

Wie es ist, den Boden unter den Füßen zu verlieren

Rainer Gruber, Kunstpavillon München, 3.6.17

im Rahmen der Ausstellung

Swinging Stars,

Maria & Neda Ploskow

The Sound and Icon Machine

(ART = Allgemeine Relativitätstheorie, SRT = spezielle Relativitätstheorie,
QM = Quantenmechanik, e.m. WW = elektromagnetische Wechselwirkung)

Ich möchte mit Ihnen über drei Aspekte des Themas „Wie es ist, den Boden unter den Füßen zu verlieren“ sprechen:

1. wie wir überhaupt Boden unter die Füße bekommen haben
2. wie die moderne Physik uns den (klassischen) Boden unter den Füßen wegzieht
3. wie die moderne Physik ihren eigenen Boden unterminiert und sich dabei mit der Philosophie trifft

Es wird um Physik gehen. Sie überleben am besten, wenn Sie das Erzählte wie ein Märchen ansehen. Beim Märchen müssen Sie auch nicht alles verstehen. Und später werden Sie vielleicht verstanden haben, was es mit dem Märchenhaften der Physik auf sich hat.

1. Wie wir Boden unter die Füße bekommen haben

Wo fangen wir an, wenn es darum geht, Boden unter die Füße zu bekommen. Natürlich bei der Mutter aller Anfänge, beim **Urknall**.

Die RaumZeit selbst nimmt hier ihren Anfang, und: sie explodiert. Es sind nicht die Dinge im Raum, die explodieren, sondern die Raumzeit selbst dehnt sich aus, wohlgemerkt, nicht nur der Raum, auch die Zeit dehnt sich aus.

Die Rede vom Urknall ist nichts als eine narrative Vergegenwärtigung einer singulären Stelle in der Allgemeinen Relativitätstheorie. Ein Narrativ ist eine vorgegebene Erzählstruktur, die dem Erzähler weitgehend unbewußt ist. Wir benutzen wie selbstverständlich das Newtonsche Bild der Bühne, auf der wir die Mitspieler versammeln, die Materie. Wir benutzen auch wie selbstverständlich das Bild eines zeitlichen Ablaufs: das, was sich abspielt, erzählen wir als zeitliche Geschichte.

Im späteren Verlauf werden wir sehen, daß Materie und Raumzeit sich wechselseitig bedingen. Aber jetzt, am Anfang, reden wir von der Materie als Mitspielern auf der Bühne der Raumzeit.

Typologisch sind diese **Mitspieler** ein kleines verwegenes Häuflein. Es besteht aus drei Gruppen.

Da sind einmal die **Quarks**, merkwürdige Gesellen. Als singuläre Existenz blitzen sie nur kurz zu Beginn des Universums auf, solange es noch richtig heiß ist. Bereits 1/100 sec nach dem Urknall stürzen sie sich in eine enge Dreierbeziehung, die aufzubrechen wir nicht in der Lage sind. Die Physik nennt das deshalb eine starke Wechselwirkung. Das Ergebnis sind die

Neutronen und die Protonen, die die Atomkerne bilden. In diesem Szenario hat jedes der Neutronen und Protonen in unserem Körper als Augenzeuge des Urknalls die gesamte weitere Entwicklung des Universums miterlebt, bevor es im dynamischen Fließgleichgewicht unserer Körperzellen einen kleinen Verweilpunkt gefunden hat.

Daneben gibt es als zweite Gruppe die **Leptonen**, das Elektron und das Neutrino. Sie bilden ein sehr ungleiches Paar: das Neutrino hat nahezu keine Masse und nahezu keine Wechselwirkung mit anderen Teilchen. Ein unendlicher Strom von Neutrinos fließt in jedem - und auch in diesem Moment - nahezu ungehindert durch die Erde und durch uns hindurch. Die Elektronen drängeln sich in unseren Stromleitern. Sie sind wie eine Kobra. Halten wir den Finger hin, ist ihr Biss tödlich. Gleichzeitig sind sie es, die die elektrischen Ladungen bereit stellen, die unsere Zellen zusammen halten. Sie treten mit allem, was elektrische Ladung hat, in sofortige ungenierte Wechselwirkung. Alle Zellen unseres Körpers, seine ganze Stabilität und seine Lebendigkeit beruhen auf dieser ungezügelter Promiskuität der elektromagnetischen Wechselwirkung.

Trotz ihrer Ungleichheit betrachten sich jedoch Elektronen und Neutrinos als je unverbrüchliches Paar. Sie beide als Paar sind es, die die wechselseitige Umwandlung von Neutronen und Protonen ineinander besorgen, indem sie Kontakt mit den Quarks im Inneren der Protonen und Neutronen aufnehmen. Die Physiker nennen das die schwache Wechselwirkung.

Das Merkwürdige ist, daß die Paarstruktur der Leptonen sich in einer Paarstruktur der Quarks, die doch so auf Dreierbeziehungen abonniert sind, spiegelt. Wir, die wir an unsere eigene Lebenswelt gebunden sind, nennen diese Paare up- und down-Quarks, was sich am Oben und Unten der Newtonschen Gravitation auf der Erde orientiert - eine sehr schöne Nebensächlichkeit.

Und dann gibt es eine dritte Kategorie Mitspieler, die **Bosonen**. Sie sind es, die die Wechselwirkungen vermitteln, Botengänger, mit deren Hilfe sich die Leptonen und Quarks austauschen: die Gluonen vermitteln die starke WW, die Vektorbosonen die schwache Wechselwirkung, mit deren Hilfe Neutronen in Protonen zerfallen können - und die e.m. WW, die alles in unserem Leben bestimmt - was wir sehen und daß wir sehen; daß wir spüren, und was wir spüren und daß wir es als Gedanken fassen können - diese Wechselwirkung wird durch Photonen vermittelt.

So haben wir nun diese farbenfrohe Truppe zusammen, und jeder Regisseur könnte bersten vor Aufregung, was sich mit diesem Ensemble alles anstellen läßt. Aber es kommt erstmal ziemlich anders.

