

## **Erkenntnistheoretische Reflexion zum holografischen Universum**

Vor nunmehr fast fünfzehn Jahren publizierte ich eine dreibändige Studienreihe über *"Erkenntnistheoretische Grundlagen der Physik"*. Darin wird ein Ansatz entfaltet, den man wegen seiner Verwurzelung in den Traditionen der Transzendentalphilosophie und des Pragmatismus als einen **transzendentalen Pragmatismus** bezeichnen kann.<sup>i</sup> Der vorliegende Text ist ein neuer Anlauf zur Darstellung einiger zentraler Aspekte dieser Position und befasst sich dabei mit einem Thema, in dem wesentliche Entwicklungen der Gegenwartsphysik brennpunktartig zusammenfließen. Es handelt sich um die im Titel angesprochenen Hypothesen zur holografischen Natur unseres Universums.

Ihnen widmete sich ein schon im Jahr 2003 in der Zeitschrift *"Spektrum der Wissenschaft"* erschienener Aufsatz von Jacob David Bekenstein<sup>ii</sup> mit dem Titel *"Das holografische Universum"*<sup>iii</sup>. Der Autor präsentierte sich hier als typischer Vertreter eines unter Physiker\*innen sehr weit verbreiteten **erkenntnistheoretischen Realismus**, der in schroffem Gegensatz zum transzendentalen Pragmatismus steht. Meine Auseinandersetzung mit den epistemologischen Implikationen dieses Aufsatzes will einerseits bei Vertreter\*innen jenes realistischen Mainstreams Verständnis für den transzendental-pragmatistischen Standpunkt wecken und andererseits dessen Relevanz im Kontext der aktuellen Forschungsaufgaben der Physik aufzeigen. Der folgende Text gliedert sich in zwei Teile: der erste referiert Bekensteins Argumentation, während der zweite deren erkenntnistheoretische Implikationen aus der Perspektive des transzendentalen Pragmatismus reflektiert.

## **Inhalt**

Seite

<b><u>Bekensteins Argumentation</u></b> .....	<b>2</b>
○ <u>Information und Entropie</u> .....	2
○ <u>Die Entropie des Schwarzen Lochs</u> .....	3
○ <u>Das holografische Universum</u> .....	4
○ <u>Ausblick</u> .....	5
<b><u>Die Perspektive des transzendentalen Pragmatismus</u></b> .....	<b>6</b>
○ <u>Realismus versus transzendentaler Pragmatismus</u> .....	6
○ <u>Zur Konstitution der Bestandteile unserer Welt</u> .....	7
○ <u>Wie Information zu einem wichtigen Baustein der Welt wurde</u> .....	9
○ <u>Vom Aufstieg der Information zum alleinigen Grundbaustein der Welt</u> .....	12
○ <u>Ist die holografische Grenze ein für allemal gegeben?</u> .....	16
○ <u>Realistische Fehlinterpretationen des holografischen Prinzips</u> .....	19
○ <u>Zur Illusion einer endgültigen Theorie</u> .....	21
<b><u>Zitierte Texte</u></b> .....	<b>23</b>

## Bekensteins Argumentation

Ausgangspunkt von Bekensteins Überlegungen zur *"Frage, woraus unsere physikalische Welt besteht"*, ist die in den *"modernen Errungenschaften in Technik, Biologie und Physik"* gründende Einsicht, *"dass Information ein genauso wichtiger Bestandteil der Welt ist"* wie Materie und Energie. Bekenstein belegt dies unter anderem mit dem *"Ribosom in einer menschlichen Körperzelle"*, das *"ohne die Information, die in der DNA des Zellkerns gespeichert ist, ... keine Proteine zu synthetisieren"* vermag. Es gebe sogar eine durch John A. Wheeler initiierte *"Interpretation der Quantentheorie, ... wonach die physikalische Welt eigentlich aus Information besteht, während Energie und Materie nur Oberflächenphänomene sind."* Diese Sicht der Dinge lade dazu ein, sich zu fragen, wie viel Information nötig sei, *"um das gesamte Universum zu beschreiben"* und ob *"diese Beschreibung"* angesichts der fortschreitenden Miniaturisierung eines Tages *"in den Speicher eines Computers passen"* könne.

## Information und Entropie

Bei seiner Antwort auf diese Fragen verweist Bekenstein zunächst auf die 1948 von Claude E. Shannon, dem Begründer der modernen Informationstheorie, geschaffene begriffliche Grundlage für die Quantifizierung von Informationen. Shannon fand bei seiner Suche nach einem **Maß für den Informationsgehalt** von Nachrichten eine Formel, deren Struktur der als Maß für die Unordnung in einem physikalischen System etablierten **Entropie** entspricht. Während sich diese seinerzeit von Ludwig Boltzmann eingeführte zentrale Größe der Thermodynamik auf *"die Anzahl der unterschiedlichen mikroskopischen Zustände (bezieht), welche die Teilchen eines Stücks Materie einnehmen können, ohne dass sich dessen makroskopische Eigenschaften verändern"*, ist *"die Shannon'sche Entropie einer Nachricht ... gleich der Anzahl der binären Ziffern oder Bits, die zu ihrer Kodierung erforderlich sind."*

Die strukturelle Übereinstimmung der zwei Formeln verweist auf eine enge begriffliche Verwandtschaft der beiden Arten der Entropie. Ihre typischen Größenordnungen weichen jedoch enorm voneinander ab. Denn *"die Shannon-Entropie des Chips berücksichtigt nur den Gesamtzustand jedes winzigen Transistors, der in den Siliziumkristall geätzt wurde. Der Transistor ist 'an' oder 'aus', im Zustand Null oder Eins: Er hat einen einzigen binären Freiheitsgrad. Die thermodynamische Entropie hingegen hängt von den Zuständen aller Milliarden Atome und freien Elektronen ab, aus denen jeder Transistor sich zusammensetzt. Mit jedem Miniaturisierungsschritt rückt allerdings der Tag ein wenig näher, an dem jedes Atom für uns ein Bit Information zu speichern vermag – und zugleich nähert sich die nutzbare Shannon-Entropie des jeweils modernsten Mikrochips allmählich der thermodynamischen Entropie des Materials."*

Auf den ersten Blick scheinen dieser Entwicklung keine Grenzen gesetzt zu sein und es sieht so aus, als ob die Kapazität der Materie zur Informationsspeicherung ins Unendliche steigerbar wäre. Man kann sich *"angesichts des atemberaubenden Fortschritts der Miniaturisierung ... rein theoretisch den Tag ausmalen, an dem die Quarks als Informationsspeicher dienen werden – vielleicht ein Bit pro Quark. Wie viel Information würde dann in einen Kubikzentimeter passen? Und wie viel erst, wenn wir Superstrings oder noch tie-*

*tere, bislang nicht einmal hypothetisch angedachte Ebenen nutzen könnten?" Denn "es könnte im Universum mehr Strukturebenen geben, als unsere physikalische Schulweisheit sich träumen lässt."*

### **Die Entropie des Schwarzen Lochs**

In der Folge legt Bekenstein dann aber dar, dass die seit den neunzehnsiebziger Jahren von der Gravitationsphysik erzielten Resultate die Vermutung einer potentiell unbeschränkten Informationsspeicherkapazität der Materie klar widerlegen. Es gelang nämlich im Zuge der Untersuchung der *"geheimnisvollen Eigenschaften von Schwarzen Löchern eine absolute Obergrenze für die Information (herzuleiten), die in einem Raumgebiet oder in einer bestimmten Materie- und Energiemenge enthalten sein kann."*

Schwarze Löcher sind ein Phänomen, das von der Allgemeinen Relativitätstheorie prognostiziert und mittlerweile durch astronomische Beobachtungen längst bestätigt ist. Für Einsteins Theorie ist die Schwerkraft letztlich nichts anderes als eine durch die Anwesenheit von Materie oder Energie bewirkte Krümmung der Raumzeit, welche dazu führt, dass sich Objekte so bewegen, als wirke eine Kraft auf sie. Und genau dieser Zusammenhang zwischen Materie bzw. Energie und Raumzeit ist verantwortlich für die Entstehung der Schwarzen Löcher. Denn *"gemäß Einsteins Gleichungen krümmt eine ausreichend dichte Ansammlung von Materie oder Energie die Raumzeit so stark, dass sie förmlich zerreißt und ein Schwarzes Loch bildet. Die Gesetze der (klassischen) Relativitätstheorie verbieten, dass irgendetwas, das in ein Schwarzes Loch gefallen ist, jemals wieder herauskommt ... Die kritische Grenze des Bereichs, aus dem es kein Entkommen gibt, heißt Ereignishorizont. Im einfachsten Fall ist er eine Kugelfläche, deren Radius desto größer ist, je mehr Masse das Schwarze Loch besitzt"*.

Gemeinsam mit Materie und Energie verschwinden hinter dem Ereignishorizont aus der Perspektive der klassischen Relativitätstheorie auch sämtliche darin gespeicherten Informationen und die Entropie. Letzteres ist eine für die Thermodynamik höchst irritierende Annahme, besagt doch deren berühmter Zweiter Hauptsatz, dass die Entropie in einem geschlossenen System niemals abnimmt. An diesem Punkt setzten nun die im vorliegenden Aufsatz zusammengefassten Überlegungen von Hawking, Bekenstein, Susskind und anderen Gravitationsphysikern an. Sie führten zu der neuen Hypothese, dass Information und Entropie beim Fall von Materie bzw. Energie in ein Schwarzes Loch nicht verloren gehen, sondern weiter vorhanden sind und **auf dessen Ereignishorizont gespeichert** werden. Es gelang sogar, eine *"Proportionalitätskonstante zwischen der Entropie Schwarzer Löcher und der Fläche ihres Ereignishorizonts (zu) bestimmen: Die Entropie eines Schwarzen Lochs ist exakt gleich einem Viertel seiner Horizontfläche."* Letztere misst man dabei in sogenannten *"Planck-Flächen"*, die als das Quadrat der *"Planck-Länge"*, einer fundamente Längeneinheit für Gravitation und Quantenmechanik, definiert sind und  $10^{-66}$  cm<sup>2</sup> betragen. Bekenstein selbst formulierte dann eine neue, verallgemeinert Form des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik, welche besagt, dass *"die Summe der Entropien Schwarzer Löcher plus der gewöhnlichen Entropie außerhalb der Schwarzen Löcher ... nicht abnehmen"* kann. Dieser **Verallgemeinerte Zweite Hauptsatz** erlaubte es

nun Leonard Susskind die Existenz einer **Obergrenze** zu postulieren, welche die maximale Entropiemenge in einem gegebenen Volumen von Materie und Energie bezeichnet.

