

## **Lokale Symmetrien, Unterbestimmtheit und Strukturenrealismus**

Holger Lyre

### **1. Die zeitgenössische Debatte um den Strukturenrealismus**

In jüngster Zeit kommt der Variante des Strukturenrealismus innerhalb der Debatte um den wissenschaftlichen Realismus (wieder) besondere Aufmerksamkeit zu. Dieser Position zufolge ermöglichen unsere fortgeschrittensten wissenschaftlichen Theorien – vorsichtig ausgedrückt – lediglich die Erkenntnis strukturaler und nicht gegenständlicher Aspekte von Entitäten. Speziell in der Philosophie der Physik des 20. Jahrhunderts ist diese Position im Grundsatz nicht neu – wenngleich ihre spezifischen Ausprägungen durchaus stark variierten (man vgl. etwa die Auffassungen von H. Poincaré, A. Eddington, H. Weyl, E. Cassirer, B. Russell, M. Schlick oder C. F. von Weizsäcker). Das in jüngster Zeit neu erstarkte Interesse am Strukturenrealismus geht sehr wesentlich auf einen Aufsatz von John Worrall (1989) zurück, in dem dieser die These vertritt, der Strukturenrealismus könne sowohl den wichtigsten anti-realistischen Einwänden die Spitze nehmen, ohne die offensichtlichen Vorteile des wissenschaftlichen Realismus einzubüßen. Als Vorteil wird gemeinhin vor allem die Plausibilität des „no miracles“-Arguments angesehen, also die Feststellung, dass der Anwendungserfolg wissenschaftlicher Theorien ohne realistische Verpflichtungen gegenüber den theoretischen Entitäten unserer besten Theorien buchstäblich als Wunder angesehen werden müsste.

Zu den wichtigsten anti-realistischen Einwänden – und hierin zeigt sich die vornehmlich wissenschaftstheoretische Provenienz der Debatte – zählen die pessimistische Meta-induktion und die Theorienunterbestimmtheit: Wie insbesondere Larry Laudan (1981) hervorgehoben hat, traten in den besten Theorien früherer Zeiten immer wieder theoretische Terme auf, die nach heutigem wissenschaftlichen Kenntnisstand 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. Falls korrekt, würde dies Argument die realistische Position ebenso nachhaltig unterminieren wie die weit verbreitete These der Theorienunterbestimmtheit, also der Behauptung, zu jeder wissenschaftlichen Theorie T gäbe es immer eine Vielzahl – ggf. sogar unendlich viele – rivalisierende Theorien, die zu T zwar empirisch äquivalent, gleichwohl aber ontologisch different sind. Unter „ontologisch different“ ist dabei insbesondere zu verstehen, dass die Rivalentheorien durch keinerlei triviales Übersetzungsmanöver ineinander überführt werden können (und es sich also nicht einfach um isomorphe Modelle ein und derselben Theorie handelt). Dies müsste sich vordergründig darin äußern, dass in genuinen Unterbestimmtheits-Szenarien inkompatible theoretische Terme auftreten – und insofern differente Entitäten in die jeweilige Ontologie aufzunehmen sind.

Nach Worrall kann der Strukturenrealist beiden Einwänden entgehen, indem er sich nicht auf die Existenz objektartiger Entitäten verpflichtet, sondern rein auf den strukturellen Gehalt wissenschaftlicher Theorien. Speziell im Rahmen physikalischer Theorien ist es vor allem die mathematische Struktur, die im wissenschaftlichen Wandel eine sehr viel größere Kontinuität zeigt als die z. T. eklatanten ontologischen Brüche auf dem Niveau der theoretischen Terme und Entitäten. Der strukturenrealistische Anspruch besteht daher darin, sowohl Kuhnschen Inkommensurabilitäts-Bedenken als auch der pessimistischen Metainduktion entgehen zu können. Ferner tritt Unterbestimmtheit in den gewöhnlich diskutierten Fällen nicht bezüglich der mathematischen Struktur, sondern eben lediglich bezüglich objektartiger Entitäten auf. Umgekehrt verdankt es sich nach strukturenrealistischer Auffassung genau der Invarianz der Struktur möglicher Theorierivalen im Rahmen von Unterbestimmtheits-Szenarien, dass es sich um empirisch equivalent-adäquate Theorien handelt. So gesehen – und unter Auslassung aller nun notwendigen Einzelbetrachtungen (zur Haltbarkeit der verschiedenen anti-realistischen Einwände, zur Theorienauffassung generell (syntaktisch, semantisch etc.), zum Strukturbegriff usw.), für die an dieser Stelle bei weitem kein Platz bleibt – bietet der Strukturenrealismus in der Tat eine optimistische Option im Rahmen der heutigen Debatte um den wissenschaftlichen Realismus.

