

Holger Lyre

Kann moderne Physik a priori begründbar sein?

Abstract. Strengths and weaknesses of transcendental reasoning concerning the laws of nature are discussed. The opinion is held that the program of apriorism might be promising for modern physics as well – within a moderate version of “apriorism without dogmatism”. Regarding modern field physics, a first step of a deeper conceptual understanding of the gauge principle is proposed. This idea is combined with the thesis of an abstract understanding of aprioristic elements in modern physics, such as distinguishability and temporality. It will be argued how they relate to the concept of information. Finally, some speculative considerations of a deeper link between information and space are done, indicating the level of abstraction on which we can expect – if at all – a priori arguments within the foundations of modern physics (to understand, for instance, the idea of locality behind the gauge principle).

1 Was bedeutet Begründung a priori?

In den *Metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft* (KANT 1786) hatte IMMANUEL KANT den kühnen Versuch unternommen, die Physik seiner Zeit auf ein apriorisches, und somit unbezweifelbares und sicheres Fundament zu stellen. Im Detail hätte dies bedeutet, insbesondere die Grundgesetze der NEWTONSchen Mechanik in ihrer formalen Struktur zu begründen. Heutzutage, vor dem Hintergrund der die Physik unseres Jahrhunderts beherrschenden Quanten- und Relativitätstheorien erscheint uns ein solcher Versuch als hinlänglich gescheitert. Eine gewisse Spannung bleibt aber unerklärt: Einerseits ist der Gedanke einer Apriori-Begründung philosophisch brillant, andererseits scheitert KANT, wie wir heute klar sehen können, in der konkreten Durchführung seines Programms. Wie hängt dies zusammen? Welche Stärken und Schwächen hat das Programm als solches? Läßt es sich modern umsetzen? Zunächst aber: was bedeutet überhaupt Begründung a priori?

Begründung a priori zielt nach kantischem Verständnis letztlich auf die Geltung von Naturgesetzen. Ausgangspunkt der Überlegungen KANTS – sein Erwachen aus dem “*dogmatischen Schlummer*” – war das HUMESche Induktionsproblem, also die Frage, wie aus Erfahrungsurteilen Gesetze gewonnen werden können. An dem von HUME selber diskutierten berühmten Beispiel illustriert heißt das etwa: Wie kann ich sicher wissen, daß morgen die Sonne aufgeht aufgrund der bloßen Beobachtung früherer Sonnenaufgänge? Oder allgemein: aus noch so vielen Beobachtungsbeispielen und einer aus ihnen ableitbaren Regelmäßigkeit läßt sich weder allgemein noch notwendig auf die Geltung der Regel schließen. Allgemeinheit und Notwendigkeit sind aber genau dasjenige, was wir von einem echten Naturgesetz erwarten.

Ebendiese vertrackte Fragestellung des Induktionsproblems war es, die KANT zur Transzen-

dentalphilosophie führte (KANT 1781). Wir können, so argumentiert KANT, in der Tat nicht aus Erfahrungsurteilen auf deren Allgemeinheit und Notwendigkeit schließen. Wir wissen lediglich, rein phänomenal, um die *Möglichkeit* von Erfahrungsurteilen. Das Bestehen dieser Möglichkeit könnte nun aber umgekehrt bedeuten, daß schon vor aller Erfahrung bestimmte Bedingungen je erfüllt sein müssen, damit Erfahrungsurteile möglich werden. Die apriorischen Formen unseres Erkenntnisvermögens, so KANT, beinhalten also genau diese geforderten Bedingungen der Möglichkeit von Erfahrung; und eine Analyse, die diese Bedingungen in den Blick nimmt, nennt er *transzendental*.

KANTS Idee war es nun, daß die Grundgesetze empirischer Wissenschaft – und mithin der Physik als ihrem harten Kern – eben darum gelten, weil sie Bedingungen der Möglichkeit von Erfahrung ausmachen oder auf ihnen beruhen. Die Stärke des transzendentalen Arguments macht man sich wiederum klar anhand des Induktionsproblems: Zwar können wir aus Erfahrung nicht sicher auf die Geltung von Naturgesetzen schließen, falls unsere Naturgesetze aber umgekehrt auf Bedingungen der Möglichkeit von Erfahrung aufsetzen, so wird ihre Geltung mit Gewißheit notwendig und allgemein sein; denn es kann qua seiner Apriorizität keine Möglichkeit bestehen, ein fundamentales Naturgesetz in der Erfahrung zu widerlegen, sondern es muß sich in der Erfahrung als immer schon gültig erweisen.

Gerade als Physiker wird man nicht umhin können, das Bestechende dieses Arguments zu loben, denn die Unausweichlichkeit physikalischer Grundgesetze ist ein staunenswertes Urerlebnis eines jeden Naturwissenschaftlers. Und natürlich würde daher auch niemand ernsthaft daran zweifeln, daß morgen wieder die Sonne aufgehen wird, und daß ein Stein lotrecht zu Boden fällt – und dabei immer wieder neu das Gravitationsgesetz bestätigt. Das tiefe Staunen und das besondere Rätsel der Naturwissenschaften ist gerade, daß nur sie in der Lage sind, allgemeine und in jeder Erfahrung in Strenge geltende Gesetze aufzustellen. Man denke etwa an die Hauptsätze der Thermodynamik oder an die Axiomatik der Quantentheorie. Hierbei handelt es sich um uns heute bekannte Gesetze, die tagtäglich vieltausend-, ja vielmillionenfach ihre Gültigkeit neu bewahrheiten. Angesichts des Induktionsproblems wirft die schiere Existenz derartiger Naturgesetze ein tiefes erkenntnistheoretisches Rätsel auf, welches hinreichend zu lösen das transzendente Argument zu leisten vermag.