Bei der Ableitung jener Obergrenze betrachtete Susskind eine beliebige annähernd kugelförmige isolierte Masse, die selbst kein Schwarzes Loch ist und in eine geschlossene Fläche der Größe  $A$  hineinpasst. Wenn diese Masse zu einem Schwarzen Loch kollabieren kann, ist dessen Horizontfläche, wie leicht zu zeigen ist, kleiner als  $A$  und die Entropie des Schwarzen Lochs folglich kleiner als  $A/4$ , weil ja die Entropie eines Schwarzen Lochs exakt gleich einem Viertel seiner in Planck-Flächen gemessenen Horizontfläche ist. Da aber nach dem Verallgemeinerten Zweiten Hauptsatz die Entropie des Systems nicht abnehmen darf, kann die ursprüngliche Entropie der Masse nicht größer als  $A/4$  gewesen sein. Daraus ergibt sich, dass die Entropie eines abgeschlossenen Systems mit der Grenzfläche  $A$  kleiner als ein Viertel seiner in Planck-Flächen gemessenen Grenzfläche sein muss. Bekenstein zeigte dann ergänzend im Jahr 2000, dass diese Obergrenze für die Entropie, und damit auch für die Informationsspeicherkapazität eines gegebenen Volumens von Materie und Energie *"unabhängig von der Zusammensetzung des Systems oder dem Wesen der fundamentalsten Naturbausteine"* ist. Sie gilt vielmehr *"für ... die gesamte Information auf allen Strukturebenen – selbst auf den bislang unentdeckten."*

### **Das holografische Universum**

Dass die maximale Informationsspeicherkapazität einer gegebenen Masse von deren Oberfläche und nicht vom Volumen abhängt, ist auf den ersten Blick erstaunlich, kann aber durch die Gravitation erklärt werden: *"Angenommen, wir türmen Speicherchips zu einem großen Haufen. Die Anzahl der Transistoren – die gesamte Speicherkapazität – wächst mit dem Volumen des Haufens."* Wenn wir damit fortfahren, kollabiert dieser Haufen irgendwann *"unter seiner eigenen Schwerkraft zu einem Schwarzen Loch. Danach vergrößert jeder weitere Speicherchip die Masse und die Horizontfläche des Schwarzen Lochs, wie es sich nach dem Verallgemeinerten Zweiten Hauptsatz gehört."*

Die Physiker\*innen erklären sich die überraschende Abhängigkeit der Informationskapazität von der Größe der Oberfläche durch die Hypothese eines allgemein gültigen **holografischen Prinzips**. Dieser Name nimmt Bezug auf die als Holografie bezeichnete fotografische Technik. Sie kodiert die gesamte zur Beschreibung einer dreidimensionalen Szene nötige Information als Muster heller und dunkler Gebiete auf einem zweidimensionalen Film, der dann bei geeigneter Beleuchtung zur Basis der Projektion eines dreidimensionalen Bildes der fotografierten Szene wird. In Analogie dazu behauptet das holografische Prinzip, dass es für jedes beliebige dreidimensionale System eine *"nur auf der zweidimensionalen Grenzfläche des Gebiets definierte physikalische Theorie (gibt), welche die dreidimensionale Physik (jenes Systems) vollständig beschreibt."* Die vom holografischen Prinzip behauptete Vollständigkeit dieser Beschreibung ist nur ein anderer Ausdruck für die zuvor erwähnte Begrenzung des Informationsgehalts eines dreidimensionalen Systems mit dem Informationsgehalt der Beschreibung auf seiner Grenzfläche. Man bezeichnet diese Begrenzung daher auch als die **holografische Grenze**.

Kaum war die Hypothese der Geltung eines holografischen Prinzip ausgesprochen, fragten sich die Physiker\*innen, ob *"wir das holografische Prinzip auf das Universum als*

*Ganzes anwenden*" können und begannen, diese Frage anhand von vereinfachenden Modellen unseres Universums zu prüfen. Einige dieser Modelle variieren ein vom holländischen Astronomen Willem de Sitter als Lösung der Einstein'schen Gleichungen erdachtes Modell einer leeren, hochgradig symmetrischen und sich beschleunigt ausdehnenden Raumzeit. Und mittels eines dieser Modelle hat man dann *"ein konkretes Beispiel für die Wirkung des holografischen Prinzips"* entwickelt: *"Ein mittels Superstring-Theorie beschriebenes Universum"* mit einer jener Modellvarianten der De-Sitter-Raumzeit *"ist völlig äquivalent zu einer Quantenfeldtheorie, die auf der Begrenzung dieser Raumzeit operiert"*.

Für die Arbeit der Theoretiker mit physikalischen Modellen ist diese **holografische Äquivalenz** sehr praktisch. Denn sie *"lässt sich im Prinzip nutzen, um ein kompliziertes Problem – etwa das Verhalten von Quarks und Gluonen – zu vereinfachen, indem es von der vierdimensionalen Grenz-Raumzeit in die hochgradig symmetrische fünfdimensionale Anti-de-Sitter-Raumzeit verlegt wird."* Die holografische Äquivalenz wirft jedoch zugleich für Bekenstein eine erkenntnistheoretische Frage mit geradezu existenzieller Dimension auf. Denn *"intelligente Bewohner eines dieser Universen könnten nicht unterscheiden, ob sie in einem fünfdimensionalen, von einer Stringtheorie beschriebenen Kosmos leben oder in einer vierdimensionalen Welt, auf die eine Quantenfeldtheorie mit punktförmigen Teilchen zutrifft."* Es ist für ihn aber denkbar, dass *"ihnen die Struktur(en) ihres Gehirns ein massives Vorurteil zugunsten einer dieser Beschreibungen aufdrängen – so wie unser angeborener 'gesunder Menschenverstand' die Wahrnehmung konstruiert, dass unser Universum drei räumliche Dimensionen besitzt"*. Bekenstein stellt daher schon in der Einleitung zu seinem Text die Hypothese in den Raum, *"unser Universum, das wir in drei Raumdimensionen wahrnehmen, sei in Wirklichkeit auf eine zweidimensionale Oberfläche "geschrieben" – wie ein Hologramm. Unser alltägliches Erleben einer dreidimensionalen Welt wäre dann entweder eine tiefe Illusion oder nur eine von zwei Alternativen, die Realität zu betrachten."*

### Ausblick

Neben der oben erwähnten holografischen Grenze nach Susskind hat man noch eine Reihe weiterer Hypothesen betreffend die Limits der Entropie entwickelt. Die Vielzahl der diesbezüglichen Vorschläge ist für Bekenstein ein Hinweis darauf, dass die holografische Denkweise Zukunft zu haben scheint. Wenn das aber so sei, dann müsse *"der ... Glaube, die Feldtheorie sei die ultimative Sprache der Physik, neuen Ideen weichen."* Während das Feld der Feldtheorie kontinuierlich von Punkt zu Punkt variere und darum unendlich viele Freiheitsgrade enthalte, beschränke die Holografie die Freiheitsgrade innerhalb einer Grenzfläche auf eine endliche Anzahl; *"folglich kann die Feldtheorie mit ihren Unendlichkeiten nicht das letzte Wort sein."* Womöglich sei die Holografie ein Hinweis darauf, *"dass eine endgültige Theorie sich weder mit Feldern befassen wird noch mit Objekten in der Raumzeit, sondern mit dem Informationsaustausch zwischen physikalischen Prozessen. Dies wäre der endgültige Triumph der Idee, dass die Welt aus Information besteht."*

## Die Perspektive des transzendentalen Pragmatismus

Die folgende Untersuchung der erkenntnistheoretischen Implikationen von Bekensteins Argumentation verweist auf einige Probleme, die aus unreflektiert bleibenden Grundannahmen seines erkenntnistheoretischen Realismus resultieren. Zur Verdeutlichung des Hintergrunds meiner aus der Perspektive des transzendentalen Pragmatismus formulierten Kritik schicke ich einen kurzen Überblick über die wichtigsten Differenz zwischen jenen beiden erkenntnistheoretischen Grundpositionen voraus.

### Realismus versus transzendentaler Pragmatismus

Die bei Physiker\*innen weit verbreitete **realistische** Sichtweise nimmt an, dass die von uns untersuchten physikalischen Größen und Gesetze gänzlich unabhängig von unserem Bewusstsein existieren und als solche prinzipiell von uns erkannt werden können. Aus der genannten Perspektive sind Energie- und Information zwei zentrale Aspekte einer an sich vorhandenen physikalischen Welt. Weil letztere als ein vollständig subjektunabhängiges Sein verstanden wird, kann man beim Realismus auch von einer **objektivistischen** bzw. **ontologischen** Erkenntnishaltung sprechen.

Der **transzendente** Standpunkt geht zwar genau wie der Realismus davon aus, dass die Welt als solche unabhängig von uns existiert. Er vertritt jedoch die Auffassung, dass **sämtliches Wissen** über sie durch die Art unseres Zugangs zu ihr gefiltert ist, weshalb uns prinzipiell verschlossen bleibt, wie sie **an sich** gestaltet ist. Das gilt bereits für so zentrale Aspekte dieser Welt wie ihre räumlich-zeitliche Strukturiertheit, ihre Quantifizierbarkeit und die Gesetzmäßigkeit ihrer Abläufe. Und es gilt erst recht für all ihre auf Basis jener formalen Grundlagen von uns registrierten Eigenschaften, wie zum Beispiel ihre Energie- oder Informationshaltigkeit.

Zu einem **Pragmatismus** wurde diese auf Kant zurückweisende Position erst in dem Moment, in dem man sich fragte, **warum** wir überhaupt Wissen über die Welt erlangen wollen. Während nämlich Kant genau wie die Realisten das Erkennen als eine von allem praktischen Handeln getrennte, interesselose Aneignung der Welt missverstand, wurde im Lichte besagter Frage klar, dass alles Erkennen nur der Optimierung unseres Handelns dient: Weil wir seinen Erfolg gewährleisten und wenn möglich steigern wollen, müssen wir unser Wissen über die Welt verbessern. Um Missverständnissen vorzubeugen ist dabei sogleich festzuhalten, dass die vom transzendentalen Pragmatismus behauptete enge Beziehung zwischen Erkennen und Handeln nicht im utilitaristischen Bezug des Wissens auf konkrete individuelle Handlungsziele besteht. Es geht dabei vielmehr um die schon in die tiefsten Strukturen unseres Erkennens eingelassene Sicherstellung, dass das von uns erzeugte Wissen prinzipiell zur Orientierung kollektiven Handelns taugt. Dazu das folgende, sehr wichtige Beispiel: Weil erfolgreiches Handeln im Kollektiv nur möglich ist, wenn wir unser Tun gemeinsam akzeptierten Regeln unterwerfen, gehen wir auch bei sämtlichen Interaktionen mit der Natur von vornherein davon aus, dass deren Verhalten bestimmten Regeln gehorcht. Natur wird für uns dadurch zu einem *Visavis*, demgegenüber wir das in unseren Sozialkontakten bestens eingeübte regelgeleitete Interagieren praktizieren können.