Nun hat James Ladyman (1998) argumentiert, man solle zwischen einer moderaten, nämlich rein epistemischen Variante des Strukturenrealismus – Theorien beschreiben die strukturalen Eigenschaften eines epistemisch ansonsten unzugänglichen Trägers, der gleichwohl nicht-strukturelle Eigenschaften besitzen kann – und einer radikalen, nämlich ontischen Variante – „Strukturen sind alles, was existiert“ – unterscheiden. Um dieser Unterscheidung Nahrung zu geben, betrachtete Ladyman insbesondere die Ontologie moderner physikalischer Theorien – und verschob so den Fokus der Argumente von einer bislang vornehmlich wissenschaftstheoretischen auf eine nunmehr naturphilosophische, speziell die Philosophie der Physik betreffende Debatte.

Ladymans Analyse verbindet sich mit dem Umstand, dass im Rahmen ontologischer Debatten zur modernen Physik in jüngster Zeit strukturenrealistisches Gedankengut wieder auf dem Vormarsch ist (vgl. Redhead 1995, Cao 1997, Saunders 2003). Dies zeigt sich besonders eindringlich in den beiden großen Themenfeldern Quantenontologie und Ontologie der Raumzeit. Im ersteren Fall spielt die Tatsache eine Rolle, dass in der Vielteilchen-Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie zur empirisch adäquaten Beschreibung von Zuständen mehrerer Objekte (derselben Sorte) von deren Ununterscheidbarkeit ausgegangen werden muss. Vielteilchen-Quantenzustände besitzen also – vereinfacht gesagt – eine Kardinalität, aber keine Ordinalität. Seit Anbeginn der Quantentheorie wurde daher immer wieder hervorgehoben, dass in der Quantentheorie das Leibniz-Prinzip der Identität des Ununterscheidbaren verletzt und mithin die Individualität von Quantenobjekten in Frage gestellt ist, wenn nicht gar aufgegeben werden muss (siehe French und Redhead 1988, vgl. auch Kuhlmann, Lyre und Wayne 2002). Da aber umgekehrt nach gängigen metaphysischen Überlegungen die Behauptung einer Entität wenigstens an eine primitive Form von Essenz gebunden ist, wird im Rahmen der jün-

geren Quantenontologie die Möglichkeit der Haecceität von Quantenobjekten erwogen. Da sich der haecceistische Charakter von Quantenobjekten jeglichem empirischem Zugriff entzieht, wurde wahlweise der Begriff der „primitive thisness“ vorgeschlagen (vgl. Teller 1995). In dieser Situation kommt Steven French (1998) zu dem Schluss, dass angesichts der Quantentheorie ein Fall von, wie er es nennt, *metaphysischer Unterbestimmtheit* vorliegt, also eine Unterbestimmtheit der Metaphysik der Physik selbst – und genau dies wertet French als ein gewichtiges Argument für den Strukturenrealismus (siehe auch French und Ladyman 2003, French und Rickles 2003).

Eine der Quantenontologie analoge Fragestellung ergibt sich auch in den Raumzeit-Theorien. Hier stehen sich spätestens seit der Newton-Leibniz-Debatte die Standpunkte des Relationalismus und des Substantialismus einander gegenüber. Der Raumzeit-Substantialist vertritt eine realistische Interpretation der Raumzeit als einer Entität per se – naheliegender Weise mit Raumzeitpunkten als ihren Konstituenten. Demgegenüber beharrt der Relationalist leibnizscher Prägung auf der These, der Raum bzw. die Raumzeit sei lediglich charakterisiert als Menge von Körperrelationen. Der Substantialist hält also die Existenz der Raumzeit unabhängig von in ihr enthaltenen materiellen Objekten für möglich, der Relationalist verneint dies.

In der jüngeren Debatte spielt das in seiner Ursprungsfassung auf Einstein zurückgehende und von Earman und Norton (1987) zu einer Kritik am Raumzeit-Substantialismus wiederbelebte „hole argument“ eine viel beachtete Rolle. Angewandt auf die Allgemeine Relativitätstheorie macht es von der Eichfreiheit der Theorie unter beliebigen Koordinatentransformationen (Diffeomorphismen) Gebrauch (vgl. auch Lyre 2002). In aktiver Sichtweise sind Diffeomorphismen als Verschiebungen der Punkte einer Mannigfaltigkeit ansehbar. Für einen Raumzeit-Substantialisten ändert sich bei einer derartigen Transformation – insofern er (naheliegender Weise) die Punkte der Raumzeit-Mannigfaltigkeit selbst als Entitäten interpretiert – der Realzustand der Welt, wenngleich dies durch keinerlei Experiment bemerkt werden kann. Nun lässt sich ein geeigneter „hole-Diffeomorphismus“ so wählen, dass unter seiner Anwendung zwei Modelle der Allgemeinen Relativitätstheorie ab einem bestimmten Zeitpunkt voneinander diffeomorph abweichen, während sie vorher diffeomorph identisch waren. Von einem substantialistischen Standpunkt muss dies als metaphysischer Indeterminismus der Theorie gewertet werden, da in ihr diffeomorphe Modelle als ununterscheidbar (und ad hoc auftretende diffeomorphe Abweichungen als unvorhersagbar) angesehen werden.