Für das folgende will ich den Raum als generelles Beispiel einer apriorischen Erkenntnisform herausgreifen. Nach KANT ist die Räumlichkeit eine Bedingung der Möglichkeit von Erfahrung, d.h., sofern wir Gegenstände empirisch aufnehmen, setzen wir sie in ein räumliches Nebeneinander. Es ist eine Leistung unseres Anschauungsvermögens, empirisch Gegebenes in einem Raume zu ordnen. Der Raum ist eine reine Anschauungsform und gleichzeitig Form der Anschauung, kann also selber je nur rein angeschaut werden. Stellt man sich die Frage, wie man Geometrie zu betreiben hat – etwa bei der Konstruktion eines Dreiecks –, dann ist es unvermeidlich, ein Dreieck zu konstruieren, dessen Winkelsumme 180 Grad beträgt. Der Raum als apriorische Erkenntnisform ist also bei KANT ein dreidimensional-euklidischer Raum.

Nun können wir ja zweifellos sofort zustimmen, daß der Raum unserer Vorstellungen *psychologisch*, also im Sinne eines kognitionstheoretischen Raumbegriffes, ein dreidimensional-euklidischer ist. KANTS Behauptung ist aber sehr viel stärker: Erfahrungsgegenstände können, da es sich um eine Bedingung der Möglichkeit von Erfahrung handelt, immer nur je in einem dreidimensional-euklidischen Raum als Gegenstände konstituiert werden. Nicht bloß psychologisch, sondern *erkenntnistheoretisch-methodisch* also ist diese These gemeint. In der empirischen

Wissenschaft ist der Raum darum etwas *objektiv Gegebenes*. Es ist auch nicht etwa so, daß wir in unseren gegenwärtigen Kognitions- und Neurowissenschaften erwarten können, das Apriori des Raumes – in diesem strengen kantischen Sinne – neuronal “verdrahtet” wiederzufinden. Denn diese Wissenschaften sind ja selber in ihrer Eigenschaft als empirische Wissenschaften a fortiori an die Bedingungen der Möglichkeit von Erfahrungswissenschaft gebunden. Das strenge kantische Apriori ist also am ehesten charakterisierbar als ein methodisches Apriori empirischer Wissenschaft.

2 Welche Möglichkeiten und Grenzen beinhaltet der Apriorismus?

Natürlich ist der Versuch der transzendentalen Begründung der Physik extrem ambitiös. Man macht sich dies klar, indem man das Programm des Apriorismus mit Alternativprogrammen kontrastiert. Bei erstem Hinsehen käme ja zunächst ein elementarer Realismus zur Lösung des Induktionsproblems in Betracht. In den empirischen Wissenschaften bilden wir in immer verfeinerter Weise die an und für sich existierende Wirklichkeit ab, und Naturgesetze geben die Struktur dieser Wirklichkeit wieder. Zwar gilt das Induktionsproblem rein logisch: wir können niemals von den bisherigen auf die zukünftigen Beobachtungen schließen –, aber eben nicht ontologisch: unsere Naturgesetze haben einen klaren beobachterunabhängigen Bestand. Ein naiver Realismus kann aber wohl angesichts der Belehrungen, die wir durch die Physik unseres Jahrhunderts erfahren, nicht aufrecht erhalten werden. Spätestens für die Quantentheorie ist die These einer vollständig beobachterunabhängigen Realität unhaltbar.

Sehr viele der heutigen Naturwissenschaftler weichen daher auf eine Position aus, die häufig als *hypothetischer Realismus* bezeichnet wird. Diese Position kommt der realistischen Neigung der modernen Naturwissenschaft entgegen, bei gleichzeitiger Anerkennung der Induktionsproblematik. Ebendies soll durch das Adjektiv “hypothetisch” angedeutet werden. Anlehnend an KARL POPPER wird dabei wie folgt argumentiert: Da Naturgesetze induktiv nicht verifizierbar sind, allenfalls – im Sinne eines Abgrenzungskriterium von Theorien – falsifizierbar, kann den Gesetzen unserer empirischen Wissenschaft lediglich der Status von Hypothesen über die Wirklichkeit zugestanden werden. Somit wäre es dann eine bloße Hypothese, daß die Energieerhaltung in abgeschlossenen physikalischen Systemen gilt. Man stelle sich aber vor, gewisse Beobachtungen legten eine Verletzung der Energieerhaltung nahe. Was wäre die natürliche Reaktion der *guten* Physiker? Sicher nicht ein sofortiges Umstoßen des ersten Hauptsatzes. Stattdessen würde man – und zwar aus guten Gründen – nach Fehlern im Experiment, seiner Durchführung oder dessen theoretischen Vorannahmen suchen. Die “guten Gründe” liegen herbei in der für uns alle wiederum staunenswert erlebbaren inneren Kohärenz oder, noch deutlicher, in der *Einheit der Physik*. Der in der Geschichte der Physik erreichte und sich bis heute hin immer mehr verstärkende Vereinheitlichungsgrad unserer Theorien auf dem fundamentalen Niveau ist für jeden Physiker ein beeindruckendes Kennzeichen seiner Wissenschaft. Umso rätselhafter wäre es dann aber, wenn die fundamentalen Naturgesetze lediglich hypothetischen Status besäßen. Es ist daher schwerlich zu sehen, wie ein hypothetischer Realismus die Einheit der Physik plausibel machen könnte.