Zunächst ist die Bühne sehr, sehr heiß, Die Materie existiert als ein heißes Plasma, alles wirbelt wild durcheinander. Jedes negativ geladene Elektron, das sich ein positiv geladenes Proton unter den Nagel reißen will, wird sofort wieder abgesprengt. Nichts gibt es zu sehen, weil kein Lichtquant in diesem Hexenkessel die Zeit hat, an einem stabilen Bild mitzuwirken.

Aber: **das Universum dehnt sich aus.** Wir kennen das Prinzip des Kühlschranks: alles, was sich ausdehnt, kühlt ab. Das Universum kühlt ab. Die Regie wird nun von der abnehmenden Temperatur übernommen.

1/100 sec nach dem Urknall haben sich bereits die Quarks als Neutronen und Protonen verkapselt und kommen nicht mehr zum Vorschein.

Eine Minute nach dem Urknall beginnen sich Neutronen und Protonen zusammen zu tun und bilden die einfachsten Atome: Deuterium, Helium, später Spuren von Lithium. Nach 3 min ist dieser Akt bereits zu Ende.

Irgendwann in diesem Prozess der Abkühlung finden sich schließlich Elektronen und Protonen und bilden neutrale Wasserstoffatome. Die Welt wird mit einem Schlag durchsichtig, weil die Photonen diese Wasserstoffatome nicht sehen können. Das ist der Grund, weshalb Photonen aus dieser frühen Anfangszeit die Möglichkeit haben, 13 Mrd. Jahre später in unseren Detektoren aufzutauchen.

Eine unvermutete Einöde breitet sich aus. Die Quarks: verschwunden. Die Agenten der e.m. Wechselwirkung neutralisiert in Wasserstoff-, Helium- oder Lithium-Atomen. Ein trostloses Plasma aus Wasserstoff, Helium, Lithium, Photonen und Neutrinos dehnt sich lautlos aus, scheinbar für alle Zeiten gefangen in der Expansion des Universums, dessen Metrik an jedem Raumzeitpunkt in alle Richtungen, auch die der Zeit, expandiert..

Aber: es gibt da ein kleines gallisches Dorf : die **Gravitation**. Sie wirkt über die Masse. Massen ziehen sich gegenseitig an. Gleiches fühlt sich zu gleichem hingezogen. Alle Mitspieler außer den Photonen haben Masse.

Die Gravitation ist zwar 10^{35} mal schwächer als die schwache Wechselwirkung, aber sie hat einen Trick: sie wirkt umso stärker, je mehr Masse schon vorhanden ist. Gravitation **klumpt**. Wo schon Masse vorhanden ist, kommt noch mehr Masse hinzu. Es ist das so etwa wie mit dem Geld.

Diese Wechselwirkung bildet die unerläßliche Grundlage, auf der sich der Reichtum der Welt entfalten konnte. Aber wie! über Katastrophen!

Kleine Unregelmäßigkeiten in der Einöde des frühen Universums bilden die Zentralisationspunkte, um die herum die Materie zu klumpen anfängt. Wasserstoffwolken, die einander anziehen, aufeinander zufallen und schließlich in ihr eigenes Zentrum stürzen, mit einer letztendlich gigantischen Wucht: je näher die Massen sich kommen, desto größer die Anziehung, und je mehr Masse schon vor einer her stürzt, desto stärker die Anziehung: ein gigantischer Sturz in das je eigene Zentrum.

Die gesamte Astrophysik läßt sich als die eine Frage formulieren: **was sind die Haltepunkte des Sturzes?**

Und nun rollen wir den Ariadne Faden wieder rückwärts auf. Alles was sich ausdehnt, kühlt ab - das Prinzip des Kühlschranks - heißt nun umgekehrt: alles was sich zusammenzieht, heizt sich auf. Das Prinzip der Luftpumpe, die warm wird beim Pressen. Im Zentrum der Zusammenballungen wird es heiß: so heiß, daß Protonen - trotz der Abstoßung ihrer gleichnamigen elektrostatischen Ladung - so nah zueinander gelangen können, daß ihre Quarks, diese Schläfer der Elementarteilchen, von innen aktiv werden und die Protonen und Neutronen mit ihrer starken Wechselwirkung aneinander ketten. Die Physik nennt es Kernfusion: eine ungeheure Energie wird freigesetzt. Ein Brennen, beginnt, in dessen Verlauf aus den Protonen und Neutronen wie aus Legobausteinen die gesamte Palette der Atome bis zum Eisen zusammengeschmiedet wird: Wasserstoff zu Helium, Helium zu Kohlenstoff, Kohlenstoff zu Sauerstoff, Sauerstoff zu Silizium, Silizium zu Eisen, ein Feuerwerk der Lego-Kreativität.

Das funktioniert, weil bei diesen Prozessen die Masse des neu erzeugten Kerns kleiner ist als die Summe der Massen seiner Teile. Der Rest wird zu Energie.

Das wird der **erste Haltepunkt** des Sturzes: die Materie stürzt, aber ihr entgegen stemmt sich die Energieflut eines Infernos. Irgendwann kommen beide Bewegungen in ein gegenseitiges

Gleichgewicht: eine Sonne ist entstanden, ein riesiger leuchtender Gasball, der seinen Wasserstoffvorrat verbrennt und was sonst noch an Fusionsmöglichkeit sich anbietet. Ein Ende des Gleichgewichts wird erreicht, wenn der Brennstoff verbraucht ist. Dann setzt erneut der Sturz ein.

Was nun passiert hängt davon ab, wieviel Materie sich bereits in diesem Stern zusammengeballt hat. Bei unserer Sonne werden es ausgerechnet die kleinsten Mitspieler, die Elektronen, sein, die den nächsten Haltepunkt erzwingen. Elektronen lassen sich laut den Gesetzen der Quantenmechanik nicht beliebig zusammenquetschen. Ein **weißer Zwerg** entsteht, die Masse der Sonne wird auf eine Kugel von etwa einem bis zweieinhalbfachen Erdradius zusammengequetscht. Damit ist Ruh an diesem Entwicklungspunkt! Ein abkühlender Gesteinsbrocken wird zurück bleiben.

