb. 1). Auf die Herkunft und Zusammensetzung dieser faszinierenden Himmelskörper können wir nicht eingehen, für uns ist vor allem die Verteilung ihrer Bahnen von Belang. Bereits im 19. Jahrhundert hatte Daniel Kirkwood entdeckt, dass die Verteilung der grossen Halbachsen der Asteroiden an ganz bestimmten Stellen Lücken aufweist (die „Kirkwoodlücken“), und zwar jeweils dort, wo die entsprechende Bahnperiode oder Bahnfrequenz (umgekehrt proportional zur Periode) mit derjenigen Jupiters weiter aussen in einem kleinen, ganzzahligen Verhältnis steht. Abbildung 2 zeigt eine moderne Darstellung dieses Sachverhalts. Den tiefsten Einschnitt in der Verteilung findet man dort, wo die Bahnfrequenz gerade der dreifachen Jupiters entspricht; dort umkreist ein Asteroide die Sonne dreimal, während Jupiter dies im selben Zeitraum bloss einmal tut. Schon Kirkwood

¹³ Warm, Hartmut: *Die Signatur der Sphären. Von der Ordnung im Sonnensystem*, Hamburg 2001. Wir haben das mit Hilfe einer alternativen Methode im Rahmen einer Studentenarbeit an der Universität Basel nachgeprüft und kommen zum selben Schluss. Hartmut Warm ist aber nicht dabei stehen geblieben, sondern hat, ganz im Geiste Keplers, das „harmonikale Potential“ aller möglichen Bahnparameter der Planeten ausgelotet und ist scheinbar fündig geworden: Benutzt man statt der (Keplerschen) Winkelgeschwindigkeiten die *linearen* Geschwindigkeiten (in Km/s) zur Intervallbildung, dann ist die harmonikale Struktur des Planetensystems hochsignifikant. Auch das konnten wir bestätigen. Vorausgesetzt ist allerdings, man beschränkt sich auf die mittleren und die Aphelgeschwindigkeiten (die Perihelgeschwindigkeiten passen nicht) und bezieht auch den Kleinplaneten Pluto mit ein. Wie man diesen Befund deuten soll, ist unklar. Harmonikale Verhältnisse in den linearen Geschwindigkeiten sind kaum physikalisch zu interpretieren; Winkelgeschwindigkeiten (Perioden) hingegen sind immer „empfindlich“ gegenüber Resonanzen (s.u.).

vermutete, dass diese 3:1-Resonanz dazu führen müsste, dass ein Asteroide in dieser Zone, durch das periodische „Gezerre“ Jupiters immer an derselben Stelle, aus seiner Bahn geworfen wird. Ähnlich würden sich die Lücken bei anderen Resonanzen (wie 5:2 oder 7:3, nicht alle haben Lücken!) erklären lassen. Das klingt ganz plausibel, denn die potentiell zerstörerische Wirkung von Resonanzen ist gut bekannt (man denke an den Auto- und Flugzeugbau).

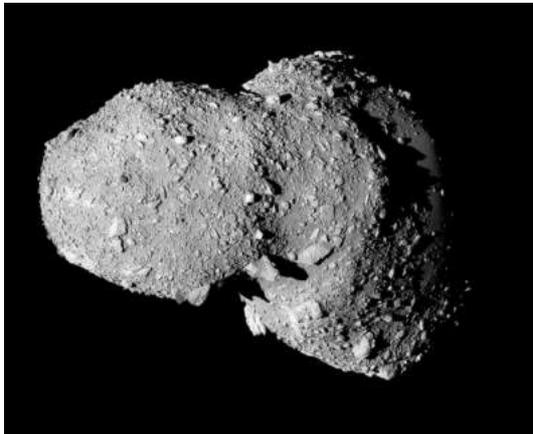


Abb. 1 Der 1998 entdeckte, Erdbahn kreuzende Asteroide 25143 *Itokawa* (540m x 270m x 210m). Aufnahme vom Vorbeiflug der japanischen Sonde *Hyabusa* 2005. (Bild: JAXA)

Verteilung der Asteroiden des Hauptgürtels

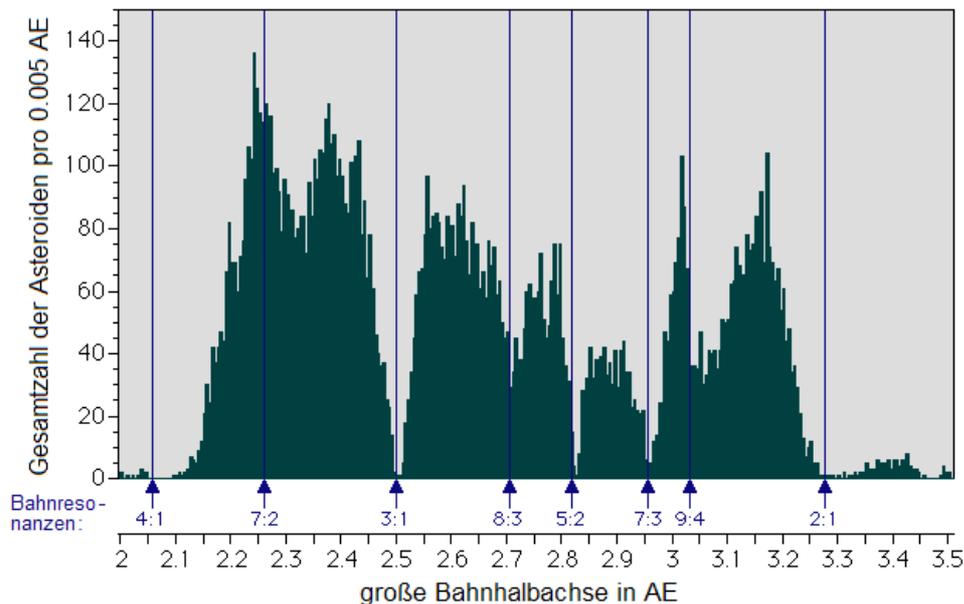


Abb. 2 Histogramm der grossen Bahnhalbachsen der Asteroiden im Hauptgürtel zwischen Mars und Jupiter, in AE (= Astronomische Einheit: Entfernung Erde-Sonne, ca. 150 Mio Km). Mars stünde links ausserhalb bei 1.5 AE, Jupiter weit rechts ausserhalb bei 5.2 AE. Man beachte die tiefen Einschnitte („Kirkwoodlücken“) in der Verteilung, z.B. bei 2.5 AE, wo die Bahnfrequenz nach dem 3. Keplersgesetz gerade dreimal der Bahnfrequenz Jupiters beträgt, hier mit 3:1-Bahnresonanz bezeichnet. Nicht bei allen Resonanzen entstehen Lücken, siehe Text. (Bild: NASA/Phocaea)

In Wirklichkeit ist die Sache sehr viel komplexer, und es dauerte rund hundert Jahre, bis sich um 1970 herum ein Verständnis der wahren physikalischen Hintergründe der Kirkwoodlücken im Rahmen der

Chaostheorie abzuzeichnen begann.¹⁴ Als es dem Himmelsmechaniker Jack Wisdom mit Hilfe eines speziellen Computers, eines sog. digitalen Planetariums, erstmals gelang, die Bahn eines Testkörpers in der 3:1-Kirkwoodzone über einen längeren Zeitraum von ein paar Millionen Jahren zu verfolgen, enthüllte sich die erratische Eigenschaft der Konstellation: Ein hypothetischer Asteroide in der 3:1-Zone kann für 100'000 Jahre „brav“ auf einer nahezu kreisförmigen Bahn die Sonne umrunden, um dann ganz unerwartet und unvorhersehbar für eine gewisse Zeit auf eine stark elliptische Bahn umzuschwenken, die ins Innere des Sonnensystems, in die Zonen von Mars und Erde führt (Der Asteroide in Abb. 1 ist ein solcher Erdbahnkreuzer oder *Near Earth Asteroid, NEA*). Solche „Tauchgänge“ erfolgen immer wieder, so dass eine nahe Begegnung mit einem inneren Planeten, die den Kleinkörper aus dem Sonnensystem hinaus schleudert, oder gar ein Zusammenstoß auf lange Sicht nicht ausbleiben wird. Asteroiden, die den Resonanzonen zu nahe kommen, werden dadurch systematisch aus dem Verkehr gezogen und es entstehen Lücken in der Bahnverteilung.

In der Nähe von Resonanzen sind Bahnen im Allgemeinen nicht mehr berechenbar, das hatte schon Henri Poincaré gegen Ende des 19. Jahrhunderts gezeigt, aber erst die auf seinen Ideen beruhende Theorie des „deterministischen Chaos“, oder kurz die Chaostheorie formalisierte diesen blinden Fleck der Newtonschen Himmelsmechanik: Resonanzen können im „Phasenraum“ (dem Raum der Orts- und Geschwindigkeitskoordinaten) ins Fahrwasser einer „chaotischen Zone“ führen. Dort ist die Bahn eines Körpers derart empfindlich gegenüber kleinsten Änderungen in den Anfangsbedingungen, dass eine Unsicherheit in den Bahnparametern *exponentiell* anwächst (dies gilt als Charakteristikum von „Chaos“). In der Folge ist die Position des Körpers nach einer gewissen Zeit nicht mehr vorherzusagen. Resonanzen bzw. chaotische Zonen müssen aber nicht zwingend auf die „schiefe Bahn“ führen wie bei der 3:1-Kirkwoodlücke; sie können im Gegenteil auch stabilisierend wirken. Es gibt eine ganze Reihe von bekannten stabilen Resonanzen im Sonnensystem. Zum Beispiel stehen drei der vier Galileischen Satelliten Jupiters in einer nahezu perfekten 4:2:1-Resonanz; hier führen die Dynamiker die zusätzliche Wirkung der Gezeiten als Stabilitätsfaktor ins Feld. Weiter steht Neptun mit Pluto und vielen weiteren Kleinkörpern, den sog. Plutinos, in einer 3:2-Resonanz. Auch bei den Asteroiden ist 3:2 positiv besetzt (nicht sichtbar in Abb. 2). Als entscheidend wichtig für oder wider Stabilität gilt, wie eng die Resonanzen stehen, ob sich Resonanzen (mit verschiedenen Körpern) überschneiden oder nicht. Bei den Kirkwoodlücken überwiegen die Überschneidungen und das Chaos führt zu Instabilität, zu Rauswurf und Zusammenstoß. Bahnresonanzen sind eines der schwierigsten und aktivsten Forschungsgebiete der Himmelsmechanik.¹⁵

Obwohl es stabile Resonanzen im Sonnensystem gibt, ist doch die Existenz von zerstörerischen Resonanzen, die ins Chaos führen, sehr bemerkenswert. Denn damit sind wir bei der *exakten Gegenthese zur Sphärenharmonie* angelangt: Schöne, einfache Zahlenverhältnisse mögen den menschlichen Geist befriedigen, weil sie etwas vom göttlichen Geist widerspiegeln, – doch *zu viel Schönheit und Harmonie kann gefährlich werden!*¹⁶ Dass jene Kleinkörper zwischen Mars und Jupiter gelegentlich aus der Bahn

¹⁴ Eine spannend geschriebene Darstellung dieser Entwicklung: Peterson, Ivars: *Was Newton nicht wusste. Chaos im Sonnensystem*, Birkhäuser, Basel 1994 (Frankfurt 1998).

¹⁵ Inzwischen kennen wir auch einige hundert „Exoplaneten“, also Planeten, die um andere Sterne kreisen. Erste Untersuchungen von Mehrfachplanetensystemen unter diesen haben gezeigt, dass die Planeten im Allgemeinen Resonanzen vermeiden. Merkwürdigerweise halten sich die Planeten aber oft knapp ausserhalb der 2:1 und 3:1 Bahnresonanzen auf, während sie die Zone knapp innerhalb derselben eher vermeiden.

¹⁶ Ich kann nicht umhin, hier an den Mythos des Sirengesangs erinnert zu werden. Innerhalb des unendlichen Zahlenkontinuums stellen *ganze* Zahlen und ihre Verhältnisse (also die rationalen Zahlen) eigentlich Singularitäten dar (das bloße, „rohe“ Zählen ganzer Zahlen gehört freilich in den Bereich der Alltagserfahrung). Singularitäten faszinieren, berauschen, ziehen uns magisch an. Sich mit ihnen ganz identifizieren, sie „anhören“ zu wollen, würde

geraten und im Asteroidengürtel Lücken hinterlassen, klingt zunächst harmlos. Aber man muss bedenken, dass solche Irrläufer (die *NEAs*) die Erde treffen und das Chaos ihrer Bahn auf das irdische Leben übertragen können. Das ist auch immer wieder geschehen in der Geschichte der Erde, und es wird weiterhin geschehen.

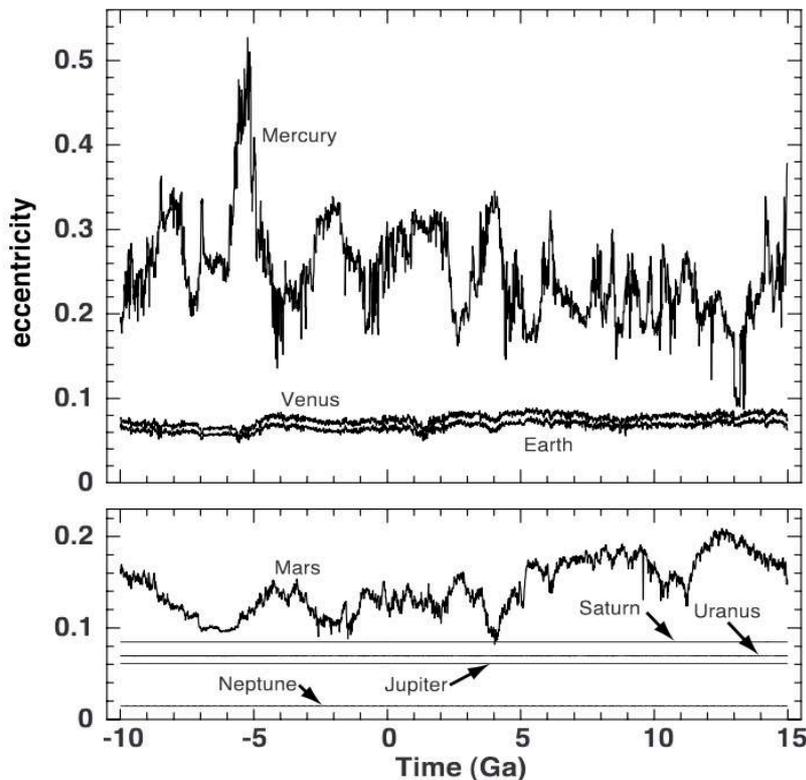


Abb. 3 Numerische Integration des Sonnensystems über einen Zeitraum von 25 Milliarden Jahren (von -10 bis +15 Ga = Gigajahren). Für jeden Planeten ist die Entwicklung der Bahnexzentrizität gezeigt. Die Exzentrizität ist ein Mass für die Abweichung von der Kreisform. Kreisförmige Bahnen haben $e = 0$, mit wachsendem e wird eine Bahn zunehmend elliptisch. Die Bahnen der Riesenplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun sind praktisch stationär. Im Gegensatz dazu variiert bei den inneren Planeten, besonders Merkur und Mars, die Exzentrizität (ebenfalls die Bahnneigung) sehr stark, so dass es im Innern des Sonnensystems zu Bahnüberschneidungen und im Extremfall zu Zusammenstößen kommen kann. Wichtig: eine nochmalige Integration des Systems würde im Detail andere, aber statistisch ähnlich grosse „Ausschläge“ der Exzentrizitäten zeigen, d.h. die Bahnen der inneren Planeten sind chaotisch, ihre Positionen strikte nicht genau vorausberechenbar. (Bild aus Laskar 2012, Anmerkung 17)

aus der Realität, aus dem Leben hinaus, letztlich in den Tod führen; es gibt sie in der Natur und im Leben gar nicht wirklich, sie sind transzendent. Dazu passend, lässt Platon die Sphärenmusik von überirdischen, jenseitigen Fabelwesen, den Sirenen, ausführen (im Mythos des Er im Dialog *Politeia*). Sphärenmusik ist nur mit dem inneren, geistigen Ohr „hörbar“. Sie real, mit physischem Ohr hören zu wollen, ist unmöglich bzw. bedeutet den Tod. Was wir real hören können, kann nie vollkommen rein sein. Wie sinnreich deshalb, dass die Sirenen bereits in der Antike von den Musen, den Schutzgöttinnen der Künste, abgelöst wurden (s. Schavernoeh, Anm. 3). Kunst ermöglicht dem Menschen die Bewältigung und Kultivierung der göttlichen Transzendenz. Musik ist „realisierte“, „herunter geholte“ Sphärenmusik, aber um den Preis des Verlusts der singulären, *absoluten* Reinheit. Damit ist nicht die temperierte Stimmung gemeint, an die wir uns längst gewöhnt haben. Auch „reine“ Intervalle können nie mathematisch exakt rein auftreten, denn die Welt ist physisch real, nicht mathematisch ideal. Aber das unlösbare Problem der Stimmung ist in diesem Zusammenhang ebenfalls vielsagend. Das „pythagoräische Komma“ (die „ärgerliche“, kleine Differenz zwischen 12 Quinten und 7 Oktaven) verunmöglicht, genau wie die zeitgleich entdeckte Irrationalität, eine einfache intellektuelle Bewältigung, eine „Rationalisierung“ der Transzendenz. Das ist der Wachs in unseren Ohren, der uns vor dem gefährlichen, überirdisch-jenseitigen Sirenengesang schützt!

Man muss diese „Disharmonie“ in einem grösseren Zusammenhang sehen. Die Stabilität des ganzen Sonnensystems, zumindest des inneren Sonnensystems mit der Erde, ist durch die chaotische Dynamik langfristig in Frage gestellt. Die Frage nach der Stabilität des Sonnensystems hat eine lange Geschichte.¹⁷ Meinten die grossen Himmelsmechaniker Laplace und Lagrange im späten 18. Jahrhunderts noch, analytisch nachgewiesen zu haben, dass die Bahnstörungen der Planeten untereinander lediglich zu periodischen Schwankungen der „Bahnelemente“ (wie der Exzentrizität) führen und somit die Stabilität des Sonnensystems gesichert wäre, so wurde dies, beginnend mit Poincaré und später durch die Chaostheorie, prinzipiell in Zweifel gezogen. Trotzdem ging man immer von der Stabilität des Sonnensystems aus. Wie sich jetzt gezeigt hat, war dieser Optimismus verfrüht und nur dem Umstand mangelnder Rechenkapazität geschuldet. Das *ganze* Sonnensystem numerisch zu simulieren, und zwar nicht nur über Millionen, sondern über Milliarden Jahre, ist nochmals eine Grössenordnung schwieriger, als die Bahnen resonanter Asteroiden nachzurechnen. Solche extrem aufwendige Langzeitrechnungen der Entwicklung des ganzen Planetensystems sind in den letzten Jahren von Jacques Laskar in Paris durchgeführt worden, und die Resultate sind spektakulär. Abbildung 3 zeigt eine solche Rechnung für die Entwicklung der Bahnexzentrizitäten. Wie man sieht, passiert bei den äusseren Riesenplaneten (Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun) praktisch nichts, weswegen das System insgesamt auch so stabil ist wie es ist.¹⁸ Bei den inneren Planeten (vor allem Merkur und Mars) schwankt die Exzentrizität jedoch z.T. heftig. Im Detail sind diese Exkursionen weg von der stabilen Norm nicht vorherzusagen; das ganze System ist langfristig, über einen Zeitraum von ca. 10 Millionen Jahren hinaus, chaotisch. Dieses Chaos hat wie bei den Asteroidenlücken mit (allerdings weniger offensichtlichen) Resonanzen zu tun, denen die inneren Planeten mehr als die äusseren ausgeliefert sind. Durch wiederholte numerische Durchläufe des Sonnensystems konnte Laskar zeigen, dass in seltenen Fällen die Exzentrizitäten von Merkur und Mars derart heftig ausschlagen, dass es zwischen den terrestrischen Planeten zu Kollisionen kommt. Es sind Szenarien möglich, in denen die Erde mit Venus, Mars oder Merkur zusammenstösst. Die Wahrscheinlichkeit für eine solche Katastrophe innerhalb der nächsten 5 Milliarden Jahre, der Lebenszeit der Sonne, liegt im Bereich von immerhin einem Prozent!

Angesichts der langfristigen und vielleicht sogar zerstörerischen Bahnschwankungen ist man geneigt, die Frage nach einer „ehernen“ Harmonik im Sonnensystem zu verneinen. Doch genauso gut liesse sich sagen, dass wir es im Gegenteil mit einem Überschuss an Harmonik zu tun haben, denn harmonikale Strukturen sind in der Himmelsmechanik gleichbedeutend mit Resonanzen, und diese führen zwangsläufig zu einem gewissen Mass an Chaos und Instabilität. Vermutlich haben wir einfach die Tendenz, Harmonik mit Harmonie zu verwechseln. Harmonik muss nicht harmonisch, sondern kann auch disharmonisch sein.

