

1.

Sohn-Rethel hat darauf insistiert, dass der Konflikt zwischen der Benutzung der Dialektik in den Gesellschaftswissenschaften auf der einen Seite und der Benutzung einer Exklusionslogik in den Naturwissenschaften auf der anderen Seite einer Lösung zugeführt werden muss, andernfalls jede politische Utopie notwendig in technokratische Herrschaft münden müsse. Ich möchte eine mögliche Lösung dieses Konflikts aufzeigen. Sie entsteht aus einer Analyse der Selbstbewegung der Physik.

Sehr grob kann man sagen: seit ihrer Entstehung marschieren Kapitalismus und Physik Hand in Hand wie Geschwister. Der Kapitalismus hat die Entwicklung der Physik befördert und die Physik hat die Entwicklung des Kapitalismus befördert.

Diese Geschwisterschaft hat ihre Wurzel in der Exklusionslogik, die durch das Postulat des privaten Eigentums, Mein und nicht Dein, geprägt ist. Es setzt die Tauschabstraktion in Gang, die nach Sohn-Rethel zur Grundlage der Herausbildung der Kategorien und der Anschauungsformen des europäischen rationalen Denkens geworden ist. Diese bilden den Denkraum der traditionellen Physik.

Beide, Kapitalismus wie Physik, blenden: der Kapitalismus mit der Freisetzung einer explosiven Produktivität in Waren, die keinen Adressaten mehr finden; die Physik mit der scheinbar intimen Nähe zu einer Natur, deren Gesetzmäßigkeit ihre Vorhersagekraft in schwindelnde Höhen geführt hat, wenn sie etwa die Bewegungsgesetze des Universums abzuleiten gelernt hat und sogar die Existenz spezifischer Elementarteilchen in diesem riesigen, leeren Universum vorherzusagen vermag, noch bevor sie experimentell aufgefunden sind.

Sohn-Rethels Thesen sind von großer Aktualität, weil sie ermöglichen, den Nimbus zu entschleiern, den sich die Physik erworben hat - aufgrund ihrer Kenntnis der Naturgesetze und der darauf fußenden Potenz zur Vorhersage.

Ich werde aufweisen, dass der Ansatz Sohn-Rethels den Schlüssel liefert, die moderne Physik zu verstehen, indem er dieser einen Schlüssel liefert, sich selber zu verstehen.

2.

Seit 1900 hat die Physik diese Geschwisterschaft mit der Tauschökonomie aufgekündigt. Es passiert allerdings hinter dem Rücken der Physiker. Ein wesentliches Charakteristikum der klassischen Physik ist ihr Beruhen auf Scheidungen. Die Zeit ist geschieden vom Raum, der Raum hat nichts mit der Zeit zu tun; desgleichen ist die Materie geschieden von Zeit und Raum, in denen sie sich autonom bewegt. Wellen und Teilchen scheinen sich auszuschließen, klassische Teilchen sind lokalisierbar, Wellen dagegen grundsätzlich nicht lokalisierbar. D.h. die klassische Physik besitzt eine dem Exklusionspostulat verpflichtete logische Struktur, Ja-oder-Nein, Tertium non datur; eine Struktur, die Sohn-Rethel auf die genetische Grundlage der Tauschabstraktion, das private Eigentum, zurückführt, das Mein-und-nicht-dein, ohne das Tauschen nicht möglich ist.

Wie eine Schlange, die sich häutet, hat die moderne Physik die durch die Tauschabstraktion bedingte Haut der klassischen Physik abgestoßen. Sie hat sich nahezu aller Scheidungen entledigt:

- die Scheidung der Zeit vom Raum – von Newton zur Grundlage der klassischen Physik befördert – wird in der speziellen Relativitätstheorie aufgehoben. Die bis dato strikt geschiedenen Anschauungsformen Raum und Zeit werden zur Raumzeit verschmolzen.
- die Scheidung der Materie von der Raumzeit – verewigt im Bild einer Materie, die sich in Raum und Zeit bewegt – wird in der allgemeinen Relativitätstheorie¹ (ART) aufgehoben. Nun bedingt die Materie die Metrik, d.h. die Massen bestimmen die Krümmung der Raumzeit, und die Krümmung der Raumzeit dirigiert den Fluss der Materie.
- in der Quantenmechanik bedingen sich Welle und Teilchen wechselseitig, eines ist gewissermaßen die Rückseite des Andern.

Das alles sind Entwicklungsschritte der Physik, weg von einer Logik, der ein Axiom der Exklusion zugrunde liegt, hin zu einer Dialektik, deren Umrisse bereits deutlich zu erkennen sind.

3.

In den theoretischen Formulierungen der ART, der Elementarteilchentheorie sowie der Quantentheorie läßt sich ablesen, dass das Prinzip einer kausalen Determiniertheit durch ein Prinzip des sich wechselseitig Bedingens abgelöst wird.

