

## **Metaphysik im „Handumdrehen“: Kant und Earman, Parität und moderne Raumauffassung**

Holger Lyre

Institut für Philosophie, Universität Bonn, 53012 Bonn,  
E-mail: lyre@uni-bonn.de

Im Jahr 1768 präsentierte Immanuel Kant ein Argument, das die Notwendigkeit einer absoluten Raumstruktur, eines Substantialismus im Gegensatz zum Relationalismus, anhand der Eigenschaft der Händigkeit demonstrieren sollte. Während weitgehende Übereinstimmung besteht, dass das kantische Argument defizitär ist, gibt es in jüngerer Zeit eine wesentlich durch John Earman angeregte Debatte über den Status des kantischen Arguments angesichts der in der modernen Physik als fundamental angenommenen Paritätsverletzung, die zur Auszeichnung von Händigkeiten führt. Dem Relationalisten, so „Earman’s challenge“, stehen keine Mittel zur Verfügung, die Auszeichnung einer Händigkeit im Kosmos ohne Rekurs auf eine absolute Raumstruktur zu erklären. Nach einer Aufbereitung des historischen Hintergrunds der Newton/Leibniz-Debatte zum ontologischen Status des Raumes sowie einer Rekapitulation des kantischen Arguments bietet die vorliegende Arbeit eine systematische Betrachtung von Händigkeitsargumenten in der modernen Physik. Ziel ist es zu zeigen, dass „Earman’s challenge“ zurückgewiesen werden kann.

In 1768 Immanuel Kant presented an argument showing the necessity of absolute space, i.e. substantialism in contrast to relationalism, based on the property of handedness. While there is large consensus about the fallacy of Kant’s argument, a more recent debate exists – mainly stimulated by John Earman – about the status of the Kantian argument in view of modern physics and its fundamentally built-in parity violation, which leads to a preferred handedness. According to Earman the relationalist has no means to distinguish one handedness in the cosmos without reference to an absolute structure of space. After recapitulating the historical background of the Newton/Leibniz debate on the ontological status of space as well as the Kantian argument, this paper offers a systematic consideration of arguments about handedness in modern physics. The goal is to show that “Earman’s challenge” can be rejected.

### **1. Ozma, Kant und „Earman’s challenge“**

Nehmen wir einmal an, wir verfügten über eine Verbindung zu einer fremden Intelligenz. Eine solche Verbindung könnten wir uns in Form eines in Pulsfolge codierten Funksignals denken. Auf diesem Wege wäre es möglich – nach Klärung technischer und Codierungsdetails –, Bild- bzw. Filmsignale zu übersenden. Nehmen wir weiter an, wir wollten ein Bild des amtierenden US-Präsidenten übersenden. Die Bildinformation könnte als Matrix mit unterschiedlich gefärbten Pixeln codiert werden, und wir wollen auch annehmen, dass ihre Übertragung so

weit gelingt. Und doch stellt sich hier ein subtiles Problem: denn wie können wir unseren fernen Kommunikationspartnern den Unterschied zwischen einer Links-Rechts-Matrix (also einer solchen, deren Zeilen von links nach rechts verlaufen) und einer Rechts-Links-Matrix vermitteln? Wie sich nach einiger Überlegung zeigt, lässt sich die Händigkeit einer Matrix nicht – oder jedenfalls nicht so ohne Weiteres – mit Hilfe eines Funksignals übermitteln. Nehmen wir nun auch an, dass es keinerlei händige Objekte gibt – etwa Spiralgalaxien etc. –, die sowohl wir als auch unsere Kommunikationspartner gemeinsam sehen, so folgt, dass es allem Anschein nach überhaupt nicht möglich ist, die Bedeutung der Begriffe „links“ und „rechts“ über einen gewöhnlichen Kommunikationskanal zu übermitteln. Martin Gardner (1964) bezeichnete dies Problem in Erinnerung an das in den 60er Jahren startende „Ozma-Projekt“ zur radioastronomischen Suche extraterrestrischer Signale intelligenten Ursprungs als das *Ozma-Problem* – es gilt als eines der interessantesten Grundlagenprobleme der nachrichtentechnischen Kommunikationstheorie.<sup>1</sup>

Das Ozma-Problem verweist auf die merkwürdige Natur der Händigkeit, also die aus dem Alltag wohlbekannte Eigenschaft eines inneren Drehsinns bestimmter Objekte im Raume. Wie es scheint, lässt sich eine *bestimmte Händigkeit* nur durch direkten Hinweis auf ein händiges Objekt kennzeichnen, erlaubt also lediglich eine ostensive Definition. Zu den Objekten, die eine Händigkeit besitzen, zählen – neben „Händen“ und Füßen – beispielsweise Schrauben, Knoten, rechts- oder linksdrehende Milchsäuren und Zuckermoleküle, DNA-Moleküle, rechts- oder linkspolarisierende optisch aktive Kristalle etc.<sup>2</sup>

Dass es sich bei der Händigkeit um eine mit dem Raum zusammenhängende Eigenschaft handelt, ist offenkundig, dass sich aber hieran auch Überlegungen zur Ontologie des Raumes anknüpfen lassen, ist keineswegs sofort einsichtig, und hierauf hat als erster Immanuel Kant in einem kleinen Essay aus dem Jahre 1768 mit dem merkwürdigen Titel *Von dem ersten Grunde des Unterschiedes der Gegenden im Raume* hingewiesen. Die Überlegung, die Kant in dieser Schrift anstellt, und die im Folgenden im Zentrum stehen soll, lautet kurz gesagt, dass das Phänomen der Händigkeit auf ein Argument zur Begründung einer substantiellen Raumauffassung führt. Das Ozma-Problem liefert hierfür eine

---

<sup>1</sup>Den Hintergrund der Bezeichnung „Ozma-Projekt“ bildet die Begeisterung seines ersten wissenschaftlichen Leiters, Francis Drake, für L. Frank Baums märchenhafte Geschichten vom Lande „Oz“. Neben der dortigen Prinzessin Ozma taucht u.a. die Figur des „Long eared hearer“ auf, ein Wesen, das hunderte Kilometer weit lauschen kann.

<sup>2</sup>Eng mit dem Begriff der Händigkeit verbunden oder teilweise synonym sind die Begriffe Parität, Chiralität, Spiralität, Helizität, Dissymmetrie sowie Enantiomorphie, Enantiomerie oder optische Isomerie.

erste Intuition: eine mit einem beliebigen Datenkanal übertragene Information, z.B. eine binärcodierende Folge von Strompulsen, stellt räumlich eine rein relationale Struktur dar – und so scheinen Vertreter einer relationalistischen Auffassung des Raumes keine Mittel an der Hand zu haben, die es ihnen gestatten, eine Händigkeit auszuzeichnen. Es ist zwar sehr wohl möglich, eine Handlungsanweisung zur Erzeugung eines händigen Objekts, etwa einer Schraube, und seines gespiegelten Gegenstücks zu geben, aber eine Klärung der Frage, welches der beiden Objekte dasjenige ist, das wir konventionell etwa als „rechts“ bezeichnen, ist nicht möglich.

In diesem Aufsatz soll nun den Implikationen des kantischen Arguments und des Ozma-Problems für die moderne Debatte zur Ontologie des Raumes nachgegangen werden. Denn im heutigen Standardmodell der Physik liegt tatsächlich die *Auszeichnung* einer Händigkeit im Rahmen der grundgesetzlich verankerten Brechung der Paritätsinvarianz vor. John Earman (1991) hat in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass dies eine Wiederaufnahme des kantischen Arguments mit modernen Mitteln und mithin eine Wiederbelebung der absoluten Raumauffassung in der modernen Physik zur Folge hat. „Earman’s challenge“, die Herausforderung an den Raumzeit-Relationalisten, dieser unliebsamen Folge zu entgehen, hat jüngst in der Literatur zu einigen Reaktionen geführt. Es soll hier dafür argumentiert werden, dass das Problem der ausgezeichneten Händigkeit gleichermaßen ein Problem für Relationalisten wie Substantialisten darstellt – dass aber der plausibelste, über das Standardmodell hinausgehende Erklärungsversuch keinerlei absolutistische Annahmen benötigt.<sup>3</sup>

## **2. Newton, Leibniz und die Metaphysik des Raumes**

*Locus classicus* der Debatte zum ontologischen Status des Raumes ist der Streit zwischen Gottfried Wilhelm Leibniz und dem englischen Theologen und Philosophen Samuel Clarke, dem Sprachrohr und Verteidiger Isaac Newtons.<sup>4</sup> Wie bekannt, treten in dieser Debatte Newton und Clarke als Verfechter einer substantialistischen und Leibniz als Vertreter einer relationalistischen Raumauffassung auf. Da die Analogie zwischen Kants und Newtons Argumentweise für das Folgende eine gewisse Rolle spielt, da beide, wie sich zeigt,

---

<sup>3</sup>Sehr vereinzelte Abschnitte finden sich – wenn auch bei weitem nicht in dieser Ausführlichkeit – in Lyre (2004). Dies betrifft jedoch nicht die eigentlichen Schlussfolgerungen und Ergebnisse des letzten Teils der Arbeit.

<sup>4</sup>Zur Historie des in Leibniz’ letztem Lebensjahr ab November 1715 geführten Leibniz/Clarke-Briefwechsels siehe das Nachwort des Herausgebers in Schüller (1991).

letztlich Ad hoc-Charakter besitzen, scheint es sinnvoll, die Genese beider Argumentweisen hier noch einmal ein wenig auszubreiten. Wir stoßen dabei auch auf eine interessante, in der Literatur kaum betonte Erklärung der vordergründigen Redundanz der drei Newtonschen Axiome im Sinne einer verklausulierten Forderung des absoluten Raumes im Trägheitsgesetz.