Zuletzt müssen wir uns dennoch eingestehen, dass es bewundernswert, ja atemberaubend „schöne“, harmonisch-harikonale Aspekte des Sonnensystems gibt. Diese zu Tage gefördert, d.h. sichtbar gemacht zu haben, ist das grosse Verdienst von Hartmut Warm.¹⁹ Gestützt auf NASA-Bahndaten zeichnet Warm über Zeiträume von Jahrhunderten die relativen Positionen bzw. Verbindungslinien zwischen zwei Planeten auf, entweder mit einem einfachen Zeitschritt (wie beispielhaft in Abb. 4) oder periodisch bei bestimmten Konstellationen (Konjunktionen, Oppositionen), die z.T. ganz andere Planeten

¹⁷ Eine Darstellung der Geschichte und der aktuellen Forschung bietet der führende Spezialist auf dem Gebiet, der französische Himmelsmechaniker Jacques Laskar (2012): *Is the Solar System stable?* Progress in Mathematical Physics, 66, 239 (2013) (on-line: <https://arxiv.org/pdf/1209.5996.pdf>)

¹⁸ In der Frühphase des Sonnensystems sollen aber nach dem sog. Nizza-Modell auch die Riesenplaneten heftige Bahnschwankungen unterlaufen, Uranus und Neptun sogar die Plätze getauscht haben!

¹⁹ Warm, Hartmut: *Die Signatur der Sphären* (Anm. 13). Siehe auch Warms Beitrag in diesem Band.

involvieren. Daraus resultieren wahre graphische Kunstwerke, die entfernt an Lissajous-Figuren erinnern. Warm findet eine gewisse Systematik in den auftretenden Symmetrien; das innere Sonnensystem scheint von einer 5-er-Symmetrie dominiert zu werden (Abb. 4), das äussere von einer 12-er Symmetrie. Ob diese Systematik eine himmelsmechanische Bedeutung besitzt (natürlich wieder im Hinblick auf Bahnresonanzen), ist unklar und harrt noch einer wissenschaftlichen Untersuchung. Dessen ungeachtet widerspiegeln Warms Kunstwerke die tatsächlichen Bewegungsverhältnisse im Planetensystem, und nichts hindert uns daran, sie in ihrem grossen ästhetischen Wert als Symbole der kosmischen Ordnung auf uns wirken zu lassen.

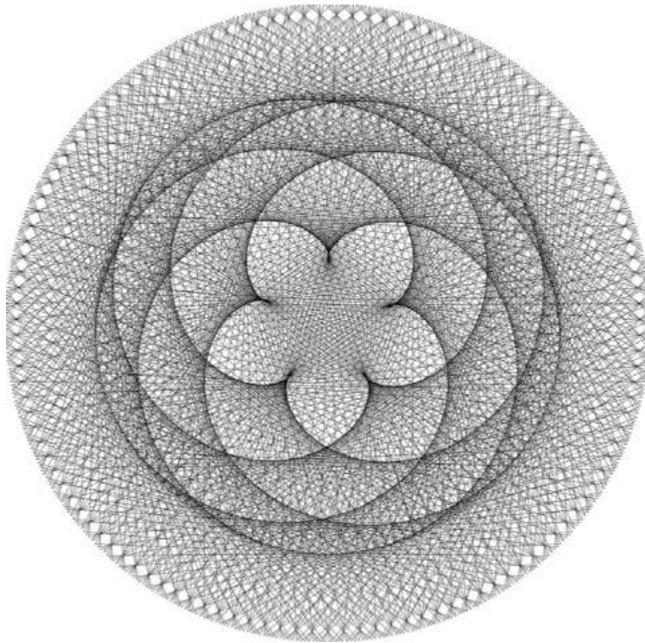


Abb. 4 Raumgerade Venus-Erde, Schrittweite drei Tage, 1000 mal (8 Jahre). Es kommt in diesem Zeitraum zu 5 Konjunktionen, die sich fast exakt an derselben Stelle wiederholen. Der Grund liegt im fast exakten 13:8-Verhältnis der Perioden von Venus und Erde (13 Venusjahre = 8 Erdenjahre). Diese besondere Konstellation ist seit alters bekannt als *pentagramma veneris*. (Bild: nach Warm)

3 Mikrokosmos

Sphärenmusik, Sphärenharmonie bezieht sich auf die Welt im Grossen, den Megakosmos. So mag man sich wundern, warum hier auch der Mikrokosmos zur Sprache kommt. Doch braucht man sich bloss klar zu machen, dass es seit dem neuzeitlichen Umbruch, der „kopernikanischen Wende“ vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltsystem und schliesslich hin zum grenzenlosen, homogenen Weltraum, kein „oben“ und „unten“, und in gewisser Weise auch kein „mega“ und „mikro“ mehr gibt. Das *was die Welt im Innersten zusammenhält*, bestimmt im Verständnis und Anspruch der modernen Physik die Struktur des gesamten Universums, einschliesslich der „sphärischen“, „ätherischen“ Sternenwelt über unseren Köpfen. Und das ist die Domäne der Quantenphysik und Teilchenphysik. Es gibt aber auch einen ganz konkreten Aufhänger für unsere Exkursion in den Mikrokosmos – es ist die Einführung des Quantenprinzips durch Max Planck selbst, von welchem sich ohne Übertreibung sagen lässt, dass es am Ursprung der modernen Physik steht und dessen Herzstück ausmacht. Und nun dies: *Das Quantenprinzip ist im Wesentlichen ein akustisches Prinzip*. Diese auf den ersten Blick etwas ungewöhnliche Sichtweise („Hörweise“) ist von Hans Kayser eingenommen worden, und sie leuchtet ein („klingt gut“).²⁰ Was ist damit gemeint?

²⁰ Kayser, Hans: *Vom Klang der Welt*, Max Niehans, Zürich 1937 (S. 76 ff), siehe auch Haase, Rudolf: *Der messbare Einklang* (Anm. 10), S. 31.

Als sich Planck gegen Ende des 19. Jahrhunderts intensiv mit der sogenannten Hohlraum- oder Schwarzkörperstrahlung beschäftigte (wir nennen sie heute auch Planckstrahlung), stiess er auf ein Problem, das mit allen Mitteln und Ansätzen der „klassischen“ Physik nicht gelöst werden konnte: das Problem der Energieverteilung dieser Strahlung. Erst im Jahr 1900, nach jahrelangem, zähen Ringen stiess Planck, fast schon aus Verzweiflung und widerwillig (wie er später gestand), auf einen genial-einfachen Trick, wie die Energiekurve rein formal erklärt werden kann – indem der Energieaustausch zwischen Strahlung und Materie immer nur paketweise, „gequantelt“ vor sich geht. Solche Energiepakete beinhalten, wenn Strahlung der Frequenz ν im Spiel ist, jeweils ein ganzzahliges Vielfaches der kleinsten Energiemenge $E = h \nu$, mit dem sehr kleinen Proportionalitätsfaktor h zwischen Energie und Frequenz, dem „Planckschen Wirkungsquantum“. Einstein identifizierte das kleinste Energiequantum bald (1905) mit der Energie eines einzelnen Strahlungsquants, eines Lichtpartikels oder „Photons“.

Nun ist aber ein ganzzahliges Vielfaches von einer Frequenz nichts anderes als das Gesetz der Obertonreihe! – daher der Vergleich mit der Akustik. Planck war sich dieser Analogie später durchaus bewusst. Er erwähnt sie z.B. in einer Leipziger Rede wie folgt:

Aus den diskreten Eigenwerten der Energie ergeben sich nach dem Quantenpostulat bestimmte diskrete Eigenwerte der Schwingungsperiode, ebenso wie bei einer gespannten an den Enden festgeklemmten Saite, nur dass bei der letzteren die Quantisierung durch einen äusserlichen Umstand, nämlich durch die Länge der Saite, hier hingegen durch das in der Differenzialgleichung selber enthaltene Wirkungsquantum bedingt wird.²¹

Ob Planck schon während seiner Arbeit am Quantenproblem diesen Gedanken hatte, wissen wir nicht; seine Tagebücher sind später bei der Bombardierung seines Heims in Berlin verloren gegangen. Immerhin ist denkbar, dass er *unbewusst* von akustischem Gedankengut zum Quantenprinzip geleitet wurde, denn Plancks enge Beziehungen zur Musik sind gut bekannt.²² Planck wollte ursprünglich Musiker werden, er war ein ausgezeichnete Klavierspieler (wie auch Heisenberg); mit dem berühmten Geiger Joseph Joachim verband ihn eine enge Freundschaft und die beiden haben oft miteinander musiziert. Nicht zuletzt beschäftigte sich Planck auch als Physiker mit musiktheoretischen Problemen, und zwar gerade in den Jahren vor seinem grossen wissenschaftlichen Durchbruch um 1900 (auch darauf hat Hans Kayser im zitierten Werk aufmerksam gemacht). Das Institut für theoretische Physik in Berlin besass damals ein spezielles Harmonium, das von Hermann von Helmholtz, dem Begründer der wissenschaftlichen Akustik, angeschafft worden war. Die Tastatur dieses Instruments, mit 104 verschiedenen hohen Tönen innerhalb einer Oktave, erlaubte das Spiel in allen denkbaren, natürlichen, pythagoräischen und temperierten Tonsystemen. Mit diesem Instrument führte Planck Untersuchungen zur Klangästhetik durch. Ihn interessierte vor allem die Frage, ob beim *a cappella*-Chorgesang die natürliche (reine) Stimmung der temperierten (gleichstufigen) Stimmung vorzuziehen sei. Plancks Interesse am Problem der musikalischen Stimmung mag auch darin wurzeln, dass er, zumindest zeitweise, über das „absolute Musikgehör“ verfügte, worunter er aber eher gelitten habe, wie er sagte. Seine Erfahrungen und Erkenntnisse publizierte Planck 1893 in der Vierteljahrsschrift für Musikwissenschaft mit einem Aufsatz, betitelt: „Die natürliche Stimmung in der modernen Vokalmusik“.²³ Der Aufsatz ist allgemein ein Plädoyer für die temperierte Stimmung auch in der

²¹ Planck, Max: *Das Weltbild der modernen Physik*, Barth, Leipzig 1929 (S. 28)

²² Man findet diese Bezüge z.B. in: Hermann, Armin: *Planck*, Rowohlt, Reinbek b. Hamburg 1973 (S. 9, 24-25)

²³ Vierteljahrsschrift für Musikwissenschaft, 1893, Band 9, Heft 4, S. 418-440. Man findet diesen Aufsatz on-line im deutschen digitalen Zeitschriftenarchiv.

Vokalmusik, womit sich Planck gegen seinen ehemaligen Lehrer Helmholtz stellte, der die natürliche Stimmung bevorzugte. Die temperierte Stimmung hatte sich damals bereits seit 200 Jahren bewährt und war auch den Chorsängerinnen und -sängern in Fleisch und Blut übergegangen. Trotzdem konnte – und kann es (wer je in einem Chor gesungen hat, kennt das) – vorkommen, dass man unwillkürlich in die natürliche Stimmung verfällt, weil man eben doch dazu tendiert, die reinen, schwebungslosen Intervalle zu genießen, und dann nach gewissen Akkordfolgen zu tief oder zu hoch „landet“, sehr zum Ärger des Dirigenten. Planck diskutiert das Problem und gibt Beispiele solcher Akkordfolgen, und setzt sich wie gesagt für die temperierte Stimmung ein. Und dann schliesst der Aufsatz mit diesen bemerkenswerten Zeilen:

Ob die natürliche Stimmung künftig einmal eine bedeutendere Rolle in der Musik zu spielen berufen ist als jetzt, vermag heute niemand zu sagen. Sicher ist nur das eine, dass dies nur dann geschehen wird, wenn ein Genius entsteht, der in der Sprache der natürlichen Stimmung mehr zu sagen weiss als irgend einer anderen; ihm würde gewiss kein prinzipielles Bedenken Stand halten.

Tatsächlich ist die natürliche Stimmung heute, z.B. mit dem Obertonsingen, wieder populärer geworden. Aber das ist nicht der Punkt. Hatten wir nicht gesagt, dass das Quantenprinzip eigentlich das Gesetz der Obertonreihe darstellt, auf der die natürliche Stimmung beruht? *Wenn ein Genius entsteht, der in der Sprache der natürlichen Stimmung mehr zu sagen weiss...* Sind diese Schlusszeilen als eine Art Selbstprophezeiung zu verstehen? Ist nicht Max Planck selbst dieser Genius, der die natürliche Stimmung schon sehr bald, aber auf einem ganz anderen Gebiet, dem Gebiet der Physik, einführen sollte? Dem Quantenprinzip hat jedenfalls bis heute *gewiss kein prinzipielles Bedenken Stand gehalten...*

Der „musikalische“ Aspekt der Quanten- und Atomphysik wird besonders anschaulich mit Louis de Broglies Elektronenwellen im Bohrschen Atommodell (siehe Abb. 5). Im Bohrschen Atom wird der Atomkern von Elektronen umkreist, so ähnlich wie die Sonne von Planeten. Doch anders als im Sonnensystem können die Elektronen dabei nur auf ganz bestimmten Bahnen liegen, entsprechend ganz bestimmter Energien. Diese Bahnquantelung hatte Bohr durch eine (postulierte) Quantelung des Bahndrehimpulses erreicht. De Broglie fand in seiner Dissertation von 1924 eine andere Erklärung dafür. Er hatte die überaus kühne Idee, dass Elektronen, Materieteilchen überhaupt, auch Wellencharakter haben, in Anlehnung an Einstein, der umgekehrt der Lichtwelle einen Teilchencharakter zugesprochen hatte. Das war der Ausgangspunkt der ganzen Wellenmechanik der Quantenphysik. Die Elektronenwellen im Atom müssten dann in Phase sein, um sich gewissermassen nicht selbst auszulöschen, d.h. für eine bestimmte Energie müsste der Bahnradius ein ganzzahliges Vielfaches der damit assoziierten de Broglie-Wellenlänge sein. Ein Elektron im untersten Energieniveau („Hauptquantenzahl“ $n = 1$) würde gerade *eine* ganze Schwingung ausführen (Bahnumfang = 1 Wellenlänge), im zweituntersten Niveau zwei Schwingungen (Bahnumfang = 2 Wellenlängen) u.s.w. wie in Abb. 5. Man erhält mit diesen stehenden Wellen etwas Ähnliches wie eine Obertonreihe, wenn auch nicht genau, weil der Bahnumfang (quasi die Saitenlänge) nach aussen zunimmt. Ausserdem darf man sich keinen wirklichen Umlauf der Elektronen vorstellen, weder als Teilchen noch als Welle; in der Wellenmechanik operiert man mit Aufenthaltswahrscheinlichkeiten der Elektronen bzw. Zustandswahrscheinlichkeiten der Atome. Dennoch bestrickt uns das Wellenmuster dieses vereinfachten Bohr/de Broglie-Modells durch seinen Anklang (!) an das griechische Modell der Planetensphären, bei welchem die Planetenbahnen mit den Saiten einer Lyra analogisiert werden konnten. Stellt das Bohrsche Atom eine Art Miniatur-Planetensystem dar, so gleicht de Broglies Ergänzung einer Miniatur-Sphärenharmonie.

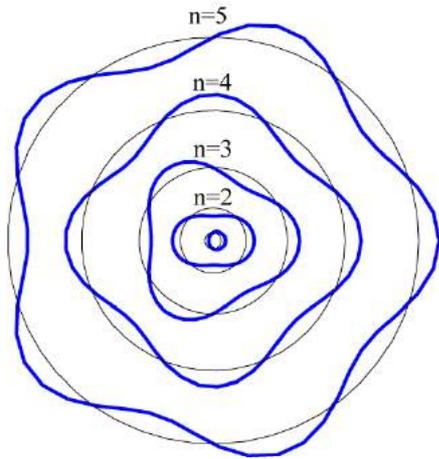


Abb. 5 De Broglies Elektronenwellen im Bohrschen Atom (für Wasserstoff). Die möglichen Bahnradien R_n des Elektrons ergeben sich aus der Forderung, dass der Umfang der Bahn ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge λ sein muss: $2\pi R_n = n\lambda$. Die Wellenlänge ist nicht konstant, sondern wächst proportional mit n .
(Bild: skullsinthestars.com, mit Genehmigung)

Die Quantisierung der Energiezustände eines Atoms (bildlich der Elektronenbahnen im Bohrschen Modell) bringt es mit sich, dass auch die Übergänge zwischen diesen Zuständen, durch Emission oder Absorption eines Photons der Frequenz ν , welche gerade der Energiedifferenz $\Delta E = h \nu$ zwischen den Niveaux entspricht, gequantelt sind. Im Energiespektrum von Strahlung, die mit Atomen einer bestimmten Sorte wechselwirkt, erscheinen dadurch bei den betreffenden Frequenzen oder Wellenlängen dünne Linien, „Spektrallinien“ (bei Emission leuchtende, bei Absorption dunkle Linien), die für das betreffende Element charakteristisch sind. Abbildung 6 zeigt ein Beispiel.

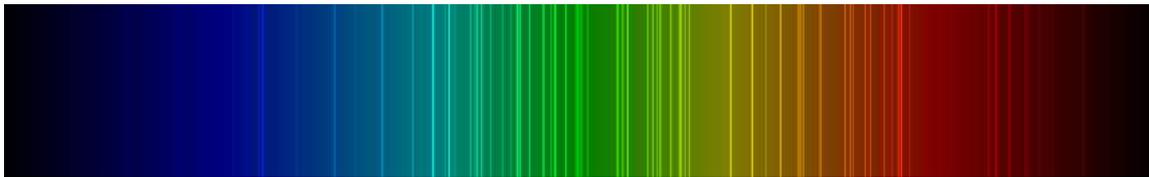


Abb. 6 Das Emissionsspektrum von Atomen des Elements Iod im optischen Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm (von rechts nach links). (Bild: McZusatz, creative commons)

Spektrallinien basieren also auf ganzzahligen Verhältnissen zwischen atomaren Quantenzuständen. Ihre harmonikale Struktur widerspiegelt die harmonikale Struktur der Atome. Kein geringerer als Arnold Sommerfeld, Doyen der Quanten- und Atomphysik im Deutschland der 1920er Jahre, Lehrer Heisenbergs und Paulis, schrieb im Vorwort zu seinem Lehrbuch „Atombau und Spektrallinien“ (1919) euphorisch:

Was wir heutzutage aus der Sprache der Spektren heraushören (!), ist eine wirkliche Sphärenmusik des Atoms, ein Zusammenklingen ganzzahliger Verhältnisse, eine bei aller Mannigfaltigkeit zunehmende Ordnung und Harmonie... Alle ganzzahligen Gesetze der Spektrallinien und der Atomistik fließen letzten Endes aus der Quantentheorie (Max Plancks). Sie ist das geheimnisvolle Organon, auf dem die Natur die Spektralmusik spielt und nach dessen Rhythmus sie den Bau der Atome und Kerne regelt.²⁴

Nachdem wir im Zusammenhang mit Resonanzen im Sonnensystem die potentiell Chaos stiftende Wirkung ganzzahliger Frequenzverhältnisse – oder umgekehrt auch die segensreiche Wirkung einer gewissen Ungenauigkeit – betont haben, erscheint uns nun durch die Quantenphysik das pythagoräische Prinzip der ganzzahligen Verhältnisse vollständig rehabilitiert. Aber Vorsicht! – hier muss noch ein

²⁴ Sommerfeld, Arnold: Atombau und Spektrallinien, Bd. 1, Braunschweig 1919, S.III

anderer Aspekt der Quantenphysik in Betracht gezogen werden: *Die Ganzzahligkeit der Quantenphysik ist erkauft durch ein gewisses Maß an Unschärfe*. In dem Grad wie man versucht, die Energie oder den Impuls eines Quantensystems einzugrenzen, verwischt sich seine zeitliche oder räumliche Struktur. Nach der Heisenbergschen Unschärferelation ist die Plancksche Konstante h ein Maß für die letztgültige „Körnigkeit“ der Materie im Kleinen, für das mikroskopische Auflösungsvermögen der Physik, welches *prinzipiell* nicht hintergangen werden kann. Darauf gründet der Wahrscheinlichkeitsaspekt der Quantenphysik. Als ein Beispiel: die Spektrallinien sind nie unendlich dünn, sondern haben eine sogenannte „natürliche Linienbreite“. Dies nicht aus messtechnischen Gründen, sondern weil die Energiedifferenz eines Übergangs nicht exakt definiert ist; wäre sie es, so würde der Übergang nie stattfinden (er wäre zeitlich nicht determiniert). Und dieser Wahrscheinlichkeitsaspekt bringt uns wieder in die Nähe der Chaostheorie: Sobald man den ganzzahligen Verhältnissen in gewisser Weise „zu nahe“ kommt, wird die Berechenbarkeit des zeitlichen und räumlichen Verhaltens schwierig bzw. kann nur noch mit Wahrscheinlichkeiten erfasst werden, seien es Planeten oder Teilchen.²⁵

Harmonikale Strukturen des Mikrokosmos sind bekannt nicht nur in Atomen, sondern auch in Molekülen, in Kristallen (dies vor allem durch die Forschungen des Mineralogen Victor Goldschmidt, zeitgleich zur frühen Entwicklung der Quantenphysik), ja selbst im organischen Reich, primär natürlich in der Botanik. Wir verweisen auf die Forschungen und Publikationen von Hans Kayser, Rudolf Haase und ihren Nachfolgern, die sich zur Zeit im „Harmonik Zentrum Deutschland“ organisiert haben.²⁶

Das mit Sicherheit ehrgeizigste Projekt der theoretischen Physik, die sogenannte Superstringtheorie, beruft sich ebenfalls explizit auf musikalische Aspekte im Herzen der Materie. So eröffnet Brian Greene Kapitel 6 seines Bestsellers „Das elegante Universum“ mit folgenden Worten:

Seit langem schon dient die Musik den Philosophen und Naturforschern, die sich über die Rätsel des Kosmos den Kopf zerbrechen, als Lieblingsmetapher. Von den „Sphärenklängen“ der Pythagoreer im antiken Griechenland bis zu den „Harmonien der Natur“, die jahrhundertlang das Leitmotiv der Forschung waren – immer wieder haben wir im majestätischen Gang der Himmelskörper wie im ausgelassenen Treiben der subatomaren Teilchen das Lied der Natur gesucht. Mit der Entdeckung der Superstringtheorie gewinnen diese musikalischen Metaphern eine verblüffende Realität, denn die Theorie geht davon aus, dass die mikroskopische Landschaft mit winzigen Saiten – den Strings – gefüllt ist, aus deren Schwingungsmustern die Evolution des Universums komponiert ist. Nach der Superstringtheorie bringt der Wind der Veränderung das ganze Universum wie eine riesige Aolsharfe zum Klingen.²⁷

Schön gesagt. Die Stringtheorie postuliert als elementarste Einheiten der materiellen Welt keine Punktsingularitäten, also nulldimensionale Teilchen, sondern eindimensionale Fäden, Strings, die allerdings in der Regel extrem kurz wären und die man sich am besten als winzige, geschlossene Schleifchen vorstellt. Die Wechselwirkung zweier Teilchen, beispielsweise deren Kollision und Verschmelzung wie in Abb. 7 links, wäre dann auf einer fundamentalen Ebene eine solche zwischen Strings, die sich hier im Raum-Zeit-Diagramm, durch das Ausstreichen der Schleifchen entlang der Zeitkoordinate, als Zusammenschluss zweier Flächen ausnimmt, siehe Abb. 7 rechts (so ähnlich

²⁵ Es ist letztlich diese quantenphysikalische Unschärfe, die uns vor dem jenseitigen Sirenengesang schützt, um an unserer Betrachtung über die Vermeidung der transzendenten ganzzahligen Verhältnisse in Anm. 16 anzuknüpfen.