Ist die Masse des Sterns dagegen größer als 8-12 Sonnenmassen, dann verschmelzen unter dem Gewicht dieser Masse die Protonen mit den Elektronen zu Neutronen. Die Neutronen übernehmen nun die Rolle der Elektronen, auch sie wollen sich partout nicht weiter quetschen lassen. Ein **Neutronenstern** resultiert, so dichtgepackt, Neutron an Neutron, daß in einer Kugel vom Durchmesser von 10-20 km die Masse von bis zu 3 Sonnen konzentriert ist.

Ist die Masse des Sterns dagegen so groß, daß der resultierende Neutronenstern mehr als 3 Sonnenmassen besitzen würde, so versagt auch die Barriere der Neutronen. Ein **Schwarzes Loch** entsteht - ein anderer Name für den nun unendlichen Sturz – ein **unendlicher Sturz ins Endliche**.

Ich möchte mich nicht mit dem Schwarzen Loch aufhalten. Nur so viel: es ist das einzige Objekt der Physik, das einen klar definierten Rand besitzt. An diesem Rand wandelt sich Raum in Zeit und Zeit in Raum. Für uns im Moment aber das Wichtigste: dieses Objekt besteht aus Nichts als unserem Konzept von Raum und Zeit.

Die Geschichte, die ich Ihnen erzählt habe, erweckt den gegenteiligen Eindruck: als bestünde es aus Nichts als Materie. In der mathematischen Formulierung der ART jedoch entsteht die Struktur und Existenz des schwarzen Loches als eine Struktur der Raumzeit. Wenn wir uns vor Augen halten, daß die ART die gegenseitige Bedingtheit von Raumzeit und Materie zum Inhalt hat, so ist das kein Widerspruch.

Wir erinnern uns an den Urknall, als wir unsere Objekte, die Elementarteilchen, der Raumzeit hinzufügten, als etwas ihr Fremdes. Hier begegnet uns erstmals eine andere Auffassung. Das Schwarze Loch entsteht als eine spezifische Struktur der Raumzeit.

Wo aber - in dieser ganzen Geschichte des Sturzes - ist der Boden abgeblieben, das Objekt unseres Begehrens ?

Lassen Sie uns einen Schritt zurück gehen: Das Ende eines Sternes wird in aller Regel eine **Supernova**-Explosion verursachen. Der Aufprall der äußeren Schichten auf den inneren harten Kern wird – wie in der Badewanne - einen Rückstoß verursachen, der die äußere Hülle des Sterns wegsprengt und als Supernova-Explosion im umliegenden Weltraum verteilt, mitsamt all den bereits erzeugten Mengen von schweren Elementen bis zum Eisen. In dieser Supernova-Explosion ist die Energie so hoch, daß auch Elemente jenseits des Eisens erzeugt werden. Wenn Sie also Gold im Mund haben, so können Sie sicher sein, daß dieses Gold in der Alchemie einer Supernova erzeugt worden ist.

Dieser Goldstaub der Supernova Explosion verteilt sich im Weltraum und nun wiederholt sich das Spiel: ein neuer Stern wird geboren, z.B. unsere Sonne, mit Sicherheit 2. Generation, weil wir Gold im Mund haben. Und nun kommt die Vorstellung Newtons zum Tragen: die Gravitation kennt nicht nur die Bewegungsfigur des Sturzes, sie kennt auch stabile Bahnen von Planeten. Irgendwo als seitliche Arabeske einer Galaxie hat sich ein kleiner vergleichsweise ruhiger Fleck im Sturm, die Sonne, gebildet, mit einer Gruppe von Followern im Schlepptau, mittendrin ein kleiner Balkon, die **Erde**, und auf ihr ein fester Boden, ein Zuhause: der kleine Ort **Lenzkirch im Hochschwarzwald**.

Die Kühe stehen auf der Wiese, Apfelbäume blühen, der Heuwagen fährt abends auf der ungeteerten Staße vorbei, mit den jungen Frauen und Burschen des Dorfes oben auf dem Heu, sodaß sie neugierig in die Wohnung im 2. Stock blicken können. Der kleine Junge sitzt auf der Wiese am geschützten Teich, onaniert ein bisschen und weiß nichts davon, ob die Zeit still steht oder vergeht. Boden unter den Füßen hat etwas mit Heimat zu tun.

Als Flüchtlingskind begreift er aber auch, daß der Boden unter den Füßen eine andere Färbung hat, wenn einem etwas gehört. Das **Exklusionsprinzip** des Eigentums, das „mein und nicht dein“, ist die kleine verletzende Schramme in der Kinderseele. Alle haben etwas, wir haben nichts. Katholische Kinder kommen in den Himmel, evangelische in die Hölle.

In der Schule lernt er dieses Exklusionsprinzip als machtvolles Prinzip einer festgefügteten Logik kennen. Ja oder Nein, tertium non datur, immer mit einem kleinen: basta! In der Hinterhand. Logik schafft Sicherheit: was ich schwarz auf weiß habe, das ist, was nicht ist, das ist nicht. Die Dinge haben eine Existenz im Raum. Raum ist zeitlos. Jetzt ist überall jetzt. Die Zeit ist universal. Und indem sie läuft, können wir sie messen. Zahlen geben Halt.

Boden ist sichtlich nicht gleich Boden. Boden unter den Füßen als Moment des Eingebettetseins in einem Zuhause mit seinen Lieben verflüchtigt sich. Der Boden wird abstrakt, eine angestrebte Gewißheit im Kopf.

Die klassische Physik bietet der Gewißheit ein starkes Zuhause. Wissenschaft schafft Technik. Wissenschaft heißt, eine Frage so zu stellen, daß sie mit Ja oder Nein beantwortet werden kann. Die Scheidung des Ja oder Nein als Sockel von Wissenschaftlichkeit erscheint nun logisch.

Mit der modernen Physik wird das anders. Was ich an der Physik so schätze ist ihr Vermögen, die eigenen Voraussetzungen zu unterminieren. Das wollen wir uns im 2. Abschnitt ansehen.

II

2. Wie die moderne Physik uns den (klassischen) Boden unter den Füßen wegzieht

Zu einem festen Boden gehört ein festes Haus. Ein Haus ist stabil, wenn seine Wände nicht schief sind und sein Boden gerade ist. Diejenigen unter uns, die auf dem Gymnasium waren, wissen, wie das gemacht wird: es braucht parallele Wände, die senkrecht auf dem Boden stehen. Ein rechter Winkel und Parallelen, das ist euklidische Geometrie.

