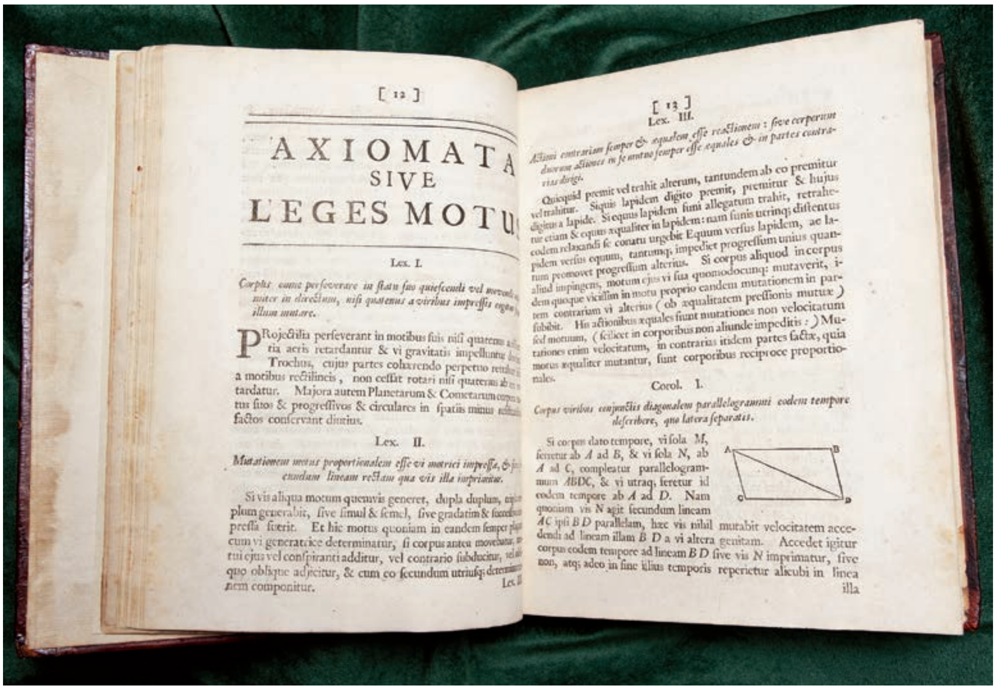
Lange nach Newton

Das schwer fassbare, aber außerordentlich reichhaltige Trägheitsgesetz

Herbert Pfister

Newton setzte für die ersten beiden seiner Axiome einen „absoluten Raum“ voraus. Das erste Axiom stellt das Phänomen der Trägheit fest, während das zweite Kräfte als Ursachen von Impulsänderungen identifiziert. Bei Verzicht auf den absoluten Raum muss man an seiner Stelle bevorzugte Bezugssysteme einführen, die Inertialsysteme. Ihre Definition erfordert große Sorgfalt, um experimentell belegbar, dabei aber nicht zyklisch zu werden. Erst die Allgemeine Relativitätstheorie lieferte eine befriedigende Alternative.


[12]
AXIOMATA
SIVE
LEGES MOTU
Lex. I.
Lex. II.
[13]
Lex. III.
Corol. I.

Diese beiden Seiten aus Newtons *Principia Mathematica* von 1687 enthalten die drei fundamentalen Axiome der Bewegung.

Newton, Isaac, Samuel Pepys, and Joseph Streater. 1687. Philosophiae naturalis principia mathematica. Londini: Jussu Societatis Regiae ac Typis Josephi Streater. John J. Burns Library, Boston College

Das Trägheitsgesetz, das so grundlegend in die klassische Mechanik eingeht, ist erstaunlich schwer auf eine logisch befriedigende Weise zu fassen und wird auch in Lehrbüchern häufig unzureichend dargestellt. Schon die Entdeckung des Trägheitsgesetzes war ein mühsamer und langwieriger Prozess. Im alten Griechenland stellte man sich die Frage, ob es in der Natur besonders ausgezeichnete, „natürliche“ Bewegungsformen von materiellen Körpern gebe. Man vermutete diese meist in Kreisbahnen, angelehnt an die scheinbaren Bewegungen der Himmelskörper. Ab dem 16. Jahrhundert analysierten vor allem italienische Philosophen und Physiker auch geradlinig-gleichförmige Bewegungen im Hinblick auf diese Frage. Dabei waren natürlich die unausweichlichen Gravitations- und Reibungseffekte in irdischen Laboren die wesentlichen Hindernisse. Galileo Galilei hat sich nach 1610 immer wieder und anhand verschiedenster Beispiele intensiv mit dieser Frage befasst und im 1632 veröffentlichten „Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme“ Formulierungen gefunden, die als erster Schritt zur Erkenntnis eines allgemeinen Trägheitsgesetzes gelten können. So lässt er sein *alter ego*, Salviati, am 2. Tag des Dialogs sagen, ein Schiff sei „daher bestrebt, nach Entfernung aller zufälligen und äußerlichen Hindernisse, mit der ihm einmal mitgeteilten Anfangsgeschwindigkeit unablässig und gleichförmig sich fortzubewegen.“ ([1], S. 155)