²⁶ Webseite des Harmonik Zentrums Deutschland: <http://harmonik-zentrum-deutschland.de/> Dort finden sich auch weiterführende Literaturangaben. Zu Kayser und Haase s. auch Anm. 10.

²⁷ Greene, Brian: *Das elegante Universum. Superstrings, verborgene Dimensionen und die Suche nach der Weltformel*, Siedler, München 2000. Das Wort ‚super‘ in der Superstringtheorie ist kein bewunderndes Attribut, sondern bezieht sich auf die sog. Supersymmetrie zwischen den zwei grundlegendsten Sorten von Teilchen (den „Fermionen“ und „Bosonen“), die in der Stringtheorie mitintegriert wird.

entstehen längliche Seifenblasen, wenn ein in Seifenwasser getauchter Ring schnell in der Luft bewegt wird). Nehmen wir Abb. 7 rechts als Sinnbild einer Stimmgabel. Denn jetzt kommt die „musikalische“ Idee hinzu, dass diese Fäden oder Schleifchen schwingen und vibrieren, und je nach Schwingungszustand (d.h. Energiezustand) sich als ein bestimmtes Elementarteilchen „maskieren“. Oder anders gesagt: Nach der Stringtheorie werden die Eigenschaften eines Elementarteilchens, z.B. seine Masse und Ladung, davon bestimmt, welches der möglichen charakteristischen Schwingungsmuster der ihm zugrunde liegende String gerade ausführt. Der „Teilchenzoo“ als Obertonreihe eines mikrokosmischen Monochords à la Fludd – das wäre tatsächlich „ein elegantes Universum“. Die Vereinheitlichung der Kräfte und Objekte der Natur bilden seit jeher das höchste Ideal der Physik, und es hat in den letzten Jahrzehnten auch grosse Fortschritte in der Stringtheorie gegeben, man versteht die grosse Euphorie ihrer Anhänger. Aber es gibt auch eine Schattenseite, und sie wiegt für die meisten Physiker schwerer als die Eleganz: das ist die fehlende – manche sagen die prinzipiell unmögliche – Anbindung der Theorie an die Beobachtung; zu klein sind die Dimensionen der Strings.²⁸

Die Stringtheorie ist vorläufig nicht mehr als eine grossartige Vision. Ob sie je auf dem Boden der physikalischen Realität ankommt oder eine rein mathematische Disziplin bleibt, ist unklar. Eine kosmische Äolsharfe finden wir aber auch auf einem andern Gebiet, wie man sehen wird.

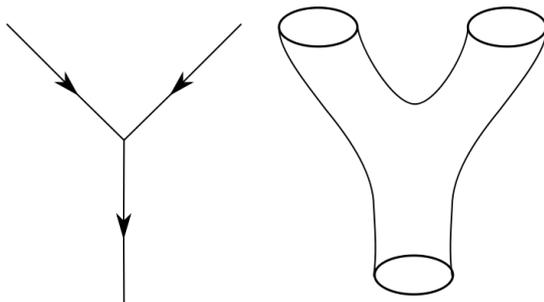


Abb. 7 Ein Vorgang in der Teilchenwelt wird beschrieben durch „Weltlinien“, hier die Kollision und Verschmelzung zweier Teilchen (links). Die Zeit verläuft von oben nach unten. Auf der horizontalen Achse ist eine der drei räumlichen Koordinaten aufgetragen. Auf einer fundamentalen Ebene der Stringtheorie würde derselbe Vorgang beschrieben durch „Weltflächen“ (rechts). (Bild: Actam, Wikimedia commons)

²⁸ Als Beispiel einer frühen Kritik zitiere ich aus Greene's elegantem Universum, Kapitel 9, „Im Kreuzfeuer der Kritik“, die Worte Howard Georgis: *Wenn wir uns betören lassen vom Sirenenengesang der „endgültigen“ Vereinigung bei Abständen, die so klein sind, dass unsere experimentellen Freunde passen müssen, dann geraten wir in Schwierigkeiten...* Es gibt heute viel harschere Kritik, aber das Zitat zeigt andererseits sehr schön, dass die theoretischen Physiker, die sich an einer letzten vereinheitlichten Theorie der physischen Dinge versuchen, einer *Theory of Everything*, das Wort vom Sirenenengesang selber im Munde führen und sich also durchaus der gewagten oder unmöglichen Unternehmung bewusst sind, sozusagen die Transzendenz immanentisieren zu wollen (in Anlehnung an Anm. 16 und 25).

4 Helioseismologie

Wenden wir uns jetzt einer ganz naturalistischen Art und Weise von moderner Sphärenmusik zu, wo wir es mit wirklichen, physischen Schwingungen von Himmelskörpern zu tun haben. Himmelskörper können auf vielfältige Weise oszillieren. Am besten kennen wir das von der Erde, die immer wieder von Erdbebenwellen „durchgeschüttelt“ wird. Diese seismischen Wellen, wie man sie auch nennt, sind Druckwellen und damit nichts anderes als Schallwellen, welche sich, abhängig vom Medium, mit einer charakteristischen Schallgeschwindigkeit ausbreiten. In der Luft beträgt diese bekanntlich 340 m pro Sekunde; im Boden, also bei Erdbeben, ist sie 10 bis 20 mal grösser. Erdbebenwellen können sich um den ganzen Globus ausbreiten, bevor sie ausgedämpft werden. Ein Erdbebenereignis gleicht einem Schlag an den Erdkörper, verursacht durch eine plötzliche Entspannung von Kräften im Erdinnern, die sich durch plattentektonische Aktivitäten aufgestaut haben. Die Erde ist ein Himmelskörper und die Nähe zur Akustik ist gegeben, aber man würde hier nicht von „himmlischer Musik“ sprechen, vor allem nicht angesichts der Zerstörungen, die ein grosses Erdbeben mit sich bringt.

Anders sieht es bei der Sonne aus, die ebenfalls „bebt“, jedoch nicht durch gelegentliche ruppige Hammerschläge, sondern gleichsam durch ein permanentes Streicheln mit einem Drum-Besen. Daraus resultiert ein höchst komplexes Muster von stehenden Schallwellen im ganzen Sonnenkörper – es entsteht ein rechtes Sonnengeläut! Dieses „abzuhören“ und damit gewisse Eigenschaften des Sonneninnern zu diagnostizieren, macht das junge Gebiet der „Helioseismologie“ aus.²⁹ Betrachten wir zunächst den Aufbau der Sonne. Sie ist ein heisser Gasball von etwas mehr als der hundertfachen Grösse der Erde. An jeder Stelle im Innern herrscht ein „hydrostatisches Gleichgewicht“ zwischen der eigenen Schwerkraft, welche diesen Ball zusammendrückt, und der daraus entstehenden Hitze, welche den Ball auseinandertreibt. Die schwere Masse, die auf eine gegebene Schicht im Innern drückt, nimmt von aussen nach innen stetig zu; so entsteht eine charakteristische Schichtung der Sonne, mit von aussen nach innen monoton steigenden Werten für Dichte, Druck und Temperatur. Im Zentrum ist die Sonne 15 Millionen Grad Kelvin heiss, an der Oberfläche noch 5500 K. Die grosse Hitze würde ohne innere Energiequelle nicht lange hinhalten; in einigen Millionen Jahren wäre die Sonne ausgekühlt. Aber es ist gerade die hohe Temperatur im Zentrum, die, wenn sie einmal erreicht ist, zur Verschmelzung von Wasserstoffkernen (Protonen) in Heliumkerne führt. Die Energie, die bei diesem Prozess freigesetzt wird, wird zunächst in Form von Strahlung nach aussen transportiert. In den äusseren Schichten, wo der Temperaturgradient sehr steil ist, geschieht der Energietransport effizienter durch sogenannte Konvektion. Dabei steigt heisse Materie nach oben an die Oberfläche, wo sie sozusagen ihre Hitze entlädt, um abgekühlt wieder nach unten zu strömen; dort heizt sie sich wieder auf und steigt von neuem hoch. Einen ähnlich brodelnden Wärmekreislauf beobachten wir beim Kochen z.B. einer Suppe, wenn der Pfannenboden sehr heiss (und damit der Temperaturgradient im Kochgut sehr gross) wird. Die Konvektionszellen, in welchen die heisse Materie hochsteigt und am Rand wieder hinunterfließt, sind an der Sonnenoberfläche im Durchmesser etwa 1000 Km gross; sie verleihen der Sonne auf Detailbildern die typische „Granulation“ (Körnigkeit). Auch bei der Erde wird die innere Wärme z.T. durch Konvektion abgeführt, aber hier haben wir es mit einer zähen Flüssigkeit zu tun, die entsprechend extrem langsam umgerührt wird. Daraus folgt die Verschiebung der Kontinente, die wie Eisschollen auf dem fließenden Erdmantel schwimmen und durch erratische Zusammenstösse eben jene besagten Erdbeben verursachen. Die Sonne besitzt keine feste Kruste und ist auch nicht flüssig. Im gasförmigen Zustand geht

²⁹ Die populärwissenschaftliche Behandlung des Themas ist z.Z. sehr spärlich vorhanden. Empfohlen seien: Roth, Markus: *Neue Blicke in das Innere der Sonne*, Sterne und Weltraum, August 2004, S.24; Lang, Kenneth: *Sun, Earth and Sky*, Berlin 2006, chapter 4: Taking the Pulse of the Sun, p.62.

die Konvektionsbewegung viel schneller, aber dennoch nicht reibungslos vonstatten. Riesige Massen werden permanent aneinander hinauf- und hinuntergeschoben, das geht nicht ohne Turbulenzen und Erschütterungen. Die Konvektionszone der Sonne, distanzmässig im obersten Drittel des Körpers, nicht weit unter der Sonnenoberfläche angesiedelt, ist eine ständige Quelle von Schallwellen.

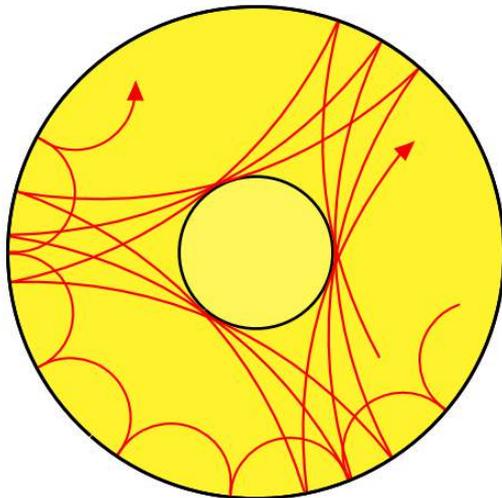


Abb. 8 Schematischer Verlauf von Schallwellen im Sonneninneren. Die Schallwellen werden erzeugt in den äusseren Schichten, der Konvektionszone. Nach innen laufende Schallwellen werden durch das Eintauchen in heissere Schichten herumgebogen, bis sie wieder nach oben laufen. Am Rand oben werden sie reflektiert und es folgt ein neuer Tauchgang, und so immer weiter. Schallwellen mit grösserer Wellenlänge tauchen tiefer ein. Der innere Kreis gibt den minimalen Zentrumsabstand einer langwelligeren Schallwelle an. (Bild: Tosaka, creative commons)

Betrachten wir nun, wie sich Schallwellen im Sonnenkörper fortpflanzen (Abb. 8). Schallwellen breiten sich in der Sonne mit ca. 100 Km/s, also ein paar Hundert mal schneller als in der irdischen Atmosphäre, ungehindert in jede Richtung aus. Aber sie bleiben in den äusseren Bezirken der Sonne gefangen und laufen, je nach Wellenlänge verschieden tief reichend, um das Zentrum herum, ähnlich einem Hamster im Hamsterrad. Schuld an der Gefangenschaft ist die Temperatur- und Dichtestruktur der Sonne. Nach innen nimmt die Temperatur stetig zu. Da sich Schall in heisserem Gas schneller bewegt als in kühlerem, nimmt auch die Schallgeschwindigkeit nach innen stetig zu. Dies führt dazu, dass eine Schallwelle, die schräg nach innen läuft, nach und nach herumgebogen wird (denn das untere Ende der Wellenfront läuft dem oberen Ende voraus), bis die Welle überhaupt wieder nach oben, gegen die Oberfläche zurück strebt. Am Rand angelangt wird die Welle schliesslich reflektiert, auch wenn es sich nicht um einen scharfen Rand handelt; es genügt eine ziemlich abrupte Dichteänderung. Und dann geht es wieder von vorne los und die Schallwelle läuft weiter herum, bis sie irgendwann ausgedämpft wird. Die Ausbreitung seismischer Wellen in der Erde verläuft ganz ähnlich. Und beide Effekte, Refraktion (Brechung) und Reflexion (Spiegelung), kennen wir natürlich auch aus dem Reich des Lichts. Wichtig für die Erforschung des Sonneninneren ist die Tatsache, dass Schallwellen mit grösserer Wellenlänge tiefer eintauchen; je grösser, desto tiefer.

Durch die dauernde, räumlich und zeitlich nach Zufallsmuster erfolgende Erzeugung von Schallwellen aller möglichen Wellenlängen entsteht zunächst eine rechte Kakaphonie. Aber aus diesem Chaos erstet schliesslich eine grandiose Ordnung. Die meisten einzelnen Schallwellen werden sang- und klanglos verebben. Manche werden sich aber selber verstärken, wenn sie z.B. nach einem Umlauf an derselben Stelle in derselben Phase vorbeikommen. Für bestimmte Wellenlängen kann sich auf diese Weise eine stehende Schwingung ergeben, im Prinzip ist das ganz ähnlich zu de Broglies Elektronenwellen im Bohrschen Atom (Abb. 5). Der Sonnenkörper fungiert insgesamt als Hohlraum-Resonator für eine riesige Anzahl von möglichen Schwingungsmoden, die durch verstärkende Interferenzen im Chaos der umherirrenden Schallwellen angeregt werden. Da wir es mit Schwingungen in einem dreidimensionalen

Körper zu tun haben, muss eine bestimmte Schwingungsmoden durch drei Grössen charakterisiert werden: die Anzahl Knotenflächen in radialer Richtung (n), die Anzahl Knotenlinien auf der Kugelfläche innen wie aussen (l), davon die Anzahl longitudinaler Knotenlinien (m).³⁰ Abb. 9 zeigt schematisch eine ganz bestimmte Schwingungsmoden des Sonnenkörpers.

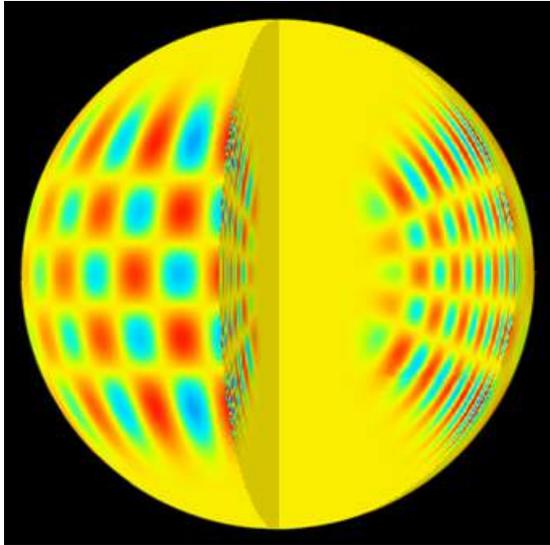


Abb. 9 Computer-Simulation einer einzelnen Schwingungsmoden des Sonnenkörpers. Blaue Gebiete sind in Aufwärtsbewegung begriffen, rote in Abwärtsbewegung, innen wie aussen. An der Oberfläche ist es ein Heben und Senken um bloss wenige bis 100 Meter im Minutentakt. Nach einer halben Periode wäre die Bewegung überall gerade umgekehrt, würden blaue zu roten und rote zu blauen Gebieten. Die trennenden, gelben Linien auf den Kugelflächen sind Knotenlinien, die trennenden, gelben Kugelflächen im Innern Knotenflächen, wo keine Bewegung stattfindet. Für diese spezifische Schwingungsmoden gilt $n = 14$, $l = 20$, $m = 16$ (siehe Erklärung im Text). (Bild: Wikimedia creative commons)

Eine einzelne Schwingungsmoden hat unmessbar kleine Bewegungen an der Sonnenoberfläche zur Folge; je nach Wellenlänge hebt und senkt sie ein grösseres Gebiet um wenige Meter, mit einer Geschwindigkeit von wenigen Zentimetern pro Sekunde. Aber es überlagern sich zu jeder Zeit Millionen solcher Moden, die kollektiv zu gut messbaren Oszillationen der Sonnenoberfläche führen. Gebiete so gross wie die Erde oder grösser können sich dann um Hunderte von Kilometern heben und senken, mit Geschwindigkeiten von einem halben Kilometer pro Sekunde. Ein erster Hinweis auf die daraus resultierende „Fünfmintenoszillation“ der Sonne gelang Robert Leighton in den frühen 60er Jahren am südkalifornischen Mt. Wilson Observatorium mit Hilfe einer ausgeklügelten Messtechnik. Das Phänomen war ganz unerwartet und blieb zunächst ein Rätsel. Es brauchte viele Jahre des Modellierens und vor allem des Beobachtens, bis sich das heutige Bild der Sonne als „tönende Glocke“ etablierte. Das Erfassen der ganzen Komplexität des Schwingungsmusters macht erforderlich, dass die Sonnenscheibe über viele Wochen und Monate ununterbrochen beobachtet wird, denn nur mit einer sehr langen Zeitreihe lässt sich eine genaue Zerlegung der integralen Messdaten in die einzelnen Schwingungsmoden bewerkstelligen. Heutzutage gibt es dafür Satelliten im erdnahen Raum, wie das *Solar and Heliospheric Observatory (SOHO)*, die ihr „Auge“ nie von der Sonne abwenden. Schauen wir uns nun das Obertonspektrum der solaren Oszillationen an (Abb. 10).

Wie erklärt sich dieses komplexe Muster? Aus einer geeigneten Analyse der Langzeitbeobachtungen folgt primär ein Zusammenhang zwischen der Frequenz oder Periode, mit der sich die Sonnenoberfläche hebt und senkt, und der Länge des Schwingungsbauches einer Moden bzw. der oben eingeführten Anzahl Knotenlinien l auf der ganzen Oberfläche. Letzere hängt direkt mit der Wellenlänge zusammen (Abb. 8), so dass nur bestimmte Kombinationen von Frequenz und l möglich sind bzw. nur solche „geeigneten“ Schallwellen sich verstärken und im allgemeinen Rauschen überleben.³¹ Für eine gegebene Anzahl

³⁰ Knotenflächen und Knotenlinien sind Orte, wo keine Schwingung stattfindet, wo die Schwingung „festgeklemmt“ ist; dazwischen liegen die „Schwingungsbauche“.

³¹ Zur Erinnerung: Frequenz f und Wellenlänge λ hängen reziprok über die Schallgeschwindigkeit c zusammen:

Knotenflächen n im Innern steigt die Frequenz mit wachsendem Grad l (mit kürzer werdenden Schwingungsbäuchen und Wellenlängen) stetig an. Eine solche Sequenz kann man als Obertonreihe in l auffassen; sie erscheint im Diagramm als ein bestimmter Ast. Lässt man die Anzahl der Knotenflächen (der radialen Schwingungsbäuche) n variieren, ergibt sich eine ganze Schar von Ästen, mit steigender Frequenz bei wachsendem n . Nun kommt noch die Amplitude, die Energie – oder man kann auch sagen: die „Lautstärke“ – der Schwingungen hinzu, sie wird im Diagramm farblich kodiert (rot maximal). Wie man sieht, oszilliert die Sonne „am Lautesten“ – und dies gleichzeitig in unzähligen verschiedenen Schwingungsmoden hohen Grades (also sozusagen in hohen Obertönen) – bei Frequenzen um drei Millihertz herum (= 0.003 Schwingungen pro Sekunde). Dies entspricht einer Periode von ca. fünf Minuten. Die „Fünfminutenoszillation“: das ist der Grundpuls oder der Grundatem der Sonne.