## Zur Konstitution der Bestandteile unserer Welt

Bekenstein demonstriert seine objektivistisch-ontologische Erkenntnishaltung schon in der Einleitung seines Aufsatzes, wenn er sich an dessen Beginn fragt, "*woraus unsere physikalische Welt besteht*". Diese Wortwahl macht deutlich, dass er die Welt für ein **an sich vorhandenes** Sein hält, das **als solches für uns erkennbar** ist. Und seine Antwort auf die einleitende Frage bestätigt dann das durch sie bereits festgeschriebene Vorurteil vom subjektunabhängigen Vorhandensein einer in ihrem An-sich-Sein erkennbaren Welt. Denn diese Antwort nennt Materie, Energie und Information als deren bausteinartige "*Bestandteil(e)*".

Die Rede von einer aus bestimmten Bestandteilen bestehenden Welt unterschlägt, dass die drei vermeintlich an sich vorhandenen Komponenten der Welt nur deshalb zu Objekten für uns werden, weil wir uns die Welt im Handeln aneignen, wobei wir sie zu Orientierungszwecken in Gegenstände unterschiedlichen Typs aufgliedern müssen. Ferner fällt hier unter den Tisch, dass die konkrete Ausgestaltung dieses unsere Erfahrung strukturierenden Objektrasters von der Art und den jeweiligen Zielen unseres Tuns abhängt.

Im Hinblick auf die drei von Bekenstein genannten Bestandteile der Welt bedeutet das folgendes:

Solange wir die Ziele unseres Handelns mit einfacher körperlicher Kraft verwirklichten, die wir selbst in Verbindung mit unseren Haustieren und den von uns konstruierten Werkzeugen ausübten, erschien die uns bei dieser Arbeit gegenübertretende Welt als körperartig strukturierte **Materie**, die mit Trägheitswiderstand auf all unsere Kraftanstrengungen reagierte. Als wir lernten, chemische, thermische und elektrische Kraftpotentiale zu nutzen, und diese wechselseitig in einander umzuwandeln, wurde die davor nur als ein lebendiges Wirken erfahrene Kraft für uns zu einer '**Energie**' genannten Substanz, die aufgenommen, abgegeben und transportiert werden konnte. Im Zuge der Verfeinerung unseres Umgangs mit der elektromagnetischen Energie, entwickeln wir schließlich Techniken ihrer Manipulation, aus deren Perspektive sie für uns ihren ursprünglich Substanzcharakter verlor und als ein sich ausbreitendes Kraftfeld erschien.

Weitere Veränderungen unserer gesellschaftlichen Praxis führten dann dazu, dass uns mit einem Mal **Information** als ein weiterer "*Bestandteil der Welt*" gegenübertrat. Um zu verstehen, wie es dazu kam, ist zunächst die prinzipielle Struktur jener Praxis etwas genauer zu betrachten. In einer ersten, ganz groben Annäherung an sie kann man zwischen dem auf Naturbeherrschung abzielenden **technischen** Handeln und dem die zwischenmenschlichen Beziehungen gestaltenden **sozialen** Handeln unterscheiden. Lange Zeit entwickelte sich das physikalischen Naturbild vor allem im Wechselspiel mit den Fortschritten des technischen Handelns: Neue Technologien ermöglichten neue Naturbeobachtungen, die Anlass zur Entfaltung neuer physikalischer Begrifflichkeiten und Theorien gaben, welche dann ihrerseits wieder zur Entwicklung neuer Technologien führten.

Weil aber das technische Handeln stets in die soziale Praxis eingebettet war, schlugen sich auch deren Veränderungen immer schon in den Begrifflichkeiten und Theorien der Physik nieder. Ein wichtiges Beispiel dafür ist der im Vergleich zur Physik des Aristoteles streng quantifizierende Zugang der neuzeitlichen Physik zur Natur. Er war von Anfang an aufs

engste mit dem Vormarsch der Geldwirtschaft im Zuge der Etablierung des Kapitalismus verknüpft. Ein anderes Beispiel ist Einsteins Entdeckung der speziellen Relativität von Raum und Zeit. Sie fand statt vor dem Hintergrund der rasanten Herausbildung von Weltmärkten und der damit verbundenen Entstehung eines internationalen Eisenbahnnetzes. Dessen Ausbau zwang dazu, die Uhren weltweit mit Hilfe von Lichtsignalen zu synchronisieren und veranlasste Einstein zur Stellung der für die Entwicklung des Konzepts der speziellen Relativität entscheidenden Frage nach den Folgen dieser Methode der Synchronisierung für den Begriff der Gleichzeitigkeit.

Der Konstitution der Erscheinung eines von uns als Bestandteil der Welt erfahrenen Objekts 'Information' lag eine noch engere und komplexere Verknüpfung der Entwicklungsstränge des sozialen und technischen Handelns zugrunde, die hier nur kurz skizziert werden kann:

Ausgangspunkt war auch in diesem Fall unsere zunehmende Fähigkeit zur kontrollierten Manipulation elektromagnetischer Felder. Sie führte zu einer Reihe bahnbrechender nachrichtentechnischer Erfindungen, die ihrerseits zu Ausgangspunkten der Entstehung eines weltweiten Telekommunikationsnetzes wurden. Dessen nach allen Richtungen hin rasantes Wachstum war untrennbar mit der bereits angesprochenen Herausbildung von Weltmärkten und den sie erschließenden Verkehrsnetzen verknüpft. Für die Nachrichtentechnik entstand dabei die Aufgabe, eine wirtschaftlich effiziente und möglichst störungsfreie Nachrichtenübertragung zu ermöglichen. Ende der 1930er Jahre kam es dabei zu einem technischen Durchbruch, als man es mit Hilfe der Puls-Code-Modulation schaffte, eine als sprachliches Kontinuum vorliegende Nachricht in befriedigender Annäherung diskret darzustellen. Vor diesem Hintergrund gelang es dem von Bekenstein erwähnten Claude Shannon, Information als physikalische Größe mit einer als 'Bit' bezeichneten Maß- bzw. Zählinheit zu definieren. Das erlaubte es nun, den Aufwand für die technische Übertragung von Informationen in verschiedener Gestalt (Töne, Zeichen, Bilder) quantitativ exakt zu vergleichen.<sup>iv</sup>

Man kann somit als erstes Zwischenergebnis der erkenntniskritischen Reflexion auf Bekensteins Aufsatz festhalten, dass 'Information' genau wie 'Materie', 'Kraft' und 'Energie' **kein an sich vorhandener Bestandteil** der Welt ist. All unsere Wahrnehmungen dieser physikalischen Objekte sind vielmehr Resultate der Anwendung entsprechender Begriffswerkzeuge, die wir uns selbst schufen, um den Erfolg unserer gesellschaftlichen Praxis sicher zu stellen, bzw. wenn möglich zu erhöhen. Im Fall der 'Information' haben wir es mit einem kognitiven Tool zu tun, das im Zuge unserer Bemühungen zur Bewältigung jener nachrichtentechnischen Probleme entstand, welche die Etablierung eines effizienten weltweiten Telekommunikationsnetzes behinderten. Die vom erkenntnistheoretischen Realismus unmittelbar anvisierte, an sich vorhandene Welt gerät dabei allenfalls als eine letzte Ursache jener Probleme in den Blick, über die wir keinerlei Aussagen treffen können. Denn jeder Versuch die erwähnten Probleme zu beschreiben, muss sich bereits wieder der von uns selbst geschaffenen Wahrnehmungs- und Denkwerkzeuge bedienen. Selbst die Qualifizierung der an sich seienden Welt als 'Ursache' unserer Probleme ist schon eine unangemessene Annäherung an sie. Denn auch das bei dieser Rede themati-



sierte Kausalitätsprinzip ist bloß eines jener kognitiven Instrumente, mit deren Hilfe wir unsere Wahrnehmungen so aufbereiten, dass sie gelingendes Handeln ermöglichen.

### **Wie Information zu einem wichtigen Baustein der Welt wurde**

Bisher zeichnete ich bloß nach, wie Information für die Physiker\*innen zu einem Teil unserer Welt wurde. Nun gilt es darzustellen, wie sie in den Rang eines ihrer wichtigsten Bausteine gelangte. Auch dabei haben wir es selbstverständlich nicht mit Vorgängen zu tun, von denen wir Kenntnis haben, weil wir über metaphysische Zugänge zu einem an sich existierenden Sein verfügen. Was nun in aller Kürze skizziert werden soll, ist vielmehr in jener der transzendental-pragmatistischen<sup>v</sup> Selbstreflexion zugänglichen Sphäre gesellschaftlicher Praxis angesiedelt, in der wir einerseits neue Handlungsmuster und andererseits intellektuelle Werkzeuge zur Steuerung unseres Tuns entwickeln.

Information stieg für uns deshalb sehr rasch vom einfachen Bestandteil der Welt zu einem ihrer wichtigsten Bausteine auf, weil sie schon bald nach ihrer Konstitution als physikalisches Objekt zu einem in allen Lebensbereichen präsenten und von uns manipulierbaren Gegenstand wurde. Es sind dafür vor allem zwei Entwicklungen verantwortlich. Eine der beiden fand im Bereich des **technischen Handelns** statt. Die andere war eine **theoretische** Revolution, die aber ihrerseits aufs Engste mit Veränderungen unserer gesellschaftlichen Praxis verknüpft war. Bei der erstgenannten Entwicklung handelte es sich um die im Gefolge eines rasanten Fortschritts der Elektronik stattfindende Ausbreitung der Informationstechnologie. In ihrem Verlauf wurde die von der Nachrichtentechnik zum **transportablen** Gegenstand gemachte Information zu einem Objekt, das wir auch maschinell **bearbeiten** und zur **Steuerung** verschiedenster technischer, sozialer und natürlicher Prozesse verwenden können. Die erwähnte theoretische Revolution bestand dagegen in der partiellen Ersetzung bzw. Ergänzung der **mechanischen** Kausalität durch **systemische** Modellvorstellungen, in deren Kontext der Gewinnung, Weiterleitung und Verarbeitung von Informationen eine Schlüsselrolle zukommt.