In der Tat sind es diese beiden nun genannten Charakteristika: erstens, die Notwendigkeit und Allgemeinheit unserer fundamentalen Gesetze und, zweitens, deren vereinheitlichender Zusammenhang, auf die ein erkenntnistheoretisch befriedigender Entwurf der Philosophie der Physik antworten muß. Und genau dies leistet, einzig soweit ich sehen kann, der Apriorismus. Man soll-

te dabei – nochmals – nicht verhehlen, daß sein Erklärungsanspruch extrem ambitiös ist. Man muß aber sehen, daß diese Ambition durch die Art der Fragestellung, nämlich derjenigen nach allgemeiner Notwendigkeit einerseits und Einheit der Physik andererseits, begründet ist – und es kann auch keine Lösung sein, diese Frage durch einfachere, leichter lösbare Fragestellungen zu ersetzen.

Wie wesentlich es ist für die Pointe des gesamten Programms, an der strengen kantischen Form des Apriori festzuhalten, sieht man im Vergleich zu Versuchen, dieses strenge Apriori durch ein “weicheres” zu ersetzen.¹ Prominent ist hier die in der Wissenschaftstheorie häufig anzutreffende Tendenz, eine Evolutionäre Erkenntnistheorie anstelle einer transzendentalen einzuführen.² Der Grundgedanke ist dabei freilich sehr plausibel: Die dreidimensionale euklidische Raumanschauung, um im Beispiel zu bleiben, hat sich für den Menschen, aber auch für unsere evolutionären Vorgänger, als Überlebensvorteil erwiesen. Ein Affe etwa könnte im Urwald kaum als guter Kletterer bestehen, hätte er nicht ein derartiges Raumkonzept. Hier wird nun KANTS “kopernikanische Wende” im Erkenntnisprozeß gleichsam wieder rückgängig gemacht. Wir haben, so das Argument der Evolutionären Erkenntnistheorie, ein derartiges Raumkonzept, weil es sich als bestangepaßt an die Wirklichkeit herausselektiert hat. Es ist dem Einzelwesen bereits als angeboren in die Wiege gelegt, also ontogenetisch a priori, für die Gattung aber hat es sich evolutionär herausgebildet, ist also ein phylogenetisches Aposteriori. Aufgrund unserer bisherigen Bemerkungen sehen wir, daß hierbei die wesentliche Pointe KANTS vertan wird. Das transzendente Argument war ja, die Notwendigkeit und Allgemeinheit eines Apriori auf die strenge, da nämlich *methodisch erzwungene* Gültigkeit der Bedingungen der Möglichkeit von Erfahrung zu gründen. Methodisch streng heißt aber, daß diese Bedingungen in der Erfahrung niemals hintergangen werden können – auch nicht im Laufe der Stammesgeschichte. Und so verfügt ein stammesgeschichtliches Aposteriori eben nicht mehr über die Stärke des strengen Apriori, nämlich zur Begründung der Geltung empirisch gefundener Naturgesetze herzuhalten.

Einen anderen Ansatz verspricht die konstruktivistische Wissenschaftstheorie aufbauend auf HUGO DINGLER und dann v.a. PAUL LORENZEN. Auch hier steht eine sehr plausible Beobachtung am Anfang. Unser Zugang zur Welt stützt sich in den empirischen Wissenschaften auf Messungen. Dabei muß je schon technisches Wissen über den Aufbau und die Herstellung von Meßgeräten vorausgesetzt werden. Und auch die Validierung von Meßgeräten kann nur auf der messenden Beobachtung mittels anderer Geräte vorgenommen werden. Will man also nicht in einen infiniten Regress geraten, so muß man zugestehen, daß ein Wissen über die Herstellung von Meßgeräten zur methodischen Voraussetzung der Physik gehört. In der Protophysik spricht man daher von einem *meßtheoretischen Apriori* (LORENZEN 1981).

Im Verhältnis zum strengen kantischen Apriori zeigt sich aber, daß der so skizzierte, bloß *normative* Charakter des meßtheoretischen Apriori nicht ausreichend ist, um die notwendige und allgemeine Geltung von Naturgesetzen zu begründen. So sucht man etwa in der Protophysik des Raumes dessen Dreidimensionalität und Euklidizität auf die Herstellungsverfahren von Ebenen, Geraden und rechten Winkeln zu begründen. Das hierzu herangezogene Dreikörper-schleifverfahren führt in der Tat auf die Euklidizität des Raumes. Die Schwierigkeit der protophysikalischen Begründung liegt dann aber darin, daß jedes Meßgerät, und somit auch sein

¹Eine aufschlußreiche Diskussion der hier im folgenden nur angeschnittenen Fragen wurde von MICHAEL DRIESCHNER gegeben (DRIESCHNER 1987).

²Vgl. etwa VOLLMER 1975, LUETTERFELDS 1987.

