

Inhalt des ersten Heftes:

ABHANDLUNGEN:

Hans Werner Ingensiep, Bonn: Biologisierte Philosophie – sinnzerstörend und sinnstiftend	3
Petra Röder, Hamburg: Individualität und Geselligkeit. – Schleiermachers Versuch einer Theorie des »geselligen Betragens«	19
Jakob Barion, Bonn: Das Prinzip der coincidentia oppositorum in der Philosophie des Nicolaus von Cues	44
Michael Eldred, Konstanz: Seinkönnen und Gestimmtheit	53
Josef Seifert, Schaan: Ideologie und Philosophie. Kritische Reflexionen über Marx-Engels' »Deutsche Ideologie« – Vom allgemeinen Ideologieverdacht zu unbezweifelbarer Wahrheitserkenntnis	67
Dieter Wandschneider, Aachen: Prinzipientheoretisches zur Speziellen und zur Allgemeinen Relativitätstheorie	82
Christof Schorsch, Berlin: Denken in der Krise. Zur Metakritik postmoderner Theoreme	97
Hans Erich Lampl, Oslo: Ein »verschollenes« Nietzsche-Telegramm... redivivum	112
BUCHBESPRECHUNGEN:	
Thomas Dörr, Kritik und Übersetzung. Die Praxis der Reproduktion im Frühwerk Walter Benjamins (Jörg Disse)	117
Ingensiep/Jax, Mensch, Umwelt und Philosophie (Julian Nida-Rümelin)	121

prima **philosophia**

HERAUSGEGEBEN VON SABINE S. GEHLHAAR

Redaktionelle Mitarbeit
Ingomar Kloos



JUNGHANS-VERLAG CUXHAVEN

Band 3 / Heft 1

PRINZIPIENTHEORETISCHES
ZUR SPEZIELLEN UND ZUR ALLGEMEINEN RELATIVITÄTSTHEORIE¹

von Dieter Wandschneider, Aachen

Philosophisches Interesse an einer physikalischen Theorie verdienen wohl vor allem die *Prinzipien*, die ihr zugrundeliegen oder auch in ihren Resultaten sichtbar werden. Solche Prinzipien werden auch von der Physik selbst schon formuliert – man denke etwa an das Relativitätsprinzip der Bewegung oder die Prinzipien der kleinsten Wirkung, der Erhaltung der Energie usw. –, doch werden diese von der Physik nicht eigens thematisiert und problematisiert. Dies fällt in die Kompetenz der *Naturphilosophie*, die insofern als eine *Prinzipientheorie des Naturseins* zu charakterisieren wäre. Natürlich wird auch der Physiker aufgrund eigener philosophischer Interessen gelegentlich prinzipientheoretisch denken. Gerade für Einstein trifft dies in besonderem Maße zu, ja, man kann sogar sagen, daß sich die *Motivation* zu seinem fundamentalen Neuansatz der Physik im Grunde prinzipientheoretischen Erwägungen über die von der Physik bis dahin unhinterfragten Grundbegriffe des Raums, der Zeit, der Relativität, Trägheit, Gravitation usw. verdankt. Vielleicht ist wirkliche Innovation in der Physik gar nicht anders möglich als durch eine solche quasi philosophische Überprüfung der bis dahin für sicher gehaltenen begrifflichen Fundamente. Im folgenden soll nun versucht werden, die für *Einsteins Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie* relevanten Grundbegriffe und Grundprinzipien zu verdeutlichen und *prinzipientheoretisch begrifflich* zu machen.

I

Fundamental für die frühe Relativitätstheorie Einsteins von 1905, im Gegensatz zu der später vorgenommenen Verallgemeinerung als *Spezielle Relativitätstheorie* bezeichnet, ist der *Bewegungsbegriff*. Dabei ist vorausgesetzt, daß es sich um sogenannte *Inertialbewegungen* handelt, also Bewegungen, die nicht durch Kräfte, sondern allein durch die Massenträgheit bestimmt sind. Ein *Inertialsystem*² ist dementsprechend ein Bezugssystem, das mit einem inertial bewegten Körper gleichsam starr verbunden ist.

Grundsätzlich ist zunächst festzustellen, daß Bewegung immer nur Bewegung im Hinblick auf eine *Bezugsinstanz* ist, die in der Bewegungsrelation gewissermaßen den

Ruhepol repräsentiert. Was aber kommt als Bezugsinstanz in Frage? Newton hatte angenommen, daß ein *absoluter Raum* existiert, auf den letztlich alle Bewegung beziehbar ist. Da ein solcher vorgeblich absoluter Raum freilich nicht wahrnehmbar ist, die praktische Physik sich aber nun einmal an das Wahrnehmbare halten muß, bleibt ihr keine andere Möglichkeit, als Bewegung auf *materielle Instanzen* zu beziehen, die als solche aber selbst etwas Bewegliches sind. Da grundsätzlich keine dieser Instanzen vor der anderen ausgezeichnet ist, kann Bewegung *gleichermaßen auf jede derselben bezogen* werden, und das heißt: Bewegung kann nichts Absolutes sein; sie ist *relativ*, d.h. von der Wahl der Bezugsinstanz *abhängig*. Bewege ich mich in einem fahrenden Zug, so habe ich relativ zu diesem eine andere Geschwindigkeit als relativ zum Bahndamm. Ebendies, daß Bewegung stets relative Bewegung ist, ist der Inhalt des klassischen *Relativitätsprinzips der Bewegung*, das historisch vor allem mit dem Namen Galileis verknüpft ist³.

Angesichts des elementar vertrauten Tatbestands relativer Bewegung mußte es nun geradezu absurd erscheinen, daß das kinematische Relativitätsprinzip, wie sich zeigte, für die Bewegung des *Lichts* nicht mehr gilt. So hat der von einer Lichtquelle emittierte Lichtstrahl relativ zum fahrenden Zug *dieselbe* Geschwindigkeit wie bezüglich des Bahndamms – ein Faktum, das unser Vorstellungsvermögen schlechterdings übersteigt und in krassem Widerspruch zum kinematischen Relativitätsprinzip zu stehen scheint. Die Lichtbewegung wäre hiernach etwas *Absolutes* in dem Sinne, daß ihre Geschwindigkeit eben keine relative Größe mehr ist, sondern *unabhängig vom jeweiligen inertialen Bezugssystem* stets denselben konstanten Wert besitzt. Sie ist damit wohlge-merkt *nicht* absolut im Sinne *Newtons*, denn eine *absolute Bezugsinstanz*, wie sie Newton angenommen hatte, ist, wie gesagt, nicht verfügbar; absolut ist die Lichtbewegung vielmehr im Sinne der *Unabhängigkeit von jeder Bezugsinstanz überhaupt*. Daß die Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen gleich ist, bedeutet weiter, wie von Einstein gezeigt wird, daß sie auch die höchsterreichbare, endliche *Grenze* für alle Geschwindigkeiten, mit denen sich Wirkungen ausbreiten können, darstellt. (Darüberhinaus gilt, daß das Licht *nur bewegt* sein kann. Es repräsentiert nichts Ruhendes und ist darum, wie man auch sagt, *ohne Ruhemasse*.)