Newton formuliert seine Position insbesondere im Scholium über Raum und Zeit in den *Principia* (Newton 1687) wie folgt: „*Der absolute Raum bleibt vermöge seiner Natur und ohne Beziehung auf einen äußeren Gegenstand stets gleich und unbeweglich.*“ In Newtons Konzeption des absoluten Raumes ist wenigstens dreierlei enthalten: Der absolute Raum stellt, erstens, ein universelles Bezugssystem für sämtliche Bewegungsvorgänge dar (auch als *Äther* bezeichnet). Der absolute Raum besitzt zweitens einen eigenständigen Realstatus. Dies ist zunächst keine intuitive Behauptung. Während wir geneigt sind, materiellen Objekten wie Tischen und Stühlen, ja überhaupt allen physikalischen Gegenständen einen gewissen substantiellen Charakter zuzubilligen, scheint der Raum selbst vordergründig keinen derartigen Status zu besitzen – oder doch allenfalls in einem gänzlich anderen Sinne als materielle Körper. Letzteres behauptet Newton jedoch ganz dezidiert und will sich dabei vor allem gegen die cartesische Auffassung der *res extensa* wenden, die den Raum mit der in ihm enthaltenen ausgedehnten Materie identifiziert. Demgegenüber ist ein Substantialismus (oder auch Realismus) des Raumes – wie bei Newton – dadurch charakterisierbar, dass nach dieser Auffassung Raum für sich und Materie für sich je einen eigenen Seinsstatus besitzen und dass insbesondere ein leerer, von jeglicher Materie freier Raum existieren kann. Fasst man den Raum als Punktemenge auf, so zieht die substantialistische Raumauffassung die Annahme von Raumpunkten als Entitäten *per se* nach sich.

Das dritte, empirisch entscheidende Charakteristikum des absoluten Raumes ist, dass Newton ihn als Ursache der Trägheit ansieht. Dies wird deutlich anhand der offenkundigen Einwände, die die beiden vorhergehenden Kriterien, insbesondere das erste, provozieren. Denn augenscheinlich ist ja die Forderung eines absoluten Bezugssystems in keiner Weise vereinbar mit der Annahme des Galileischen Relativitätsprinzips der Geschwindigkeiten, das besagt, dass der Bewegungszustand eines Körpers nur relativ, also bezogen auf andere Körper, aber eben nicht absolut angegeben werden kann. Das Relativitätsprinzip sah Newton aber durchaus als gültig an: Körperbewegungen sind auch nach seiner Auffassung zunächst rein relational aufeinander bezogen. Newton wollte diese Annahme jedoch nur für den Bereich der Kinematik, also Bewegungsvorgänge

und ihre Geschwindigkeiten, nicht aber für die Dynamik, also unter Berücksichtigung äußerer Kräfte und Beschleunigungen, behaupten. Von derartigen äußeren Kräften ist im Trägheitssatz die Rede: Eine gleichförmig geradlinige Trägheitsbewegung charakterisiert den kräftefreien Fall – umgekehrt enthält eine nicht-geradlinige, krummlinige Bewegung Beschleunigungs- oder Abbremsvorgänge, die von der Einwirkung äußerer Kräfte herrühren.

Wie bekannt stellt Newton seiner Mechanik drei Axiome voran: Trägheitssatz, Bewegungsgesetz und *actio = reactio*. Der Trägheitssatz „*Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus a viribus impressis cogitur statum illum mutare.*“ behauptet bei fehlenden äußeren Kräften einen Zustand der Ruhe oder der *gleichförmigen geradlinigen* Bewegung. Das Bewegungsgesetz – modern die Newtonsche Gleichung  $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a}$  – scheint nun aber das Trägheitsgesetz als Spezialfall bereits zu enthalten, denn aus  $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = 0$  folgt  $\vec{p} = m\vec{v} = const$ , also ein *gleichförmiger* Bewegungszustand. Dies könnte zu der Annahme verleiten, Newton hätte seine Axiome redundant formuliert. Entscheidend aber ist, dass im Trägheitsgesetz von gleichförmig *geradliniger* Bewegung („*uniformiter in directum*“) die Rede ist. Um hierbei definieren zu können, in Bezug worauf eine Bewegung „wahrhaft“ geradlinig verläuft, benötigen wir ein universelles Bezugssystem. Newton führt also im Trägheitsgesetz in verklausulierter Form den absoluten Raum ein!

Die Einführung des absoluten Raumes gestattete Newton, zwischen einer, wie er sagt, „wahren“ Bewegung gegenüber dem absoluten Raume und bloß „scheinbarer“, relativer Bewegung zu unterscheiden. Um dann den wahren Bewegungszustand eines Körpers zu ändern, sind laut Trägheitsgesetz äußere Kräfte aufzubringen. Newton zeigt dies anhand zweier Experimente, die er im Scholium diskutiert, und in denen er das Auftreten von Trägheitskräften in rotierenden Bezugssystemen betrachtet. Mit Blick auf das bekanntere der beiden, das *Eimerexperiment*, argumentiert Newton, dass für das Auftreten von Trägheitskräften – sichtbar anhand der Wasserwölbung eines sich drehenden Eimers – keine hinreichende relationalistische Erklärung in Form von Relativbewegungen zwischen Eimer und Wasser gegeben werden kann. Eine solche Erklärung bietet jedoch die Vorstellung des absoluten Raumes, gegen den das Wasser sich dreht. Nach Newton „stiftet“ der absolute Raum die Trägheit.

In dieser Form ist Newtons Argument nicht zwingend. Warum sollte man nicht, so könnte der Relationalist naheliegend einwenden, die Relativbewegung

zwischen Wasser und Laborumgebung zur Erklärung des Phänomens heranziehen? Newton verfolgt diesen Einwand im Scholium nicht explizit, seine Konsequenz aber wäre es, dass der Relationalist behaupten müsste, dass aufgrund der Relativität der Standpunkte auch im umgekehrten Fall, falls nämlich der Eimer in Ruhe und das Labor in einer Drehbewegung um den Eimer sei, ebenso Trägheitskräfte auftreten wie im ersteren Fall. Dass Newton diese Konsequenz nicht erwogen hat oder doch wenigstens für phantastisch hielt, zeigt das zweite, im letzten Absatz des Scholiums diskutierte Gedankenexperiment. Newton betrachtet dort ein System zweier rotierender und mit einem Faden verbundener Kugeln. Auch in diesem Fall wirken Fliehkräfte auf die Kugeln, was sich objektiv an der Fadenspannung nachweisen lässt. Newton geht nun einen entscheidenden Schritt weiter, indem er zusätzlich behauptet, dass ein solches Experiment in gleicher Weise auch in einem leeren Raum stattfinden würde. Dass er dies nicht wirklich experimentell zeigen kann und es sich insofern also streng genommen um eine metaphysische Behauptung handelt, scheint Newton nicht weiter zu beunruhigen. Er war offenbar der Auffassung, dass die Möglichkeit, dass Trägheitskräfte ursächlich von der Existenz ferner Massen abhängen, anschaulich auszuschließen ist.

Es ist demnach durchaus vorstellbar, dass diese logische Option, die ja das Einfallstor der späteren Kritik durch Ernst Mach an der absoluten Raumauffassung Newtons darstellt, von Newton zwar gesehen wurde, er sie aber sachlich schlicht für abwegig hielt. Sehr deutlich aber sah Newton, dass sich seine Mechanik in Ansehung der Dynamik nur im Zusammenspiel mit der Vorstellung des absoluten Raumes mit dem Trägheitssatz (den er im Wesentlichen von Descartes übernommen hatte und der ihn nach seiner Ansicht nicht widerspruchsfrei verwendete) konsistent machen lässt. Erst Einstein gelang es auf der heuristischen Basis der Machschen Kritik, sowohl die Konzeption des absoluten Raumes über Bord zu werfen als auch eine völlig neue Sicht von Trägheit und Schwere einzuführen.<sup>5</sup>

In seiner Debatte mit Clarke greift nun Leibniz die Newtonsche Position nicht im Sinne der späteren Kritik Machs an, sondern unter besonderer Verwendung

---

<sup>5</sup>Das Mach-Prinzip kann so verstanden werden, dass kein physikalisches Agens lediglich Wirkungen ausüben darf, ohne selbst solche erleiden zu können (in diesem Sinne verletzt Newtons absoluter Raum sogar sein drittes Axiom *actio = reactio*). In der Allgemeinen Relativitätstheorie wirkt darum die Materie auf die Krümmung der Raumzeit zurück. Dennoch kann man den Einwand machen, dass die Existenz von Vakuum-Lösungen mit dem strengen Machianismus nicht vereinbar ist, so dass entweder ein Feld-Materie-Dualismus bestehen bleibt, oder die operationale Bedeutung der Vakuum-Lösungen angezweifelt werden muss. – Zur modernen Diskussion des Machschen Prinzips siehe Barbour und Pfister (1995), Barbour (2001) und Dambmann (1990).