Herstellungsverfahren, mit einer intrinsischen Ungenauigkeit behaftet ist. Ein Wissen über die geometrischen Verhältnisse in Raumdistanzen, die die Meßgenauigkeit des Dreikörperschleifverfahrens unterschreiten, kann durch dieses Verfahren also prinzipiell nicht bereitgestellt werden. Das meßtheoretische Apriori kann daher im Gegensatz zum kantischen Apriori lediglich methodische Notwendigkeit, nicht aber Allgemeinheit beanspruchen und ist daher ungeeignet zu einer echt fundamentalen Begründung der Naturgesetze. Die notorischen, in der Literatur seit jeher umfassend diskutierten Schwierigkeiten der Protophysik des Raumes im Umgang mit der Relativitätstheorie³ belegen dabei m.E. nur exemplarisch die angesprochene systematische Schwäche des Programms allgemein.

Ich komme nun auf das obige Beispiel der vermeintlichen Apriorizität des Raumes zurück. KANT hat also versucht, den Raum a priori als dreidimensional und euklidisch zu begründen. Beide Charakterisierungen schlagen historisch jedoch fehl. Das Aufkommen nicht-euklidischer Geometrien wirft zunächst die Frage auf, inwiefern denn der euklidische Raum ausgezeichnet und mithin a priori gewiß sein solle – und im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie erweist sich dann sogar die Geometrie der Raumzeit als ein dynamischen Element der Physik der Gravitation. Ferner lassen sich mathematisch ebensogut höherdimensionale Geometrien betrachten – und es bleibt in diesem Zusammenhang völlig ungeklärt, welche Gründe es denn ausgerechnet für die Dreidimensionalität des Ortsraumes geben mag. Daher nimmt es heute nicht Wunder, daß das Programm KANTS in deutlichen Mißkredit geriet. Falls uns also daran gelegen ist, die Grundfigur der Transzendentalbegründung für die moderne Physik fruchtbar zu machen, so sehen wir uns der folgenden Schwierigkeit ausgesetzt: wie läßt sich eine Position verteidigen, die sich einerseits auf Evidenz und intuitive Gewißheit ihrer Grundaussagen beruft, die aber andererseits in ihrer konkreten Ausführung bereits derart spektakulär gescheitert ist?

Mir scheint diese Frage eine bedeutsame, aber keine unüberwindbare Hürde darzustellen. Man kann ja doch zwischen dem allgemeinen Geltungsanspruch der Bedingungen der Möglichkeit von Erfahrung und ihrer historischen Auffindung im Rahmen der Erkenntnistheorie als einer Leistung menschlicher Wissenschaft wohl unterscheiden. Es ist der Geltungsanspruch der Notwendigkeit und Allgemeinheit, der nicht abgewiesen werden kann, da er ja die Stärke des Apriorismus ausmacht: die wahren Bedingungen der Möglichkeit von Erfahrung können sich niemals empirisch als falsch erweisen – das wäre ein Widerspruch. Wir, die wir Erkenntnistheorie betreiben, unterliegen aber, wie alle menschliche Wissenschaft, sehr wohl möglichen Irrtümern. Man könnte dies als die *inhärente Grenze des Apriorismus* bezeichnen (LYRE 1998, Kap. 3.1.3). Sie führt uns dazu, die dogmatische Inanspruchnahme der unbezweifelbaren Evidenz eines Apriori aufzugeben. Dennoch kann die Einheit der Physik möglich sein. Sie wird sich, einmal gefunden, als möglich erweisen auf der Basis von Naturgesetzen, die als wahre Bedingungen der Möglichkeit von Erfahrung notwendige und allgemeine Geltung beanspruchen dürfen. Beurteilen läßt sich dies freilich immer nur im nachhinein auf der Basis des jeweils Erreichten – und dann auch niemals zweifelsfrei. Die bereits erreichte Einheit der Physik unterliegt der Möglichkeit historischer Irrtümer. Das heißt aber nicht, daß unsere wahren Naturgesetze bloße Hypothesen sind; sie sind immer wahre Bedingungen der Möglichkeit von Erfahrung. Wir können sie nur nicht mit Gewißheit kennen. Dies wäre ein Apriorismus in seinen inhärenten Grenzen, ein *Apriorismus ohne Dogmatismus*.

³Vgl. etwa BUECHEL 1976, PFARR 1981, MITTELSTAEDT 1979.

3 Vor welche Fragen stellt uns die moderne Physik?

Es ist nun nötig zu fragen, ob das aprioristische Programm auch für die Gegenwartsphysik sinnvoll angewendet werden kann. Betrachten wir einmal das Rüstzeug der modernen theoretischen Physik: abstrakte Strukturen und Morphismen. Da die physikalische Rückführung häufig auf Symmetrien beruht, spielen Gruppen eine besondere Rolle. Aber auch geometrische Strukturen wie z.B. Faserbündel sind heute weitverbreitet. Dem Laien muß dieser mathematische Apparat hoffnungslos abgehoben erscheinen. Als Apriorist möchte man aber vermuten, daß die letzten Endes “wahre” Theorie hinter kompliziertem Formalismus dann wieder eine “einfache”, da auf allgemein-erkenntnistheoretische Konzeptionen zurückführbare Struktur besitzen wird.