Gerade mit der *Relativitätstheorie* ist also kurioserweise ein *Absolutheitsaspekt* in der Physik hervorgetreten, was den Psychologen M. Wertheimer (der Einstein seinerzeit interviewt hat, um etwas über die Bedingungen kreativen Denkens herauszufinden) zu der Bemerkung veranlaßte, daß »Absolutheitstheorie« als Bezeichnung angemessener wäre⁴. Auf der anderen Seite hat die Absolutheit der Lichtbewegung zur Folge, daß Raum- und Zeitbestimmungen sowie andere physikalische Größen, die man lange für etwas Absolutes gehalten hatte, in verschiedenen Bezugssystemen ganz verschiedene Werte annehmen, sich damit als *relativ* erweisen und insofern den Titel »Relativitätstheorie« rechtfertigen. Bezüglich des *Raumes* hatte, wie dargelegt, eine solche Relati-

uerung schon vorher stattgefunden, da die Fiktion des Newtonschen absoluten Raumes für die praktische Arbeit der Physik, wie gesagt, unbrauchbar war und durch untereinander gleichberechtigte materielle Bezugssysteme ersetzt werden mußte. Die *Zeit* hingegen, so schien es, war eine für alle solche Bezugssysteme gleichermaßen verbindliche, absolute Bestimmung. Um freilich eine entsprechend absolute Synchronisierung aller Uhren, insbesondere der relativ zueinander bewegten, durchführen zu können, wären Signalübermittlungsprozesse von unendlicher Geschwindigkeit notwendig. Das ist aber unmöglich, wenn die Lichtgeschwindigkeit, die selbst endlich ist, die Grenzgeschwindigkeit aller Prozesse darstellt. Aus dieser Unmöglichkeit zog Einstein die Konsequenz, daß auch die Zeitbestimmung (und nicht nur die Raumbestimmung) eine vom Bezugssystem abhängige, also *relative* Größe sein müsse.

Nun ist die Relativität der Zeit sicher ein erstaunlicher Tatbestand. Die Zeit scheint ja eine sich allen Manipulationen widersetzen Macht zu sein. Gerade dieses Resultat Einsteins bot daher immer wieder Anlaß zur Spekulation. Der Grund für die Relativierung der Zeitbestimmung ist aber die *Absolutheit* der Lichtbewegung, so daß die folgenden prinzipienlogischen Überlegungen vornehmlich darauf konzentriert sein werden.

Die epochemachende Leistung der Speziellen Relativitätstheorie besteht primär darin, daß sie jene beiden unvereinbar scheinenden Tatbestände – die *Relativität* normaler Bewegungen und die *Absolutheit* der Lichtbewegung – in einer mathematischen Theorie formal konsistent zu verbinden vermochte. Die Frage der *Begreifbarkeit* einer solchen coincidentia oppositorum ist ein anderes Problem⁵, das die Zumutung enthält, eine *nicht-relative* Bewegung zu denken.

Allerdings läßt sich aus der Gleichwertigkeit von Inertialsystemen mit Hilfe von Symmetrieüberlegungen (sowie der Annahme, daß die Zeitfolge kausal verknüpfter Ereignisse unumkehrbar ist, die Zeit also nicht rückwärts läuft) rein mathematisch erschließen, daß die Existenz einer absoluten Bewegung nicht nur nicht im Gegensatz zum Relativitätsprinzip steht, sondern sogar aus diesem *herleitbar* ist⁶ – ein außerordentlich befremdlicher Aspekt, der für das philosophische Begreifenwollen eine Herausforderung darstellt. In diesem Sinne wird es hier darum zu tun sein, die Vereinbarkeit der beiden Grundprinzipien der (Speziellen) Relativitätstheorie – das der *Relativität* normaler Bewegungen und das der *Absolutheit der Lichtbewegung* – begreiflich zu machen, wobei die in letzterem sich ausdrückende *Sonderstellung* des Lichts als der eigentlich begründungsbedürftige Tatbestand erscheint. Auf der anderen Seite ist festzustellen, daß das klassische Relativitätsprinzip der Bewegung zwar altvertraut, aber darum nicht weniger begründungsbedürftig ist, auch wenn es von der neuzeitlichen Wissenschaft und Philosophie seit Galilei praktisch immer wie ein unbezweifelbarer Grundsatz behandelt wurde. Selbst Kant unternimmt in seiner Schrift ›Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft‹, die eine Klärung und Grundlegung der meta-

physischen Voraussetzungen der Physik zum Ziel hat, keinen Versuch, das Relativitätsprinzip zu begründen⁷.

II

Prinzipienlogische Argumente für das kinematische Relativitätsprinzip lassen sich von der noch gar nicht recht rezipierten *Naturphilosophie Hegels* her gewinnen. So ist Hegel zufolge im *Begriff* von Bewegung immer schon der dialektische Bezug auf Ruhe mit enthalten⁸. Ortsveränderung setzt immer einen *identisch erhaltenen* Ort voraus. Dieser Charakter eines gleichsam substantiellen Orts ist dasjenige, was wir empirisch als Materialität im Sinne der *Massenträgheit* kennen. Nur durch die träge Materie ist überhaupt ›Ort‹ realisierbar als ein zu verschiedenen Zeiten identischer Ort. Nur vermöge eines solchen materiellen Orts ist Lokalisierung und damit auch Bewegung möglich, wobei wir einen ›materiellen Ort‹ üblicherweise als ›Körper‹ oder ›Partikel‹ bezeichnen. Körperbegriff und Bewegungsbegriff gehören im Sinne der Hegelschen Argumentation wesentlich zusammen (Hegel 9.60 Zus.)⁹.