Die oben bereits sichtbare Analogie der Ununterscheidbarkeit von Quantenobjekten einerseits und Raumzeitpunkten andererseits und die daraus folgenden Konsequenzen für die metaphysische Interpretation von Quanten- und Raumzeittheorien hat kürzlich John Stachel (2002) in nochmals abstrakterer Weise hervorgehoben: Gegeben sei eine Menge von Objekten  $a = \{a_1, a_2, \dots\}$  und die auf ihnen deklarierten Relationen  $R(a)$ . Falls mit  $R(a)$  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. Sind ferner die Entitäten  $a$  lediglich relational, also durch ihre Rolle im Gefüge  $R(a)$  und mithin ausschließlich als Träger der Relationen  $R$

definiert, so beschreiben  $P(a)$  und  $PR(a)$  notwendig denselben Realzustand. Derartige Theorien nennt Stachel „allgemein permutierbar“. Die Quantentheorie bezüglich Teilchenpermutationen und die Allgemeine Relativitätstheorie bezüglich Diffeomorphismen (als kontinuierlichem Grenzfall von Raumzeitpunkt-Permutationen) sind Beispiele für allgemein permutierbare Theorien. In derartigen Theorien werden die Entitäten lediglich über ihre relationale Rolle und mithin strukturell festgelegt. Diese Strukturen sind insofern ontisch zu interpretieren. Da man ferner die Objekte als Träger der relationalen Struktur nicht unabhängig individuieren, andererseits aber auch gerade wegen ihrer Eigenschaft als Träger auf sie nicht verzichten kann, scheint die Variante des epistemischen Strukturenrealismus hier angemessen.

## 2. Strukturenrealismus in Theorien lokaler Symmetrien (Eichtheorien)

Sowohl aus der Quantentheorie als auch aus der Allgemeinen Relativitätstheorie lassen sich also den Strukturenrealismus stützende Argumente ableiten. Heutzutage werden unsere reifsten empirisch bestätigten physikalischen Fundamentaltheorien üblicher Weise als Feldtheorien formuliert. Hierbei spielt die Klasse derjenigen Theorien, die sich durch eine lokale Symmetrieforderung kennzeichnen lassen, eine ausgezeichnete Rolle – aus historischen Gründen werden sie als Eichtheorien bezeichnet (vgl. Lyre 2002). Sowohl die Quantenfeldtheorien des Standardmodells als auch die Allgemeine Relativitätstheorie lassen sich eichtheoretisch erfassen. Das Konzept der Eichtheorien bildet daher heute die vielversprechendste konzeptionelle Klammer zwischen den ansonsten getrennten Welten der Quantenfeldtheorien und der Allgemeinen Relativitätstheorie als klassischer Gravitationstheorie. Dieser Umstand führt zwangsläufig zu der Frage, inwieweit – und ob überhaupt – der Strukturenrealismus durch das Konzept der Eichtheorien gestützt werden kann. Dieser Fragestellung soll im Folgenden – vornehmlich anhand des einfachsten Typs einer Quanten-Eichtheorie mit lokaler  $U(1)$ -Symmetrie (vgl. Lyre 2001) – nachgegangen werden. Wie sich zeigt, lassen sich drei zentrale Argumente anführen, die in der Tat zu einer Stützung des Strukturenrealismus führen. Ihnen sei in der Folge je ein Abschnitt gewidmet. Abschließend erfolgt dann eine ausblickhafte Diskussion (eine ausführliche Bearbeitung der in Abschnitt 2 und 3 behandelten Fragen findet sich in Lyre 2003).

### 2.1 Die gruppentheoretische Konstitution von Objekten

Die heutige Teilchenphysik verwendet das abstrakte Konzept von Teilchen als Darstellungen von Symmetriegruppen. Hier manifestiert sich die fundamentale Rolle der Gruppentheorie in der modernen Physik. Symmetrien lassen sich in ihrer konzeptionellen Rolle in der Physik als *Realitätsfilter* ansehen. Ihre Aufgabe besteht darin, diejenigen Realeigenschaften einer Menge von Objekten auszuzeichnen, die unter einer bestimmten Klasse von Transformationen invariant bleiben. Von zentraler Bedeutung sind hierbei die Eigenschaften, die mit den raum-zeitlichen Symmetrien in Zusammenhang