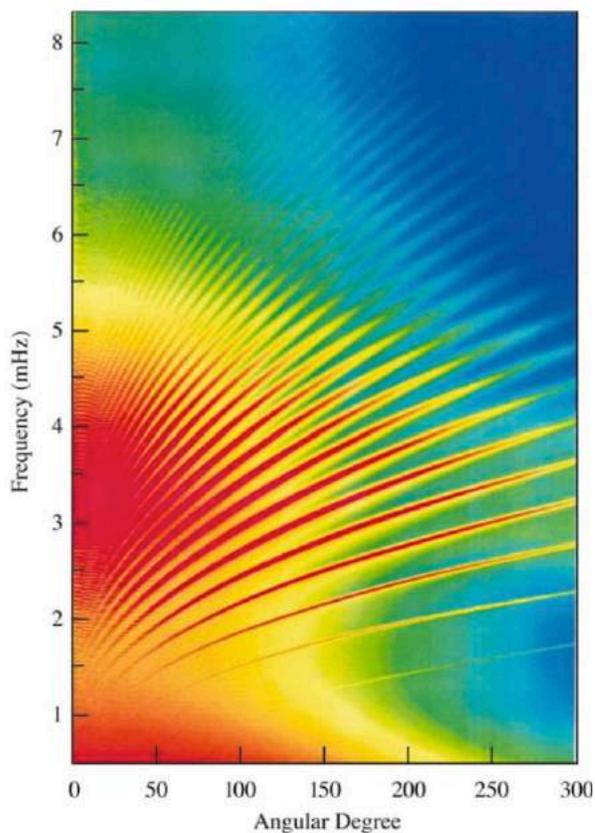


Abb. 10 Diagnostik-Diagramm („Obertonspektrum“) der solaren Schwingungsmoden. Aufgetragen ist die Frequenz der Schallwellen in mHz (Tausendstel Hertz) gegen den „harmonischen Grad“ l = Anzahl Knotenlinien auf der Sonnenoberfläche. Der Grad l hängt direkt von der Wellenlänge des Schalls ab (kleinere Wellenlängen für grössere l). Nur bestimmte Kombinationen von Frequenz und Grad l bzw. Wellenlänge sind möglich (verstärken sich) für jeweils ein bestimmtes n = Anzahl Knotenflächen im Sonneninnern. Jeder Ast im Diagramm gilt für ein bestimmtes n , aufsteigend mit wachsendem n . Die unzähligen einzelnen Moden innerhalb eines Astes lassen sich hier gar nicht unterscheiden. Die Frequenz muss mit n und l wachsen, weil die Wellenlänge mit wachsenden n und l kleiner wird (Frequenz mal Wellenlänge = Schallgeschwindigkeit). Die Farben sind nach der Energie (bzw. Amplitude) der Schwingung kodiert; rot am stärksten, blau am schwächsten. Das Maximum liegt bei circa 3 mHz, was einer Periode von 5 Minuten entspricht. Das Diagramm beruht auf einer zweimonatigen Messreihe des *SOHO* Satelliten. (Bild: *SOHO* MDI/SOI Konsortium, NASA und ESA)

Es sind aber nicht in erster Linie diese ästhetischen Aspekte der Helioseismologie, nach denen die Sonnenphysiker aus sind. Sie benutzen das Frequenz-Diagramm als Diagnose-Werkzeug, sozusagen als Stethoskop, um das unsichtbare Sonneninnere „abzuhören“ (und genauso verfahren natürlich auch die Erdwissenschaftler mit der Erde). Das macht ja die Überlegenheit des Hörsinns gegenüber dem Sehsinn aus: das Sehen ist flächenhaft, wir sehen immer nur an die Oberfläche der Dinge, während das Hören in die Tiefe führt, uns die dreidimensionale, innere Struktur der Dinge vermittelt.³² Ein Ding, das in

$f \cdot \lambda = c$, wobei allerdings die Schallgeschwindigkeit nicht konstant bleibt, sondern im Mittel mit der Wellenlänge zunimmt, weil längere Schallwellen tiefer ins (heissere) Sonneninnere eintauchen.

³² Die „Rehabilitation“ des Gehörs in unserer bildlich dominierten Welt popularisiert zu haben, ist das grosse Verdienst von J. E. Berendt. Seine Bücher *Nada Brahma* und *Das dritte Ohr* haben in den 1980-er Jahren die von Kayser und Haase propagierte *Akróasis* (Weltanhörung) weit herum bekannt gemacht.

Schwingung versetzt wird, schwingt als Ganzes, und wir als Hörende, sofern die Schwingung direkt übertragen wird, schwingen mit, ebenfalls als Ganzes. Jedes Musikinstrument klingt auf eine charakteristische Weise, und der Klangcharakter ist dabei im Wesentlichen durch das Obertonspektrum des Instruments gegeben. Im Prinzip liesse sich aus einer Analyse der Obertöne fast blindlings die Struktur eines Instruments rekonstruieren. Sterne wie die Sonne sind riesige Musikinstrumente. Hören können wir ihre Musik nicht, weil ein Medium zur Schallübertragung zwischen Stern und uns fehlt, aber wir können die akustischen Schwingungen auf der Oberfläche optisch beobachten und analysieren. Ein Diagramm wie in Abb. 10 gibt ziemlich direkt Aufschluss über den Verlauf der Schallgeschwindigkeit im Sonneninnern, und daraus ergibt sich der innere Verlauf der Temperatur, was sich sonst nur mit einer Theorie des Sternaufbaus erschliesst. Helioseismologie, und allgemeiner die „Astroseismologie“, soweit eine solche Analyse auch bei andern, weiter entfernten Sternen möglich ist, erlaubt deswegen einen „Kontrollblick“ ins Sterninnere und ist somit von unschätzbarem Wert für die Astrophysik.³³

Bei der Sonne werden durch die erratische Erzeugung von Schallwellen in der Konvektionszone nur hochgradige Obertöne angeregt, keine Grundschnwingungen mit niedrigen Knotenzahlen. Man hat den Prozess auch mit einem sandsturmgepeitschten Gong verglichen (oben hatte ich den Drum-Besen bemüht). Mir gefällt das Bild einer Glocke besser, die meinetwegen sandgestrahlt wird. Gong und Glocke haben natürlich gemeinsam, dass ihre Obertöne nicht harmonikal sind. Harmonikale Obertöne – also solche, wo sich die Frequenz genau verdoppelt, verdreifacht, vervierfacht etc. für Knotenanzahlen $n = 1, 2, 3, 4$ etc. – gibt es nur in *einer* Dimension, in der Musik bei Instrumenten mit eindimensionalen Schwingungen, d.h. bei Saiten- und Blasinstrumenten, schon nicht mehr bei zweidimensionalen Schwingungen etwa von Pauken oder eben Glocken, erst recht nicht bei dreidimensional schwingenden Körpern, also auch bei der Sonne nicht.

Doch gibt es tatsächlich (seltene!) Sterne, sog. pulsierende Riesensterne, das sind Sterne in einer ganz speziellen Phase ihres Lebens, die in radialer Richtung eine Grundschnwingung ausführen, für die gilt $n = l = m = 0$. Dabei bläht sich der Stern auf, manche tun dies bis zur zweifachen Grösse oder mehr, und schrumpft anschliessend wieder zusammen, im Zeitraum von Tagen oder Wochen. Diese enorme Schwingung wird nicht durch Gasturbulenzen in der Konvektionszone wie bei der Sonne oder gewöhnlichen Sternen verursacht, sondern durch einen ganz speziellen Effekt, der mit der chemischen Zusammensetzung der äusseren Hülle dieser Riesensterne zu tun hat; eigentlich ist es eine Form der periodischen Instabilität, welche diese Sterne erleiden. Die stellare Pulsation entspricht im Prinzip der Grundschnwingung eines nur einseitig offenen Blasrohrs, z.B. einer gedackten Orgelpfeife (ich bevorzuge, akustisch freilich nicht ganz korrekt, das Bild der Posaune, denn es handelt sich um eine ganz langsame, mächtige, „laute“, „tiefe“ Schwingung). Manche dieser Sterne pulsieren auch mit $n = 1$, also im ersten Oberton, allerdings nicht doppelt so schnell (wie bei Saiteninstrumenten) oder dreifach (wie bei gedackten Blasrohren), sondern nur 1,4 mal so schnell wie in der Grundschnwingung, d.h. wiederum nicht harmonikal, denn ein Stern ist ein dreidimensionaler Körper.

Das grenzenlose Meer der Sterne – : ein feines, silbrig hohes Glockengeläut von überall her, und dann und wann ein mächtiger, tiefer Posaunenstoss; – nicht harmonikal und nicht harmonisch. Von einer stellaren Symphonie kann man also schlecht sprechen, von einer „Sphärenmusik“ moderner Prägung aber schon!

³³ Helioseismologie hat das theoretische Sonnenmodell bestätigt. Das ist sehr wichtig, weil dieses Modell auf Grund scheinbar fehlender Neutrino-Teilchen zeitweise in Zweifel gezogen wurde. Dank Helioseismologie wissen wir insbesondere auch, wie die Sonne im Innern rotiert.

Die Fünfminutenoszillation der Sonne (drei Millihertz) und auch alle andern stellaren Pulsationen wären freilich selbst bei einer Übertragungsmöglichkeit zu tief für unsere Ohren (von wegen hohes Glockengeläut!), aber eine Transposition in den hörbaren Bereich lässt sich leicht bewerkstelligen.³⁴

Zuletzt sei auch noch ein Bezug zur Poesie hergestellt. Die tönende Sonne erinnert natürlich sogleich an die Eingangszeilen des Prologs in Goethes *Faust: Die Sonne tönt nach alter Weise/ In Brudersphären Wettgesang,/ Und ihre vorgeschriebne Reise/ Vollendet sie mit Donnergang*. Aber damit ist die klassische, planetarische Sphärenmusik gemeint. Passender zur Helioseismologie ist ein Gedicht von R.M. Rilke, das er 1925 schrieb – ein Jahr vor A.S. Eddingtons bahnbrechendem Werk *The Internal Constitution of the Stars*, welches erstmals ein (rein theoretisches!) Verständnis des inneren Aufbaus der Sonne und der Sterne erschloss:

*Schlag an die Erde: sie klingt stumpf und erden,
gedämpft und eingehüllt von unsern Zwecken.
Schlag an den Stern: er wird sich dir entdecken!*

*Schlag an den Stern: die unsichtbaren Zahlen
erfüllen sich; Vermögen der Atome
vermehrten sich im Raume. Töne strahlen.*³⁵

5 Gravitationswellen

Wir haben eingangs unterschieden zwischen einer mystischen, auf Zahl und Proportion beruhenden, und einer naturalistischen, auf physischen Schwingungen beruhenden Sphärenmusik. Erstere ist prinzipiell unhörbar und wird uns, als räumliche Struktur, nur über den Umweg des Auges vermittelt. Letztere wäre, als zeitliche Struktur, im Prinzip hörbar, falls es ein Medium gäbe, das den Schall bis zur Erde überträgt. Aber das Weltall ist luftleer, und so bleiben auch das Glockengeläut und das Blorchester der Sterne für uns stumm. Auch hier bedarf es des optischen Umwegs. Es ist als ob wir einen Stummfilm schauen würden und an den Bewegungen der Instrumente die Musik rekonstruieren müssten. Nun gibt es aber doch eine naturalistische „Sphärenmusik“ moderner Prägung, die sich vollkommen im Dunkeln vollzieht und prinzipiell unsichtbar bleibt, – und die uns direkt, ganz im Sinn der Akustik, mitvibriert lässt und insofern, freilich bloss mittels unvorstellbar extremer Verstärkung, hörbar wäre, weil sie zur Signalübertragung keiner Luft bedarf, sondern als Medium die Raumzeit selbst in Schwingung versetzt. Wir sprechen von Gravitationswellen.

³⁴ Hörproben zur solaren Fünfminutenoszillation bietet die Webseite *The Singing Sun* (Stanford Solar Center): <http://solar-center.stanford.edu/singing/singing.html>; stellare Pulsationen haben auch zu musikalischen Kompositionen angeregt, siehe *Stellar music project*, www.konkoly.hu/stellarmusic/ und www.konkoly.hu/stellarmusic/StellarAcoustics.pdf

³⁵ Aus Rilkes Gedicht, überschrieben mit „Musik“ 1925, zitiert nach F. Zipp (Anm. 3, S. 111). – Die Querverbindung zu Eddington ist nicht allzu weit hergeholt. Helioseismologen machen gerne auf die Eingangspassage des besagten Werks aufmerksam (chapter 1, „survey of the problem“, p.1): *At first sight it would seem that the deep interior of the sun and stars is less accessible to scientific investigation than any other region of the universe. Our telescopes may probe farther and farther into the depths of space; but how can we ever obtain certain knowledge of that which is hidden behind substantial barriers? What appliance can pierce through the outer layers of a star and test the conditions within?* Für Eddington stellte seine Theorie des Sternaufbaus diese *appliance* dar. Dass es tatsächlich einmal möglich sein würde, das Sterninnere zu beobachten (*pierce through the outer layers*), hätte er sich kaum träumen lassen. Jene *appliance* ist heutzutage natürlich die Helioseismologie.

Was sind Gravitationswellen?³⁶ Die Gravitationskraft, die von einer schweren Masse wie der Sonne oder der Erde ausgeht, hat, wie die elektrische Kraft, eine unendliche Reichweite. Aber was passiert eigentlich, wenn die Masse verschoben wird? Offensichtlich muss sich auch die Kraftwirkung an jedem Ort ändern. Geschieht dies sofort, ohne Zeitverzögerung, auch unendlich weit entfernt? Seit Faraday (ca. 1850) reden wir zwar von einem Kraftfeld, das sich jederzeit bis ins Unendliche erstreckt, was die wundersame *action at a distance*, welche schon Newton nicht behagt hatte, beseitigt. Aber wie sich Änderungen der Feldstärke vollziehen, ob instantan oder verzögert, blieb vorerst unklar. Für die elektrische bzw. elektromagnetische Kraft ergab sich schliesslich eine Antwort durch die Arbeiten von Maxwell, Hertz und Einstein (in der Zeit von 1864 bis 1905): Änderungen des elektromagnetischen Feldes, verursacht durch beschleunigte Ladungen, pflanzen sich in Form von „elektromagnetischen Wellen“ mit Lichtgeschwindigkeit im Raum fort – auch im Vakuum, wo diese Geschwindigkeit ca. 300'000 Km pro Sekunde beträgt. Jegliche bekannte Strahlung (Radiostrahlung, Mikrowellen, Wärmestrahlung, Licht in allen Farben, UV, us.w.) besteht aus elektromagnetischen Wellen, es variiert lediglich die Wellenlänge. – Und beim unsichtbaren Gravitationsfeld? Gibt es so etwas wie „Gravitationswellen“? Eine konsistente Beschreibung der Gravitation ermöglichte erst Einsteins „Allgemeine Relativitätstheorie“ aus dem Jahr 1915. In dieser Theorie gibt es keine Schwerkraft mehr, bzw. was als Schwerkraft *erscheint*, ist vielmehr die Wirkung einer lokalen Raumkrümmung. Gravitation wird bei Einstein zu einer Eigenschaft des Raums bzw. der Raumzeit (wenn die Zeit als vierte Dimension hinzu kommt). Nun kann man sich einen höherdimensionalen gekrümmtem Raum schlecht vorstellen, aber in zwei Dimensionen haben wir es einfach mit gekrümmten Flächen zu tun. Das radialsymmetrische Schwerefeld z.B. der Sonne liesse sich zwecks Veranschaulichung durch eine trichterförmige Fläche mit der Sonne im Trichterzentrum repräsentieren. Kleine Kügelchen würden in diesem Trichter, scheinbar von ihr angezogen, auf die Sonne zurollen, einzig verursacht durch die Krümmung (lokale Schiefe) der Fläche, auf der sie sich bewegen. Wenn sich nun die Masse bewegt, genauer gesagt: wenn sie beschleunigt wird, dann verschiebt sich (in der zweidimensionalen Analogie) der Trichter, und zwar wiederum nicht instantan: es entsteht eine Art Bugwelle auf der Fläche, die sich mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzt – eine Gravitationswelle. Gravitationswellen sind also Störungen oder Schwankungen des Gravitationsfeldes, in der Beschreibung Einsteins „Kräuselungen“ des Raums bzw. der Raumzeit (*ripples of spacetime*), die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, in der Flächenanalogie ähnlich wie Wasserwellen (Abb. 11).

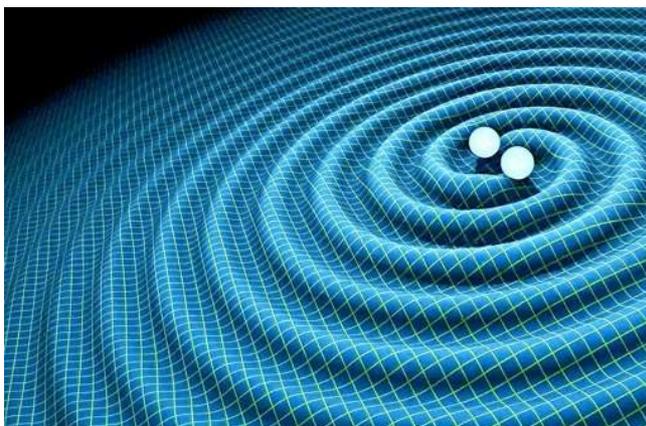


Abb. 11 Zwei eng benachbarte, schwere Massen, die mit grosser Geschwindigkeit und grosser radialer Beschleunigung umeinander kreisen, in der Flächenanalogie. Die ständige Richtungsänderung der Beschleunigung bewirkt eine bugwellenartige Krümmung der Fläche (eigentlich des Raums bzw. der Raumzeit) – eine „Gravitationswelle“ –, die sich nach aussen mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. (Bild: R. Hurt, Caltech-JPL)

³⁶ Allgemeinverständliche Einführungen in die Thematik findet man bei: Spanner, Günter: *Das Geheimnis der Gravitationswellen*, Stuttgart 2016; Thorne, Kip: *Gekrümmter Raum und verborgene Zeit*, München 1994; Webseite des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik: <http://www.einstein-online.info>

Elektromagnetische Wellen breiten sich *im* Raum aus, Gravitationswellen sind der gewellte Raum selbst. Beides sind sog. Transversalwellen, wo die Auslenkung der Störung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung steht. Schallwellen dagegen sind sog. Longitudinalwellen; die Druckschwankung verläuft hier entlang der Ausbreitungsrichtung. Aber die Unterschiede überwiegen: elektromagnetische Strahlung ist „Dipolstrahlung“, bei der Gravitation ist es „Quadrupolstrahlung“. Die Zweipoligkeit der elektromagnetischen Strahlung beruht darauf, dass es zwei einander entgegengesetzte elektrische Ladungen gibt: negative und positive. Bei der Gravitation gibt es nur eine Sorte von „Ladung“: die anziehende Masse. Eine beschleunigte Masse erzeugt nur dann Gravitationswellen, wenn die Beschleunigung in zwei Dimensionen erfolgt, z.B. wenn ein Körper asymmetrisch in einer Ebene oszilliert (hin und her „schwabbelt“): sich abwechselnd in der einer Richtung dehnt und in der andern (senkrecht dazu) zusammenzieht; dann ist die Schwingung vierpolig.³⁷ Dieselbe Wirkung haben aber auch zwei Massen, die sich in einer gemeinsamen Bahnebene umkreisen; die Massenverteilung des Pairs dreht sich dann im Rhythmus der Bahnperiode herum und ändert sich quadrupolförmig. Und diese Konstellation ist im Weltall allgegenwärtig: die meisten Sterne befinden sich in Doppelsternsystemen, Sterne werden von Planeten umkreist, Planeten von Monden. Das Universum sollte nur so brummen von Gravitationsstrahlung, – es muss erfüllt sein von einem ständigen, gravitationellen Hintergrundrauschen, so ähnlich wie die Luft (oder der „Äther“, wie man liebevoll sagt) voller Radiowellen steckt, die wir bloss mit unseren Antennen abzufangen brauchen. Aber Gravitationswellen erreichen uns, ob wir wollen oder nicht. Gravitation kann nicht abgeschirmt werden – weil es nur eine Ladung gibt. Die Raumzeit-Schwankungen gehen durch alles hindurch, alles wird in Schwingung versetzt, weil der Raum selbst vibriert, Luft zur Übertragung braucht es keine. Die Erde wird erschüttert, jeder von uns wird erschüttert, mit dem ganzen Körper vibrieren wir mit, nicht nur mit dem Trommelfell; – Welch durchdringende „Sphärenmusik“!