metaphysischer Prinzipien, die er in geschickter Weise mit Symmetrienüberlegungen vermennt. Dies ist zum einen Leibniz' Satz *vom zureichenden Grunde* – hieraus leitet sich wesentlich eine theologische Argumentationslinie gegen Clarke ab – sowie das *Indiscernibilibienprinzip* (*principium identitatis indiscernibilium*), also die Behauptung der Identität des Ununterscheidbaren. Leibniz setzt dem Newtonschen Substantialismus einen Relationalismus entgegen, der den Raum lediglich als eine Menge von Lagebezeichnungen oder Körperrelationen versteht. Das bedeutet unter anderem, dass die Eigenschaft eines Körpers, sich an einem Raumpunkt zu befinden, zwingend eine relationale Eigenschaft ist – nämlich bezogen auf die Lagen anderer Körper. Der Relationalismus ist in diesem Sinne ein Anti-Realismus bezüglich des Raumes, insofern dem Raum bzw. Raumpunkten als dessen Konstituenten keinerlei ontologische Eigenständigkeit zugebilligt wird. In seinem dritten Schreiben an Clarke schreibt Leibniz (1716) im fünften Absatz:

*„Ich besitze mehrere Beweise, um die Vorstellung von all denen zu widerlegen, die den Raum fälschlicherweise für eine Substanz oder zumindest für irgendein absolutes Seiendes halten. Jedoch will ich im Augenblick nur von dem Beweis Gebrauch machen, zu dem man mir an dieser Stelle Gelegenheit gibt. Ich behaupte also: Wäre der Raum ein absolutes Seiendes, so könnte sich auch etwas ereignen, wofür es keinen hinreichenden Grund geben kann, was aber meinem Axiom widerspricht. Ich beweise es hier folgendermaßen: Der Raum ist etwas vollkommen Homogenes und wenn sich in dem Raum keine Dinge befinden, so unterscheidet sich ein Raumpunkt von einem anderen Raumpunkt durchaus in nichts. Hieraus folgt nun aber (wobei angenommen wird, daß der Raum außer der gegenseitigen Ordnung der Körper noch irgend etwas an sich ist), daß es keinen Grund geben kann, warum Gott, die gleiche gegenseitige Lage der Körper beibehaltend, die Körper so und nicht anders in den Raum gesetzt hat. Warum ist nicht alles in umgekehrter Weise angeordnet worden, zum Beispiel durch Vertauschen von Ost und West? Wenn nun aber der Raum nichts anderes als diese Ordnung bzw. Beziehung ist und ohne Körper überhaupt nichts weiter als die Möglichkeit ist, sie anzuordnen, so werden sich diese beiden Zustände, der eine, so wie er jetzt ist, und der andere, der als von umgekehrter Art angenommen wurde, voneinander überhaupt nicht unterscheiden. Ihr Unterschied beruht darum nur auf unserer trügerischen Annahme von der Wirklichkeit eines Raumes an sich. In Wirklichkeit aber ist der eine Zustand genau der gleiche wie der andere, da sie vollkommen ununterscheidbar sind. Es gibt also auch keinen Anlaß, nach dem Grund für eine Bevorzugung des einen Zustandes vor dem anderen zu fragen.“*

Die Leibniz/Clarke-Debatte vermennt naturphilosophische und theologische

Argumente. Bezüglich letzterer stützt sich Leibniz vornehmlich auf seinen Satz vom zureichenden Grunde, wie an der Textpassage deutlich wird: Nichts in der Welt geschieht ohne Grund – und die Tatsache, dass Raumpunkte sich in nichts unterscheiden, würde Gott – unter der (fälschlichen) Annahme der Realität des Raumes – keinen zureichenden Grund geben, sich zwischen einer gegebenen Materiekonstellation und einer relational identischen, aber anders positionierten Konstellation zu entscheiden. Demgegenüber stützt sich Leibniz' naturphilosophisch-systematische Argumentlinie, auf die es uns hier nur ankommen soll, auf das Indiscernibilienprinzip. In moderner Sprechweise erhält man ein Symmetrieargument: Da die Gesamtkonfiguration aller Körper im Raume – also die Totalität ihrer Lagebeziehungen – bei einer Drehung um  $180^\circ$  ungeändert bleibt, besteht keinerlei empirische Möglichkeit, die besagte Transformation zu bemerken. Beharrt man dennoch – im Sinne einer substantialistischen Raumauffassung – auf einer solchen Möglichkeit, so führt dies zur Verletzung des Indiscernibilienprinzips, was Leibniz für unzulässig hält.

### **3. Kant 1768: Das Problem inkongruenter Gegenstücke**

Die Behauptung, dass ein drehtransformierter Raum zu keinerlei observablen Konsequenzen führt, scheint empirisch gut bestätigt. Bemerkenswerterweise lässt die Formulierung Leibniz' aber auch eine andere Interpretation zu, denn eine Vertauschung von Ost und West könnte ebenso gut durch eine Spiegelung anstelle einer Drehung des Raumes erreicht werden – und es bleibt unklar, was Leibniz tatsächlich gemeint hat. Falls es sich aber um eine Spiegelung handelt, liegen die Dinge nicht so einfach. Dies führt auf die kantische Fragestellung.

Denn mit der Händigkeit existiert eine empirisch bekannte Eigenschaft, die unter Spiegelungstransformationen verändert wird – und es ist Kants Verdienst in seiner Schrift von 1768 als Erster auf mit der Händigkeit zusammenhängende Problemstellungen hingewiesen zu haben. Kant macht darauf aufmerksam, dass es nicht möglich ist, eine rechte Hand durch reine Lageveränderungen in eine linke Hand zu überführen, und er nennt Paare rechts- und linkshändiger Objekte „inkongruente Gegenstücke“. Sie sind dadurch definiert, dass sie einander relational völlig gleich, d.h. bezüglich aller internen Lagebeziehungen ununterscheidbar sind, aber nicht von derselben Oberfläche umschlossen werden können (was wir daran bemerken, dass wir etwa unsere rechte Hand nicht in einen linken Handschuh stecken können):



*Definition:* Zwei Objekte sind *inkongruente Gegenstücke*, falls ihre Oberflächen durch keinerlei starre Bewegungstransformationen (Rotationen und Translationen) in Übereinstimmung gebracht werden können (wohl aber durch Spiegelung).

Beispiele händiger Objekte in der Natur findet Kant etwa bei Hopfen- und Bohnenwindungen, Schneckengehäusen, Haarwirbeln, Umläufen von Himmelskörpern und der Orientierung der inneren Organe des Menschen.<sup>6</sup>

Das Merkwürdige an der Eigenschaft der Händigkeit ist, wie schon beim Ozma-Problem zu sehen war, dass es sich scheinbar um eine intrinsische Eigenschaft von Körpern im Raume handelt, die aber nicht auf die Relationen der inneren Teile der Körper zurückgeführt werden kann. Kant versucht nun aus diesem Umstand Kapital zu schlagen, indem er dies Phänomen auf eine dem Raum zukommende absolute Struktur zurückzuführen versucht. Doch leider ist Kants diesbezügliche Argumentation alles andere als klar, und in der Literatur herrscht Uneinigkeit über die genaue Rekonstruktion dessen, was Kant in seinem 1768er Essay zum einen gemeint hat, und was zum anderen argumentativ überhaupt haltbar wäre (siehe Rusnock und George 1995 und mehrere Aufsätze in van Cleve und Frederick 1991 zum Stand der Diskussion).

Die Situation wird durch zwei weitere Umstände verkompliziert; denn erstens vertrat Kant in seiner früheren Kosmologie von 1755/56<sup>7</sup> noch eindeutig eine relationale Raumauffassung – der Essay von 1768 bedeutet also zunächst einen Schwenk vom Relationalismus zum Substantialismus. Zweitens ändert Kant bereits zwei Jahre später, in der *Dissertatio* von 1770, wiederum seine Meinung. Offensichtlich boten der 1768er Essay und die darin explizit und implizit aufgeworfenen Fragen zur Natur des Raumes für Kant eine ganz entscheidende Anregung zum Übergang in die Transzendentalphilosophie, der mit der *Dissertatio* markiert wird. Doch leider ist der nunmehr kritische Gebrauch des Phänomens der Händigkeit argumentativ noch undurchsichtiger als in seiner vorkritischen Arbeit von 1768. Immerhin findet sich in einer kurzen Sentenz des 1768er Aufsatzes bereits ein Vorverweis auf die transzendente Argumentation:

---

<sup>6</sup>Darüber hinaus bemerkt er sehr richtig, dass die Orientierung der Windrichtung von anderer Art ist, denn sie ist vom Ort auf der Erde, genauer Nord- vs. Südhalbkugel, abhängig. In der Tat ist ja ihr Ursprung die in einem rotierenden Bezugssystem wie der Erde auftretende Coriolis-Kraft.

<sup>7</sup>Hierunter sind die Schriften *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels, Neue Erhellung der ersten Grundsätze metaphysischer Erkenntnis (Nova dilucidatio)* und *Der Gebrauch der Metaphysik, sofern sie mit der Geometrie verbunden ist, in der Naturphilosophie, dessen erste Probe die physische Monadologie enthält (Monadologia physica)* zu verstehen (Weischedel 1956-1964, Bd. I).