Um an einem Beispiel anzudeuten, wie dies zusammenhängen mag, will ich im folgenden einige Überlegungen zu der vielleicht bedeutsamsten feldtheoretischen Konzeption der Physik unserer Tage anstellen: dem Konzept der sogenannten *Eichfeldtheorien*. Unter einer Eichfeldtheorie (oder auch kurz: Eichtheorie) versteht man die zusammenfassende Beschreibung eines Materiefeldes und des an dieses Feld ankoppelnden Wechselwirkungsfeldes, des sogenannten Eichfeldes. Die Verknüpfung beider kommt durch das *Eichprinzip* zum Ausdruck, welches besagt, daß die Forderung nach lokaler Eichinvarianz (Eichpostulat) einer freien Materiefeldtheorie im allgemeinen Fall nur durch die Einführung eines neuen Feldes, des Eichfeldes, befriedigt werden kann. Dieses Konzept liegt allen vier bekannten Wechselwirkungsarten zugrunde – und es handelt sich dabei im Standardmodell um das einzige, vielleicht entscheidende Bindeglied zwischen der Gravitation und den nicht-gravitationalen Wechselwirkungen.

Mathematisch werden Eichtheorien im Rahmen des Faserbündelformalismus beschrieben – hier nur die nötigsten Stichpunkte zur Erläuterung. Man betrachte die Quantenelektrodynamik als Paradebeispiel einer Eichfeldtheorie; das Eichprinzip funktioniert dann folgendermaßen: Man startet mit dem freien DIRAC-Feld, welches beispielsweise Elektronen und Positronen beschreibt. Die freie Theorie ist klarerweise invariant unter globalen Eichtransformationen, nämlich Transformationen der absoluten Phase der quantentheoretischen Elektronenwellenfunktion. Diese Invarianz der Theorie zieht nach dem NOETHER-Theorem die Existenz einer Erhaltungsgröße nach sich – in diesem Falle die Existenz der elektrischen Ladung. Es zeigt sich, daß man dasjenige Feld, welches an diese Ladung koppelt, nämlich das elektromagnetische Feld, genau dadurch in die Theorie einführen kann (als Wechselwirkungsterm in der DIRAC-Gleichung), indem man die Invarianz unter *lokalen*, d.h. raumzeit-abhängigen Eichtransformationen postuliert. Man muß dann ein Eichpotential einführen, welches seinerseits den gleichen lokalen Eichtransformationen genügt. Technisch gesprochen erhält man ein Prinzipalfaserbündel mit der Eich-LIE-Gruppe – in unserem Beispiel $U(1)$ – als Strukturgruppe. An jedem Punkt der (Raumzeit-) Basismanigfaltigkeit des Bündels ist die Gruppe topologisch als sogenannter Faserraum angeheftet, und der Zusammenhang (Konnektion) zwischen den einzelnen Fasern wird durch eine 1-Form mit Werten in der LIE-Algebra der Eichgruppe hergestellt. Dem Physiker ist die Idee der Konnektion als kovariante Ableitung geläufig. Die Konnektion repräsentiert das Eichpotential, die Feldstärke entspricht der Krümmung des Bündels. Das Materiefeld ist gegeben durch Schnitte im zum Prinzipalfaserbündel assoziierten Vektorbündel – die typische Faser ist hier derjenige Vektorraum, in dem die Eichgruppe fundamental dargestellt wird. Wie wir sehen, ist das Eichprinzip ein heuristisch höchst erfolgreiches und mathematisch elegant darstellbares “Rezept” zur Einführung der Wechselwirkung. Es stellt zudem einen bedeutsamen Schritt in Richtung auf die Vereinheitlichung der Physik dar. Dennoch bleibt die Frage nach seiner tieferen inhaltlichen

Bedeutung bis heute hin völlig unbeantwortet (will man sich nicht mit dem bloß heuristischen Hinweis zufrieden geben, daß es sich beim Eichpostulat um eine in Feldtheorien natürlicherweise auftretende Lokalitätsforderung handelt). Sie ist vermutlich eine der spannendsten Fragen der modernen theoretischen Physik und ihrer philosophischen Grundlagen.

Vielleicht kann man aber doch versuchen, einige erste Schritte in Richtung auf ein Verständnis des Eichprinzips zu wagen. Abstrakt läuft nämlich das Eichprinzip auf etwas sehr Einleuchtendes hinaus: Man startet mit einer freien Theorie, erhält dann aber Belehrung darüber, daß dieser Theorie nicht die allgemeinst mögliche Symmetrie – nämlich lokale Eichsymmetrie – zukommt, sondern eben erst einer Wechselwirkungstheorie. Nun ist ja eine freie Theorie ohnehin eine pure Idealisierung – wir werden also zwangsweise auf eine “realistischere” Beschreibung geführt.