Das stimmt im Prinzip. Aber ach! jetzt kommt der entscheidende Unterschied zwischen Elektromagnetismus und Gravitation. Die gravitationelle Wechselwirkung ist um viele Grössenordnungen schwächer als die elektromagnetische, genauer: um den Faktor 10^{39} (eine 1 mit 39 Nullen). Das lässt sich am besten mit dem „gravitationellen Wasserstoffatom“ veranschaulichen. Im Bohrschen Bild besteht das Wasserstoffatom aus einem positiv geladenen Proton, das von einem negativ geladenen Elektron umkreist wird. Die beiden sind aneinander gebunden über die gegenseitige elektrostatische Anziehung, – und das Atom ist unsichtbar klein. Wie gross wäre das Atom, wenn man nun in Gedanken die elektrostatische durch die viel schwächere gravitationelle Anziehung zwischen der Protonmasse und der Elektronmasse ersetzte? Das Elektron würde das Proton in sehr viel grösserer Entfernung umkreisen, – nämlich in ca. 10 Billionen Lichtjahren, das entspricht ca. 100 mal der Distanz zum „Welthorizont“ (siehe folgendes Kapitel). Das gravitationelle Wasserstoffatom wäre damit grösser als das ganze sichtbare Universum! – Was heisst das nun für die Gravitationswellen? Sie werden in der Regel schier unendlich schwach sein, und es bleibt bei der blossen poetischen Begeisterung über ihre „welterschütternde“ Wirkung. Damit ein „gesundes“ Signal entstünde, müssten enorme Massen auf ungeheuer grosse Beschleunigungen gebracht werden. Nun, das All ist gross, und solche Ereignisse, mögen sie noch so selten sein, werden irgendwann irgendwo stattfinden. Die grössten Beschleunigungen erwartet man in der Nähe von kompakten Objekten. Die kompaktesten Objekte, die wir kennen, sind die „Schwarzen Löcher“. Schwarze Löcher entstehen bei einem vollständigen Gravitationskollaps von Massen, die so gross sind, dass die Eigengravitation am Ende gleichsam alles zermalmt und der Kollaps durch keine

³⁷ So wirkt auch die Gezeitenkraft. Zurecht werden wir auch an die solaren Oszillationen erinnert. Eine Dipolschwankung entspricht dem Grad $l = 1$, eine Quadrupolschwankung dem Grad $l = 2$ ($l = 0$ ist ein Monopol).

inneren Gegenkräfte mehr aufgehalten werden kann. Das können sehr massereiche Sterne sein (mindestens 25 mal so schwer wie die Sonne) oder ganze Galaxienkerne (bis eine Milliarde Sonnenmassen). Schwarze Löcher bestehen gewissermassen nur noch aus gekrümmter Raumzeit; die auf einen Punkt zusammengequetschte Materie wird umhüllt von einer unsichtbaren Grenzkugel (mit dem „Schwarzschildradius“), aus welcher nichts entweichen kann, auch das Licht nicht. Bei einer Masse von einer Sonne beträgt der Schwarzschildradius lediglich drei Kilometer, was uns die Kompaktheit dieser Objekte drastisch vor Augen führt. An der Schwarzschildgrenze sind die grössten Beschleunigungen möglich, die uns im Prinzip noch signalisiert werden können. Die stärkste mögliche Änderung der Raumzeit-Krümmung, welche ein maximal „lautes“ Gravitationswellensignal zur Folge hätte, erwartet man deshalb bei der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher. Einer solchen Verschmelzung voraus ginge, bedingt just durch den galoppierenden Energieverlust in Form von Gravitationsstrahlung, eine langsame gegenseitige Annäherung der Löcher in einem gebundenen System (wie in Abb. 11 gezeigt). Die Bahngeschwindigkeit der Löcher nähme dabei stetig zu, und am Ende würde das hantelartige System mit der Geschwindigkeit eines Flugzeugpropellers rotieren, um dann im Bruchteil einer Sekunde – zack! – zu *einer* Masse, einem grösseren, schwereren Schwarzen Loch zu verschmelzen. Dieses Szenario hat man sich schon vor Jahrzehnten ausgedacht und seither im Detail durchgerechnet – und genau ein solcher Prozess steckt nun hinter der kürzlichen Erstentdeckung von Gravitationswellen (siehe Abb. 12).

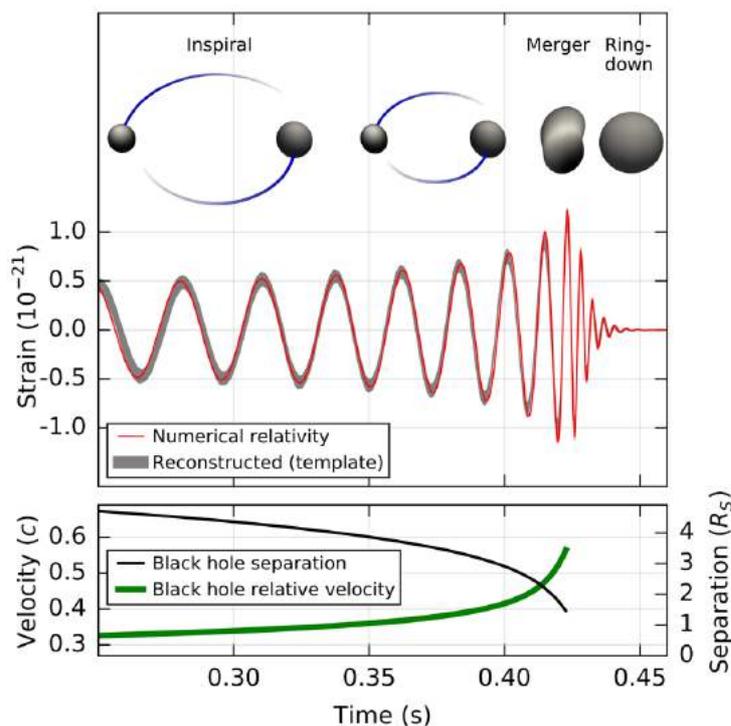


Abb. 12 GW150914: das Ereignis, das zum erstmaligen Nachweis einer Gravitationswelle geführt hat. Die Zeit verläuft von links nach rechts, die Zeitspanne ist 0,2 Sekunden. Ganz oben bildlich, was (unsichtbar) passiert ist: Zwei Schwarze Löcher spiralen aufeinander zu, umkreisen sich immer schneller, bis sie verschmelzen zu einem grösseren Schwarzen Loch. In der Mitte das Gravitationswellensignal bzw. die im LIGO-Detektor gemessene Raumverzerrung in Einheiten von 10^{-21} der Teststrecke. Die Frequenz entspricht direkt der Umlauffrequenz der Schwarzen Löcher, von anfänglich 50 Hz bis über 200 Hz bei der Verschmelzung. Das gemessene Signal, modelliert mit der grauen Kurve, stimmt in hohem Mass mit der relativistischen Berechnung (in rot) überein. Ganz unten der Verlauf der Separation der Schwarzen Löcher in Einheiten des Schwarzschildradius (Skala rechts) und ihrer Relativgeschwindigkeit in Einheiten der Lichtgeschwindigkeit (in grün, Skala links). (Bild: Abbott et al., Physical Review Letters 116, 061102 (2016))

Aber bevor wir zu dieser Entdeckung kommen, müssen wir uns klar machen, wie schwach das Signal selbst einer solchen kosmischen Katastrophe sein wird. In unmittelbarer Nähe wird der Raum so stark beben, dass alle Dinge, wenn es dort welche gäbe, im Takt eines Sekundenbruchteils abwechselungsweise auf ihre halbe und dann auf die doppelte Grösse zusammengedrückt bzw. auseinandergezogen würden. Aber rein statistisch wird ein seltenes Ereignis dieser Art eine Milliarde Lichtjahre entfernt und das dabei

entstandene Signal der Gravitationswelle, wenn es bei der Erde ankommt, um einen Faktor von 10^{21} abgeschwächt sein. Das bedeutet, dass hier alle Längen oder Distanzen bloss noch um einen Trillionstel (10^{-21}) schwanken, d.h. sich verkürzen und verlängern würden. Ein Trillionstel! Ein Trillionstel der ganzen Erde ($\approx 10^6$ m) macht ein Proton aus ($\approx 10^{-15}$ m). Man versteht, dass es einer jahrzehntelangen technischen Entwicklung bedurfte, um überhaupt in die Nähe der geforderten Empfindlichkeit eines „Gravitationswellendetektors“ zu kommen. Dieses faszinierende Stück Wissenschaftsgeschichte kann hier nicht erzählt werden (ich verweise auf Anm. 36). Nur soviel: die erfolgreiche Strategie bestand schliesslich im Bau von riesigen „Laser-Interferometern“, deren Prinzip darin besteht, kohärentes Laserlicht mittels halbdurchlässiger Spiegel auf zwei senkrecht zueinander stehenden Wegen auf die Reise zu schicken und, zurück gespiegelt, wieder zusammen zu führen, und zwar so, dass sich die beiden Laserstrahlen durch Interferenz gegenseitig auslöschen. Wenn nun eine Gravitationswelle kommt, wird sie (als Quadrupolschwingung) die beiden Lichtwege abwechselnd und entgegengesetzt um einen winzigen Betrag verkürzen und verlängern, was im Rythmus der Gravitationswellenfrequenz (konkret: der Bahnfrequenz der Schwarzen Löcher) das Interferenzmuster verschiebt und damit ein optisches Signal erzeugt (ganz ohne Optik geht es also auch hier nicht!). In verschiedenen Ländern wurden solche Apparate gebaut, der grösste steht in zwei identischen, weit auseinander liegenden Exemplaren (um ein Zufallssignal ausschliessen zu können) in den USA und wird von einem internationalen Team betrieben: das LIGO (= Laser Interferometric Gravitational Wave Observatory). Die zwei rechtwinkligen Arme des LIGO-Interferometers sind enorme 4 Km lang, aber diese grosse Strecke mal 10^{-21} ergibt nur ein Tausendstel des Protondurchmessers (10^{-18} m). Es scheint an Zauberei zu grenzen, dass diese unvorstellbar kleine Längenänderung heute messbar ist. Konzipiert in den 80-er Jahren und gebaut um die Jahrtausendwende, wurde LIGO über die Jahre hindurch ständig verbessert. 2015 war die erforderliche Empfindlichkeit zur Entdeckung von Gravitationswellen erreicht.

Man war bereit – und es geschah. Am 14. September 2015, um 09:50:45 Uhr Weltzeit, läuft eine Gravitationswelle praktisch zeitgleich durch die beiden LIGOs. Das Signal („GW150914“) entsprach dermassen genau den Erwartungen und Berechnungen, dass man der Sache anfangs nicht traute; aber es war echt. Die genaue Modellierung des Signals (siehe Abb. 12) erlaubt Rückschlüsse auf die Quelle und die Umstände des Ereignisses: Es muss sich um die Verschmelzung von zwei Schwarzen Löchern von 36 und 29 Sonnenmassen zu einem solchen von 62 Sonnenmassen gehandelt haben. Die drei fehlenden Sonnenmassen wurden dabei vollständig verstrahlt, in Form von Gravitationswellen. Die Entfernung des Ereignisses: ca. 1,3 Milliarden Lichtjahre! Das heisst: es fand vor 1,3 Milliarden Jahren statt; die Erde befand sich noch im Präkambrium, als die jetzt empfangene Gravitationswelle losgeschickt wurde. Am 11. Februar 2016 wurde die Entdeckung bekannt gemacht (Anm. 1). Damit wurde ein ganz neues Fenster zur Beobachtung des Weltraums aufgestossen, und man darf in den nächsten Jahren viele neue Erkenntnisse über die „dunkle Seite“ des Universums erwarten.

Von Anfang an hat man gerne, und durch die inhaltliche Nähe zur Akustik natürlich sehr zu Recht, von der Klangmetapher regen Gebrauch gemacht. Schon Kip Thorne sprach in seinem Buch (Anm. 36) von einer Sinfonie, einer Sinfonie der Schwarzen Löcher (statt der schwarzen Fräcke, möchte man hinzu fügen). Gravitationswellendetektoren werden als Hörrohre oder Hörgeräte bezeichnet. Tatsächlich machen sie, als empfindlichste Geräte, die der Mensch je gebaut hat, etwas hörbar, das eigentlich unhörbar schwach ist – auch dies ein Anklang an die mythische Sphärenmusik. Bei der akustischen Umsetzung des Signals, das bloss eine Fünftelsekunde dauert, braucht es nicht einmal eine Transposition, die Schwingungen liegen schön im hörbaren Bereich. Wie man aus Abb. 12 ablesen kann, beträgt die Schwingungsdauer bei $t = 0.35$ Sekunden ca. 0.02 Sekunden, das entspricht 50 Hertz. Durch das schnelle Aufeinander-zu-spiralen (*inspiraling*) bis zur Verschmelzung (*merging*) der Löcher schnellt

die Frequenz auf über 200 Hertz und es wird „lauter“, bevor das Signal dann, durch das rasche Abklingen (*ringing down*) des neuen Schwarzen Lochs ziemlich abrupt abbricht. Das Ganze klingt dann wie ein kurzes Gezitscher (*chirp*), zu hören an der Pressekonferenz (Anm. 1). – Keine „himmlische Musik“, eher eine Art Aufschrei aus den Tiefen des Alls.

6 Big Bang-Akustik

Im Fokus des heutigen physikalischen Weltbilds steht ein Ereignis, das mit einer Klangmetapher belegt ist: *Big Bang*, zu deutsch „Urknall“, – so wird die Anfangssingularität des Universums vor rund 14 Milliarden Jahren bezeichnet. Inzwischen zum *Terminus technicus* mutiert, war der Begriff ursprünglich als Schimpfwort gedacht. Sir Fred Hoyle benutzte ihn erstmals 1949 in einer BBC-Radiosendung, um damit das Weltmodell des Abbé Lemaître, welches eine Art Schöpfungsakt postulierte, mit einem griffigen Wort zu charakterisieren. Ob mit oder ohne spöttischem Unterton – Hoyle wollte diesem Modell jedenfalls ein anderes *ohne* Schöpfungsakt, das „Steady-State-Modell“, entgegensetzen. Diese Alternative zum Urknall-Szenarium geriet jedoch fast schlagartig ins Abseits der Wissenschaftsgeschichte durch eine bahnbrechende Entdeckung mit der Holmdel-„Hornantenne“ (Abb. 13), einem kleineren Radioteleskop, bei dem sich der morphologische Vergleich mit einem Ohr ganz besonders aufdrängt. Es handelt sich um eins der historisch bedeutsamsten Instrumente der Wissenschaft überhaupt. Denn – um bei der akustischen Metapher zu bleiben – mit diesem stählernen Ohr wurde vor wenig mehr als fünfzig Jahren zum ersten Mal ein „Nachwimmern“ des Urknalls registriert. Seither gilt das Big-Bang-Modell als Standardmodell der wissenschaftlichen Kosmologie. Die Geschichte ist längst Teil der astronomischen Folklore und soll hier kurz erzählt werden.

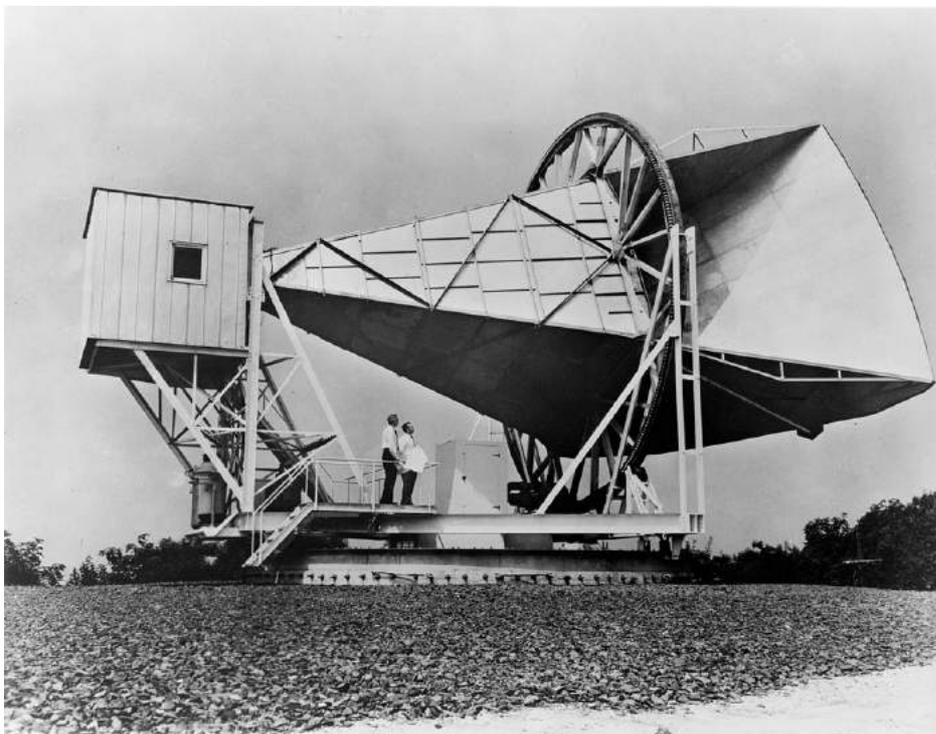


Abb. 13 Die Hornantenne in Holmdel, New Jersey, mit welcher A. Penzias und R. Wilson 1964 zufällig den kosmischen Mikrowellenhintergrund entdeckten. (Bild: NASA)

Wir schreiben das Jahr 1964. Arno Penzias und Robert Wilson, zwei junge amerikanische Physiker, arbeiten für die Bell Telephone Laboratories in Holmdel, New Jersey, und machen sich daran, mit der Hornantenne Radioastronomie zu betreiben. Das Gerät ist während einer kurzen Pionierphase der Weltraumtechnik für die Kommunikation mit ECHO-Ballonsatelliten benutzt worden; nun dieser Aufgabe entledigt, dient es unter anderem zur Untersuchung des optisch nicht sichtbaren Wasserstoffgases in der Milchstrasse. Penzias und Wilson gehen sehr sorgfältig und systematisch vor. In einer langen Messreihe versuchen sie zunächst, alle möglichen Störquellen zu bestimmen, damit am Ende ein "reines" Signal der zu untersuchenden Himmelsquelle aus dem Rauschen extrahiert werden kann. Zu ihrer Verwunderung und Frustration gelingt es jedoch nicht, alle Störquellen ausfindig zu machen. Immer bleibt ein gewisses, extrem schwaches, jedoch messbares Restrauschen übrig, eine "Exzess-Temperatur" von ca. drei Grad Kelvin, deren Ursache unbekannt bleibt.³⁸ In ihrer wachsenden Ratlosigkeit verdächtigen sie zuletzt ein Taubenpaar, das friedlich in der Riesenohrmuschel nistet, aber das Entfernen von Vogelnest und Vogeldreck bringt auch nicht den gewünschten Effekt. Wie konnten die beiden wissen, dass dieser lästige "Dreckeffekt" eine Jahrhundertentdeckung bedeuten würde! Sie sollten es bald erfahren. Denn in nicht allzu grosser Entfernung, an der Princeton University, gab es eine Gruppe von Forschern, die ganz bewusst nach einer Reststrahlung im Mikrowellenbereich suchte; eine solche war nämlich von gewissen Theoretikern als Überbleibsel der heissen, dichten Frühphase des Universums vorausgesagt worden. Penzias und Wilson, die mit ihrer Zufallsentdeckung des "Kosmischen Mikrowellenhintergrunds" den Kollegen von Princeton zuvorkamen, lieferten damit einen überzeugenden Hinweis für die Richtigkeit des Urknall-Szenariums der Kosmologie; 1978 erhielten die beiden dafür den Nobelpreis für Physik.³⁹

Singularitäten wie null und unendlich sind eigentlich bloss Gegenstand der Mathematik, nicht der Physik. Dem physikalischen Zustand des Universum zur Zeit null, dem "Schöpfungsakt", können wir uns, bildlich gesprochen, nur immer weiter annähern. Die heutige Forschung kämpft um ein Verständnis der ersten Milliardstelsekunde. Eine Milliardstelsekunde nach dem Urknall ist das Universum eine fast unendlich dichte und heisse Teilchensuppe, – doch durch die unaufhörliche Ausdehnung kühlt sich das All stetig ab. Nach 400'000 Jahren ist die Temperatur auf 3'000 Grad gesunken; es ist die Epoche, in der sich das Licht zum erstenmal frei ausbreiten kann. In der gegenwärtigen kosmischen Epoche, nachdem sich der Weltraum abermals um den Faktor Tausend ausgedehnt und abgekühlt hat, kommt dieses Licht aus dem ursprünglichen "Feuerball" bei einer Temperatur von drei Grad Kelvin in Form von Mikrowellen bei uns an, und zwar aus jeder Richtung mit derselben Temperatur (bzw. Intensität), – denn der Urknall fand überall zur gleichen Zeit statt. Das ganze Universum gleicht einem riesigen Mikrowellenofen, und wir befinden uns irgendwo da drin. Aber die Mikrowellenstrahlung ist sehr kalt (d.h. sehr schwach), weil sich dieser Ofen über alle Massen ausgedehnt hat. So gesehen, stecken wir eher in einer Tiefkühltruhe und wärmen uns an einem heissen Lämpchen (der Sonne).

Die Welt als Geburt aus Hitze und Licht – ein schönes Bild, das uns die moderne Kosmologie liefert, und passend zum *Fiat Lux* der biblischen Genesis. In dieser Hinsicht wäre "Urblitz" ein treffenderes Wort gewesen als "Urknall". Ich habe mich selber immer am Unwort Urknall gestossen, aber inzwischen halte ich es nicht mehr für ganz irreführend und würde es höchstens durch "Urklang" ersetzen. Nach unserem heutigen physikalischen Verständnis lässt sich die Welt nämlich ebenso gut als Klanggeburt auffassen. Und das hat nun wieder mit dem kosmischen Mikrowellenhintergrund zu tun, den wir oben als

³⁸ In der Radiotechnik gibt man die mit einer Antenne registrierte Radiointensität als Temperatur an.

³⁹ Der populärwissenschaftliche Klassiker, der diese Geschichte erzählt und die Frühzeit des Universums allgemeinverständlich behandelt, stammt selbst von einem Nobeltreisträger der Physik: Weinberg, Steven: *Die ersten drei Minuten – der Ursprung des Universums*, München 1977.

“Nachwimmern” des Urknalls bezeichnet haben (statt “Nachglühen”, wie meistens gesagt wird). Hinter dieser akustischen Metapher steckt ein wahres akustisches Phänomen der Physik.