Um die Einbettung dieses Paradigmenwechsels in entsprechende Veränderungen unserer gesellschaftlichen Praxis verstehen zu können, müssen wir uns zunächst ganz kurz den Praxis-Hintergrund der mechanischen Kausalität vergegenwärtigen. Bei der Etablierung jenes Erklärungsmusters im Zuge der Entstehung der neuzeitlichen Physik folgten die damaligen Wissenschaftspioniere einem seit jeher von der Menschheit praktizierten Erkenntnisprinzip: Sie erklärten sich die Natur, als das ihnen Unbekannte, durch vergleichenden Rückbezug auf das ihnen bestens Bekannte. Denn dadurch konnte man sich jenem Unbekannten gegenüber so verhalten, wie man es dem Bekannten gegenüber gelernt hatte. Das Bekannte, vor dessen Hintergrund man das Unbekannte zu begreifen versuchte, fanden die Menschen immer schon in den Strukturen ihrer eigenen gesellschaftlichen Praxis. Sie versuchten deshalb bei all ihren naturwissenschaftlichen Erklärungen ihr Kooperationsverhalten modellhaft auf die jeweils beobachteten Naturvorgänge zu projizieren. In den Grundstrukturen des am Beginn der Neuzeit entwickelten mechanischen Weltbilds spiegelt sich daher das Kooperationsmuster des zur gleichen Zeit entstehenden Frühkapitalismus:

- Weil hier die Warenproduzenten als von einander isolierte Individuen agieren, die nur durch die hinter ihrem Rücken wirkenden Gesetze des Marktes zu einer kollektiven Produktionsleistung verbunden werden, sehen die Schöpfer der klassischen Physik auch bei allen von ihnen beobachteten Naturvorgängen **von einander isolierte Objekte** (Körper, Teilchen, ...) vor sich, deren Verhalten durch hinterrücks wirkende Gesetze koordiniert wird.
- Und weil sich das Gesamtprodukt der Warenproduzenten immer nur als **Summe** ihres individuellen Produzierens herstellt und nie das Resultat einer dem individuellen Handeln vorausgehenden gemeinsamen Planung ist, erscheint auch im mechanischen Weltbild **das Ganze** des Zusammenspiels der jeweils beobachteten Einzelobjekte immer bloß als die **Summe** ihres gesetzlich determinierten Individualverhaltens.

Das heutzutage dominierende **systemische Modelldenken** ist genau wie die mechanische Kausalität ein Spiegelbild des menschlichen Kooperationsverhaltens. Mittlerweile sind es nun aber die vernetzten Strukturen eines hochentwickelten Kapitalismus, die sich in den Grundmustern unseres naturwissenschaftlichen Erklärens niederschlagen. Weil die Märkte inzwischen längst der Kontrolle durch Monopole und/oder staatliche bzw. internationale Organisationen unterworfen sind, wurden nun aus den von einander isolierten Objekten der klassischen Mechanik **Elemente von übergeordneten Systemen**. Und weil die Steuerung dieser Märkte stets auf bestimmten vorausgesetzten Zielen fußt, sind auch in unseren Erklärungsmodellen die jeweiligen Systemerfordernisse dem Verhalten der verschiedenen Elemente des Systems vorgeordnet. Anders gesagt ist nun für uns **das Ganze mehr als die bloße Summe** seiner Teile.<sup>vi</sup>

Information, die durch Nachrichtentechnologie und Datenverarbeitung zu einem eigenständigen, transportierbaren und bearbeitbaren Gegenstand wurde und damit eine zentrale Funktion bei der Steuerung und Koordination unserer systemisch organisierten gesellschaftlichen Praxis erlangte, erhält durch die Etablierung des Systemparadigmas in den Naturwissenschaften vor allem bei unserem Erklären von **Lebensprozessen** eine Schlüsselrolle. Traten die physikalischen Körper der klassischen Mechanik in Wechselwirkung mit anderen Körpern, dann taten sie dies ohne jeglichen Austausch von Informationen. Auch bei der Betrachtung lebendiger Organismen kam die klassische Mechanik ohne den Informationsbegriff aus. Denn die Interaktionen zwischen solchen Organismen waren für sie letztlich rückführbar auf die informationsfreien Wechselwirkungen zwischen den physikalischen Körpern, aus denen diese Organismen bestanden. Ein System dagegen vollzieht seine Interaktionen mit anderen Systemen als eine arbeitsteilig gegliederte Ganzheit, deren Elemente bei allen Reaktionen des Systems auf seine Umgebung kooperieren. Und jenes Zusammenspiel zwischen den Elementen des Systems ist für die Lebenswissenschaftler\*innen notwendigerweise vermittelt durch Informationen - genau wie es Bekensteins eingangs zitiertes Beispiel des Ribosoms in der menschlichen Körperzelle demonstriert.

Dieser mit der Etablierung des Systemparadigmas verbundene Einzug des Objekts 'Information' in unser aktuelles Bild der lebendigen Natur verweist auf einige bisher noch nicht explizit zur Sprache gekommene Einsichten des transzendentalen Pragmatismus, die hier nun ergänzend erwähnt werden sollen.

Während die realistisch denkenden Naturwissenschaftler\*innen das Objekt stets für ein an sich vorhandenes Ding halten, ist es aus der Perspektive des transzendentalen Pragmatismus immer bloß ein von uns selbst konstruiertes Gegenüber. Diese Konstruktionen sind aber **keineswegs beliebig**, denn sie müssen sich im Erfolg unseres an ihnen orientierten Handelns bewähren. Scheitert es, dann gelten die seiner Planung zugrunde liegenden theoretischen Konstrukte ebenfalls als gescheitert. Über diesen Kontrollmechanismus sind auch unsere obersten, als Paradigmen bezeichneten Hypothesen mit der gesellschaftlichen Praxis verbunden. Als allgemeinste Annahmen korrespondieren sie den obersten Zielen unseres auf die Natur bezogenen Handelns. Sobald sich ein solches Ziel ändert, muss sich auch das Paradigma ändern, welches allen Theorien und Begriffen zugrunde liegt, die der Anleitung des am betreffenden Ziel orientierten Handelns dienen.

Vor dem Hintergrund dieser allgemeinen Überlegung wird klar, warum es in den Lebenswissenschaften zu einer Ablösung des mechanischen durch das systemische Paradigma kommen musste. In beiden Fällen modellieren wir unsere Objekte als **virtuelle Subjekte**, die nach dem Vorbild unserer eigenen gesellschaftlichen Praxis mit einander kommunizieren. Die Mechanik siedelt die virtuelle Subjektivität ihrer Gegenstände aber ganz gezielt auf einem sehr niedrigen Niveau an: Sie unterliegen aus ihrer Perspektive deterministischen Gesetzen, die ihnen keinerlei Freiheit gewähren. Dadurch erhalten wir Menschen die Möglichkeit, auf Basis der Erforschung jener verhaltenssteuernden Gesetze alle ihnen unterliegenden Objekte zu **beherrschen**.

Weil wir aber im Verlauf der letzten hundert Jahre aufgrund schmerzhafter Lernprozesse einsehen mussten, dass unser immer brutaler umgesetztes Konzept der Naturbeherrschung letztlich scheitert, bemühen wir uns nun um ein **partnerschaftliches** Verhältnis zu ihr. Und eine der wichtigsten theoretischen Folgen dieses Wechsels unserer Grundhaltung zur Natur ist der Vormarsch des systemischen Paradigmas in den Lebenswissenschaften. Denn durch die Modellierung als System heben wir alles Leben auf eine **höhere Stufe virtueller Subjektivität** als wir sie dem mechanischen Objekt zugestehen. Systeme verfügen nicht nur über die bereits im Zusammenhang mit der Information erwähnten inneren Kommunikationsstrukturen, sondern haben darüber hinaus eine eigene, durch bestimmte Sollwerte definierte Identität, deren Stabilität sie auf verschiedenen funktional äquivalenten Wegen sicher stellen können. Schließlich haben sie so wie wir selbst auch eine individuelle Geschichte, die sie von der Geburt über das unvermeidliche Altern und allfällige Krisen bis hin zum schließlichen Tod (sprich: dem endgültigen Zusammenbruch ihrer Identität) führt.

Aus dieser Perspektive ist der Aufstieg des Objekts 'Information' zu einem der wichtigsten Bausteine der uns erscheinenden Welt nicht zuletzt auch eine Folge des Wandels unserer Einstellung zu allem uns umgebenden Leben. Anders gesprochen, ist es nicht allein auf die Entwicklung neuer Beobachtungs- und Messtechnologien zurückzuführen, dass wir im Lauf der letzten Jahrzehnte immer mehr mit Informationsübertragung verbundene systemische Zusammenhänge in der Natur entdeckten. Unsere Augen für sie wurden vielmehr geöffnet durch wachsende Bereitschaft, die lebendige Natur als ein Ensemble von zielgerichtet agierenden Kollektiven zu begreifen, mit dem wir uns partnerschaftlich arrangieren wollen, anstatt es uns zu unterwerfen.

## Vom Aufstieg der Information zum alleinigen Grundbaustein der Welt

Das Paradigma des Systems wurde aus den zuletzt skizzierten Gründen zwar primär bestimmend für die Entwicklung der modernen Lebenswissenschaften, fasste aber auch in der theoretischen Physik Fuß. Man sieht das Eindringen des systemischen Denkens in deren von der Mechanik geprägte Modellierungen sehr schön bei der Entwicklung des Atommodells. Schon das Rutherford'sche Modell hatte systemische Züge, berücksichtigte aber noch nicht die im Paradigma des Systems implizierten Stabilitätsanforderungen. Rutherford konnte daher nicht erklären, wieso das um den Atomkern kreisende Elektron, das bei dieser Bewegung gemäß den Gesetzen der klassischen Elektrodynamik ständig an Energie verlieren musste, nicht auf einer Spiralbahn in den Kern stürzt. Erst Bohr gelang es dann, das Atommodell an die Erfahrung anzupassen, indem er von einer **Überformung** der mechanischen Gesetze durch eine systemische Gesetzlichkeit ausging. Für ihn waren nun die Elektronen Teile der ihnen vorgeordneten Ganzheit 'Atom', die für ihre Elemente *"nur ganz bestimmte Bahnen erlaubt, auf denen sie - entgegen den Voraussagen der klassischen Physik - keine Energie verlieren."*<sup>vii</sup>

Auch wenn das Systemmodell in der theoretischen Physik und der eng mit ihr kooperierenden Chemie bald immer größere Bedeutung erlangte, wurde es hier doch bestimmter nur für das Leben charakteristischer Eigenschaften entkleidet. Zwar sind auch physikalische Systeme stets mehr als die Summe ihrer Teile, zwar haben auch sie eine an bestimmte Stabilitätsbedingungen geknüpfte Identität, die unter gewissen Bedingungen zusammenbrechen kann. Die Interaktion mit ihrer Umwelt ist aber in den Systemen der theoretischen Physik nicht durch Sinneswahrnehmungen vermittelt, weshalb es in ihrem Inneren weder zum Fluss noch zur Verarbeitung von Informationen kommt. Information konstituierte sich daher für die theoretische Physik im Zuge der Übernahme systemischer Modellvorstellungen noch nicht als eigenständiges Objekt. Dies geschah erst im Kontext der Quantentheorie, weshalb erst ein Quantenphysiker wie Wheeler auf die Idee kommen konnte, dass *"die physikalische Welt eigentlich aus Information besteht, während Energie und Materie nur Oberflächenphänomene sind."*

Diese Vorstellung einer im Grund nur aus Informationen bestehenden Welt, die bloß an ihrer Oberfläche Energie- und Materieeigenschaften zeigt, ist aus erkenntnistheoretischer Perspektive in mehreren Hinsichten hochproblematisch, weshalb sie nun etwas genauer zu betrachten ist. Schon bei der im Vorfeld zu klärenden Frage, wie bzw. wieso sich Information für die Quantentheorie als eigenständiges physikalisches Objekt konstituiert, stoßen wir auf die von einer objektivistisch argumentierenden Physik nur höchst mangelhaft reflektierte Rolle des Subjekts im Erkenntnisprozess. Die damit zusammenhängenden Schwierigkeiten erfahren in der Quantenphysik eine Zuspitzung, die für ein im ontologischen Weltbild verankertes Denken nur mit äußerst unbequemen, oft geradezu grotesken geistigen Verrenkungen zu bewältigen ist.