Diejenigen unter uns, die nicht auf dem Gymnasium waren, wissen auch, wie das geht. Zwei Lote runterhängen lassen, das sind Parallelen. Und einen Estrich leicht flüssig anrühren, der richtet sich aus wie eine waagerechte Wasseroberfläche. Das ergibt den Boden, auf dem die an den Loten ausgerichteten - Wände senkrecht nach oben stehen. Das Lot definiert uns, wo **oben** ist.

Sehen wir uns die beiden Lote allerdings aus größerem Abstand an, dann zeigt sich, daß sie garnicht parallel sind. Sie treffen sich im Erdmittelpunkt. Jedes Lot definiert, was „oben“ ist. Nehmen wir die Lote in München oder London oder Beijing, dann sehen wir die verschiedenen „Oben“ wie die Stacheln eines Igel in allen Richtungen aus der Erdkugel heraus starren. Es gibt kein gemeinsames Oben. Das betrifft nicht nur weit auseinander liegende Orte wie Beijing, München und London. Jede von uns hier im Raum hat ihr je eigenes Oben.

Auch der durch eine Wasserfläche definierte Boden des Hauses ist garnicht eben: schauen wir aus einigem Abstand, so sehen wir: er hat dieselbe Krümmung wie die Ozeane. Das, was wir in unserem Kopf als eine Ebene oder eine Gerade konstruieren, ist in der Realität eine gekrümmte Linie.

Wie hängen diese unsere verschiedenen Oben miteinander zusammen? Die vom Gymnasium kommen – dazu gehöre auch ich - drängeln sich, sie wissen, wie man das berechnen kann: die Erde ist eine Kugel und die Richtung nach oben zeigt immer in Richtung des Radius an der betreffenden Stelle der Erdoberfläche.

Das Problem ist sofort: die Erde ist abgeplattet, mit Wülsten am Äquator. Und sie hat eine unregelmäßige Zusammensetzung. Wir müssen der Realität ins Auge sehen: unsere Beschreibung des Raumes hängt nicht von der Geometrie, sondern von der Gravitation ab!

Wir sind damit bereits bei einer der wichtigsten Einsichten der **allgemeinen Relativitätstheorie** angelangt. Sie formuliert es nur etwas radikaler: der metrische Tensor, mit dem wir den Raum beschreiben, sobald wir ihm eine vermessbare Form geben wollen, ist identisch mit dem Gravitationsfeld, das unsere Schwerkraft bestimmt. Materie und Raum sind nicht geschieden, sie bedingen sich wechselseitig über das sog. gravito-inertiale Feld.

Dafür, daß das Haus stabil wird, sorgt die Ausrichtung der Praktiker an der Schwerkraft. Die euklidische Geometrie ist eine abstrakte und nur manchmal hilfreiche Konstruktion im Kopf. Es ist aber nicht hilfreich, sie mit der Realität zu verwechseln.

Die Beispiele zeigen uns eine wichtige Forderung der ART: den Übergang zu notwendig **gekrümmten** Räumen. Soweit macht das gar keine so große Schwierigkeit. Es bereitet – wie Sie gesehen haben – kein großes Problem, die Kernidee der ART anschaulich zu formulieren. Das Problem für uns kommt, sobald wir die **Zeit** einbeziehen!

Unter dem Einfluß der Materie hat jede von uns ihr eigenes Oben, d.h. ihr eigenes räumliches Koordinatensystem. Frage: **Hat jede von uns auch ihre je eigene Zeit?** Die SRT bejaht das. Sie belehrt uns:

Jedes bewegte Objekt hat seine Eigenzeit, die umso langsamer abläuft, je schneller sich ein Objekt bewegt. Wenn ich mit dem Zug nach Hamburg fahre und wieder zurück komme zu meinen Freunden, dann bin ich ein bisschen weniger gealtert als sie. Wir bleiben jünger, wenn wir uns bewegen.

Für Apologeten einer zukünftigen Technik des Jüngerwerdens hält das **Zwillingsparadoxon** eine herbe Lektion bereit: Nehmen wir zwei Zwillinge, beide 20, sie fliegt mit sehr hoher Geschwindigkeit nahe Lichtgeschwindigkeit in den Weltraum, besucht eine ferne Galaxie und kehrt nach 2 Jahren ihrer Zeit zurück. Sie findet ihren Zwillingsbruder um z.B. 60 Jahre gealtert vor. Aber nicht nur der ist gealtert. Auch der technische Fortschritt ist in diesen 60 Jahren explodiert. Das heißt: sie, die bei ihrem Abflug als die modernste Frau galt und die jung geblieben ist, ist nun hoffnungslos veraltet und kennt sich in der Welt, in die sie zurückkehrt, nicht mehr aus. Das Jungbleiben hat für diese junge Frau verheerende Konsequenzen.

Warum haben wir solche Schwierigkeiten, uns das vorzustellen? In unserem Kopf – und das heißt: in unserem europäischen Kopf, soweit er auf die Messbarkeit seiner Objekte ausgerichtet ist – begreifen wir Raum und Zeit als **geschieden**.

Das hat eine zweifache Konsequenz: zum einen wird der Raum zur **zeitlosen Geometrie**. Es ist die Euklidische Geometrie, die wir nun vor uns haben. Ihre Existenz enthält ein Moment von Ewigkeit und von zeitloser Schönheit, schön, weil zeitlos.

Umgekehrt wird die Zeit, da an keinen Ort gebunden, notwendig zu einer **universalen Zeit**. Das ergibt eine pikante kolonialistische Schräglage. Wenn die Zeit universal ist, dann muß sie in China dieselbe sein wie bei uns. Wenn die Menschen in China aber eine andere Zeitvorstellung haben – und die haben sie – dann kann das nur eine rudimentäre Vorstellung von Wirklichkeit sein, denn wir wissen ja, wie sich das in Wirklichkeit verhält.