Zwei Beispiele: In der ART hat sich herausgeschält, dass kein sog. absolutes Objekt existieren darf, d.h. keine Struktur, die „zwar bewirkt, aber nicht selbst bewirkt wird“. Die Unbedingtheit, mit der sie diesen dialektischen Grundsatz zu ihrem Leitprinzip macht, hebt die ART gegen alle übrigen Theorien der Physik ab. Norton² hat das 1993 in seinem Resümee über eine acht Jahrzehnte währende Debatte um eine angemessene Interpretation der ART herausgearbeitet.

Das bedeutet bspw., daß universale Strukturen, wie sie die rigiden, euklidischen Koordinatensysteme repräsentieren, nicht mehr zugelassen sind. Sie charakterisieren einen homogenen Raum, eine Raumstruktur, die laut Sohn-Rethel die Aufgabe hat, die Gültigkeit des Tauschpostulats in Zeit und Raum zu sichern. Ihr Kennzeichen ist die ewige Wiederholung des sich selbst Äquivalenten, von der Kette der Tauschakte in Szene gesetzt und widergespiegelt in der Vorstellung linearer Koordinatensysteme.

Der *Riemannsche* Raum dagegen lässt nur lokal definierte Koordinatensysteme zu. Das bedeutet insbesondere, dass jede Änderung einer physikalischen Größe von einem Raumzeitpunkt zum Nachbarpunkt ergänzt werden muss durch eine sogenannte *Konnexion*, die beim Übergang zum Nachbarpunkt auch den Einfluss der Änderung des Koordinatensystems berücksichtigt.

In der Quantenmechanik zeigt sich, dass Teilchen und Wellen nurmehr zwei Seiten einer Medaille sind. Die Paradoxien der Quantenmechanik sind bekannt: Fragt man ein Elektron, bist du ein Teilchen, so antwortet es mit Ja, und zwar mit der und der Masse, und diese Antwort ist wahr nach allen Regeln physikalischer Kunst, d.h. das Experiment lässt sich wieder und wieder mit demselben Ergebnis wiederholen. Fragt man aber dasselbe Elektron: bist du eine Welle? So antwortet es ebenfalls mit Ja und gibt seine Wellenlänge an. Und auch diese Antwort ist wahr im Sinne der Physik: sie lässt sich beliebig oft experimentell bestätigen. Das Problem ist: diese Antworten widersprechen einander: ein Teilchen kann man lokalisieren, eine Welle lässt sich prinzipiell nicht lokalisieren. Das bedeutet: Solange wir eine Logik anwenden, die auf einem Exklusionspostulat des Ja oder Nein - entweder/oder - aufbaut, erhalten wir immer nur die Hälfte der Wahrheit. Das Prinzip des sich wechselseitig Bedingens ist in der modernen Physik fundamental geworden.

¹ im Folgenden abgekürzt als ART

² John Norton: „General covariance and the foundations of general relativity: Eight decades of dispute“. In: *Reports on Progress of Physics* 56 (1993), S. 791-858.

4.

Ich komme zu meinem wichtigsten Punkt: In der Physik – so schält es sich heraus – kommt den Raumkonzepten eine grundlegende Bedeutung zu.³ Sie haben eine genuine Aufgabe: sie kodieren mathematisch die Bedingung der Möglichkeit des Messens. Überraschenderweise stellt sich heraus, dass diese Bedingungen identisch mit den Grundgleichungen der Physik sind. Das gilt für alle Sparten der Physik: die ART, die Quantenmechanik, die Theorie der Elementarteilchen, die Elektrodynamik und die klassische Mechanik.

Das diesen Sparten je eigene Konzept des Raumes kodiert die Bedingung der Möglichkeit des Messens im jeweiligen Gebiet und diese fällt zusammen mit der jeweiligen Bewegungsgleichung, die physikalisch das Gebiet charakterisiert. Die Nähe zur Kantischen Formel der Bedingung der Möglichkeit von Erkenntnis ist erkennbar. Diese erlaubte es der Kantischen Philosophie, sich von der Metaphysik loszusagen. In der Physik ermöglicht sie, die größte Bürde loszuwerden, die in der Auseinandersetzung zwischen Dialektik und Exklusionslogik zu existieren scheint: die enorme Fähigkeit der Physik zur Vorhersage. Eugene Wigner, Nobelpreisträger von 1963, hat diese Fähigkeit in einem vielbeachteten Aufsatz 1960 als „the unreasonable effectiveness of mathematics in Natural Sciences“ bezeichnet⁴.

Diese Potenz, die im Kapitalismus von den Apologeten einer rationalen, auf dem Exklusionspostulat *tertium non datur* basierenden Denklogik stets als Pfeil im Köcher benutzt wird, bekommt nun ihre einleuchtende Erklärung: Jedes gelungene Experiment verifiziert naturgemäß die Bedingung der Möglichkeit des Messens. Wenn jedoch diese Bedingung identisch ist mit der jeweiligen Grundgleichung des Gebiets, so muss jedes Experiment notwendig diese Gleichung bestätigen, was in der Praxis in Form einer mühevollen Auseinandersetzung zwischen der Konzeption von Experimenten und der Ausformung theoretischer Begrifflichkeiten zur Beschreibung ihrer Resultate stattfindet.