Dass wir in diesem Forschungsfeld nicht von dem für alle Objektivist\*innen selbstverständlichen An-Sich-Sein eines vom beobachtenden Subjekt getrennten Objekts ausgehen können, wird zumeist anhand des sogenannten **Doppelspaltexperiments** erläutert. Dabei richtet man einen Lichtstrahl auf eine Barriere mit zwei Spalten, hinter der sich ein Detektor befindet, der das auf ihn treffende Licht registriert. Vermindert man die Intensität

dieses Strahls so stark, dass jeweils nur mehr elektromagnetische Energie im Ausmaß eines einzelnen Photons den Doppelspalt durchquert, offenbart das Objekt 'Licht' scheinbar eine eng mit dem Handeln des Beobachters verknüpfte duale Natur. Wird nämlich keine Messung durchgeführt, um zu bestimmen, durch welchen Spalt das Licht gegangen ist, zeigt der Detektor das für alle Wellenphänomene typische Interferenzmuster. Dies deutet darauf hin, dass jedes Photon als Welle durch beide Spalten gleichzeitig ging und mit sich selbst interferierte. Wenn man jedoch mittels entsprechender Messungen eruiert, durch welchen Spalt das Licht ging, verschwindet das Interferenzmuster, und es zeigen sich bloß zwei Streifen auf dem Detektor – als ob jedes der Photonen tatsächlich nur einen der beiden Wege eingeschlagen hätte, wie man es für ein klassisches Teilchen erwarten würde.

Die klassische, als 'Kopenhagener Deutung der Quantenphysik' bekannt gewordene Interpretation dieses Phänomens besagt, dass die **reale Existenz** der Gegenstände der Quantenmechanik (hier: die Existenz des Lichts als Welle oder Teilchen) erst durch den Akt der Beobachtung konstituiert werde. Vor ihrer Wahrnehmung seien jene Objekte nur als **Wahrscheinlichkeitswellen** vorhanden. Zu den zuvor erwähnten geistigen Verrenkungen führt diese Interpretation deshalb, weil für die Quantenphysik der die reale Existenz der Gegenstände vermittelnde Beobachter auch selbst nur ein aus dem Zusammenspiel von Quantensystemen bestehendes System höherer Ordnung ist. Letztlich würden somit bloß als Wahrscheinlichkeitswellen existierende Quanten für die reale Existenz der beobachteten Objekte sorgen - ein Befund, der für alle nach an sich vorhandenen Tatbeständen suchenden Quantenphysiker\*innen verstörend ist und viele von ihnen auf esoterische Abwege führt.

Um ihre metaphysischen Verirrungen wollen uns aber hier nicht weiter bekümmern, da wir uns nun auf die im Doppelspaltexperiment exemplarisch sichtbar werdende Schnittstelle zwischen Subjekt und Objekt konzentrieren müssen. Sie markiert nämlich exakt den Punkt, an dem der Informationsbegriff in der Quantenphysik Fuß fassen konnte. Denn dort, wo jenes Subjekt mit seinen Sinnen den Weg des Objekts 'Licht' durch den Doppelspalt registriert (oder eben nicht registriert), ist endlich auch in der bloß mit leblosen Körpern, Wellen und Feldern befassten theoretischen Physik Platz für die in den Lebenswissenschaften längst schon thematisierten Prozesse der Sinneswahrnehmung. Und wo es Wahrnehmungen gibt, gibt es auch Information, die übertragen, gespeichert und verarbeitet wird. Erzählt man nun den Ablauf des Doppelspaltversuchs mithilfe des Informationsbegriffs, dann sieht es so aus, als ob die Information, die wir über ein System (in diesem Fall: über den Weg des Photons) haben oder nicht haben, dessen beobachteten Zustand (als Welle oder Teilchen) bestimmt. Der Informationsbegriff bringt damit zwar **keine Lösung** für das zuvor skizzierte Existenzproblem. Er verbessert aber die Möglichkeit sich bei der Darstellung des Beobachtungsgeschehens über das Subjekt-Objekt-Problem hinwegzuschwindeln, indem man sich weiterhin des objektivistischen Sprachspiels der Beschreibung von Abläufen im vorhandenen Sein bedient. Nun ist es die Übertragung oder Nicht-Übertragung von Informationen, welche den Zustand des die Informationen tragenden Systems (hier: des Photons) beeinflusst.

Um zu verstehen, wie Quantenphysiker\*innen vor diesem Hintergrund auf die Idee kommen, Information sei ein grundlegenderer Baustein des Seins als Materie und Energie,

muss man sich den unterschiedlichen Stellenwert des Informationsbegriffs in den Lebenswissenschaften und in der Quantenphysik vor Augen halten:

Wie das von Bekenstein zitierte Beispiel von dem durch die DNA gesteuerten Ribosom zeigt, ist Information für die Lebenswissenschaften stets nur einer von mehreren Teilen eines komplexen Funktionszusammenhangs. Dieser beinhaltet im Fall des Ribosoms neben der in der DNA kodierten Information auch

- Materie (Aminosäuren als Bausteine für die zu bildenden Proteine)
- Energie (ATP<sup>viii</sup> als Energiequelle für die Synthetisierung der Proteine)
- Regulatorische Mechanismen (molekulare Signale und Regulationsnetzwerke, die sicherstellen, dass die Proteine zur richtigen Zeit am richtigen Ort synthetisiert werden)

Für die mit dem Informationskonzept arbeitenden Quantenphysiker\*innen dagegen hat Information eine viel fundamentalere Bedeutung. Wegen deren zentraler Rolle in dem die Existenz der quantenphysikalischen Gegenstände konstituierenden Beobachtungsprozess bestimmt aus ihrer Sicht die Übertragung von Information an den Beobachter die Zustände und Übergänge der jeweils beobachteten Systeme, während Energie (in Wellenform) und Materie (in Teilchenform) nur zwei Eigenschaften dieser Zustände darstellen, die in Abhängigkeit von der stattfindenden bzw. nicht stattfindenden Informationsübertragung alternativ auftreten. In diesem Sinne erscheinen dann Energie und Materie selbst als bloße Manifestationen der Information.

Aus erkenntnistheoretischer Perspektive ist diese These vom fundamentalen Stellenwert der Information nur ein hilfloser Versuch, in der subjektfreien Welt der objektivistisch denkenden Physik einen Ersatz für das transzendente Subjekt zu konstruieren. Dabei tritt die Vorstellung einer tiefsten Schicht des objektiv vorhandenen Seins an die Stelle der von den Objektivist\*innen verdrängten Konstitutionsleistung des handelnden Menschen. Dessen aller Wissenschaft **vorausgesetztes** erfahrungskonstitutives Handeln kann jedoch prinzipiell nicht als ein an sich vorhandenes, vermeintlich 'fundamentales' Sein beschrieben werden. Denn es ist nur durch Selbstreflexion der handelnden und zu diesem Zweck Wissenschaft betreibenden Menschen erschließbar. Genau wie alle anderen physikalischen Begriffe wird auch der Begriff der Information seine Verwurzelung in der transzendentalen Sphäre des erfahrungskonstitutiven Handelns niemals abschütteln können. Anstatt ihn durch seine Erhebung in den Status eines ontologisch gedachten Fundaments objektivistisch zu verklären, gälte es daher jene Verwurzelung zu reflektieren.

Würde man dann einen durch solche Reflexion geschärften Blick auf den Beobachtungsvorgang im Doppelspaltexperiment werfen, könnte man sofort erkennen, dass es auf der Ebene der physikalischen Abläufe keinerlei Vorrang der Information vor der Energie gibt. Tatsächlich hängt nämlich die Erscheinung des durch den Doppelspalt wandernden Lichts als Welle oder Teilchen nicht davon ab, ob wir die Information über seinen Weg haben oder nicht haben, bzw. ob diese Information vom Licht an uns übertragen oder nicht übertragen wird. Entscheidend ist bloß, dass wir zur Gewinnung dieser Information mit dem Licht **interagieren**, was im Rahmen der vorliegenden Versuchsanordnung gleichbedeutend ist mit einer **Zerstörung seiner Fähigkeit zur Interferenz**.<sup>ix</sup>

Dieser Verlust der Interferenzfähigkeit des den Doppelspalt durchquerenden Lichts sollte aber nicht vorschnell mit einem Verlust seiner Wellennatur gleichgesetzt werden. Denn es ist ja durchaus denkbar, dass das Licht in **beiden** Varianten des Experiments **als elektromagnetische Welle** (und nicht als bloße Wahrscheinlichkeitswelle!) durch den Doppelspalt wandert, wobei es im Fall der Messung am Doppelspalt bloß seine Interferenzfähigkeit nicht aber seine Identität als elektromagnetische Welle verliert.<sup>x</sup> Solch alternative Interpretation des Doppelspaltversuchs müsste allerdings begründen, warum die elektromagnetische Welle bei der Messung immer nur mit **einem** der beiden Spalte interagiert. Eine Erklärung dafür liegt möglicherweise in einem **nicht-lokalen**, also im systemischen Sinne **ganzheitlichen** Verhalten des elektromagnetischen Feldes, das durch die klassische Elektrodynamik nicht beschrieben wird.