Das Konstrukt einer universalen, vom Raum geschiedenen Zeit vermittelt vor allem ein Gefühl von Gleichzeitigkeit. Wir stellen uns vor, daß im ganzen Universum etwas gleichzeitig passiert. Diese Gleichzeitigkeit aber ist ein Phantasma, es gibt sie nicht. Die SRT hat die vor allem in Europa übliche Scheidung von Raum und Zeit aufgehoben. Das macht uns Schwierigkeiten.

Die **ART** verschärft das Problem. Sie stellt fest, daß das Ablaufen der Zeit nicht nur von der Geschwindigkeit abhängt, mit der wir uns bewegen, sondern auch von der Materie, die uns umgibt. In der ART hat die Aufkündigung der Scheidung von Raum und Zeit – weil sie mit der gleichzeitigen Aufkündigung der Scheidung der Materie von der Raumzeit verbunden ist - drastische Konsequenzen.

Weit jenseits des Bildes vom zeitlosen räumlichen Firmament erhält das Universum jetzt selbst eine **Genese**. Die Vorstellung eines Beginns der Raumzeit in einem Urknall wird denkbar. Die Metrik der Raumzeit explodiert und führt in einer ausgedehnten Expansion die Materie mit sich.

Die Materie - seit nunmehr zwei Dekaden flankiert von der neu entdeckten dunklen Materie – bestimmt die Krümmung der Raumzeit. Die Krümmung ihrerseits bestimmt die Bewegung der Materie. So bedingen sie sich wechselseitig.

Aus den Gleichungen, die die wechselseitige Bedingtheit von Materie und Raumzeit formulieren, folgt notwendig die Existenz von schwarzen Löchern, Objekten, die aus nichts bestehen als unserer Konzeption von Raum und Zeit, mit einer Masse und einem Spin als

freiem Parameter. Anfangs als Bestandteil eines Kuriositätenkabinetts in der Tiefe einer Bibliothek gelandet, gilt die materielle Existenz dieser schwarzen Löcher heute als durch eine Fülle von Beobachtungsdaten abgesichert.

Dasselbe gilt für das sog. Standardmodell der Kosmologie, dessen Aussagen durch Beobachtungen aus einer Vielzahl von Epochen und Himmelsrichtungen des Universums und an einer Fülle von qualitativ verschiedenen Objekten wie Galaxiencluster, Supernovae oder die kosmische Hintergrundstrahlung gestützt werden.

Kommen wir zurück zum Ausgangspunkt:

Scheidung heißt: es ist entweder so oder so, tertium non datur. Dieses Postulat, das zum sakrosankten Axiom einer Logik geronnen ist, wurde nicht nur von spezieller und allgemeiner Relativitätstheorie erfolgreich in Frage gestellt. Es ist die **Quantenmechanik**, die den unverhülltesten Angriff auf das **Tertium non datur** der klassischen Logik führt..

Frage ich ein Elektron: bist du ein Teilchen, so antwortet es selbstbewußt: ja, ich bin ein Teilchen und zwar habe ich die und die Masse.

Frage ich dasselbe Elektron: bist du eine Welle, so antwortet es: ja, ich bin eine Welle und zwar habe ich die und die Wellenlänge.

In unserem europäisch aufgewachsenen, durch sich ausschließende Kategorien geprägten Kopf sind die beiden Bestimmungen unvereinbar. Ein Teilchen läßt sich an einem Ort lokalisieren. Eine Welle läßt sich gerade nicht lokalisieren, wie die entsprechende Handbewegung zeigt..

Jede der beiden Antworten ist wahr, jede vermittelt aber nur die Hälfte der Wahrheit. Wellencharakter und Teilchencharakter von Objekten bedingen sich wechselseitig. Ich kann keines ohne das Andere erhalten.

Der Begriff der **Wissenschaftlichkeit** der klassischen Physik befindet sich in einer Falle. Als wissenschaftlich gilt eine Theorie dann, wenn sie ihre Fragen mit Ja oder Nein zu beantworten erlaubt. Und auch ein Experiment - der Dreh- und Angelpunkt der Physik - gilt dann als wissenschaftlich, wenn es so konzipiert ist, daß es erlaubt, die gestellte Frage mit Ja oder Nein zu beantworten. Das bedeutet, sich systematisch mit jeweils einer halben Antwort zu begnügen. Das Fatale dabei: in diesem Prinzip der Amputation stützen sich Experiment und Theorie wechselseitig.

Wenn wir den Einsichten der Quantenmechanik folgen, dann wird die Vorstellung eines Objektes, das durch seine Eigenschaften definiert ist, obsolet. Den Objekten der QM können keine bestimmten Eigenschaften mehr zugeordnet werden. Ob ihnen eine konkrete Eigenschaft zukommt oder nicht, wird erst im Augenblick der Messung durch die Zielsetzung des Experiments festgelegt. Wenn ich hier von Objekten spreche, dann sind damit die Neutronen, Protonen und Elektronen gemeint, die ich in das Narrativ vom Aufbau des Universums hineingemischt habe. Die Grundlage einer **Ontologie** steht in Frage.

Wie reimt sich das alles zusammen? **Ist die moderne Physik die Überbringerin einer neuen Wahrheit?**

Ich möchte zur Untersuchung dieser Frage bei den Erfolgen der modernen Physik ansetzen. Alle ihre Aussagen sind außerordentlich gut belegt, experimentell oder durch Beobachtung. Was **hellhörig** werden läßt ist der Umstand, daß in den letzten 5 Jahrzehnten die Fähigkeit der Physik zur Vorhersage außerordentlich gestiegen ist. Lassen Sie uns dieses Phänomen der Vorhersagbarkeit in einem 3. Abschnitt genauer unter die Lupe nehmen.

III

3. Wie die moderne Physik ihren eigenen Boden unterminiert - und sich dabei mit der Philosophie trifft

1963 war ich im Rahmen einer Diplomarbeit mit der Berechnung der 4. Näherung des anomalen magnetischen Moments des μ -Mesons beschäftigt. Was ist das denn! werden Sie fragen. Ganz richtig!

Da existiert in diesem unendlich großen, unendlich leeren Universum, keiner weiß warum, eine Teilchenart, das μ -Meson. Und dieses Teilchen hat nicht nur ein magnetisches Moment, mit dem es auf Magnetfelder reagiert, es hat – wie Messungen beweisen - ein **anomales magnetisches Moment**.