Alles, was bewegt ist, kann somit immer nur *relativ zu einer materiellen Bezugsinstanz* bewegt sein. Aber das ist noch keineswegs die Aussage des schon erwähnten Relativitätsprinzips der Bewegung, wonach der Bewegungszustand eines Bewegten von der *jeweiligen* Bezugsinstanz abhängt und dementsprechend *unterschiedlich* bestimmt sein kann. Genau dies ist aber gegeben, wenn das relativ zu einem materiellen Körper Bewegte seinerseits ein *materieller Körper* ist. Dieser ist dann also relativ zu jenem Körper bewegt, in bezug auf sich selbst aber in Ruhe. Jeder Körper kann, je nach Bezugsinstanz, als bewegt oder auch als ruhend betrachtet werden¹⁰ oder allgemeiner: Er kann in Abhängigkeit von der jeweiligen Bezugsinstanz *verschiedene* Bewegungszustände haben. Das ist in der Tat der Inhalt des klassischen *Relativitätsprinzips der Bewegung*, das so freilich nicht mehr empirisch aufgegriffen, sondern prinzipienlogisch aus dem *Begriff* der Bewegung gewonnen ist. Dabei ist aber auch deutlich geworden, daß sich die Aussage des kinematischen Relativitätsprinzips nicht auf Bewegungen schlechthin, sondern wesentlich auf *Körperbewegungen* bezieht. Die übliche Fassung ›Alle Bewegung ist relative Bewegung‹ ist so gesehen falsch und muß modifiziert werden in: ›Relative Bewegung ist gleichbedeutend mit Körperbewegung‹. Daß dies nicht lediglich eine triviale Variation des Ausdrucks, sondern eine höchst folgenreiche Präzisierung darstellt, ergibt sich aus der hiermit involvierten Möglichkeit einer *nicht-relativen* Bewegung: Ist relative Bewegung nämlich gleichbedeutend mit Körperbewegung, so folgt unmittelbar, daß die Bewegung eines Nicht-Körpers eine nicht-relative Bewegung wäre. Freilich: Was ist ein ›Nicht-Körper‹?

Nun, die Physik hat diese Frage beantwortet, denn *empirisch* kann kein Zweifel

mehr daran sein, daß das Licht Nicht-Körper-Charakter besitzt: Es hat zwar Energie, aber, wie schon gesagt, keine Ruhemasse¹¹. Es bleibt die Frage, wie es *prinzipienlogisch* zu verstehen sei, daß außer Körpern in der Natur auch nicht-körperhafte Materie existiert und wie das Verhältnis beider Materieformen zu bestimmen wäre. Der einzige Philosoph, der diese Frage, soweit ich sehe, überhaupt gestellt und dann auch eine Antwort darauf gegeben hat, ist (abgesehen von dem hyperspekulativen Schelling) Hegel gewesen – sicherlich ein überraschender Tatbestand angesichts der verbreiteten Meinung, daß *Hegels Naturphilosophie* anachronistisch, abstrus, bestenfalls ›Goethisch‹ sei und zu einer Philosophie der Physik, schon gar der modernen, nichts beizutragen habe. Es zeigt sich aber, daß Hegel, auch wenn seine Polemik gegen Newton weithin unhaltbar ist¹², in seiner Deutung des *Lichts* in einem entscheidenden Punkt gegen Newton im Recht ist, wenn er bereits die *Sonderstellung* des Lichts betont. Geht Newton noch von der naheliegenden Annahme aus, daß das Licht aus zwar kleinen, aber doch materiellen Partikeln besteht, insistiert Hegel demgegenüber aus philosophischen Gründen darauf, daß das Licht nur in strikter Entgegensetzung gegen jede Form körperhafter Materialität zu denken sei. Ja, selbst die damals schon von Huygens entwickelte Wellentheorie des Lichts verfällt diesem Hegelschen Verdikt (9.120 Zus.); zu Recht, wie man heute sagen muß, sofern sich damit noch Vorstellungen materieller Wellen in der Art von Wasserwellen, Schallwellen usw. verbinden. Alle Formen von Körperhaftigkeit sind, darin ist Hegel vom Standpunkt der heutigen Physik aus zuzustimmen, von der Auffassung des Lichts strikt fernzuhalten.

Wie begründet Hegel die Körperlosigkeit des Lichts aber? Hierzu ist zunächst daran zu erinnern, daß im Zusammenhang mit dem Bewegungsbegriff der Körperbegriff eingeführt werden mußte: Nur der materielle Körper kann qua Trägheit einen identischen Ort konstituieren, der als solcher geeignet ist, Bezugsinstanz von Bewegung zu sein. Nun ist der Körper aber wesentlich *einer*. Im Charakter der *Einzelheit*, so argumentiert Hegel (vgl. 5.190 ff.), ist aber notwendig der Aspekt der *Vielheit* dialektisch mitgesetzt. Wenn es *einen* Körper gibt, kann es prinzipiell auch *viele* Körper geben – ›prinzipiell‹, d.h. nicht im physikalischen, sondern im *prinzipientheoretischen* Sinne. Im Körperbegriff sind damit, recht verstanden, entgegengesetzte Hinsichten enthalten: Als viele sind die Körper *real verschieden*; sie *gleichen* sich aber auch wieder darin, daß sie, unbeschadet solcher Verschiedenheit, alle gleichermaßen Körper und insofern *wesensmäßig identisch* sind. Wohlgemerkt: ›Wesensmäßig‹, d.h. ihrem Begriff, ihrer *Idee* nach, so Hegel, sind die Körper als Körper identisch, ihrer *Realität* nach aber verschieden (vgl. 9.60 ff.). Weil die Realität des Körpers seiner *Idee* also *nicht gemäß* ist, deshalb, so schließt Hegel nun weiter, gehört zu Körpern wesensmäßig auch die Tendenz, ihre reelle Verschiedenheit *aufzuheben*, um die Identität zu erreichen, die sie ihrer Idee nach sind. Aus diesem Grunde, so Hegel, streben sie zueinander. Die *Schwerkraft*, die Körper aufeinander ausüben, ist dieser naturphilosophischen Deu-

tung zufolge als Ausdruck dieses Strebens nach Aufhebung der realen Verschiedenheit der Körper und Erreichung ihrer ideellen Identität zu verstehen.

Freilich, auf der Ebene *körperhaften* Seins, charakterisiert durch Vereinzelung und Verschiedenheit, kann die ideelle Identität der Körper naturgemäß nie als solche in Erscheinung treten. Möglich wäre das vielmehr nur in Form einer *nicht mehr körperhaften Materie*, mit der so die Diskrepanz von Idee und Realität aufgehoben wäre, die also diesen Mangel materieller Körperlichkeit nicht mehr hätte. Im vollständigen System der Naturformen muß diese höhere Form einer nicht mehr körperhaften Materie nach idealistischer Auffassung daher ebenfalls existieren. Hegel identifiziert sie richtig mit dem, was wir empirisch als *Licht* kennen, und charakterisiert sie im Sinne der Körperlosigkeit als »das *Absolutleichte*« (9.116). Soweit Hegels Argumentation.

