In Michael Esfeld, Hg. (2012): *Philosophie der Physik*. Suhrkamp, Berlin, S. 368–389.

Symmetrien, Strukturen, Realismus

Holger Lyre*

Zusammenfassung

In der modernen Physik spielen Symmetrien eine herausragende Rolle zur Identifikation und Klassifizierung der fundamentalen Theorien und Entitäten. Symmetrien dienen der Darstellung invarianter Strukturen, das geeignete mathematische Werkzeug hierfür ist die Gruppentheorie. Eine Struktur lässt sich als eine Menge von Relationen verstehen, die einer Menge von Objekten aufgeprägt sind. Strukturell charakterisierte Objekte sind daher wesentlich über ihre relationalen Eigenschaften charakterisiert. Sieht man die theoretischen Entitäten wissenschaftlicher Theorien vornehmlich in dieser strukturellen Weise an, vertritt man eine moderate Variante eines wissenschaftlichen Realismus, die als Strukturenrealismus bekannt ist. Im Umfeld dieser drei Konzepte – Symmetrien, Strukturen, Realismus – bewegt sich der folgende Aufsatz.

Der Aufsatz besteht aus zwei Teilen. Im ersten Teil wird ein recht ambitiöser Durchmarsch durch die wichtigsten Anwendungen des Symmetriebegriffs in der modernen Physik gewagt. Dieser Teil ist mathematisch über Strecken ein wenig voraussetzungsvoll, da eine ausführliche Begründung sämtlicher verwendeter Fachtermini den Umfang des Textes bei Weitem gesprengt hätte. Im zweiten Teil wird die symmetrietheoretische Darstellung der modernen Physik des ersten Teils zu einer rigorosen Interpretation im Rahmen des Strukturenrealismus herangezogen.

Teil 1. Symmetrien in der modernen Physik

1.1 Der physikalische Symmetriebegriff

Symmetrien haben die Menschen seit der Antike fasziniert. Sie begegnen uns in der Malerei, der Bildhauerei, der Architektur, der Musik, der Astronomie und nicht zuletzt der Natur selbst, etwa als Spiegelungssymmetrien des Körpers oder im Aufbau von Kristallen. In den meisten dieser Zusammenhänge handelt es sich um geometrische Symmetrien, sie sind insofern auch „anschaulich". Die Physik macht jedoch einen weit allgemeineren und tieferen Gebrauch vom Konzept der Symmetrie. Dabei lässt sich die Bedeutung des Symmetriebegriffs für die moderne Physik kaum überschätzen. Quanten- und Quantenfeldtheorien sowie die Relativitätstheorien basieren, ebenso wie das Konzept der Eichtheorien, auf Symmetriebetrachtungen ihrer

* Institut für Philosophie, Universität Magdeburg; Email: lyre@ovgu.de

Gegenstandsbereiche. Dies zeigt sich vor allem darin, dass die fundamentalen Gesetze als Symmetrieprinzipien und Erhaltungssätze formuliert sind (zur Ideengeschichte des Symmetriebegriffs sei stellvertretend auf Weyl 1952 und Mainzer 1988 verwiesen, für moderne systematische Analysen auf Brading und Castellani 2003, Debs und Redhead 2007 sowie van Fraassen 1989).

Betrachten wir zum Einstieg ein einfaches Beispiel. Unter den unendlich vielen Drehungen eines gleichseitigen Dreiecks um seinen Mittelpunkt gibt es einige ausgezeichnete Drehungen, die das Dreieck in seine Ausgangsgestalt überführen, nämlich die Drehungen um 120°, 240° und 360°. Die Menge dieser Drehungen definiert eine Symmetrie des Dreiecks, sie besitzt die Eigenschaft, dass zwei miteinander verkettete Drehungen wiederum ein Element der Menge bilden. Mathematisch bildet eine solche Menge eine Gruppe – die Gruppenstruktur ist das zentrale formale Ausdrucksmittel zur Darstellung einer Symmetrie. Das Beispiel zeigt, dass Symmetrien dazu dienen können, die strukturellen Invarianten einer Klasse von Enititäten unter einer bestimmten Gruppe von Transformationen hervorzuheben – in diesem Fall die Form oder Struktur des Dreiecks. Unter der Symmetrie einer Domäne D versteht man allgemein eine Menge von Abbildungen von D auf sich selbst, so dass die Struktur von D erhalten bleibt. Diese Selbstabbildungen werden Symmetrietransformationen genannt und bilden eine Gruppe. Die Symmetriegruppe induziert eine Partitionierung von D in Äquivalenzklassen, d.h. die durch Symmetrietransformationen verbundenen Elemente von D sind über eine Äquivalenzrelation miteinander verbunden. Zwischen den Begriffen Symmetrie, Invarianz, Äquivalenz, Gruppe und Struktur bestehen insofern enge inhaltliche Zusammenhänge.

Den eigentlichen Einzug in die moderne Physik hielt das Symmetriekonzept in der Folge von Felix Kleins „Erlanger Programm" Ende des 19. Jahrhunderts und dann später durch die Einführung gruppentheoretischer Methoden in der Quantenmechanik vor allem durch Hermann Weyl und Eugen Wigner (die häufig so genannte „Gruppenpest"). Die Idee von Kleins Programm liegt in Folgendem: Mit Hilfe der Gruppe der räumlichen Drehungen und Verschiebungen eines physikalischen Objekts lässt sich die Symmetrie des Raumes und somit der Raum selbst in seiner relevanten geometrischen Struktur vollständig charakterisieren, denn jede Geometrie ist mit einer metrischen Form assoziiert (die die Abstandsrelation des betreffenden Raums deklariert). Die Form stellt eine Invariante bezüglich der Bewegungsgruppe dar. Für den in der klassischen Mechanik zugrundegelegten euklidischen Raum ist die in Frage kommende Gruppe die Galilei-Gruppe. Die Entdeckung gekrümmter Räume oder Geometrien führte im 19. Jahrhunderts auf die Frage nach einem umfassenderen Geometriebegriff. Hierauf konnte Klein 1872 die Antwort geben, dass Geometrie allgemein als „Invariantentheorie von Transformationsgruppen" anzusehen ist. Diese Definition erlaubt und umfasst neben den metrischen Strukturen auch eine Hierarchie von affinen, projektiven, topologischen u.a. Strukturarten von Mannigfaltigkeiten. In systematischer Hinsicht lassen sich zahlreiche Gegensatzpaare von Symmetrien unterscheiden: kontinuierlich/diskret, global/lokal, geometrisch/dynamisch und empirisch/nicht-empirisch. Diese Unterscheidungen werden in Folge anhand ihrer wichtigsten physikalischen Verwendungen erläutert.