Ein Vierteljahrhundert nach Penzias und Wilson ist bereits eine grosse Gemeinde von Forschern und Technikern mit der Beobachtung und theoretischen Deutung des kosmischen Mikrowellenhintergrunds beschäftigt. Die besten “Ohren” werden jetzt auf Satelliten in einer Erdumlaufbahn platziert, denn die irdische Atmosphäre ist für den grössten Teil der Mikrowellen undurchlässig. Mit dem COBE-Satelliten (*cosmic background explorer*) gelingt es 1992 schliesslich, kleinste Abweichungen von der mittleren Temperatur von drei Grad Kelvin (genauer 2,73 K) nachzuweisen. Die Temperatur der Hintergrundstrahlung ist eben doch nicht genau dieselbe für alle Himmelsrichtungen; je nach Richtung kann sie um ein Zehntausendstelgrad nach oben oder unten von der mittleren Temperatur abweichen. Solche “Temperaturschwankungen” im Mikrowellenhintergrund sind erwartet worden, denn ohne solche würde sich die Bildung der Galaxien nur schwer erklären lassen. Es muss in der kosmischen Ursuppe bereits “Keime” für die Galaxienbildung gegeben haben, und das sind im einfachsten Fall kleinste Dichteschwankungen (also ganz geringe Abweichungen der örtlichen Dichte von der mittleren Dichte des Universums), die sich dem Mikrowellenhintergrund als Temperaturschwankungen aufgeprägt haben; denn grob gesagt wird es in dichteren Gebieten auch heisser gewesen sein. Nun sind aber Dichteschwankungen in einem gasförmigen Medium, unter gewissen Bedingungen, die das frühe Universum durchaus erfüllte, zugleich *Druckschwankungen*. Und schliesslich: Druckschwankungen pflanzen sich als Schallwellen fort, – Schallwellen sind einfach Druckwellen. Die beobachteten Temperaturschwankungen bedeuten also nichts weniger als die Existenz von Schallwellen in der Urzeit des Kosmos. Und es sind diese Schallwellen, denen letztlich auch wir, über den Prozess der Galaxien- und Sternbildung, unsere Existenz verdanken. Erbrachte also die Entdeckung von Penzias und Wilson den Nachweis für eine Weltgeburt aus Hitze und Licht, so sorgte die nachfolgende Entdeckung der Temperaturschwankungen für eine gebührende „Vertonung“ dieser Anschauung. Aber das „hohe Lied“ des kosmischen Mikrowellenhintergrunds kommt erst noch.

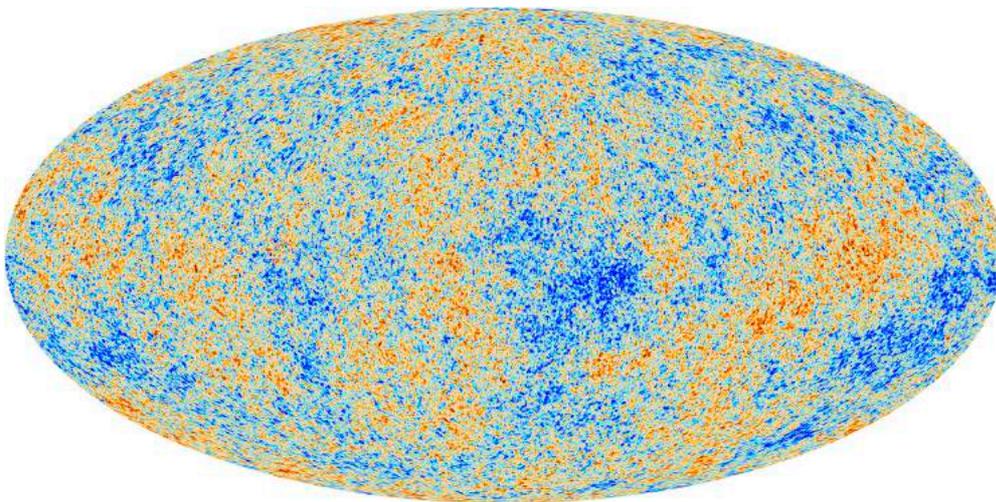


Abb. 14 Eine Himmelskarte der Temperaturschwankungen im Mikrowellenbereich, aufgenommen mit dem Plancksatelliten (2013). Gezeigt ist, mit einer Auflösung von ca. einem Zehntelgrad (wenige Bogenminuten), die Abweichung der gemessenen Temperatur von der durchschnittlichen Temperatur von 2.73 Kelvin in jeder Himmelsrichtung. Abweichungen nach unten, wo es typischerweise um ein Zehntausendstelgrad kühler ist, sind blau eingefärbt, solche nach oben, wo es ebenso geringfügig heisser ist, gelb (Bild: ESA, Planck Collaboration)

Schauen wir uns die Verteilung der Temperaturschwankungen am Himmel an, wie sie die neueste, nach Planck benannte Satellitenmission der ESA zur Vermessung des kosmischen Mikrowellenhintergrunds erbrachte (Abb. 14). Die Mikrowellenkarte zeigt im Prinzip, wie das Universum 400'000 Jahre nach dem Urknall „ausah“, als es noch keine Sterne und Galaxien gab, bloss Gas (und sog. Dunkle Materie, um genau zu sein), dessen winzige Unebenheiten (Dichteschwankungen) sich hier als winzige Temperaturschwankungen verraten. Die Temperatur schwankt offensichtlich auf ganz grossen Winkelskalen (das ist das grobe Flickermuster über die ganze Sphäre), aber auch auf kleineren und kleinsten Winkelskalen (zu sehen als feines Farbgesprenkel). Nun lässt sich mathematisch aus den Daten eruieren, wie stark die Temperatur bei einer bestimmten Winkelskala im statistischen Mittel schwankt, und wenn man das für alle möglichen Winkelskalen durchführt und auf diese Weise die mittlere Amplitude der Temperaturschwankung als Funktion der Winkelskala berechnet, kriegt man das sog. Spektrum der Temperaturschwankungen, auch kurz „Fluktuationsspektrum“ genannt.⁴⁰ Für die Planckdaten sieht das Fluktuationsspektrum wie folgt aus (Abb. 15).

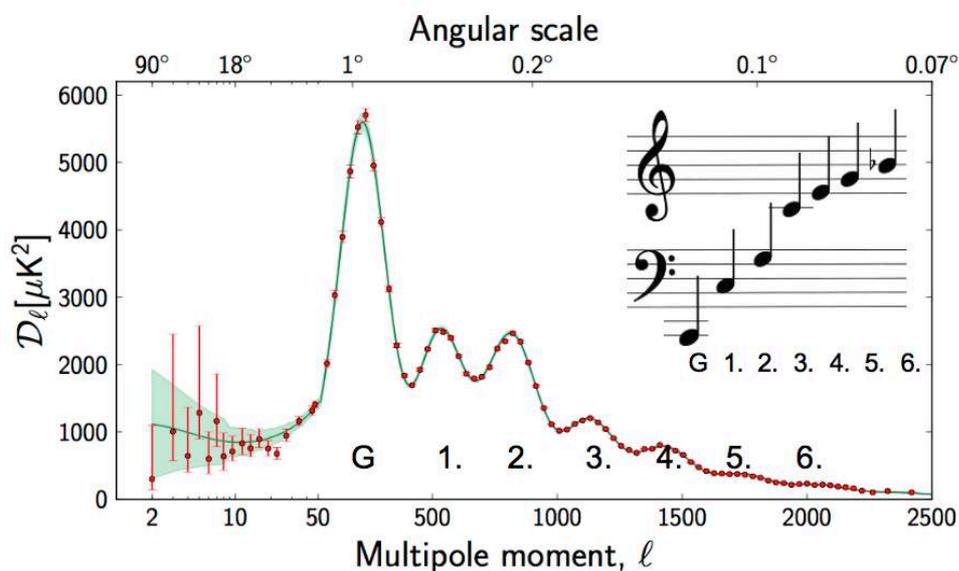


Abb. 15 Das Spektrum der Temperaturschwankungen im kosmischen Mikrowellenhintergrund, gemessen mit dem Plancksatelliten (2013). Auf der horizontalen Achse ist die Winkelskala aufgetragen, oben in Winkelgrad, unten als diskretes Glied l der „Multipolreihe“, in welche die Daten auf der Himmelssphäre zerlegt worden sind (siehe auch Anm. 40 zur Erklärung); zu beachten: für $l < 50$ (grosse Winkelskalen, links) ist die Skala logarithmisch, für $l > 50$ (kleine Winkelskalen, rechts) linear. Auf der vertikalen Achse ist die mittlere Temperaturschwankung im Quadrat aufgetragen (in Millionstel Kelvin im Quadrat). Die roten Punkte sind die Multipol-Amplituden aus den Messdaten des Plancksatelliten, die grüne Kurve ist ein bestimmtes kosmologisches Modell zur besten Erklärung des Fluktuationsspektrums. Ins Akustische übertragen, entspricht die Kurve einem Klangspektrum, mit der Lautstärke als Schwankungsamplitude und der Tonfrequenz als reziproke Winkelskala; nach rechts fällt die Schallwellenlänge und steigt die Tonfrequenz (vereinfacht: oben laut, unten leise, links tiefer Ton, rechts hoher Ton). Die Hügelspitzen (*acoustic peaks*) folgen recht genau einer Obertonreihe, wie sie in musikalischer Notation rechts oben eingeblendet ist (G = Grundschiwingung, 1. Oberton, 2. Oberton usw.). (Bild [ohne Noten]: Planck Collaboration)

⁴⁰ Technisch funktioniert das z.B. so, dass man die Abweichung von der mittleren Temperatur über die Himmelssphäre mit einer „Multipolreihe“ modelliert. Das grösste Muster einer solchen Abweichung hätte die Form eines Dipols ($l = 1$), bei dem die eine Hälfte des Himmels etwas kühler, die andere etwas heisser wäre; die zweitgrösste Abweichung wäre ein Quadrupol ($l = 2$) mit zwei einander gegenüberliegenden Regionen, wo es kühler (und orthogonal dazu) heisser ist – u.s.w., mit wachsendem Multipolgrad l immer kleinere Winkelskalen auf der Himmelssphäre modellierend (annäherungsweise ist der Zusammenhang zwischen Winkelskala Θ und Multipolgrad l wie folgt: $\Theta \approx 180^\circ/l$). Das ist ganz analog zur Analyse der solaren Oszillationen (siehe oben).

Auf grösseren Skalen, bis hinunter in den Gradbereich, ist die Schwankungsamplitude mehr oder weniger konstant (d.h. unabhängig von der Winkelskala), aber dann folgt eine rechte Hügellandschaft, mit der höchsten Spitze bei ca. 1^0 , und einer Reihe kleinerer Spitzen bei noch kleineren Skalen. Diese feine Struktur lässt sich aus dem Flickenteppich (Abb. 14) nicht erahnen, sie ergibt sich erst durch eine statistische Analyse. Die Höhengipfel sind als *acoustic peaks* („akustische Spitzen“) bekannt, denn, wie bereits angedeutet, haben wir es hier mit einem akustischen Phänomen zu tun, mit Schallwellen, die sich im frühen Universum ausgebreitet haben. Tatsächlich entspricht die Reihe der Höhengipfel nichts anderem als einer Obertonreihe, mit der höchsten Erhebung als Grundschwingung und den kleineren, nachfolgenden als Obertöne. Wenn diese Höhengipfel die Kosmologen in helle Aufregung und Begeisterung versetzt, so liegt das jedoch wiederum nicht am musikalischen Aspekt der Sache, sondern weil diese Höhengipfel, durch ihre spezifische Position und Höhe im Spektrum, genauestes Zeugnis vom physikalischen Zustand des Universum zur damaligen Zeit ablegen (das Obertonspektrum verrät das Instrument, wie man sich erinnert). Wir hingegen wollen versuchen zu verstehen, was es mit dieser Akustik genau auf sich hat und wie die Schöpfung, mittels geeigneter Transposition, geklungen haben mag.⁴¹

Der kosmische Mikrowellenhintergrund ist eine Art Schnappschuss des Universums zur Zeit der „Rekombination“, ca. 400'000 Jahre nach dem Big Bang. Wie ist es also möglich, dass wir auf einer Momentaufnahme Schwingungen ausmachen können? Und was ist diese Rekombination überhaupt? Mit der Rekombination meint man die Bildung von Wasserstoffatomen aus Protonen und Elektronen, welche einsetzte, sobald die Temperatur der Ursuppe aufgrund der ständigen Expansion des Weltalls unter etwa 3'000 Kelvin gesunken war. Vorher, also in den ersten 400'000 Jahren, flogen Protonen und Elektronen frei herum, die Materie war „ionisiert“, und das machte das Weltall undurchsichtig, denn die ebenfalls frei herum fliegenden, noch viel zahlreicheren Photonen (Lichtteilchen) kamen nie weit, sondern stiessen ständig mit den Materieteilchen, hauptsächlich den Elektronen, zusammen. Hätte man damals ein grosses Stück dieses urtümlichen Materie-Photon-Gases versucht zu komprimieren (die kosmische „Ursuppe“ war natürlich keine Flüssigkeit, sondern ein Gas), dann wäre es darin heisser und dichter geworden und der daraus folgende Gegendruck hätte das Gaspaket wieder expandieren lassen. Nun haben wir aber genau diese Situation gleich nach dem Big Bang: es muss praktisch von Anfang an Dichteschwankungen gegeben haben, und an den Stellen geringer Überdichte war es die Schwerkraft, die das Materie-Photon-Gas zu komprimieren suchte. Aber das ging immer nur soweit, bis der Gegendruck, der sich durch die erhöhte Dichte und Temperatur aufgebaut hatte, die Wirkung der Schwerkraft überwog, und das Gas wieder aus dem „Schwitzkasten“ entliess und auseinander trieb, nur um der Schwerkraft abermals die Oberhand zu überlassen, u.s.w. – ein auf und ab, wie eine Feder, die rhythmisch gestaucht und gedehnt wird. Mit andern Worten: das Gas in den überdichten Gebieten fing an zu schwingen – : das sind die bereits erwähnten Druckschwingungen des Gases, die sich als Schallwellen ausbreiten! Und diese Oszillationen gingen vor sich – bis zur Rekombination; dann war abrupt Schluss, denn die Rekombination bedeutet einen enormen Druckabfall. Die von den Protonen eingefangenen Elektronen fielen als Streupartner der Photonen plötzlich weg, es kam zur „Entkopplung“ von Materie

⁴¹ Eine allgemeinverständliche Darstellung dazu: Hu, Wayne und White, Martin (2004): *Die Symphonie der Schöpfung*, Zeitschrift Spektrum der Wissenschaft, Mai 2004, S. 48. Anspruchsvoller, aber ein grossartiges, audiovisuelles Lehrbuch online: Whittle, Mark (University of Virginia): *Big Bang Acoustics: Sounds From The Newborn Universe*, http://people.virginia.edu/~dmw8f/BBA_web/index_frames.html

und Licht. Jetzt konnte sich das Licht frei ausbreiten – es kommt heute, tausendfach „zerdehnt“, in Form von Mikrowellen bei uns an. Und für das Materiegas gab es nun kein Halten mehr, die Feder war sozusagen gebrochen: – in den überdichten Zonen fiel es langsam in sich zusammen und bildete erste Galaxien und Sterne.

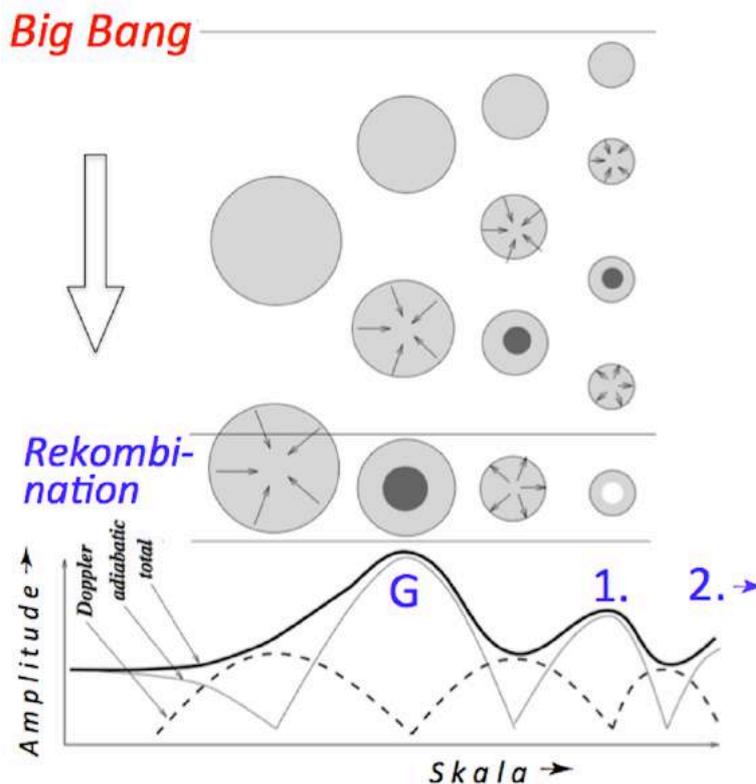


Abb. 16 Eine bildliche Erklärung, wie es zu den Hügelspitzen im Fluktuationsspektrum kommt. Gezeigt sind oben Momentaufnahmen oszillierender Gasregionen verschiedener Grösse. Je grösser die Region, desto länger die Schwingungsperiode bei gleicher Schallgeschwindigkeit. Die Oszillation fängt praktisch mit dem Big Bang an: zuerst eine Kontraktion (einwärts gerichtete Pfeile) bis zur maximalen Verdichtung (innen schwarz), dann eine Expansion (auswärts gerichtete Pfeile) bis zur maximalen Verdünnung (innen weiss) usw. Die Oszillation stoppt abrupt bei der Rekombination ca. 400'000 Jahre später (die Zeit fliesst von oben nach unten). Dort wo in diesem Moment gerade eine maximale Verdichtung oder Verdünnung erreicht ist, entsteht im Spektrum der Temperaturschwankungen (unten) ein Maximum. Gezeigt sind nur die Grundschwingung und der erste Oberton. Die Gasbewegung selber erzeugt ebenfalls ein Signal („Doppler“, gestrichelte Linie), das aber den beschriebenen Effekt („adiabatisch“, dünne Linie) nur etwas dämpft und verbreitert. (Bild: nach Lineweaver)

Gehen wir zurück zu den Oszillationen, zu den Schallwellen. Druckschwankungen pflanzen sich mit Schallgeschwindigkeit fort. Im frühen Universum war die Schallgeschwindigkeit enorm gross, ungefähr halb so gross wie die Lichtgeschwindigkeit! (aber das ist nicht entscheidend für das Folgende.) Nun betrachten wir Dichtefluktuationen verschiedener Grösse; es waren ja nicht alle gleich gross. Wichtig ist, dass die Oszillation – Kontraktion und Expansion – mit immer derselben Schallgeschwindigkeit vor sich ging. Daraus folgt sofort, dass sich die *Schwingungsperiode* proportional zur Grösse einer Dichteschwankung verhält: Gas in einem doppelt so grossen „Potentialtopf“ braucht doppelt so lange für eine Schwingung, denn die Druckwelle (Schallwelle) muss den doppelten Weg zurücklegen. Die Folge ist, dass die oszillierenden Gasballen im Moment der Rekombination, wenn sie sozusagen auf frischer Tat ertappt werden, in einer jeweils ganz verschiedenen *Schwingungsphase* stecken, je nach Grösse. Manche ertappen wir dabei, wie sie gerade maximal komprimiert oder maximal verdünnt sind. Dort weicht die Dichte, also auch die Temperatur des Gases maximal vom Durchschnittswert ab, dort finden wir eine starke Temperaturschwankung, eine Hügelspitze, im Fluktuationsspektrum des Mikrowellenhintergrunds. Und bei welchen ist das der Fall? Ganz einfach: bei denjenigen, die in den 400'000 Jahren zwischen Urknall und Rekombination genau *ein ganzzahliges Vielfaches einer halben Schwingung* ausgeführt haben. Das ergibt die beobachtete Obertonreihe im Spektrum. In Abb. 16 ist das veranschaulicht. Die Grundschwingung (halbe Wellenlänge) finden wir bei einer Winkelskala von ca. 1° am Himmel, was zur damaligen Zeit einer Länge von etwa 200'000 Lichtjahren entspricht (heute um den Faktor Tausend expandiert). Eine Fluktuation dieser Grösse hätte sich bis zur Rekombination maximal

verdichtet. In musikalischer Analogie wäre das der Grundton einer 200'000 Lichtjahre langen (nicht gedackten, beidseits offenen) Orgelpfeife! Der erste Oberton (ganze Wellenlänge) findet sich bei der halben Grösse; hier führt die Schwingung über die maximale Verdichtung gerade wieder bis zur maximalen Verdünnung. Beim zweiten Oberton, bei der gedrittelten Länge, führt die Schwingung dann wieder zur maximalen Verdichtung, u.s.w.⁴²

Wir haben es also wieder, wie bei der Sonne und den Sternen, ganz naturalistisch mit richtigen Schallwellen zu tun. Aber wieder *sehen* wir die Schallwellen bloss; sie erreichen unsere Ohren nicht. Die Phänomene sind physikalisch vergleichbar. Bei der Sonne beobachten wir die Schallwellen an der Oberfläche, wo sie ein komplexes, durch Interferenzen im Innern erzeugtes Obertonspektrum zeigen. Auch in der Kosmologie beobachten wir die Obertonreihe der Oszillationen nur an der Oberfläche, allerdings einer extrem weit entfernten und *konkaven* Oberfläche, der „Rekombinationsschicht“, die wir als Flickenteppich im Mikrowellenbereich sehen (Abb. 14, und vorausgehend Abb. 17). Aber anders als bei der Sonne, ist das Gebiet unter/hinter dieser Oberfläche keine räumliche, sondern eine zeitliche (oder genauer: raumzeitliche) Struktur – es ist einfach die Zeit *vor* der Rekombination. Damals oszillierte das Gas in allen Dichtefluktuationen jeglicher Grösse, und deswegen auch mit jeglicher Frequenz, gleichzeitig und gleich „laut“, auch noch im Moment der Rekombination. Es wäre also die reinste Kakaphonie, die wir als fiktive kosmische Zeitreisende nach dem Urknall hören könnten. Die schöne Obertonreihe im Mikrowellenhintergrund hat nichts mit Interferenzen oder stehenden Wellen zu tun; sie kommt einzig durch den zeitlichen Schnitt zustande. Die endliche Zeitstrecke zwischen Urknall und Rekombination von 400'000 Jahren wirkt wie die endliche Länge einer Saite oder eines Blasrohrs. Nur eindimensionale Instrumente haben harmonikale Obertöne. Auch die Zeit ist eindimensional, deswegen haben wir auch hier harmonikale Obertöne (man erinnere sich: bei der Sonne sind die Obertöne nicht harmonikal).