Vielleicht könnte man diesem Verhalten des elektromagnetischen Feldes durch eine entsprechende **Umdeutung des Stellenwerts** der empirisch bestens bestätigten Quantenelektrodynamik (QED) gerecht werden. In dieser Theorie spiegeln sich sowohl die Quantenaspekte als auch die hier möglicherweise zum Tragen kommenden ganzheitlichen Eigenschaften des elektromagnetischen Feldes. Die QED kann deshalb Phänomene wie das Verhalten des Lichts am Doppelspalt oder die Verschränkung von Zwilling photons erklären. In der gängigen Interpretation stellen aber die von der QED modellierten Wahrscheinlichkeitswellen keine elektromagnetischen Wellen, sondern den vor dem Kontakt mit dem Detektor bloß "*verschmierten*" Seinszustand eines Teilchens dar. Sie geben also gewissermaßen dessen **Seinswahrscheinlichkeiten** an. Demgegenüber würde die alternative Deutung der QED davon ausgehen, dass die Wahrscheinlichkeitswellen dieser Theorie **Beobachtungswahrscheinlichkeiten** darstellen, welche die Vermessung einer sich ausbreitenden elektromagnetischen Welle beschreiben. Auf die Darstellung bloßer Wahrscheinlichkeiten der Beobachtung würde sich die QED für diese Interpretation deshalb beschränken, weil wir die Ausbreitung der elektromagnetischen Welle aus messtechnischen Gründen prinzipiell immer nur mit einer gewissen Unschärfe ermitteln können.

Wenn die zuvor skizzierte Interpretation des Doppelspaltversuchs auf Basis eines derart umgedeuteten Stellenwerts der QED möglich wäre, hätte dies aus erkenntnistheoretischer Perspektive zwei gewaltige Vorteile gegenüber der Kopenhagener Deutung der Quantentheorie:

- Zum einen würde damit das vermeintliche Mysterium der dualen Natur des Lichts als bloßer Unterschied in der Erscheinung eines in sich identischen Objekts enttarnt. Damit hätte man es hier mit einem Phänomen zu tun, das uns auch in der Alltagswelt gegenübertritt. So erscheint uns etwa ein Würfel aus bestimmten Blickrichtungen als zweidimensionales Quadrat, während wir bei der Einnahme anderer Beobachtungspunkte seine vollständige dreidimensionale Gestalt wahrnehmen können.
- Zum anderen wäre diese Interpretation die Basis für eine Auflösung des angeblich durch den Doppelspaltversuch bewiesenen Existenzproblems der Quantenphysik. Wenn nämlich das Licht bei beiden Varianten des Experiments als Energie- und nicht als Wahrscheinlichkeitswelle durch den Doppelspalt läuft, dann ist keine Beobachtung erforderlich, um es aus dem Zustand eines bloß "*verschmierten Seins*" in die reale Existenz zu überführen.<sup>xi</sup>

### **Ist die holografische Grenze ein für allemal gegeben?**

Mein Versuch einer Neuinterpretation des Doppelspaltexperiments resultiert zwar aus einer transzendentalen Reflexion auf die Rolle unseres Handelns bei der Beobachtung des Objekts 'Licht'. Eine negative Beurteilung seiner physikalischen Tragfähigkeit sollte aber nicht zu einer vorschnellen Ablehnung des transzendentalen Zugangs zum Erkenntnisprozess verleiten. Wenn sich nämlich die vorgeschlagene Umdeutung des Stellenwerts der QED als unmöglich oder empirisch unhaltbar erwiese, wäre dies noch **kein Argument gegen den transzendentalen Standpunkt als solchen**, sondern höchstens ein Hinweis auf Mängel in meinem Physikverständnis. Denn als Philosoph kann ich selbstverständlich nicht der bessere Physiker sein, sondern bloß beispielhafte Demonstrationen des transzendentalen Fragens und Analysierens liefern. Auch die folgenden Überlegungen wollen dort, wo sie gängige physikalische Lehrmeinungen in Frage stellen, nur dazu einladen, sich auf die Perspektive eines nicht-objektivistischen Realitätsverständnisses einzulassen.

Ihr Thema ist, wie aus dem Titel des vorliegenden Abschnitts hervorgeht, die holografische Grenze. Schon bei der Präsentation der zur Formulierung dieser Grenze führenden Fragestellung erweist sich Bekenstein als lupenreiner Ontologe. Es geht bei dieser Fragestellung um die mögliche Dichte der im Volumen von einem Kubikzentimeter speicherbaren Information, und Bekenstein denkt hier zunächst an Quarks als Informationsspeicher. Danach bringt er Superstrings ins Spiel, und schließlich erwähnt er sogar *"bislang nicht einmal hypothetisch angedachte Ebenen"*. Denn *"es könnte im Universum mehr Strukturebenen geben, als unsere physikalische Schulweisheit sich träumen lässt."* Diese Vorstellung von möglicherweise **gegebenen** Strukturebenen ist pure Ontologie des Vorhandenen. Aus transzendentaler Perspektive sind es dagegen die Weiterentwicklungen unserer eigenen Praxis, die uns neue Modelle und Strukturebenen **auf die Natur projizieren** lassen, weil wir mit ihrer Hilfe eine bessere Orientierung unseres sich im Gefolge technischer und gesellschaftlicher Umwälzungen ändernden Handelns erzielen wollen.

Genau an dieser Stelle kommt dann die auch vom transzendentalen Ansatz geteilte Überzeugung von einer subjektunabhängigen Existenz der Welt ins Spiel. Sie äußert sich einfach darin, dass nicht all die neu entwickelten Modelle gleich gut zur Orientierung unseres künftigen Handelns taugen: Einigen gelingt das besser als anderen, während viele von ihnen das Handeln gänzlich scheitern lassen, weil sie zu falschen Prognosen des Verhaltens der uns im Tun gegenüberstehenden Objekte führen. Und dieses immer drohende **Scheitern** des Handelns ist der einzige Grund für unsere Überzeugung von einer eigenständigen Existenz der von uns wahrgenommenen Welt. Man kann es auch so formulieren: Die Existenz der Welt äußert sich darin, dass sie **Widerstand** gegen bestimmte Modellvorstellungen zeigt, während sie sich anderen mehr oder weniger bereitwillig zu fügen scheint.

Nun zu Bekensteins Antwort auf die Frage nach der möglichen Kapazität der Materie zur Informationsspeicherung. Wie oben referiert, vertritt er die These, dass die maximale Informationsdichte eines dreidimensionalen Systems durch seine in Planck-Flächen gemessene Oberfläche und nicht durch sein Volumen begrenzt ist, wobei diese Begrenzung von der Zusammensetzung des Systems oder dem Wesen der fundamentalsten Naturbausteine unabhängig ist. Dass seine im vorliegenden Aufsatz gegebene Begründung für jene Unab-



hängigkeit von der Art der jeweils als Informationsspeicher genutzten Systemstrukturen unzureichend ist, möge die folgende Überlegung zeigen:

Es sind prinzipiell **zwei Wege der Informationsverdichtung** innerhalb eines gegebenen Volumens denkbar: Erstens ein **immer dichteres Zusammenpacken** der Informationsträger. Zweitens die Verwendung von **immer feingliedrigeren Strukturen** als Informationsträger. Bekensteins Argument mit dem irgendwann "*unter seiner eigenen Schwerkraft zu einem Schwarzen Loch*" kollabierenden Transistorhaufen bezieht sich aber nur auf den ersten der beiden Wege. Den anderen Weg verfolgt er nicht weiter. Dabei ist gerade auf ihm meiner Ansicht nach eine Informationsverdichtung denkbar, die über die von der Physik der Schwarzen Löcher angedachte Grenze hinausgeht. Denn bei diesem Weg kommt es ja zu keiner verstärkten Zusammenballung von Materie, weshalb kein Kollabieren zu einem Schwarzen Loch droht. Hier geht es vielmehr um eine Weiterentwicklung unserer Beobachtungsmethoden, denn nur sie könnte uns den Zugang zu jenen feingliedrigeren Materiestrukturen eröffnen. Die damit zusammenhängenden Beobachtungsprobleme sind zwar nicht viel geringer als die im Kontext der Schwarzen Löcher auftretenden Schwierigkeiten, aber doch etwas anders geartet. Und weil sie nicht in einem streng vom Subjekt getrennten Objektbereich angesiedelt sind, sondern dort auftreten, wo unser erfahrungskonstitutives Beobachtungshandeln mit seinen Gegenständen interagiert, könnte man hier von transzendentalen Problemen sprechen.

Eine Konkretisierung dieser Probleme am Beispiel der von Bekenstein erwähnten Quarks ergibt folgendes Bild: Quarks sind Elementarteilchen, die nach dem Standardmodell der Teilchenphysik mehrere Quanteneigenschaften oder Freiheitsgrade besitzen. Würde man daher Quarks zur Informationsspeicherung verwenden, könnten deren Quantenzustände (Farbe, Geschmack, Spin usw.) unterschiedliche Informationseinheiten darstellen. Damit wäre es theoretisch sogar möglich mehr als ein Bit Information pro Quark zu speichern. Jedoch sind die praktischen Herausforderungen, diese Information zu kontrollieren und zu extrahieren derzeit aus mehreren Gründen nicht lösbar. So liegt etwa die präzise Kontrolle und Isolation von Quarkzuständen innerhalb von Hadronen oder anderen Teilchen außerhalb unserer aktuellen technologischen Möglichkeiten. Ferner kollabiert die Quantenmessung typischerweise den Zustand, was es schwierig macht, mehrbitige Informationen aus einem einzelnen Quark abzurufen, ohne dessen Quantenzustand zu zerstören. Schließlich sind Quantensysteme anfällig für Fehler durch Dekohärenz und andere Quantengeräusche, was eine zuverlässige Informationsspeicherung erschwert.

Das sind gewiss sehr große Hürden. Während aber das immer dichtere Zusammenpacken von Informationsträgern mit naturgesetzlicher Notwendigkeit zur Bildung eines Schwarzen Lochs führt, scheint es mir doch immerhin **denkbar**, dass man bei der Lösung der eben genannten Kontroll- und Isolationsprobleme entscheidende Fortschritte erzielt. Sollte dies der Fall sein, dann wäre das unvereinbar mit dem von Bekenstein vertretenen Gedanken einer subjektunabhängigen Gegebenheit der holografischen Grenze.