„... daß, weil der absolute Raum kein Gegenstand einer äußeren Empfindung, sondern ein Grundbegriff ist, der alle dieselbe zuerst möglich macht, wir dasjenige, was in der Gestalt eines Körpers lediglich die Beziehung auf den reinen Raum angehet, nur durch die Gegenhaltung mit andern Körpern vernehmen können.“

Kant greift das Problem der inkongruenten Gegenstücke im Rahmen der kritischen Schriften in der *Dissertatio* (1770, § 15), den *Prolegomena* (1783, § 13) und den *Metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft* (1786, A 8) auf (vgl. auch Fußnote 4 in Rusnock und George 1995). Er schließt dabei von der Existenz händiger Objekte auf die Idealität des Raumes, denn bekanntlich ist nach seiner „gereiften“ transzendentalphilosophischen Auffassung der Raum eine reine Anschauung a priori, der die Konstitution physikalischer Gegenstände im Raume erst ermöglicht. Die Realität des Raumes – der Raum „an sich“ – ist unerkennbar. In der reinen Anschauung erweist sich der Raum zunächst als relational, während sich im Falle konkreter sinnlicher Gegenstandserfassung bei Objekten, die inkongruente Gegenstücke besitzen, das Phänomen der Händigkeit zeigt, eine Eigenschaft, die nicht auf innere relationale Unterschiede der Objektteile zurückgeführt und somit vom reinen Verstand auf keinerlei Begriff gebracht werden kann. Für Kant dienen händige Objekte daher zur Illustration seiner These, dass Gegenstände ganz allgemein als Erscheinungen der sinnlichen Anschauung aufzufassen sind. Auf einen Nenner gebracht: Intelligibel ist der Raum – dies ist die Zutat der kritischen Wende – relational, sensibel jedoch – unter Beibehaltung der 1768er Argumente – absolut.<sup>8</sup>

Nun soll der kritische Kant nicht Gegenstand dieses Aufsatzes sein (zur Diskussion dieser Fragen siehe insbesondere Buroker 1981 und Falkenburg 2000, § 3). Von Interesse ist im Weiteren nur die Ursprungsüberlegung der Arbeit von 1768 zur Begründung der absoluten Raumauffassung aus dem Phänomen der Händigkeit. Folgende Passage ist hierbei zentral:

„... wenn man sich vorstellt, das erste Schöpfungsstück solle eine Menschenhand sein, so ist es notwendig entweder eine Rechte oder eine Linke, und um die eine

---

<sup>8</sup>Bemerkenswert ist auch, dass in der Anschauungslehre der *Kritik der reinen Vernunft* (Kant 1781), der transzendentalen Ästhetik, jeglicher Hinweis auf die Problematik der inkongruenten Gegenstücke fehlt und nur die relationale Sichtweise vorgestellt wird, während diese Fragestellung in den *Prolegomena* und den *Metaphysischen Anfangsgründen* erwähnt wird. Eine Erklärung wäre, dass die *Kritik* auf die Begründung eines systematischen Gebäudes ausgerichtet ist und insofern synthetisch, wie Kant sagt, vorgeht, während die beiden anderen Schriften im analytischen Verfahren von der empirisch gegebenen Phänomenvielfalt ausgehen, um dann auf deren Vorbedingungen zu schließen.

*hervorzubringen, war eine andere Handlung der schaffenden Ursache nötig, als die, wodurch ihr Gegenstück gemacht werden konnte.*

*Nimmt man nun den Begriff vieler neueren Philosophen, vornehmlich der deutschen an, daß der Raum nur in dem äußeren Verhältnisse der nebeneinander befindlichen Teile der Materie bestehe, so würde aller wirkliche Raum in dem angeführten Falle nur derjenige sein, den diese Hand einnimmt. Weil aber gar kein Unterschied in dem Verhältnisse der Teile derselben unter sich stattfindet, sie mag eine Rechte oder Linke sein, so würde diese Hand in Ansehung einer solchen Eigenschaft gänzlich unbestimmt sein, d.i. sie würde auf jede Seite des menschlichen Körpers passen, welches unmöglich ist.*

*Es ist hieraus klar, daß nicht die Bestimmungen des Raumes Folgen von den Lagen der Teile der Materie gegeneinander, sondern diese Folgen von jenen sind, und daß also in der Beschaffenheit der Körper Unterschiede angetroffen werden können und zwar wahre Unterschiede, die sich lediglich auf den absoluten und ursprünglichen Raum beziehen, weil nur durch ihn das Verhältnis körperlicher Dinge möglich ist...“*

Zunächst ist offensichtlich, dass Kants absoluter Raum von der Newtonschen Konzeption abweicht; denn während bei Newton der Raum die Eigenschaft besitzt, Trägheitskräfte zu induzieren, liegt in Kants absolutem Raum der vermeintliche Ursprung der Händigkeit. Es ist nicht einzusehen – und wird von Kant auch nicht diskutiert –, inwieweit diese beiden unterschiedlichen Eigenschaften miteinander zusammenhängen. Andererseits besteht eine verblüffende Parallelität zwischen der Argumentweise Kants und derjenigen Newtons. Dabei ist zunächst wichtig zu sehen, dass Kant die Gegenposition des Relationalismus in ihren ontologischen Verpflichtungen durchaus richtig einschätzt: Wäre das erste Schöpfungsstück eine Menschenhand (gäbe es also tatsächlich nur eine einzige Hand im Kosmos), so wäre dieser Hand nach relationalistischer Auffassung die Eigenschaft dezidierter Rechts- oder Linkshändigkeit schlichtweg abzusprechen!

So wie nun Newton die Möglichkeit für abwegig hielt, dass für ein rotierendes System in einem ansonsten leeren Kosmos *keine* Trägheitskräfte mehr auftreten, hält Kant es für abwegig, dass ein einziges händiges Objekt im Kosmos *keine spezifische Händigkeit* besitzt. Die spezielle Überlegung, die Kant dabei anstellt – dass nämlich eine einzelne und erstmalig geschaffene Hand paradoxerweise auf jede Seite des menschlichen Körpers passen müsse –, enthält aber einen entscheidenden gedanklichen Fehler: der paradoxe Charakter kommt hier ja nur dadurch zustande, dass Kant ein weiteres, nunmehr seinerseits händiges Objekt – einen menschlichen Körper – einführt. Dies ist aber nach relationalistischer

Auffassung für das Argument nicht so ohne Weiteres zulässig, denn offenkundig ändert die Einführung eines weiteren händigen Objekts die physikalische Gesamtsituation. Und für den Moment lässt sich aus relationalistischer Perspektive immerhin soviel sagen: Liegen wenigstens je ein Vertreter beider Händigkeitseigenschaften vor, so lässt sich die Eigenschaft der Händigkeit als solche sehr wohl relational definieren. Hierbei müssen die beiden Vertreter auch nicht notwendigerweise von gleicher Art sein: So lässt sich beispielsweise die – per Konvention zugeordnete – Rechtshängigkeit einer Schraube tadellos gegenüber einem linksdrehenden Haarwirbel definieren (ähnlich auch Sklar 1974). Zur Fortführung dieser Überlegungen am Ende des folgenden Abschnitts sind nun zuvor einige mathematische Sachverhalte zu klären.

#### **4. Enantiomorphie, Topologie und Algebra**

Kant war und konnte zu seiner Zeit noch nicht über den vollen mathematischen Hintergrund des Phänomens der Händigkeit unterrichtet sein. Man betrachte etwa einmal eine zweidimensionale Hand in der Ebene, die an einer gegebenen Geraden gespiegelt wird. Betten wir die Ebene in die dritte Dimension ein, so lässt sich sehr wohl durch Rotation um die vormalige Spiegelungsachse die rechte in die linke Hand überführen und umgekehrt.<sup>9</sup> Dies gilt allgemein: jede Spiegelung im  $R^n$  ist als Rotation im  $R^{n+1}$  darstellbar.

Darüberhinaus ist eine euklidische zweidimensionale Ebene orientierbar: wir können eine globale Konvention für „oberhalb“ und „unterhalb“ der Ebene einführen. Nun denken wir uns die Ebene – etwa in Gestalt eines Papierbandes – aufgerollt und zu einem Zylinder aneinandergeklebt. Auch diese Fläche ist orientierbar, es gibt eine global gültige Konvention für „innen“ und „außen“. Falls wir aber das Papierband vor dem Zusammenkleben einmal in sich verdrehen, erhalten wir anstelle eines Zylinders ein Möbiusband – ein einfaches Beispiel für eine nicht-orientierbare Fläche. Auf einem Möbiusband ist keine globale Konvention von oben und unten mehr angebar. Diese Feststellung ist gleichbedeutend damit, dass das Möbiusband keine Händigkeit auszeichnet: eine beliebige Hand kann durch Verschieben entlang des Bandes – bei einmaligem Umlauf – in ihr Spiegelbild und – bei zweimaligem Umlauf – wieder in sich selbst überführt werden.

Nun sind Rotationen und Translationen – die in der obigen Definition

---

<sup>9</sup> Hierauf weist auch Wittgenstein im *Tractatus* (1922, Satz 6.36111) hin.

inkongruenter Gegenstücke auftretenden starren Bewegungstransformationen – relational einwandfrei darstellbar. Wie es scheint, hängt dann die Eigenschaft der Händigkeit und mithin die Möglichkeit eines anti-relationalen Arguments à la Kant von gewissen Globaleigenschaften des Raumes wie (Einbettungs-) Dimension und Orientierbarkeit ab. In nicht-orientierbaren Räumen etwa versagt sein Argument. Andererseits lässt sich die Rückführbarkeit der Händigkeit auf die Globaltopologie des Raumes auch als substantialistisches Argument lesen. Diesen Weg hat Graham Nerlich (1973) beschritten. Nach seiner Auffassung ist die Händigkeit als intrinsische Globaleigenschaft des Raumes anzusehen und verweist insofern auf die Substantialität des Raumes als Ganzem. Gegen diese Auffassung spricht jedoch, dass es durchaus einen Unterschied zwischen der Händigkeit als lokaler und globaler Eigenschaft gibt. Es wäre zum Beispiel denkbar, dass unser Universum die Topologie eines nicht-orientierbaren dreidimensionalen Raumes besitzt. Dennoch haben wir eine einwandfreie Anschauung von der Eigenschaft der Händigkeit. Dies ließe sich durch folgende Definition (im Anschluss an Earman 1991) zum Ausdruck bringen:

*Definition:* Ein Objekt  $O$  ist ein *Enantiomorph*, falls sich das Resultat jeder Spiegelung von  $O$  vom Resultat aller möglichen starren Bewegungstransformationen in einer lokalen Umgebung von  $O$  unterscheidet (andernfalls ist  $O$  ein Homomorph).

