VOM NEWTONSCHEN EIMERVERSUCH
ZUR QUANTENTHEORIE DES UNIVERSUMS:
DAS MACHSCHE PRINZIP[1]

Ulrich Bleyer
WIP-Projekt der Universität Potsdam
Dierck-Ekkehard Liebscher
Astrophysikalisches Institut Potsdam

1 Das Paradoxon

"Es widerstrebt dem wissenschaftlichen Verstande, ein Ding zu setzen, das zwar wirkt, aber auf das nicht gewirkt werden kann." Mit diesen Worten kommentiert A.Einstein die Forderung von E.Mach, den Begriff des absoluten Raums aus der Physik zu entfernen [15]. Diese Forderung, das Machsche Prinzip, ist in verschiedener Gestalt konstruktiv umgesetzt worden, hat sich aber einer befriedigenden Antwort bisher immer entzogen. Es ist das letzte große Prinzip der klassischen Physik, das einer solchen Antwort noch bedarf [4],[22]. Von der Begründung der Physik durch Newton bis zu den jüngsten Fragen der Bedeutung einer Quantentheorie des Universums spannte sich der Bogen der Fragen, die heute in Verbindung mit dem Machschen Prinzip diskutiert werden.

Obwohl das Machsche Prinzip besonders bei der Begründung der Einsteinschen Allgemeinen Relativitätstheorie eine große Rolle gespielt hat, ist es immer noch nicht eindeutig formuliert und schon gar nicht eindeutig theoretisch realisiert. Der Grund liegt darin, daß es mehr ein Paradoxon ist, dessen Lösung gefordert werden muß, aber nicht auf einfache Weise erreicht werden kann.

Das Paradoxon ist einfach erklärt: Die Drehung der Schwingungsebene eines Foucaultschen Pendels sagt uns, daß die Erde rotiert, auch wenn am Himmel keine Sterne uns Orientierung gestatteten. Vergleichen wir diese dynamische Rotation mit dem astronomischen Tageslauf, der kinematisch bestimmten Rotation, stellen wir überrascht fest, daß beide Rotationsgeschwindigkeiten übereinstimmen. Newton postulierte einen ansonsten bescheiden unsichtbaren absoluten Raum, dessen einzige Aufgabe es ist, die rotationsfreien Bewegungen zu definieren. Die Oberfläche der Wasserfüllung eines rotierenden Eimers krümmt sich zum Paraboloid nicht bei Bewegung gegen den Eimer, sondern bei Bewegung gegen den absoluten Raum. Der Fixsternhimmel kann seinerseits gegen den absoluten Raum nicht rotieren, weil die zu unterstellenden Fliehkräfte ihn zerreißen würden. Ernst Mach dagegen sah, daß der absolute Raum physikalisch nicht vermessen werden kann und eine Fiktion ist. Die inertialen Bezugssysteme Newtons können nur an reellen Objekten oder der Gesamtbewegung eines Massensystems fixiert werden. Es gibt nur Bewegung von Massen gegeneinander, Relativbewegungen, und alle Physik muß auf diesen aufgebaut werden. Der fiktiv rotierende Sternenhimmel spürt eben keine Fliehkraft, weil sich die relativen Postitionen der Sterne bei einer starren Rotation nicht verändern. Machs Forderung war, die Physik so zu schreiben, daß allein die Relativbewegungen physikalische Wirkung haben. Fliehkräfte entstehen dann nicht durch Rotation gegen einen absoluten Raum, sondern durch Rotation gegen die Gesamtheit der kosmischen Massen.