Einen weiteren Ansatzpunkt findet mein Zweifel an dieser Subjektunabhängigkeit in dem Umstand, dass man die den maximalen Informationsgehalt eines dreidimensionalen Systems begrenzende Oberfläche auf Basis der **Planck-Länge** vermisst. Auch darin steckt

nämlich ein womöglich eines Tages überholter Bezug auf unsere aktuellen Beobachtungsmöglichkeiten. Zur Konkretisierung dieser Vermutung gilt es etwas näher auf den Stellenwert jener Planck-Länge einzugehen: Sie ist Bestandteil der sogenannten Planck-Skala, die universelle Maßeinheiten für Länge, Zeit, Masse und Temperatur auf der Basis fundamentaler Naturkonstanten wie der Lichtgeschwindigkeit ( $c$ ), der Gravitationskonstante ( $G$ ) und dem Planckschen Wirkungsquantum ( $h$ ) definiert. Die Planck-Länge ist im Bereich von  $10^{-35}$  m angesiedelt und damit so klein, dass unsere derzeitigen Technologien und theoretischen Modelle nicht ausreichen, um unter dieser Größenordnung angesiedelte Strukturen, wie etwa die von Bekenstein als mögliche Informationsträger ins Spiel gebrachten Strings, zu beobachten und zu kontrollieren. Die Energie, die dafür notwendig wäre, ist extrem hoch und liegt aus folgenden Gründen jenseits unseres aktuellen technischen und theoretischen Potentials:

- Bei Energien dieser Größenordnung wird die Gravitation so stark, dass sie mit den Effekten der Quantenmechanik konkurriert. Insbesondere könnten bei der Erzeugung dieser Energien womöglich Schwarze Löcher entstehen. Das bedeutet, dass die erzeugten Teilchen ihre Energie in Form eines Schwarzen Lochs einschließen könnten, was weitere Beobachtung verunmöglichen würde.
- Darüber hinaus erfordert die Erzeugung von Planck-Energien so hohe Energiedichten, dass die dabei in Gang gesetzten Prozesse auf sehr kleinen räumlichen und zeitlichen Skalen ablaufen würden. Dies könnte die Möglichkeit einschränken, diese Prozesse mit den derzeit verfügbaren Instrumenten überhaupt zu beobachten.
- Schließlich dürften unsere auf der Allgemeinen Relativitätstheorie und dem Standardmodell der Teilchenphysik fußenden Prognosemodelle jenseits der Planck-Skala versagen, weil wir über keine konsistente Theorie der Quantengravitation verfügen.<sup>xii</sup>

All dies sind ebenfalls wieder gewaltige Hürden. Aber undenkbar ist es nicht, dass wir sie in ferner Zukunft überwinden, oder gar mit völlig neuen, auf gänzlich anderen Theorien fußenden Methoden umgehen - und damit zugleich auch die in Einheiten der Planck-Skala angegebene holografische Grenze überschreiten.

Außerdem ist folgendes zu bedenken: Das Konzept der Übertragung und Speicherung von Information beschreibt einen objektiven Naturvorgang, der auch dann stattfindet, wenn wir nicht in der Lage sind, ihn zu beobachten. Solche Vorgänge gibt es selbstverständlich auch aus transzendentaler Perspektive. Denn sie geht genau wie der erkenntnistheoretische Realismus davon aus, dass die Welt als solche unabhängig von uns existiert. Für die transzendente Position ist bloß die **Art** der von uns postulierten unbeobachtbaren Vorgänge stets gebunden an den durch unsere jeweilige Lebenspraxis konstituierten Erfahrungsfiler, nicht aber die prinzipielle Annahme ihrer Existenz. Sollte es also aufgrund der mit der Planck-Skala verbundenen Beobachtungsschranken tatsächlich unmöglich sein, jemals feinste Strukturen wie die Strings zu beobachten, dann würde die holografische Grenze bloß die **für uns Menschen nutzbare** maximale Informationsspeicherkapazität eines abgeschlossenen Systems mit Grenzfläche  $A$  beschreiben, nicht aber die objektiv gegebene maximale Informationsspeicherkapazität eines solchen aus Strings bestehenden Systems. Die Annahme der objektiven Existenz von Informationen, die auf der Ebene von Strings gespeichert und transportiert, von uns aber nicht gemessen werden können, würde

allerdings erfordern, dass diese für uns nicht zugänglichen Vorgänge zumindest **indirekte** Auswirkungen in der für uns beobachtbaren Sphäre der Welt haben, welche nur so erklärbar sind. Denn andernfalls hätten wir es dabei mit einer unnötigen und daher sinnlosen Zusatzannahme zu tun.

### **Realistische Fehlinterpretationen des holografischen Prinzips**

Das realistische Weltbild begünstigt nicht nur eine vorschnelle Verabsolutierung der holografischen Grenze, sondern auch Fehlinterpretationen des holografischen Prinzips. Wie oben erwähnt, besagt dieses Prinzip, dass es in der Physik für jedes beliebige dreidimensionale System eine nur auf seiner Grenzfläche definierte Theorie gibt, welche die dreidimensionale Theorie jenes Systems vollständig beschreibt. Richtig verstanden, behauptet man hier zunächst nichts anderes als eine **Äquivalenz** dieser beiden Theorien. Sie besteht in einer mathematischen Beziehung zwischen der zweidimensionalen und der dreidimensionalen Theorie, welche sicherstellt, dass beide **dieselben physikalischen Vorhersagen** machen.

Aus transzendentaler Perspektive bedeutet solche Äquivalenz, dass beide Theorien gleiche Orientierungsmarken für unser technisches Handeln setzen. Ergänzend sei hier am Rande erwähnt, dass zwei in dieser Weise äquivalente Theorien für den transzendentalen Standpunkt **gleichen Wahrheitswert** besitzen. Bemisst sich doch für ihn die Wahrheit einer Theorie am Ausmaß ihrer Eignung zur Orientierung unseres Handelns. Im Fall einer physikalischen Theorie ist dies gleichbedeutend mit dem Ausmaß der Möglichkeit aus ihr zutreffende Prognosen über das Objektverhalten abzuleiten.

Ganz anders die Interpretationsperspektive im realistischen Weltbild. Denn dieses betrachtet Theorien nicht primär als Orientierungshilfen für die gesellschaftliche Praxis sondern als Abbilder eines an sich vorhandenen Seins. Und aus dieser Perspektive wird die mathematische Äquivalenz unter der Hand ganz schnell zum vermeintlichen Abbild eines **realen Projektionsvorgangs**, in dem analog zur fotografischen Technik der Holografie unsere dreidimensionale Welt aus zweidimensionalen Informationen hervorgeht. Die in mathematischer Sprache verfassten theoretischen Arbeiten der Physiker\*innen stellen zwar nur auf die erwähnte Äquivalenzbeziehung ab. Dort jedoch, wo man die Theorien einem breiten Publikum in umgangssprachlichen Texten präsentiert, schleichen sich immer wieder Formulierungen ein, die auf einen realen Projektionsvorgang verweisen. So entsteht der Verdacht, dass die Physiker\*innen auch dann, wenn sie selbst über den Stellenwert ihrer mathematisch formulierten Erkenntnisse im Kontext ihres realistischen Weltbilds nachdenken, mit dem Projektionsgedanken spielen.

Zurückzuweisen ist dies deshalb, weil es für eine solche Projektion irgendeines **Kausalprozesses** bedürfte, der dafür verantwortlich ist, dass Informationen zunächst auf einer zweidimensionalen Oberfläche gespeichert und danach in den dreidimensionalen Raum transferiert werden. Die mathematisch-physikalischen Schlussfolgerungen aus dem holografischen Prinzip beinhalten derzeit aber kein allgemein akzeptiertes Modell eines solchen Kausalprozesses, sondern nur die erwähnte Äquivalenz. Hier spielt bloß der in der Informationstechnik und in den Lebenswissenschaften etablierte Begriff der 'Information' dem Denken einen Streich. Denn dieser Begriff ist stets eingebettet in zielorientierte bio-

logische oder technische Kommunikationsprozesse, bei denen es zur Speicherung und Übertragung von Informationen kommt. Und wenn man jenen Begriff in unkontrollierter Weise auf das Feld der theoretischen Physik überträgt, kommt es zu unangemessenen Vorstellungen, wie der eines holografischen Universums. Auch Bekensteins Denken ist anfällig für diesen Fehler. Auf der einen Seite betont er zwar den theoretischen Nutzen der holografischen Äquivalenz für die vereinfachte mathematische Behandlung von hochkomplexen Teilchen-Problemen. Auf der anderen Seite präsentiert er aber seinen Leser\*innen das holografische Prinzip als die *"Hypothese ..., unser Universum, das wir in drei Raumdimensionen wahrnehmen, sei in Wirklichkeit auf eine zweidimensionale Oberfläche 'geschrieben' – wie ein Hologramm."*

Bei seiner Diskussion dieser Hypothese weist Bekensteins Argumentation dann auch noch zwei weitere Schwachpunkte auf, die auf entsprechende Mängel seines erkenntnistheoretischen Realismus verweisen. Der eine der beiden findet sich dort, wo er, wie bereits oben zitiert, zwei mögliche Schlussfolgerungen aus der Hypothese des holografischen Universums unterscheidet: Entweder sei unser alltägliches Erleben einer dreidimensionalen Welt *"eine tiefe Illusion"*, oder es sei *"nur eine von zwei Alternativen, die Realität zu betrachten"*.

Bekenstein drückt sich an dieser Stelle vor einer begründeten Entscheidung für eine der zwei Sichtweisen und bleibt den Leser\*innen auch einige der in diesem Kontext wichtigen Reflexionen schuldig. So gälte es etwa im Zusammenhang mit der Illusions-These zu präzisieren, was genau denn unter einer Illusion zu verstehen ist. Hätte Bekenstein darüber nachgedacht, wäre er vielleicht dem pragmatistischen Wahrheitsverständnis einen Schritt näher gekommen. Er hätte dann nämlich bemerkt, dass wir den illusionären Charakter einer Wahrnehmung nur vor dem Hintergrund ihrer Orientierungsleistung für das Handeln beurteilen können. In dem Maße, in dem sie dem Akteur Handlungsmöglichkeiten verspricht, die tatsächlich nicht bestehen, ist sie illusionär. So weckt etwa die Betrachtung des Hologramms eines dreidimensionalen Körpers bei den Betrachter\*innen die Erwartung, dass sie beim Abtasten seiner Oberfläche bestimmte sensorische Erlebnisse haben werden, die dann bei der Probe aufs Exempel nicht eintreten. Analog zum vorliegenden Beispiel wäre zu überlegen, bei welchen Handlungen (sprich: Experimenten) man im Falle eines holografischen Universums den bloß illusionären Charakter dieser von uns erfahrenen dreidimensionalen Welt bemerken könnte. Wären keine derartigen Experimente denkbar, dann müsste man die Frage, ob es sich bei unserem Erleben einer dreidimensionalen Welt um eine Illusion handelt, aus pragmatistischer Perspektive als **sinnlos** zurückweisen.

