

## Quantenloch versus Lochquant

Als geradezu erregende Idee in [Juan Maldacenas Artikel](#) inspiriert mich die Hypothese, das Phänomen der Verschränkung sei daselbst die Strickmaschine der Raumzeit. Ich versuche jetzt, meine Freude an diesem Kerngedanken zu erklären. Das mache ich aus dem hohlen Bauch und vielleicht liege ich komplett falsch. Darum geht es mir im Augenblick aber nicht. Ich will vor allem meine Freude an der Konstruktion vermitteln und zwar den nichtwissenschaftlichen Teil der Freude, also den poetisch anspruchsvollen. Also bitte nichts glauben, was ich hier schreibe, sondern nur spüren, welchen laienhaften Bewusstseinsstrom der Artikel in mir auslöst:

Die Kommilitonen, die zur gleichen Zeit mit mir in München an der LMU dasselbe Fach studiert haben und im Gegensatz zu mir fast alle Vorlesungen schwänzten, weil sie die Übungen dazu aus ihren Ärmeln schütteln konnten, so unvorstellbar gut waren die, hatten alle nur ein Interesse, Physik zu studieren: sie wollten die Quantengravitation finden. Das ist seit hundert Jahren das mit riesigem Abstand zermürbendste, reizvollste, geilste und frustrierendste Problem der reinen Wissenschaft. Wie sieht eine mathematisch formulierbare, physikalische Theorie aus, die Quantenphysik und Relativitätstheorie vereint? Quantenphysik beschreibt die Naturgesetze im subatomaren Bereich, also die Physik der Elementarteilchen, deren Darstellung nicht mehr den klassischen Theorien folgt, sondern entweder in Schrödingers Wellenmechanik oder in der Matrizenmechanik von Heisenberg, Born und Jordan hingeschrieben werden kann. Ich kenne aus meinem Studium nur eine einzige konkrete Anwendung, die relativistische Physik mit der Quantenphysik paart. Das ist die Dirac-Gleichung. Ich habe diese Gleichung kennengelernt in Umständen, die mir bis heute Freude machen, was ich jetzt hier nicht vertiefe. Aber es ist nur ein Hauch von Paarung der beiden unvereinbaren Theorien und hat nichts zu tun mit dem fetten Problem, dass sich keine Quantentheorie der Gravitation bisher hat finden lassen. Gravitation wird durch die Relativitätstheorie beschrieben und Quantenphysik durch wahlweise Schrödinger oder Born-Jordan.

In meiner Erinnerung sind die Begriffe Relativität und Gravitation beinahe Synonyme. Die Relativitätstheorie ist das mathematische Modell für das Phänomen der Gravitation. Das grundlegende Konzept der Relativitätstheorie ist, eine Raumzeit zu modellieren, die Schwerkraft, Massenanziehung, Massenablenkung und Bewegung von Massen im „leeren“ Raum des Alls über die geometrische Interpretation dieses vierdimensionalen Gebildes erklärt; oder sagen wir besser statt erklärt: die Beobachtungen auf eine 4D-Geometrie der Raumzeit abbildet. Weil aber niemand weiß, was ein Raum eigentlich ist und weil erst recht niemand kapiert, was die Zeit eigentlich ist, gibt es kein absolutes „falsch“ oder „richtig“ für die Theorie. Sondern wir können nur in Experimenten prüfen, ob messbare Wirkungen den aus der Theorie folgenden Erwartungen entsprechen. Das wurde unzählige Male gemacht und die Relativitätstheorie hat sich bis heute nie falsifizieren lassen, das heißt: alle Versuche, experimentell Ergebnisse zu erhalten, die durch die Relativitätstheorie anders herauskommen, als in den Messungen, sind bisher gescheitert. Daher ist diese Theorie eines der am besten bestätigten Modelle für die in der Welt geltenden Naturgesetze (im Bezug auf gravitative Fragestellungen). Ähnliches gilt für die Quantenphysik bezüglich der Fragen nach dem Verhalten von Elementarteilchen – vom Photon bis zum Quark.

Die Schrödinger-Gleichung löste erstmals das Problem, zu verstehen, wie das Spektrum eines Wasserstoffatoms gebaut ist. Das kleinste und primitivste Atom ist aus mehreren Elementarteilchen aufgebaut (wenigstens zwei – wenn wir das Proton als elementar anschauen, was damals noch üblich war, weil niemand an Quarks dachte; Quarks kamen erst lange nach James Joyce zum Vorschein). Obwohl also das H-Atom nicht elementar ist, kann die Schrödingergleichung Lösungen für die Spektrallinien liefern, wenn die bekannten Größen für die Wechselwirkungen zwischen Proton und Elektron eingesetzt werden. Gravitation kann dabei völlig vernachlässigt werden, weil ihr Einfluss um so viele Größenordnungen kleiner ist, als die Coulombkraft der elektrischen Wechselwirkung, dass wir sie Null nennen dürfen.

Die Dirac-Gleichung setzt jetzt den Impuls in der Schrödinger-Gleichung relativistisch an. Das hat noch nichts mit Gravitation zu tun, zeigt aber schon, dass das Phänomen der Gravitation wohl weniger in der Massenanziehung seine Bedeutung findet, als eher in der Modifikation der Bewegungsgrößen. Also ist das Modell der Raumzeit hier deutlich elementarer als das Phäno-

men der Schwerkraft. Muss auch so sein, denn die Schwerkraft kommt ja bei der Relativitätstheorie gerade als Wirkung durch den von Massen verkrümmten Raum heraus. Erstaunlich und schwer zu begreifen für mich war nun immer, dass ich über die Gravitation zur Relativitätstheorie komme, in der sich die Lorentz-Transformationen zwanglos einfügen und dass ich dann diese Lorentz-Transformationen verwende, um Bewegungsgleichungen anzuwenden, bei denen die Gravitation völlig vernachlässigt werden kann. Jetzt lichtet sich dieses Problem in meinem Kopf vielleicht endlich. Dirac hat also den klassischen Impuls in der Schrödinger-Gleichung durch den relativistischen Impuls, wie wir ihn aus den Lorentz-Transformationen kennen, ersetzt und die relativistisch modifizierte Schrödinger-Gleichung gelöst. Was kommt raus? Absolut irre: der Spin des Elektrons kommt raus! Es gibt zwei Lösungen, die den Eigenwerten des Eigendrehimpulses des Elektrons entsprechen:  $+1/2$  und  $-1/2$ .

Das alles ist so halbverdaut in meinem Hirn und ich kann längst nichts mehr davon mathematisch hinschreiben oder rechnen. Ich erinnere mich nur noch schwach und laienhaft daran. Das ist der bescheidene Grundstock, mit dem ich den Artikel lese. Mein Interesse, mich aufzuraffen, ihn zu lesen, weckt er mit der in meinem verschwommenen Bild paradoxen Überschrift. Sie suggeriert, Schwarze Löcher seien Objekte, die mit quantenphysikalischen Modellen berechnet werden dürften. Da stellt sich die Frage, ob es auf so einen kleinen Seiteneffekt hinausläuft, wie ich ihn umgekehrt bei der Dirac-Gleichung kennenlernen durfte. Oder ob jemand ein Tor zur Lösung des Problems aufstößt, an dem sich in den letzten hundert Jahren von einschließlich Albert Einstein bis hin zu Claus Kiefer alle die Zähne ausgebissen haben.

Ich lese. Am Ende des ersten Absatzes eine starke, erregende Tatsachenbehauptung: wenn eine Äquivalenz zwischen Wurmloch und Verschränkung nachweisbar sei, hätte das eine Auswirkung auf die fundamentale Konstruktion von Raum und Zeit.

Genau so was wäre nach meinem Geschmack. Bloß: meint der Satz, was ich darin sehe? Da steht: sie testen ihre Hypothese, dass das aus der Relativität ableitbare Phänomen des Wurmlochs äquivalent zur quantenphysikalischen Verschränkung sei. Falls der Test diese Äquivalenz bestätige, wirke sich diese Bestätigung auf die fundamentale Konstruktion von Raum und Zeit aus. Das

steht da. Es ist schwammig. Ich frage mich: was ist die fundamentale Konstruktion von Raum und Zeit? Es kann doch nur etwas Menschliches sein, wenn ein Physiker von einer grundlegenden Konstruktion spricht. Sonst würde es ja bedeuten, dass der Autor behauptet, der positive Test sei ein Beweis für intelligentes Design. Oder verwendet er den Begriff „Konstruktion“ metaphorisch für die Naturgesetze von Raum und Zeit? Dann wäre es eine unglückliche Sprachwahl. Was meint er mit „fundamentale Konstruktion von Raum und Zeit“? Meint er damit die Relativitätstheorie? Denn das ist die einzige fundamentale Konstruktion von Raum und Zeit, die ich kenne. Vorher war Newton fundamental gewesen, aber Einstein hatte erkannt, dass die Voraussetzung einer absoluten Zeit im Newtonschen Universum nicht erfüllt ist. Im Universum Newtons kannst du eine Weltraumuhr aufstellen – irgendwo, egal wo; und an allen Orten des Alls kannst du deine lokalen Uhren auf diese „Uruhr“ kalibrieren. Bei Newton gibt es die Gleichzeitigkeit. Einstein zeigt, dass die Naturgesetze, die wir zu seiner Zeit bereits kennen, nicht funktionieren, wenn es diese Gleichzeitigkeit, also eine absolute Zeit, gibt. Also folgert Einstein: wir müssen auf dieses liebgewordene Modell verzichten, es gäbe eine universelle Zeit und zwei beliebige Uhren an beliebigen Orten des Alls seien synchronisierbar und zeigten ab ihrer Synchronisation jeweils dieselbe Zeit an. Einstein zeigte, dass schnell bewegte Uhren langsamer gehen, als ruhende. Zugleich schaut Licht für jeden egal wie schnell bewegten Beobachter immer gleich schnell aus. Wir können das nicht begreifen, weil wir sehr langsam sind und nur unsere Erfahrungen verarbeiten können, die nicht anwendbar sind auf kosmische Entfernungen, Zeiträume und Geschwindigkeiten. Aber wir können es rechnen: in den Lorentz-Transformationen, die mit dem Newton-Weltbild kollidierten, so dass Einstein eine Theorie schuf, in der diese Transformationen elementar bzw. fundamental sind. Es ist das Modell der relativistischen Raumzeit. Ich schliesse also, der tolle Satz sei so gemeint: wenn die These stimmt, dass Wurmlöcher verschränkte Schwarze Löcher sind, dann wirkt sich dieses Erkenntnis auf das Modell aus, das wir von der Raumzeit in der Relativitätstheorie konstruiert haben. So muss das gemeint sein: es wird eine Revision der Relativität geben.

Und im gleichen Augenblick, wo mir das als einzig sinnvolle Lesart erscheint, frage ich mich, ob er mich verarschen will. Denn er argumentiert ja doch so: aus der Relativitätstheorie folgt, dass Wurmlöcher mögliche Lösungen der relativistischen Gleichungen in der Nähe von Singularitäten sind

(Nähe ... hmm ... also: die Singularität ist ein lokales Phänomen; ein Schwarzes Loch ist in einem bestimmten Raumzeitareal lokalisiert; wir berechnen den Rand. Wir rechnen am Rand eines Schwarzen Lochs Entropie-Bilanzen aus, weil wir hinschreiben können, wo dieser Rand ist. Okay: in der Nähe von ... gibt es ein Wurmloch). Das schaut für mich so aus:

Relativität ergibt die Existenz eines (lokalen) Wurmlochs.

Hypothese: Wurmloch ist äquivalent zu Verschränkung.

Folgerung, falls Hypothese stimmt: Relativität ist unzureichend, wie einst Newtons Mechanik unzureichend war und daher durch Relativität ersetzt werden musste. Jetzt dasselbe, ausgelöst durch Erkenntnis: ... aha, okay. So muss das gedacht worden sein vom Autor.

Jetzt bin ich schon sehr gespannt, ob er es erklärt. Tatsächlich hüpfte mein Herz, als der folgende Absatz mit „Denn“ anfängt. Heureka: er will es mir erklären, weshalb die Relativitätstheorie analog zur Newton-Welt überarbeitet werden muss, wenn seine Hypothese zutrifft, die er gerade testet.

„Denn womöglich entsteht durch Verschränkung kleinster Bausteine des Universums erst die Raumzeit selbst.“

Aha.

Bahnbrechend, oder? Leibniz nannte genau so was eine Monade. Also – vielleicht bin ich ja naiv, aber der sagt doch jetzt mit geschwollener Brust und für den Laien nur unzulänglich erklärten Begriffen bloß, dass im All alles mit allem verwoben ist, so dass wir das All mit unseren Sinnen und Messgeräten als Universum wahrnehmen, wie wir es wahrnehmen, obwohl es „nur“ eine Strickware aller Wirkleins und Passierchens sein könnte. Das erklärt doch überhaupt nicht, was an der Relativitätstheorie wie zu verallgemeinern sei, damit die Äquivalenz von Verschränkung und Wurmloch rauskommt. Und es erklärt auch nicht, warum die Äquivalenz unvereinbar mit der Relativität sein soll oder warum die Relativitätstheorie nur als Grenzfall (und wenn, als welcher) des besseren, allgemeineren Modells einer neu zu schaffenden RaumKnotenZeit fungiert.

Dann kommt ein blöder Absatz, der bloß wieder einmal mehr für die große vereinheitlichte Theorie von allem wirbt. Juan schließt einen historischen Rückblick an: Einstein habe in einem Jahr 1935 mit verschiedenen Gruppen an zwei getrennten Arbeiten gewerkelt, die genau diese beiden Phänomene behandeln: Verschränkung und Wurmloch. Aber Einstein hat wohl nicht an eine Gemeinsamkeit gedacht. Einstein mochte die Verschränkung nicht und sah in ihr geradezu ein handfestes Indiz für die Unsinnigkeit der Quantenhypothesen seiner Zeit. Sagt Juan. Weil das viele Leute gerne sagen: Einstein mochte die Quantenphysik nicht, sagen sie. Sie sagen nicht, dass Einstein den Nobelpreis für seine Arbeit zu den Photonen bekam, also der ersten quantenphysikalischen Erklärung des Planckschen Kunstgriffs, eine funktionierende Formel für die Strahlung eines Schwarzen Körpers zu liefern.

Egal, das ist ein Seitenast des Themas, den ich nicht ausführe jetzt. Aber Juan hätte es sich sparen können, durch die Blume zu sagen: Kollege Einstein war schon mit der Nase an der Lösung, aber zu verbohrt (vernielsbohrt vielleicht?), so dass es eines Genies wie meiner bedarf, heute zu sehen, was er nicht sehen konnte. Nämlich, Juan? „Dass gerade diese von Einstein verspottete „spukhafte Fernwirkung“ die Brücke werden kann für eine funktionierende Theorie der Quantengravitation. Denn nach meiner Ansicht haben Wurmloch und Verschränkung etwas miteinander zu tun“.