stehen. So drückt sich etwa die Erhaltung des Viererimpulses im Minkowskiraum in der Invarianz der Masse aus (technisch gesprochen ist  $m^2$  Casimiroperator der Poincarégruppe). Die Symmetrien des Minkowskiraumes – die Poincarétransformationen – lassen also die Teilchenmassen ungeändert, und heben die Masse somit als eine physikalische Eigenschaft hervor, die zur Klassifizierung physikalischer Objekte geeignet ist. Ebenso verhält es sich mit dem Spin als zweitem Casimiroperator der Poincarégruppe. Zur weiteren Klassifizierung von Elementarteilchen dienen dann die Invarianten der inneren Symmetrien, eben die Eichsymmetrien. Sie führen auf die verschiedenen fundamentalen Ladungen (elektromagnetische Ladungen, schwacher Isospin, Farbladung).

Der wesentliche Punkt ist, dass eine Charakterisierung von Teilchen als Darstellungen von Symmetrien der Sache nach immer Bezug nimmt auf *Objektklassen*, nicht auf individuelle Objekte. Die als Symmetrieminvarianten hervorgehobenen permanenten Eigenschaften physikalischer Objekte werden als diejenigen Eigenschaften angesehen, über die sich der physikalische Objektbegriff überhaupt erst konstituieren lässt. Die moderne Konzeption physikalischer Objekte startet also nicht – gleichsam bottom-up – mit individuellen Objekten, sondern konstituiert Objekte gruppentheoretisch in Form von Objektklassen – also top-down. Diese Strategie, die innig mit dem Konzept der Eichsymmetrien verbunden ist, führt in der modernen Physik zu einer nachhaltigen Unterminierung des traditionellen Begriffs von Objekten als Individuen. In diesem Sinne ist die Eichsymmetriestruktur als das primär und real Gegebene anzusehen, objektartige Entitäten allenfalls als sekundär und strukturell abgeleitet (siehe auch Castellani 1998a, Mittelstaedt 1994, 1998).

## 2.2 Historischer Wandel in den Eichtheorien

Wie erwähnt beansprucht der Strukturenrealismus, dem Argument der pessimistischen Metainduktion zu entgehen. Es ist daher von Interesse, den historischen Ursprung der Eichtheorien zu betrachten und die für die Charakterisierung einer Eichtheorie so zentrale lokale Symmetrie im Theorienübergang einer Proto-Eichtheorie zu einer vollständigen Eichtheorie zu verfolgen. Historisch schlägt sich dies im Übergang von der klassischen Elektrodynamik zur elektromagnetischen Kopplung in der Quantenmechanik und letztlich der Quantenelektrodynamik nieder.

Der mathematische Hintergrund kann hier nur angedeutet werden: Die klassische Elektrodynamik besitzt bereits eine Eichfreiheit der Potentiale unter dem Gradienten beliebiger reeller skalarer Funktionen, also unter der Gruppe der reellen Zahlen. Es ist aber sinnvoll, die Elektrodynamik als Theorie des Eichfeldes noch nicht als vollständige Eichtheorie anzusehen, sondern erst die über die minimale Kopplung (mit lokaler Symmetrie) erfolgte Kombination einer Materiefeld- und einer Wechselwirkungs-Eichfeldtheorie (Lyre 2001, 2002). Oder anders ausgedrückt: die Elektrodynamik berücksichtigt lediglich lokale Eichtransformationen zweiter Art (der Eichpotentiale), nicht aber erster Art (der Materiefelder). Mathematisch lässt die klassische Elektrodynamik die genaue Identifizierung der Eichgruppe daher offen. Vom Standpunkt der voll entwickelten

Eichtheorie, etwa der Quantenelektrodynamik, nehmen die Eichpotentiale Werte in der Lie-Algebra der Eichgruppe an. Diese Lie-Algebra ist, wie wir gesehen haben, isomorph zu den reellen Zahlen  $\mathbf{R}$ . Sie lässt aber die ihr korrespondierende Lie-Gruppe unterbestimmt: sowohl  $\mathbf{R}$  selbst als auch die eindimensionale unitäre Gruppe  $U(1)$  kommen in Frage. Erst durch den Übergang in die volle Eichtheorie (d.h. im Rahmen der quantentheoretischen Behandlung) fällt diese Ambivalenz zugunsten der  $U(1)$  aus.

Man sieht hier also, wie eine schon vorhandene Symmetriestruktur genutzt und eingebettet wird in einen größeren theoretischen Zusammenhang. Der entscheidende Punkt dabei ist, dass der Wandel auf dem strukturellen Niveau, nämlich bezüglich des Symmetriegehalts, sehr viel geringer ausfällt als auf dem Niveau der Objekte der Theorie. Dies stellt geradezu ein Musterbeispiel dar für eine strukturenrealistische Rekonstruktion wissenschaftlichen Fortschritts in der Physik.