Das ist der Schlüssel zum Verständnis der verblüffenden Kapazität der Physik zur Vorhersage, zur *unreasonable effectiveness of reason*, wie ich das gerne in Abänderung von Wigner zuspitzen würde. Er fußt auf der Systematik, die Eddington anhand seiner Analyse der ART herausdestilliert hat, und er liefert den physikalischen Hintergrund für das, was Kant seine kopernikanische Wende nannte. Das möchte ich im Folgenden gerne nahe bringen.

5.

Eddington, Verfasser eines Buches zur allgemeinen Relativitätstheorie⁵, das bis in die 70er Jahre hinein elf Auflagen erzielte, bezeichnet 1927 in einer Public Lecture⁶ das Gravitationsgesetz, das es erlaubt, die Sonnenfinsternis von August 1999 vorherzusagen, als eine Binsenwahrheit⁷, vergleichbar mit der Vorhersage, daß auch 1999 noch $2+2=4$ gilt. Er nennt das Gesetz einen *put-up job*⁸: Die Physik bekommt nur heraus, was sie selbst zuvor hinein gesteckt hat.

³ Wenn ich im Folgenden von Raum spreche, so ist es immer im mathematischen Sinne gemeint und umfasst automatisch die Raumzeit, es sei denn, ich rede explizit von Raum und Zeit.

⁴ Eugene P. Wigner: *The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences*. In: Communications on Pure and Applied Mathematics 13 (1960), S. 1-14.

⁵ Arthur Stanley Eddington: *The Mathematical Theory of Relativity* [1923]. New York 1975.

⁶ Arthur Stanley Eddington, Gifford Lectures 1927, *The Nature of the Physical World* [1928]. London 1942

⁷ Eddington, *The Nature of the Physical World*, S.288: „[the eclipse] predicted as a consequence of the law of gravitation, a law which we found [...] to be a mere truism.“

⁸ Eddington, *The Nature of the Physical World*, S.145: „The law of gravitation is – a put-up job“

Mit dieser Formulierung beschreibt Eddington salopp, was Kant 1781 als Ergebnis seiner *Kritik der reinen Vernunft* so festhält: „Die Ordnung und Regelmäßigkeit also an den Erscheinungen, die wir Natur nennen, bringen wir selbst hinein, und würden sie auch nicht darin finden können, hätten wir sie nicht [...] ursprünglich hineingelegt.“⁹ In den *Prolegomena* präzisiert Kant: „Der Verstand schöpft seine Gesetze (a priori) nicht aus der Natur, sondern schreibt sie dieser vor.“¹⁰ Kant nannte das seine kopernikanische Revolution. Sie hat nie wirklich Eingang in unsere Köpfe gefunden, wie an der unhinterfragten Verwendung des Begriffs *Naturwissenschaft* deutlich wird.

Der springende Punkt für uns ist, dass Eddington dieselbe philosophische Einsicht aus der Physik heraus entwickelt. Er bezog seine ernüchternde Einschätzung aus einer Analyse der ART. Damals – 1927 – äußerte er noch die Hoffnung, dass die sich gerade entwickelnde Quantentheorie vielleicht erfolgreicher sein würde, und es ermöglichen würde, ein Zipfelchen vom Mantel der Natur zu lüften. Eine genauere Untersuchung belegt, dass auch diese Hoffnung vergeblich ist: Das heutige Standardmodell der Elementarteilchen zeichnet bis in all seine Verästelungen hinein die Physiognomie des flachen Raumes nach, wie sie Élie Cartan, ein französischer Mathematiker, 1938 in seinem Buch über *Spinoren*¹¹ dargelegt hat – zu einer Zeit als niemand auch nur eine Ahnung von einer zukünftigen Theorie der Elementarteilchen hatte¹².

Spinoren, das sind Parameter, die den Aufbau des flachen Raumes beschreiben, wenn er über Reflektionen statt Rotationen konstituiert wird. In der Elementarteilchentheorie werden sie mit den *Fermionen*, den Grundbausteinen der Materie, identifiziert.

6.

Damit kommen wir zur zweiten wichtigen Einsicht: Das Konzept des Raumes, das die Bedingung der Möglichkeit des Messens kodiert, erzeugt gleichzeitig die Objekte der Theorie. Und nicht nur das: es beinhaltet notwendig auch die Art der Wechselwirkungen, denen diese Objekte unterliegen und die sie für uns messbar machen. Das trifft auf die ART zu, in der das – im Riemannschen Raum kodierte – Konzept des Messens die *schwarzen Löcher* wie auch die *Keplerschen Zentralgestirne* erzeugt, die mittels der Metrik dieses Raumes wechselwirken, sobald diese Metrik mit dem gravito-inertialen Feld (sprich: der Gravitation), identifiziert wird. Und das trifft zweitens auf das sogenannte *Standardmodell* der Elementarteilchen zu, sobald die Spinoren als die Grundbausteine der Materie, als die *Fermionen*, identifiziert werden und die sog. *p-Vektoren* des flachen Raumes als die *Bosonen*, deren Austausch die Wechselwirkung vermittelt.