Und dieser Satz ist wirklich billig. Das „Denn“ ist dem Mann nicht heilig, so viel steht fest. Bei ihm ist „Denn“ nur Füllwort, das die Spannung erhöht, aber dann kommt die erwartete Erklärung nicht. Der ganze Satz ist redundant zur Einleitung. Er hält uns für blöd. Wir wollen von ihm wissen, auf welche Weise die Bestätigung der Äquivalenz (das ist eine GLEICHHEIT) von Wurmloch und Verschränkung das Konstrukt der Raumzeit verallgemeinert. Darauf sind wir angespitzt. Und was kommt? Denn er glaubt, die haben was miteinander zu tun. Hallo? Du hast ein paar Sätze weiter vorn postuliert, es sei GLEICH. Äquivalenz von Loch und Knopf – daraus folgt: Raumzeit ist vielleicht der Strickpullover aus Wirkleins.

Vollhonk! Aber gut, er muss vorher freilich erklären, was ein Schwarzes Loch ist. Er erklärt etwas zum Schwarzen Loch. Er erwähnt den Schwarzschild, der zu Schwarzen Löchern die Bedingungen ausgerechnet hat, aus denen sich ihre „Größen“ ergeben. Er bringt ein paar Gedankenexperimente mit Romeo

und Julia. Das freut mich. Aber nur wegen der Poesie in meinem Kopf dazu. Für den Artikel ärgert es mich. Es sagt absolut nichts zum Thema der Geschichte aus und ich lerne nichts von den versprochenen Erkenntnissen: WIE verdammt nochmal hängen Wurmloch und Verschränkung über eine Gleichung zusammen? Äquivalenz bedeutet immer, dass ich eine Gleichung hinschreiben kann. Eine Gleichung ist eine Tatsachenbehauptung in mathematischer Formelsprache. Zu jeder Gleichung gibt es viele äquivalente Formulierungen in Prosa. Bitte, Juan, sag es uns endlich: welche Äquivalenz zwischen Loch und Knopf prüfst du?

Geduld, er muss nach dem schwachen Exkurs ins Schwarze Loch jetzt freilich noch die Verschränkung für den Laien erklären. Die Verschränkung zweier Quantenteilchen ist wie zwei Handschuhe, deren einen man vergessen hat, in die Tasche zu stecken. Bloß anders. MANN! Ich glaube, er hat einen Film erzählen wollen, den er nicht verstanden hat: verschränkte Handschuhe gehören nicht zu Romeo und Julia, sondern zu Adam and Eve. Vollhonk! (Zugegeben, ich schmunzle wie ein Wüstenfuchs, dass er Verschränkung mit Handschuhen erklärt, obwohl sein wesentlicher Satz ist, dass es anders ist).

Ich werde ungeduldig. Juan hatte angekündigt, eine Hypothese und den Test dafür vorzustellen: „Denn womöglich entsteht durch Verschränkung kleinster Bausteine des Universums erst die Raumzeit selbst.“ Dann hat er erst die Schwarzen Löcher erklärt und schließlich, dass Handschuhe was anderes sind, als verschränkte Teilchen, aber so ähnlich. Jetzt sollte alles an Grundlagen beisammen sein. Jetzt muss er in die Vollen gehen. Und wie kommt er zurück zu seinem Ansinnen?

„Wie könnten nun diese beiden bizarren Phänomene, Wurmlöcher und Verschränkung, miteinander verwandt sein? Auf der Suche nach einer Antwort schauen wir uns die Schwarzen Löcher noch einmal genauer ...“ leck! Erstens: das ist Positivismus, oder? Ich habe die Idee, dass ich eine Identität zwischen Wurmloch und Verschränkung postulieren kann und suche nach einer Bestätigung. Gut, ist bis zu einem gewissen Grad legitim, aber doch grenzwertig vom Ansatz her. Er ist nicht über eine Ähnlichkeit gestolpert, die er dann prüfte, ob es womöglich mehr sei, vielleicht gar eine Äquivalenz. Sondern er geht wohl mit der Brechstange des Ehrgeizigen hin und sagt: wenn ich das größte Rätsel der modernen Physik löse und die

Theorie der Quantengravitation erschaffe, werde ich Gott sein! Dann spukt (!) er in die Hände und wühlt sich mit seinem mathematischen Apparat in irgendwelche Vergleiche der mathematischen Strukturen von Löchern und Knöpfen. So schaut das für mich aus.

Ich mag die Idee. Ich finde die Vorstellung toll, über eine strukturelle Gleichstellung von Knopf und Loch die Monaden wiederzubeleben. Und einen bisher unbedachten Aspekt der Raumzeit zu offenbaren: als Strickmuster der Wirkleins. Gefällt mir. Aber hey, wo ist jetzt die Aussage dazu, wie es physikalisch funktioniert? Juan kriecht ins Loch: „Wegen der Strahlung der Akkretionsscheibe kann dem Loch eine Temperatur zugeordnet werden.“ Und er wird esoterisch:

„Die Temperatur eines Objekts kommt von der Bewegung der Teilchen. Wenn das Loch eine Temperatur hat, muss es aus Teilchen bestehen.“ Er kann nicht so blöd sein. Ich schaue nach in Wikipedia, wer der Typ ist: aha, ein Genie der theoretischen Physik. Sorry. Das ist ein klassischer Zirkelschluss, den er da macht: ich kann dem Loch eine Temperatur zuordnen, weil es strahlt und weil ich die Plancksche Strahlungsformel habe, die Strahlung mit Teilchen (streng genommen sagt Planck nichts von Teilchen, sondern er redet und schreibt von Oszillatoren) verknüpft und mit einer Temperatur. Wenn also eine Temperatur mit Strahlung verknüpft ist, kann ich einem Objekt, das strahlt, eine Temperatur zuordnen. Das ist ein virtueller Vorgang, erst mal. Weil ich aus einer Akkretionsscheibe wohl kaum ein Planckspektrum heraus bekomme und das mit den Teilchen ist doch lächerlich: wir erklären die Strahlung aus der Scheibe des Lochs als den Todesschrei der Materie, die bis nahe an Lichtgeschwindigkeit beschleunigt ins Loch stürzt, dabei in Plasmazustände zerrissen alle vorstellbaren Kollisionen erlebt und alle denkbaren Anregungszustände. Also stecke ich in die Strahlung des Lochs vorne als Erklärung schon die Materieteilchen hinein, deren Strahlung gerade noch aus dem Sog des Lochs entkommen kann, weil die Strahlung aus Photonen besteht, die erst hinter dem Schwarzschildradius auch nicht mehr wegkommen vom Loch. Wenn Anregungen der zerrissenen Partikel beim Sturz ins Loch weit genug vor dem Schwarzschildradius entstehen, dann kommen die Photonen, die den unvermeidlichen Rekombinationsprozessen entspringen und in eine Richtung vom Loch weg emittiert werden, in den Raum hinaus, wo wir sie sehen, messen können. Die Strahlung stammt aus Teilchen. Juan interpretiert das so: weil da Strahlung kommt, können wir eine Temperatur

dafür berechnen, denn wir haben eine Formel, wie Strahlung aussieht bei einer bestimmten Temperatur eines Körpers. Wir berechnen also für das Loch eine Temperatur auf der Grundlage seiner Strahlung. Wenn aber nun das Loch eine Temperatur hat, hat es auch Teilchen, weil die Formel, in der wir die Temperatur mit Strahlung verknüpft wissen, was mit Teilchen zu tun hat. Der Satz könnte von einem esoterischen Idioten stammen. Sorry.

Ich habe gelesen, dass Juan ein genialer Physiker ist. Wahrscheinlich irre ich. Aber der Artikel ist bis hierher nur Schrott. Aber es wird noch abenteuerlicher:

„In der Akkretionsscheibe vor dem Schwarzschildradius sollte die uns bekannte Physik gelten. Also schließen wir, dass Schwarze Löcher aussehen wie normale Quantenobjekte. Also hindert uns nichts, zwei Schwarze Löcher als verschränktes Paar zu betrachten.“ Mit derselben Argumentation kann ich jeden makroskopischen Körper als „normales Quantenobjekt“ betrachten. Mein Polo kann mit deinem Benz verschränkt sein. Wenn ein Polizist die Geschwindigkeit meines Polos auf dem Weg in die Arbeit zu 120 km/h misst, ist augenblicklich und spukhaft die Geschwindigkeit deines Benz auch 120 km/h ... oder wie? Gut, die Geschwindigkeit ist keine Quantenzahl. Verschränkung heißt: in wenigstens einer Quantenzahl identisch. Von welcher Quantenzahl eines Schwarzen Lochs reden wir hier? Aha: wir reden von Mikrozuständen. Und zwar nach seiner eigenen Argumentation von Mikrozuständen außerhalb des Schwarzschildradius, weil wir dahinter nicht wissen, welche Physik dort im Inneren des Lochs gilt. Wenn wir also Physik machen wollen mit dem Schwarzen Loch, müssen wir uns auf das Gebiet beschränken, in dem unsere Physik gilt. Das ist draußen. Und ein Raumgebiet, in das zum Beispiel ganze Sonnen hineingesaugt werden und dabei zerrissen werden und ihren Todesschrei als elektromagnetischen Holocaust ins All plärren – da sage ich mal salopp: keine Ahnung, wieso diese Situation näher an einem normalen Quantenobjekt liegen soll, als es mein Polo tut. Ich nehme an, wir können seine Hypothese prüfen, indem wir die Halbwertszeit des spontanen, spukhaften Zerfalls von Garagen messen und statistisch auswerten. Wir sollten dann die Verschränkungsrate von Automobilen bekommen bezüglich ihrer Quantenzahl „Eigendrehimpuls“, da ich denke, dass der Spin eines schleudernden oder sich überschlagenden Autos für seinen Verschränkungspartner in einer Garage Spuren setzt.

Und jetzt kommt endlich die Gleichung:

$$ER = EPR$$

Leonard Susskind ist ein richtig großartiger Physiker. Wenn Susskind mit Juan zusammengearbeitet hat, sollte ich davon ausgehen, dass Juan kein Vollhohnk ist. Aber es hilft nichts. Ich kenne Juan nicht. Das einzige, das ich von ihm kenne, ist dieser haarsträubend schlechte Artikel, in dem er Zirkelschlüsse konstruiert, mit der Brechstange Positivismus propagiert und ich mag es nicht, wenn ich verarscht werde.

Ich vermute, dass die Gleichungen für Loch und Knopf korrespondierende Strukturen aufweisen und dass der ganze Text des Artikels krampfhaft versucht, in diese Korrespondenz mathematischer Ähnlichkeiten einen Sinn hineinzuzinterpretieren, der dem Durchschnittsleser von Holtzbrinck-Journallen angemessen verständlich erscheint. Bloß: zu verstehen gibt es da gar nichts, weil Juan überhaupt nichts erklärt. Er behauptet nur verschiedene Dinge, wobei die jeweils angeführten Szenarien und Voraussetzungen aus dem täglichen Leben Otto Normalverbrauchers überhaupt keine Relevanz besitzen für die physikalischen Objekte, die er damit erklären will. Wenn er ein Loch von der Masse – sagen wir mal mittelgroß: tausend Sonnen – als normales Quantenobjekt bezeichnet, *weil es „Temperatur hat“* und *daher* Teilchen und *daher* Mikrozustände (und daher Quantenzahlen, die nicht explizit genannt werden, aber durch die Hintertüre der Mikrozustände freilich hereinkommen: ein Mikrozustand ist durch die Angabe all seiner Quantenzahlen vollständig beschrieben), dann würde er in einer mündlichen Physik-Diplomprüfung garantiert durchfallen. Der Prüfer würde ihm sagen: Lieber Herr Maldacena, sie hätten doch in den Vorlesungen zur Thermodynamik das Konzept der Temperatur als makroskopische Größe eines Ensembles von Teilchen kennenlernen sollen; bei wem haben sie Thermodynamik gehört? Was eine Temperatur hat, ist kein normales Quantenobjekt. Alles Makroskopische ist zwar aus Quantenobjekten zusammengesetzt, aber erst die statistischen Methoden unseres hochverehrten Ludwig Boltzmann erklären, wie sich aus dem Zusammenwirken der unzählbar vielen Quantenobjekte die nur im Makrokosmos mit Sinn erfüllten Größen ergeben, deren hervorstechendste wohl die Temperatur ist. Aber selbst, wenn wir die Temperatur schimpflich verallgemeinern und als Hilfsgröße verwenden, um sie etwa einem im Kreis-

beschleuniger umlaufenden Elektron – wahrlich ein Quantenobjekt – zuzuordnen, dann können wir doch nicht umgekehrt hergehen und sagen: weil wir trickreich dem Elektron eine Temperatur zugeordnet haben, besteht es aus Teilchen. Am wenigsten hilfreich ist das, Herr Maldacena, wenn wir dieses schräge Konstrukt errichten, um zu zeigen, dass das Elektron folglich ein Quantenobjekt sei, weil es aus Teilchen zusammengesetzt sein muss, da es eine Temperatur habe. Sehen sie denn nicht, dass sie vollkommen im Quatsch stecken und dass ihre ganze Faselei mit Physik nicht das Geringste zu tun hat?

So wäre der Vortrag in einer Prüfung bewertet worden, wenn er von einem Studenten gekommen wäre auf die Frage hin: können sie sich vorstellen, dass Schwarze Löcher miteinander verschränkt sind?