Und nun kommt meine Bestürzung: da kann sich Rainer Gruber, ich, an einen Schreibtisch setzen - nur mit Papier, Bleistift und Razifummel bewaffnet – und dieses anomale magnetische Moment berechnen. Und die Messungen bestätigen den berechneten Wert. Wie ist das möglich!

Mir fiel, so habe ich es damals meinen Freunden beschrieben, die Kinnlade herunter. Wie ist es möglich, daß die Physik in der Lage ist, von irgendeinem, merkwürdigen, in diesem merkwürdigen Universum existierenden fucking Teilchen eine Eigenschaft zu berechnen, und das Experiment zeigt, daß der berechnete Wert stimmt? Die Genauigkeit sowohl der Rechnung als auch des Experiments wurden später auf 11 Stellen hinter dem Komma erhöht, mit demselben Ergebnis. 11 mal eine Erhöhung der Genauigkeit um jeweils einen Faktor 10, - eine ungeheure Anstrengung, für Theoretiker als auch für Experimentatoren – und immer diese bestürzende Übereinstimmung des Experiments mit der Vorhersage der Theorie!

Später stieß ich auf eine Arbeit, die 3 Jahre zuvor, 1960, in dem Jahr als ich zu studieren anfang, ein berühmter Mathematiker, Eugene Wigner, verfasst hatte, der dieses Erstaunen thematisierte unter dem schönen Titel: „The unreasonable effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences“ (die unvernünftige, d.h. nicht vernünftig erklärbare Effektivität der Mathematik in den Naturwissenschaften).

Tatsächlich sind die letzten 50 Jahre in der Elementarteilchen-Physik geprägt von einer erstaunlichen Umkehrung. Nicht mehr machen überwiegend Experimentalphysiker Experimente, die die Theoretiker zu erklären suchen. Zusehends machen die Theoretiker Voraussagen und die Experimentalphysiker machen sich auf die Suche - und wir haben uns bereits daran gewöhnt, daß sie finden, was vorhergesagt wurde. Das betrifft die Vorhersage der Existenz von Teilchen, wie der Vektor-Bosonen in der schwachen Wechselwirkung oder des top-Quarks oder des Higgs-Teilchens. Und es betrifft den Sachverhalt, daß sich die experimentell vorgefundenen Elementarteilchen just so gruppieren, wie es dem Darstellungsschema abstrakter mathematischer Symmetrien entspricht.

Seit 50 Jahren grundiert das Erstaunen über „the **unreasonable effectiveness of reason**“, wie ich es später genannt habe, meine Beschäftigung mit Physik. Wie kann das sein?

Heute meine ich zu wissen, warum das so ist.

Die beiden Schlüssel, über die ich mit Ihnen reden möchte, finden sich im eng begrenzten Zeitraum eines Vierteljahrhunderts, der 25 Jahre von **1913**, dem Jahr vor Beginn des 1.

Weltkriegs, und **1938**, dem Jahr vor dem Beginn des 2. Weltkriegs. Zwei Namen, **Élie Cartan**, ein damals (und übrigens heute noch) bekannter Mathematiker und Sir **Arthur Eddington**, ein berühmter Physiker, der für seine Verdienste geadelt wurde, sind auf diese Schlüssel zur Lösung unseres Rätsels gestoßen.

1913, im Jahr vor Beginn des Infernos des 1. Weltkriegs, entdeckt Cartan Spinoren, merkwürdige Gebilde, die mathematisch den flachen Raum charakterisieren. Zwei Jahre später, **1915** stellt Einstein die Allgemeine Relativitätstheorie fertig - Einstein, ein glühender Pazifist – in einem Klima der Kriegsbegeisterung in Berlin einquartiert in den Räumen des Chemikers Fritz Haber, der in diesem Jahr persönlich den Einsatz des von ihm entwickelten Giftgases in Ypern leitet.

8 Jahre später, **1923**, veröffentlicht Arthur Eddington - 1919 Leiter der berühmten Expedition, die die Ergebnisse der ART spektakulär unter Beweis stellte und damit eine weltweite Welle der Euphorie auslöste – veröffentlicht Eddington sein Buch: **Mathematical Analysis of General Relativity**; darin beschreibt er den 1. Schlüssel für unser Rätsel.

5 Jahre später, **1928**, finden die Spinoren Cartans – quasi per trial and error, wie Dirac das formulierte - Eingang in die relativistische Formulierung der Quantenmechanik, die das Tor zur Quantenfeldtheorie öffnet. Spinoren werden zur unverstandenen, aber ganz zweifelsohne tragenden Säule der relativistischen Beschreibung des Elektrons.

Weitere 10 Jahre später, **1938** - Einstein lebt im Exil, in Deutschland toben die ersten Progrome gegen Juden, die Faschisten in Spanien haben Federico Garcia Lorca, den jungen Dichter auf dem Höhepunkt seines Ruhms, erschlagen und am Straßenrand verscharrt – in diesem Jahr vor der Entfesselung des 2. Weltkriegs veröffentlicht Cartan seine Vorlesungen unter dem Titel: die **Theorie der Spinoren**. Dieses Buch birgt den Generalschlüssel zu unserem Rätsel. Wir können ihn nutzen, wenn wir Eddington aufmerksam gelesen haben.

Szenenwechsel. Am Himmel sehen wir die Planeten, sie kreisen auf Ellipsen um die Sonne. Es muß eine Anziehungskraft der Sonne geben, folgerte Newton. Denn, so seine Überlegung, wenn es sie nicht gäbe, flögen die Planeten geradeaus und ab in den Weltraum.

Die Flut der Phänomene, die **Newton** mit seiner **Anziehungskraft** erklären konnte, war überwältigend: Nicht nur konnte er die elliptischen Bahnen der Planeten und die parabolischen der Kometen vorhersagen, die Gezeiten bestimmen und die Abplattung der Erde an den Polen und ihre Aufwölbung am Äquator berechnen. Letzteres ermöglichte ihm sogar, die Präzession der Erdachse, eine Umdrehung in sage und schreibe 26.000 Jahren, durch die Wirkung von Sonne und Mond auf den Erdwulst abzuschätzen und nachzuweisen, dass der Einfluss des Mondes doppelt so gross wie der der Sonne ist. Fast 20 Jahrhunderte lang, seit Hipparchos (180-125 v.u.Z.) war dieses Phänomen bekannt, aber ungeklärt, weil niemand den Erdwulst kannte. Eine überwältigende Evidenz für die Richtigkeit der Newtonschen Anziehungskraft führte zu ihrem Status als dem Paradigma der klassischen Physik.