### 2.3 Unterbestimmtheit in Eichtheorien

Zu welcher Ontologie verpflichten uns die Eichtheorien? Welches sind die zentralen theoretischen Terme dieser Theoriensorte? In diesem Abschnitt soll gezeigt werden, dass sich diese Fragen keinesfalls eindeutig beantworten lassen. Besonders deutlich wird dies anhand der Analyse eines typisch eichtheoretischen Effektes: dem Aharonov-Bohm-Effekt (AB-Effekt).

Man betrachte die Beugung von Elektronen am Doppelspalt. Quantenmechanisch führt dies bekanntermaßen auf ein Interferenzmuster. Das AB-Experiment kann als eine Abwandlung dieses Experiment angesehen werden. Hier setzt man zusätzlich hinter den Mittelsteg des Doppelspalts (senkrecht zur Zeichenebene) eine abgeschirmte, hinreichend lange Spule. Durch Anlegen eines Spulenstroms wird im Inneren der Spule ein Magnetfeld erzeugt. Es lässt sich plausibel machen, von der Idealisierung einer unendlich langen und ideal abgeschirmten Spule auszugehen. Insofern existiert keinerlei lokale Kontaktwechselwirkung zwischen der Elektronenwellenfunktion und dem Magnetfeld. Der AB-Effekt besteht nun darin, dass man bei Variation des Spulenstroms eine Verschiebung des Interferenzmusters am Schirm beobachtet. Allgemeiner ausgedrückt: Führt man ein Elektron entlang eines geschlossenen Weges um ein abgeschirmtes Magnetfeld, so kann man bei Änderung des Magnetfeldes eine Phasenverschiebung der Elektronen-Wellenfunktion beobachten.

Wie läßt sich dieser erstaunliche und, wie es scheint, in einer gewissen Weise nicht-lokale Effekt erklären? Macht man zunächst die in den Feldtheorien übliche Annahme, dass Feldstärken die mit allen Beobachtungsgrößen verknüpften Entitäten darstellen, so stellt sich der AB-Effekt als nicht-lokale Fernwirkung zwischen dem eingeschlossenen magnetischen Feld  $\underline{\mathbf{B}}$  und dem umlaufenden Elektronenfeld dar. Wir wollen diese Sichtweise als „B-Interpretation“ bezeichnen. In ihr werden lediglich die Feldstärken realistisch interpretiert.

Mathematisch lassen sich die Eichfeldstärken als Ableitung der Eichpotentiale auffassen. Wie bereits bemerkt, gestattet die Elektrodynamik eine Eichfreiheit der Potentiale

in Form eines zusätzlichen Gradientenfeldes. Im Übergang zu den Feldstärken verschwindet diese Freiheit: Feldstärken sind daher eichinvariant, Potentiale hingegen eichabhängig. Im AB-Effekt zeigt sich, dass der Außenraum der Spule zwar feldstärkefrei ist, dass aber das magnetische Potential von Null verschiedene Werte besitzen kann. Unter Physikern wird daher sehr weitergehend die Auffassung vertreten, das Eichpotential  $A$  als Realobjekt der Theorie anzusehen. Wir wollen dies als „A-Interpretation“ bezeichnen. Im Gegensatz zur B-Interpretation gestattet die A-Interpretation eine Erklärung des AB-Effekts in Form einer lokalen Kontaktwechselwirkung zwischen Elektronenwellenfunktion und Eichpotential. Und auch eine weitere Lokalisationsannahme, die in Feldtheorien üblicherweise zugrundegelegt wird, wird auf diese Weise erfüllt: das Nahwirkungsprinzip. Hierunter versteht man die wichtige Forderung, dass sämtliche Wirkung eines Ereignisses nur mittels kontinuierlicher physikalischer Prozesse propagieren. Eine Verletzung des Nahwirkungsprinzips, wie im Falle der B-Interpretation, kommt einer zeitlich instantanen Fernwechselwirkung gleich. Im Gegensatz zur B-Interpretation erfüllt also die A-Interpretation zwei wesentliche Lokalisationsforderungen der Physik.

Da es sich im Falle der Eichpotentiale jedoch um eichabhängige Größen handelt, erkaufte man sich die Erfüllung der feldtheoretischen Prinzipien der Nahwirkung und punktuellen Wechselwirkung mit einem hohen Preis: durch Einführung einer, von der Eich-Konventionen abhängigen und mithin nicht direkt observablen, gleichwohl aber realistisch interpretierten Entität. Es sind genau diese hohen ontologischen Kosten, die die B-Interpretationen nicht zu tragen bereit ist. Interessanterweise ergibt sich aber noch eine dritte Option.