Am Schluss seines Artikels holt er nochmal zu Spekulationen aus. Diese Spekulationen haben mehr Hand und Fuß als sein krampfhaftes Versagen, die wahrlich hervorragend pfiffige Idee hinter dem Artikel im Rahmen der bekannten physikalischen Modelle zu erklären. Juan hat vielleicht mit der klassischen Physik schon komplett gebrochen und denkt jetzt, er dürfe alle fest in der Klassik verankerten Begriffe beliebig neu mischen. Das bringt aber nur Kummer und gar nichts Neues auf die Beine. Sein Problem ist: es gibt die Mathematik noch nicht, deren Gleichungen seinem Wunschziel  $ER = EPR$  entsprechen. Er hockt also im leeren Raum. Er ist beseelt von der Idee, er habe mit einigen wenigen hervorragenden theoretischen Physikern die Schwelle zu einer neuen Physik erklommen. Aber die Tür ist noch zu. Das war vor 100 Jahren auch so. Da haben ein Planck, ein Einstein, ein Born, ein Jordan, ein Heisenberg, ein Dirac unglaublich viel klassische Physik nach Boltzmann, Lorentz und Maxwell getrieben und aus dem fundierten Studium des Bestandes nach Erweiterungen gesucht, die ihre Wissenslücken schlossen. Dazu hat ein Schrödinger die prinzipiell bekannte Struktur der Wellengleichung für Korpuskel angesetzt und die Wellenmechanik erfunden, die ein wesentlicher und unverzichtbarer Bestandteil der Quantenphysik geworden ist. Noch radikaler waren die Matrizenmechaniker um Heisenberg herum. Frech! Die haben eine Mathematik erfunden, die zu ihrem Problem der Quanten passte. Feynman hat eine Mathematik erfunden, indem er auf ähnliche Weise, wie die Heisenberg-Arbeitsgruppe mit unendlichen Matrizen lange vor ihm, die Pfadintegrale mit unendlichen Wegen auf neue Art aus

Bekanntem abgeleitet hat und damit seine Vertices – graphisch die Feynman-Diagramme – rechnen konnte. Ich glaube, das wird sich nicht in derselben Methodik wiederholen. Die Leute wie Juan und Sussman knobeln schon seit Jahrzehnten an ihren Strings herum und kommen über die bescheidenen Anfangserfolge nicht so recht hinaus. Jetzt fangen sie an, die erträumten Ergebnisse mit Würfeln und Einbruchwerkzeug zu erzwingen. Diesmal wird es auch einen Bruch geben müssen. Das sehen sie, aber sie wollen ihre Mathematik nicht loslassen, weil es ja vor hundert Jahren auch schon mal geklappt hat.

Ich denke, wir brauchen von dem Artikel den Traum im Kern: alles im All ist auf eine nicht kausale, vollkommen entspannte und nicht bewegte Art miteinander verbunden. Die Physiker rechnen immer zeitliche Ableitungen. Warum? Weil alle Tests von Hypothesen bisher so gelangen: du formulierst ein System und definierst alle relevanten Größen in dem System. Dann setzt du eine Änderung einer Größe, die du genau beobachten kannst. Du schaust, wie sich das System unter den definierten Bedingungen entwickelt. Der Test ist bestanden, wenn die Entwicklung nach den Messwerten dem entspricht, was dein hypothetisches Naturgesetz dafür voraussagt. Und was ist Entwicklung anderes, als ein Differenzial nach der Zeit?

Wir interessieren uns für Prozesse, also für Entwicklungen in der Zeit. Dazu definieren wir Modellsysteme im Raum. Damit kommen wir freilich der Zeit, dem Raum und ihrer Koexistenz als Raumzeit nicht auf die Schliche. Aber genau diese Aufgabe steht an, wenn wir Quantengravitation verstehen wollen. Wir gehen von räumlich begrenzten Systemen aus, in denen möglichst alle Zustände weitgehend kontrolliert werden können und dann schauen wir in diesen Systemen die Entwicklung nach der Zeit an. Das ist unser eingefleischtes Denken und unser Erfolgsrezept seit Galileo Galilei. Was aber nun, wenn die Wahrheit, die wir heute suchen, keine Bewegung in sich trägt oder verursacht oder auch nur kennt? Was, wenn wir Universum wörtlich als Antwort nehmen müssen? Wenn das All die 1 ist? Wenn die Raumzeit nur die Bremsstrahlung der Entropie ist? Hat Juan die Entropie erwähnt? Ich erinnere mich nicht, das Wort gelesen zu haben in seinem schrecklich blöden Text. Vielleicht bin ich zu blöd für den Artikel. Okay. Kann leicht sein. Es ist sogar wahrscheinlich, dass er viel besser Physik kann, als ich. Aber nur, weil er so berühmt ist und so viele Preise gekriegt hat, kann ich

mich nicht dazu durchringen, dieses anzunehmen: mein Urteil sei falsch im Bezug auf seinen Artikel. Jetzt interessiert mich brennend, was ab Seite 20 kommt: „Die Quantenbits der Raumzeit“

Da referiert Clara über einen Fachartikel von Juan aus dem Jahre 1997 in der Fassung von 1999. Eine Wissenschaftsjournalistin bereitet für uns Laien auf, was Juan vor 20 Jahren in einem renommierten Fachblatt seinen hochgebildeten Kollegen zu demselben Thema schrieb. Juan war noch jung und hatte wohl damals schon die gleiche Idee, wie heute. Das wird spannend. 20 Jahre! Planck führte sein Wirkungsquantum 1899 glaub ich ein, 20 Jahre später war die Quantentheorie dank Einsteins Photonenhypothese schon ordentlich entwickelt, aber es gab noch keine Wellenmechanik und erst recht keine Matrizenmechanik. Das kam erst ... spicken in Wikipedia ... witzig: 1926 und zwar jede dieser neuen Betrachtungsweisen samt zugehöriger Mathematik.

Da aber Juan nicht erst 1997 als erster damit angefangen hat, Strings sexy zu finden, bin ich skeptisch, dass da noch jemals was rumkommt. Ich denke, es ist ein Holzweg, auch wenn Holtzbrinck diesen Weg immer wieder in seine Heftchen holt und tut, als würde die physikalische Revolution morgen in neue Dimensionen aufbrechen. Schon in den Siebzigern mit ihrem Artikel über Quarks hieß es: morgen ist die Welt nicht mehr dieselbe, denn wir wissen jetzt, dass das Proton nicht elementar ist. Quark!

Trotzdem liebe ich die Idee. Sie wird nur leider komplett versaut dargestellt.

Und ich bin froh, dass sich Polos nicht mit Benzen verschränken. Sondern sie sind mit dem All verschränkt in einer Weise, die wir anders nennen müssen, denn die Verschränkung ist nun mal ein Phänomen der Quantenzahlen zweier subatomarer Teilchen. Es gibt eine Verbindung zwischen Mikrokosmos und Makrokosmos und bisher hilft uns nur die statistische Physik auf den Grundlagen Ludwig Boltzmanns, das Verhalten der an sich quantenhaften Objekte in Ensembles als makroskopische Körper klassisch zu rechnen. Den Körpern Temperaturen zuzuordnen und sie zu streicheln, zu riechen, zu schmecken. In der Quantenwelt gibt es keine Körper, das Korpuskel-Bild stimmt nicht für Elementarteilchen. Das Wellenbild stimmt aber auch nicht. Erst in Ensembles bilden sich Körper und Felder aus, für die wir hervorragend entwickelte klassische Theorien haben. Diese Theorien bestimmen unse-

ren Alltag. Da gibt es Wärme und Kontinuum. In der Quantenwelt gibt es keine Temperatur, so wie ich es noch gelernt habe. Ist halt vielleicht Physik von vorgestern, das mag schon sein. Aber ich hänge daran. Zugleich mag ich den Aufbruch in freche, neue Konzepte. Sie sollten halt nicht alles kaputt machen, was sich bisher prima bewährt hat für Bastler, Künstler, Handwerker und Logistiker. Die klassische Physik funktioniert prima für klassische Wesen in makroskopischen Welten. Wenn jemand eine Neue Physik erfindet, die mehr von der subatomaren Welt erklärt, als wir heute verstehen, dann sollte er zuerst ein Modell vorstellen, das erklärt, wie aus seiner neuen Physik durch die entsprechenden Grenzwertbetrachtungen unsere plausible klassische Welt herauskommt. Da bin ich altmodisch.

Deshalb mag es eine Art von Blindheit meinerseits sein, wenn ich behaupte: Juan ist nicht weiter gekommen, als dorthin, wo Leibniz schon vor 300 Jahren gewesen ist. Aber Leibniz hat immerhin für seine Vision was Handfestes geliefert: er hat das Binärsystem entwickelt, um eine Sprache zu haben, in der er mit mechanischen Rechenwerken reden konnte. Das ist konstruktiv. Das imponiert mir. Vielleicht sind die Korrespondenzanalysen von Juan auch so viel wert, ich sehe es bloß nicht. Und wenn: dann ändert es nichts an meinem Urteil, dass der Artikel in keinem Punkt das eventuell in seiner Arbeit schlummernde Genie wiedererkennen lässt.

Solltest du also das Gefühl haben, nicht zu verstehen, was Juan schreibt, dann schiebe die Schuld nicht dir zu. In diesem Fall ist es Juan, der die Schuld auf sich geladen hat, viel zu versprechen und nichts davon einzulösen: er erklärt nichts und was er behauptet, das verknüpft er falsch und fast sittenwidrig, so dass jeder, der denkt, er verstünde, was Juan da schreibt, ziemlich sicher eher weniger versteht von Physik als eine(r), der sagt, er verstehe nichts von alledem, was er schreibt.

Er steht übrigens nicht allein da, ich habe schon oft Artikel da drin gelesen, die Märchenprosa für die Dumpfbeutel wie mich da draußen liefern, weil die Autoren denken, sie müssten ihre unverständliche Mathematik weglassen und trotzdem irgendwie erklären, was ihre Ergebnisse bedeuten. Vielleicht sind die Ergebnisse gar nicht so viel wert? Sie verstehen es selbst nicht?

## Lochquant versus Quantenloch

[Juan Maldacenas Artikel](#) hatte mir den Spaß verdorben, über die Wirkung seiner Idee nachzudenken. Seine Hypothese, dass die mathematische Korrespondenz zwischen zwei „korrekt“ beschriebenen Phänomenen gänzlich unterschiedlicher Art auf eine physikalische Äquivalenz führe, fasziniert mich abnehmend; diese Hypothese halte ich für einen Trugschluss, der in seiner populärwissenschaftlichen Ausarbeitung dazu einiger unerlaubter Methoden bedarf, um sie plausibel erscheinen zu lassen. In der Essenz der Argumentation erkenne ich die Bereitschaft, alles Bewährte niederzubrennen, wenn es seinem Traum nützt, zu zeigen, dass er Recht hat. Die Wut über Herrn Maldacenas Schlampigkeit und Zerrissenheit in seinem Spektrum der Wissenschaft Artikel bügelte den Spaß am Spielen mit dem Inhalt nieder.

Ganz weit vorne erregte mich Herrn Maldacenas Tatsachenbehauptung. Was aber meint er mit „fundamentale Konstruktion von Raum und Zeit“? Im Universum Newtons kannst du eine Weltraumuhr aufstellen und an allen Orten des Alls kannst du deine lokalen Uhren auf diese „Uhr“ synchronisieren. Das ist unser unmittelbares Empfinden: es gebe eine Zeit für alles, das existiert. Die Zeit sei eine Größe, die unabhängig von Raum, Materie und Feldern immer und ewig existiere und gleichförmig sei, unbeeinflussbar von allem unter ihrem Takt Existierenden. Wir können gar nicht anders, als uns so eine Uhr zu denken. Wir haben diese Uhr uns ausgedacht, weil unsere eigene „innere, biologische Uhr“ deren Vorbild ist. Ein lebender Organismus bildet eine Prozesskette: Befruchtung, Zellteilung, Wachstum, Entwicklung, Reifung, Geburt, Heranwachsen, Lernen, ... Vergehen. Der Organismus vergeht und während er vergeht sieht er andere Organismen werden und vergehen, also kommt er auf die Idee, das Prinzip zu verallgemeinern: die Zeit vergehe. Das tut sie freilich nicht – zumindest können wir es nicht ernsthaft behaupten, weil wir keine Ahnung haben, was diese Zeit sein soll. Wir können sie nur als Hilfsgröße verwenden, um Prozesse zu formulieren. Noch strenger: die Zeit existiert nicht als physikalische Größe, sondern nur als mathematische Hilfskonstruktion, Wirkungen zwischen Objekten zu beschreiben.

Für etwas unendlich stabil Gleichförmiges ergibt der Begriff Zeit keinen Sinn. Zeit hat eine ähnliche Funktion in der Physik, wie das Quant in Plancks erster funktionierender Formel für den schwarzen Körper. Das will ich kurz erläutern in meiner laienhaften Erinnerung:

Max Planck sollte für die Beleuchtungsindustrie ausrechnen, wie das Licht aus einem heißen Körper in Abhängigkeit von dessen Temperatur herausstrahlt. Die Industrie hatte hervorragende Messdaten, vor allem zu den Gaslampen, die damals noch die Straßen und Wohnungen erhellten. Man hatte schon seit einem halben Jahrhundert Erfahrungen mit elektrischen Glühlampen gemacht, aber es gab damit viele noch ungelöste Probleme: Lebensdauer kurz, Wirkungsgrad nachlassend; die Glühmaterialien verspiegelten den Glaskolben, der nötig war, um den Faden in Schutzgas-Atmosphäre vor dem spontanen Verdampfen zu bewahren. Um 1900 herrschte ein Wettrennen oder gar Krieg zwischen den etablierten Gaslampen-Herstellern und den fieberhaft elektrisches Licht verbessernden Konkurrenten rund um Edison. Es gab eine Formel von Rayleigh und Jeans, welches Spektrum ein Schwarzer Körper abhängig von seiner Temperatur abgeben sollte. Diese Formel war falsch, denn sie erklärte die Messdaten nur für große Wellenlängen gut, mündete aber in die sogenannte UV-Katastrophe am kurzwelligen Ende des Spektrums. Von Wien gab es eine andere Formel, die zwar am kurzwelligen Ende gut zu den Daten passte, aber am langwelligen Ende versagte. Max Planck hat dann also mit den beiden klassischen Theorien zu Elektromagnetismus (Maxwell) und Thermodynamik (Boltzmann) eine Formel gebaut, die einen winzigen Beitrag enthielt, der weder in Maxwells noch in Boltzmanns Theorie eine Grundlage findet: [das Quant](#). Nun war Herr Planck aber ein genialer Physiker in der Zeit, in der es noch keine Quanten gab. Er widmete sich eines Problems, das sich mit den hervorragend entwickelten Methoden und Theorien seiner Zeit – den klassischen Theorien zu Elektromagnetismus und zu Thermodynamik – nicht lückenlos korrekt lösen ließ. In seiner Not erfand Max Planck eine Hilfsgröße, die ihm half, eine Formel hinzuschreiben, mit der Ergebnisse für das Spektrum eines Schwarzen Strahlers herauskamen, die sehr genau den Messwerten entsprach. Die Erfindung des Wirkungsquantums durch Max Planck war de facto eine Entdeckung und nicht bloß eine Erfindung; sie fand trotz der hoffnungsvollen Ankündigung durch das Genie jahrelang keine klassische Erklärung: das Quant folgte nicht aus den gültigen Theorien oder der bekannten Mathematik.