Die von Cartan aufgefundene Struktur des flachen Raumes ist tatsächlich bestimmend dafür, dass wir es in der Elementarteilchentheorie mit drei Typen von Wechselwirkungen zu tun haben: mit der elektromagnetischen, die unser alltägliches Leben bestimmt; mit der schwachen, die die Umwandlung der Teilchen ineinander, d.h. ihren radioaktiven Zerfall, regelt und mit der starken Wechselwirkung, die den Zusammenhalt der Atomkerne bedingt. Es sind die von Cartan entdeckten Invarianten des *kovarianten* flachen Raumes, die die Struktur dieser Wechselwirkungen, wie sie die heutige Elementarteilchentheorie zugrunde legt, bestimmen.

Dass mit dem Konzept des Raumes nicht nur die Objekte, sondern im selben Atemzug auch deren Wechselwirkungen festgelegt sind, ist ein Indiz dafür, wie sich dialektische Beziehungen in die Theorien der Physiker ohne deren Absicht einnisten: Für eine Dialektik ist es zwingend, dass die

⁹ Immanuel Kant: *Kritik der reinen Vernunft*. 3,179 (A 125)

¹⁰ Kant (1783) 189 [A 113])

¹¹ Elie Cartan: *La théorie des spineurs* [1938]. Paris 1981.

¹² Die Emergenz der Quantenmechanik aus der Translations- und Galilei-Invarianz homogener Räume hat J. Jauch 1968 nachgewiesen: Josef Jauch, *Foundations of Quantum Mechanics*, Addison-Wesley Pub-Comp., London 1968

Methode, die die Objekte in die Welt bringt, gleichzeitig festlegt, wie deren Wechselwirkung mit dieser Welt beschaffen ist.

Nirgends in diesen Herleitungen der Existenz von Materie in der Physik spielt das Konzept Natur auch nur die geringste Rolle: Was uns als Gesetz der Natur erscheint, ist nichts als die Bedingung der Möglichkeit des Messens – kodiert als mathematische Gleichung.

Die physikalisch definierte Natur ist ein Fetisch. Der messende Mensch hat es nur mit sich selbst zu tun, mit seinem Willen zu messen.

7.

Szenewechsel: Wir machen Astronomie, schauen an den Himmel und sehen: die Planeten kreisen um die Sonne. Warum tun sie das?

Newton sagt: weil die Sonne eine Anziehungskraft ausübt. Seine Begründung ist so einfach wie überzeugend: gäbe es keine Anziehungskraft, würden die Planeten schnurgeradeaus fliegen und in den Tiefen des Weltalls verschwinden. Tun sie aber nicht! Also muss es eine Anziehungskraft geben.

Die ART widerspricht: da existiert keine Kraft. Die Planeten fliegen kräftefrei. Wie kommt dieser Widerspruch zustande?

Wir haben bei unserer so überzeugend wirkenden Argumentation zugunsten einer Anziehungskraft – ohne es zu merken – ein Vorurteil vorausgesetzt: wir sind wie selbstverständlich von der Existenz eines flachen Raumes ausgegangen.

Was bedeutet das: ein flacher Raum? Auf einer ebenen Tischplatte wird ein Kügelchen, das ich mit dem Finger anstoße, in der Tat geradeaus laufen. Aber ist die Tischfläche nur ein wenig gekrümmt, wird die Kugel nicht geradeaus laufen. Das extreme Beispiel liefert eine Roulettekugel. Die Kugel kreist, obwohl keine Anziehungskraft vorhanden ist.

Wenn wir fälschlicherweise einen flachen Raum voraussetzen, dann suggeriert uns die *Konnexion*, die die lokalen Koordinatensysteme miteinander verknüpft, das Vorhandensein einer Kraft: wir imaginieren die Newtonsche Gravitationskraft – als Folge unserer Imagination des flachen Raumes. Wir sitzen einer Täuschung auf! Das ist, was uns – und mit uns der gesamten klassischen Physik – passiert.

Die elegante, einfache Form des von Newton entdeckten physikalischen Gravitationsgesetzes ist lediglich die mathematische Widerspiegelung der Definition des flachen Raumes: ihre Stärke nimmt mit dem Quadrat des reziproken Abstands ab, weil der flache Raum mathematisch durch eine *quadratische Form* definiert ist.

Wir beginnen zu ahnen, was Eddington mit der Bezeichnung *put-up job* gemeint haben könnte: Wir haben die Konzeption eines flachen Raumes vorausgesetzt, und wir erhalten als Widerspiegelung dieses Vorurteils die scheinbare Gravitationskraft von Newton heraus, die in der Welt der ART keine Existenz hat. Sie ist nur der Schatten der *Konnexion*.