Die mathematische Analyse des AB-Effekts zeigt, dass die Phasenverschiebung nicht vom Wert des Potentials an jedem Raumzeitpunkt abhängt, sondern nur vom geschlossenen Wegintegral um die Spule. Ein solches Kreisintegral wird auch als Holonomie bezeichnet. Da es sich um ein Integral entlang einer „closed curve“ handelt, können wir dem Alphabet folgend eine „C-Interpretation“ einführen, die sich auf Holonomien als Entitäten stützt. Unter Lokalisationsgesichtspunkten zeigt sie eine Besonderheit, die als Nicht-Separabilität ausgedrückt werden kann. Folgende Definition sei dabei zugrunde gelegt: *Ein physikalisches System  $S$  ist separabel, falls es möglich ist,  $S$  aufgrund einer raumzeitlichen Partitionierung in Teilsysteme zu zerlegen und die Eigenschaften von  $S$  aus denjenigen der Teilsysteme zu gewinnen.* Die Eigenschaften eines separablen Systems supervenieren also auf den Eigenschaften der Teilsysteme. Umgekehrt ist die Supervenienzbeziehung verletzt, falls die Eigenschaften des Gesamtsystems nicht auf die intrinsischen Eigenschaften seiner Teilsysteme zurückgeführt werden können. Ein derartiges System ist nicht separabel.

Der paradigmatische Fall einer Verletzung von Separabilität in der Physik liegt in der quantenmechanischen Zustandsverschränkung vor: der Zustand eines zusammengesetzten Quantensystems kann im Allgemeinen nicht faktorisiert, also nicht als Produkt der Teilsystemzustände geschrieben werden, sondern lediglich als lineare Superposition. Im Allgemeinen supervenieren daher die Eigenschaften eines Quantensystems nicht auf denjenigen seiner Teilsysteme. Eine ähnliche Verletzung der Separabilitätsbedingung,

wenngleich gänzlich verschiedenen physikalischen Ursprungs, zeigen die in der C-Interpretation favorisierten Holonomien. Denn der Wert des Kreisintegrals lässt sich nicht stückweise aus den Werten des Potentials im Rahmen einer Raumzeit-Partitionierung gewinnen. Der Grund dafür ist, dass das Potential eine lokale Eichfreiheit besitzt, und daher in jedem Raumzeitgebiet beliebig umgeeicht werden kann. Sowohl die C- als auch die A-Interpretation sind somit nicht-separabel im obigen Sinne.

Der Vorteil der C-Interpretation ist, dass Holonomien im Gegensatz zu Eichpotentialen eichinvariante Größen sind – und mithin geeignete Kandidaten physikalischer Observablen. Ebenso erfüllt die C-Interpretation die Nahewirkungs-Forderung, verletzt aber das Konzept einer lokalen Kontaktwechselwirkung. Unsere ontologische Analyse führt also auf drei rivalisierende Interpretationen, deren ontologische Kosten sich wie folgt bilanzieren lassen (vgl. Eynck, Lyre, Rummell 2001):

	A-Interpretation	B-Interpretation	C-Interpretation
Nahewirkung	ja	nein	ja
Separabilität	nein	ja	nein
Kontaktwechselwirkung	ja	nein	nein
Observabilität	nein	ja	ja

In diesem Sinne fördert die Frage nach der Ontologie der Eichtheorien ein vordergründig instruktives Beispiel von Theorienunterbestimmtheit zutage: ontologische Differenz bezüglich der zentralen theoretischen Terme trotz empirischer Äquivalenz. Da sich diese ontologische Unterbestimmtheit jedoch lediglich auf die Gegenstände der Eichtheorien, nicht aber die strukturellen Aspekte bezieht – denn die Eichgruppenstruktur ist in allen drei Fällen dieselbe –, stellt dies Szenario allenfalls eine Bedrohung eines Entitätenrealismus, nicht aber eines Strukturenrealismus dar.

### 3. Strukturenrealismus in der Physik: Diskussion und Ausblick

Der Analyse des vorangehenden Abschnitts zufolge findet der Strukturenrealismus durchaus stützende Argumente im Bereich der Eichtheorien. Dies ist umso bemerkenswerter, als noch einmal betont sei, dass es sich hier nicht um die Analyse eines randständigen und für die Argumentation nur geeignet ausgewählten Bereichs der Physik handelt, sondern dass Eichtheorien zum fundamentalen Paradigma der modernen Physik zu zählen sind.