Ich sehe eine Korrelation zwischen der Frage Plancks und unserer heutigen Frage nach der Verknüpfung zwischen Raumzeit und Information. Ich will das auch ein bisschen anreißen:

Die Schwarze Strahlung Plancks verknüpft zwei zunächst voneinander unabhängige Disziplinen der Physik: Wärmelehre und Elektromagnetismus. Zu dieser Zeit gibt es noch keine funktionierende Theorie des Atoms. Es gibt auch keine stimmigen Modelle für den inneren, mikroskopischen Aufbau von Materie. Aber es gibt bereits die statistische Physik nach den bahnbrechenden Arbeiten des Ludwig Boltzmann, der Ensembles unvorstellbar vieler winziger Teilchen untersuchte und erklären konnte, wie sich durch das Zusammenwirken der noch nicht näher bekannten Atome als Individuen plötzlich Größen ergeben, die für jedes dieser Individuen sinnlos sind. Die Temperatur ist ein Phänomen, das erst für Ensembles Sinn ergibt. Ebenso der Druck. Ein isoliertes Korpuskel hat keine Temperatur und keinen Druck. Aber ein System aus zehn hoch zwanzig Teilchen hat Druck und Temperatur. Druck und Temperatur sind physikalische Größen, die sich ausschließlich aus dem Wirken vieler Teilchen aufeinander ergeben. Diesen Größen liegt ein Paradoxon im Bauch, finde ich. In der Thermodynamik unterscheidet der Physiker intensive und extensive Größen. Ändert sich eine physikalische Größe mit der Größe des Systems, nennen wir sie extensiv; Beispiele: die Teilchenzahl oder die innere Energie. Intensive Größen hängen von der Größe des Systems nicht ab. Das heißt aber, wenn ich ein System immer weiter halbiere, bleibt die Temperatur als intensive Größe gleich. Nimm ein Mol eines Gases in einem abgeschlossenen System; keinerlei Austausch mit der Umgebung, nichts kann raus oder rein. Jetzt füge eine Trennwand in die Mitte des abgeschlossenen Systems. Du hast jetzt zwei gleich große Systeme, die jeweils halb so groß sind, wie das ursprüngliche war. In jedem der neuen Systeme sind nur halb so viele Teilchen ( $\rightarrow N$  ist extensiv), wie im ursprünglichen System. Jedes der beiden Systeme hat nur das halbe Volumen ( $\rightarrow V$  ist extensiv). Aber in jedem neuen System herrscht dieselbe Temperatur ( $\rightarrow T$  ist intensiv) und derselbe Druck ( $\rightarrow p$  ist intensiv) wie im ursprünglichen. Die ideale Gasgleichung  $pV = NkT$  verknüpft zwei intensive Größen mit zwei extensiven Größen.  $k$  ist die Boltzmann-Konstante. Aber Ludwig Boltzmann hat diese Größe nur vorbereitet und noch nicht explizit angegeben, sondern erst Max Planck ist es gelungen, sie in den Arbeiten des großartigen Erfinders der statistischen Physik zu erkennen und nach ihm zu benennen. Wenn ich jetzt

immer wiederhole, jeweils das halbe abgeschlossene System nochmal zu halbieren, wird irgendwann einmal ein System herauskommen mit  $N = 1$ . Demnach kann ich einem einzelnen Gasatom die Temperatur  $T$  zuordnen, wenn ich beim Abschließen und Teilen immer sorgfältig war. Das ist paradox, denn  $T$  ist eine Zustandsgröße, die ausschließlich für ein Ensemble von Teilchen definiert ist. Ebenso  $p$ : was will ich denn einem einzelnen Heliumatom für einen Druck zuordnen? Aber im Gedankenexperiment gelingt mir das durch fortgesetztes Halbieren eines exakt beschriebenen Ausgangssystems, das keinerlei Wechselwirkung mit der Umgebung hat. Das wird der Knackpunkt sein: die Trennwand zum Teilen meines Gaskastens wird mit jedem Teilungsschritt wichtiger. Irgendwann kann ich die Trennwand nicht mehr vereinbaren mit der Forderung, das entstehende Teilsystem sei wechselwirkungsfrei zur Umgebung. Die Idealisierung führt ins Absurde, denn die Wand wird in jedem realistischen Kontext mit immer kleinerem System zu immer stärkerem und schließlich beherrschenden Bestandteil des Systems. Eine reale Wand besteht aus Teilchen, dampft Teilchen ab, lagert Teilchen ein: wie soll ich ein System mit einem einzelnen Heliumatom herstellen, das Wände benutzt? Es geht nicht. Wenn ich ein einzelnes Heliumatom beobachten will, muss ich es in einen Potenzialtopf einschließen, der dafür sorgt, dass das Atom keine Wechselwirkungen mit Wänden ausführt. Dazu muss ich es kühlen. Und zwar bis nahe an die unerreichbare Grenze von 0 Kelvin. Das machen die Leute auch, Herr Hänsch zum Beispiel hat dafür einen Nobelpreis gekriegt, dass er an trickreich mit Photonen herunter gekühlten Wasserstoffatomen die genauesten Spektren der Welt gemessen hat. Aber nochmal: die Beobachtung eines einzelnen Atoms setzt voraus, dass wir es gezielt so wechselwirken lassen, bis es nahezu keine „Temperatur“ mehr hat.

Die Temperatur ist eine intensive Größe, die nur Sinn für Ensembles ergibt. Es bleibt dabei. Und es ist heilsam paradox, weil wir daran sehen, wo Idealisierungen der uns bekannt scheinenden makroskopischen Welt krank machen. Mit-hin scheint mir, dass nicht nur das Ganze mehr ist als die Summe seiner Teile, sondern dass auch das Teil mehr ist, als sein Ensemble zu erkennen gibt. Oder wer hätte aus der Kenntnis der Temperatur vermutet, wie komplex ein Atom funktioniert und gebaut ist? Wir lieben solche sprachliche Wegweiser: das Ganze ist mehr als ... Ich denke das gerne umgekehrt und sei es nur aus Protest: das Einzelne ist mehr, als sein Ensemble noch erkennen lässt. Ich will beides und die Natur gibt es mir auch: ich bin ein Individuum und gehöre

dem riesigen Ensemble aller Lebewesen an. Und nichts ist ein abgeschlossenes System. Die Idealisierung funktioniert nicht. Die Probleme der Physik treten immer dort auf, wo abgeschlossene Systeme große Erkenntnisfortschritte gebracht haben und dann jemand anfängt, die Bestandteile zu isolieren. Es scheint, als wäre das Abschließen an sich schon der Fehler. Als sei das Ideal der Freiheit von jeder unkontrollierten Wechselwirkung der eigentliche Sündenfall. Aber gut, immerhin sehen wir, dass es zum Beispiel in so berühmten Arbeitsgruppen wie der unseres lieben Professors Hänsch in der Schellingstraße alltägliche Praxis war und ist, einzelne Atome auf weniger als 1 Kelvin herunter zu kühlen. Ich frage mich, ob ich auch ein einzelnes Wasserstoffatom bei 300 Kelvin beobachten kann. Ergibt das einen Sinn?

Nimm an, du kannst ein Atom mit der Temperatur 1K isoliert betrachten. Dann ein weiteres mit 2K und eins mit 3K und so weiter. Jetzt fügst du all diese Atome als Ensemble in einem System zusammen und schließt es ab. Welche Temperatur wird das Gas haben? An dieser Stelle magst du vielleicht denken, es genüge, aus den Energien der Individuen, die sich ja irgendwie aus den zugeordneten Temperaturen errechnen lassen müssen, die Summe der Energie zu berechnen und dann diese extensive Größe als innere Energie dem Gas zuzuordnen. Aber es werden schreckliche Dinge passieren: etwa Molekül-Bildungen. Gut, das können wir berücksichtigen. Je zwei der Atome werden zusammenrumpeln und H<sub>2</sub> bilden. Da wird Bindungsenergie in die Bilanz eingehen. Das kriegen wir in den Griff. Aber noch was passiert: wir bekommen eine Durchmischung vieler Teilchen. Es gibt einen Beitrag der Mischungsentropie. Entropie? Was zum Teufel ... hat der Ludwig Boltzmann da bloß gefunden: Entropie! Wahnsinnig leistungsfähiges Konzept, das die Idee von Ensembles mit der Idee von Prozessen verknüpft: bei allen Prozessen, die spontan ablaufen, wächst die Entropie. Entropie kann nicht vernichtet werden. Wird die Entropie in einem Teilsystem der Welt verkleinert, muss dafür Energie aufgewendet werden und in der Umgebung muss mindestens so viel Entropie entstehen, wie im Teilsystem verschwindet.

Zack! Ist das nicht irre? Woher will denn das All wissen, wie viel Entropie ich in einem System weg schaufle? Naja – ich muss ja die Energie fürs Schaufeln aus dem All stehlen. Die Entropie hat also eine Verknüpfung mit der Energie. Eine intuitiv sehr vertraute Energieform ist Wärme. Übertrage ich Wärme an ein System, steigt dessen Temperatur. Wärme ist extensiv und Temperatur ist

intensiv; das kann in einer Gleichung nicht miteinander vorkommen, ohne dass noch eine zweite extensive Größe drin steht; sonst geht jede Bilanz baden. Zugegeben, das Argument ist nicht ganz sauber, weil ich ja vom Zuführen einer extensiven Wärmemenge ins System rede und wir hatten das Argument, auf das ich mich berufe, ja nur für abgeschlossene Systeme eingeführt. Zuführen von Wärme ist aber eine Wechselwirkung wenigstens mit einem Wärmebad, also ... siehst du: solche Sachen stimmen in dem Artikel von Juan Maldacenas nicht und er verwendet keinerlei Mühe, es auch nur zu erwähnen oder gar es zu erklären. Es würde den Rahmen der Zeitung sprengen. Und da sage ich: erkläre die Sachen so einfach wie möglich, aber nicht einfacher als richtig. Und Maldacenas Artikel strotzt von Fehlern, die er als Physiker sicher nicht in einer Vorlesung oder Prüfung machen würde. Er passt sich dem Trieb seines Mediums an, in drei Punkten für den Stammtischsäufer pseudo-verständlich zu erklären, welche Korrelation er zwischen Löchern und Knöpfen gefunden haben will. Nach zwanzig Jahren beruflicher Vollzeitforschung stellt er ein Märchen hin, in dem er die Grundlagen seines Fachs verrät und tot schlägt, indem er das massivste Objekt im All als normales Elementarteilchen behandelt. Er sagt nirgendwo explizit, wie die Formel  $ER = EPR$  tatsächlich aussieht, weil das Zielpublikum eh nicht folgen könnte; aber was er *glaubt*, dass es bedeuten *könnte*, damit setzt er uns Flausen ohne Fundament, weil für das Fundament kein Platz da ist in den Kopf.

Dabei wäre es vielleicht hilfreich gewesen, auf die Entropie einzugehen. Denn Entropie bleibt mir auch dann geheimnisvoll, wenn ich die teilweise schwierigen Modifikationen der Übergänge vom abgeschlossenen System über das geschlossene bis hin zum offenen System rekapituliere. Die Entropie kennt immer den Grenzwert, unter den sie nicht fallen darf. Die Entropie des Universums nimmt zu. Ohne wenn und aber. Woher weiß der Rand des Universums, was in der Mitte mit der Entropie passiert? Wie kann das All wissen, wie viel Entropie irgendwo vernichtet wird, damit es in der Summe dann doch stets wachsende Entropie garantieren kann? Da sehe ich mehr Zugang, die Verschränkung als notwendigen Kommunikationsmechanismus zu betrachten, als in dem mathematischen Konstrukt des strukturellen Vergleichs der Formeln für Verschränkung und Wurmlöcher. Bloß: dann kommt der String-Theoretiker halt nicht mit seiner Idee in seinem Fach weiter. Er ist mehr Höriger seiner Strings denn einfach Neugieriger in seiner Idee.

Diese Idee ist offenkundig: das Weltall zu berechnen. Dieser Traum der totalen Kontrolle wütet in den Gehirnen, wohl weil wir genau dieses Prinzip gelernt haben seit Millionen von Jahren: Kontrolle der Parameter der Lebensumstände verbessert die Nahrungsgrundlagen des Kämpfers im Krieg um Ressourcen. Ein besseres Mittel, die Lebensumstände zu kontrollieren, als das Leben in mathematischen Modellen abzubilden, kennen wir nicht. Wahrscheinlich hängt das mit der Entwicklung unseres Gehirns zusammen. Einzellige Organismen haben kein Gehirn. Trotzdem leben sie offenkundig, auch wenn wir keine exakte Definition für „leben“ angeben können. Der kleinste gemeinsame Nenner aller Ansätze, Leben zu definieren, schließt Bakterien ein. Ein Bakterium hat kein Gehirn, weil ein Gehirn die Ansammlung eines Ensembles miteinander kommunizierender, stark vernetzter Neuronen ist. Ein Neuron ist eine Zelle. Ein Wesen aus einer Zelle kann kein Ensemble von Neuronen haben, weil es sich widerspricht, *eine* lebende Zelle zu *sein* und *sehr viele* Nervenzellen zu *haben*. Es ist ein „äquivalenter“ Widerspruch zur Temperatur eines Quants. Da Bakterien nach unserer Beobachtung zielgerichtete Entscheidungen zu treffen scheinen, unterstellen wir ihnen in unseren Forschungen über sie oft eine Denkleistung, die sich in manchen Experimenten zu bestätigen scheint. Wir kämen aber wohl kaum auf die Idee, zu sagen, unser Gehirn verhalte sich wie ein Bakterium. Wir sagen nicht einmal, unser Gehirn verhalte sich, weil es aus vielen Zellen besteht, wie ein Ensemble von Bakterien, das auch aus vielen Zellen besteht. Wir haben herausgefunden, dass Bakterien miteinander kommunizieren, indem sie sich einander annähern und bei inniger Berührung genetischen Code austauschen. Das habe ich vor vielen Jahren in dem Holtzbrinck-Blatt gelesen. Ist das eine Vorstufe von Sex? Nach dem klassischen Bild haben Bakterien kein Geschlecht und sie vermehren sich asexuell. Sollten wir nicht also sagen: unser Gehirn besteht aus fickenden Bakterien? Was hätten wir gewonnen?