Ist das Licht aber als Nicht-Körper bestimmt, so folgt aus der früher begründeten modifizierten Form des kinematischen Relativitätsprinzips ›Relative Bewegung ist gleichbedeutend mit Körperbewegung‹, wie schon bemerkt, daß die Bewegung des Lichts *nicht-relativer* Natur sein muß. Der Sonderstatus der Lichtbewegung ist nach dieser Argumentation also nicht nur mit dem Relativitätsprinzip vereinbar, sondern aus diesem – in der angegebenen modifizierten Fassung und unter der Bedingung der Körperlosigkeit des Lichts – sogar erschließbar.

III

Läßt sich mit solchen rein *prinzipienlogischen* Überlegungen aber auch ein *physikalischer* Sinn verbinden, oder handelt es sich dabei nur um ein philosophisches Glasperlenspiel? Nun war eingangs schon darauf hingewiesen worden, daß die Existenz einer absoluten Bewegung aus der dem Relativitätsprinzip zugrundeliegenden *Äquivalenz* der inertialen Bezugsinstanzen mathematisch hergeleitet werden kann. Die hierbei in Anschlag gebrachten *Symmetriebeziehungen* beruhen aber letztlich auf der Gleichwertigkeit der (inertialen) Bezugskörper. Diese Gleichwertigkeit ist nun nicht anderes als die vorher geltend gemachte *ideelle Identität* der real verschiedenen Körperinstanzen, aus der auf die Existenz nicht-körperhafter Materie geschlossen wurde, die, wie dargelegt, weiter zur Konsequenz einer nicht-relativen Bewegung führt. Die philosophische Argumentation holt so gleichsam nur die prinzipienlogischen Strukturen heraus, die auch dem mathematischen Gedankengang zugrundeliegen, der damit seinerseits eine *naturphilosophische Deutung* gefunden hat. Jene beiden *prima vista* unvereinbar erscheinenden Grundprinzipien der (Speziellen) Relativitätstheorie – die Relativität der Körperbewegung und die Absolutheit der Lichtbewegung – werden so im Grunde als ein Prinzip verstehbar: *Relativität und Absolutheit erweisen sich als notwendig zusammengehörende Momente des Bewegungsbegriffs* oder präziser: als Ausdruck zwei-

er strikt entgegengesetzter Formen von Materie – Partikel und Licht (oder allgemeiner Strahlung) –, die gemäß Hegel aus der ›Logik‹ des Materiebegriffs folgen, der seinerseits durch den Bewegungsbegriff impliziert ist.

Natürlich wäre es völlig absurd zu behaupten, nicht Einstein, sondern bereits Hegel habe in Wahrheit die Relativitätstheorie entwickelt, die ja doch eine mathematisch-physikalische Theorie ist, von der Hegel nicht einmal eine Ahnung haben konnte. Dennoch, so wird man sagen müssen, ist von Hegel her eine *naturphilosophische Deutung* des zentralen, der Relativitätstheorie eigentlich zugrundeliegenden Sachverhalts möglich geworden: Der *Relativitäts*aspekt betrifft die reale Verschiedenheit der Körper, während ihre ideelle Identität, ihre Gleichwertigkeit qua Körper, *zugleich* einen die Verschiedenheit übergreifenden, *absoluten* Aspekt repräsentiert. Dieser Doppelaspekt von Relativität und Absolutheit ist in der ›Logik‹ des Materiebegriffs von vornherein mitgesetzt. Auch wenn Hegel an dem daraus folgenden kinematischen Aspekt, der wissenschaftshistorisch erst in der Perspektive der Relativitätstheorie Aktualität gewinnen sollte, nicht speziell interessiert war und sich die hier entwickelte Argumentation darum nicht explizit im Hegeltext selbst findet, so sind doch die beiden *entscheidenden Prämissen* – (a) ›Relative Bewegung ist gleichbedeutend mit Körperbewegung‹ und (b) ›Licht ist nicht körperhafter Natur‹ –, wie dargelegt, von Hegel her prinzipientheoretisch begründbar. Die Konsequenz, daß das Licht in einem *absoluten* Sinne bewegt sein muß, ist dann unabweislich. Ebendies findet sich auch im Hegeltext schon, wenn vom Licht gesagt wird, daß »sein Sein die absolute Geschwindigkeit« sei (9.112 Zus.). Zu Recht konstatiert J. N. Findlay »a flavour of relativity-physics in some of the things Hegel says about Light«¹³.

Physikalisch, so ist festzustellen, ist *dieser* Sinn von Absolutheit, nämlich als das die Verschiedenheit Übergreifende, erst durch die Relativitätstheorie deutlich hervorgetreten. Absolut kann danach nicht etwas sein, was spezifisch für ein *bestimmtes* Bezugssystem ist, sondern nur etwas *allen* Bezugssystemen *Gemeinsames*, vom je besondern Bezugssystem *Unabhängiges*, das alle speziellen Perspektiven *übergreift*¹⁴. In diesem Sinne kann es auch im Rahmen der Relativitätstheorie noch *Absolutheit* in der Physik geben. Newton hatte dem Raum und der Zeit Absolutheitscharakter zugesprochen. Vor Einstein galt immerhin die Zeit noch als etwas Absolutes, was schließlich durch die Relativitätstheorie widerlegt wurde. Absolut ist danach nicht mehr der Raum oder die Zeit, sondern eine bestimmte *Bewegung*, und das heißt eine *Beziehung* von Raum und Zeit. Es ist in der Tat eine der einschneidendsten theoretischen Konsequenzen der Relativitätstheorie, daß Raum- und Zeitbestimmungen nicht nur keine vom Bezugssystem unabhängige Bedeutung mehr besitzen, sondern nun auch nicht mehr unabhängig voneinander, sondern *nur in ihrer Beziehung sinnvoll* sind. Prinzipientheoretisch läßt sich dies durch eine einfache Überlegung deutlich machen¹⁵; durch die Relativitätstheorie sind Raum und Zeit nun aber auch physikalisch in Be-

ziehung gesetzt worden. Nur noch diese *Einheit* beider hat eine von der speziellen Perspektive des jeweiligen Bezugssystems unabhängige und in diesem Sinne *absolute* Bedeutung. Die häufig gebrauchte Bezeichnung ›Raumzeit‹ trägt dieser durch die Spezielle Relativitätstheorie herbeigeführten Vereinheitlichung Rechnung¹⁶.

In philosophischer Perspektive ist dies zweifellos eine bemerkenswerte Entwicklung, denn das beziehungslose Nebeneinander von Raum und Zeit dergestalt, daß es Raum gibt und *auch* Zeit, ist prinzipientheoretisch natürlich unbefriedigend. »Dieses ›Auch‹«, sagt Hegel, »bekämpft die Philosophie« (9.48 Zus.). Wenn es beides ›gibt‹, dann möchte man auch etwas über deren *Beziehung* wissen.