8.

Diese Einsicht ist von großer Tragweite. Die Existenz der Gravitationskraft erscheint so überzeugend und real, weil sie eine Flut von Vorhersagen ermöglicht: sie erlaubt, die Bahnen der Himmelskörper – nicht nur der Planeten, auch der Kometen – vorauszusagen; sie erlaubt, Ebbe und Flut zu berechnen und die Abplattung der Erde an den Polen zu begreifen; und nicht nur das: sogar

die Präzession der Erdachse – eine Umdrehung einmal in rund 26.000 Jahren – konnte Newton mit seinem Gesetz berechnen.

Diese Vorhersagekraft erhob das Newtonsche Gesetz zu dem Paradigma klassischer Physik. Es kündete von der Fähigkeit der Menschheit, in der Natur Gesetze zu erkennen und sie der Natur zu entreißen. Es belegte den Triumph des menschlichen Gehirns über die Bewegung der Gestirne.

Jedoch: all diese Evidenz für die Existenz eines Naturgesetzes trägt. Die ART entthront dieses Gesetz. Sie erlaubt es, mithilfe des Konzepts eines gekrümmten, genauer gesagt des *Riemannschen* Raumes, ohne zusätzliche Anstrengung diese Erfolge der Newton'schen Physik zu reproduzieren.

Sie sagt unmissverständlich: es gibt keine Anziehungskraft, die Planeten fliegen kräftefrei, die Kraft erscheint uns als solche nur, insofern wir irrtümlich den flachen Raum vorausgesetzt haben. Und diese neue Theorie bekam Recht: sie konnte die *Periheldrehung* des Merkur präzise bestimmen – eine winzige Drehung der Ellipse, die der Merkur um die Sonne zieht; eine Abnormität, die die Astronomen seit langem kannten, aber nie zuvor korrekt zu berechnen in der Lage waren.

9.

Ist die ART also lediglich eine bessere Theorie, die die Newtonsche Theorie ablöst? Ist sie lediglich ein Indiz dafür, dass die Natur den *Riemannschen* Raum dem flachen Raum vorzieht? Gibt es womöglich eine Natur, die als Gesetz sagt, der gekrümmte Raum sei der richtigere Raum?

Physikalisch weist die Periheldrehung des Merkur darauf hin, dass die durch die Tauschabstraktion stimulierte Festlegung auf die rigiden Koordinatensysteme der Euklidischen Geometrie zu einschneidend ist, um die Realität wiederzugeben. Aber was für eine Realität?

Wir müssen aufmerksam werden. Eddington hat das Verdikt des *put-up jobs* nicht auf das Newtonsche Gravitationspotential beschränkt. Er hat ausdrücklich die allgemeine Relativitätstheorie als *put-up job* bezeichnet. Was bringt ihn dazu?

Eddington hatte Folgendes erkannt: Der Riemannsche Raum wird mathematisch eindeutig durch den *Riemann-Christoffel-Tensor* charakterisiert, ein Gebilde mit 4 Indizes. Durch die mathematische Operation der *Kontraktion* läßt sich daraus ein Tensor mit 2 Indizes gewinnen, wegen seiner Bedeutung *Einstein-Tensor* genannt. Eine weitere Kontraktion liefert eine Invariante. Das ist alles, was an unabhängigem mathematischem Material in diesem Raumkonzept zur Verfügung steht.

Zur Beschreibung einer Metrik braucht es einen Tensor mit zwei Indizes. Wenn also im Riemannschen Raum eine Metrik eingeführt werden soll, so muss sie notwendig mit einem Vielfachen des Einstein-Tensors identifiziert werden. Das ist nach Eddington der einigermaßen banale mathematische Inhalt der *1. Einsteinschen Feldgleichung* – d.h. derjenigen Feldgleichung, die sich auf den leeren Weltraum ohne Materie bezieht: wer unter diesen Umständen messen will, muss, so Eddington, zwangsläufig diese Gleichung zugrunde legen!

Eddington fand noch mehr heraus: Physikalisch sagt diese Gleichung, dass im leeren Universum das, was er den „gerichteten“ Krümmungsradius nannte, an jedem Ort und in jeder Richtung der gleiche ist. Eine sehr merkwürdige Vorstellung! Eine irritierende und kaum vorstellbare Selbstbeschränkung der Natur!

Eddington nimmt sich noch einmal das Messen vor, die Handwerkskunst der Physik, ihre zentrale Obsession. Messen benötigt unabdingbar die Eichung des Maßstabs. Normalerweise genügt die Existenz eines unabhängigen, von außen *a priori* vorgegebenen Eichmaßstabs: Geläufig für die

Masse ist das Urkilogramm in Paris. Wie aber soll man sich im leeren Weltraum eine Eichung vorstellen, wenn kein externer materieller Maßstab existiert, an dem geeicht werden kann?