1.2 Kontinuierliche Symmetrien, Lie-Gruppen, Erhaltungssätze und Noethers erstes Theorem

Die von Klein betrachteten Symmetrien sind kontinuierliche Symmetrien, die ihnen zugrundeliegenden Gruppen sind Lie-Gruppen. Bei einer Lie-Gruppe sind die Gruppenelemente

U analytische Funktionen n-dimensionaler Parameter $\boldsymbol{\phi} = (\phi_1, \phi_2, \dots \phi_n)$ in der Form $U(\phi) = e^{-i\phi L}$. Die Operatoren $\mathbf{L}=(L_1, L_2, \dots L_n)$ werden Generatoren der Gruppe genannt, sie bilden die Basis eines n-dimensionalen Vektorraums, der Lie-Algebra. Betrachten wir die Galilei-Gruppe. Sie setzt sich aus mehreren Untergruppen, etwa Drehungen und Verschiebungen, zusammen. Jede Gruppe besitzt eine gewisse Anzahl von Parametern, der Raum dieser kontinuierlichen Parameter bildet eine Parametermannigfaltigkeit, durch die die betreffende Gruppe ihrerseits charakterisiert ist. Eine Lie-Gruppe kann daher als differenzierbare Mannigfaltigkeit angesehen werden, die Dimension der Mannigfaltigkeit entspricht der Zahl der Parameter. Die Translations- und Drehgruppe im euklidischen Raum sind dreidimensionale Gruppen. Hinzu kommt die dreidimensionale Translation des Schwerpunkts sowie die Verschiebbarkeit bezüglich des eindimensionalen Zeitparameters. Die Galilei-Gruppe besitzt daher 3+3+3+1=10 Dimensionen. Ihre Invariantentheorie ist die Geometrie des euklidischen Raumes. Wie lauten die Invarianten ihrer vier Untergruppen? Hier werden wir auf Noethers erstes Theorem geführt, das besagt, dass zu jeder kontinuierlichen Symmetrie eine Erhaltungsgröße gehört, genauer: die Invarianz des Wirkungsfunktionals bzw. der Euler-Lagrange-Gleichungen unter einer k-dimensionalen Lie-Gruppe führt auf die Existenz von k Erhaltungsgrößen. Die Translationssymmetrie führt auf die Erhaltung des dreidimensionalen Impulses, aus der Homogenität des Raumes folgt die Schwerpunktserhaltung und aus der Homogenität der Zeit die Erhaltung der Energie, die Isotropie des Raumes ist mit der Drehimpulserhaltung verknüpft. Noethers (erstes) Theorem erlaubt also ganz allgemein die formale Herleitung von Erhaltungsätzen aus globalen kontinuierlichen Symmetrien und beinhaltet so einen direkten Zusammenhang zwischen Symmetrien und Naturgesetzen.

1.3 Diskrete Symmetrien und CPT-Invarianz

Neben den kontinuierlichen Symmetrien kennt die Physik drei fundamentale diskrete Symmetrien: räumliche Inversion bzw. Parität P, zeitliche Inversion T und Ladungsinversion C. Gruppen diskreter Transformationen bestehen nur aus endlich vielen Operationen. Weitere Beispiele sind die eingangs erwähnte Drehgruppe des Dreiecks oder andere Kristallsymmetrien. Anschaulich, da räumlich-geometrisch, ist die Paritätstransformation als Punktspiegelung im Raume (formal als Inversion der Vorzeichen aller Koordinaten). Sie hängt global mit der topologischen Eigenschaft der Orientierbarkeit eines Raumes zusammen. Anders als Translationen und Drehungen lässt sie sich für einen starren Körper jedoch nicht als aktive Transformation realisieren, sondern virtuell durch einen Spiegel (da im Dreidimensionalen Achsen- und Punktspiegelung ununterscheidbar sind). Auf die Merkwürdigkeiten der Spiegelungssymmetrie hat Kant 1768 in seinem Aufsatz „Von dem ersten Grunde des Unterschieds der Gegenden im Raume" als erster hingewiesen, der spätere „Fall der Parität" durch ihre Verletzung im Bereich der schwachen Wechselwirkung war ein Schock für die Physik der 50er Jahre. Auf die sich hier anknüpfende Debatte um den ontologischen Status des Raumes durch die Auszeichnung von Händigkeiten kann hier leider nicht eingegangen werden (vgl. Lyre 2005).

Die T-Transformation wird meist als Zeitumkehr-Transformation bezeichnet, sie ist formal genauer eine Umkehr aller Koordinaten und Impulse, also eine Bewegungsumkehr im Phasenraum. Die C-Symmetrie erstreckt sich auf alle 12 als fundamental erkannten Ladungen der quantisierten Eichfeldtheorien im Standardmodell. 1964 zeigte sich, dass auch die Kombination CP verletzt ist. Lediglich die kombinierte Anwendung von C, P und T ist eine Invariante im

Rahmen der relativistischen Quantenfeldtheorie (im Wesentlichen in Folge der Lorentz-Invarianz, wie das CPT-Theorem besagt).

1.4 Die Permutationssymmetrie in der Quantentheorie

Eine bemerkenswerte diskrete Symmetrie aller Quantentheorien ist die Zustandsinvarianz unter der Symmetrischen Gruppe. Die symmetrische Gruppe vom Rang n ist diejenige Gruppe, die aus allen Permutationen einer n-elementigen Menge besteht. Genauer gesagt sind im Zustandsraum eines Vielteilchen-Quantensystems nur total symmetrische oder total antisymmetrische Darstellungen realisiert. Gemischt-symmetrische Darstellungen (Parastatistik) kommen nicht vor. Der tiefere mathematische Grund für die Quantenstatistik besteht darin, dass der Quantentheorie eine nicht-kommutative Algebra-Struktur zugrunde liegt. Die Kommutator- (bei Bosonen) oder Antikommutator-Relationen (bei Fermionen) der Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren im Fockraum führen auf die entsprechenden symmetrischen oder antisymmetrischen Darstellungen.

Die Permutationssymmetrie wurde in der Quantenmechanik schon früh als eine Verletzung des Leibniz-Prinzips der „Identität des Ununterscheidbaren" diskutiert. Diesem Prinzip zufolge sind zwei Objekte x und y identisch, falls für jede Eigenschaft gilt, dass x sie dann und nur dann hat, falls y sie auch hat (oder besser in kontrafaktischer Formulierung als „Ungleichheit des Verschiedenen": falls x und y verschieden sind, dann existiert wenigstens eine Eigenschaft, die x hat und y nicht hat oder umgekehrt). Dabei wird üblicher Weise von monadischen, intrinsischen Eigenschaften ausgegangen.

Diese Auffassung wurde in jüngerer Zeit kritisiert. Saunders (2006) argumentiert, dass Fermionen zwar nicht absolut, aber doch schwach unterscheidbar sind. Er greift dabei auf einen Vorschlag von Quine (1976) zurück. Demnach sind Objekte absolut unterscheidbar, wenn sie das Leibniz-Prinzip für monadische intrinsische Eigenschaften erfüllen. Objekte, die in irreflexiven Relationen zueinander stehen, sind demgegenüber schwach unterscheidbar – sie erfüllen gewissermaßen ein schwaches Leibniz-Prinzip. Eine Relation R ist reflexiv, wenn für alle x in der Domäne R(x,x) gilt. Gilt ¬R(x,x), dann ist R irreflexiv. Dies ist zum Beispiel der Fall für Blacks bekanntes Szenario zweier gleicher Kugeln im relationalen Raum (Black 1952). Die Kugeln befinden sich im Abstand d, die Abstandsrelation ist dann irreflexiv: jede Kugel besitzt den Abstand d zu der anderen aber nicht zu sich selbst. Das gleiche gilt für die Eigenschaft zweier Fermionen in einem verschränkten Zustand, einen entgegengesetzten Spin zu besitzen. Muller und Seevinck (2009) haben dieses Resultat kürzlich auf beliebige Quantenobjekte erweitert, indem sie die irreflexive Heisenbergsche Eigenschaft, einen komplementären Ort und Impuls zu besitzen, betrachten. Demnach sind alle Quantenobjekte schwach unterscheidbar. Dies ist ein bedeutsames Resultat: die Quantentheorie gestattet schwach individuierbare Entitäten.

1.5 Spezielle Relativitätstheorie und Casimir-Invarianten

Die Spezielle Relativitätstheorie ist keine eigentliche Theorie mit einem bestimmten Gegenstandsbereich, sondern im Wesentlichen eine allgemeine Symmetrieforderung an die Physik. Jede physikalische Theorie muss der Lorentz-Invarianz, genauer der Invarianz der Grundgleichungen unter der inhomogenen Lorentz- bzw. Poincaré-Gruppe genügen. Auf diese Weise wird man dem empirischen Faktum der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und dem Speziellen Relativitätsprinzip gerecht, also der Forderung der physikalischen Gleichberechtigung aller Intertialsysteme. Während die Galilei-Gruppe die Symmetrie der Newtonschen Raumzeit wiedergibt, stellt die Poincaré-Gruppe die Symmetrie der Minkowski-Raumzeit dar. Sie ist ebenso wie die Galilei-Gruppe zehndimensional.