Schließlich muß sich in diesem Zusammenhang die Frage stellen, ob und wie der hier zwar vorausgesetzte, aber nicht eigentlich thematisierte Begriff der *Materie* zu interpretieren ist und wie sich diese insbesondere zur relativistischen Raumzeit verhält. Die von Einstein zehn Jahre später vollendete *Allgemeine Relativitätstheorie*, von der im folgenden die Rede sein soll, stellt gewissermaßen die Antwort auf diese Frage dar.

IV

Die hier zunächst betrachtete Spezielle Relativitätstheorie ist auf rein inertial bewegte und als solche gleichwertige Bezugsinstanzen beschränkt. Die mit der Allgemeinen Relativitätstheorie verbundene *Verallgemeinerung* bedeutet, daß nun auch *nicht-inertiale* Bezugssysteme in die Betrachtung einbezogen werden. Daß *alle* materiellen Bezugsinstanzen zwar nicht *gleichwertig* (wie die inertialen), aber doch prinzipiell *gleichberechtigt* sind, wird als *allgemeines Relativitätsprinzip* bezeichnet.

Die Zulassung nichtinertialer Bezugsinstanzen hat das Auftreten *gravitativer* Phänomene zur Folge. Zunächst: Für frei fallende Gegenstände gilt *empirisch*, daß sie, unabhängig von ihrer Masse, gleich schnell fallen; eine Feder und eine Bleikugel unterscheiden sich (im Vakuum) diesbezüglich nicht – sicher ein merkwürdiger Tatbestand, dem Einstein nun folgende *Deutung* gibt¹⁷: Angenommen, Feder und Bleikugel sind in einem Inertialsystem in Ruhe und werden nun von einem konstant beschleunigten Bezugssystem aus beobachtet, so würden beide in *gleicher* Weise beschleunigt und damit wie frei fallende Gegenstände erscheinen. Der freie Fall wäre hier nichts anderes als eine *Trägheitsbewegung* in einem beschleunigten Bezugssystem. Aber auch die durch Beschleunigung induzierten Trägheitskräfte, z.B. bei einem bremsenden Zug, sind nicht von Gravitationskräften zu unterscheiden, weil die dabei auftretende Reaktionsbeschleunigung nach dem Actio-reactio-Prinzip bei allen Massen gleich ist. Gravitation und Trägheit wären somit grundsätzlich äquivalente Eigenschaften; dies ist der Inhalt des sogenannten *Äquivalenzprinzips*.

Einstein hat diese Überlegungen mathematisch untermauert (vgl. Einstein 1911).

Im Rückgriff auf die bereits verfügbaren speziell-relativistischen Beziehungen kann er zeigen, daß Nichtinertialsysteme, im Gegensatz zu inertialen, *nicht mehr homogen* sind¹⁸. Dies kann auch so ausgedrückt werden, daß hier *metrische Strukturveränderungen der Raumzeit* und, unmittelbar damit zusammenhängend, energetische Strukturen auftreten, die ein *Gravitationsfeld* repräsentieren. Die Besonderheit dieses Gravitationsfeldes besteht darin, daß es hier nicht irgendwelche Kraftquellen gibt, sondern allein die metrische Raumzeitstruktur des beschleunigten Bezugssystems dafür verantwortlich zu machen ist. Die Gravitation, so sagt man, ist durch *Geometrisierung* gedeutet worden.

Dieses Schema liefert Einstein nun auch die Heuristik zur Erklärung des Gravitationsfeldes in dem ganz anders gearteten Fall, daß dieses *durch reale Massen verursacht* wird. Er kommt zu dem Ergebnis, daß die Materie in ihrer Umgebung ebenfalls metrische Strukturveränderungen der Raumzeit zur Folge hat, die, ähnlich wie im Modell beschleunigter Bezugssysteme, das Gravitationsfeld bestimmen¹⁹.

Diese Geometrisierung auch des eigentlichen, auf die Materie zurückführbaren Gravitationsfeldes, im folgenden kurz als *Geometrisierungsprinzip* bezeichnet, stellt eine revolutionäre Deutungsleistung Einsteins dar. Das Gravitationsfeld ist hiernach *nicht* etwas, das in einer schon vorhandenen Raumzeit auftritt, sondern es ist *die Raum-Zeit-Struktur selbst*; gleichsam eine *physikalische* Eigenschaft des ›Vakuums‹, das so eben nicht als das schlechthin ›Leere‹ zu denken ist, sondern als reales physikalisches Feld, das *verbindet*, statt zu trennen.

Soviel in aller Kürze zum physikalischen Inhalt der Allgemeinen Relativitätstheorie, der sich, wie dargelegt, durch *drei physikalische Prinzipien*, das allgemeine Relativitätsprinzip, das Äquivalenzprinzip und das Geometrisierungsprinzip, kennzeichnen läßt. Diese Prinzipien sind nun näher zu betrachten.

Die im *allgemeinen Relativitätsprinzip* erhaltene Verallgemeinerung im Sinne der Zulassung auch beschleunigter Bezugssysteme ist nach den entwickelten Überlegungen insofern naheliegend, als der materielle Körper, prinzipienlogisch gesehen, ja einzig durch seine Trägheit und damit die Eigenschaft, Bezugsinstanz möglicher Bewegung zu sein, charakterisiert worden war. In dieser Hinsicht sind natürlich *alle* materiellen Bezugsinstanzen, und das heißt auch die nichtinertial bewegten, prinzipiell *gleichberechtigt*²⁰.

Bezüglich des *Äquivalenzprinzips*, des zweiten der allgemein-relativistischen Prinzipien, stellt sich die Frage, ob dieses aus dem allgemeinen Relativitätsprinzip folgt oder ob es sich um ein davon unabhängiges Prinzip handelt. Hier ist daran zu erinnern, daß die Äquivalenz von Trägheit und Gravitation mathematisch bedeutet, daß Gravitationsphänomene auf die metrische Struktur der Raumzeit zurückführbar sind und dadurch als reine Trägheitsphänomene interpretierbar werden, *sofern* beschleunigte Bezugssysteme als gleichberechtigt zugelassen sind. Dies ist aber durch das allgemeine

Relativitätsprinzip gesichert, und man muß daher urteilen, daß das Äquivalenzprinzip *kein logisch unabhängiges* Prinzip ist, sondern das allgemeine Relativitätsprinzip voraussetzt.