Wie nun schon im ersten Abschnitt angedeutet, wird der Strukturenrealismus in der wissenschaftstheoretischen Debatte hauptsächlich als Antwort auf die zentralen anti-realistischen Einwände der pessimistischen Meta-Induktion und der Theorienunterbestimmtheit angesehen. Sollten sich diese Einwände jedoch als nicht stichhaltig erweisen, so bestünde vordergründig keine Veranlassung, am Strukturenrealismus festzuhalten. Daher sind direkte Argumente, also solche, die sich unmittelbar aus der Struktur und Ontologie einer Fachwissenschaft ergeben, wertvoller als die nur indirekten Abwendun-



gen vermeintlich anti-realistischer Einwände. Derart direkte Argumente lassen sich, wie am Ende des ersten Abschnitts ausgeführt, aus Quanten- und Relativitätstheorie gewinnen, insofern sie etwa bezüglich ihrer zugrundeliegenden Ontologie als „allgemein permutierbare Theorien“ ansehbar sind.

Unter den im zweiten Abschnitt diskutierten Argumenten lässt sich nur die in 2.1 ausgeführte gruppentheoretische Konstitution physikalischer Objekte als direktes strukturenrealistisches Argument lesen. 2.2 ist als Reaktion auf den Einwand der pessimistischen Meta-Induktion, 2.3 auf denjenigen der Theorienunterbestimmtheit zu verstehen. Es ist hier nur möglich, den letztgenannten Punkt ansatzweise zu diskutieren.

In der Tat stellt die These der Theorienunterbestimmtheit ja bei weitem keine unkontroverse These innerhalb der Wissenschaftstheorie dar. Ein vielleicht nicht unwichtiger Aspekt hierbei ist die frappierende Tatsache des Fehlens überzeugender, aus den gegenwärtigen Frontwissenschaften stammender praktischer Anwendungsbeispiele. Bieten die Eichtheorien im Sinne von 2.3 ein derartiges Beispiel? Eine bekannte Schwierigkeit bei der Beurteilung dieses und vergleichbarer Beispiele ist die Rolle und Gewichtung, die den für die Praxis der Wissenschaften so bedeutsamen, häufig gar nicht explizit genannten Metakriterien bei der Theorienwahl zukommt. Zu derartigen Metakriterien gehören zweifelsohne die Forderungen nach Konsistenz und Kohärenz, Einfachheit und Denkökonomie, ontologischer Sparsamkeit und Einheit. Im konkreten Falle der eichtheoretischen Unterbestimmtheit würden wohl nur die wenigsten Physiker die B-Interpretation favorisieren, da eine Aufgabe des Nahwirkungsprinzips sich mit den Ergebnissen aus beinahe allen anderen Bereichen der Physik kaum in Einklang bringen lässt. Intertheoretische Konsistenz und Kohärenz sprechen also gegen die B-Interpretation. Wegen der umgekehrt kaum tragbaren Annahme eichabhängiger „Realgrößen“ ist auch die A-Interpretation nicht sehr attraktiv. Es scheint daher ziemlich gewiss, dass eine Mehrheit sich letztlich für die C-Interpretation aussprechen wird – und dies zudem, da in der jüngeren Entwicklung im Bereich der Quantengravitation, also in einem Bereich der bislang rein theoretischen Forschungsfront, Holonomien in einigen Zugängen eine wesentliche Rolle spielen. Die Mehrzahl der Metakriterien spricht also für die C-Interpretation. Dies lässt das in 2.3 skizzierte Unterbestimmtheitszenario als prinzipiell fragwürdig erscheinen.

Was folgt hieraus für den Strukturenrealismus? An die Stelle des indirekten Arguments von 2.3 tritt eine tief liegende Form von Nicht-Lokalität, genauer Nicht-Separabilität, die mit der C-Interpretation einhergeht (vgl. Healey 1997, 2001). Nun ist es aber die natürliche und nicht leicht aufzugebende Annahme einer Gegenstandsontologie, von Objekten als an Raumzeit-Stellen individuierbaren Entitäten auszugehen – im Sinne einer Einheit des Gegenstandes an einer Raumzeit-Stelle oder innerhalb einer umgrenzten Raumzeit-Region. Nicht-separable Holonomien als fundamentales Mobiliar der physikalischen Ontologie bedeuten also durchaus eine Unterminierung der traditionellen Gegenstandsontologie. Es muss hier allerdings offen bleiben, ob dies bereits als direktes Argument für einen Strukturenrealismus gewertet werden kann, oder nicht einfach für eine raffiniertere Variante von Gegenstandsontologie.