2 Machsche Mechanik

Die einfachste Lösung wäre, den Ausdruck für die kinetische Energie als Summe über Distanzänderungen zu schreiben. Dann ist die kinetische Energie allerdings nicht mehr eine einfache Summe über alle Massen

[1] Dies war der Titel einer internationalen, ausschließlich dem Machschen Prinzip gewidmeten Konferenz, die Ende Juli 1993 in Tübingen stattfand.

eines Systems,

$$E_{\text{kinetisch}} = \frac{1}{2} \sum_A m_A \dot{\mathbf{r}}^r_A,$$

sondern eine Summe über alle Paare von Körpern, geradeso wie die potentielle Energie des Schwerefeldes auch. Eine einfaches, aber charakterisierendes Beispiel [20],[21],[6] ist die Mechanik mit der Lagrangefunktion

$$L = E_{\text{kinetisch}} - E_{\text{potentiell}} = \frac{1}{2} \sum_{AB} \frac{m_A m_B}{r_{AB}} (1 + \alpha \frac{\dot{r}^2_{AB}}{c^2}). \tag{1}$$

Hier werden nur die Abstände zwischen den Massenpunkten und deren zeitliche Änderung anerkannt. Die einfachsten Eigenschaften einer solchen Mechanik sind

- Für ein einzelnes Teilchen in einem ansonsten leeren Kosmos gibt es kein Bewegungsgesetz, weil es keine Orientierungspunkte für irgendeine Bewegung gibt.
- Für zwei einzelne Teilchen in einem ansonsten leeren Kosmos gibt es nur eine Bewegungsgleichung für ihren Abstand, nicht etwa für eine Rotation umeinander: Es gibt keine Anhaltspunkte, an denen die Orientierung ihrer Verbindungslinie bestimmt werden könnte.
- Wie viele Teilchen das Massenpunktsystem auch hat, eine Rotation oder Bewegung als Ganzes ist nicht bestimmbar und geht in die Bewegungsgleichungen nicht ein: Der Kosmos rotiert nicht, nur Teile können gegen den Kosmos rotieren.
- Das Keplerproblem ist das Teilproblem der Bewegung eines Untersystems im Kosmos der übrigen Körper, deren es in der Realität überwältigend viele gibt.

Die Lagrange-Funktion (1) ist invariant, unveränderlich bei allen Bewegungen und Rotationen des Gesamtsystems, weil davon die Abstände der Körper untereinander nicht berührt werden. Wir sagen, diese Mechanik ist invariant gegen die kinematische Gruppe des euklidischen Raums.

Die Newtonsche Mechanik dagegen gründet auf die Lagrange-Funktion

$$L = \frac{1}{2} \sum_A m_A \dot{\mathbf{r}}^2_A + f \frac{1}{2} \sum_{AB} \frac{m_A m_B}{r_{AB}}.$$

Diese ist nicht invariant gegen die volle kinematische Gruppe des euklidischen Raums, sondern nur gegen die Galilei-Gruppe: nur Position, Orientierung und unbeschleunigte Translationsbewegung fallen aus der Bestimmung heraus, beschleunigte Translationsbewegung und starre Rotationsbewegung des Gesamtsystems sind dagegen bestimmt: Ihre Änderung erzeugt die Trägheitskräfte, die Newton – wie dargestellt – für den Existenzbeweis des absoluten Raums hielt.

Wie kommen nun in einer Machschen Mechanik die Trägheitskräfte zustande? Reduzieren wir die Mechanik (1) auf ein kleines Teilsystem des Kosmos (etwa das Sonnensystem). Dann zerfällt die Summe über alle Teilchenpaare AB in drei Summanden. Der erste enthält die Paare, deren Teilchen beide zum umgebenden Kosmos gehören. Er verändert sich nicht bei Bewegung des Teilsystems und fällt aus dessen Bewegungsgleichung heraus. Der zweite Summand enthält die Paare, deren Teilchen beide zum Teilsystem gehören. Er ist die bekannte Newtonsche potentielle Energie, korrigiert durch einen kleinen geschwindigkeitsabhängigen Term (der schließlich die Periheldrehung des Merkur liefert). Der entscheidende dritte Summand enthält die Paare, bei denen ein Teilchen zum Kosmos, das andere zum untersuchten Teilsystem gehört. Es liefert bei einem isotropen Kosmos die gewöhnliche kinetische Energie, wobei die effektive träge Masse eine Funktion des Potentials des Kosmos wird:

$$m_{A\ \text{träge}} = m_A \sum_{B \in \text{Kosmos}} \frac{f m_B}{c^2 r_{AB}} \tag{2}$$