Juan Mandacela sagt etwas, das für mich auf genau dieser Ebene funktioniert. Es klingt für mich wie die Verzweiflungstat des Forschers, der um jeden Preis beweisen will, dass er mit seinen hochgradig deterministischen Methoden die Weltformel aus einem Quanteneffekt ableiten könne. Vielleicht stößt er mit diesem Amoklauf am Rande des Wahnsinns tatsächlich eine Tür auf. Vielleicht brauchen wir genau so einen Irrsinn, um bei seiner Widerlegung den verborgenen Schatz zu sehen. Denn in der Tat könnte die Verschränkung eine Erklärung dafür bieten, wie das All den Haushalt seiner Entropie regelt. Die

gesamte Thermodynamik nimmt in der Physik eine Sonderstellung ein. Ihre Hauptsätze sind prinzipiell nicht beweisbar. Sie tragen das Stigma der Heuristik in sich. Die Thermodynamik ist Statistik des Alls. Das schaut bei allen anderen Theorien der Physik anders aus. Im mechanischen Zweig der Quantenphysik erklären wir den Bau der Materie mit Orbitalen, deren Geometrie sich aus Wahrscheinlichkeitsrechnungen ergibt, denn das Kollabieren der Wellenfunktion liefert genau das: Wahrscheinlichkeiten für den Aufenthaltsort der Elektronen, die für chemische Bindungen zur Verfügung stehen. Bei Quanten gelten die Statistiken von Boltzmann und Maxwell (MB) in der Regel nicht. Es mussten erst gültige Statistiken „erfunden“ werden und diese Arbeit haben wieder die berühmten Stars des zwanzigsten Jahrhunderts geschaffen: Bose und Einstein (BE) für bosonische Teilchen, etwa Photonen. Fermi und Dirac (FD) für fermionische Teilchen, etwa Elektronen. Quantenteilchen verhalten sich entweder wie Fermionen oder wie Bosonen.

Was tut so eine Statistik überhaupt?

Du hast ein makroskopisches System mit seinen typischen makroskopischen Zustandsgrößen Temperatur, Druck, Volumen und Stoffmenge. Das System ist bestimmt durch das, woraus es besteht. Das sind mikroskopische Quanten. Also etwas, das du in ungeheurer und unbeherrschbarer Zahl vorliegen hast und über das du im Einzelnen nichts weißt. Jetzt willst du wissen, wie sich das Ensemble verhält, ohne die unzähligen Quantenbeiträge kennen zu müssen. Genau dafür ist die Statistik gemacht. Maxwell und Boltzmann wussten noch nichts von Quanten, also konnte ihre Statistik nur eine klassische sein. Für Quantensysteme funktioniert sie nicht. Das haben die schlaunen Leute gemerkt und sie haben Quantenstatistik eingeführt. Das ist jetzt irgendwie verwunderlich, weil doch jedes makroskopische System aus Quanten aufgebaut ist und wenn die MB-Statistik gut ist, wie soll sie dann für Quantensysteme nicht passen? Das hängt wieder mit verschiedenen Eigenheiten und Grenzwerten zusammen. Hier speziell mit Energie, Reinheit und Spin. Faszinierend ist die prinzipielle Ähnlichkeit des mathematischen Kerns der drei unterschiedlichen Verteilungsfunktionen der Besetzungszustände:

$$\text{MB: } \mu(E) \sim 1 / (\exp(E/kT))$$

$$\text{FD: } \mu(E) \sim 1 / (\exp(E/kT) + 1) \quad ; \text{ Fermionen haben } \underline{\text{halbzahligen Spin}}$$

$$\text{BE: } \mu(E) \sim 1 / (\exp(E/kT) - 1) \quad ; \text{ Bosonen haben ganzzahligen Spin}$$

Das weiß ich nicht mehr auswendig, ich muss also spicken. Das sagt mir, es ist nicht meine Welt. Ich habe es mir damals antrainiert und konnte es ganz passabel, aber das war zwanghaft, sonst hätte ich nicht mehr aufgehört, damit im Kopf zu spielen. Da ich es nachschauen musste, ist klar: es ist nicht meins. Trotzdem fasziniert mich die Einfachheit der Darstellung und die Interpretierbarkeit, die sich für Ingenieursanwendungen bestens bewährt. Aber sind Anwendungen nicht fade? Tand, Tand ist alles von Menschenhand. Juan Maldacena spricht garantiert besser Mathematisch als Englisch oder Deutsch. Mathematisch ist wohl seine Muttersprache. Darf er dann so einen schlechten Artikel verbreiten oder sehe ich nur nicht, wie toll der Artikel ist, weil ich die eklatante Begrenzung meiner Denkfähigkeit nicht erkenne?

Obwohl ich da sicher nicht objektiv sein kann, da es um mein Hirn geht, über das ich mit meinem Hirn nachdenke, fühle ich mich ungewöhnlich sicher in meinem Urteil: Juan Maldacena schwafelt märchenhaften Mist in diesem einzigen mir von ihm bisher bekannten Text. Ich traue ihm aber freilich zu, unfassbar tiefere Kenntnisse und Einblicke in die Materie zu haben, als ich. Das ist schon auch irgendwie paradox, oder? Deshalb schreibe ich so viel dazu, weil das wahnsinnig erregend und spannend ist, sich klar zu machen, dass ich als Laie mir anmaße, den Artikel eines anerkannten Spezialisten und Avantgardisten der härtesten aller Naturwissenschaften zu verreißen. Hauptsächlich motiviert mich wohl meine Wut, dass er mich enttäuscht. Juan hat hochtrabende Erwartungen in mir gepflanzt. Dann hat er nichts davon eingelöst und mich im Regen seiner schiefen Gleichnisse stehen lassen. Als Alternative kann ich den Vorfall ignorieren. Oder ich werde konstruktiv. Wie aber soll ich etwas konstruieren, an dem er sich die Zähne ausbeißt?

Das ist der Effekt solcher Artikel und TED-Vorträge: du verstehst eigentlich nichts, weil unerlaubt vereinfacht wurde. Dir wurden aber so irrwitzig drastische Indizien hingeworfen, wie viel Spezialistentum und Fachgenie in dieser Vereinfachung hinter einem dir unverständlichen Methodikapparat steckt, dass es zu spät für dich ist, auf den Zug aufzuspringen. Du findest den Anschluss sicher nie mehr. Also bleibt dir nur das Wundern und Anbeten. Die Wissenschaftler werden zu Priestern und Bischöfen heiliger Geheimnisse. Sie können mit Gott sprechen, du kannst nur zu Gott beten, denn du verstehst schon seine Priester nicht, die dir Gottes Weisheit in deine Sprache übersetzen. Du kannst nur frustriert werden. Zuerst aber wird dir der Him-

mel versprochen: lies meinen Aufsatz und du wirst endlich kapieren, wie die Raumzeit gebaut ist! Wenn du es dann nicht kapierst, bist du halt zu blöd. Und weil die wenigsten Leser gerne zugeben, dass sie zu blöd sind, kann Juan einen beschissenen Dreck schreiben und wird trotzdem vergöttert werden. Denn die Menschen werden ihm zustimmen, um nicht als blöd unangenehm aufzufallen.

Noch einen tragischen Aspekt will ich wenigstens andeuten: Juan Maldacena gehört zu den Wissenschaftlern, die von der Neugier auf wesentliche Erkenntnisse über die Natur stärker getrieben werden als auf die ingenieurtechnische Anwendung zu spitzen. Das sind die „Guten“, sag ich mal salopp. Dass ausgerechnet einer aus der sympathischen Gruppe die Grundlagen seines heiligen Grals in der populärwissenschaftlichen Aufklärungsarbeit ans Kreuz nagelt, schmerzt doppelt. Und es potenziert sich nochmal dadurch, dass er den Mut hat, wie Hans Peter Dürr bis zum dünnen Rand des Eises zu schreiten. Leider geht Juan viel zu weit über den Rand, der gerade noch getragen hätte, hinaus. Gerade als Grenzgänger sollte ein Wissenschaftler sorgfältig arbeiten. Sorgfalt kann ich in dem Artikel am wenigsten finden.

Ich habe aus dieser katastrophal schlechten populärwissenschaftlichen Schande eine gewaltige Inspiration erhalten, die wahrscheinlich zu nichts führt. Vielleicht aber doch irgendwann zu einer geilen Kurzgeschichte. Wer weiß. Er hat mich – wie gesagt – erregt und maßlos enttäuscht. Die Erregung ist geblieben. Information ist eng verknüpft mit Entropie. Entropie ist eng verknüpft mit Temperatur. Temperatur ist eine intensive Zustandsgröße eines Ensembles. Entropie ist extensiv. Ist Information extensiv oder intensiv? Temperatur ist eine kontinuierliche Größe. Tatsächlich? Ist die Temperatur nicht vielleicht quantisiert? (Eine statistische Größe eines makroskopischen Zustands ... ? Nie!) Die Temperatur ist über Wärmeaustausch und Entropie definiert. Wie ist Information definiert? Es gibt noch keine Einigung darüber; über Information besteht kein Konsens. Deshalb ist der Spruch „wir leben in einer Informationsgesellschaft“ so hohl, weil wir keine deutliche und eindeutige Beschreibung dazu haben, was der Begriff Information eigentlich aussagen soll. Geil ist, dass Information mit der Entropie verknüpft wird, obwohl wir nicht wissen, was mit Information gemeint ist. Schon die Frage, ob Information quantisiert sei, führt zum Gehirnkrampf. Was wäre denn zum Beispiel die kleinste Einheit der Information? Das Informationsquant?

Dazu noch einmal Max Planck: der Energieaustausch zwischen Materie und elektromagnetischem Feld passiert immer in Portionen der Größe  $hf$ , worin  $f$  die Frequenz des Austauschteilchens ist ... also doch wohl eine kontinuierliche Größe. Prinzipiell ist die Frequenz durch eine reelle Zahl mit der Benennung eins durch Sekunde bestimmt. Da wir Zeit bisher nur als Kontinuum erfahren haben, ist Frequenz eben auch kontinuierlich. Aber das ändert sich in dem Augenblick, in dem wir den Resonator oder eine entsprechende Rahmenbedingung hinzunehmen. Zum Beispiel das Wasserstoffatom. Es gibt nur wenige Elemente: die Resonatoren für die Materie-Photon Wechselwirkung sind leicht abzählbar. Dazu kommen noch all die Gitter von Festkörpern, in denen die Austauschpakete Phononen heißen, also so was wie akustische Quanten. Da kommt zwar einiges zusammen, aber das ist alles noch abzählbar. Trotzdem sollte klar werden: die kleinsten Energieportionen, die zwischen Materie und Feldern getauscht werden können, führen zu kontinuierlichen Spektren. Löcher in einem Spektrum gelten uns immer als Nachweis des Vorhandenseins eines entsprechenden Absorbers. Fraunhofer-Linien im Sonnenspektrum etwa. Weil wir ohne solche Absorber nur kontinuierliche Spektren von Schwarzen Körpern kennen. Die Quantisierung hat also was zu tun mit dem jeweils speziellen Einzelfall. So wird es auch mit der Information sein. Ein Informationsquant kann beliebig winzig sein, wenn ich bei den Rahmenbedingungen freie Hand habe. Ein Bit sagt gar nichts aus. Ein Bit Information ist der Wahrheitsgehalt einer Aussage. Wenn ich frage: „Geht morgen die Welt unter?“ dann würde eine sichere Antwort von einem Bit schon recht große Bedeutung haben. Wenn ich frage, ob sich genau zwei Sauerstoffmoleküle jetzt gerade in mir befinden, die Caesar während seiner Erdolchung im Senat von Rom aus geschnauft hat, kann mir der Wahrheitsgehalt des „wahr“/„falsch“ Bits der richtigen Antwort vollkommen am Arsch vorbeigehen. Also – was hat ein Bit mit Information zu tun? Nur, dass der „Resonator“ hier ein Computer ist. Sonst eigentlich nicht viel. Wir können Information nicht messen. Sie ist eine ideale Spielwiese für Schwätzer, Genies und Irre.

Aber die Pioniere der Informationstheorie sagen: Information ist mit Entropie verknüpft. Sind sie Wegbereiter für das Ziel, Information messbar zu machen? Auf welches Informationsquant werden wir das Messgerät kalibrieren? Und woher kommt diese Schwammigkeit der Information?

Alle Informationen über ein Schwarzes Loch kommen von seiner Oberfläche zu uns, weil hinter der Oberfläche (Schwarzschild-Radius) nichts mehr aus dem Loch heraus kommt. Nimm an, wir hätten durch irgendeinen Geniestreich eine griffige Definition für Information, die sie in den Reigen der physikalischen Größen aufzunehmen erlaubt; quasi echte, leibliche Schwester der Temperatur. Dann dürfte ich fragen, ob der Quotient aus der vom Schwarzen Loch geschluckten Information zu der von der Oberfläche als Todesschrei ins All abgestrahlten Information eine bestimmte Größe ist, die nur von der Größe des Lochs abhängt. Oder von der Art der geschluckten Materie? Oder ... wovon hinge dieser Quotient ab? Wir haben durch diese Überlegung schon was gelernt: Information ist eine extensive Größe. Sonst gäbe die Bildung des Quotienten keinen Sinn. Wir haben aber den Quotienten als „Wirkungsgrad“ des Lochs intuitiv akzeptiert. Obwohl wir nicht wissen, was Information ist, sagt unsere Intuition: Information ist eine extensive Größe. Ist das irre? Wenn im All alles mit allem so verknüpft ist, dass jedes winzige Teilsystem irgendwie geheimnisvoll Teil hat an allem außen herum, dann entspricht das der Idee des holographischen Prinzips. Letztlich sagt das holographische Prinzip, dass es möglich ist, die Information einer Audio-CD auf ein Zehntel des Speichers oder noch weniger als mp3 zu komprimieren, ohne beim Genuss der Musik Mangel zu leiden.

Einen Schritt weiter: ist das Innere eines Schwarzen Lochs Teil des Universums? Das Innere des Lochs ist fürs All so was wie ein WOM. Das Loch liest alle Informationen, die das All in seine Richtung sendet. Photonen, Materie. Schluckt alles. Ein Bruchteil entkommt als Todesschrei der geschluckten Information, gut, aber das kommt nicht aus dem Loch selbst, sondern von seiner Oberfläche. Das Loch(-Innere) ist ein WOM: liest alles, schreibt nichts. Aus seiner Sicht. Aus der Anwendersicht: das All kann ins Schwarze Loch nur hinein schreiben, aber nichts aus ihm lesen, daher der Name WOM: write only memory. In der Elektronik ist der WOM ein riesig gelungener Gag.

Einen Schritt von der anderen Seite: Ist die Verschränkung zweier Quanten die Repräsentation einer kleinsten Portion relevanter Information über einen Aspekt der Struktur des Alls? Das ist jetzt gar nicht so trivial. Im Spektrum eines Wasserstoffatoms (Balmer-, Paschen-, Lyman-, ... Serie) steckt die Information über die elektronischen Mikrozustände des Atoms. Wie verhalten sich die Größen der Informationsquanten aus dem Spektrum zu den ent-

sprechenden Informationsgrößen bei Verschränkung? Ich kann noch nicht einmal eine Relation angeben, was von den beiden wie viel größer oder kleiner ist als das jeweils andere. Also: was weiß ich schon über Information?