Was gilt aber bezüglich des dritten Prinzips, hier als *Geometrisierungsprinzip* bezeichnet? Es wird meistens gar nicht als ein eigenes Prinzip aufgeführt, obwohl es zweifellos ein entscheidendes *Novum* gegenüber dem Relativitätsprinzip und dem von ihm abhängigen Äquivalenzprinzip enthält, den Gedanken, daß die metrische Struktur in der Umgebung von Massen in ähnlicher Weise verändert wird wie in beschleunigten Bezugssystemen, was aus den beiden anderen Prinzipien schon deshalb nicht folgen kann, weil die Masse als Mengenbegriff darin gar nicht auftritt. Daß hier eine neue, *zusätzliche* Annahme darüber, in welcher Weise die Massenenergie zu berücksichtigen sei, nötig ist, wird von Einstein selbst ausdrücklich betont: »Es muß zugegeben werden, daß diese Einführung des Energietensors der Materie durch das Relativitätspostulat allein nicht gerechtfertigt wird; deshalb haben wir sie [...] aus der Forderung abgeleitet, daß die Energie des Gravitationsfeldes in gleicher Weise gravitierend wirken soll wie jegliche Energie anderer Art« (Einstein 1916, 112). Was Einstein meint, ist, wie eine Umstellung der Satzteile besser zum Ausdruck bringen würde, die Annahme, daß die Energie der Materie (im weitesten Sinne) in gleicher Weise gravitierend wirkt wie z.B. die eines Gravitationsfeldes, das, im Sinne des Äquivalenzprinzips, etwa durch Beschleunigung entsteht.

Zweifellos eine geniale Idee: Durch Rückgriff auf die speziell-relativistische Einsicht, daß auch die massive Materie eine *Energieform* darstellt, erreicht Einstein, daß die Materie nun *mit Eigenschaften des Gravitationsfeldes vergleichbar* wird, das nach dem Äquivalenzprinzip seinerseits als metrische Struktur der Raumzeit gedeutet werden kann, kurz: Die Anwesenheit von Materie wird hier als Veränderung der Energieverteilung aufgefaßt, die weiter als *Veränderung der Raumzeitstruktur selbst* und damit (gemäß Äquivalenzprinzip) als Gravitationsfeld interpretierbar wird. Auf diese Weise wird die charakteristische *Feldwirkung* der Materie verstehbar – man bedenke: Auch dort, wo die Materie *nicht* ist, entfaltet sie Wirkungen; genau dies ist ja im Begriff des Feldes enthalten, das sicher eines der am schwersten zu begreifenden Naturphänomene darstellt.

Es ist naheliegend, hier nach *Bildern und Gleichnissen* zu suchen. So ist das metrische Feld gelegentlich mit einem Gummituch verglichen worden: Legt man eine Masse darauf, so dehnt und krümmt es sich auch in der näheren und weiteren Umgebung derselben. Solche Veränderungen in der metrischen Struktur des Gummituchs können gleichsam als das von der Masse hervorgerufene ›Feld‹ interpretiert werden, das auch dort existiert, wo die Masse selbst nicht ist. Wie ist das möglich? In Anlehnung an das betrachtete Beispiel offenbar dadurch, daß die physikalische Raumzeit keineswegs, wie schon bemerkt, ›Vakuum‹ im Sinne eines schlechthin Leeren ist, wie die unmittel-

bare Anschauung nahelegt, sondern internen *Zusammenhang* besitzt, vielleicht in der Art eines energetischen Gleichgewichts oder auch einer stationären Strömung, so daß eine lokale Störung zu Strukturveränderungen des sogenannten Vakuums führt, die sich auch in der Umgebung auswirken. In der Elementarteilchenphysik gibt es Ansätze zur *Erklärung* solcher Mechanismen, die – das gilt es zu beachten – von der Relativitätstheorie *nicht* begründet, sondern *vorausgesetzt* werden.

Um ferner die *anziehende Wirkung* zwischen Massen zu illustrieren, sei ein Beispiel aus dem Wirtschaftsleben gewählt. Auch ein Wirtschaftsunternehmen, so könnte man sagen, entwickelt eine Art Feldwirkung, indem es die Strukturen des Marktes, und das heißt ja, seiner eigenen Umgebung, beeinflußt. Unternehmen (derselben Branche), die um denselben Markt konkurrieren, üben dadurch Wirkungen aufeinander aus. Insbesondere ist dabei eine *Tendenz zur Fusionierung* zu beobachten, ein Sachverhalt, der gewissermaßen energetisch bedingt ist; denn unter dem Aspekt des Aufwands ist es einfach günstiger, ein großes Unternehmen zu organisieren als viele kleinere. Die in der Wirtschaft überall wirksame Tendenz zur Konzentration von Firmen läßt sich so gleichsam auf energetische Gründe und damit zusammenhängende Marktstrukturen zurückführen und stellt insofern auch eine Art Gravitationswirkung dar²¹.

Man kann in diesem Zusammenhang auch an die früher schon erwähnte Interpretation gravitativer Phänomene durch Hegel erinnern: Die *reale Verschiedenheit* materieller Körper, so Hegel, sei im Widerspruch zu ihrer *ideellen Identität*, die darin bestehe, daß alle gleichermaßen Körper sind. Im Körpersein liege daher immer schon die Tendenz zur Aufhebung der Verschiedenheit und Vereinzelung, und ebendies sei das Phänomen der Massenanziehung. Mit Bezug auf das zuvor angegebene Gleichnis könnte man so interpretieren: Die Existenz vieler gleichartiger Wirtschaftsunternehmen in derselben Region steht im Widerspruch zum Prinzip ökonomischer Einheitlichkeit und fördert so die Tendenz zur Aufhebung der Vereinzelung und Konzentration in *einem* Unternehmen.

Nun, das alles sind natürlich nur Plausibilitätsargumente, die als solche nichts beweisen, aber vielleicht doch einen Verständnisszugang zu diesem außerordentlich schwer zu begreifenden Phänomen eröffnen können.

Das Gleichnis gravitierender Wirtschaftsunternehmen ist im übrigen auch geeignet, den Gedanken der Geometrisierung des Gravitationsfeldes zu illustrieren. Denn die Existenz von Wirtschaftsunternehmen bedeutet unvermeidlich Strukturveränderungen des Marktes, oder, physikalisch gewendet, der Raumzeitstruktur, die dergestalt *nichts Selbständiges* gegenüber der Materie, sondern *durch diese bestimmt* ist.