Des Rätsels Lösung: Das einzige Eichmaß, das im leeren Weltraum zuhanden ist, ist der im Riemannschen Raum vorfindliche gerichtete Krümmungsradius an jedem Punkt in jeder Richtung. Wenn ich, so Eddington, mit einem am lokalen Krümmungsradius geeichten Maßstab diesen Krümmungsradius selbst vermesse, muss notwendigerweise immer derselbe Wert herauskommen. Das ist aber genau, was die 1. Einsteinsche Feldgleichung beinhaltet.

Diese Gleichung – so das Fazit von Eddington – spiegelt kein Gesetz der Natur wider. Sie erlaubt vielmehr, die Bedingung der Möglichkeit des Messens zu kodieren für den Fall, dass kein äußerer materieller Maßstab vorhanden ist.

Das Verblüffende ist: Die Folgerungen aus eben dieser messtechnischen Gleichung¹³ sind es, die die ART weltberühmt machten: die Periheldrehung des Merkur, die Rotverschiebung des Lichts im Gravitationsfeld von Sternen und die Ablenkung des Lichts im Gravitationsfeld der Sonne, deren beobachtungsmäßige Bestätigung 1919 zu einer Euphorie führte, die Einstein zu einem Popstar in der europäischen Öffentlichkeit werden ließ: sie alle folgen ohne weitere Umstände aus der Bedingung der Möglichkeit des Messens, wie sie in der 1. Einstein'schen Feldgleichung kodiert ist.¹⁴

10.

Vor diesem Hintergrund wird nun klarer, was den flachen Raum für die klassische Mechanik so unentbehrlich gemacht hat. Mathematisch kodiert seine quadratische Form die Bedingung der Möglichkeit des Messens für den Fall, dass ein äußerer Maßstab zur Verfügung steht. Wie ist das zu verstehen?

Die quadratische Form kennzeichnet die essentielle Eigenschaft eines Maßstabs: er muss *invariant* gegen Rotation und Translation sein. Ich übersetze das: wenn ein Tuchhändler auf dem Markt mit seiner Elle das verkaufte Tuch abmisst, dann erwartet der Kunde mit Recht, dass die Elle ihre Länge beibehält, wenn sie gedreht wird. Und sie darf ihre Länge auch dann nicht ändern, wenn der Händler sich in eine andere Ecke des Marktes begibt. Der flache Raum ist es, der die Bedingung der Möglichkeit des Messens kodiert, indem er eine charakteristische Form bereitstellt, die invariant gegen Rotation und Translation ist. Er stellt die mathematische Grundlage für einen materiellen Eichmaßstab bereit.

In der ART, die keine universellen Maßstäbe kennt, sind es die lokalen „gerichteten“ Krümmungsradien – an jedem Ort in jede Richtung –, die die Rolle von lokalen Eichmaßstäben spielen, die vom Ort des Messens und von der jeweiligen Richtung abhängen. Wir kennen sie nicht, und wir brauchen sie auch nicht zu kennen. Ihre Funktion tritt nur vermittels der 1. Einsteinschen Feldgleichung in Erscheinung.

11.

Nun kommt ein entscheidender Schritt. Eine Physik, der das Messen zur Obsession geworden ist, muss dem Riemannschen Raum metrische Eigenschaften verleihen, die durch eine Metrik, den sog. *metrischen Tensor*, beschrieben werden. Der entscheidende Durchbruch zur physikalischen

¹³ In Verbindung mit der *Geodätengleichung*, dem Äquivalent zur Newtonschen kräftefreien Bewegung im gekrümmten Raum

¹⁴ Eddington, *The Mathematical Theory of Relativity*, S.88-92

Interpretation der ART war die Eingebung Einsteins, diese Metrik zu identifizieren mit dem *gravito-inertialen Feld*, das die gravitative Wechselwirkung der Objekte bestimmt.

Aber welcher Objekte? Die 1. Einsteinsche Feldgleichung führt unmittelbar – unter wenigen, uns selbstverständlich erscheinenden präzisierenden Annahmen – auf eine ganz bestimmte Metrik, die sog. *Schwarzschild-Metrik*. Überraschenderweise beinhaltet diese Metrik die Existenz von Objekten, die wir als *schwarze Löcher* interpretieren, mathematische Gebilde, die aus nichts als unserer Konzeption von Raum und Zeit zu bestehen scheinen.

Und nun passiert uns dasselbe, was Newton passierte. So wie Newton sein Gravitationspotential als offensichtliche Eigenschaft der Natur begriff, die sich messen ließ, so lassen sich auch diese Objekte durch Messung in der Realität nachweisen. Sie finden sich als extrem massereiche Objekte im Zentrum nahezu jeder größeren Galaxie.