Die Invarianz des Teilsystems ist nicht mehr die volle (teleskopische) Invarianz des Kosmos, sondern auf die Galilei-Invarianz gebrochen. Der Kosmos – das klassische Vakuum für das Teilsystem – hat eine Struktur, die die teleskopische Invarianz bricht: Das Teilsystem erhält durch den Kosmos Position und Orientierung.

Mit diesem Beispiel ist nun das Machsche Prinzip voll modelliert. Es ist aber bei weitem zu einfach, um den Tatsachen voll zu entsprechen. Die ersten dieser Tatsachen sind:

- Die induzierte Masse (2) verändert sich mit der Expansion des Kosmos, was effektiv einer zunehmenden Gravitationskonstanten entspricht.
- Die induzierte Masse ist anisotrop, wenn der Kosmos nicht vollständig isotrop ist (die wichtigste Anisotropie kommt durch unsere Galaxis selbst zustande, deren Potential $\Phi = \frac{fM}{rc^2}$ die Größenordnung 10^{-6} hat).
- Die (spezielle) Relativitätstheorie ist nicht berücksichtigt, das Gravitationsfeld ist instantan.

3 Zeit ohne Zeit

J.Barbour fand nun, daß es keinen Sinn macht, die absolute Position und Orientierung im Raum aufzugeben, diese aber für die Zeit beizubehalten. Damit leitete er eine Entwicklung ein, in der die Bewegung in der Zeit als reine Änderung der Konfiguration eines Systems aufgefaßt und die Zeit an dieser gemessen wird [3]. Hier greift er eine Darstellung wieder auf, wie wir sie aus dem Maupertuisschen Prinzip kennen: Die Bewegung im Raum ist eine kürzeste Linie, wobei das Maß auf dieser Linie die Lagrange-Funktion reflektiert, aber die Zeit nicht enthält. Die Bewegung durch den Raum der Konfigurationen ist bestimmt als Minimum des Integrals

$$S = \int \mathrm{d}t \sqrt{E - E_{\text{potentiell}}} \sqrt{2E_{\text{kinetisch}}}.$$

Dieses Integral hängt von der Zeit nicht explizit ab: t ist hier nur ein Parameter, für den beliebig ein anderer substituiert werden könnte. Die kinetische Energie metrisiert den Konfigurationsraum mit der Metrik

$$\mathrm{d}s^2_{\text{Maupertuis}} = 2(E - E_{\text{potentiell}})E_{\text{kinetisch}}\mathrm{d}t^2, \tag{3}$$

aus der sich die Zeit herauskürzt. Ist eine Integralkurve gefunden, bestimmt ds den Zeitablauf. Das ist aber die bekannte Formel für die Ephemeridenzeit.

Dies führt nun aber sofort auf die allgemeine Relativitätstheorie. Setzt man nämlich als Konfigurationsraum den Superraum aller (lokal beliebig gekrümmter) Geometrien[2] eines dreidimensionalen Raums ein und bestimmt deren Abstand unter Berücksichtigung der Freiheit in der Koordinatenwahl in diesen Räumen, erhält man[3]

$$\mathrm{d}s^2_{\text{Maupertuis}} = \int \mathrm{d}^3x\ {}^3R\ G^{abcd}\mathrm{d}K_{ab}\mathrm{d}K_{cd}$$

mit

$$G^{abcd} = \frac{1}{2}\sqrt{h}(h^{ac}h^{bd} + h^{ad}h^{bc} - 2h^{ab}h^{cd})$$

und

$$\mathrm{d}K_{ab} = N_{(a|b)}\mathrm{d}\lambda - \mathrm{d}h_{ab}$$

Diese Maupertuissche Metrik im Superraum [2],[5],[12] bestimmt in modifizierter Form die klassische Bewegung des Gravitationsfeldes

$$\mathrm{d}s^2 = -(N^2 - N_iN^i)\mathrm{d}t^2 + 2N_i\mathrm{d}x^i\mathrm{d}t + h_{ij}\mathrm{d}x^i\mathrm{d}x_j$$