V

Im Grunde ist das schon im Bewegungsbegriff antizipiert, der einerseits eine Beziehung von Raum und Zeit darstellt und andererseits die Existenz von Materie als Bezugsinstanz von Bewegung voraussetzt. Raum und Zeit einerseits und Materie andererseits haben also, *prinzipientheoretisch* gesehen, keinen voneinander unabhängigen Sinn, sondern gehören unter dem Aspekt des Bewegungsbegriffs wesentlich zusammen. Aber erst durch die Allgemeine Relativitätstheorie ist dem *auch physikalisch* Rechnung getragen: Durch die *Spezielle* Relativitätstheorie waren zunächst Raum und Zeit als aufeinander bezogene Hinsichten nachgewiesen und zu einer ganzheitlichen Raumzeitstruktur verbunden worden, während die Materie noch als eine davon unabhängige Entität verstanden und vorausgesetzt war. Demgegenüber ist es eine der Grundeinsichten der *allgemeinen* Theorie, daß die Raumzeitstruktur nichts Selbständiges gegenüber der Materie sein kann, sondern konstitutiv *durch diese bestimmt* ist. Auch Materie und Raumzeit sind danach nun als wesentlich verknüpft zu denken. Diese mit der Geometrisierung der Gravitation erreichte *Vereinheitlichung* des physikalischen Weltbilds ist in prinzipientheoretischer Hinsicht vielleicht das wichtigste Resultat der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Zugleich ist damit ein *kosmologischer Aspekt* involviert: Daß nämlich die Raumzeitstruktur Einstein zufolge durch die in ihr vorhandene *Gesamtmasse* und deren Verteilung bestimmt ist, führt unmittelbar auch zu *Modellen der Welt im ganzen*. In diesem Zusammenhang sind überraschende und sich der Vorstellung weithin entziehende Sachverhalte sichtbar geworden, z.B. die Möglichkeit eines *geschlossenen Universums*, einer *zirkulären Zeitstruktur* oder auch unüberschreitbarer *Ereignishorizonte*. Zweifellos ist derartige für unser Natur- und Weltverständnis und damit auch philosophisch von höchstem Interesse. Aber ich kann an dieser Stelle nicht näher darauf eingehen, sondern muß mich auf die Prinzipien Diskussion beschränken.

Wenn nun die Raumzeit, wie dargelegt, nichts Selbständiges gegenüber der Materie ist, dann muß sich weiter die Vermutung aufdrängen, daß *die Materie umgekehrt auch von der Raumzeit abhängig* ist: Dies entspricht einer schon vor Einstein formulierten Auffassung *E. Machs*²², die für Einstein mit ein entscheidendes Motiv zur Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie darstellte²³. Sie enthält die Annahme, daß die *Trägheit* eines Körpers keine gleichsam private, individuelle Eigenschaft desselben sein könne, sondern ebenfalls als eine Feldwirkung zu verstehen sei, induziert durch die kosmische Raumzeit insgesamt, die ihrerseits wiederum durch die Gesamtmaterie des Kosmos bestimmt ist: ein philosophisch wegen seines *holistischen* Charakters zweifellos äußerst attraktiver Gedanke, der die physische Welt als *einen* großen Zusammenhang, als Ganzheit, *Universum* denkt. Dieses sogenannte *Machsche Prinzip* wird von der Allgemeinen Relativitätstheorie, wie man inzwischen weiß, allerdings nicht auto-

matisch erfüllt. Sie formuliert aber empirische Bedingungen (z.B. eine hinreichend große Gesamtmasse), unter denen es in ihrem Rahmen gelten würde. Man hätte dann ein in sich geschlossenes Universum²⁴, ohne Grenzen, aber dennoch endlich, für das die alte Kantische Antinomie bezüglich der Endlichkeit oder Unendlichkeit der Welt nicht mehr formuliert werden könnte; ein selbsttragendes Ganzes, in welchem das Einzelne nicht nur das Ganze mitbedingt, sondern dieses umgekehrt seinerseits totaliter durch das Ganze bestimmt wäre; ein Verhältnis durchgängiger Wechselseitigkeit, kraft derer das Einzelne seine Individualität der überindividuellen Einheit alles Naturseienden verdankte. Ja, man könnte dies auch so ausdrücken, daß sich das *Innere* der Dinge, wenn man die Massenträgheit einmal so nennen darf, gerade nicht zeigt, wenn man die Dinge öffnete, um hineinzuschauen, sondern nur im Blick auf dasjenige, was ihnen eher äußerlich zu sein scheint, sichtbar werden kann, nämlich das Gesamt der übrigen Dinge, mit denen sie in Wahrheit eine *innere Einheit* verbindet. Man ist auch hier wieder an Hegels Gedanken der ideellen Zusammengehörigkeit materiellen Seins erinnert, dessen reale Vereinzelung so gleichsam nur ein ›Oberflächenphänomen‹ darstellt.

Zusammenfassend läßt sich sagen: Dominiert in der Speziellen Relativitätstheorie der Gedanke der *Äquivalenz* der Bezugssysteme und damit freilich auch ein *Perspektivenpluralismus*, so ist die allgemeine Theorie darüberhinaus durch eine wesentlich *integrative Tendenz* bestimmt, wie sie in der *kosmologischen Verklammerung* von Raum, Zeit, Materie und Trägheit zum Ausdruck kommt. Das Phänomen des Lichts, als das Zentrum der speziellen Theorie, so könnte man pointiert sagen, ist nur die *abstrakte Aufhebung körperhafter Vereinzelung*, insofern es selbst zwar körperlos ist, die Pluralität der Körper andererseits aber bestehen läßt. Demgegenüber ist die Welt der allgemeinen Theorie wesentlich *Universum*, ein totales Beziehungsgefüge der Vereinzelten, das ebenso durch diese bedingt, wie umgekehrt diese auch bedingend ist. Der *Pluralismus* der speziellen Theorie ist in der allgemeinen Theorie in *Holismus* aufgegangen.

Einsteins Relativitätstheorie, so ist insgesamt festzustellen, hat nicht nur unser Alltagsverständnis von Raum, Zeit, Bewegung, Materie und Gravitation radikal in Frage gestellt und überdies zu einem ganz neuen physikalischen Weltbild geführt; sie ist auch, wie kaum eine andere physikalische Theorie, von allgemeinen *Prinzipien* her entworfen und der Philosophie dadurch besonders affin. *Naturphilosophie*, als die *Weise begreifenden Erkennens*, kann sich ja nicht auf Erfahrung berufen (Hegel 9.15), sondern hat vielmehr deren logische Durchdringung zum Ziel, und in diesem Sinne ist die Relativitätstheorie, die – im Unterschied etwa zur Quantentheorie – weithin rein apriorisch rekonstruierbar ist, eine besonders philosophische Form der Physik und insofern ein *Glücksfall* für die Naturphilosophie.