Die Frage wäre nun, warum man überhaupt den Schritt von der globalen zur lokalen Symmetrieforderung machen soll. Dies führt uns wieder zum Begriff des Raumes. Etwas locker formuliert: Es ist die Forderung nach einer *räumlichen* Betrachtung per se, welche im Eichprinzip auf Wechselwirkung führt – Raum und Wechselwirkung stehen somit in einer engen inhaltlichen Beziehung. Man kann dies auch umgekehrt ausdrücken: Eine wechselwirkungsfreie Theorie ist nur denkbar, wenn man auf den Raum verzichtet. Wir wollen diese Betrachtung noch ein wenig weiter treiben (mangels einer genauen Theorie absichtlich in einer leicht stenographischen Metaphorik): Denken wir uns für einen Moment nur ein einziges Objekt im Kosmos (das Objekt *ist* dann sozusagen der Kosmos), dann hat der Begriff des Ortes in der Tat keine sinnvolle Bedeutung. Ein solches Objekt wäre wahrhaft “frei” – und eben darum auch kein Objekt empirischer Wissenschaft, da in diesem Kosmos ja kein Platz für Beobachter, Meßgeräte oder dergleichen wäre. Eine solche Situation kann in der empirischen Welt nicht auftreten! Hat man nun aber mehrere Objekte, dann wird gleichsam durch den Übergang von der Einheit zur Vielheit die Trennbarkeit der Objekte impliziert – trennbar heißt empirisch eben immer trennbar im Raume. Raum ist der Inbegriff der Trennbarkeit mehrerer Objekte. Dabei kann nun kein Objekt mehr als in Strenge frei angesehen werden, da, metaphorisch gesprochen, die ursprüngliche Ganzheit ja in eine Vielheit zerlegt wurde, und mithin nun als Korrektur dieser Zerlegung intrinsische Beziehungen zwischen den Teilen bestehen. Wo räumliche Trennbarkeit verlangt wird, muß sie mit dem Preis der Wechselwirkung bezahlt werden – und Wechselwirkung ihrerseits wird durch die räumlichen Relationen der so getrennten Objekte parametrisiert.⁴

Dies ist soweit natürlich nur sehr vage und spekulativ formuliert. Wenn etwas Wahres daran sein soll, so sehen wir, daß wir in jedem Fall auf den Begriff des Raumes und seine tiefliegende Verknüpfung mit dem Begriff der Wechselwirkung geführt werden. Keine der soweit vorgebrachten Überlegungen kann unmittelbaren Apriori-Charakter beanspruchen, statt dessen könnten derartige Zusammenhänge von Raum und Wechselwirkung eine Mittelstufe bilden zwischen der uns bekannten, höherstufigen Eichphysik und einer noch unbekannteren fundamentalen Stufe, welche dann möglicherweise a priori begründbar sein kann. Der jetzige Abschnitt verdeutlicht aber vielleicht, daß auch vermeintlich komplizierte mathematische Strukturen eine Rückführung auf elementare Begrifflichkeiten gestatten, hier etwa auf die Einheit-Vielheit bzw. Teil-Ganze-Problematik. Von diesen elementaren Begriffen aus mag es dann nur ein kleiner Schritt hin zu einer apriorischen Begründung sein. Davon soll nun im letzten Abschnitt die Rede sein.

⁴Vgl. DRIESCHNER 1979, §VIII.2. Im Hinblick auf Faserbündel läßt sich der Raum rein relationalistisch als bloßer “indexing device” der Fasern auffassen (AUYANG 1995, App. B); zum Status von Faserbündelräumen und deren Geometrie vgl. auch LYRE 1999.

4 Wie kann moderne Physik a priori begründbar sein?

Wie wir gesehen haben, konnten KANTS konkrete Durchführung seines Programms und die von ihm im Detail benannten apriorischen Erkenntnisformen der sich insbesondere in unserem Jahrhundert überaus abstrakt entwickelnden Physik nicht gerecht werden. Auf welchem Abstraktionsniveau kann man dann aber erwarten, auf echte apriorische Formen zu stoßen? Da wir bereits gesehen haben, daß Dogmatismus und Gewißheitsanspruch im Rahmen eines “geläuterten” Apriorismus keinen Platz haben, können wir wiederum auf die gestellte Frage eine nur vorläufige und spekulative Antwort erwarten. Wie soll man ansetzen? Meine Vermutung wäre, so rudimentär wie nur irgend möglich zu starten. Mir scheint dies die besondere historische Lehre des “Post-KANTianismus” zu sein, kombiniert mit dem Tatbestand fortschreitender Abstraktion in der Physik. Ich will daher *Unterscheidbarkeit* und *Zeitlichkeit* als mir in diesem Sinne geeignet erscheinende Kandidaten rudimentärer apriorischer Erkenntnisprinzipien vorschlagen.

Ich gehe zunächst auf Unterscheidbarkeit ein mit der Behauptung: Erkenntnis ist immer nur möglich, sofern Unterscheidungen vorgenommen werden können. Unterscheidung sei dabei ganz allgemein gefaßt – also vor allem auch im Sinne begrifflicher Erkenntnis: Begriffe dienen essentiell der Trennung und Unterscheidung. Ein Hund ist keine Katze. Aber auch jeder individuelle Hund fällt unter den Begriff des Hundes. Begriffliche Erkenntnis operiert damit, bestimmte Unterscheidbarkeiten auszuschöpfen, andere hingegen zu nivellieren. Wir können zwar zwei einzelne Hunde unterscheiden, als *Hunde* aber sind sie gleich. Die Möglichkeit, Unterscheidungen vornehmen zu können, erscheint mir daher in der Tat eine sehr allgemeine apriorische Vorannahme begrifflicher Erkenntnis überhaupt zu sein, bei deren Verzicht man nicht einmal mehr wüßte, wie Erkenntnis dann noch zu definieren wäre.