[2] Als Geometrie bezeichnen wir hier eine Metrik $h_{ij}[x]$ modulo der offen bleibenden Koordinatentransformationen.

[3] Die "Geschwindigkeit" ist $\frac{\partial h_{ij}}{\partial t}$, der koordinatenfreie Anteil $K_{ij} = \frac{\partial h_{ij}}{\partial t} - N_{i|j} - N_{j|i}$. Die Funktionen N^i müssen bestimmt werden und vermitteln dann zusammen mit der Bestimmung einer Art Ephemeridenzeit den Zusammenhang zwischen Raum-Zeit und Superraum. Der potentiellen Energie entspricht die Krümmung des dreidimensionalen Raums ${}^3R = h^{ik}\,{}^3R^l_{ikl}$.

mit der Wirkung

$$S = \int \mathrm{d}\lambda \int \mathrm{d}^3x \sqrt{{}^3RG^{abcd}(\frac{\partial g_{ab}}{\partial \lambda} - N_{(a|b)})(\frac{\partial g_{cd}}{\partial \lambda} - N_{(c|d)})} \qquad (4)$$

und ist die vollständige Lösung des Problems, wie sich die Metriken des Raumes ausschließlich relativ zueinander bestimmen und verändern und dabei das Maß des Zeitablaufs gleich mit ergeben. Ein besonderer Reiz dieses Ergebnisses liegt in der Möglichkeit, die kanonische Quantentheorie des Gravitationsfeldes zu interpretieren, in der die der Schrödinger-Gleichung entsprechende Wheeler-deWitt-Gleichung keine Zeitabhängigkeit enthält, sondern nur Wahrscheinlichkeitsamplituden im Superraum liefert. Das Machsche Prinzip unterstützt aus dieser Sicht das dreidimensionale Konzept der kanonischen Quantisierung des Gravitationsfeldes.

4 Maß durch Masse

Angesichts des Ausgangsproblems könnte man mehr verlangen: Schließlich ist die Metrik $\mathrm{d}s^2 = g_{\mu\nu}\mathrm{d}x^\mu \mathrm{d}x^\nu$ in der Allgemeinen Relativitätstheorie Ausdruck der Orientierung des Inertialsystems und sollte sich nicht an sich selbst, sondern an der Massenverteilung bestimmen, die in einer Relativitätstheorie immer die Verteilung des Energie-Impuls-Tensors $T_{\mu\nu}$ ist. Die Einsteinschen Gleichungen stellen dies auf dem Niveau einer Differentialgleichung ohne weiteres fest[4]

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \kappa T_{\mu\nu}. \qquad (5)$$

Die Metrik, d.h. die Konfiguration der Inertialsysteme, ist dadurch aber noch nicht ausreichend bestimmt. Wir brauchen Randbedingungen, die dies tun, und führen damit durch die Hintertür den absoluten Raum wieder ein. Eine wichtige Aufgabe ist es deshalb, nach Umständen zu suchen, unter denen diese Angabe von Randbedingungen entfallen kann. Sie heißt Integralformulierung der Einsteinschen Gleichungen und gelingt im wesentlichen nur für Raum-Zeiten mit geschlossenen Raumschnitten, also etwa kosmologischen Modellen, die vom Einstein-Kosmos abstammen. Ungeachtet der Erkenntnisse, die man bei der Verfolgung dieser Aufgabe sammelt, kann das Ergebnis eben nur Auswahl aus der Gesamtheit der Lösungen der Einsteinschen Gleichungen lauten, und das ist eine Vorstellung, die anderen Feldtheorien fremd ist.