In dieser Terminologie – die rein konventionell ist, die obige Definition inkongruenter Gegenstücke ließe eine Beschränkung auf *lokale* Bewegungstransformationen ja ebenso zu – lassen sich allenfalls kongruente Gegenstücke, nicht aber Enantiomorphe auf die globale Topologie zurückführen. Nerlich bietet demnach keine Erklärung für die Händigkeit als lokalem Phänomen.<sup>10</sup>

Die relationalistische Gegenstrategie besteht nun in Folgendem: Schon Hermann Weyl (1928a, Kap. 14; 1952, S. 16ff) hat darauf hingewiesen, dass sich die Orientierbarkeit von Koordinatensystemen auf ein kombinatorisches Problem zurückführen lässt (Mühlhölzer 1992 schließt sich hier an; siehe auch Grünbaum 1963, S. 331). Er nutzt hierzu den Umstand, dass die Menge der Permutationen der Koordinatenachsen eines  $n$ -Beins in zwei Symmetrieklassen

---

<sup>10</sup>Es soll hier nicht geleugnet werden, dass dem Relationalisten mit der Charakterisierung topologischer Eigenschaften einer Raumzeit-Mannigfaltigkeit wie Dimension und Orientierbarkeit Probleme entstehen, denn diese Eigenschaften sind in der Allgemeinen Relativitätstheorie nach wie vor absolut und nicht dynamisch (ebenso die Signatur der Metrik). Dies ist jedoch kein Problem, das speziell an Fragen der Händigkeit hängt (vgl. auch Huggett 2003).

zerfällt: gerade und ungerade Permutationen – und diese entsprechen den beiden Händigkeiten. In diesem Falle ist die Händigkeit nicht als topologische, sondern schlicht als algebraische Eigenschaft anzusehen, die auch zweifellos in relationalistischem Vokabular erfassbar ist. Dieser Punkt war oben bereits im Anschluss an die zentrale Kant-Passage deutlich geworden. Der Relationalist hat keine Schwierigkeiten, rechts und links *in Bezug aufeinander* zu definieren, und auch die obige Definition inkongruenter Gegenstücke ist relationalistisch einwandfrei – ohne jeden Rekurs auf absolute Raumstrukturen. Auch im Rahmen der Ozma-Problematik deutete sich dies bereits an: Es ist unproblematisch, einem fernen Kommunikationspartner die genannten Definitionen inkongruenter Gegenstücke, der Enantiomorphie oder Weyls Charakterisierung von Händigkeit zu übermitteln, problematisch hingegen ist die *Auszeichnung* einer Händigkeit.

Zwischen den folgenden beiden Fällen muss also unterschieden werden:

- a) Das Phänomen der Händigkeit als solcher im Sinne einer „gleichwertigen“ Existenz rechts- und linkshändiger Objekte (symmetrischer Fall).
- b) Die Auszeichnung einer bestimmten Händigkeit im Sinne einer „Which-is-which“-Frage (asymmetrischer Fall).

Es ist nicht klar, inwieweit Kant zwischen beiden Fällen sauber unterschieden hat (er hat es vermutlich nicht), auch wenn unsere obige Diskussion eine Lesart im Sinne der „Which-is-which“-Frage nahe legt. Doch wie auch immer sich dies historisch verhält, so dürfte systematisch klar sein, dass erst im Rahmen des asymmetrischen Falls b) dem Relationalisten potentiell ein Problem entsteht.

Mit Blick auf Kants einzelne Hand und in Vervollständigung der Diskussion am Ende des vorigen Abschnitts sind zwei unterschiedliche relationalistische Positionen denkbar: Der Relationalist könnte dieser Hand die Eigenschaft der Händigkeit *per se* absprechen (im Sinne von a)), ganz gewiss aber muss er ihr eine ausgezeichnete, also spezifische Rechts- oder Linkshändigkeit im Sinne des asymmetrischen Falls b) absprechen. Fraglich ist, ob es für den Relationalisten problematisch wäre, für ein einzelnes Objekt zu entscheiden, ob es sich um ein Homo- oder Enantiomorph handelt. Es ist nach unseren jetzigen Überlegungen nicht einzusehen, dass dem so wäre.

Im Folgenden soll nur noch der Fall b) weiter betrachtet werden. Für diesen Fall liegt ja die Vermutung nahe, dass die Spiegelungssymmetrie der Welt fundamental gebrochen ist. Gespiegelte Modelle der Welt sind dann nicht mehr Leibniz-äquivalent. Und dies ist insofern der philosophisch interessantere Fall.

## 5. Der Sturz der Parität und die Folgen

Stand der Physik bis zur Hälfte des 20. Jahrhunderts war, dass die bis dato als fundamental angesehenen Theorien – insbesondere die den Aufbau der Materie dominierende Theorie der elektromagnetischen Wechselwirkung (und zwar sowohl als klassische wie auch als Quantenelektrodynamik) – formal invariant sind unter Paritätstransformationen. Eine Paritätstransformation ist im  $R^n$  als Vorzeichenwechsel aller Koordinaten  $x_1 \rightarrow -x_1, x_2 \rightarrow -x_2 \dots x_n \rightarrow -x_n$  definiert. Für ungerades  $n$ , also auch im Ortsraummodell des  $R^3$ , entspricht die Paritätstransformation einer Spiegelung, für gerades  $n$  jedoch nicht. Man ging daher seit Bestehen der Quantenmechanik bis in die fünfziger Jahre von der Parität als einer fundamentalen Symmetrie aus. Dies ist, vor dem Hintergrund unserer bisherigen Diskussion, eine beinahe unverständliche Annahme, denn bei aller möglichen Kritik an Kant ist doch wenigstens die von ihm klar gesehene empirische Tatsache der Bevorzugung gewisser Händigkeiten in der belebten Natur kaum zu leugnen – Kant beginnt seine 1768er Arbeit nämlich mit Hinweisen auf die zahlreichen Spiegelungs-*Asymmetrien*: menschliche Haarwirbel, die Vorzugsrichtung der Windung von Hopfen, Bohnen oder Schnecken und die generelle Tatsache, dass – wie er es ausdrückt – „... *alle Völker der Erde rechtsch sind*“. Es scheint also eine empirische Tatsache, dass die Natur bestimmte Händigkeiten auszeichnet und insofern paritätsbrechend ist.

Steht dies nicht in klarem Widerspruch zur Annahme fundamentaler Paritätserhaltung? In der Physik bis Mitte des 20. Jahrhunderts war man offenbar der Meinung, dass eine Erklärung der Händigkeit makroskopischer Objekte gegeben werden kann, obgleich die Natur auf fundamentalen Niveau paritätsinvariant ist. Eine vollständige Aufklärung dieser Zusammenhänge existierte aber – übrigens bis zum heutigen Tage – nicht. Verfolgen wir diesen Punkt noch ein wenig: Rein logisch verlangt jede Asymmetrie auf einer gegebenen Komplexitäts- oder Erklärungsstufe nach einer zugrundeliegenden Asymmetrie auf einer ursächlich tieferliegenden Komplexitäts- oder Erklärungsstufe, andernfalls wäre die Kausaldetermination verletzt. Dieser Gedanke wurde insbesondere von Pierre Curie (1894) hervorgehoben und wird gelegentlich als Curie-Prinzip bezeichnet. Die Geschichte von „Buridans Esel“ liefert eine Illustration: Um seinen Esel, den er wegen einer längeren Reise zurücklassen musste, nicht verhungern zu lassen, legte ein Bauer seinem Tier zwei Heuhaufen auf die Wiese. Doch zufällig waren beide Heuhaufen einander völlig gleich und befanden sich in gleicher Entfernung zum Esel, und auch darüberhinaus gab es keinerlei Anhaltspunkte, die eine Bevorzugung eines Haufens vor dem anderen ermöglicht hätten. In dieser Situation perfekter Bilateralsymmetrie konnte das

arme Tier, so das Argument, zu keiner Entscheidung kommen und verhungerte jämmerlich. Es bedarf offenkundig einer asymmetrischen Ursache zur Brechung der Symmetrie. Warum also bilden alle DNA-Moleküle im menschlichen Körper eine rechtsgewundene Doppelhelix? Oder warum, wie Kant behauptet, haben fast alle Schneckenarten linksdrehende Gehäuse? Zweifellos gibt es unzählige Beispiele bevorzugter Händigkeiten im Bereich der belebten Natur.

Man kann leicht sehen, dass für all diese Beispiele eine unproblematische Erklärungsstrategie möglich ist: Nach dem Curie-Prinzip beruht eine Asymmetrie ja nur dann auf einer Asymmetrie, wenn wir strenge Kausaldetermination voraussetzen. Biologische Evolution unterliegt aber dem Prinzip der Selektion bei vorgängiger *zufälliger* Variation oder Mutation, ist also insofern in einem wesentlichen Sinne indeterministisch. Es ist daher logisch einwandfrei denkbar, dass sich gewisse bevorzugte Händigkeiten evolutiv herausgebildet haben aus paritätssymmetrischen Anfangspopulationen, bei denen dann rein zufällig eine Händigkeit selektiv verstärkt wurde und die entgegengesetzte Händigkeit entsprechend verdrängt. Modalsemantisch ausgedrückt: In einer hinreichend großen Zahl möglicher Welten, in denen die Evolution bis auf die Zufallswahl biologischer Händigkeiten gleich abläuft wie in der unseren, ergibt sich eine statistische Gleichverteilung über die Vorkommnisse rechts- oder linksgewundener menschlicher DNA, Schneckengehäuse etc. Obwohl also die genauen Mechanismen zur Erklärung der speziellen Vorkommnisse biologischer Händigkeiten bis zu heutigen Tage nicht vollständig aufgeklärt sind, lässt sich doch eine allgemeine Strategie angeben, so dass das Auftreten bevorzugter Händigkeiten im Bereich des Lebendigen in keinem logischen Widerspruch zur fundamentalen Paritätssymmetrie in der Physik stehen muss.