Jetzt geht der Juan Maldacena her und sagt: Max, ich glaube, die Raumzeit ist eine Socke, die aus Verschränkungsinformation gestrickt ist. Er hätte sich doch denken können, dass mich das für den Rest meines Lebens aufwühlt! Obwohl er nichts dazu erklärt: der Gedanke ist einfach köstlich. Ich frage mich jetzt plötzlich, wie sich ein Photon fühlen muss, wenn es den Artikel liest. Nutzlos! Hetzt sich ab, Information mit Lichtgeschwindigkeit durchs All zu schaufeln – aber der Igel ist immer schon längst dort, wenn das Photonenbunny ankommt. Die Lichtgeschwindigkeit ist die begrenzende Größe bei der Übertragung von Information durch den Raum. Laut Relativitätstheorie. Laut derselben Relativitätstheorie sollte es Singularitäten geben, Schwarze Löcher. Zwei solche Löcher könnten durch ein Wurmloch verbunden sein, das gibt die Mathematik her. Wie soll ich mir vorstellen, dass das Loch und der Knopf gerade jene Struktur erzeugen, die sie ad absurdum führen? Das ist paradox. Deshalb ist es erregend.

Juan Maldacena führt seine Hypothese, Löcher könnten verschränkt sein, auf die Tatsache zurück, dass die Teilchen, die das Loch frisst, verschränkt sein können. Auch so ein schwacher Punkt. Trotzdem – gehen wir von diesen makroskopischen Objekten mal weg und sagen: wie schauen Statistiken aus, wenn wir Verschränkung darin berücksichtigen? Bei einer Verteilung zählen wir nur Mikrozustände, streng genommen. Also gibt es da zuerst einmal keine Zeit oder zumindest keine Prozesse. Wir zählen einfach alle Quantenzahlen der dem Ensemble angehörenden Objekte. Wenn da Verschränkung eine Rolle spielen sollte, dann muss sie schon in den bekannten Statistiken drin sein, ohne dass wir ihren Anteil erkennen können. Denn von Verschränkung sagen die Statistik-Schöpfer nichts. Oder explizit nichts. Es gibt aber eine Rahmenbedingung bei Quanten. Das ist die Ununterscheidbarkeit. Diese Eigenschaft, dass ich Quantenteilchen nicht nummerieren kann ... ist das vielleicht eine Folge der Verschränkung? Genau durch diese Eigenschaft der Ununterscheidbarkeit wurden die BE- und die FD-Verteilung der Quantenstatistik ja notwendig; MB lieferte einfach falsche Ergebnisse, wenn Systeme jenseits des Gültigkeitsbereichs damit angeschaut wurden. Das geht analog zur UV-Katastrophe beim Rayleigh-Jeans Strahlungsgesetz: stimmt prima im

Infrarot und wird unsinnig fürs Ultraviolette. Die MB-Statistik stimmt prima für Systeme, denen ich im Alltag begegne, aber nicht für Laborsysteme mit ganz bestimmten, extremen Eigenschaften: Reinheit, Kälte ... was in der Biosphäre alles so nicht vorkommt eben. Aber: ist ein Grund hinterlegt, der erklärt, *wie* es unmöglich ist, Quantenteilchen zu nummerieren? Oder ist das wieder nur ein pragmatisches Postulat? Aus der Heuristik geboren? Wie lautet das hergeleitete Gesetz, wonach es nicht möglich ist, Quantenteilchen eines Ensembles individuell zu unterscheiden? Da muss ich mir klar machen, dass Unterscheidbarkeit keine Eigenschaft des Objekts ist, sondern eine Eigenschaft des Beobachters. Wenn ich keine konkrete Möglichkeit habe, ein Quantenteilchen anzuschauen, ohne es dabei zu verändern, wodurch es ja ein anderes Quantenteilchen würde, wenn ich es änderte ... tja: das war genau der Ausgangspunkt für das Dilemma der Physiker vor hundert Jahren. Da wurde plötzlich klar, dass das am wenigsten invasive Verfahren einer Messung ist, ein Lichtquant zu verschlucken. Wie will ich denn ein Lichtquant beobachten? Sobald ich es sehe, ist es absorbiert und damit weg. Da wird die Messung auf einmal zu einem existenziellen Problem für das gemessene System. Ich kann eben ein Quantenteilchen nicht anschauen, ohne wenigstens seinen Zustand damit komplett zu verändern. Wenn ich das Hüllenelektron eines Wasserstoffatoms, das relativ „groß“ ist verglichen mit einem Photon, anschauen will, bin ich darauf angewiesen, zu warten, bis es mir ein Photon schickt, das ich schlucken kann. Wenn aber das Elektron was sendet, ist es nachher nicht mehr dasselbe, sondern hat seinen Mikrozustand eben genau um den gesendeten Beitrag geändert. Damit das nicht ewig dauert, auf so eine Quantensendung zu warten, kann ich das Atom anregen. Damit ändere ich den Mikrozustand zwar, aber dafür kann ich dann beim schnell folgenden Zerfall der Anregung zuschauen. So mache ich die Spektren: viele Messungen in kurzer Zeit. Aber wie ich es auch einrichte: in allen Fällen der Beobachtung von Mikrozuständen gibt es keine Passivität mehr; der Experimentator ist immer ein Wüterich. Was er sieht ist im gleichen Augenblick weg, weil sehen heißt: ein Photon absorbieren. Und wenn ich was makroskopisches anschau, ist das was völlig anderes. Da liegt der große Unterschied zwischen der Alltagswelt und der Nanowelt. In der Quantenwelt ist die kleinste Form des Hinschauens bereits die Vernichtung dessen, was ich sehen will. Da ist es doch wenig verwunderlich, dass wir ein Problem mit der Interpretation der Schrödingergleichung haben. Die Gleichung beschreibt ein Quant, sagt uns aber überhaupt nichts darüber, wo es ist oder wie es aussieht.

Wollen wir es willen, müssen wir die Gleichung auf eine Art behandeln, die der Physiker als Kollaps bezeichnet. Dem Schlucken eines Quants entspricht der Kollaps seiner Beschreibung. Aus die Maus. Zu messen, was für ein Mikrozustand vorliegt, heißt, diesen Mikrozustand zu zerstören. Nachher liegt der Zustand vor, der dem Messergebnis entspricht, dass wir die Information aus dem Kollaps absorbiert haben.

Fragt sich, ob dieses Bewusstsein für die Besonderheit der Arbeit mit Quantensystemen nicht elementar vorausgesetzt werden muss, wenn wir über die Verschränkung reden. Ich meine – Herrn Maldacena ist das freilich in Fleisch und Blut übergegangen – aber wie kann er einem Publikum seine Geschichte auftischen, dem er die Verschränkung mit Handschuhen erklärt, ohne sich klar zu machen, dass ein Publikum, das solche Stammtisch-Metaphern braucht, wohl eher nicht in dem Bewusstsein lebt, dass jede Messung zerstört, was sie misst? Und wenn das Publikum elitär genug ist, die fundamentale Problematik der Quantenwelt stets gegenwärtig zu haben, wozu dann die Handschuhe?

Der Exkurs kam mir zu der Frage, woraus wir schließen, die Quantenteilchen seien ununterscheidbar. Ist es nur, weil wir einen Mikrozustand nicht passiv anschauen können, ohne ihr zu zerstören?

Spannung wächst. Jetzt müsste ich recherchieren, womit die Physiker herleiten, dass Quantenteilchen ununterscheidbar sind. Und warum funktioniert die MB-Statistik im Grenzfall großer Objekte so gut, wenn doch diese großen Objekte auch aus Quantenteilchen zusammengesetzt sind, die ununterscheidbar sind? Da beißt es bei mir zum Teil aus, ich erinnere mich nicht mehr an alles Wichtige. Da hilft jetzt auch kein Spicken mehr. Denke ich. Das müsste ich knallhart recherchieren, runderneuern im Hirn. Dazu habe ich keine Lust. Ich sage einfach: die Ununterscheidbarkeit der Quantenteilchen ist wie ein Paar Handschuhe, deren einer daheim vergessen wurde, bloß anders.

Mit ein bisschen Glück kriege ich für diesen Satz einen Preis.

Was ist Glück? Es ist eine wenigstens als angenehm empfundene Fügung, die im Widerspruch zum Erwartungswert steht, der sich aus der verfügbaren Information über das System berechnen lässt. Welchen Erwartungswert hat

die Aussage, dass ich dich auch nur (also: wenigstens) ein einziges Mal im Arm halten darf und küssen? Kennt das All diesen Erwartungswert und wenn ja: wie ist er gespeichert? Wie viel Information steckt in der richtigen Antwort? Wie viel Information steckt in meinen Bauplänen? Wie hängt die Größe der Information in meinen Bauplänen davon ab, wohin ich diese Baupläne gebe? Information sieht nach dieser Überlegung aus, wie ein Maß für Hellschere. Wenn meine Baupläne zu passender Zeit am passenden Ort sind, entsteht ein Organismus. Ist dieser Organismus mit mir verschränkt? Das wäre dann ein Beispiel für eine makroskopische Verschränkung. Ist Verschränkung tatsächlich eine Größe, die elementar mit Information zu tun hat? Dann sollte die Vereinigung von DNA einer Eizelle und DNA eines Spermiums ein verschränktes Makroobjekt hervorbringen. Quantenverschränkung kann durch Thermodynamik aufgehoben werden. Was zerstört die Verschränkung von Makroobjekten?

### ER = EPR

Aha! Äh ... ich nehme als Hypothese an, das Universum sei ein Schwarzer Kasten, in dem sich Informationen befinden und sonst nichts. Bloß ein Gebilde aus informationsdichten Wänden und drinnen alle Informationen der Welt, die es gibt, egal, was das auch sein mag.

Die Information in dem Kasten gebiert Strukturen: Raum, Zeit, Materie, Felder. Die Strukturen bilden – angeleitet von der Mutter Information – Gesetze, wie sie miteinander umgehen. Und sie sterben. Denn die Entropie wächst, das ist äquivalent zu: Information verschwindet. Wir lernen, dass der Kasten, der die Informationen von allem im All einschließt, nur eine Projektion dieser Informationen ist: die Raumzeit. Dann bin ich selbst eine Projektion dieser Informationen: ein komplexer Organismus aus Masse in der Raumzeit. Alles nur Projektionen aus den Informationen übers All. Wieder salopp sage ich jetzt: Leben ist das Konzentrat an Information, das diese Information ausbildet, weil sie sich dagegen wehrt, durch die Zunahme der Entropie abzusterben. Wenn die Raumzeit aus Verschränkung gewebt ist, dann besteht sie aus Information. Verschränkung ist zuerst einmal nur raumzeitlose Information über eine Quantenzahl und die Tatsache, dass diese Quantenzahl bei zwei ununterscheidbaren ... oha, merkst du was?

Verschränkung erfordert doch wohl, dass ich ein Paar von gleichartigen Quantenteilchen habe. Ununterscheidbarkeit ... woher weiß ich dann, dass es zwei verschiedene sind und welches davon welches ist? Die Ununterscheidbarkeit erfordert ebenso wenig wie die Verschränkung, dass die beiden Teilchen an verschiedenen Orten lokalisiert sein müssen. Was ist für ein Quantenteilchen denn schon Lokalisierung? Der Erwartungswert der kollabierten Wellenfunktion. Wo ich das Ding also finde, wenn ich es messe. Solange ich es nicht messe, ist es überall. Mit mehr oder weniger großer Wahrscheinlichkeit auf Sirius, in der Sonne oder auf dem Mond. Oder im Schwarzen Kasten der Information, genannt: das All. Da immerhin auf jeden Fall. Das bedeutet: der natürliche Zugang zum Raumzeit-Problem ist es, die physikalischen Eigenschaften der Information zu untersuchen. Einstieg dafür ist die Quantenstatistik. Erstelle eine Liste aller Quantenzahlen im All. Stelle fest, welche Rolle in dieser Statistik die Verschränkung spielt. Leite daraus eine Gleichung ab, die der Definition der Temperatur über die Entropie entspricht. Untersuche anhand der Gleichung den Wert der Intuition, dass wir Information für eine extensive Größe halten. Falls sich die Intuition bestätigt und Information eine extensive Größe ist, dann suche nach einer Metrik, die die Größe eines Systems nach dem Ergebnis „Inhalt der Information“ misst. In dieser Metrik wird hoffentlich eine Diskrepanz sichtbar zur Raumzeit.

Oder würde etwa nicht erstaunen, dass in manchen Kubiklichtjahren des leeren Raums weniger Information steckt, als in einem Mäusehirn? Außer das holographische Prinzip gilt in extremo und alle Information aus dem Mäusehirn ist mit jedem Teilchen des Alls so verschränkt, dass wir im interstellaren Vakuum unsere Baupläne wiederfinden. Ist es eine legitime Folgerung der Hypothese von Juan Maldacena, dass dieses so unvorstellbar glatte, geschmeidige, stetige Phänomen der Raumzeit aus dem Garn der Verschränkung gestrickt sein soll und folglich mit zunehmender Entropie löcherig werden muss, wie Schweizer Käse? Ab welcher Grenze der Entropie des Alls würden wir merken, dass unsere Raumzeit auf uns gewohnten Skalen diskontinuierlich wird? Wohin verschwindet die Information? In Schwarze Löcher? (sic!) Aber die Thermodynamik macht doch überall in den zugänglichen Bereichen des Alls ständig neue Entropie. Jeder spontan ablaufende, irreversible Prozess erzeugt Entropie. Ergo: vernichtet Information. Nein, die Verschränkung als Strickmaschine der Raumzeit wirft unzählig mehr Fragen auf, als sie Antworten gibt. Also mehr als Null, denn ich weiß kein physikali-

ches Problem, das mit dieser Hypothese gelöst werden kann. Das mag ich in der philosophischen Ecke meines Hirns, aber in der Physikabteilung strebe ich schon nach Antworten. Das dürfen gerne auch Antworten sein, an die sich neue Fragen anschließen. Aber zuerst einmal muss eine physikalische Theorie eine beobachtete Tatsache erklären. Und zwar besser, als die vorangegangenen Theorien.