5 Der dicke Eimer

"Niemand kann sagen, wie der (Eimer-)Versuch verlaufen würde, wen die Gefäßwände immer dicker und massiger und zuletzt mehrere Meilen dick würden" schreibt E.Mach als Urteil über Newtons Gedankenversuch. Dies mit Zahlenwerten zu versehen, hat die Allgemeine Relativitätstheorie bereits im ersten Anlauf erreicht. Sie kann ohne weiteres beschreiben, wie der Eimer Newtons die Konfiguration der Inertialsysteme und mit ihr die Flüssigkeit beeinflußt, wenn seine Masse (genauer sein Gravitationspotential) relevant anwachsen. Dazu vergleicht man Lösungen mit verschieden schnell und verschieden massiv rotierenden Quellen und berechnet den Effekt auf etwa ein frei fallendes Gyroskop (Lense-Thirring-Effekt [13],[18],[19]), der allerdings meßtechnisch vom Effekt der Raumkrümmung getrennt werden muß. Satellitenexperimente sind projektiert, die zwar die nötige Meßgenauigkeit erreichen, aber immer noch wenigstens eine Größenordnung von der Finanzierung entfernt sind. Man kann nun eine Komponente des Schließfehlers der Inertialsysteme im Gravitationsfeld rotierender Objekte immer als Machschen Effekt titulieren, der entscheidende Punkt bleibt, daß der Grenzfall des rotierenden Kosmos nicht gefaßt ist, und das liegt gerade an der Schwierigkeit, Rotation überhaupt

[4]Der Ricci-Tensor ist die Spur $R_{\mu\nu} = R^\rho_{\mu\nu\rho}$ des Riemannschen Krümmungstensors $R^\lambda_{\mu\nu\rho}$, der die Drehung eines Vektors bei Paralleltransport um eine infinitesimale geschlossene Linie beschreibt:

$$\mathrm{d}A^\lambda = R^\lambda_{\mu\nu\rho} \mathrm{d}f^{\nu\rho} A^\mu.$$

ohne Grenzbedingungen zu beschreiben. Hier ist die Stelle daran zu erinnern, daß der die Rotation eine besonders sperrige Eigenschaft hat: Der Drehimpuls hat eine diskrete Quantenzahl.

6 Gesetztes und Erklärtes

Die geschichtliche Entwicklung von der Newtonschen Mechanik zur Allgemeinen Relativitätstheorie kann man als wiederholte Zurücknahme absoluter Elemente aus der Physik verstehen: Die Spezielle Relativitätstheorie entfernte die absolute Gleichzeitigkeit der Newtonschen Mechanik und ersetzte das formale Produkt aus Raum und Zeit durch eine tatsächliche Union, wie es H.Minkowski nannte. Dabei wurde die absolute Geschwindigkeitsmessung, die in der Verbindung von Mechanik und Elektrodynamik möglich erschien und die von A.Michelson und anderen gesucht aber nicht gefunden wurde, als ausgeschlossen erkannt und die Relativität der Geschwindigkeit anerkannt. Die Allgemeine Relativitätstheorie klärte die lokale Relativität der Beschleunigungen als Folge der lokalen Äquivalenz von Trägheit und Schwere. Die Tatsache daß alle Körper gleich schnell fallen, erlaubt nur die Messung einer Relativbeschleunigung, das heißt einer Gezeitenkraft [8]. Führt nun das Machsche Prinzip über die Allgemeine Relativitätstheorie hinaus? Muß man das Machsche Prinzip als Programm auffassen, stufenweise die absoluten Elemente einer Theorie als Ergebnis einer zu verallgemeinernden Dynamik zu erklären?