Mit Blick auf die Unterscheidung der epistemischen und ontischen Variante des Strukturrealismus erlaubt die Analyse der Eichtheorien, soweit hier angedeutet, allenfalls die moderatere epistemische Form zu stützen. Dies zeigt sich deutlich anhand der in 2.1 ausgeführten Objektkonstitution, da hier zwar nur die permanenten Eigenschaften von Objektklassen empirisch zugänglich sind, aber dennoch die Existenz von Einzelobjekten hierdurch nicht überflüssig gemacht werden kann. Ähnliches gilt, mit Abstrichen, auch für die Domäne allgemein permutierbarer Theorien.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die radikale ontische Variante des Strukturrealismus sich ohnehin einem gewichtigen Einwand ausgesetzt sieht, denn die These, dass relationale Strukturen ohne jeglichen Träger existieren, dass es also „Relationen ohne Relata“ geben kann, besitzt vordergründig wenig Plausibilität (vgl. auch van Fraassen 2003, Psillos 1995). Zukünftige Untersuchungen, insbesondere im Schnittstellenbereich allgemein permutierbarer Theorien und Eichtheorien, müssen zeigen, inwieweit das traditionelle Konzept individueller Objekte in der modernen Physik überhaupt noch haltbar ist. Parallel dazu wird es auch erforderlich sein, den Strukturbegriff sehr viel weitgehender zu präzisieren, als dies im Rahmen dieser kurzen Besprechung auch nur angedeutet werden konnte.

## Literatur

- Cao, T. Y. (1997). *Conceptual Developments of 20th Century Field Theories*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Castellani, E. (1998a). Galilean Particles: An Example of Constitution of Objects. In Castellani (1998b).
- , editor (1998b). *Interpreting Bodies: Classical and Quantum Objects in Modern Physics*. Princeton University Press, Princeton.
- Earman, J. und J. Norton (1987). What Price Spacetime Substantivalism? The Hole Story. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 83: 515–525.
- T. O. Eynck, H. Lyre und N. v. Rummell (2001). A versus B! Gauge Potentials, Reality and the Aharonov-Bohm effect. (E-print PITT-PHIL-SCI00000404)
- Fraassen, B. C. van (2003): *Structure: Its Shadow and Substance*. In P. Ehrlich und R. Jones, (Hg.), *Reverberations of the Shaky Game: Essays in Honor of Arthur Fine*. University of Chicago Press, Chicago.
- French, S. und M. Redhead (1988). Quantum Physics and the Identity of Indiscernibles. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 39: 233–246.
- French, S. (1998). On the Withering Away of Physical Objects. In Castellani (1998b).
- French, S. and Ladyman, J. (2003). Remodelling Structural Realism: Quantum Physics and the Metaphysics of Structure. *Synthese*, 136(1): 31–56.
- French, S. and Rickles, D. (2003). Understanding Permutation Symmetry. In Brading, K. and Castellani, E., (Hg.). *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*. Cambridge University Press, Cambridge.

- Healey, R. (1997). Nonlocality and the Aharonov-Bohm Effect. *Philosophy of Science*, 64: 18–41.
- (2001). On the Reality of Gauge Potentials. *Philosophy of Science*, 68(4): 432–455.
- Kuhlmann, M., H. Lyre und A. Wayne, Hrsg. (2002). *Ontological Aspects of Quantum Field Theory*, World Scientific, Singapore.
- Laudan, L. (1981). A Confutation of Convergent Realism. *Philosophy of Science*, 48: 19–49.
- Lyre, H. (2001). The Principles of Gauging. *Philosophy of Science*, 68 (3): 371–381.
- (2002). Zur Wissenschaftstheorie moderner Eichfeldtheorien. In A. Beckermann und C. Nimtz, (Hg.), *Argument & Analyse – Sektionsvorträge*. mentis, Paderborn.
- (2003). *Lokale Symmetrien und Wirklichkeit*. Habilitationsschrift, Philosophische Fakultät, Universität Bonn.
- Mittelstaedt, P. (1994). Constitution of Objects in Classical Mechanics and in Quantum Mechanics. *International Journal of Theoretical Physics*, 34(8): 1615–1626.
- (1998). The Constitution of Objects in Kant’s Philosophy and in Modern Physics. In Castellani (1998b).
- Psillos, S. (1999). *Scientific Realism: How Science Tracks Truth*. Routledge, London.
- Redhead, M. (1995). *From Physics to Metaphysics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- (2001). The Intelligibility of the Universe. In A. O’Hear (Hg.), *Philosophy at the New Millennium*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Saunders, S. (2003). Critical Notice: Tian Yu Cao’s ‘The Conceptual Development of 20th Century Field Theories’ und Structural Realism, Again. *Synthese*, 136(1): 79–105.
- Stachel, J. (2002). “The Relations between Things” versus “The Things between Relations”: The Deeper Meaning of the Hole Argument. In: Malament, D. B. (Hg.). *Reading Natural Philosophy: Essays in the History and Philosophy of Science and Mathematics*. Open Court, La Salle, Illinois.
- Teller, P. (1995). *An Interpretive Introduction to Quantum Field Theory*. Princeton University Press, Princeton.
- Worrall, J. (1989): Structural Realism: The Best of Both Worlds? *Dialectica*, 43: 99–124.