Für die relativistische Quantentheorie spielt die Poincaré-Gruppe eine wichtige Rolle, da ihre irreduziblen unitären Darstellungen zur Klassifizierung der Elementarteilchen dienen. Die physikalische Annahme dahinter ist, dass der Zustandsraum eines elementaren Objekts keine relativistisch invarianten Unterräume besitzen soll. Hierzu dient als Erläuterung, dass die Operatoren einer Gruppe auf einen invarianten Unterraum allgemein derart wirken, dass die Zustände, aus denen er besteht, nur unter sich selbst transformiert werden. Besitzt ein Darstellungsraum keine weiteren invarianten Unterräume, so nennt man die Darstellung irreduzibel. Elementarteilchen-Darstellungen müssen in diesem Sinne als irreduzible Darstellungen angesehen werden.

Nun lassen sich die Darstellungen der Poincaré-Gruppe durch die Eigenwerte ihrer Casimir-Operatoren charakterisieren. Dem liegt zugrunde, dass die Aussage, ein physikalisches System besitze eine gewisse Symmetrie, äquivalent ist zu der Aussage, dass der Hamiltonoperator mit allen Operatoren der Symmetriegruppe kommutiert – was intuitiv klar ist, da der Hamiltonoperator die zeitliche Dynamik des Systems generiert, und die zeitliche Entwicklung eines Zustands und seines symmetrietransformierten Zustands dieselbe sein muss. Die Casimir-Operatoren werden aus den Erzeugenden der jeweiligen Symmetrie-Gruppe gebildet und sind der größte Satz unabhängiger invarianter Operatoren, der mit den Symmetrieoperatoren kommutiert. Die Angabe der Casimir-Operatoren ist daher äquivalent mit der Angabe der physikalisch relevanten Invarianten eines Systems. Im Falle der Poincaré-Gruppe sind dies Masse und Spin (genauer: die aus m und s gebildeten Eigenwerte der Quadrate des Viererimpulses und des Pauli-Łubanski-Vektors).

1.6 Eichsymmetrien und Faserbündel

Jede Quantentheorie oder quantisierte Feldtheorie besitzt eine Symmetrie unter unitären Transformationen der Wellenfunktion $\psi'(x) = e^{i\lambda}\psi(x)$. Eine derartige Transformation wird *globale Eichtransformation* genannt. Zum Beispiel kommt der Dirac-Lagrangedichte $L_D = \psi^{+}(x)\,\gamma^{o}\,(i\,\gamma^{\mu}\,\partial_{\mu} - m)\,\psi(x)$ eine globale Symmetrie mit der U(1) als Eichgruppe zu. Die Symmetrie ist „global", da der Transformationsparameter λ nicht vom Ort abhängig ist. Noethers erstes Theorem bezieht sich auf kontinuierliche globale Symmetrien. Die U(1)-Invarianz bedingt entsprechend die Existenz einer erhaltenen Ladung q bzw. eines erhaltenen Stroms $j^{\mu} = -\,q\,\psi^{+}\,\gamma^{o}\,\gamma^{\mu}\,\psi$. Geht man von globalen zu *lokalen Eichtransformationen* über, das heißt zu Transformationen $\psi'(x) = e^{i\lambda(x)}\psi(x)$ mit einem vom Ort abhängigen Transformationsparameter $\lambda(x)$, wird man auf Noethers zweites Theorem geführt, das die Existenz algebraischer Identitäten (hier: Bianchi-Identitäten) besagt. Die Zahl dieser Identitäten hängt von der Zahl der Transformationsparameter ab, sie weisen die Euler-Lagrange-Formulierung der Feldtheorie als entsprechend redundant aus.

Eichtheorien besitzen eine tiefliegende geometrische Struktur, die sich im Faserbündel-Formalismus ausdrücken lässt. Dies kann hier lediglich informell dargestellt werden (vgl. Baez & Munian 1994). Faserbündel sind Verallgemeinerungen des direkten Produkts, hier speziell des Produkts der Raumzeit als Basismannigfaltigkeit M und eines inneren Raumes, der Faser F, auf den die Strukturgruppe G des Bündels wirkt. Für F=G spricht man von einem

Prinzipalfaserbündel. Ein Faserbündel sieht aber nur lokal wie ein direktes Produkt aus. Zur Angabe der globalen Struktur benötigt man eine Konnektion (auch: Zusammenhang). Sie ist definiert als Differentialform mit Werten in der Lie-Algebra der Strukturgruppe. Da man sich die Lie-Algebra als isomorph zum Tangentialraum der Lie-Gruppe denken kann, gibt die Konnektion eine Regel, wie man den Tangentialraum des Prinzipalfaserbündels in einen „horizontalen" Anteil (isomorph zum Tangentialraum des Basisraums) und einen „vertikalen" Anteil zerlegen kann. Dem Physiker ist dies als kovariante Ableitung vertraut: sie ist roh gesagt die Summe aus gewöhnlicher Ableitung und Konnektion. Anschaulich bedeutet die kovariante Ableitung, dass eine horizontale Verschiebung im Basisraum im Allgemeinen auch zu einer vertikalen Verschiebung in der Faser führt, die wiederum einem Element der Strukturgruppe entspricht. Die kovariante Ableitung ist daher ein verallgemeinerter Paralleltransport.

Das Konzept der Eichtheorien fügt sich in das folgende geometrische Schema: die Eichgruppe fungiert als Strukturgruppe des Bündels. Die Feldstärke entspricht der Bündelkrümmung, das Eichpotential der Bündelkonnektion. Das Materiefeld ist gegeben durch Schnitte im assoziierten Vektorraumbündel (hierbei ist die typische Faser derjenige Vektorraum, in dem die Eichgruppe fundamental dargestellt wird).

1.7 Eichprinzip und nicht-empirische Symmetrien

Das Eichprinzip gilt gemeinhin als grundlegendes Prinzip der Eichtheorien, es besteht in der Forderung der Invarianz des Wirkungsfunktionals unter lokalen Eichtransformationen der Felder. Nach der üblichen Folklore führt diese Forderung von einer freien zu einer wechselwirkenden Theorie. Im Formalismus der einfachsten Eichtheorie, der Dirac-Maxwell-Theorie, deren eichtheoretische Struktur der Quantenelektrodynamik (QED) zugrunde liegt, stellt sich das so dar: Ausgehend von der freien Dirac-Lagrangedichte $L_D = \psi^+(x)\,\gamma^o\,(i\,\gamma^\mu\,\partial_\mu - m)\,\psi(x)$ fordert man die Invarianz von L_D unter lokalen Eichtransformationen $\psi(x) \to \psi'(x) = e^{iq\alpha(x)}\psi(x)$. Diese Forderung kann erfüllt werden, wenn man ein Potential A_μ mit dem Tranformationsverhalten $A_\mu(x) \to A'_\mu(x)=A_\mu(x)-\partial_\mu\alpha(x)$ einführt. Man erhält dann statt der ursprünglichen freien Theorie scheinbar eine Theorie $L_D + L_{int} = L_D - j_\mu\,(x)\,A^\mu\,(x)$, in der das Diracfeld ψ an ein Potentialfeld A_μ koppelt – oberflächlich betrachtet eine elegante „Herleitung der Wechselwirkung" aus einem Symmetriepostulat.