Kehren wir daher zur Physik zurück: Hier war die hohe Überzeugungskraft der mathematischen Symmetrie der bis in die 50er Jahre bekannten fundamentalen Wechselwirkungsgleichungen unter der Paritätsoperation so groß, dass es für bedeutende Physiker wie Wolfgang Pauli einem Sakrileg nahekam, als sich 1956 die Möglichkeit der Verletzung der Paritätssymmetrie in der schwachen Wechselwirkung abzeichnete. Lee und Yang (1956) hatten eine solche Verletzung theoretisch vorhergesagt, und noch im selben Jahr beobachteten Wu et al. (1957) eine größere Wahrscheinlichkeit bei der Aussendung von Elektronen im  $\beta$ -Zerfall von Kobalt 60 (formal  ${}^{60}\text{Co} \rightarrow {}^{60}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}_e$ ) in Richtung der Kernspinachse als entgegengesetzt. Damit war der fundamentale Charakter der Paritätsinvarianz aufgehoben.<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup>Lee und Yang wurden für ihre Arbeit bereits im Jahr 1957 mit dem Nobelpreis geehrt, Frau Wu



Der „Sturz der Parität“ veranlasste die Physiker, eine umfassendere Symmetrie, nämlich die Verkettung der Symmetrien  $P$  und  $C$ , die  $CP$ -Parität, als neue Fundamental-Symmetrie anzusehen. Hierbei bezeichnet  $C$  die Ladungskonjugation, also eine Vertauschung positiver und negativer elektrischer Ladungen. Doch nur wenige Jahre später – 1964 – zeigten Cronin und Fitch, dass auch die  $CP$ -Invarianz in der schwachen Wechselwirkung (beim Zerfall neutraler  $K$ -Mesonen) verletzt ist (Christenson et al. 1964). Unter Hinzunahme der Zeitumkehr-Transformation  $T$  nimmt man seither eine gemeinsame Kombination der drei Transformationen  $C$ ,  $P$  und  $T$  als fundamental an. Diese Erkenntnis ist im so genannten  $CPT$ -Theorem niedergelegt (dessen Formulierung ebenfalls wesentlich auf Pauli zurückgeht).<sup>12</sup>

Anhand des Ozma-Problems lassen sich die Implikationen dieser Entwicklungen ein wenig besser einschätzen: Vordergründig sieht es so aus, als sei das Problem nun einer Lösung zugeführt, denn offenbar muss ein entfernter Kommunikationspartner lediglich das Wu-Experiment durchführen, um mit uns Einigung über die eindeutige Referenz der Begriffe „rechts“ und „links“ herzustellen. Doch ist dies lediglich Stand der Dinge zum Zeitpunkt der  $P$ -Verletzung. Nachdem aber auch  $CP$  verletzt ist, reicht ein rein  $P$ -verletzendes Experiment nicht aus, da wir nicht sicher sein können, ob unsere Kommunikationspartner nicht aus Antimaterie bestehen. Bei einem  $CP$ -verletzenden Experiment müssen wir ferner zuvor sicherstellen, dass unsere Kommunikationspartner alle Ereignisse in derselben Zeitrichtung wie wir erleben. Insofern wir hierüber keine Kenntnisse haben, hat sich das ursprüngliche Ozma-Problem einfach um zwei Stationen verschoben – und besteht insofern weiter. Man mag aber einwenden, dass es widersinnig ist anzunehmen, man könne mit einer zeitumgekehrten Welt kommunizieren. Unter dieser – durchaus plausiblen – Annahme wäre das Ozma-Problem schließlich doch durch den Hinweis auf  $CP$ -verletzende Prozesse gelöst.

Wie eingangs bemerkt, hat nun John Earman (1991) – in Vorform bereits in Earman (1971) – hervorgehoben, dass mit der Entdeckung der Paritätsverletzung das kantische Argument zur Begründung eines absoluten Raumes wieder in sein Recht tritt. Earman's challenge in seinen eigenen Worten (1991, S. 246-247):

*The failure of mirror image reflection to be a symmetry of laws of nature is an*

---

wurde unverständlicher Weise übergangen.

<sup>12</sup>Eine physikhistorische Darstellung dieser Zusammenhänge findet sich bei Pais (1986, Kap. 20).

*embarrassment for the relationist account sketched. ... for as it stands that account does not have the analytical resources for expressing the law-like asymmetry for the analogue of Kant's hand standing alone. Putting some 20th century words into Kant's mouth, let it be imagined that the first created process is [a  $\beta$ -decay]. The absolutist has no problem in writing laws in which [a so-and-so-handed decay] is more probable than [the other], but the relationist ... certainly does since for him [both decays] are supposed to be merely different modes of presentation of the same relational model. Evidently, to accommodate the new physics, relational models must be more variegated than initially thought.*

Die Schlagkraft von Earman's challenge hängt wesentlich mit der Tatsache zusammen, dass die Paritätsverletzung in unserer heutigen Physik direkt auf der Ebene der *fundamentalen Naturgesetze* verankert ist. So kann etwa der Hinweis auf bevorzugte Händigkeiten in der Biologie nicht zur Lösung des Ozma-Problems herangezogen werden; denn wir können nicht sicher sein, ob die Evolution auf fremden Planeten (falls sie dort überhaupt in ähnlicher Weise auf organischer Chemie basiert) zu denselben Händigkeiten biologischer Makromoleküle geführt hat. Das obige Evolutionsargument besagt ja, dass dies in 50 Prozent der Fälle nicht der Fall ist. Zur Lösung des Ozma-Problems benötigt man jedoch ausgezeichnete Händigkeiten auf der Basis von Prozessen, die im gesamten Universum gleich ablaufen. Und hierbei kann es sich daher nur um physikalisch grundlegende Prozesse handeln.

## **6. Earman's challenge – revisited**

Ist also der Substantialismus des Raumes unvermeidlich? Earman's challenge ist eine Herausforderung an den Relationalisten, alternative Beschreibungen ausgezeichneter Händigkeiten zu liefern – und es scheint prima facie unmöglich, dass dies dem Relationalisten gelingen kann. Die folgende Diskussion soll aber zeigen, dass sich der Substantialist faktisch in keiner besseren Situation befindet (wenngleich aus anderen Gründen), und dass vor dem Hintergrundwissen der heutigen Physik die relationalistische Option letztlich sogar größere Plausibilität besitzt.

Ein naheliegender relationalistischer Ansatz bestünde zunächst in der Berufung auf die Leibniz-Äquivalenz *CPT*-transformierter Modelle der Welt: Bis heute wurden keinerlei *CPT*-verletzende Prozesse beobachtet. Da das *CPT*-Theorem auf

sehr allgemeinen quantenfeldtheoretischen Voraussetzungen wie Lorentz-Invarianz, schwacher Lokalität und Spektralität beruht, besitzt es eine tief liegende Verankerung (gleichwohl ist es nicht sakrosankt – bei Anwendung auf den Kosmos, also die globale Raumzeit, steht ja bereits die Forderung der Lorentz-Invarianz sehr in Frage). Auf der Basis des *CPT*-Theorems kann der Relationalist behaupten, dass weder *P*- noch *CP*-transformierte Modelle der Welt, sondern lediglich *CPT*-transformierte Modelle Leibniz-äquivalent sind. Aber diese Aussage hilft für sich genommen leider wenig zur Aufhellung des Problems. Denn es bleibt unerklärlich, warum – in der Terminologie des heutigen Standardmodells der Elementarteilchen gesprochen – in der elektroschwachen Theorie keine rechtshändigen Neutrinos existieren oder nur die linkshändigen Elektronen an die schwachen *W*-Bosonen koppeln, nicht aber die rechtshändigen. Die Tatsache, dass auch die rechtshändigen Positronen (also Anti-Elektronen) koppeln (im Sinne der *CPT*-Invarianz), hilft wenig zum Verständnis des vorgenannten Problems. Die Paritätsverletzung bleibt für sich fortbestehen, auch wenn sie in den Rahmen einer umfassenderen Invarianzforderung eingebettet werden kann (vgl. auch Pooley 2003).

Die Leibniz-Strategie des Relationalisten verfängt also nicht, und die Vermutung liegt nahe, dass vergleichbare relationalistische Erklärungsversuche ebenso scheitern. Earman scheint insofern Recht zu haben, als es dem Relationalisten nicht gelingen kann, die Auszeichnung einer Händigkeit als nomologischen Zug der Natur zu verstehen. Welches Verständnis der Paritätsverletzung kann uns aber umgekehrt der Substantialismus liefern?

Ganz wie im Falle der Newtonschen Ad hoc-Erklärung der Trägheit durch den absoluten Raum, d.h. ohne Angabe eines genauen kausalen Mechanismus, kann der Substantialist gewiss eine Ad hoc-Erklärung der Händigkeit, ja auch der Which-is-which-Frage geben: Die Auszeichnung einer Händigkeit scheint auf eine absolute Struktur des Raums zu verweisen – eine dem Zeitpfeil analoge Eigenschaft eines „Raumpfeils“. Wäre also das erste Schöpfungsstück ein Neutrino, so kommt ihm die Eigenschaft der Linkshändigkeit in Bezug auf den Raumpfeil zu. Will der Substantialist jedoch mehr als eine bloße Ad hoc-Erklärung liefern, so muss er weiter gehen – und hierbei scheinen sich nur zwei Optionen aufzutun, die in der Literatur auch diskutiert wurden.