Die Apriorizität von Zeitlichkeit zielt direkt auf den Begriff der Empirie. CARL FRIEDRICH VON WEIZSÄCKER hat hervorgehoben, daß dem Begriff der Erfahrung der Unterschied von Vergangenheit und Zukunft bereits methodisch zugrundeliegt, denn “Erfahrung machen” heißt nichts anderes als aus den Fakten der Vergangenheit für die Möglichkeiten der Zukunft zu lernen (WEIZSÄCKER 1985, S. 29, 49, Kap. 4). Wer also weiß, was Erfahrung ist, oder von ihr methodisch Gebrauch macht, macht stillschweigend von der Zeitlichkeit im Sinne eines Unterschiedes von Vergangenheit und Zukunft Gebrauch. Wiederum wäre es nicht einmal möglich, Erfahrung zu definieren, ohne auf diesen Unterschied, ohne auf Zeitlichkeit zu rekurrieren.

In den empirischen Wissenschaften als einer systematischen Variante begrifflicher und empirischer Erkenntnis, sind daher mindestens Unterscheidbarkeit und Zeitlichkeit zwei fast zwingend erscheinende methodische Vorannahmen und mithin geeignete Kandidaten einer apriorischen Begründung der Physik. Was folgt nun daraus? Ich kann hier nur andeuten, was ich an anderen Stellen detaillierter ausgeführt habe (LYRE 1997; LYRE 1998): Man kann versuchen, allein aus den beiden Vorannahmen der Unterscheidbarkeit und der Zeitlichkeit ein vollständiges Konzept von Information herzuleiten. Vollständig heißt dabei, das der Begriff der Information in seiner umfassenden konzeptionellen Dimensionalität verwendet wird, nämlich im Sinne der Syntaktik, Semantik, Pragmatik und Zeitlichkeit. Meine These lautet: Der Begriff der Information, auf diese Weise abstrakt eingeführt, läßt sich direkt a priori begründen. Man muß dann erwarten, daß dieser Begriff in den Grundlagen der Physik eine zentrale Rolle spielen wird.

In der Tat spielt ja der Informationsbegriff heute nicht nur in der Physik, sondern in fast allen empirischen Fachwissenschaften eine gewisse Rolle. Dies wäre bereits ein Indiz. Bemer-

kenswert ist aber vor allem, wie der Informationsbegriff ganz konkret in der Quantentheorie ins Spiel kommt. In der Quantentheorie werden Objektsysteme durch Zustandsräume repräsentiert. Hierbei tritt ein genuin kleinstes nicht-triviales Objekt auf, nämlich ein Objekt mit einem bloß zweidimensionalen Zustandsraum. Ein solches Objekt wird heutzutage als Quantenbit bezeichnet. Es ist dann trivial, daß *jedes* quantenphysikalische Objekt in einem Tensorprodukt von Quantenbits dargestellt werden kann. Die Quantentheorie beinhaltet also in gewisser Weise eine Art *informationstheoretischen Atomismus*, dem auch ontologische Bedeutung zukommen könnte. Dabei unterstellt man freilich, daß die Quantentheorie bereits den fundamentalen Theorientypus darstellt. Diese Annahme ist nun angesichts des beispiellosen empirischen Erfolges der Quantentheorie keineswegs abwegig. Sie wird hier von anderer Seite gestützt durch unsere Überlegungen zum apriorischen Aufbau der Physik und zum zentralen Auftreten des Informationsbegriffes.

Ein physikalisches Rahmenprogramm, das an diese Überlegungen anschließt, wurde von C. F. VON WEIZSÄCKER vorgeschlagen und ist seither unter dem Namen *Quantentheorie der Ur-Alternativen* (kurz: Ur-Theorie) weiterentwickelt worden (WEIZSÄCKER 1985, Kap. 9, 10). Die Ur-Theorie basiert auf einer versuchten Begründung des Raumes und der Raumzeitsymmetrie aus der Symmetrie der Ur-Alternative, also einem fundamentalen Quantenbit. Dabei wird insbesondere die $SU(2)$ topologisch als Ortsraum gedeutet. Das Argument hierfür lautet, daß die Symmetrie der Ure, welche wesentlich $SU(2)$ ist, diejenige Symmetrie unserer Welt ist, deren Transformationen den Gesamtzustand der Welt ungeändert lassen. Dies sind essentiell die Transformationen des Raumes bzw. der Raumzeit. Man schließt so also vom HILBERTraum auf den Ortsraum.⁵

Hier könnte sich der Kreis nun schließen, denn in der Tat wäre dies eine im Rahmen unserer Argumentation durchaus denkbar erscheinende wahre abstrakte Begründung des Raumes! Er wird dabei also nicht direkt als ein Apriori eingeführt, sondern vermittelt einer konsequenten Quantentheorie der Information, die ihren konzeptionellen Ursprung in einem a priori begründbaren Begriff von Quanteninformation hat, welcher seinerseits auf Unterscheidbarkeit und Zeitlichkeit als Bedingungen der Möglichkeit von empirischer Wissenschaft beruht (LYRE 1998, Kap. 3). In ähnlich abstrakter Weise sollte man versuchen, den Begriff der Wechselwirkung und mithin das Konzept der Eichfeldtheorien zu begründen. Einen begrifflichen Ansatz habe ich ja bereits skizziert. Dabei demonstriert die Offenheit dieser Überlegungen die inhärenten Grenzen