Dass hier ein Missverständnis vorliegt, konnte durch die Analysen verschiedener Autoren in der Philosophie der Physik gezeigt werden (vgl. Brown 1999; Healey 2001, 2007, Kap. 6.3; Lyre 2004a, b, Martin 2002), denn der in der kovarianten Ableitung auftretende inhomogene Term enthält eine „flache" Konnektion, was bedeutet, dass die zugehörige Krümmung null ist. Das Eichprinzip erzwingt daher nicht die Existenz eines echten Wechselwirkungsfeldes mit nicht-verschwindender Krümmung, sondern garantiert lediglich die allgemeine Kovarianz der Theorie unter lokalen Eichtransformationen. Aus derartigen und ähnlichen Überlegungen folgt, dass sowohl globale als auch lokale Eichsymmetrien nicht-empirische Symmetrien sind, die empirisch ununterscheidbare Modelle besitzen. Brading und Brown (2004) verteidigen den nicht-empirischen Charakter lokaler Eichtransformationen auch gegen die in der Literatur gelegentlich anzutreffende Verwechslung mit relativen Phasenänderungen. Der Umstand, dass Eichsymmetrien nicht-empirisch sind, hat auch Auswirkungen auf die Interpretation der Symmetriebrechung in Eichtheorien etwa im Rahmen des Higgs-Mechanismus (vgl. Lyre 2008).

Der nicht-empirische Charakter der Eichsymmetrien bedeutend jedoch nicht, den Eichsymmetrien käme keinerlei physikalische Relevanz zu. Der physikalische Gehalt von Eichtheorien beruht auf den eichinvarianten Größen, etwa dem Feldstärketensor oder den erhaltenen Noether-Ladungen. Für die fundamentalen Eichsymmetrien der elektroschwachen Wechselwirkung mit U(1)xSU(2) und der Chromodynamik mit SU(3) sind dies 1+3+8=12 fundamentale Ladungen (s.a. 1.3).

1.8 Allgemeine Relativitätstheorie als Eichtheorie

Die verbreitete Vorstellung, die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) sei eine symmetriebezogene Verallgemeinerung der Speziellen Relativitätstheorie, etwa charakterisiert durch den Übergang von Lorentz- zu beliebigen Koordinatentransformationen oder gar vom Speziellen zu einem Allgemeinen Relativitätsprinzip ist in vielfacher Weise irreführend (siehe auch folgender Abschnitt), denn im Gegensatz zur Speziellen Relativitätstheorie ist die ART eine Theorie einer spezifischen Wechselwirkung, der Gravitation, und es ist daher instruktiv, sie unter diesem Gesichtspunkt einzuordnen und ihre Gemeinsamkeiten mit den quantenfeldtheoretischen Wechselwirkungstheorien herauszustellen. Eine wichtige Gemeinsamkeit besteht formal darin, dass auch die ART eine eichtheoretische Struktur besitzt, wenngleich im Zusammenhang mit der Wahl der geeigneten Eichgruppe und Lagrangedichte, der Auszeichnung der fundamentalen dynamischen Objekte und der Besonderheit der Verschmelzung zwischen Basis- und Faserraum spezielle Umstände auftreten, die eine Sonderbehandlung erfordern. So kann die ART wahlweise als Eichtheorie der homogenen Lorentzgruppe oder der Translationsgruppe bzw. lokalen Diffeomorphismen angesehen werden. Es existieren insofern verschiedene empirisch äquivalente Formulierungen, was auf interessante Unterbestimmtheitsszenarios führt (vgl. Lyre und Eynck 2003).

Da eine detaillierte Darstellung der mathematischen Hintergründe hier aus Platzgründen unmöglich ist, sei lediglich ein einfacher und informeller tabellarischer Vergleich der eichtheoretischen Struktur der Quanten-Eichtheorien und der ART angegeben:

Eichtheorie	*Faserbündel*	*Quanten-Eichtheorie*	*ART*
Materiefeld	Vektorbündelschnitt	Spinorfeld	Vierbeinfeld
Eichpotential	Konnektion	Viererpotential	Levi-Civita-Konnektion
Eichfeldstärke	Bündelkrümmung	Feldstärketensor	Riemann-Tensor
Eichgruppe	Strukturgruppe G	U(1) x SU(2), SU(3)	Diff(M)
Eichbosonen	Generatoren von G	Photon, W-Bosonen, Gluonen	-

1.9 Allgemeine Kovarianz

Die Allgemeine Relativitätstheorie zeigt eine sehr allgemeine Symmetrie unter der Gruppe der Diffeomorphismen. Ein Diffeomorphismus ist eine differenzierbare und invertierbare Abbildung zwischen differenzierbaren Mannigfaltigkeiten. In aktiver Sichtweise entspricht er einer Punktverschiebung auf der Mannigfaltigkeit (anschaulich vorstellbar als Deformation eines kontinuierlichen elastischen Mediums). Dabei werden die auf der Mannigfaltigkeit erklärten

Tensorfelder „mitgezogen". Dies führt dazu, dass sich die lokalen Koordinaten ändern. Man sagt: der Diffeomorphismus induziert einen Kartenwechsel bzw. eine Koordinatentransformation. Dies entspricht der passiven Sichtweise eines Diffeomorphismus.

Einstein hat die Diffeomorphismen-Symmetrie als Prinzip der allgemeinen Kovarianz adressiert. Aber bereits Kretschmann wies 1917 darauf hin, dass die Forderung der Unabhängigkeit der Physik unter Koordinatentransformationen keine substantielle Forderung ist. Es ist daher kontrovers, in welchem Sinne es sich um ein physikalisch gehaltvolles Prinzip handelt. Zu einer wesentlichen Klärung dieser Fragen trug Anderson (1967) mit der Unterscheidung absoluter und dynamischer Objekten einer Theorie bei. Dynamische Objekte sind veränderbar, absolute Objekte bleiben invariant. Die Minkowski-Metrik stellt ein absolutes Objekt der Speziellen Relativitätstheorie dar, die Riemann-Metrik ist eine dynamische Größe der ART. Mit jeder Raumzeit-Theorie ist genau eine Symmetriegruppe assoziiert, deren Definition es ist, die größte Untergruppe der Kovarianzgruppe zu sein, die die absoluten Objekte der Theorie unverändert lässt. In der Newtonschen Theorie ist dies die Galilei-, in der Speziellen Relativitätstheorie die Poincaré-Gruppe. Die ART ist insofern ausgezeichnet, als sie überhaupt keine absoluten Objekte besitzt (modulo gewisser Einschränkungen, vgl. Pitts 2006), die Symmetriegruppe der Theorie degeneriert zur allgemeinen Kovarianzgruppe, der Diffeomorphismengruppe. Das Symmetrie der ART unter Diffeomorphismen beinhaltet insofern eine triviale mathematische Forderung, der letztlich jede physikalische Theorie genügen muss, und eine physikalisch gehaltvolle Forderung über die Abstinenz absoluter Objekte. In letzterer Hinsicht ist die Diffeomorphismen-Symmetrie eine dynamische Symmetrie im eichtheoretischen Sinne.

Der Vergleich mit den Überlegungen in 1.7 zeigt, dass das Prinzip der allgemeinen Kovarianz im Sinne einer trivialen mathematischen Forderung viel Ähnlichkeit mit dem Eichprinzip besitzt. Beide „Prinzipien" beinhalten die Forderung der Kovarianz unter den jeweiligen allgemeinen Bündeltransformationen. So lässt sich der triviale Charakter des Eichprinzips auch sehr gut anhand der ART illustrieren. Denn geht man von der gewöhnlichen Geodätengleichung eines freien Objekts im flachen Raum aus, dann erhält man bei Koordinatenwechsel einen zusätzlichen Term in der Ableitung, der die Christoffel-Symbole, also die Komponenten der Levi-Civita-Konnektion, enthält. Dies entspricht dem Auftreten der Konnektion im Eichprinzip, besagt aber keineswegs, dass der Raum eine nicht-verschwindende Krümmung besitzt, was einem echten Gravitationsfeld entspräche. Die Konnektion ist „flach", das Auftreten von Christoffel-Symbolen ist nur der Wahl krummliniger Koordinaten im flachen Raum geschuldet und somit ein Artefakt der mathematischen Darstellung.