Nach Huggett (2000) müsste der Substantialist ein explizites physikalisches Feld, eine Art „Orientierungsfeld“, einführen. Damit es sich um ein wahrhaft physikalisches Feld handelt, darf es kein absolutes Objekt sein, sondern muss

dynamische Eigenschaften besitzen – und diese Dynamik muss in einer entsprechenden Theorie niedergelegt sein. Andernfalls drohen Verletzungen weiterer fundamentaler Prinzipien der heutigen Physik, etwa der Lokalität und gegebenenfalls auch der Kausalität. Denn ein physikalisches Agens, das Wirkungen – sei es an Teilchen (wie deren Händigkeit) oder an den von ihnen eingenommenen Raumzeit-Regionen (wie deren Orientierung) – hervorruft, ohne raumzeitlich zu propagieren, wirkt nicht-lokal und instantan. Bis heute liegt kein ernstlicher Vorschlag vor, wie ein derartiges Orientierungsfeld in unsere Physik zu inkorporieren wäre. Im Falle seiner Existenz hätte der Relationalist vermutlich keine Handhabe, dies mit seiner Doktrin in Einklang zu bringen. Da ein solches Feld nicht in Sicht ist, steht der Substantialist hier in der Beweispflicht.

Eine zweite substantialistische Option verfolgt Hofer (2000): nach seiner Ansicht kann der Substantialist Händigkeit dann und nur dann erklären, wenn er sie als Eigenschaft auf das spezielle Raumgebiet bezieht, das der händige Körper einnimmt. Dies gilt sowohl für den symmetrischen Fall wie den asymmetrischen Fall ausgezeichneter Händigkeiten. Eine intuitive Begründung für diese These (nicht ganz im Einklang mit Hofer's nicht in allen Teilen überzeugender Argumentation) kann man darin erblicken, dass erst auf diese Weise die Händigkeit als *lokales* Phänomen (Enantiomorphie im obigen Sinne) plausibel gemacht werden kann. Ein Elektron beispielsweise müsste an jeder Raumzeitstelle „wissen“, welche Händigkeit ihm zukommt – und dies kann nur insofern unter Bezug auf den Raum geschehen, als jedem Raumpunkt ein solches „Wirkvermögen“ zugesprochen wird. Dass eine lokale Spiegelungstransformation zu einem physikalisch unterscheidbaren Resultat führt, kann der Substantialist also nur sicherstellen, indem er die Leibniz-Identität gespiegelter Raumzeitpunkte (oder doch wenigstens lokaler Regionen) aufgibt und somit umgekehrt deren „primitive thisness“ postuliert. Folgt man dieser Argumentation, so ist der Substantialist auf eine haecceitistische Variante des Substantialismus festgelegt. Dies ist jedoch, wie Hofer bemerkt, genau diejenige Variante, die durch das bekannte Earman-Nortonsche „hole argument“ (vgl. Earman 1989, Kap. 9) mit guten Gründen zurückgewiesen werden kann.<sup>13</sup> Wollte der Substantialist von

---

<sup>13</sup> Das in seiner Ursprungsfassung auf Einstein zurückgehende und von Earman und Norton (1987) zu einer Kritik am Raumzeit-Substantialismus wiederbelebte „hole argument“ besteht in Folgendem: Diffeomorphismen sind als Verschiebungen der Punkte einer Mannigfaltigkeit ansehbar. Für einen haecceitistischen Raumzeit-Substantialisten ändert sich bei einer solchen Transformation daher der Realzustand der Welt, wenngleich dies durch keinerlei Experiment bemerkt werden kann. Wählt man einen geeigneten „hole-Diffeomorphismus“ derart, dass unter seiner Anwendung zwei Modelle der Allgemeinen Relativitätstheorie ab einem bestimmten Zeitpunkt voneinander diffeomorph abweichen, während sie vorher diffeomorph identisch waren, so muss dies vom substantialistischen Standpunkt als ein metaphysischer Indeterminismus gewertet werden, da vonseiten der Relativitätstheorie derartige Abweichungen unvorhersagbar sind.

dieser Option Gebrauch machen, müsste er dies also um den Preis einer metaphysischen Annahme – die Leibniz-Äquivalenz diffeomorpher Modelle – tun, die an anderen Stellen inakzeptable ontologische Kosten, nämlich einen Ad hoc-Indeterminismus, erzeugt.

Um die Erklärungsoptionen des Substantialisten steht es also nicht sonderlich gut bestellt, und es ist mehr als fraglich, ob Earman's challenge es wert ist, etwa den Preis der zweiten Option in Kauf zu nehmen. Zwar hat Earman augenscheinlich Recht mit seiner Aussage, dass der Relationalist keine begrifflichen Mittel an der Hand hat, die Which-is-which-Frage zu beantworten – aber ist dies wirklich so tragisch? Ist dieser Befund tatsächlich so „challenging“? Schließlich geht es hier lediglich um die Konsistenz mit einem von beinahe jedem Physiker nur als vorläufig angesehenen Modell: dem Standardmodell. Kein Physiker würde sich aufgrund unserer jetzigen Befunde dazu verleitet sehen, ernsthaft das Konzept eines absoluten Raumes in die Physik wiedereinzuführen – und Philosophen sollten dies auch nicht tun! –, denn beinahe jeder ist davon überzeugt, dass das Standardmodell nur vorübergehenden Charakter hat. Earman hat zwar Recht, aber es folgt praktisch nichts daraus, weil sein Argument lediglich als Artefakt unseres unvollständigen Wissens um die Natur angesehen werden kann! Hinzu treten die zusätzlichen, vollkommen unplausiblen Konsequenzen, die mit der Wiederkehr einer absoluten Raumauffassung basierend auf dem Argument der Händigkeit einhergehen.

Die Schlussfolgerung unserer Überlegungen sollte also sein, dass weder Relationalismus noch Substantialismus – wenn auch aus unterschiedlichen Gründen – mit dem Phänomen der Paritätsbrechung angemessen umgehen können. Aufgrund des nur vorläufigen Status des Standardmodells ist es daher von Interesse, zum Abschluss dieser Untersuchung auf die Erklärungsmöglichkeiten jenseits des Standardmodells zu blicken. Wir wollen hierzu annehmen, dass die Paritätsbrechung *keinen* fundamentalen nomologischen Zug der Natur darstellt, sondern zurückgeführt werden kann auf einer tieferliegenden Ursache. Und hier scheint der Relationalist eine plausiblere Verständnisstrategie anbieten zu können.

Begeben wir uns nochmals auf den Stand der Jahre zwischen 1956 und 1964, den Stand der  $CP$ -Invarianz. Ihr zufolge ist mit der Verletzung von  $P$  auch eine Verletzung von  $C$  involviert. Für sich genommen bedeutet schon die  $C$ -Verletzung, dass die Eigenschaft, Materie (z.B. ein Elektron) zu sein, vor der Eigenschaft, Antimaterie (Positron) zu sein, ausgezeichnet ist. Die Ladung ist somit beinahe

notwendig als intrinsische Eigenschaft anzusehen. Da aber die Ladung keine Eigenschaft *im Raume* ist (zu ihrer Charakterisierung benötigt man keinerlei raumzeitliches Vokabular), hat dies keine Auswirkung auf unsere Frage nach dem Status des Raumes, einer Frage, die eben nur mit Implikationen der *P*-Verletzung zusammenhängt.

Im Gegensatz zur *P*-Verletzung besitzen *C*- und *CP*-Verletzung explanatorischen Wert (die Idee geht auf Sakharov 1967 zurück); denn offenkundig ist unser Universum – soweit wir das beobachten können – von Materie dominiert, Antimaterie macht nur einen kleinen Bruchteil aus. Dies ist ein Glück für uns, denn da Materie und Antimaterie einander zerstrahlen, wäre in einer *C*-invarianten Welt unsere eigene (materielle) Existenz ein stark erklärungsbedürftiges Faktum. Vor 1956 musste man daher eine Annahme der Art machen, dass eventuell nur unser Teil des Universums materiedominiert ist, es aber ebenso andere antimateriedominierte Regionen gibt. Während wir den *Effekt* der *C*- und *CP*-Verletzung also gutheißen können, liegt jedoch die *Ursache* dieser Asymmetrie vollständig im Dunkeln. Gleiches gilt für die *P*-Asymmetrie und letztlich jede der insgesamt sechs Symmetrieverletzungen *C*, *P*, *T*, *CP*, *CT* und *PT*.

Nach dem Curie-Prinzip bedarf jede Asymmetrie einer tieferliegenden Asymmetrie, andernfalls kann lediglich ein Zufallselement zur Erklärung herangezogen werden. Eine derartige Erklärung liefern die in der Astroteilchenphysik heutzutage gängigen Hinweise auf spontane Symmetriebrechungen. Das Problem mit dieser Art Bemühung des Zufalls besteht, wie wir gesehen haben, darin, dass für die Verletzung der sechs „Paritäten“ nicht einsehbar gemacht werden kann, wieso sie im Standardmodell *gesetzesartig* sind. Relationalisten wie Substantialisten steht aber natürlich frei, den Gesetzescharakter der Paritätsbrechung im Standardmodell nicht als fundamental anzusehen, sondern statt dessen anzunehmen, dass etwa in der Frühphase der kosmischen Entwicklung die Parität erhalten war, und sich Prozesse einer bestimmten Händigkeit in gleicher Weise durch eine Fluktuation bedingt verstärkt haben, wie wir dies bereits für biologische Händigkeiten diskutiert haben. Das die Eigenschaft einer ausgezeichneten Händigkeit tragende physikalisches Feld besitzt eine bekannte Dynamik: es ist die (elektro-)schwache Wechselwirkung. Diejenige Dynamik, die zu seiner Entstehung aus vermutlich fundamentalen Feldern führt, bleibt gegenwärtig noch offen. In diesem Sinne lässt sich der Zufall jenseits der heute bekannten Physik als Erklärungsstrategie nutzen.