Wie fern Bekenstein solcher Pragmatismus liegt, zeigt der zweite der beiden zuvor erwähnten Schwachpunkte seiner Diskussion des holografischen Prinzips. Die betreffende schon im Referat zitierte Aussage folgt unmittelbar auf jene ebenfalls bereits wiedergegebene Passage seines Aufsatzes, in der er feststellt, dass ein *"mittels Superstring-Theorie beschriebenes Universum"* mit einer De-Sitter-Raumzeit *"völlig äquivalent zu einer Quantenfeldtheorie (ist), die auf der Begrenzung (von dessen) Raumzeit operiert"*. Dies bedeutet für Bekenstein, dass intelligente Bewohner jenes Universums *"nicht unterscheiden (könnten), ob sie in einem fünfdimensionalen, von einer Stringtheorie beschriebenen*

*Kosmos leben oder in einer vierdimensionalen Welt, auf die eine Quantenfeldtheorie mit punktförmigen Teilchen zutrifft. Natürlich könnte ihnen die Struktur ihres Gehirns ein massives Vorurteil zugunsten einer dieser Beschreibungen aufdrängen – so wie unser angeborener 'gesunder Menschenverstand' die Wahrnehmung konstruiert, dass unser Universum drei räumliche Dimensionen besitzt."*

Was hier als ein bloßes "*Vorurteil*" abgetan wird, ist der **transzendente Praxisbezug der Theorie**. Sie muss sich im Handeln bewähren, um als wahr zu gelten. Wenn daher die intelligenten Bewohner des von Bekenstein erwähnten Universums neue Formen der Praxis entwickeln, für welche die Annahme eines fünfdimensionalen String-Universums bessere Orientierung liefert als die einer vierdimensionalen Quantenwelt, werden sie der Ansicht sein, dass die fünfdimensionale Theorie die Realität besser beschreibt und somit einen höheren Wahrheitswert besitzt als das Modell einer vierdimensionalen Quantenwelt. Auch die Zurückführung eines solchen angeblichen "*Vorurteils*" der intelligenten Bewohner jenes Universums auf "*die Struktur ihres Gehirns*" ist eine Form der Ignoranz der Praxis. Denn die Strukturen des Gehirns von intelligenten Lebewesen entstehen **im Wechselspiel** mit ihrer Praxis: Einerseits schaffen bestimmte Entwicklungen ihres Handelns Raum für evolutionäre Veränderungen ihres Gehirns. Andererseits eröffnen diese Veränderungen die Möglichkeit zur Weiterentwicklung ihrer Praxis.

### **Zur Illusion einer endgültigen Theorie**

Bekenstein lag ganz richtig mit der seinen 2003 geschriebenen Aufsatz beschließenden Vermutung, dass in der künftigen Physik "*Informationsaustausch zwischen physikalischen Prozessen*" eine zentrale Rolle spielen werde. Dies gilt vor allem für die Schnittstelle zwischen Gravitation und Quantenmechanik.

So beschreibt etwa die Theorie der **Schleifenquantengravitation** die Raumzeit im Unterschied zur klassischen allgemeinen Relativitätstheorie nicht als ein glattes Kontinuum sondern in Gestalt von sogenannten **Spin-Netzwerken**, deren diskrete Strukturen im Bereich der Planck-Skala angesiedelt sind. Jeder Knoten und jede Verbindung besagter Netzwerke trägt Quanteninformationen über geometrische Größen wie Flächen oder Volumina, welche definieren, wie Raum und Zeit miteinander verknüpft sind und wie sie sich bei bestimmten physikalischen Prozessen entwickeln. Die Dynamik der Raumzeit und der physikalischen Felder kann daher in dieser Theorie als ein Austausch von Informationen zwischen den als quantisierte Raumzeit-Einheiten fungierenden Knoten und Verbindungen verstanden werden.

Auch die **Quanteninformationstheorie** nutzt diskrete Netzstrukturen, um die in der Quantengravitation auftretenden komplexen Zustände und Dynamiken in den Griff zu bekommen. Und diese Netzwerke stellen ebenfalls auf den Informationsfluss und den Austausch zwischen verschiedenen Teilen des jeweils analysierten Quantensystems ab. In diesem Fall handelt es sich um sogenannte **Tensor-Netzwerke**. Jeder ihrer Knoten repräsentiert einen lokalen Teil des jeweils dargestellten Quantensystems und enthält Informationen über seinen Zustand. Die als Kanten oder Links bezeichneten Verbindungen zwischen jenen Knoten tragen Informationen über die Korrelationen und Verschränkungen zwischen den verschiedenen Teilen des Systems. Der Informationsaustausch wird in Tensor-

Netzwerken durch diese Verknüpfungen dargestellt. Sie zeigen an, wie Informationen (z.B. über den Zustand oder die Wechselwirkungen) zwischen den einzelnen Komponenten des Systems fließen. Die Tensor-Netzwerke stellen daher nicht nur die statische Struktur des jeweiligen Quantensystems dar, sondern betonen auch den zwischen den verschiedenen Teilen des Systems stattfindenden Fluss von Informationen. Darüber hinaus kann man mit ihrer Hilfe eines der größten Probleme bei der Beschreibung von Quantensystemen bewältigen. Es handelt sich dabei um die mit zunehmender Anzahl von Teilchen exponentiell wachsende Komplexität der Zustandsräume. Tensor-Netzwerke ermöglichen es, diese Komplexität zu reduzieren, indem sie nur die relevanten Informationsströme (Verschränkungen und Korrelationen) zwischen den Teilen des Systems hervorheben. Denn in den Tensoren und ihren Verbindungen werden nur die für die Beschreibung der Dynamik und die Zustände des Systems wichtigen Informationseinheiten kodiert.<sup>xiii</sup>

Obwohl in den letzten Jahren sowohl bei der Theorie der Schleifenquantengravitation als auch bei der Quanteninformationstheorie signifikante Fortschritte erzielt wurden, existiert aktuell noch keine umfassende Theorie, die völlig ohne Felder und Objekte in der Raumzeit auskommt und nur den Informationsaustausch zwischen physikalischen Prozessen beschreibt. Dass das eines Tages der Fall sein könnte, erscheint zwar durchaus möglich. Dies wäre jedoch **keinesfalls** die von Bekenstein beschworene "*endgültige Theorie*", durch welche der "*endgültige Triumph der Idee, dass die Welt aus Information besteht*" besiegelt wird. Der Glaube an die mögliche Existenz einer solchen Theorie ist eine weitere **Folge der ontologischen Illusion**, dass unsere Theorien praxisunabhängige Abbilder einer an sich bestehenden Realität sind.

Behält man nämlich im Auge, dass die Theorien sich nur dadurch auf die Realität beziehen, dass sie unserem im Kontakt mit dieser Realität ablaufenden Tun mehr oder weniger erfolgreich Orientierung geben, dann wird sofort klar, dass es eine wie auch immer geartete endgültige Theorie prinzipiell niemals geben wird. Denn unser Weltbild kann diese Orientierungsleistung nur dann erbringen, wenn es sich gemeinsam mit unserem in kontinuierlichem Wandel begriffenen Handeln weiter entwickelt. So wie die Konzepte der Information und des Netzwerks im Kontext einer gesellschaftlichen Praxis entstanden, die erstmals mit der Herausforderung des Steuerns von hochkomplexen, weltumspannenden Systemen und Kommunikationsnetzen konfrontiert war, werden daher neue Herausforderungen des kollektiven Handelns den Anstoß zur Entwicklung von ganz neuen Paradigmen und Theorien geben.

## Zitierte Texte

- (1) CZASNY, K.: Erkenntnistheoretische Grundlagen der klassischen Physik, Band I, Hamburg, 2014, Disserta Verlag (Ersterscheinung: 2010 im GRIN Verlag)
- (2) CZASNY, K.: Erkenntnistheoretische Grundlagen der klassischen Physik, Band II, Hamburg, 2014, Disserta Verlag (Ersterscheinung: 2010 im GRIN Verlag)
- (3) CZASNY, K.: Quantenphysik als Herausforderung der Erkenntnistheorie, Freiburg im Br., 2010, Verlag Karl Alber
- (4) CZASNY, K.: Das bedrohte Subjekt, Beiträge zur pragmatistischen Transzendentalphilosophie, Baden-Baden, 2020, Academia,
- (5) RÖTHLEIN, B.: Das Innerste der Dinge. Einführung in die Atomphysik, München, 1998, Deutscher Taschenbuch Verlag
- (6) <https://de.wikipedia.org/wiki/Informationstheorie>; abgerufen am 3.8.2024
- (7) <https://www.spektrum.de/magazin/das-holografische-universum/830304>; abgerufen am 3.8.2024

- 
- i Vgl. (1), (2) und (3) im Verzeichnis der zitierten Texte
  - ii Jacob David Bekenstein (1947 - 2015) war einer der Begründer der Thermodynamik Schwarzer Löcher und leistete wichtige Beiträge zur Verbindung von Information und Gravitation. Nach ihm sind die Bekenstein-Hawking-Entropie und die Bekenstein-Grenze – die maximal mögliche Information in einer Kugel – benannt.
  - iii Vgl. (7)
  - iv Vgl. (6)
  - v Im weiteren Verlauf dieses Textes werde ich der Einfachheit halber statt "transzendental-pragmatistisch" immer nur "transzendental" schreiben. Dies ist deshalb möglich, weil hier von anderen Varianten der transzendentalen Position nicht mehr die Rede sein wird.
  - vi Die vorliegende Skizze greift nur einige Aspekte meiner ausführlichen Analyse der Unterschiede zwischen dem mechanischen und dem systemischen Paradigma im Aufsatz "*Erkenntniskritische Betrachtung der Lebenswissenschaften*" heraus. Der Aufsatz ist publiziert in (4).
  - vii)(5), S. 38
  - viii Adenosintriphosphat (ATP) speichert und transportiert chemische Energie, die für verschiedenste biochemische Reaktionen im Körper essentiell ist.
  - ix Auch alle subtileren Messverfahren bieten keinen Ausweg. Entweder führen sie ebenfalls dazu, dass das Licht nicht mehr interferiert, oder sind sie wegen der Unschärfebeziehung nicht mit der erforderlichen Genauigkeit durchzuführen. Vgl. (3), S. 37
  - x Vgl. (3), Abschnitt 3.4
  - xi Um eine detaillierte Auseinandersetzung mit dem Existenzproblem und anderen erkenntnistheoretischen Stolpersteinen der Quantenphysik bemühte ich mich im dritten Band meiner eingangs erwähnten Studienreihe zu den erkenntnistheoretischen Grundlagen der Physik. Vgl. (3)
  - xii Diese Aufzählung von Beobachtungsproblemen auf stützt sich auf die Antwort von ChatGPT auf folgende Frage: Wieso soll es uns nicht möglich sein zu Beobachtungszwecken Energien zu erzeugen, die größer sind als die sogenannte Planck-Energie?
  - xiii Die vorangehenden Hinweise auf den aktuellen Forschungsstand in der Theorie der Schleifenquantengravitation und Quanteninformationstheorie stützen sich auf die Antwort von ChatGPT auf folgende Frage: Hat sich Bekensteins Vermutung aus dem Jahr 2003, dass sich die fundamentale physikalische Theorie der Zukunft weder mit Feldern noch mit Objekten in der Raumzeit befassen wird, sondern mit dem Informationsaustausch zwischen physikalischen Prozessen, inzwischen bestätigt?