Anmerkungen:

¹ Redigierte Fassung eines Beitrags zum Einstein-Kongreß des *Istituto Italiano per gli Studi Filosofici*, Neapel, Februar 1986.

² Bezüglich eines operationalen Kriteriums für den Inertialcharakter von Bezugssystemen s. Anm. 18.

³ Eine Vorwegnahme des Relativitätsprinzips findet sich schon bei Cusanus aufgrund der Überlegung, daß die Natur, als ein Nicht-Absolutes, kein festes, unbewegliches Zentrum besitzen könne (Cusanus, *Philosophisch-theologische Schriften*, ed. L. Gabriel, Wien 1964, Bd. I, 391 ff., 397; vgl. auch V. Hösle 1984, *Wahrheit und Geschichte*, Stuttgart 1984, 697).

⁴ M. Wertheimer 1964, *Produktives Denken*, Frankfurt a.M. 1964, 205.

⁵ Ein Problem, das auch durch Einsteins Plausibilitätsüberlegungen zur Bezugssystemabhängigkeit der Gleichzeitigkeitsdefinition nicht geklärt wird, da die Absolutheit der Lichtbewegung hierfür vorausgesetzt ist; vgl. A. Einstein/L. Infeld 1956, *Die Evolution der Physik*, Hamburg 1956, 120.

⁶ Hierzu P. Mittelstaedt 1976, *Der Zeitbegriff in der Physik*, Mannheim/Wien/Zürich 1976, Kap. 4.2 f.; D. Wandschneider 1982, *Raum Zeit Relativität*, Frankfurt a.M. 1982, Kap. 5.5.

⁷ Vgl. Kant, *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft*, Akademie-Ausgabe Bd. IV, S. 487. Rein konstatierenden Charakter haben auch die sogenannten ›protophysikalischen‹ Erwägungen bei P. Janich 1969, *Die Protophysik der Zeit*, Mannheim/Wien/Zürich 1969, 64.

⁸ Hierzu ausführlich Wandschneider 1982, Kap. 4.1 und 4.2.

⁹ Zitiert nach der *Hegel-Werkausgabe* in 20 Bänden, ed. E. Moldenhauer/K. M. Michel, Frankfurt a.M. 1969 ff., 9.60 Zus., verweist auf Bd. 9, S. 60, Zusatz zum Text.

¹⁰ Darum kann Zenon von Elea den ›fliegenden Pfeil‹ durchaus als ruhend betrachten, aber er irrt, wenn er ihm deshalb Bewegung überhaupt abspricht; hierzu Wandschneider 1982, Kap. 4.3.

¹¹ Das Licht kann nach heutiger Auffassung auch Partikelform annehmen, doch besitzt ein solches ›Photon‹ dann keine ›Ruhemasse‹ und kann darum nicht Bezugsinstanz von Bewegung sein.

¹² Hierzu M. J. Petry 1987, Hegels Verteidigung von Goethes Farbenlehre gegen Newton, in: M. J. Petry (ed.), *Hegel und die Naturwissenschaften*, Stuttgart 1987.

¹³ J. N. Findlay 1964, *Hegel. A Re-Examination*, London 1964, 279.

¹⁴ In den hier entwickelten Überlegungen ist nur der Bewegungsbegriff thematisiert. Die Physik kann dabei natürlich nicht stehenbleiben, sondern muß die Betrachtung auch auf komplexere Vorgänge ausdehnen. Die Äquivalenz der Inertialsysteme zeigt sich diesbezüglich dann darin, daß gleichartige Prozesse in allen diesen Systemen gleich ablaufen: Mit dieser weiteren Fassung des ›Relativitätsprinzips‹ (vgl. Mittelstaedt 1976, 65 ff.) ist also ebenfalls eine Form von *Absolutheit* (im Sinne der Invarianz gegen einen Wechsel des Bezugssystems) involviert, die der Absolutheit der Lichtbewegung korrespondiert.

¹⁵ Vgl. Wandschneider 1982, Kap. 3.1 und 3.2.

¹⁶ Vgl. H. Minkowskis berühmtes Diktum: ›Von Stund an sollen Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbständigkeit bewahren‹ (H. Minkowski 1908, *Raum und Zeit*, in: *Das Relativitätsprinzip. Abhandlungen von A. Einstein et al.*, Darmstadt 1958, 54).

¹⁷ A. Einstein 1911, Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes, in: *Das Relativitätsprinzip*, 72 ff.

¹⁸ Das hat insbesondere zur Folge, daß die Lichtgeschwindigkeit in Nichtinertialsystemen nun keine globale Konstante mehr ist. Auf diese Weise hat man im übrigen auch ein operationales Kriterium für den Inertialcharakter eines Bezugssystems; hierzu Wandschneider 1982, Kap. 5.10.

¹⁹ Wegen der Inhomogenität eines durch Massen erzeugten Gravitationsfeldes ist dieses bekanntlich nur noch *lokal* (im kleinen) einem Beschleunigungsfeld äquivalent.

²⁰ Daß die ihrer Trägheit überlassenen, also rein inertial bewegten, unbeschleunigten Bezugsinstanzen *gleichwertig* sind, wird deutlich, wenn nicht nur *Bezugskörper*, sondern komplette *Bezugssysteme* betrachtet werden. Der Charakter der Gleichwertigkeit erscheint dann in Form gewisser *Symmetrieeigenschaften* (Homogenität, Isotropie des Raumes u.ä.); vgl. H. J. Treder 1974, *Philosophische Probleme des physikalischen Raumes*, Berlin 1974, Kap. 28.

²¹ Eine andere Möglichkeit der Veranschaulichung bieten benachbarte Biasen auf einer Flüssigkeitsober-

fläche; diese zeigen die Tendenz, sich zu einer großen Blase zu vereinigen.

²² E. Mach 1973, *Die Mechanik*, Darmstadt 1973, 222 ff.; hierzu auch B. Kanitscheider 1971, *Geometrie und Wirklichkeit*, Berlin 1971, 221 ff.

²³ Vgl. A. Einstein 1916, Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, in: *Das Relativitätsprinzip*, 82 f.

²⁴ Instruktiv H. Hönl 1966, Das Machsche Prinzip und seine Beziehungen zur Gravitationstheorie Einsteins, in: H.-J. Treder (ed.) 1966, *Einstein-Symposium*, Berlin 1966. Hönl kommt zu dem Ergebnis: »Alle räumlich geschlossenen endlichen Weltmodelle genügen dem Machschen Prinzip« (266, gesperrt). »Man darf also wohl behaupten, daß man aufgrund solcher Überlegungen in die Lage versetzt ist, das Auftreten von Trägheitskräften im Kosmos wirklich zu »verstehen« (270).