Relationalisten wie Substantialisten müssen also über das Standardmodell hinausgehen – beider Erklärungen sind insofern ad hoc. Der Relationalist kann aber für sich in Anspruch nehmen, in besserem Einklang mit dem übrigen Hintergrundwissen der Physik zu stehen. Dies zeigt sich anhand nochmals weiter vorangetriebener Spekulationen zur Physik der Raumzeit jenseits des Standardmodells. Warum hängen eigentlich ausgerechnet die drei Transformationen  $C$ ,  $P$  und  $T$  in invarianter Verkettung miteinander zusammen? Die Antwort, dass es sich hierbei gerade um die drei herausgehobenen diskreten Symmetrien handelt, erklärt wenig. Denn während  $P$  und  $T$  noch in gewisser Weise inhaltlich zusammenhängend sind – es handelt sich ja um raumzeitliche Operationen –, ist  $C$ , die Ladungsumkehr von Materie in Antimaterie, offenbar von ganz anderer Art. Weitere ungelöste Fragen schließen sich an: Warum finden sich die Verletzungen der diversen Untertransformationen von  $CPT$  nur in der schwachen Wechselwirkung? Welcher Zusammenhang besteht – falls überhaupt – zwischen der sehr minimalen  $T$ -Verletzung und der scheinbar „phänomenalen“  $T$ -Asymmetrie des zweiten Hauptsatzes?

Eine größere mathematische Gemeinsamkeit als in der Raumzeit besitzen die drei Operationen  $C$ ,  $P$  und  $T$  im Spinorraum, etwa im Darstellungsraum der Diracmatrizen – und eine Reihe moderner Ansätze zur Quantengravitation nutzt die Spinstruktur, um der Raumzeit-Geometrie eine Subebene unterzuschieben, die das Phänomen des Raumes und der Raumzeit seines fundamentalen Charakters beraubt und daher auch die Frage nach der Ontologie des Raumes in ein völlig neues Licht rückt. Nicht wenige Vertreter derartiger Quantengravitations-Ansätze sind nach eigenem Bekunden radikal relationalistisch (siehe etwa Rovelli 1997 und Smolin 2000; vgl. auch Lyre 1998). Die Frage freilich, wie eine derartige spinorielle Begründung der Raumzeit auszusehen hat, weiß niemand genau zu beantworten.

So scheint das durch Kant in die Welt gebrachte Problem der Händigkeit nur in einer Physik jenseits des Standardmodells lösbar zu sein. Derartige Lösungen stehen sowohl dem Relationalisten wie dem Substantialisten offen – im direkten Vergleich ist die relationalistische Option aber natürlich die ontologisch sparsamere. Der Relationalist kann ferner im Rahmen von Erklärungen über das Standardmodell hinaus größeren Einklang mit dem derzeitigen Kenntnisstand beanspruchen. Die Frage nach der Natur der Paritätsbrechung bleibt eine virulente Frage – sowohl für die Physik wie für die Philosophie. Earman's challenge aber erweist sich als Tiger ohne Krallen.

## Danksagung

Ich danke einem anonymen Gutachter dieser Zeitschrift für Hinweise hinsichtlich der Ausformulierung der genauen Konsequenzen meiner Analyse.

## Literatur

Barbour, J. B. (2001). *The Discovery of Dynamics*. Oxford University Press, Oxford.

Barbour, J. B. und Pfister, H., Hg. (1995). *Mach's Principle*. Einstein Studies, Vol. 6. Birkhäuser, Boston.

Brading, K. und Castellani, E., Hg. (2003). *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*. Cambridge University Press, Cambridge.

Buroker, J. (1981). *Space and Incongruence: the Origin of Kant's Idealism*. Reidel, Dordrecht.

Christenson, J. H., Cronin, J. W., Fitch, V. L., und Turlay, R. (1964). Evidence for the  $2\pi$  decay of the  $k_2^0$  meson. *Physical Review Letters*, 13: 138–140.

Curie, P. (1894). Sur la symétrie dans les phénomènes physiques, symétrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique. *Journal de Physique*, 3:393–417.

Dambmann, H. (1990). Die Bedeutung des Machschen Prinzips in der Kosmologie. *Philosophia Naturalis*, 27: 234–271.

Earman, J. (1971). Kant, incongruous counterparts, and the nature of space and space-time. *Ratio*, 13: 1–18. . (Ebenso in: *van Cleve and Frederick 1991*).

Earman, J. (1989). *World Enough and Space-Time*. MIT Press, Cambridge, MA.

Earman, J. (1991). On the other hand...: A reconsideration of Kant, incongruent counterparts, and absolute space. In: *van Cleve and Frederick (1991)*. (Ebenso in: *Earman 1989*, Kap. 7).

Falkenburg, B. (2000). *Kants Kosmologie*. Klostermann, Frankfurt a. M.

Gardner, M. (1964). *The Ambidextrous Universe*. Basic Books, New York. (Third revised edition: *The New Ambidextrous Universe*, Freeman, 1990).

Grünbaum, A. (1963). *Philosophical Problems of Space and Time*. Knopf, New York. (Second enlarged edition: Reidel, Dordrecht, 1973).



- Hofer, C. (2000). Kant's hands and Earman's pions: Chirality arguments for substantial space. *International Studies in the Philosophy of Science*, 14(3): 237–256.
- Huggett, N. (2000). Reflections on parity nonconservation. *Philosophy of Science*, 67(2): 219–241.
- Huggett, N. (2003). Mirror symmetry: What is it for a relational space to be orientable? In: *Brading und Castellani (2003)*.
- Kant, I. (1768). Von dem ersten Grunde des Unterschiedes der Gegenden im Raume. In: *Weischedel (1956-1964, Bd. I)*.
- Kant, I. (1781). *Kritik der reinen Vernunft*. Riga. (B-Ausgabe 1787).
- Kant, I. (1783). *Prolegomena zu einer jeden künftigen Metaphysik die als Wissenschaft wird auftreten können*. Riga.
- Kant, I. (1786). *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft*. Riga.
- Lee, T.-D. und Yang, C. (1956). Question of parity conservation in weak interactions. *Physical Review*, 104: 254–258.
- Leibniz, G. W. (1716). Drittes Schreiben an Clarke. In *Schüller (1991)*.
- Lyre, H. (1998). *Quantentheorie der Information*. Springer, Wien. (Zweite Aufl.: mentis, Paderborn, 2004).
- Lyre, H. (2004). *Lokale Symmetrien und Wirklichkeit*. mentis, Paderborn.
- Mühlhölzer, F. (1992). Das Phänomen der inkongruenten Gegenstücke aus kantischer und heutiger Sicht. *Kant-Studien*, 83: 436–453.
- Nerlich, G. (1973). Hands, knees, and absolute space. *Journal of Philosophy*, 70:337–451. (Ebenso in: *Nerlich 1976*, Kap. 2).
- Nerlich, G. (1976). *The Shape of Space*. Cambridge University Press, Cambridge. (Second edition 1994).
- Newton, I. (1687). *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. London.
- Pais, A. (1986). *Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World*. Oxford University Press, New York.
- Pooley, O. (2003). Handedness, parity violation and the reality of space. In *Brading und Castellani (2003)*.
- Rovelli, C. (1997). Halfway through the woods: Contemporary research on space and time. In Earman, J. und Norton, J., Hg. *The Cosmos of Science*. University of Pittsburgh Press/Universitätsverlag Konstanz.

- Rusnock, P. und George, R. (1995). A last shot at Kant and incongruent counterparts. *Kant-Studien*, 86: 257–277.
- Sakharov, A. D. (1967). CP violation and baryonic asymmetry of the universe. *JETP Letters*, 5: 24–27.
- Schüller, V., Hg. (1991). *Der Leibniz-Clarke Briefwechsel*. Akademie, Berlin.
- Sklar, L. (1974). Incongruous counterparts, intrinsic features, and the substantivality of space. *Journal of Philosophy*, 71: 277–290.
- Smolin, L. (2000). *Three Roads to Quantum Gravity*. Weidenfeld & Nicolson, London.
- van Cleve, J. und Frederick, R. E., editors (1991). *The Philosophy of Right and Left*. Kluwer, Dordrecht.
- Weischedel, W., Hg. (1956). *Immanuel Kant – Werke in sechs Bänden*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt. 6 Bände, 1956-1964.
- Weyl, H. (1928). *Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaft*. Oldenbourg, München. (5. Aufl. 1982).
- Weyl, H. (1952). *Symmetry*. Princeton University Press, Princeton.
- Wittgenstein, L. (1922). *Tractatus logico-philosophicus/Logisch-philosophische Abhandlung*. Routledge and Kegan Paul, London.
- Wu, C.-S., Ambler, E., Hayward, R. W., Hoppes, D. D., und Hudson, H. P. (1957). Experimental test of parity conservation in beta decay. *Physical Review*, 105: 1413–1415.