Jetzt fühlt sich mein Hirn an wie ein Ensemble von Penicillin vergifteter Bakterien. So müde bin ich. Ich schlafe. Ich wache auf. Ich bin ich. Wo ist wo. Wann ist wann. Ich bin mit meinem Leben verschränkt. Seit 57 Jahren. Ich setze mich noch einmal hin und kann es nicht lassen, auch diesen Punkt zu kommentieren, den Juan Mandacela vorbringt:

Da die Strahlung aus der Oberfläche des Lochs Mikrozustände repräsentiert, die mit den Mikrozuständen verschränkt sind, welche ins Loch stürzen, werden wir vielleicht einmal durch Analyse der Strahlung ins Loch hineinschauen können. Denn in der Strahlung sind ja die Verschränkungspartner derer, die dann drin sind. Ich habe Herrn Maldacena so verstanden, auch wenn er es anders formuliert hat. Sein Artikel hat mir diese Spekulation suggeriert. Also: woher weiß ich, welche Information der Strahlung zu einer Verschränkung gehört, die beim Trennen der Verschränkungspartner nicht zerstört worden ist? Woher weiß ich beim Messen eines Mikrozustands aus der Strahlung, dass dieser Mikrozustand nicht auf dem Weg zu meinem Absorber verändert wurde? Was weiß ich über die Verschränkung der Quanten, die in unserer Sonne fusionieren? Herr Mandacela rechnet und argumentiert mit Schwarzen Löchern, wie sie real im All herumschwirren. Das nächstgelegene Schwarze Loch bedeutender Größe dürfte sich im Zentrum unserer Galaxis aufhalten. Wir sehen es nicht. Da ist zu viel interstellarer Dreck zwischen uns und dem Pol der Milchstraße. Wollen wir nicht erst einmal hergehen und eine kleine, leichte und überschaubare Aufgabe lösen, ehe wir uns an die große Vision wagen? Daher schlage ich vor, die These, verschränkte Teilchen kämen in der Natur dermaßen häufig vor, dass sie das gewaltige Konstrukt der Raumzeit gebären, am Objekt zu testen, bei dem es am leichtesten möglich sein sollte. Unsere Sonne strahlt unvorstellbare Mengen an Information zu uns. Die Strahlung ist jeweils 500 Sekunden unterwegs zwischen der Oberfläche des Sterns und unseren Sensoren. Wir bekommen von der Sonne rund tausend Watt Strahlungsleistung pro Quadratmeter Absorber. Das ist

eine ideale Situation, um Statistiken zu gewaltig großen Ensembles zu machen. Wir können nicht ins Innere der Sonne schauen. Wir können ausrechnen, dass es da drin wohl rund 20 Millionen Kelvin heiß sein dürfte, wenn ich mich recht erinnere. Wir sehen aber nur eine Strahlung, die von einem Gebiet kommt, das 6000 Kelvin hat. Die Sonne ist in dieser Hinsicht ein gutes Modell für ein Schwarzes Loch: wir kriegen Strahlung ausschließlich von der dünnen Oberflächenschicht des kosmischen Objekts, können nicht hineinschauen und empfangen so gut wie keine Photonen aus dem Inneren. Setzen wir also die Sonne als Modell, stellt sich die Frage: können wir aus dem exorbitant reichhaltigen Angebot an Quanten, die auf denkbar kürzestem Weg weitestgehend unverfälscht gegenüber ihrem Ursprung zu uns kommen, irgendwelche Informationen herauslesen über Verschränkung von Teilchen im Inneren des Fusionsreaktors Sonne?

Freilich ist das Modell nicht perfekt, denn die Sonne ist kein Schwarzes Loch. Aber dafür sind die Nebenbedingungen ideal: große Nähe, leerer Raum, große Datenmenge. Alle Methoden, die wir brauchen, um der Strahlung eines extrem weit entfernten Schwarzen Lochs Informationen abzurufen über das Innere, indem wir – wie auch immer – Verschränkungsmerkmale analysieren, all diese Methoden können wir extrem bequem an der Sonne entwickeln und testen. Wenn ein Schwarzes Loch als normales Quantenobjekt gerechnet werden darf, warum dann nicht auch die Sonne? Ist das zu langweilig? Ist uns die Sonne trivial geworden? Würden wir nicht immer schon gerne in die Sonne hinein geschaut haben? Wir können es nicht, weil es da diese Grenzfläche gibt. Die primäre Strahlung, die bei der Fusion entsteht, wird komplett im Inneren resorbiert. Dann bilden sich Kaskaden von Photonen, wobei nach außen hin die mittlere Temperatur sinkt. Das Gas der Sonnenoberfläche strahlt alle Photonen, die bis dorthin kommen (das sind praktisch nur solche, die auch dort entstehen durch die thermische Anregung des Plasmas in diesem Außenbereich, geheizt mit der Leistung des Fusionsreaktors darunter), ins All ab – auf diese Weise wird die Oberfläche der Sonne so extrem kalt im Vergleich zu ihrem Inneren. Die Abstrahlung kühlt das abstrahlende Gebiet, weil dort die ganze gewaltige Wärmemenge eben durch die Strahlung für die Sonne verloren geht. So sehen wir immer nur Licht von der Oberfläche, Licht bei 6000 Kelvin und nicht Licht bei 20 000 000 Kelvin aus dem Inneren. Aber sollte nicht das Licht der Außenschicht über Verschränkung Informationen aus dem Inneren haben, wenn doch die Hypothese sagt: die Raumzeit wird

durch Verschränkung gebildet? Die Sonne steckt genauso in der Raumzeit, wie wir selbst und die Oberfläche eines Schwarzen Lochs. Und es gibt ziemlich viele Teilchen in der Sonne. Schließlich ist die Dichte in der Sonne groß genug, dass sie – diese Sonne – messbar die Raumzeit verkrümmt. Licht von weit entfernten Sternen, das die Sonne streifend zu uns gelangt, wird vom Weg abgelenkt – das war gemäß meiner Erinnerung der erste handfeste Beweis für eine der Konsequenzen der Relativitätstheorie: dass ein Stern um genau den vorhergesagten Betrag gegen seine tatsächliche Himmelsposition verschoben in unseren Teleskopen auftauchte. Eine Sonnenfinsternis war für diese Messung notwendige Bedingung gewesen. Wenn also die Sonne den laut Relativität vorhergesagten Einfluss auf die Raumzeit hat, muss sie wesentlich teilhaben an der „Morphogenese“ der RaumKnotenZeit nach der Hypothese Herrn Mandacenas. Also muss die RaumKnotenZeit gebärende Verschränkung der Quanten durch die makroskopischen Eigenschaften der Sonne messbar modifiziert werden, so dass wir davon ausgehen müssen, dass die Hypothese auch an Messungen des Sonnenlichts geprüft werden kann.

Aber wen interessiert heute schon die Sonne? In jedem SciFi-Film gehören Wurmlöcher zum Standard und Holtzbrinck bringt natürlich keinen Schnee von gestern aufs Tablett seines elitären Leserkreises. Langsam wird es mir sogar schon peinlich, Abonnent dieser Zeitung zu sein. Seit der Chefredakteur der deutschen Ausgabe gewechselt hat, werden die Artikel immer lauter und Sensationen geifernder, aber der wissenschaftliche Gehalt der Artikel geht den Bach runter. Ich bin nicht sicher, ob es nur an der beschissenen Aufmachung liegt, vielleicht sogar primär ganz gute Forschung in populäre Prosa auf dreibeinigen Hockern zu präsentieren, oder ob wir inzwischen tatsächlich nur noch Scheiße erforschen, die uns als feuchter Wunschtraum einer lieblosen Kindheit überfällt, den wir dann hinter abstrusem Popanz unangemessen aufgeblähten Spezialistentums verstecken.

Ich weiß es *wirklich* nicht. Vielleicht werde ich auch bloß alt :) raumzeitlich gesehen jedenfalls. Vielleicht. Ich überlege, ob ich mir Handschuhe kaufe.

## Anhang:

### *A 1 ) Eine kleine Bemerkung zur Temperatur für Menschen, die das Geld für eine physikalische Größe mit der Dimension einer Währung halten.*

Eine Größe, die erst zu existieren beginnt, wenn sehr viele Teilchen als Ensemble zusammenwirken, ist für Menschen, die nicht Physik studiert haben, meistens schwer vorstellbar. Unsere Ausbildungspläne bringen uns Informationen über Zusammenhänge bei, die für das Funktionieren des Wirtschaftssystems wichtiger sind und unterdrücken dafür schädliche. Daher ein allgemein angemessenes Beispiel für eine Größe aus dem Wirtschaftsleben, die manche strukturelle Ähnlichkeit mit der Temperatur hat.

Jede Woche werden im Lotto (6 aus 49, deutscher Lotto- und Totoblock DLTB) rund 80 Millionen Euro als „Spieleinsatz“ für zwei Ziehungen (Mittwoch und Samstag) gebucht. Vom Spieleinsatz wird gemäß einem hierarchisch gestaffelten Gewinnplan für jede Gewinnklasse die jeweilige Quote ermittelt und veröffentlicht. Ein Einzeltipp erfordert den Einsatz von 1,00 €. Es werden also rund 80 Millionen Tipps abgegeben. Davon gewinnen rund 3 Millionen Tipps an einem der beiden Ziehungstage zu jeweils einer der 9 Gewinnklassen die nach dem Gewinnplan verteilten 50% der Gewinnausschüttung. Für den Spieler ist emotional ausschließlich interessant, wie wahrscheinlich ein Gewinn ist und wie hoch er ausfallen kann.

K\D	21.1.2017		18.1.2017		14.1.2017		11.1.2017		7.1.2017	
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	3	668.326	1	1.099.000	2	989.433	2	526.642	3	623.489
3	151	6.639	54	10.175	69	14.340	33	15.953	68	13.753
4	1424	2.112	461	3.575	714	4.157	310	5.095	549	5.111
5	7876	127	2685	205	5342	185	1957	269	3920	239
6	67943	30	26879	41	44154	45	19792	53	29806	63
7	125240	16	47706	23	109456	18	37841	28	83095	23
8	1092871	8	496024	10	902208	10	402259	12	649804	13
9	826822	5	355380	5	813548	5	300590	5	721377	5

Der Begriff „Lotto-Millionär“ zeigt das Traumziel deutlich an. Wir finden es wieder in der Gestaltung des Gewinnplans, dass zwar selten aber doch realistisch oft ein Millionengewinner vorkommt, sagen wir mal: rund ein Millionär pro Monat. Ich habe in der Tabelle die Quoten der letzten 5 Ziehungen aufgelistet; die linke Zahl sagt, wie viele Tipps in die jeweilige Klasse der Ziehung fielen und die rechte Zahl ist die auf ganze Euro gerundete Gewinnquote für einen Gewinner-Tipp dieser Klasse in dieser Ziehung. Wie viel Gewinnanteil kam jeweils in jeder Klasse zur Ausspielung?

K\D	21.1.2017	18.1.2017	14.1.2017	11.1.2017	7.1.2017
1	-	-	-	-	-
2	2.005.000	1.099.000	1.979.000	1.053.000	1.870.500
3	1.002.500	549.500	989.500	526.500	935.000
4	3.007.500	1.648.000	2.968.000	1.579.500	2.806.000
5	1.000.000	550.500	988.000		
6	2.038.000				
7	2.004.000				
8	8.743.000				
9	4.134.000				

Die Rundungsfehler um die Cent-Beträge der niederen Gewinnränge wirken sich hier klar aus, aber das kann bitte ignoriert werden. Ich wollte nicht alle Felder ausfüllen; wer mag: einfach die beiden Zahlen jedes Feldes der ersten Tabelle miteinander multiplizieren. Braucht's aber nicht so genau, wir sehen schon an den hier gerechneten Beispielfeldern, wohin es ungefähr grob läuft:

1	2	3	4	5	6	7	8	9
-	7%	3,5%	10,5%	3,5%	7%	7%	31%	15%

Wenn kein Jackpot gewonnen wird, teilen sich die Ränge sehr seltsam den Gewinn von 50% des Spieleinsatzes auf. Ein Drittel geht in Klasse 8, das sind 3 Richtige. Ein Sechstel geht in Klasse 9, das sind 2 Richtige plus Superzahl. Das heißt: Die Hälfte der Gewinne wird mit der Gießkanne über die miesen

Ränge gekippt, um das Bedürfnis der Spieler nach Sicherheit zu befriedigen und mit kleinen Gewinnen das Gefühl zu nähren, schon ganz gut dabei zu sein. Das ist irre bescheuert. Andererseits kriegt auch Klasse 2 ordentlich, wenn wir bedenken, dass es immer nur rund 2 Tipps in dieser Klasse pro Ziehung gibt. Damit werden die Lottomillionäre gemacht. Auf Lotto-Multimillionäre (Klasse 1) kann man lange warten. Aber egal. Übel sind die Klassen 3 und 4 gestutzt worden gegenüber früher, um die Angeberei bei den unteren Rängen zu finanzieren. Hat man heute 5 Richtige, gibt es kaum noch über 5000 Euro. Sogar für 5 Richtige und Superzahl kriegt man weniger, als ein Auto kostet: typisch unter 15000 €. Ein Teil der Ausschüttung von 50% des Spieleinsatzes wird für den Jackpot zurückgehalten und fließt nicht in die normalen Gewinnklassen 2 bis 9.

80 Millionen Tipps pro Woche sind eine winzige Zahl verglichen mit Ensembles von Atomen in einem Gramm Materie. Aber wir erkennen trotzdem schnell, was eine Temperatur ist: die Temperatur ist die Kennzahl einer ganz typischen Verteilung der Bewegungsgrößen der Individuen eines Ensembles. Jetzt spielen wir bei einer Lottoziehung mal Streik. Die Bundesregierung hat beschlossen, den Jackpot zu verwenden, um Yahya Jammeh seinen Abschied von der Macht über Gambia zu versüßen. Alle Lottospieler sind entsetzt, demonstrieren und vereinbaren, nicht mehr Lotto zu spielen. Ein einziger Spieler spielt nicht mit beim Streik, sondern spielt um einen Euro einen Tipp.

Er tippt 1, 2, 3, 4, 5, 6 und auf seinem Schein steht die Superzahl 7.

Die Wahrscheinlichkeit, dass sein Tipp irgendeinen Gewinn macht, ist ungefähr 3,5% - es gibt unter rund 80 Millionen Tipps immer rund 3 Millionen Gewinne. Er wird also – genau, als würde nicht gestreikt – seinen Einsatz mit einer Wahrscheinlichkeit von 96,5% komplett verlieren. Wenn er aber das unfassbare Glück haben sollte, völlig konkurrenzlos zu gewinnen, wie sieht dann seine Quote aus?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
?	0,035 €	0,018 €	0,053 €	0,018 €	0,035 €	0,035 €	0,16 €	0,08 €

Für 6 Richtige kriegt er von seinem Einsatz 1,00 € dann 4 Cent zurück. 5 Richtige mit Superzahl bringen 2 Cent. Er kann nur hoffen, 3 Richtige zu haben, denn dafür bekäme er 16 Cent. In keinem Fall wird also die staatlich garantierte Ausschüttung von 50% der Spieleinsätze in dieser Ziehung ausgeschüttet. Mit Million und so ist ohnehin Essig. Was passiert mit dem nicht ausgeschütteten Gewinnanteil? Kommt in den Jackpot. Dann ist der wenigstens nicht mehr leer.