Natürlich ist es trotzdem sehr reizvoll, die Obertonstruktur im Mikrowellenhintergrund in hörbare Töne zu übersetzen. Mark Whittle von der Virginia University hat dies auf spielerische und sehr lehrreiche Weise ausgeführt (seine grossartige Webseite *Big Bang acoustics* wurde oben in Anm. 41 angeführt). Um die urzeitlichen Oszillationen hörbar zu machen, müssen ihre Tonfrequenzen um rund 50 Oktaven nach oben transponiert werden, und selbst dann ist der Klang zunächst enttäuschend, denn wir haben es, trotz dieser Hügelspitzen, mit einem recht breiten Spektrum zu tun. Erst wenn die „reinen“, zentralen Frequenzen der Grundschwingung und der Obertöne rausgefiltert werden, ergibt sich ein ansprechender, harmonischer Klang, der durch die geringfügig nicht-harmonikale Platzierung der Grundschwingung gegenüber den Obertönen ein bisschen an ein Glockengeläut erinnert. Das also wäre dann das abgrundtiefe, kosmische Urgeläut, und die Sonne und die Sterne scheinem ihm ein feines Echo zu geben.

Woher aber stammen die Dichtefluktuationen, die zu diesen Schallwellen Anlass gaben? Hierfür machen die Theoretiker die sog. inflationäre Phase des Universums verantwortlich, bei der unmittelbar, genauer 10^{-35} Sekunden (!) nach dem Urknall, aufgrund einer Symmetriebrechung, die zur Ausdifferenzierung der bekannten Kräfte der Natur führte, der Raum schlagartig um einen Faktor 10^{30} (!) aufgeblasen wurde. Und bei dieser Inflation sollen die anfänglichen Unebenheiten im Quantenbereich (man denke an die Heisenbergsche Unschärferelation), die sog. Quantenschwankungen, mitaufgeblasen worden sein, zu makroskopischer Grösse, wo sie dann als Keime der Galaxienbildung wirken würden. Aber soweit kam es erst nach der Rekombination, zuerst resultierte daraus bloss – Lärm. Das bringt uns auf die nächste Frage: wie laut war es? Das ist einfach zu beantworten: die relativen Dichte-

⁴² Die Winkelskalen der Hügelspitzen lassen sich nicht sehr gut ablesen in Abb. 15, aber man erkennt ohne Weiteres die Äquidistanz der Reihe, was auf ihre harmonikale Struktur hinweist.

Temperatur-, und also auch Druckschwankungen waren von der Grössenordnung eines Zehntausendstels (10^{-4}) – das sind 110 Dezibel, was typischerweise einem Rockkonzert entspricht. Der Urknall selbst, die Anfangssingularität, der „Schöpfungsmoment“, war also totenstill – ; aber nach 10^{-35} geht es gleich los mit einem Rockkonzert! Die Zeitspanne ist so kurz: Sollten wir nicht diesen Urklang (wenn wir uns wieder auf die harmonische Obertonreihe besinnen) mit dem Urknall selbst identifizieren? – statt von Urknall lieber von *Urklang* reden?

Ob Urknall oder Urklang – : dass die Weltschöpfung ein akustisches Ereignis war, davon berichten viele Mythen. Der Musikethnologe Marius Schneider hat sie gesammelt und erforscht; in seinem Buch *Singende Steine* 1955 (Anm. 3) schreibt er:

Sowohl die Schöpfungsmythen der Naturvölker wie die Kosmogonien der afro-asiatischen Hochkulturen erwähnen einen dunklen, überbegrifflichen Klang als die Mutter des Weltenschöpfers. Dieses „erste Wort“ ist die erste aktive Manifestation, der erste Wunsch, der sich aus der vollkommenen Ruhe und Einheit des „Urabgrundes“ bzw. aus dem (wie ein Ei sich spaltenden) Mund des singenden Todes erhebt. Der Schöpfer selbst ist das „zweite Wort“, das bald als der erste blitzende Donner oder als ein singendes Gestirn, bald als ein klingendes Morgenrot oder als leuchtender Gesang bezeichnet wird. In Ägypten ist es die singende Sonne, welche die Welt durch ihren Lichtschrei erschafft. [...] Prajapati, der vedische Schöpfergott war selber nur ein Hymnus. Sein Körper bestand aus drei mystischen Silben, aus deren singender Aufopferung der Himmel, das Meer und die Erde hervorgingen.

Dieser Lichtklang, der zunächst nur eine rein akustische, leuchtende Welt erschuf, bildet die Ursubstanz alles Geschaffenen. Durch dieses zweite Wort entstanden die Urbilder d.h. Klänge, die durch ihre verschiedenen rythmischen Gestaltungen für den Geist sicht- und begreifbar wurden. [...]

Auch die reine Materie entstand dadurch, dass die klingenden Urbilder erstarrten und klangarm (oder scheinbar sogar klanglos) wurden. Nichtsdestoweniger ist und bleibt nach altindischer Auffassung auch in der reinen Materie das eigentliche Substrat akustisch. Der Schall bildet das allen kosmischen Erscheinungen gemeinsame Urelement. Nur der Anteil oder die Lebendigkeit des Urklangs ist von Fall zu Fall verschieden. Götter sind reine Klänge.

Natürlich darf man hier auch an das Johannes-Evangelium denken: *Im Anfang war das Wort...*; ebenso an die Genesis: *... und Gott sprach...*; oder selbst an den *Geist, der über den Wassern schwebte*, denn Geist (im hebräischen Original *ruach*, griechisch *pneuma*) meinte eigentlich Hauch, Wind, Stimme.⁴³ Die Vorstellung einer Klanggeburt ist ganz plausibel, eignet sich doch die formlose, körperlose Tonwelle sehr gut als Verbindungstück, als Übergang zwischen dem Nichts und der gestalteten, materiellen Welt, – besser noch als die Lichtwelle, denn Klang ist durchdringender als Licht, und vor allem eben: dunkel.

Zurück zum Urklang der heutigen Astrophysik. Nach 400'000 Jahren wird es wieder still. Aus den oszillierenden Dichtefluktuationen, den kosmischen Schallwellen, schnüren sich Gaswolken ab, es entstehen erste Sterne – und fortan klingt es wieder; nur viel leiser. Ein Echo des Urklangs. – Aber noch in anderer Hinsicht bleibt eine Art Echo: Durch die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit sehen wir bekanntlich alles in der Vergangenheit. Sterne, die Lichtjahre entfernt sind, sehen wir so, wie sie vor Jahren waren; Galaxien, die Millionen Lichtjahre entfernt sind, sehen wir so, wie sie vor Millionen Jahren waren. Je weiter wir in den Raum vorstossen mit unseren Teleskopen, desto tiefer schauen wir in die Vergangenheit. Es ist alles noch da, die ganze kosmische Geschichte schwebt, schön zeitlich gestaffelt, über unseren Köpfen. Und zuoberst (zuäusserst), als Sichtbarkeitshorizont, denn länger als seit dem Weltbeginn kann das Licht nicht unterwegs gewesen sein, liegt der Big Bang, bzw. das räumliche Abbild des Big Bangs; aber wir sehen ihn nicht, weil das Universum, wie wir wissen, die erste Zeit undurchsichtig war. Wir sehen nur bis zur Rekombinationsschicht, wo uns der Flickenteppich des

⁴³ Nicklaus: *Die Maschine des Himmels*, S. 45 (Anm. 3)

Mikrowellenhintergrunds erscheint. Sphärenartig umgibt er uns und umhüllt die ganze, beobachtbare Welt; hätten wir Mikrowellenaugen, wir blickten auf die Innenwand einer riesigen Hohlkugel.

Das Universums des Beobachters hat die Gestalt einer – wenn auch unfassbar grossen – Kugel, mit dem Beobachter im Zentrum und dem Big Bang an der Peripherie. Es ist keine räumliche, sondern eine raumzeitlich Kugel. Objekte einer bestimmten, zeitlich vergangenen Epoche liegen auf einer Sphäre (Kugelschale), deren Radius dem Lichtreiseweg seit dieser Epoche bis heute entspricht; man könnte von zeitlichen Sphären reden. Dieser neue Kugelkosmos ist in Abb. 17 rechts dargestellt.

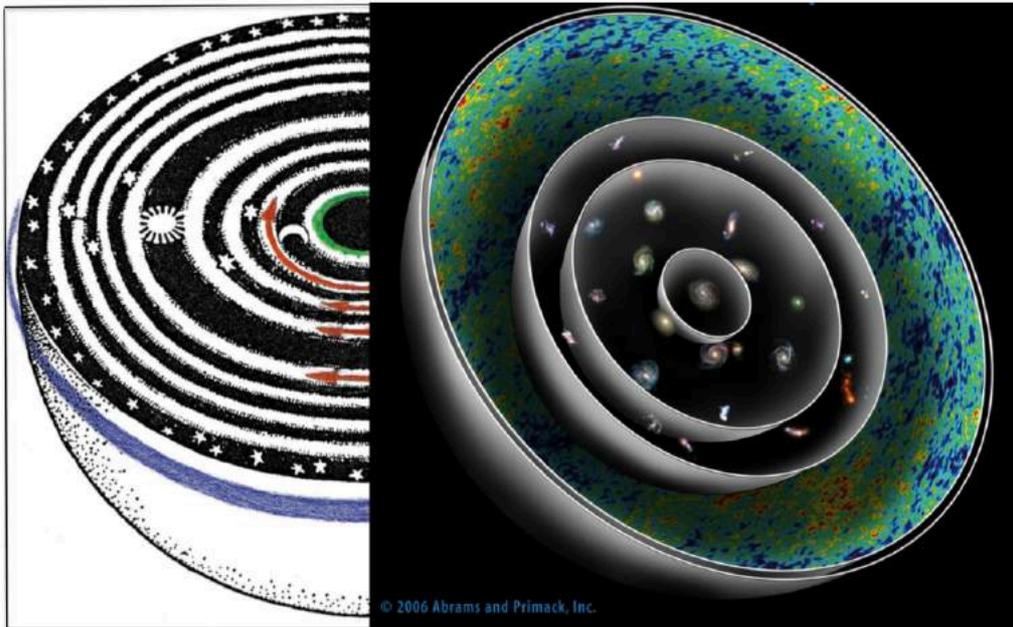


Abb. 17 Der antike (links) und der moderne (rechts) Sphärenkosmos. Im antiken Sphärenkosmos sind die Planeten, und zuäusserst die Fixsterne in (transparenten) Sphären untergebracht, welche sich, von innen nach aussen langsamer werdend, relativ zur Fixsternsphäre um die stillstehende Erde im Zentrum bewegen. Im modernen „Sphärenkosmos“ des beobachterzentrierten Universums entsteht die Schalenstruktur durch die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit: Vergangene kosmische Epochen liegen auf raumzeitlichen Sphären um das Hier und Jetzt des Beobachters, zuäusserst (unsichtbar) das Abbild des Big Bangs, und kurz davor die Rekombinationsschicht des Mikrowellenhintergrunds. (Bild links aus Binggeli: *Primum Mobile*; rechts aus Abrams & Primack: *The new universe and the human future*, mit Genehmigung der Autoren, Anm. 44)

Das mutet nun in gewisser Weise wie die Rückkehr des griechischen Sphärenkosmos an, – nicht quantitativ (der moderne Kosmos ist schier unendlich viel grösser), sondern qualitativ, *morphologisch*. Der Kosmos der Griechen (in seiner kanonisch gewordenen Gestalt) war bekanntlich kugelförmig und gleich in seinem Aufbau einer Zwiebel; die im Zentrum stehende Erde war konzentrisch umgeben von einer Reihe sich drehender, durchsichtiger Kugelschalen, die mit den Planeten und Fixsternen bestückt waren (Abb. 17 links). Die Ähnlichkeit der beiden „Weltkugeln“ hat mich dazu bewogen, die moderne Kosmologie, wo man sich dem Big Bang – morphologisch betrachtet: der „höchsten“ Sphäre – mittels Teleskopen und Teilchenbeschleunigern wachsender Leistungsfähigkeit und „Durchschlagskraft“ (freilich bloss virtuell) immer mehr annähert, mit der mythischen (ebenfalls virtuellen) Reise Dantes ins Paradies

zu vergleichen, mit seinem Flug durch die Himmelsphären, hinauf in die höchsten Gefilde, zum göttlichen Ursprung.⁴⁴

Und nun achte man in diesem Bild auf den Mikrowellenhintergrunds mit seiner Obertonstruktur im neuen Sphärenhimmel. Dürfen wir darin nicht eine *Wiederkunft der griechischen Sphärenmusik* erblicken? In Platons Beschreibung der Sphärenmusik im Mythos des Er thront auf jeder der acht Sphären bzw. Halbsphären (sieben für die Planeten, die äusserste für die Fixsterne) eine Sirene. Jede dieser Sirenen singt einen zur Sphäre passenden, bestimmten Ton, und alle acht Töne zusammen klingen in einer einzigen Harmonie. Auch im Mikrowellenhintergrund erklingt sichtbar eine Reihe von Tönen, die sogar die fundamentalste harmonikale Struktur befolgen, die bereits die Griechen kannten: – einen Grundton und wenigstens sechs Obertöne mit abnehmender Lautstärke. Man ist versucht auszurufen: Das ist der *neue kosmische Sirenengesang!*⁴⁵ – Jedenfalls haben wir mit den akustischen Schwingungen im frühen Universum nicht bloss eine Analogie zur mythischen Klangschopfung, sondern *gleichzeitig* eine Analogie zur griechischen Sphärenmusik, insofern diese Schwingungen hoch oben, über unseren Köpfen im kosmischen Mikrowellenhintergrund erscheinen. Die Sphärenmusik des Mikrowellenhintergrunds ist ein räumliches Abbild der zeitlichen Klangschopfung, des Urknall-Urklangs. Es ist eigentlich dasselbe – einmal in zeitlicher, und einmal in räumlicher Perspektive. Durch die endliche Lichtgeschwindigkeit sind Zeit und Raum stets gekoppelt. Was den mittelalterlichen Scholastikern nicht, oder nur mit phantasievoller Zurechtbiegung gelingen konnte – , nämlich die beiden hauptsächlichen Weltbilder des Abendlandes: die jüdische Schöpfungsgeschichte und den ungeschaffenen Sphärenkosmos der Griechen miteinander zu versöhnen – : das folgt aus der modernen Relativitätstheorie und Kosmologie durch Analogieschluss gewissermassen automatisch.⁴⁶ Der einmalige Schöpfungsakt wird zu einer ewigen Schöpfung (*creatio continua*), der einmalige Urknall zu einer ewig klingenden Sphärenmusik.

Oder anders aufgefasst: die Sphärenmusik des Mikrowellenhintergrunds stellt ein fortwährendes Echo des Urknall-Urklangs dar. Dieses Echo pflanzt sich nun aber durch die ganze, lange kosmische Geschichte hindurch fort bzw. lässt sich weiter verfolgen – bis „hinunter“ zu uns. Die akustischen Oszillationen im frühen Universum stehen an der Wurzel der gesamten Strukturbildung. Wie oben schon kurz erklärt, kann das Gas in den Dichtefluktuation nur bis zur Rekombination oszillieren (der Mikrowellenhintergrund liefert uns also, gerade in dem Moment wo sie aufhören, ein letztes, ewig haltbares Erinnerungsfoto dieser Schallwellen). Nachher bilden sich dort, wo die Dichte stark erhöht ist (unabhängig davon, in welcher Phase eine Schwingung gerade erwischt wurde), gravitationell gebundene Gaswolken, die langsam kontrahieren und, vermutlich bereits nach wenigen hundert Millionen Jahren, erste (zunächst noch kleinere) Galaxien mit (zunächst noch chemisch sehr „reinen“) Sternen bilden. In einer komplexen, wechselvollen Entwicklung verschmelzen sodann die kleineren zu immer grösseren, milchstrassenähnlichen Galaxien; das Gas, aus dem fortwährend neue Sterne entstehen, wird durch explosive Prozesse rezykliert und nach und nach mit höheren Elementen angereichert, bis genügend Staub da ist, damit sich um die Sterne herum auch Planeten bilden können. Da entsteht in irgendeiner Ecke vor 4,5 Milliarden Jahren ein durchschnittlicher Stern mitsamt einer Reihe von Planeten, darunter

⁴⁴ Binggeli, Bruno: *Primum Mobile – Dantes Jenseitsreise und die moderne Kosmologie*, Zürich 2006. Der Vergleich der neuen mit der alten Sphäre scheint in der Luft gelegen zu haben, er fand auch Eingang ins gleichzeitig erschienene Buch von Primack, Joel und Abrams, Nancy.: *The view from the center of the universe*, New York 2006, wiederholt in Abrams, N. and Primack, J.: *The new universe and the human future* (Terry lectures), New Haven 2011, woraus das Bild Abb. 17 rechts entnommen ist.

⁴⁵ Nochmals eine Anspielung auf den verführerischen Sirenengesang: Im Big Bang müsste die Einheit aller Kräfte der Natur uranfänglich realisiert gewesen sein. „Dorthin“ zu gelangen, den letzten Schleier zu lüften, die „Welformel“ zu finden, „lockt“ es die theoretischen Physiker, nicht nur die Superstringadepten (vgl. Anm. 28).

⁴⁶ Ausführlicher dazu Binggeli: *Primum Mobile*, Kapitel 6 und 7 (zitiert 44).

einer, der die Entwicklungsgeschichte auf einer ganz anderen, chemisch-biologischen Ebene weiter treibt..., – und sozusagen auf die Spitze treibt. Am Ende dieser unübersehbar langen Kette steht der Mensch – auch er noch ein Produkt, ein letzter Ausläufer jener urzeitlichen Dichteschwankungen, die durch die Schallwellen im Mikrowellenhintergrund angezeigt werden⁴⁷; ein Echo des Echos, wenn man so will.

Die Kontinuität der Schöpfung verbindet uns lückenlos mit der Big Bang-Akustik. Und insofern wir diesen Urknall-Urklang, im neuen Weltkugelbild, auch mit der Sphärenmusik assoziiert haben, böte sich nun eine neue „Erklärung“ für die epische Unhörbarkeit der Sphärenmusik an: *Die Sphärenmusik ist nicht hörbar – weil wir selbst die Töne sind!*⁴⁸

7 Symbolische Wiederkehr der Sphärenmusik?

Nachdem wir die wichtigsten sphärenmusikalischen Analogien der modernen Astrophysik haben Revue passieren lassen, sollen nun noch einige Gedanken zur Deutung dieser Analogien geäußert werden. Was sind Analogien überhaupt? Analogien sind Ähnlichkeiten zwischen Dingen, die kausal nichts miteinander zu tun haben. Ursprünglich als rein quantitative Ähnlichkeit im mathematischen Sinn, als Gleichheit von Proportionen gemeint, etwa wenn von „ähnlichen Dreiecken“ oder dergleichen gesprochen wird, bezeichnet die Analogie im verallgemeinerten Sinn eine Ähnlichkeit, die sich auf irgendwelche, auch *qualitativen* gemeinsamen Merkmale bezieht, seien es solche der Form, der Funktion oder des Sinns. Je weiter entfernt vom Quantitativen, Mathematischen, desto schwieriger ist es, eine (qualitative) Analogie oder Entsprechung zu sehen. „Sehen“ ist dann auch nicht das richtige Werkzeug dafür; gefragt wäre vielmehr ein *Schauen*. Anders als das analytische Sehen, schliesst ein impressionistisch auf Empfang gestelltes Schauen die Wahrnehmung eines geistig-seelischen, „symbolischen“ Hintergrunds mit ein; Schauen ist ein Sehen mit dem inneren Auge, gleichsam ein „hörendes Sehen“.