Die ART aber sagt: **da existiert keine Kraft**. Die Planeten fliegen kräftefrei. Sie verfolgen ihre Bahn, weil die Raumzeit gekrümmt ist, so wie eine Roulettekugel im Casino ohne anziehende Zentralkraft rotiert. Der Irrtum entsteht, wenn und weil wir den flachen Raum voraussetzen. Im gekrümmten Raum der ART weiß kein Punkt von seinem Nachbarpunkt, was für ein Koordinatensystem dort gilt. Der Zusammenhang zwischen den verschiedenen Koordinatensystemen - denken Sie an den Stacheligel der Baumeister auf der Erdkugel - wird

durch ein Gebilde bestimmt, das mathematisch ein Zusammenhang genannt wird. Unter dem Vor-Urteil des flachen Raumes erscheint uns dieser Zusammenhang als ein Potential, das eine Kraft ausübt.

Wenn diese Kraft aber gar nicht existiert; was haben wir dann gemessen, wenn wir das Newtonsche Gravitationspotential mit seinem eleganten Verlauf so genau vermessen haben? Mathematisch ist das Konstrukt des flachen Raumes durch eine sogenannte quadratische Form charakterisiert. Das aufgefundene Potential ist nichts anderes als die Greensche Funktion dieser quadratischen Form. D.h. weit davon entfernt, mit dem Gravitationspotential einen wie alle dachten Zipfel des Mantels der Natur gelüftet zu haben, haben wir **nichts anderes als den flachen Raum vermessen**, den wir zuvor als Vorurteil hineingesteckt haben.

Eddington, der in seinem Buch 1923 diese Gedanken darlegte, nannte das einen **put job**: wir kriegen heraus, was wir vorher hineingesteckt haben. Und so hält er 1928 im Rahmen einer öffentlichen Vorlesung lakonisch fest, daß die künftige Sonnenfinsternis von 1999 – die nahezu alle von uns miterlebt haben – mit derselben Sicherheit vorherzusagen sei wie die Tatsache, daß auch 1999 noch $2+2 = 4$ gelte. Die Vorhersage ist trivial, obwohl sie für uns wunderbar erscheint.

10 Jahre später entwickelt **Cartan** in seinem Buch „Die Theorie der Spinoren“ die Mathematik des flachen Raumes, wenn dieser nicht über Rotationen definiert wird, sondern über **Reflexionen**. Cartan hat erstmals festgestellt, daß jede Rotation aus zwei Reflexionen aufgebaut werden kann. Der flache Raum, der – wenn er über Rotationen definiert wird - als eine monotone Wüste erscheint, die in jede Richtung das gleiche Bild zeigt, entfaltet wenn über Reflexionen definiert einen unvermuteten Reichtum an Details. Dessen Grundlage bilden die Spinoren. Und nun kommt der Clou: dem überraschten Blick enthüllt sich, daß die Theorie und die Experimente der Elementarteilchenphysik augenscheinlich nichts anderes machen, als die Physiognomie des flachen Raumes in all seinen Verästelungen nachzuzeichnen, wie sie Cartan 1938 in seiner Analyse mittels Reflexionen mathematisch ausgebreitet hat.

1938, das war zu einer Zeit, als die physikalische Quantenfeldtheorie noch mehr als ein Jahrzehnt auf sich warten ließ und Jahrzehnte, bevor das physikalische Standardmodell der Elementarteilchen nach vielen Windungen und Wendungen seine heutige Form bekam.

Die Elementarteilchen, ihre Eigenschaften, die spezifische Form ihrer Wechselwirkungen, ihre Aufspaltung in starke, schwache und e.m. Wechselwirkung wie auch die Existenz von Antiteilchen, haben im flachen Raum ihr Modell. Sie entstehen augenscheinlich als Emergenz der flachen Raumzeit, die wir als Voraussetzung postuliert haben.

Wir müssen den Schluß ziehen: das Standardmodell der Elementarteilchen nimmt in der heutigen Zeit die Rolle des Newtonschen Potentials ein, mit all den Begeisterungen, die dessen Vorhersagekraft auslöste. Genauso wie die Theorie und die Beobachtungen der Newtonschen Anziehungskraft nichts anderes nachzeichneten als das Konstrukt des **flachen** Raumes, soweit es durch **Rotationen** bestimmt ist, so zeichnen Theorie und Experimente des Standardmodells der Elementarteilchen das Konstrukt des flachen Raumes nach, soweit er über **Reflexionen** definiert ist.

Eddington, der 1928 die Hoffnung äußerte, die gerade frisch entstehende Quantentheorie könne anders als Newtons Gravitation tatsächlich ein Zipfelchen vom Mantel der Natur lüften, würde auch das Standardmodell der Elementarteilchen – hätte er es noch erlebt - als put job bezeichnen. Die **Physiker finden heraus, was sie hineingesteckt haben.**

Wir stehen vor der Auflösung des Rätsels von der „unreasonable effectiveness of reason“. Wenn es denn so ist, daß all unsere Theorie und Praxis lediglich die Physiognomie des flachen Raumes nachzeichnet, die wir vorher hineingesteckt haben, dann ist klar, daß wir die Resultate so unverschämt genau prognostizieren können. Ich erinnere: das anomale magnetische Moment des Mü-Mesons auf 10 Stellen hinter dem Komma genau vorhergesagt... Wir sehen „the reasonable effectiveness of reason“ vor uns.

Aber was bedeutet das?

Kant hat **1783** in seinen prolegomena unter direktem Verweis auf das 100 Jahre früher formulierte Newtonsche Kraftgesetz formuliert:

„Der Verstand schöpft seine Gesetze (a priori) nicht aus der Natur, sondern schreibt sie dieser vor.“

(Kant (1783): 189 [A 113] Prolegomena)

(Prolegomena zu einer jeden künftigen Metaphysik, die als Wissenschaft wird auftreten können.)