Teil 2. Strukturenrealismus

2.1 Strukturen und Strukturenrealismus

Shapiro gibt folgende informelle Definition des mathematischen Strukturbegriffs: *"Ein* System *sei definiert als Ansammlung von Objekten mit bestimmten Relationen. … Ein* Muster *oder eine* Struktur *sei definiert als die abstrakte Form des Systems, so dass die Relationen zwischen den Objekten hervorgehoben und jegliche ihrer Merkmale ignoriert werden, die nicht die Frage betreffen, wie die Objekte zu anderen Objekten im System in Beziehung stehen."* (Shapiro 2000, S. 259, Übersetzung HL). Strukturen sind abstrakt deklariert als Mengen von Relationen, die Mengen von Objekten aufgeprägt sind. Eine Struktur ist demnach ein Tupel $\Sigma=\langle a,R(a)\rangle$ mit einer Menge von n Objekten $a=\{a_1, a_2, \ldots a_n\}$ und beliebigen n-stelligen Relationen $R(a)$.

Unter Strukturenrealismus (SR) versteht man nun eine moderate Variante eines wissenschaftlichen Realismus, die sehr allgemein ausgedrückt besagt, dass unsere ontologischen Verpflichtungen hinsichtlich reifer, avancierter wissenschaftlicher Theorien auf den strukturellen Gehalt und nicht auf objektartige Entitäten zu richten sind. Dabei können unter strukturellem Gehalt auch strukturell charakterisierte Objekte verstanden werden, wobei der mathematische Strukturbegriff zeigt, dass derartige Objekte entscheidend über ihre relationalen Eigenschaften charakterisiert sind. Vom mathematischen Strukturalismus unterscheidet sich SR in wesentlicher Hinsicht dadurch, dass keine *ante rem*-Variante existiert, denn dies wäre ein Strukturen-Idealismus oder Platonismus. SR ist nicht intendiert als Realismus bezüglich abstrakter mathematischer Entitäten, sondern als *in re*-Variante bezüglich der physikalisch instantiierten, realen Strukturen.

Die bisherige Charakterisierung von SR ist noch recht unpräzise. Ein generelles Problem für SR-Vertreter ist, dass es keine eindeutige Methode gibt, den strukturellen Gehalt einer wissenschaftlichen Theorie zu extrahieren. Dies ist umso dringlicher, wenn es sich um weniger formalisierte, höherstufige Wissenschaften handelt, aber das Problem tritt bereits auf der Ebene der stark mathematisierten, fundamentalen Physik auf. Eine erste Näherung an den strukturellen Gehalt physikalischer Theorien bietet klarer Weise deren Symmetriestruktur. Dies soll hier in Anbindung an den ersten Teil des Aufsatzes verfolgt werden.

2.2 Zwei Wege zum Strukturenrealismus

SR hat eine bis auf Henri Poincaré zurückreichende Historie, das jüngere Wiederaufleben dieser Position wurde durch John Worrall (1989) initiiert. Worrall wies darauf hin, dass SR geeignet ist, die beiden zentralen anti-realistischen Argumente in der Debatte um den wissenschaftlichen Realismus, das Argument der pessimistischen Meta-Induktion und die Theorien-Unterbestimmtheit, abzuwehren. Ersteres geht von dem Befund aus, dass in den besten Theorien früherer Zeiten theoretische Terme auftraten, die nach heutigem Wissen nicht referieren (paradigmatische Beispiele sind Phlogiston oder Äther). Per Meta-Induktionsschluss über die Wissenschaftsgeschichte folgt die pessimistische Einsicht, dass wir keinen Anlass haben anzunehmen, heute in einer besseren Situation zu sein. Die These der Theorien-Unterbestimmtheit besagt, dass zu jeder wissenschaftlichen Theorie rivalisierende, empirisch äquivalente, aber ontologisch differente Theorien existieren. Nach Worrall kann der Strukturenrealist beiden Einwänden entgehen, denn im wissenschaftlichen Wandel zeigt der strukturelle Gehalt von Theorien eine sehr viel größere Beharrungstendenz als deren objektbezogener Gehalt. In gleicher Weise beziehen sich Unterbestimmtheits-Szenarios auf Objekte und nicht auf die typischerweise invariante Struktur (allerdings gibt es keinen prinzipiellen Grund, strukturelle Unterbestimmtheit generell auszuschließen; vgl. Lyre 2011).

Während Worralls Begründung des SR sich direkt an Argumenten im Rahmen der Debatte um den wissenschaftlichen Realismus orientiert, hat die jüngere SR-Diskussion einen anderen Weg eingeschlagen. Die unmittelbare metaphysische Analyse unserer reifsten physikalischen Theorien, so die Annahme vieler moderner SR-Vertreter, führt direkt auf eine strukturelle Ontologie. Strukturenrealistische Analysen decken mittlerweile die gesamte Breite der fundamentalen Physik ab: Quantentheorie (French und Ladyman 2003, Esfeld 2004), Quantenfeldtheorie (Cao 2003, Saunders 2003), Eichtheorien (Lyre 2004a,b, Kantorovich 2009), Allgemeine Relativitätstheorie (Bain 2008, Dorato 2000, Rickles 2007) oder Quantengravitation (Rickles et al. 2006).

2.3 Spielarten des Strukturenrealismus

James Ladyman (1998) hat in einem zentralen Aufsatz auf die Unterscheidung einer epistemischen von einer ontischen Variante von SR hingewiesen. ESR-Vertreter schließen objektartige Entitäten nicht aus, behaupten aber, dass unser epistemischer Zugang zur nichtbeobachtbaren Welt auf strukturelles Wissen beschränkt ist. Die intrinsische Natur oder Essenz der basalen Entitäten bleibt uns verborgen. OSR-Vertreter sehen demgegenüber Strukturen als ontologisch primitiv an. Fügt man, wie in der Debatte um den wissenschaftlichen Realismus üblich, eine semantische Position hinzu, so ergibt sich folgende Dreiteilung:

- Epistemischer SR: die Wissenschaft liefert uns (lediglich) wahre Erkenntnis von Strukturen,
- Semantischer SR: Theorien, Modelle und Terme referieren auf Strukturen,
- Ontischer SR: Strukturen existieren unabhängig von unseren epistemischen Limitationen.

Die Mehrheit der Autoren, die den „zweiten Weg“ einer direkten Ontologie der Wissenschaft wählen, vertreten eine ontische Variante von SR. Sie zerfällt in weitere Unterarten. Zunächst kann man zwischen einer eliminativen und einer nicht-eliminativen OSR-Variante unterscheiden:

- Nicht-eliminativer OSR: es gibt Relationen und Relata,
- Eliminativer OSR: es gibt nur Relationen und keine Relata.

Bei dieser Charakterisierung wird von der Voraussetzung ausgegangen, dass jede strukturelle Ontologie eine Individuation von objektartigen Entitäten durch monadische und intrinsische Eigenschaften ablehnen muss. OSR-Vertreter lehnen in diesem Sinne das starke Leibniz-Prinzip ab (vgl. 1.4). Speziell Steven French and James Ladyman (French and Ladyman 2003, French 2006, Ladyman and Ross 2007) haben zwischenzeitlich die radikale Auffassung vertreten, dass eine strukturelle Ontologie gänzlich auf Objekte verzichten soll. Dieser Eliminativismus, in dem provokanten Slogan „structure is all there is“ zusammengefasst, wurde von vielen Seiten heftig kritisiert. Die Mehrheit der SR-Proponenten neigt seither der Auffassung zu, dass die radikale Redeweise von „Relationen ohne Relata“ weder logisch noch ontologisch haltbar ist.