⁵Dabei läßt sich die spezielle Relativitätstheorie im lokal-flachen Tangentialraum eines geschlossenen FRIEDMANN-ROBERTSON-WALKER-Kosmosmodells darstellen, wobei die LORENTZ-Gruppe aus der Spinormathematik der Ure folgt. Man kann in diesem Rahmen eine alternative und interessante Form von Kosmologie betreiben (GÖRNITZ 1988), insbesondere aber lassen sich bestimmte große Zahlenverhältnisse ur-theoretisch motivieren und sogar in Teilen begründen (wie etwa die Nukleonenzahl im Kosmos und das Photon-Baryon-Verhältnis). Die Thermodynamik Schwarzer Löcher und die in ihr auftretende BEKENSTEIN-HAWKING-Formel kann als Quantifizierung von Quanteninformation reproduziert und verstanden werden. Die dabei auftretenden Zahlenwerte entsprechen sämtlich den in ein jeweiliges Objekt ur-theoretisch investierten Mengen an Quantenbits. Ferner lassen sich in einer Viel-Ur-Theorie prinzipiell Darstellungen gewinnen, die als Kandidaten für phänomenologisch bekannte Elementarteilchen in Frage kommen (vgl. LYRE 1998, Kap. 2) zum gegenwärtigen Stand der Ur-Theorie). – Bedenkt man, wie ambitiös dieses Vorhaben ist, und wie wenige Physiker daran faktisch gearbeitet haben, bleibt vielleicht entschuldbar, wieso bislang keine echt empirisch überprüfbareren Vorhersagen in der Ur-Theorie gelungen sind. Zweifellos kann das auch schlicht an der Falschheit des Ansatzes liegen. Der Blick auf das bisher Gesagte läßt aber die dort erreichten Fortschritte sehr interessant aussehen. Abgesehen von technischen Schwächen kann das Programm in jedem Fall aber einige interessante konzeptionelle Anstöße geben – sein besonderer Ertrag liegt heute nicht zuletzt in einem wesentlich von der Standardphysik abweichenden Blickwinkel auf die Grundlagenfragen der Physik und deren notwendiger philosophischer Analyse.

des Apriorismus. Dennoch tut dies der Stärke des transzendentalen Arguments keinen Abbruch: Die wahren Bedingungen der Möglichkeit von Erfahrung werden eines Tages am Anfang einer abstrakten Begründungskette unserer fundamentalen Naturgesetze stehen. Zwar werden wir sie niemals zweifelsfrei kennen, doch sie werden durch keine Erfahrung mehr hintergebar sein. Und wir sollten darauf gefaßt sein, letzten Endes auf sehr abstrakt-allgemeine Konzepte zu stoßen.

In diesem Sinne könnte moderne Physik durchaus a priori begründbar sein.

Literatur

- AUYANG, S. Y. (1995). *How is Quantum Field Theory Possible?* Oxford University Press, New York.
- BÖHME, G., Hrsg. (1976). *Protophysik*. Suhrkamp, Frankfurt a. M.
- BÜCHEL, W. (1976). *Zur "Protophysik" von Raum und Zeit*. In: BOEHME 1976.
- DRIESCHNER, M. (1979). *Voraussage - Wahrscheinlichkeit - Objekt. Über die begrifflichen Grundlagen der Quantenmechanik..* Lecture Notes in Physics 99. Springer, Berlin.
- DRIESCHNER, M. (1987). *Das Apriori von Kausalität und Raum*. In: PASTERNAK 1987.
- GÖRNITZ, TH. (1988). *Abstract Quantum Theory and Space-Time-Structure. I. Ur Theory and Bekenstein-Hawking Entropy*. International Journal of Theoretical Physics, 27(5):527–542.
- KANT, I. (1781). *Kritik der reinen Vernunft*. Riga. (B 1787).
- KANT, I. (1786). *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft*. Riga.
- LORENZEN, P. (1981). *Geometrie als meßtheoretisches Apriori der Physik*. In: PFARR 1981.
- LÜTTERFELDS, W., Hrsg. (1987). *Transzendente oder evolutionäre Erkenntnistheorie?*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- LYRE, H. (1997). *Time and Information*. In: ATMANSPACHER, H. und E. RUHNAU, Hrsg.: *Time, Temporality, Now*. Springer, Berlin.
- LYRE, H. (1998). *Quantentheorie der Information*. Springer, Wien, New York.
- LYRE, H. (1999). *Gauges, Holes, and their 'Connections'*. To appear in: D. HOWARD, Hrsg., Proceedings of the "Fifth International Conference on the History and Foundations of General Relativity", Notre Dame, Indiana. (E-print: gr-qc/9904036).
- MITTELSTAEDT, P. (1979). *Protophysik und spezielle Relativitätstheorie*. In: K. LORENZ, Hrsg., Konstruktionen versus Positionen, Band I, W. de Gruyter, Berlin. (Nachdruck in: PFARR 1981).
- PASTERNAK, G., Hrsg. (1987). *Philosophie und Wissenschaften: Das Problem des Apriorismus*. Peter Lang, Frankfurt a.M.

PFARR, J., Hrsg. (1981). *Protophysik und Relativitätstheorie*. B.I.-Wissenschaftsverlag, Mannheim.

VOLLMER, GERHARD (1975). *Evolutionäre Erkenntnistheorie*. Hirzel, Stuttgart.

WEIZSÄCKER, C. F. VON (1985). *Aufbau der Physik*. Hanser, München.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Holger Lyre

Institut für Philosophie

Ruhr-Universität Bochum

D-44780 Bochum

Email: holger.lyre@ruhr-uni-bochum.de