Es besteht ein merkwürdig intimer Zusammenhang zwischen diesen exotisch erscheinenden *schwarzen Löchern* und den *Keplerschen Zentralgestirnen*, wie unserer gewohnten Sonne. Beide gehen durch eine – in der ART notwendig mögliche – mathematische Transformation von Koordinatensystemen auseinander hervor. Dieser Zusammenhang erlaubte Einstein, die Periheldrehung des Merkur zu berechnen.

Wir müssen uns vor Augen führen: an keiner Stelle wurde bisher die Existenz von Materie vorausgesetzt. Wie denn auch? Das wären absolute Objekte, die nach Norton in der Welt der ART nicht zugelassen sind. Dass wir auf einmal die Struktur von Objekten auffinden, hat seinen Grund darin, dass der Einstein-Tensor, den wir bereits mit dem metrischen Tensor identifiziert haben, selbst in komplizierter Weise vom metrischen Tensor abhängt. Das bewirkt eine Selbstdetermination des metrischen Tensors, als deren Folge die Objekte auftreten: Wir bewegen uns in einem genuin dialektischen Zusammenhang.

Und wir können die Einsicht gewinnen: Die Objekte, mit denen wir es in der Astronomie zu tun haben, sind eine Emergenz des verwendeten Raumkonzepts, sprich: sie entspringen unserer Absicht zu messen.

12.

Die Schlussfolgerungen, die wir aus der ART ziehen konnten, werden auf eindrucksvolle Weise durch die Theorie der Elementarteilchen gestützt. Wir finden das überraschende Resultat, dass das Standardmodell der Elementarteilchen bis in seine kleinsten Verästelungen hinein die Physiognomie des flachen Raumes nachzeichnet, wie sie Cartan 1938 in seinem bereits erwähnten Buch *La théorie des spineurs* entwickelt hat¹⁵.

Die Dirac-Gleichung, die 1928 wie ein Phönix aus der Asche auftauchte¹⁶ und seitdem unverändert die Bewegungsgleichung des relativistischen Elektrons beschreibt, ist nichts anderes als die invertierte Definitionsgleichung von Spinoren. Die *Antiteilchen* sind in dieser Sicht eine unausweichliche Folge der inhärenten Zweideutigkeit der Definition der Normalen auf eine Fläche. Die Wechselwirkungen entspringen den von Cartan benannten Spinorinvarianten, die der flache Raum bereitstellt.

Das Standardmodell der Elementarteilchen, basierend auf diesen Wechselwirkungen, beschreibt die Existenz ganzer Klassen experimentell gefundener Elementarteilchen sowie ihre Eigenschaften – sie kommen in Dubletten, in Triplets oder Oktetts vor – mit verblüffender Präzision, sodass es

¹⁵ Elie Cartan: *La théorie des spineurs* [1938]. Paris 1981.

¹⁶ Paul A. M. Dirac: *The Quantum Theory of the Electron*. In: *Proceedings of the Royal Society A* 117 (1928), S. 610-624.

einige dieser Teilchen vorhersagen konnte, bevor sie experimentell entdeckt wurden. Die Quantenelektrodynamik vermag das anomale magnetische Moment des μ -Mesons, eines etwas schwereren Zwillings des Elektrons, bis auf 11 Stellen hinter dem Komma genau zu berechnen, und das experimentelle Ergebnis bestätigt diesen Wert.

Wir finden für die Elementarteilchentheorie dasselbe eindrucksvolle Resultat wie in der ART: die Materie in ihrer expliziten Gestalt wird konstituiert durch das Raumkonzept, das es uns ermöglicht, die Bedingung der Möglichkeit des Messens zu kodieren. Und wir stehen vor der Auflösung des Rätsels, das die Physik mit ihrem *unreasonable* Vermögen zur Vorhersage darstellt: die Theorie der Elementarteilchen zeichnet bis in kleinste Verästelungen hinein die Physiognomie des flachen Raumes nach. Die Ergebnisse sind das, was Eddington einen *put-up job* genannt hat, ein anschauliches physikalisches Beispiel dessen, was Kant als seine kopernikanische Revolution bezeichnet hat: wir bekommen heraus, was wir zuvor hinein gesteckt haben.

13.

Diese Sichtweise wirft ein neues Licht auf die sog. Fundamentalkonstanten der Physik. Sie erscheinen als invertierte Narben, die zurück bleiben, wenn das zuvor Geschiedene wieder zusammengefügt wird. Die moderne Physik macht die Scheidungen rückgängig, die ein durch die Tauschabstraktion konstituiertes Denken in die europäische Beschreibung der materiellen Welt implementiert hat.