Aus Gründen, die im nächsten Abschnitt deutlich werden, wollen wir im Folgenden nicht nur von Relationen, sondern allgemeiner von strukturellen Eigenschaften sprechen. Die Position des nicht-eliminativen OSR besagt dann, dass es Objekte und strukturelle Eigenschaften gibt. Dabei bleibt noch offen, ob und in welchem Abhängigkeitsverhältnis Objekte und strukturelle

Eigenschaften stehen. Im Prinzip ergeben sich drei Möglichkeiten:

(a) Objekte und strukturelle Eigenschaften sind ontologisch äquivalent,

(b) Objekte sind ontologisch primär, strukturelle Eigenschaften sekundär,

(c) strukturelle Eigenschaften sind primär, Objekte sekundär.

Diese und weitere Optionen werden im Folgenden im Licht der in Teil 1 zusammengefassten Befunde über physikalische Symmetriestrukturen diskutiert.

2.4 Strukturell abgeleitete intrinsische Eigenschaften und Symmetrieinvarianten

Wir wollen nun zeigen, dass es für SR-Vertreter nicht ausreicht, lediglich Relationen als mehrstellige Eigenschaften zu betrachten, denn die Symmetriestrukturen der Physik beziehen neben relationalen Eigenschaften notwendig auch strukturell abgeleitete intrinsische Eigenschaften mit ein. Dies folgt unmittelbar aus den Überlegungen der Abschnitte 1.5 und 1.7 zu Symmetrie-Invarianten. Die elementaren Bausteine des Standardmodells lassen sich über ihre Eigenschaften Masse, Spin und Ladung(en) charakterisieren und klassifizieren. Als Invarianten kommen diese Eigenschaften allen Mitgliedern der Symmetriedomäne D zu. Sie sind intrinsische Eigenschaften in dem Sinne, dass sie jedem Element von D unabhängig von der Existenz anderer Objekte zukommen. Da sie aber jedem Element gleichermaßen zukommen, sind sie nicht hinreichend zur Individuation im Sinne des starken Leibniz-Prinzips. Strukturinvarianten führen lediglich auf Objektklassen, nicht auf Individuen.

Weiterhin kommen sie jedem Element von D nur vermöge der zugrundeliegenden Symmetriestruktur zu. In diesem Sinne können wir sie als „strukturell abgeleitete intrinsische Eigenschaften" bezeichnen. Da jede nicht-triviale Struktur auf Invarianten unter ihren Automorphismen führt, ist es unvermeidlich, dass jede Variante von SR diese invarianten Eigenschaften neben den Relationen akzeptieren muss. Fassen wir beide Eigenschaftsgruppen als strukturelle Eigenschaften zusammen, so erhalten wir eine verfeinerte Form eines nicht-eliminativen SR, der von der Existenz von Relata und strukturellen Eigenschaften ausgeht, und die als *erweiterter OSR* bezeichnet werden kann (vgl. Lyre, im Druck, in Lyre 2010 zunächst als *intermediärer SR* eingeführt).

Die Bedeutung strukturell abgeleiteter intrinsischer Eigenschaften zeigt sich insbesondere an den für die moderne Physik wichtigen Eichsymmetrien. Denn wie wir in 1.7 gesehen haben, handelt es sich dabei um nicht-empirische Symmetrien, bei denen nur die eichinvarianten und somit strukturell-intrinsischen Größen physikalische Relevanz haben. Eine SR-Position, die ausschließlich relationale Eigenschaften akzeptiert, könnte der Physik der Eichtheorien keine Rechnung tragen.

Dennoch stehen strukturell abgeleitete intrinsische Eigenschaften in einem speziellen ontologischen Abhängigkeitsverhältnis zu den zugrundeliegenden Strukturen. Zur Illustration kann das folgende Gedankenexperiment dienen: Wir betrachten eine mögliche Welt, in der nur ein einziges Elektron (in einer relationalen Raumzeit) existiert. Besitzt das Elektron eine elektrische Ladung? Nach traditioneller, nicht strukturen-, sondern objekt-realistischer Auffassung hat das Elektron seine Ladung intrinsisch, also auch als „einsames" Elektron. SR-Varianten, die exklusiv relationale Eigenschaften anerkennen, müssen einem einsamen Elektron seine Ladungseigenschaft jedoch absprechen. Der erweiterte OSR besagt demgegenüber, dass auch ein einsames Elektron die Ladung als invariante Eigenschaft der U(1)-Symmetrie besitzt.

Denn es ist unerheblich, wie viele Mitglieder einer Symmetriedomäne existieren, ein einzelnes Exemplar reicht aus, um die fragliche Struktur *in re* (und damit nicht-platonisch) zu instantiieren. Daher ist es für Strukturen*realisten* auch inakzeptabel, die Ladung einfach als relational zur Struktur anzusehen, denn dies würde die Möglichkeit eröffnen, dass dann auch nicht-exemplifizierte, platonische Strukturen *per se* existieren können.

2.5 Strukturelle Raumzeit

In der traditionellen Debatte um den ontologischen Status der Raumzeit stehen sich Substantialisten und Relationalisten gegenüber. Substantialisten sehen den Raum als eine Entität sui generis an, also kann auch ein leerer Raum existieren. Dem Relationalismus zufolge besitzt der Raum keinen eigenständigen Realcharakter, er ist einfach die Menge aller möglichen Lagebeziehungen von Körpern, ein leerer Raum kann nicht existieren. Earman und Norton (1987) haben eine Überlegung, die Einstein in seinem frühen Ringen um die Bedeutung der allgemeinen Kovarianz angestellt hatte (vgl. 1.9), und die er als „Loch-Betrachtung" bezeichnete, zu einem metaphysischen Argument gegen den Mannigfaltigkeits-Substantialismus der Raumzeit abgewandelt. Das Argument basiert auf der Leibniz-Äquivalenz diffeomorpher Modelle der ART. Der Mannigfaltigkeits-Substantialismus in seiner einfachsten Form sieht Raumzeit-Punkte als reale, aber eigenschaftslose, haecceitistische Entitäten an. Für diese Position ändert ein Diffeomorphismus etwas am Zustand der Welt. Earman und Norton wählen nun einen „Loch-Diffeomorphismus", der bis zu einem bestimmten Zeitpunkt die Identitätsabbildung ist, dann jedoch stetig davon abweicht. Unter der Anwendung des Loch-Diffeomorphismus spaltet die Welt in verschiedene Modelle auf, ohne dass diese Aufspaltung observable Konsequenzen hat. Nach Earman und Norton ist der Mannigfaltigkeits-Substantialist auf einen unplausiblen Ad hoc-Indeterminismus festgelegt, was seine Position metaphysisch unattraktiv macht.

John Stachel (2002, 2006) hat dem Loch-Argument eine strukturenrealistische Sichtweise abgewonnen. Denn die ART ist für ihn das Beispiel einer allgemein permutierbaren Theorie. Hierzu sei an die Strukturdefinition in 2.1 erinnert. Falls mit den auf der Objektmenge *a* deklarierten Relationen *R(a)* auch *PR(a)*, die Menge der permutierten Relationen, einen durch die Theorie erlaubten möglichen Zustand repräsentiert, besitzt die Theorie nach Stachel die Eigenschaft der Permutierbarkeit. Falls ferner *R(a)* und *PR(a)* den selben Realzustand beschreiben (also Leibniz-äquivalent sind), sind die Theorien allgemein permutierbar. Beispiele hierfür sind die Quantentheorie bezüglich Teilchenpermutationen und die ART bezüglich Diffeomorphismen (als kontinuierlichem Grenzfall von Raumzeitpunkt-Permutationen). Allgemein permutierbare Theorien legen ihre Entitäten rein strukturell fest – im Sinne von OSR.