Das trifft den Nagel unserer Beobachtung auf den Kopf!

2 Jahre vorher schon hat Kant in der Kritik der reinen Vernunft konstatiert, Galilei und Torricelli hätten

„begriffen, daß die Vernunft nur das einsieht, was sie selbst nach ihrem Entwurfe hervorbringt“

(Kant (1781/87),²³ [B XIII]), (KdrV)

Das sind starke Worte, und wir finden uns unversehens in dieser Flugschneise.

Sie wird als die von Kant vollzogene **kopernikanische Wende** bezeichnet und besagt: die Gegenstände der Erkenntnis richten sich nach uns, nicht umgekehrt.

Der „Entwurf“ der Vernunft, von der Kant spricht, ist in ihrer Konzeption von Raum und Zeit verankert, so Kant. Das ist es, worauf die moderne Physik gestoßen ist.

Was bedeutet das für die Interpretation der Physik? Wir sind an dem wichtigen Punkt angelangt, daß die Aussagen der Physik **bedingte** Aussagen sind. Unter der Bedingung des flachen Raumes werden wir Elementarteilchen vorfinden. Umgekehrt heißt das: wo die Bedingung des flachen Raumes nicht gegeben ist, werden wir auch keine Elementarteilchen vorfinden.

D.h. die Elementarteilchen werden ihrer raumzeit-losen Substanz entkleidet. Sie existieren nicht universal: sie sind eine Emergenz des flachen Raumes und verschwinden mit dem flachen Raum.

Damit sind wir bei der Kritik des von mir benutzten Narrativs, mit dem ich die kosmologische Entwicklung des Universums beschrieb. Die Expansion des Universums ist mathematisch an den **homogenen** Raum gebunden, einen Raum, in dem ein Punkt wie jeder andere aussieht. Aber in unserem Sonnensystem und in unserer Galaxie sieht gerade **nicht** ein Raumpunkt wie jeder andere aus: die Materie klumpt. Folglich gibt es die Expansion des Universums nur im großen Ganzen, das statistisch gemittelt einem homogenen Raum nahekommt, nicht aber auf der Ebene der Galaxien oder Galaxiencluster. Diese Bedingung

fiel bei der Art Beschreibung, die ich benutzt habe, beiläufig unter den Tisch. Nicht ohne Grund: der zeitlich organisierte Ablauf verstellt den Blick für Zusammenhänge, die sich **wechselseitig bedingen**. Er legt die Verwendung einer ein-dimensional organisierten **Ursache-Wirkungs-Relation** nahe mit der Maßgabe: die Ursache kommt immer vor der Wirkung. Das macht es schwer, die Denkfigur einer wechselseitigen Bedingtheit anzuwenden. Wir – und nun rede ich wieder von uns als den Europäern – wir sind zutiefst dem Denkmodell der Kausalität verhaftet.

Woher kommt diese Bedingtheit in der Physik? (ich komme zum Schluß)

Die Physik nähert sich der Welt über das **Messen**. Ihre Gleichungen formulieren die Bedingung der Möglichkeit des Messens. Im Normalfall ist die Bedingung das Vorhandensein eines Maßstabs. Von dem Maßstab des Stoffverkäufers auf dem Markt erwarten wir selbstverständlich, daß er denselben Wert anzeigt, egal in welche Richtung er gedreht wird. Er muss invariant gegenüber Rotationen sein. Der Maßstab muß auch dasselbe anzeigen, wenn der Händler zur anderen Ecke des Raumes geht: er muss translationsinvariant sein. Das aber sind die Bestimmungen des flachen Raumes und von daher und nur von daher erhält der flache Raum seine immense Bedeutung für uns, die wir messen wollen.

Die **Quantentheorie** und die **Allgemeine Relativitätstheorie** unterscheiden sich von der klassischen Physik, indem sie der Frage nach der Bedingung eine andere Wendung geben. „Was ist die Bedingung des Messens – fragen sie - unter der Bedingung, daß kein materieller Maßstab vorhanden ist.“

Für die **Quantenphysik** ist das relevant, weil und soweit sie nach Abständen **unterhalb des Atomabstands** forscht, wo naturgemäß kein materieller Maßstab an der Hand ist. Sie beantwortet die Frage, indem sie auf die Frequenz des Lichts zurück greift. Das ist eine bewußte Entscheidung für eine kovariante Größe, ein Sachverhalt, der für all die Irritationen verantwortlich ist, die uns die Quantenmechanik mit auf den Weg gibt.

Für die **Allgemeine Relativitätstheorie** ist dieselbe Frage relevant im **leeren** Universum, wo ebenfalls „natürlich“ kein materieller Maßstab zur Hand ist. Sie benutzt stattdessen die Krümmungsradien der Metrik an jedem Ort der Raumzeit. Das ist die einzige vorgegebene Bedingung, und das Verblüffende ist, daß aus dieser Bedingung die Einsteinschen Feldgleichungen resultieren. Zusammen mit der Forderung nach einer zentralsymmetrischen Lösung und mit dem Postulat der Existenz einer Bahn, der kräftefreien Geodäte (die in der Quantenmechanik gerade nicht gefordert werden kann) ist das der hinreichende Input, um die triumphalen Erfolge der frühen Allgemeinen Relativitätstheorie zu erzielen: die Erklärung der **Periheldrehung** des Merkur, der **Lichtablenkung** im Gravitationsfeld und der **Rotverschiebung** der Wellenlänge des Lichts im Gravitationsfeld.

Die Bedingtheit der physikalischen Erkenntnis durch das Messen und die wechselseitige Bedingtheit ihrer Ingredienzien **explizit** zu formulieren, das ist der neue Boden, auf dem wir stehen. Er hat märchenhafte Blüten hervorgebracht. Wir sind in der Lage CD-Player zu bauen und ein GPS zu betreiben. Den alten Boden unter den Füßen zu verlieren war die Voraussetzung dafür, den neuen Boden zu gewinnen.

Habe ich es bereits gesagt?: ich liebe die Physik für ihre Fähigkeit, ihre eigenen Grundlagen zu unterminieren. Ich hoffe, das gibt Anregung, solches öfter mal und mit Lust zu wagen.