Das absolute Element der Allgemeinen Relativitätstheorie ist die (lokale) Lorentz-Invarianz der Inertialsysteme, die Existenz einer eindeutigen Metrik der Raum-Zeit, die die Gültigkeit der speziellen Relativitätstheorie im Infinitesimalen festschreibt. Unter diesem Gesichtspunkt heißt das Machsche Programm, die lokale Lorentz-Invarianz durch umfassendere Invarianz zu ersetzen und die lokale Lorentz-Invarianz als Ergebnis einer (klassischen) Symmetriebrechung aufzufassen, die nur für (im kosmischen Sinne) kleine Raum-Zeit-Gebiete festgestellt werden kann. Dies entspricht unmittelbar der oben besprochenen Machschen Mechanik, hat nun allerdings eine feldtheoretische Grundlage.

Die einfachste Erweiterung der Lorentz-Invarianz ist die Konform-Invarianz. Sie erwartet, daß alle Bewegungs- und Feldgleichungen nicht nur unbeeindruckt von Lorentz-Transformationen bleiben, sondern sich auch bei lokalen Neuskalierungen (im speziellen der Masse) nicht verändern. Solche Theorien verlangen im wesentlichen nach einem zusätzlichen skalaren Feld, das die aktuell durch die Symmetriebrechung festgelegte Skalierung beschreibt. Es sind Skalar-Tensor-Theorien für das Gravitationsfeld – im Gegensatz zur Allgemeinen Relativitätstheorie, die eine reine Theorie für den metrischen Tensor $g_{\mu\nu}$ ist. Die Brans-Dicke-Theorie [7] und die Hoyle-Narlikar-Theorie [10],[11] sind die wichtigsten Vertreter. Unabhängig von den beobachtungsseitigen Schwierigkeiten ist eine konforminvariante Theorie nur eine ganz elementare Erweiterung der Allgemeinen Relativitätstheorie, die an der alles entscheidenden Kausalstruktur nichts ändert und alle Rechnungen ganz konventionell erscheinen läßt.

Viel spannender wird es, wenn nicht nur die lokale Skala auf dem Lichtkegel durch die kosmisch induzierte Symmetriebrechung bestimmt wird, sondern die Existenz des Lichtkegels selbst. Dies geschieht etwa in einer Theorie, in der zunächst ausschließlich die affinen Zusammenhänge eine Rolle spielen, das einfachste dynamische Element also das Verhältnis zweier Raum-Zeit-Volumina ist [14]. In einer solchen Theorie gibt es keine Kausalität außerhalb der Begrenzung auf ein kosmisch kleines Gebiet, und die Existenz der Zeit wie der kausalen Ordnung ist eine Frage der Existenz und der Symmetrie des Kosmos. Es gibt keine Theorie für diesen Teil des Programms, aber man kann charakteristische Effekte bestimmen. Ist nämlich die lokal beobachtete Lorentz-Invarianz nicht ideal, weil der umgebende Kosmos nicht ideal homogen und isotrop ist (und wenigstens unsere Galaxis stört mit ihrem Potential von etwa 10^{-6}), muß es Feldkomponenten geben, deren maximale Ausbreitungsgeschwindigkeit nicht mit der abstrakten Signalgeschwindigkeit übereinstimmt. Wir können also nach einer komponentenabhängigen Signalgeschwindigkeit suchen [1]. Erst eine fertige Theorie kann aber entscheiden, welche Feldkomponenten die maximal meßbare Abweichung liefern und ob es auch eine induzierte Anisotropie der Masse geben muß (die in einigen Komponenten bereits als kleiner 10^{-24}

festgestellt worden ist).

Wenn von Symmetriebrechung die Rede ist, taucht die Frage auf, ob es nicht der Higgs-Mechanismus ist, der für eine Symmetriebrechung verantwortlich gemacht werden muß. Eine solche Theorie ([16], [17]) verzichtet auf den Kosmos als Orientierung und bleibt in diesem Sinne lokal, hat aber dafür das Problem, die Kohärenzlänge des symmetriebrechenden Feldes zu erklären, das im Grunde den absoluten Raum in neuem Gewande darstellt.