Dorato (2000) hat dafür argumentiert, dass der Strukturenrealismus der Raumzeit eine dritte Option neben Substantialismus und Relationalismus darstellt. Zwar haben wir in 1.9 mit Anderson gesehen, dass die ART keine absoluten Objekte besitzt, aber dies bezieht sich hauptsächlich auf die auf der Raumzeit als diffeomorpher Mannigfaltigkeit deklarierten Tensorfelder. Der Strukturenrealismus der Raumzeit bezieht sich demgegenüber auf die metrischen Invarianten. Eine absolute, strukturinvariante Größen ist beispielsweise die pseudoeuklidische Signatur der Metrik. Wesentlicher aber ist, dass die Metrik die relevante physikalische Information über die Kausal- und Trägheitsstruktur der Raumzeit kodiert. Dieser Struktur zufolge sind diffeomorphe, haecceitistisch differente Modelle der ART Leibniz-äquivalent – und wie Bain (2008) hervorhebt, bildet die metrische Struktur auch die invariante, den physikalischen Gehalt verschiedener ART-Formalismen tragende Struktur (z.B. in Tensor-, Faserbündel- oder algebraischer Formulierung).

2.6 Strukturen und Individuen, Tropen und Arten

Wie in 1.4 gezeigt, führt die Permutationsinvarianz von Vielteilchen-Quantenzuständen zum Versagen des starken Leibniz-Prinzips der Identität des Ununterscheidbaren. Traditionell wurde daraus der Schluss gezogen, dass Quantenobjekte Nicht-Individuen sind. Dieser Schluss ist aber metaphysisch nicht zwingend. Man kann auch umgekehrt argumentieren, dass die Unmöglichkeit der empirischen Unterscheidbarkeit von Quantenobjekten es erfordert, deren Individualität auf eigenschaftslose, haecceitistische Träger zurückzuführen (auch bekannt als transzendentale Individualität, Lockesche Substanzen oder primitive Diesheiten). Mögliche Welten können qualitativ, hinsichtlich aller Eigenschaften, ununterscheidbar sein, aber dennoch metaphysisch different. Steven French (1989) hat auf dieser Basis nun argumentiert, dass wir uns in der ontologisch grundlegenden Frage der Individualität in der ominösen Situation einer „metaphysischen Unterbestimmtheit“ befinden: entweder verletzen Quantenobjekte das Leibniz-Prinzip und sind keine Individuen – oder sie erfüllen das Leibniz-Prinzip unter Bezug auf haecceitistische Träger. Wenn wir aber, so French, in einer derart elementaren ontologischen Frage unterbestimmt sind, dann sollten wir das Konzept objekt-artiger Entitäten insgesamt aufgeben und einer strukturellen Ontologie zuneigen. Es ist offensichtlich, dass ein eliminativer OSR aufgrund dieser Argumentation nahe liegt.

Wie in 1.4 aber weiter gezeigt wurde, lassen Quantenobjekte sich als schwach individuierbar ansehen. Die dem schwachen Leibniz-Prinzip zugrundeliegenden irreflexiven Relationen sind strukturelle Eigenschaften in dem Sinne, dass sie die nicht-kommutative Algebra-Struktur der Quantentheorie reflektieren. Allerdings haben einige Autoren die Annahme schwach individuierbarer Quantenobjekte abgelehnt mit dem Hinweis darauf, dass die Korrelations-Eigenschaften in einem verschränkten Zustand nicht Eigenschaften aktualer Teilobjekte, sondern lediglich Eigenschaften des Gesamtzustandes sind (Dieks und Versteegh 2008, Morganti 2009). Schwache Individualität gilt dann nur für klassische Beispiele wie Blacksche Kugeln oder Raumzeit-Punkte. Schwache Unterscheidbarkeit ist vielleicht nicht hinreichend für Individualität (Ladyman & Bigaj 2010), aber sie ist hinreichend für numerische Diversität. Dies steht damit in Einklang, dass in der QFT die Feldquantenzahl eine Observable ist. Quantenobjekte sind keine ordinalen, sondern kardinale Entitäten.

Die Frage ist, welche Konsequenz der Strukturenrealist aus diesem Befund ziehen soll – und diese Frage hängt auch mit den OSR-Optionen (a)-(c) in 2.3 zusammen (vgl. hierzu auch die Diskussion zwischen Ainsworth 2010 und Esfeld & Lam 2010). Eine Abschwächung der Objekt-Individualität geht in Richtung von Variante (c), derzufolge die Objekte derivativ sind bezüglich der ontologisch vorgängigen strukturellen Eigenschaften. Konzeptionell wäre dies die strukturenrealistisch konsequenteste Variante, die Schwierigkeit liegt aber darin, sie so auszugestalten, dass sie nicht in einen Eliminativismus der Objekte kollabiert.

Hier kann die Einbeziehung der Tropenontologie hilfreich sein. Tropen sind Eigenschaften als individuelle Konkreta oder Partikularia – also Eigenschaftsindividuen und keine Universalien. Indem wir alle strukturellen Eigenschaften (Relationen und strukturell abgeleitete intrinsische Eigenschaften) als Tropen ansehen, vermeiden wir jede Form von Haecceitismus. Objekte werden als Bündel von Tropen rekonstruiert. In diesem Sinne werden die Objekte gemäß (c) aus den strukturellen Eigenschaften abgeleitet. Im Gegensatz zum eliminativen OSR werden die Objekte aber nicht ganz über Bord geworfen, da Tropen – und damit auch Tropenbündel – partikulär sind. Dies lässt sich noch zusätzlich in der Weise modifizieren, dass nicht einzelne Objekte, sondern ganze Strukturen als globale Konkreta konzipiert werden (vgl. Lyre, im Druck).

Hierbei sind die in 2.4 begründeten strukturell abgeleiteten intrinsischen Eigenschaften von zusätzlicher Bedeutung. Sie kommen allen Objekten einer Dömane gleichermaßen zu – und bedingen sozusagen eine „strukturelle Art". Als Tropen garantieren sie die metaphysische Verschiedenheit der Objekte einer Domäne oder Art (Tropen sind per definitionem metaphysisch, aber nicht notwendig empirisch Leibniz-unterscheidbar). Die empirisch feststellbare numerische Verschiedenheit wird durch die schwache Individuierbarkeit im Sinne irreflexiver Relationen (die ebenfalls Tropen sind, was für diese Überlegung aber keine Rolle spielt) garantiert.

Ein struktureller Artbegriff, wie er hier vorgeschlagen wird, ist auch nominalistisch attraktiv. Denn im Gegensatz zum traditionellen Konzept der natürlichen Art geht er mit keinerlei Modalität einher: strukturell abgeleitete intrinsische Eigenschaften sind keine essentiellen Eigenschaften. Dennoch wird verständlich, warum beispielsweise alle Elektronen dieselbe Ladung tragen, denn sie sind *in re*-Instantiierungen der kontingenten nicht-trivialen Struktur der Welt. Die Struktur der Welt ist die Struktur der Welt *in toto*. Hierin drückt sich ein genuiner Holismus der hier vorgeschlagenen SR-Variante aus. Dass die Welt eine gewisse Struktur mit nicht-trivialen Automorphismen, die auf Symmetrieklassen führen, besitzt, ist ein kontingenter Zug der Welt. Elektronen besitzen also nur insofern dieselbe Ladung, als in dieser Welt eine bestimmte Symmetriestruktur realisiert ist, sie besitzen die Ladung aber nicht in einem stärkeren Sinne notwendig oder essentiell.