Eine Temperatur für ein einzelnes Elementarteilchen anzugeben, ist ungefähr so sinnvoll, wie einen Lottotipp abzugeben, wenn man weiß, dass man der einzige ist, der spielt. Das ist zwar keine Äquivalenz, aber ein hilfreiches Beispiel, dass die Grenzwerte einer Welt großer Ensembles völlig andere Interpretationen der Naturgesetze mit sich bringen als die Grenzwerte der Nanowelt mit einzelnen Quanten. Die Motivation, Lotto zu spielen, ist die Gewinnerwartung. Die Gewinnerwartung eines Spielers hat überhaupt nichts zu tun mit der wohldefinierten Statistik-Größe des Erwartungswerts. Der Erwartungswert des Alleintippers für einen Gewinn ist Null. Er verliert immer. Bei vielen Tippern verlieren fast alle fast immer, so dass das Ensemble genügend Verlustschmerz auffängt, dass für extrem Glückliche netto sogar was rauskommen kann. Euphemistisch gesprochen. Aber konkret ist es doch schon erstaunlich, dass ein konkurrenzlos tippender Lottospieler weiß, er wird mindestens 84 Cent von seinem Euro verlieren – im günstigsten Fall. Freilich kann ich jetzt formal hergehen und definieren, ein solcher konkurrenzloser Lottospieler hege die Gewinnerwartung, weniger als 84 Cent zu verlieren. Aber ehrlich: ist doch bescheuert, oder? Ich spiele doch nicht Lotto um einen Euro, wenn ich weiß, dass ich in rund 97% der Fälle alles verliere *und* in den 3% der Fälle eines Gewinns statt 100 Cent nur 98 bis bestenfalls 84 Cent *verliere*. Ehrlich – es ist zwar formal möglich, den Verlust von 84% des Spieleinsatzes als maximal möglichen Gewinn zu feiern, aber andererseits ist es völlig idiotisch, dazu Gewinn zu sagen. Genau darin besteht die Ähnlichkeit mit der Temperatur.

Wenn Physiker sagen, sie hätten ein Atom auf 0,01 Kelvin herab gekühlt, dann entspricht das einem Bild. Dieses extrem „kalte“ Atom hat dann so wenig Bewegungsenergie relativ zum Labor (das sich übrigens mit einer Überlagerung der Geschwindigkeiten unserer Sonne auf ihrer Bahnellipse in der Milchstraße, der Erde auf ihrer Ellipse um die Sonne und der Erde um

sich selbst bewegt – relativ zur Zentralmasse des Schwarzen Lochs im Zentrum der Galaxis), wie es einem Durchschnittsteilchen in einem Ensemble entspräche, wenn das Ensemble diese Temperatur hätte. Dieses Bild hat aber keine relevanten Eigenschaften der Temperatur mehr. Temperatur ist mit ungeordneter Bewegung verknüpft, mit Stößen und einer Geschwindigkeitsverteilung. Sie ist ein Maß dieser Verteilung. Da wird auch ein zweiter Aspekt sichtbar, weshalb das Gedankenexperiment mit der fortgesetzten Teilung eines Systems aus Gas nicht bis zu einem Teilchen hinunter klappt. In dem ganzen System kommen alle Geschwindigkeiten nach einer eben nach Boltzmann berechenbaren Verteilung vor. Es gibt Teilchen mit 1m/s, Teilchen mit 2m/s ... bis hin zu Teilchen mit 2000m/s oder mehr. Wenn Luft Zimmertemperatur hat, werden die *meisten* Teilchen darin *ungefähr* zwischen halber und doppelter Schallgeschwindigkeit haben. Wenn mein Ensemble durchs Teilen so klein wird, dass ich mit den wenigen verbleibenden Teilchen diese Verteilung gar nicht mehr herstellen kann, wie soll dann die Temperatur als intensive Größe noch konstant bleiben? Sobald ich ein einzelnes Teilchen aus dem Ensemble heraus isoliert habe und anschau, werde ich mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit feststellen, dass es langsamer oder schneller ist, als die zur Temperatur der ursprünglichen Verteilung gehörende „häufigste“ Geschwindigkeit. Denn fast alle Teilchen eines Ensembles liegen links oder rechts vom Maximum der Verteilungskurve, obwohl dieses Maximum zwar der häufigste Wert gemessen an *irgendeinem bestimmten* anderen Wert ist, aber klein verglichen mit den Zählergebnissen für *alle anderen* Werte in deren Summe.

Beim Schwerpunkt eines Körpers ist es ja auch klar, dass die meisten Beiträge zum Schwerpunkt von außerhalb des Schwerpunkts herrühren. Und das sind dann typisch übrigens auch diejenigen Stellen unseres Körpers, mit denen wir nicht zufrieden sind. Wir nennen sie gerne unsere Problemzonen. Aber sind es nicht gerade auch die Zonen, die uns ausmachen, diese Problemzonen? Beim Ensemble liegt der Charme auch gerade in dieser chaotisch erscheinenden Wirrnis aller Möglichkeiten, die zauberhaft über die Form der Verteilung (Maxwell-Boltzmann) eine so wundervolle Gemeinschaftsleistung Temperatur hervorbringen. Und Druck – oh, wie schön kann Druck sein! Drück mich fest und traue keinem berühmten Namen, wenn er dir erzählt, die aus der Strahlung eines Lochs ermittelte Temperatur mache das Loch zum normalen Quantenobjekt! Sag einfach: April, April!

*A 2 ) Ein großer Beitrag zur Senkung der Entropie ist unverdient herein  
geschneite Information aus meinem Lektorat*

Die Maxwell-Boltzmann Statistik stellt die Verbindung zwischen den mikroskopischen Bewegungsgrößen der Quantenteilchen, die den Körper bilden, mit der intensiven, makroskopischen Zustandsgröße Temperatur des Körpers her. Wenn sich alle Impulse der Quantenteilchen vektoriell zu Null addieren, sieht der makroskopische Körper für mich in meinem Beobachtungs-Koordinatensystem ruhend aus. Er kann trotzdem beliebig heiß oder kalt sein. Das ist eine Bedingung für das Attribut „ungeordnet“ zum Phänomen der Bewegung der Teilchen des Körpers. Ungeordnete Bewegung der Teilchen bedeutet, dass ich nur diejenigen Bewegungsanteile aller Teilchen in die Statistik zur Temperatur aufnehme, die sich in der vektoriellen Summe annullieren. Anteile, die sich darüber hinaus nicht gegenseitig aufheben, wirken als makroskopische Bewegung des Ensembles selbst, also als resultierender Impuls des Körpers. Diese beiden Sorten der Bewegungsgröße sind zu unterscheiden: alle sich in der Summe gegenseitig eliminierenden Beiträge sind ungeordnet und führen zur Temperatur des Körpers. Alle übrigen ergeben einen resultierenden Impuls und führen zur makroskopischen Bewegung des Körpers in meinem Beobachtungsraum. Auf Seite 17 des Quantenlochs fügte ich in mein abgeschlossenes Gas  $pV = NkT$  eine Trennwand ein, um die Eigenschaft „intensiv“ darzulegen. James Clerk Maxwell, sagt mein Lektorat, habe das mit einer interessanten Modifikation auch schon gemacht vor 150 Jahren. Er gab der gedachten Wand eine Tür und zu der Tür einen Dämon, der die Tür genau dann und nur dann öffnet, wenn sich im linken Teilsystem der Temperatur  $T$  ein Teilchen nähert, das schneller ist, als die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen des Gesamtsystems oder wenn sich im rechten Teilsystem der Temperatur  $T$  ein Teilchen nähert, das langsamer als diese ist. Im linken System (L) sammeln sich die langsamen Teilchen an und die schnellen Teilchen werden durch den Dämon im rechten System (R) separiert. Bloß durchs Sortieren in diese beiden Geschwindigkeitskategorien ändern die beiden Systeme ihre makroskopischen Zustandsgrößen  $p$ ,  $T$  und  $N$ . Offensichtlich ist alleine schon aus der Änderungsvorschrift, dass links  $T$  sinkt und rechts  $T$  ansteigt. Ganz am Anfang, wenn erst wenige Teilchen die Tür nach der jeweiligen Entscheidung des Maxwellschen Dämons passiert haben, fällt die Änderung der Teilchenzahlen noch nicht auf. Denn es werden ungefähr gleich viele Teilchen von L nach R durchgelassen werden, wie

umgekehrt von R nach L. Aber sobald uns klar ist, dass es rechts wärmer wird und links kälter, drängt sich der Verdacht auf, dass rechts der Druck ansteigen wird und links wird er fallen. Für jedes Teilsystem gilt die Gasgleichung weiterhin, aber nun mit systemspezifischen und veränderlichen Größen  $p$ ,  $T$  und  $N$ ; nur  $V$  bleibt in jedem System konstant halb so groß wie das ursprüngliche  $V(0)$  des Systems ohne Wand.

Wegen  $p/T = Nk/V$  folgere ich:  $p(x)/T(x) \sim N(x)$  für die Systeme  $x = 0$ ,  $x = L$  und  $x = R$ . Faszinierend ist, dass dabei die Verteilung der Geschwindigkeiten aller Teilchen aus dem Ausgangssystem 0 in zwei Verteilungen der Systeme L und R übergehen muss, die ihre Maxima nicht mehr dort haben, wo das Maximum der Verteilung des Systems 0 war. Ein ideal arbeitender Dämon, dem genügend Zeit gegeben wird, sollte eigentlich irgendwann mit seiner Arbeit fertig werden, die Teilchen vollständig nach der einfachen Bedingung auseinander zu sortieren, möchte man annehmen. Aber das ist nicht richtig. Denn die sortierten Teilchen müssen sich jeweils in ihr neues System einleben. Dazu stoßen sie mit allen Teilchen ihres Zielsystems, denen sie nahe genug begegnen, zusammen. Bei diesen Stößen werden Impulsanteile der Teilchen ausgetauscht. Dieser Austausch mikroskopischer Bewegungsgrößen zwischen Teilchen eines Ensembles geht so vor sich, dass sich die Maxwell-Boltzmann Statistik für die Verteilung ergibt. Das bedeutet insbesondere, dass im rechten System immer langsame Teilchen *entstehen* und der Dämon mit seiner Arbeit *nie* fertig werden kann. Wie im Ensemble R dem alle langsamen Teilchen entzogen werden, trotzdem immer langsame nachwachsen? Das ist einfach: Stoßen sich zwei gleichartige Teilchen mit den Impulsen  $p$  und  $-p$  zentral. Was kommt dabei heraus? Eben: beide stehen. Analog kann auch gezeigt werden, dass in jedem Ensemble immer ein paar ganz schnelle Teilchen „entstehen“. Sie bilden den Maxwell-Schwanz der Verteilung. Das heißt: jedes System kommt von sich aus durch die Ensemble-Selbstwirkung zur MB-Verteilung, sodass eine gemeinsame Statistik über alle Teilchen der beiden sortierten Systeme L und R völlig anders aussieht, als die Statistik der tatsächlichen Vereinigung derselben Systeme vor der Trennung und Sortierung. Aber dafür sieht jede der beiden Verteilungen L und R der Form nach wieder der ursprünglichen Verteilung 0 ähnlich. Halt mit anderem Maximum, aber um dieses neue Maximum herum eben wieder die typische Verteilung nach MB. Ich hatte es vergessen. Ich hatte tatsächlich den Maxwell-schen Dämon vergessen! Irre oder? Unfassbar!

Ein gutes Lektorat ist wie ein Maxwellscher Dämon: es öffnet die Tür im richtigen Augenblick. Und es schließt sie im richtigen Augenblick. Und so sagte mein Maxwellscher Dämon zu mir Simsalabim Munaykim, im Problem rund um die Information steckt Leó Szilárd drin. Er braucht all diese kompliziert machenden Eigenschaften des Ensembles und der Verteilungen nicht in seiner radikalen Simplifizierung des Maxwellschen Dämons auf den Einquantenteilchen-Kolbenmotor. Und er findet erstmalig 1929 die thermodynamische Grundlage der Informationstheorie: der Aufwand zur Ermittlung des Wahrheitswerts, ob das Teilchen die Eigenschaft hat oder nicht hat, dass die Tür zu öffnen sei oder nicht, erzeugt wenigstens  $k \ln 2$  Entropie.

Es sieht also so aus, als wüssten wir sehr wohl recht genau, was Information ist und wie die Information mit der Entropie verknüpft ist. Bloß sehe ich in den Arbeiten die Auseinandersetzung mit der Bedeutung einer Alternativfrage nicht. Ich sehe nur dieses völlig langweilige Bit der Antworten. Ja oder nein, das ist in der Informationstheorie die Frage. Das sind die Elementarteilchen der Informationstheorie: wahr oder falsch, ein oder aus, ja oder nein. Jeder Broker entscheidet komplexer: kaufen, halten oder verkaufen? Demnach sieht es aus, als sei der binäre Wahrheitswert von 1 Bit tatsächlich das Quant der Information. Und ich erkenne nicht, wie wir damit die morphologischen Eigenschaften von Intelligenz modellieren wollen. Intelligenz verhält sich zum Bit wohl wie die Thermodynamik zum Impuls. Intelligenz entsteht zauberhaft aus dem Ensemble der Wahrheitswerte, aber sie ist nicht die Summe dieser Wahrheitswerte, sondern das geheimnisvolle Rauschen der makroskopisch unbewegten Gemeinschaft. Nach Landauers Hypothese verbraucht der Schwarze Löscher  $kT \ln 2$  Energie zum Löschen eines Bits. Und wir versuchen bis heute, zu messen, ob das stimmt. Ich denke, es wird nicht nur an schlechter Technologie liegen, dass immens mehr Hitze erzeugt wird als  $kT \ln 2$ , wenn wir to be or not to be auslöschen wollen. Und es liegt auch nicht daran, dass dort von two bit or not two bit die Rede wäre. Sondern es liegt daran, dass wir unangemessen an Ensembles und ihre faszinierende Kraft zur Selbstorganisation herangehen, wenn wir immer geiler werden, unseren Makrokosmos auf Quanten zu reduzieren und dabei übersehen, welche Netze wir damit stricken, die uns schlimmer würgen als die mit ihnen vermeintlich überwundene Thermodynamik es je könnte. Mancher Quantenhandschuh sieht nach Fehdehandschuh aus.