Bleibt es also festzuhalten, daß das Machsche Prinzip nach wie vor zu anregender Diskussion und verblüffenden Einsichten Anlaß gibt und geben wird, auch wenn auf der Tagung Referees zitiert wurden, die den Ratschlag geben: "Drop the notion Mach's principle, and the paper will be accepted."

References

[1] Audretsch,J., Bleyer,U., Lämmerzahl,C. (1993): Testing Lorentz invariance with atomic beam interferometry, *Phys.Rev. A* **47**, 4632-4636.

[2] Baierlein,R.F., Sharp,D.H., Wheeler,J.A. (1962): Three-dimensional geometry as carrier of information about time. *Phys.Rev.* **126**, 1864-1865.

[3] Barbour,J.B. (1979): Mach's Mach's principles, especially the second, *in: J.Nickel, J.Pfarr, J.Nitsch (eds.): P.Mittelstaedt Festschrift*, Bibl.Inst.Mannheim.

[4] Barbour,J.B. (1990): *Absolute or Relative Motion? Vol.1: The Discovery of Dynamics*, Cambridge UP.

[5] Barbour,J.B. (1992): The emergence of time and its arrow from timelessness, *in: Physical origins of time asymmetry, Proc.*, Cambridge UP.

[6] Barbour,J.B., B.Bertotti (1977): Gravity and inertia in a Machian framework, *Nuovo Cim. B* **38**, 1-27.

[7] Brans,C.H., Dicke,R.H. (1961): Mach's principle and a relativistic theory of gravitation, *Phys.Rev.* **124**, 925-935.

[8] Ehlers,J. (1993): Relations between Machian ideas and general relativity, *Vortrag*, Tübingen, Tagung "Mach's Principle".

[9] Einstein,A. (1955): *The meaning of relativity*, 5th ed. Princeton UP.

[10] Hoyle,F., Narlikar,J.V. (1963): Mach's principle and the creation of matter, *Proc.Roy.Soc.(London) A* **273**, 1-11.

[11] Hoyle,F., Narlikar,J.V. (1974): *Action at a distance in Physics and Cosmology*, Freeman, New York.

[12] Kuchar,K. (1993): Canonical gravity and the definition of time, *Vortrag*, Tübingen, Tagung "Mach's Principle".

[13] Lense,J., Thirring,H. (1918): Über den Einfluß der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie, *Phys.Z.* **19**, 156-163.

[14] Liebscher,D.-E., Yourgrau,W. (1979): Classical spontaneous breakdown of symmetry and the induction of inertia, *Ann.d.Phys.(Lpz.)* **36**, 16.

[15] Mach,E. (1883): *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, Leipzig.

[16] Ne'eman,Y., Sijacki,Dj. (1988): Gravity from symmetry breakdown of a gauge affine theory, *Phys.Lett. B* **200**, 489-494.

[17] Peldan,P. (1990): Gravity coupled to matter without the metric, *Phys.Lett. B* **248**, 62-66.

[18] Pfister,H., Braun,K.H. (1985): *Class.Quant.Grav.* **2**, 909.

[19] Pfister,H., Braun,K.H. (1986): *Class.Quant.Grav.* **3**, 335.

[20] Schrödinger,E. (1925): Die Erfüllbarkeit der Relativitätsforderungen der klassischen Mechanik, *Ann.d.Phys.(Lpz.)* **79**, 325-336.

[21] Treder,H.-J. (1972): *Die Relativität der Trägheit*, Akademie Verlag Berlin.

[22] Treder,H.-J. (1974): *Über die Prinzipien der Dynamik von Einstein, Hertz, Mach und Poincaré*, Akademie Verlag Berlin.