Schlussbemerkung

Die letzten Abschnitte zeigen deutlich den offenen und lebendigen Charakter der gegenwärtigen Debatte um den Strukturenrealismus. Es konnten bei weitem nicht alle Aspekte aufgeführt werden. In jüngerer Zeit kreisen zum Beispiel lebhafte Diskussionen um den kausalen Charakter von Strukturen. Hier stehen sich Vertreter modaler (Chakravartty 2008, Esfeld und Sachsse 2010) und humeanischer Positionen (Sparber 2009, Lyre 2010, im Druck) gegenüber. Insgesamt bemerkenswert ist die teilweise Annäherung von SR an entitätenrealistische Positionen. Dies ist aber nicht einfach ein nachteiliges Aufweichen der ursprünglichen Position, sondern zeigt viel eher den philosophischen Reifegrad und Fortschritt der Debatte, in der sich ontologisch antipodisch angelegte Positionen im Rahmen verfeinerter Analysen einander annähern – mit verbleibenden subtilen Unterschieden. Der Strukturenrealismus kann weiterhin als der wohl vielversprechendste Ontologiekandidat der modernen Physik angesehen werden.

Literatur

Ainsworth, Peter M. (2010). What is Ontic Structural Realism? Studies in History and Philosophy of Modern Physics 41, 50–57.

Anderson, J. L. (1967). Principles of Relativity Physics. New York: Academic Press.

Baez, J., & Munian, J. P. (1994). Gauge Fields, Knots and Gravity. Singapore: World Scientific.

Bain, Jonathan (2006). Spacetime Structuralism. In: D. Dieks (Hg.): The Ontology of Spacetime. Amsterdam: Elsevier, S. 37–66.

Max Black (1952): The Identity of Indiscernibles. Mind 61: 153-64.

Brading, Katherine & Brown, Harvey (2004). Are Gauge Symmetry Transformations Observable? The British Journal for the Philosophy of Science 55 (4): 645-665.

Brading, Katherine & Castellani, Elena, Hg. (2003). Symmetries in Physics: Philosophical Reflections, Cambridge: Cambridge University Press.

Brown, Harvey (1999). Aspects of Objectivity in Quantum Mechanics. In: J. Butterfield & C. Pagonis (Hg.): From Physics to Philosophy. Cambridge: Cambridge University Press, S. 45-70.

Cao, Tian Yu (2003). Structural Realism and the Interpretation of Quantum Field Theory. Synthese, 136: 3–24.

Chakravartty, Anjan (2007). A Metaphysics for Scientific Realism. Cambridge: Cambridge University Press.

Debs, Talal & Redhead, Michael (2007). Objectivity, Invariance, and Convention: Symmetry in Physical Science. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Dieks, Dennis and Versteegh, Marijn A. M. (2008): Identical Quantum Particles and Weak Discernibility. Foundations of Physics 38, 923–934.

Dorato, Mauro (2000). Substantivalism, Relationism and Structural Spacetime Realism. Foundations of Physics 30 (10): 1605–1628.

Earman, John & Norton, John D. (1987). What Price Spacetime Substantivalism. British Journal for the Philosophy of Science 38: 515-525.

Esfeld, Michael (2004). Quantum Entanglement and a Metaphysics of Relations. Studies in History and Philosophy of Modern Physics 35, 601–617.

Esfeld, Michael & Lam, Vincent (2010). Ontic Structural Realism as a Metaphysics of Objects. In: A. Bokulich & P. Bokulich (Hg.): Scientific Structuralism. Berlin: Springer.

Esfeld, Michael & Sachse, Christian (2010): Kausale Strukturen. Berlin: Suhrkamp.

French, Steven (1989). Identity and Individuality in Classical and Quantum Physics. Australasian Journal of Philosophy 67, 432-446.

French, Steven & Ladyman, James (2003): Remodelling Structural Realism: Quantum Physics and the Metaphysics of Structure. Synthese 136, 31–56.

Steven French & Decio Krause (2006). Identity in Physics: A Historical, Philosophical, and Formal Analysis. Oxford: Oxford University Press.

Steven French (2006). Structure as a Weapon of the Realist. Proceedings of the Aristotelian Society 106 (2): 167–185.

Healey, Richard (2001). On the Reality of Gauge Potentials. Philosophy of Science 68 (4): 432-455.

Healey, Richard (2007). Gauging What's Real. New York: Oxford University Press.

Kantorovich, Aharon (2009). Ontic Structuralism and the Symmetries of Particle Physics. Journal for General Philosophy of Science 40 (1): 73-84.

Ladyman, James (1998). What is Structural Realism? Studies in History and Philosophy of Modern Science 29, 409–424.

Ladyman, James & Ross, Don (2007): Every Thing Must Go. Metaphysics Naturalised. Oxford: Oxford University Press.

Ladyman, James & Bigaj, Tomasz (2010). The Principle of the Identity of Indiscernibles and Quantum Mechanics. Philosophy of Science 77, 117–136.

Lyre, Holger (2004a). Lokale Symmetrien und Wirklichkeit. Paderborn: Mentis.

Lyre, Holger (2004b). Holism and Structuralism in U(1) Gauge Theory. Studies in History and Philosophy of Modern Physics 35(4): 643-670.

Lyre, Holger (2005). Metaphysik im "Handumdrehen": Kant und Earman, Parität und Raumauffassung. Philosophia Naturalis 42(1): 49-76.

Lyre, Holger (2008). Does the Higgs Mechanism Exist? International Studies in the Philosophy of Science 22(2): 119–133.

Lyre, Holger (2010). Humean Perspectives on Structural Realism. In: F. Stadler (Hg.): The Present Situation in the Philosophy of Science. Dordrecht: Springer, S. 381-397.

Lyre, Holger (2011). Is Structural Underdetermination Possible? Synthese 180 (2): 235-247.

Lyre, Holger (im Druck). Structural Invariants, Structural Kinds, Structural Laws. In: D. Dieks et al. (Hg.): Probabilities, Laws, and Structures. Dordrecht: Springer.

Lyre, Holger & Eynck, Tim (2003): Curve It, Gauge It, or Leave It? Underdetermination in Gravitational

Theories. Journal for General Philosophy of Science 34 (2): 277-303.

Martin, Christopher (2002). Gauge Principles, Gauge Arguments and the Logic of Nature. Philosophy of Science 69 (3), Suppl.: S221-S234.

Mainzer, Klaus (1988). Symmetrien der Natur. Berlin: de Gruyter.

Morganti, Matteo (2009). Inherent Properties and Statistics with Individual Particles in Quantum Mechanics. Studies in History and Philosophy of Modern Physics 40(3): 223-231.

Muller, Fred & Seevinck, Michiel (2009): Discerning Elementary Particles. Philosophy of Science 76: 179–200.

Pitts, Brian (2006). Absolute Objects and Counterexamples: Jones-Geroch Dust, Torretti Constant Curvature, Tetrad-Spinor, and Scalar Density. Studies in History and Philosophy of Modern Physics 37, 347-371.

Quine, Willard v. (1976). Grades of Discriminability. Journal of Philosophy 73(5): 113-116.

Rickles, Dean, French, Steven & Saatsi, Juha (2006). The Structural Foundations of Quantum Gravity. Oxford University Press.

Rickles, Dean (2007). Symmetry, Structure, and Spacetime. Philosophy and Foundations of Physics, Volume 3. North Holland: Elsevier.

Saunders, Simon (2003). Critical notice: Cao's 'The Conceptual Development of 20th Century Field Theories'. Synthese, 136: 79–105.

Saunders, Simon (2006). Are Quantum Particles Objects? Analysis 66: 52-63.

Shapiro, Stewart (2000). Philosophy of Mathematics. Oxford: Oxford University Press.

Sparber, Georg (2009). Unorthodox Humeanism. Frankfurt a.M.: Ontos.

Stachel, John (2002). 'The Relations Between Things' versus 'The Things Between Relations': The Deeper Meaning of the Hole Argument. In: D. Malament (Hg.): Reading Natural Philosophy. Chicago and LaSalle, IL: Open Court, S. 231-266.

Stachel, John (2006). Structure, Individuality, and Quantum Gravity. In: D. Rickles et al., S. 53–82.

Van Fraassen, Bas (1989). Laws and Symmetry. Oxford: Clarendon Press.

Weyl, Hermann (1952). Symmetry. Princeton: Princton University Press.