Die besprochenen Analogien, wenn wir von den kühnen Vergleichen, zu denen wir uns zuletzt im Zusammenhang mit Urknall und Mikrowellenhintergrund aufgeschwungen haben, absehen, sind allerdings ganz quantitativer, mathematisch-physikalischer Natur und erschliessen sich schon einem rein intellektuellem Verständnis. Die zwei Arten, wie astrophysikalische Objekte oder Prozesse zu sphärenmusikalischen Vergleichen Anlass geben können, wurden im Eingangskapitel bereits genannt: Entweder finden sich harmonikale Strukturen in irgendwelchen physikalischen Grössen, oder es schwingt tatsächlich etwas im Weltraum, – oder beides zusammen, wie beim kosmischen Mikrowellenhintergrund. Der Bezug zur Sphärenharmonie oder Sphärenmusik wird von den Forschern selbst hergestellt und sehr ausgiebig zwecks Popularisierung ihrer Forschung benutzt. Das ist legitim und auch sehr wichtig, nicht nur zum Abbau der oft zitierten „Bringschuld“ der akademischen Wissenschaft gegenüber der interessierten (Steuern zahlenden) Öffentlichkeit, – zur assimilationsfähigen Aufbereitung wissenschaftlicher Fakten, die vorzugsweise mit den Mitteln der Kunst erreicht werden kann, überhaupt. Populäre Metaphern und Analogien, die eine kulturgeschichtliche Dimension besitzen

⁴⁷ Es ist nicht ganz falsch, aber doch etwas verkürzt, wenn man sagt, „wir“ seien das Produkt der Schallwellen im frühen Universum. Ohne jene Schallwellen gäbe es uns nicht, das stimmt, aber bloss weil es dann auch keine Dichteschwankungen gegeben hätte, die am Anfang der ganzen Strukturentwicklung standen. Man muss sich auch klar machen, dass die Schallwellen/Dichteschwankungen, die zu „uns“ geführt haben, nicht jene sind, die wir im Mikrowellenhintergrund beobachten. Alles was wir beobachten können, ist vergangen *und anderswo*. Aber wir gehen davon aus, dass die Geschichte überall ganz ähnlich verlaufen ist; das ist das sog. Kosmologische Prinzip.

⁴⁸ Im Grunde wäre das vielleicht doch nur eine extreme Variante der Erklärung Ciceros, nämlich dass wir einen Dauerklang nicht hören können; s. auch Nicklaus: *Die Maschine des Himmels*, S. 105–108 (Anm. 3).

und an alte Weisheiten erinnern, dienen vor allem auch dem inneren Zusammenhalt, dem Selbstverständnis einer in tausend Spezialgebiete zersplitterten wissenschaftlichen Disziplin; sie motivieren, beflügeln, faszinieren die Forscher selbst.

Aber gerade diese Faszination, diese Begeisterung für musikalische Bezüge, sobald sich nur die Gelegenheit dazu ergibt, kommt mit einer Intensität und Beständigkeit daher, die weit über eine rein spielerische, intellektuelle Freude an diesen Zusammenhängen hinausweist. Anscheinend haben wir es bei der Vorstellung einer himmlischen Musik, als Klangschöpfung und/oder Sphärenmusik, mit einer anthropologischen Konstante zu tun. Man könnte versucht sein, den Ursprung dieser Veranlagung rein physiologisch, entwicklungspsychologisch zu erklären. Der Mensch kann hören, bevor er sieht; seine ganze embryonale Entwicklung vollzieht sich im Dunkeln, unter Wahrnehmung allerlei chaotischer Geräusche im Mutterleib, aber auch dumpf empfundener, strukturierter Klänge wie Sprache und Musik aus der Aussenwelt, sozusagen aus dem Jenseits der Lebenshöhle. Ist es die unbewusste Erinnerung an dieses klangliche Urparadies? Das wäre eine Deutung entlang der Denkschule Freuds, in welcher alle Dispositionen der unbewussten Psyche entweder körperlich bedingt (im „Es“) oder kulturell aufgepfropft sind (im „Über-Ich“).⁴⁹ Wer aber an der Autonomie und Irreduzibilität der menschlichen Psyche und des Geistigen überhaupt festhält, wird dieser profanen Erklärung nur eine Teilwahrheit zusprechen können.

Ein anderer Ansatz, der sich an der Tiefenpsychologie C. G. Jungs orientiert, versteht diesen „Attraktor“ oder *hot spot* rund um die himmlische Musik (wie wir in der Physik sagen würden) als Indikator für die Existenz eines entsprechenden Strukturelements der autonomen, „kollektiven“ unbewussten Psyche. Jung hat dafür den Namen *Archetypus* geprägt. Archetypen sind angeborene Faktoren, Anordner, die – selbst transzendent – jeweils in den spontanen Äusserungen der Seele ganz bestimmte Vorstellungen und Bilder zur Folge haben.⁵⁰ Klangschöpfung und Sphärenmusik würden somit eine archetypische Vorstellung konstituieren, die sich darin zeigt, dass offenbar schon die bloße Ansicht des gestirnten Himmels seit jeher entsprechende Mythen produziert, und heute eben, bei aller rational-wissenschaftlichen Durchdringung des Weltalls, sich auch der hartgesottendste Physiker von einer „himmlischen Musik“ angerührt gibt, sobald es der Vergleich zulässt. Wenn es irgendwo schwingt und singt im Weltall, oder sonstwie harmonikale Strukturen erscheinen, wird (in der Sprechweise der Jungianer) anscheinend der Archetypus der Sphärenmusik (oder wie man ihn nennen will) „konstelliert“ (aktiviert).⁵¹

Eine andere, etwas neutralere (wenn auch noch immer Jung-spezifische) Sprechweise benutzt hier den Begriff des *Symbols*. Ein Symbol (am ehesten mit *Sinnbild* übersetzbar) ist dabei mehr als nur ein Zeichen, das eine Sache repräsentiert; ein Symbol ist rational nicht auszuschöpfen, nicht weiter reduzierbar, emotional (oft religiös) aufgeladen und Sinn gebend. Symbole sind archetypisch motivierte Botschaften des Unbewussten. Sie wirken unbewusst auf uns und wir verwenden sie auch unbewusst.

⁴⁹ Hier wäre es wohl eine Mischung aus beidem: vorgeburtlich wahrgenommene, harmonische Klänge müssten bereits als Teil der kulturellen Prägung angesehen werden.

⁵⁰ Jung hat sich erst ganz spät, im entscheidend wichtigen Dialog mit dem Physiker Wolfgang Pauli, zur Ansicht durchgerungen, dass die Archetypen selbst transzendent sind, also nicht wirklich Strukturelemente des kollektiven Unbewussten bilden (wie gerade gesagt wurde), sondern einem psychophysich neutralen, transzendenten *unus mundus* angehören (s. C. G. Jung: *Theoretische Überlegungen zum Wesen des Psychischen*, 1954). Vorher sprach Jung im Zusammenhang mit den Archetypen oft von angeborenen „Instinkten“, was letztlich ebenfalls eine rein biologische Deutung zugelassen hätte.

⁵¹ Genau so sehe ich den Archetypus (bzw. das Symbol) des „Selbst“ aktiviert, wenn in der heutigen beobachtenden Kosmologie wieder die Kugelsymmetrie zurückkehrt (Abb. 17). Die ganze Analogisierung zwischen antik-mittelalterlichem Kosmos und dem heutigen Urknall-Modell, wie sie im *Primum Mobile* (Anm. 44) durchgeführt wurde, dreht sich um nichts anderes. Der vorliegende Essay kann als eine Art musikalische Ergänzung dazu aufgefasst werden.

Man kann sich ihrer aber auch bewusst werden und sie gezielt einsetzen. Klarerweise haben wir es in dieser Sichtweise bei der Klangschöpfung und Sphärenmusik, dort wo sie in der modernen Forschung wieder „anklingen“ (!), mit – zunächst unbewusster – Symbolik zu tun. Als Sonnenforscher oder Kosmologe stossen wir unversehens auf einen alten Mythos, ein altes Symbol, und der analytische Verstand wird augenblicklich überstrahlt von einer Art Freude und Begeisterung des Er-innerns (buchstäblich), und der Sinnfindung. Die Analogien zwischen griechischer Sphärenmusik und gewissen astrophysikalischen Prozessen sind eben mehr als Analogien, bzw. es schwingt bei aller oberflächlichen, mathematisch-physikalischen Entsprechung etwas mit, eine Qualität, eine Irrationalität, die uns besser von einer gemeinsamen psychologischen Symbolik sprechen lässt. In diesem Sinne ist die Frage dieses Kapitels durchaus zu bejahen: Wir begrüßen nichts weniger als eine *symbolische Wiederkehr* der Sphärenmusik!

Die Begriffe Analogie und Symbol lassen sich noch auf andere Weise miteinander verknüpfen, indem man sagt: Ein Symbol beruht auf einer Analogie zwischen Innenwelt und Aussenwelt – oder wie Pauli schreibt: ... *einem Zur-Deckung-Kommen von präexistenten inneren Bildern der menschlichen Psyche mit äusseren Objekten und ihrem Verhalten...*⁵² In unserem Fall würde das etwa bedeuten, dass die präexistente (archetypische) Vorstellung einer kosmischen Musik mit dem wissenschaftlichen Befund der oszillierenden Sonne oder der Obertonstruktur des Mikrowellenhintergrunds „zur Deckung kommt“ – und dann entsprechend auf uns *symbolisch wirkt*. Ein anderes Wort für dieses „Zur-Deckung-Kommen“, das noch besser passt, weil es den Prozess der daraus resultierenden „Rührung“ mit einschliesst, ist der akustische Begriff – Resonanz. Wenn etwas in der Aussenwelt symbolisch aufgeladen ist, das uns seelisch erregt, dann sind wir mit ihm auf irgendeine Weise „in Resonanz“; Resonanz aufgefasst als „akustische Analogie“, oder akustisch wirksame Analogie zwischen innen und aussen.

Wie immer man die symbolische Wirkung einer wissenschaftlichen Wiederbegegnung mit alten Weisheiten beschreibt, wichtig ist, dass man sie gebührend ernst nimmt und nicht nur spielerisch benutzt. Ernst nehmen heisst: sich der symbolischen Wirkung, die spontan und unbewusst geschieht, *bewusst* werden, und die *audiovisuelle, symbolische Qualität einer wissenschaftlichen Erkenntnis* – neben ihrer quantitativ-rationalen Erklärungsmacht – ins Bewusstsein integrieren. Die einseitig rationale Weltansicht der Moderne zu beklagen, ist eine Platitüde, die man nicht mehr hören mag. Aber leider gehen Probleme nicht weg, wenn man sie genügend oft benennt. Wer will bestreiten, dass uns der wissenschaftliche Ansatz aller Seelenbilder beraubt hat? Man gesteht ihnen freilich noch gerne eine Existenzberechtigung in der Welt der Kunst, Religion und Psychologie zu, sie liefern Stoff für geisteswissenschaftliche Dissertationen und deftige Theaterproduktionen. Aber aus Sicht des – gesellschaftlich dominanten – naturwissenschaftlich-technischen Weltverständnisses stellen sie eine Art seelische Notdurft dar, ohne die der Mensch dummerweise nicht leben kann, – ein Relikt des Stammhirns, das loszuwerden sich die Robotik bereits zum Ziel gesetzt hat. Dabei wird die unheilvolle Dissoziation zwischen den Grundbedürfnissen von Verstand und Seele, die im Kern die Zerrissenheit und Orientierungslosigkeit des modernen Menschen ausmacht, immer grösser, und die „Notdurft“ immer abwegiger und gefährlicher. Nun verfügt die Naturwissenschaft aber durchaus über eine „Vorratskammer seelischer Nahrung“, man muss sie nur recht nutzen. Damit ist nicht der alltägliche Einsatz des neuesten technischen Schnickschnacks im Dienst des Austauschs von Emotionen gemeint –

⁵² Pauli, Wolfgang: *Der Einfluss archetypischer Vorstellungen auf die Bildung naturwissenschaftlicher Theorien bei Kepler*, in: *Naturerklärung und Psyche* (mit C. G. Jung), Zürich 1952, S. 112, – ein Schlüsselwerk für unsere Thematik. Pauli bezieht sich in diesem Zitat nicht explizit auf Symbolik, sondern, ganz in Anlehnung an die Platonische *anamnesis* (Erinnerung), auf den Erkenntnisprozess. Für Pauli wie für Jung hat aber jede wichtige wissenschaftliche Theorie Symbolcharakter und ist archetypischen Ursprungs.

das wäre bloss wieder kompensatorisch – , sondern, wie bereits gesagt: die Fruchtbarmachung auch der bildhaften, symbolischen Seite jeder grundlegenden wissenschaftlichen Erkenntnis, – ihre Wertschätzung und Integration ins Bewusstsein, um sie gleichberechtigt neben die fachwissenschaftliche Bedeutung zu stellen; – um, kurz gesagt, am *gleichen* Gegenstand – Verstand *und* Seele zu nähren.

Hören wir nochmals Pauli in seiner Kepler-Untersuchung (Anm. 52):

[Es] erscheint uns heute nur ein solcher Standpunkt annehmbar, der beide Seiten der Wirklichkeit – das Quantitative und das Qualitative, das Physische und Psychische – als vereinbar anerkennt und einheitlich umfassen kann (S.163) [...] Diese Verknüpfung lässt sich nur erfassen durch Symbole, die sowohl die emotionale Gefühlsseite des Erlebens bildhaft ausdrücken, als auch in lebendiger Beziehung zum Gesamtwissen der Zeit und zum tatsächlichen Prozess der Erkenntnis stehen. (S.166)

Nicht alle wissenschaftlichen Ergebnisse und Begriffe besitzen eine solche Zweiwertigkeit, sind auf diese Weise symbolfähig. Pauli greift (darin natürlich Jung folgend) auf alchemistische Symbole zurück, die er allerorten in physikalischen Begriffen wiederfindet. Was Pauli noch nicht genügend bekannt sein konnte: In der Kosmologie haben wir mit dem Big Bang genau einen solchen, ganz zentralen Begriff mit einer Doppelfunktion, einen Fokus der Mikro- wie Makrophysik gleichermaßen, dessen mythische, symbolische Kraft auf der andern Seite unmittelbar einleuchtet und unbestritten ist. Der Big Bang ermöglicht die symbolische Wiederkehr der mythischen Welterschöpfung, und durch seine räumliche Abbildung auf die äusserste Sphäre (bedingt durch die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit, Abb. 17) ebenso die symbolische Wiederkehr des mittelalterlichen *Primum mobile*, des ersten Bewegten, das an den transzendenten Feuerhimmel grenzt und den ganzen Kosmos antreibt, – solcherart, dass sich der Vorstoss der Astronomen und Teilchenphysiker zum Big Bang *morphologisch* und *symbolisch* wie Dantes Pilgerreise zu Gott ausnimmt (bzw. ausnehmen könnte oder sollte, wenn man diese symbolische Schau zulässt, Anm. 44). So verstanden wäre das ein Stück integrative, Einheit und Sinn stiftende Forschung, die vollkommen mit allen wissenschaftlichen Fakten übereinstimmt, und dabei gleichzeitig – aktiviert durch die zu Grunde liegende Symbolik – unsere „kosmische Herzensunruhe“ stillt. – Und nun finden wir mit der Big Bang-Akustik eine „Vertonung“ dieser Symbolik, eine symbolische Wiederkehr sowohl der mythischen Klangschopfung wie der mythischen Sphärenmusik, die in den verschiedensten Himmelskörpern und astrophysikalischen Prozessen (Resonanzen im Sonnensystem, Asteroseismologie, Gravitationswellen, Stringtheorie) noch eine natürliche Verstärkung, ein Echo findet.

Vielleicht täten wir also gut daran, die Aufdeckung solcher symbolischen, integrativen Aspekte nicht bloss als angenehmes Nebenprodukt, sondern geradezu als wichtigste Aufgabe der naturwissenschaftlichen Forschung anzusehen⁵³, denn dadurch trägt die Naturwissenschaft zur Heilung der durch sie selbst verursachten, unseligen Gespaltenheit bei, mit welcher das typische „aufgeklärte“ Individuum und jede westliche Gesellschaft infiziert ist. Von Heilung zu reden, mag hoch gegriffen sein. In der Jung'schen Psychologie besteht der heilende Aspekt (der Weg der „Individuation“) darin, dass die archetypischen Inhalte des Unbewussten, wesentlich durch die Wahrnehmung spontan produzierter Symbolik z.B. in Träumen, ins Bewusstsein integriert werden. Und insofern wir es ebenfalls mit der Wahrnehmung und Bewusstmachung symbolischer, mythischer Aspekte (naturwissenschaftlicher Erkenntnisse) zu tun haben, geht es hier letztlich um etwas ganz Ähnliches.⁵⁴

⁵³ Was man freilich nicht so formulieren würde in einem Forschungsgesuch...

⁵⁴ Man braucht nicht der Lehre Jungs zu folgen, um die Forderung nach Integration der mythischen Aspekte der Naturwissenschaft nachvollziehen zu können. Eine andere Referenz wäre z.B. Jean Gebser, der in seinem Hauptwerk *Ursprung und Gegenwart* die Kulturgeschichte der Menschheit als Abfolge von Bewusstseinsstrukturen auffasst: der archaischen, magischen, mythischen, mentalen, und zukünftig integralen Struktur. Seit der Kopernikanischen Wende dominiere das mental-rationale Bewusstsein, das sich durch die bekannten negativen

Es bleibt das Problem des Ursprungs der kosmischen Klangsymbolik. Wenn die Spur in die tiefsten Seelengründe führt, dann muss man fragen: wer oder was hat sie dort hinein gelegt? Hier hilft uns möglicherweise eine alte (natürlich wieder mythisch motivierte) Auffassung weiter, die seit der Aufklärungszeit eher im Untergrund lebt, nun aber in den letzten zwanzig Jahren in der „Philosophie des Geistes“ wieder mächtig an Geltung gewonnen hat: eine Denkschule, die unter der Bezeichnung *Panpsychismus* läuft.⁵⁵ Ausgehend von der Grundthese, dass das phänomenale Bewusstsein des Menschen prinzipiell nicht physikalistisch reduzierbar ist, postuliert der Panpsychismus, dass alle Dinge eine mentale, oder proto-mentale Seite (sozusagen Rückseite) haben, – eine rudimentäre Seele besitzen. Mithin erlaubt der panpsychistische Ansatz, verkürzt gesagt, die Wiedereinführung des antiken (platonischen) Konzepts der Weltseele, der *anima mundi*, die im theologischen Diskurs der mittelalterlichen Scholastik verworfen wurde, als Geist und Seele ihren Sitz im Jenseits erhielten. Das griechische Konzept der Sphärenmusik war eng verknüpft mit dem Konzept der Weltseele; im Grunde war die Sphärenmusik nichts anderes als die *klingende Weltseele*. Auch dieser Aspekt ging verloren im Mittelalter: der *musica mundana* (Sphärenmusik) wurde die *musica coelestis* (Engelsmusik) übergestülpt⁵⁶, und nur letztere hat im Jenseits (bis heute) den kopernikanischen Umsturz überlebt. – Nun also könnte man zu einer vollen Rehabilitierung des Konzepts der klingenden Weltseele, der Sphärenmusik, und selbstverständlich auch der einmaligen Klangschöpfung schreiten – wozu uns die wissenschaftlichen Befunde der Big Bang-Akustik, der Gravitationswellen, der Sternbeben allen Anlass geben.

Zum Konzept der Weltseele gehört, dass sie die individuelle Menschenseele mit einschliesst, in sich einbettet, wodurch der Mensch einen direkten, geistigen (aussersinnlichen) Zugang zum Weltganzen hätte. Wenn Pythagoras die Sphärenmusik gehört haben soll, so war das immer in diesem Sinn gemeint: als geistige Wahrnehmung, als ein Hören mit dem geistigen, inneren Ohr. Für diese Art des Hörens braucht es kein Medium, keine Mittlerinstanz, wie Luft oder Raumzeit. So bedeutet die symbolische Wiederkehr der Sphärenmusik in panpsychistischer Sichtweise viel mehr als eine wiederkehrende Vorstellung mit „seelenwärmender“ Funktion. Die neu-alte Symbolik des kosmischen Klangs eröffnet dem mystisch Geneigten erneut die Möglichkeit einer geistigen Weltanhörung (*akróasis*) – um durch „geistige Resonanz“ mit der neu-alten Weltseele, mit dem Kosmos in *Einklang* zu kommen.⁵⁷

Einklang bedeutet nicht Gleichklang (man weiss um die Gefährlichkeit reiner Resonanzen). Wir sollten uns die Sirenen „anhören“ – und ihnen mit den Musen antworten; – Sphärenmusik in Musik verwandeln.

Eigenschaften und Einseitigkeiten auszeichnet (Gebser spricht von „Defizienz“). Bevor der Mensch zum „Sprung“ zu einer „höheren“ Bewusstseinsstufe ansetzen könne, müssten die früheren, jetzt unterdrückten Bewusstseinsstrukturen wieder konkretisiert werden. In unserem Fall würden Weltschöpfung und Primum mobile einen *mythischen* Aspekt, Klangschöpfung und Sphärenmusik einen *magischen* Aspekt zurück bringen.

⁵⁵ S. z.B.: Brüntrup, Godehard: *Das Leib-Seele-Problem*, 3. Auflage, Stuttgart 2008, Kap. 8: Geiststaub – ein alternatives Bild der Materie; Müller, T., Watzke, H. (Hrsg.): *Ein Universum voller „Geiststaub“? Der Panpsychismus in der aktuellen Geist-Gehirn-Debatte*, Paderborn 2011; Skrbina, David: *Panpsychism in the West*, Cambridge Mass. 2005

⁵⁶ Siehe Schavernoeh, S. 89ff, Zipp, S. 47ff (Anm. 3).

⁵⁷ Der Begriff der Resonanz ist inzwischen auch in der Soziologie angekommen: Rosa, Hartmut: *Resonanz. Eine Soziologie der Weltbeziehung*, Frankfurt a.M. 2016. Rosa diagnostiziert die Zerrissenheit und Hektik unserer Zivilisation als Mangel an (Sinn stiftenden) Resonanzbeziehungen auf allen Ebenen, letztlich auch auf der Ebene des (spirituellen) Weltbilds.