Ein Beispiel: Raum und Zeit wurden in diesem Denken als voneinander gänzlich unabhängige Größen betrachtet, denen die Dimensionen [cm] und [s] zugeordnet wurden. Folglich taucht in der speziellen Relativitätstheorie, die diese Scheidung rückgängig macht, eine fundamentale Konstante c mit der Dimension einer Geschwindigkeit [cm/s] auf. Sie gibt an, wie die eine, nunmehr überflüssige Dimension historisch mit der anderen zusammenhängt, nachdem beide nicht mehr als getrennt angesehen werden.¹⁷

Entsprechend vermittelt in der ART die *Newtonsche Gravitationskonstante* [g/cm] die von der Newtonschen Vorstellung geschiedenen Dimensionen Raumzeit [cm] und Materie [g] in eine wechselseitige Bedingtheit. In der Quantenmechanik ist es das *Plancksche Wirkungsquantum* [erg s], das Welle und Teilchen als eines die Rückseite des andern begreifen läßt.¹⁸

Als Folge dieser Sicht ist es obsolet, den numerischen Wert der sog. Fundamentalkonstanten aus einer Theorie ermitteln zu wollen. Sie sind bestimmt durch die Art und Weise, wie die jeweilige Scheidung der Dimensionen historisch (in Europa) implementiert wurde.

14.

Vordergründig mag der Eindruck entstehen, eine Erkenntnis, die die physikalischen Objekte und ihre Wechselwirkungen dem gedanklichen Konstrukt eines Raumkonzeptes entspringen läßt, sei zutiefst idealistisch. Ein genauerer Blick zeigt: dem ist nicht so. Es bedurfte jahrhundertelanger Auseinandersetzungen mit der Realität des Messens, die es Newton 1687 erlaubten, das Raumkonzept zu formulieren, das der klassischen Physik zugrunde liegen sollte.¹⁹

¹⁷ In der spez. Relativitätstheorie kennzeichnet c darüber hinaus auch die Lichtgeschwindigkeit, die hier als fundamentale Konstante erscheint. In der ART kann die Lichtgeschwindigkeit von Ort zu Ort und sogar am selben Ort in verschiedenen Richtungen einen je anderen Wert annehmen.

¹⁸ Das Plancksche Wirkungsquantum identifiziert den kovarianten Wellenvektor mit den kontravarianten Messgrößen Energie und Impuls der klassischen Mechanik.

¹⁹ Isaac Newton: Die mathematischen Prinzipien der Physik [1687]. Berlin 1999.

Es bedurfte weiterer zwei Jahrhunderte theoretischer Auseinandersetzung mit mathematischen Raumkonzepten und physikalischer Praxis, bis Einstein 1915 das Riemannsche Raumkonzept in die Physik einführen konnte.²⁰

Und es bedurfte mühevoller Anstrengungen, die heutige Elementarteilchentheorie zu konstituieren. d.h. auf den von Cartan beschriebenen kovarianten Raum zu stoßen - als geeignetes Fundament einer Messung, die die Objekte ihrer Begierde erst in Wechselwirkung mit diesem Raumkonzept zu konstituieren in der Lage ist.

15.

Die Physik errichtet eine Parallelwelt, in der jedem sinnlichen Objekt ein Wert zugewiesen wird, der nurmehr quantitativer Differenzierung fähig ist; ein Vorgehen, das dem der Ökonomie warenproduzierender Gesellschaften wie auf den Leib geschnitten erscheint. Nach Sohn-Rethel sichern die abstrakten Konstruktionen von Raum und Zeit die Bedingung der Möglichkeit des Tauschens. In der Physik sichern sie die Bedingung der Möglichkeit des Messens.

In Anlehnung an den von Marx herausgearbeiteten Fetischcharakter der Waren²¹ läßt sich der im Sprechen über Naturwissenschaften übliche Naturbegriff als *Fetisch* identifizieren. Als sachliches Verhältnis der Dinge erscheint, was in Wahrheit ein gesellschaftliches Verhältnis der Menschen bezeichnet. Der messende Mensch begegnet nur sich selbst.

Wie der Tausch, so schafft auch die Physik eine Verdoppelung der sinnlichen Objekte in eine Parallelwelt, die nurmehr quantitativer Vergleichung fähig ist. Die Sonne als sinnliches Objekt, das Wärme und Licht als Lebenselixier spendet, nimmt in diesem Bild die Rolle des Gebrauchswertes ein. Das Raumkonzept erzeugt das mit einem Tauschwert behaftete physikalische Objekt Sonne, das sich gravitativ mit allen anderen Objekten des Sonensystems und darüber hinaus vergleicht. Die messenden Menschen selbst erzeugen den Schein der Objektivität, der ihnen in ihren Messungen entgegen tritt und sie mit der *unreasonable effectiveness of reason* blendet.

Die Aktualität von Sohn-Rethel – so mein Beitrag – ist keine akademische. Sie besteht fort, solange der Konflikt zwischen dem Anspruch der Physik auf Naturwahrheit und der Dialektik als einer spezifischen Weise, die Bedingung der Möglichkeit von Erkenntnis gesellschaftlich zu verorten, nicht zum Austrag gebracht worden ist.

²⁰ Albert Einstein: *Akademie-Vorträge: Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften 1914–1932*. Weinheim 2005.

²¹ Karl Marx: *Das Kapital*, Band 1 [1867]. In: Karl Marx und Friedrich Engels: *Werke*, Band 23. Berlin 1962. S. 85.