In der Folgezeit haben vor allem Descartes und Huygens das Trägheitsgesetz konkretisiert und die Vermutung geäußert, dass es sich um ein universelles Prinzip der Physik handele. Die explizite Formulierung des Trägheitsgesetzes als ein allgemeines und fundamentales Prinzip der Physik verdanken wir Isaac Newton, der 1687 in den *Principia* als Gesetz I feststellte: „Jeder Körper verharrt in seinem Zustand des Ruhens oder des Sich-geradlinig-gleichförmig Bewegens, außer insoweit wie jener von eingeprägten Kräften gezwungen wird, seinen Zustand zu verändern.“ ([2], S. 33)

Dieses Gesetz ist fast zwei Jahrhunderte lang im Wesentlichen unverändert überliefert worden. Zusammen mit den beiden anderen Newtonschen Axiomen hat es sich in unzähligen Anwendungen mit beispiellosem Erfolg bewährt. Trotzdem weist Newtons Formulierung wesentliche Mängel auf: Sie verrät nicht, bezüglich welcher Bezugssysteme das Gesetz gelte – sofern man nicht stillschweigend den im Scholion ([2], S. 28) eingeführten absoluten Raum zugrunde legt. So bleibt unklar, dass die eigentliche Aufgabe von Gesetz I die Einführung der Inertialsysteme ist, und was dabei Definition, was nichttriviales Faktum, wenn nicht sogar ein Wunder der Natur ist. Schließlich ist in Gesetz I von „eingeprägten Kräften“ die Rede, die aber erst in Gesetz II definiert sind, das schließlich nur in Inertialsystemen (gemäß Gesetz I) gültig ist. Newton selbst war sich zumindest pauschal dieser Mängel bewusst, wenn er im Vorwort zur *Principia* schreibt: „Ich möchte dringend darum bitten, daß alles unvoreingenommen gelesen wird und die Mängel bei

Prof. Dr. Herbert Pfister, Institut für Theoretische Physik, Universität Tübingen – Dieser Artikel kann dank der Mithilfe von **Prof. Dr. Matthias Bartelmann** (Universität Heidelberg) und **Prof. Dr. Markus King** (Hochschule Albstadt-Sigmaringen) nach Herbert Pfisters Tod erscheinen (Nachruf siehe Physik Journal, Januar 2016, S. 49).

Ernst Mach (1838 – 1916), dessen hundertster Todestag sich am 19. Februar dieses Jahres jährte, war einer der schärfsten Kritiker von Newtons absolutem Raum.

einem so schwierigen Gegenstand nicht so sehr getadelt als vielmehr durch neue Bemühungen der Leser erforscht und wohlwollend ergänzt werden.“ ([2], S. 4) Albert Einstein schrieb dazu 340 Jahre später anerkennend, „dass Newton selbst die seinem Gedankengebäude anhaftenden schwachen Seiten besser kannte, als die folgenden Gelehrten-Generationen.“ [3]

Tatsächlich sind aber viele Behandlungen des Trägheitsgesetzes nach Newton und leider auch in den meisten modernen Lehrbüchern der logischen Konsistenz bei Newton deutlich unterlegen. Oft genug wird zwar auf den absoluten Raum verzichtet, aber kein adäquater Ersatz dafür bereitgestellt. Eine besondere konzeptionelle Schwierigkeit liegt darin, dass es letztlich nicht *ein* besonders ausgezeichnetes Bezugssystem gibt, sondern eine unendliche Vielfalt, die sich aus der 10-parametrigen Galilei-Gruppe ergibt. Oft treten Tautologien und Zirkelschlüsse auf, im Gegensatz zu Newton wird nicht konsequent zwischen Definitionen und nichttrivialen Fakten der Natur unterschieden. Zudem bleibt ungeklärt, dass Newtons Gesetze I bis III je eigene und nichttriviale Naturphänomene beschreiben. Zu den Schwierigkeiten, das Trägheitsgesetz zu vermitteln, bemerkte bereits Heinrich Hertz in seinem Mechanik-Lehrbuch von 1894 treffend (S. 8)[1], dass es sehr schwer sei, „gerade die Einleitung in die Mechanik denkenden Zuhörern vorzutragen, ohne einige Verlegenheit, ohne das Gefühl, sich hier und da entschuldigen zu müssen, ohne den Wunsch, recht schnell über die Anfänge hinwegzugelangen.“ Selbst in etablierten Lehrbüchern finden sich unhaltbare Aussagen derart, dass zumindest die Newtonschen Gesetze I und II nur Definitionen seien (z. B. [4], S. 58).

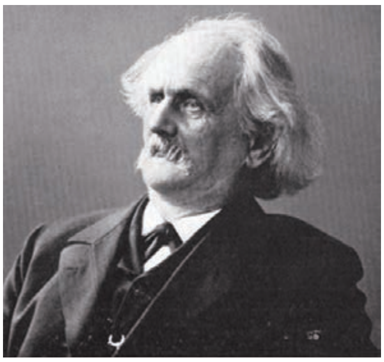
Langes vergessener Beitrag

Ab etwa 1870 haben einige Physiker substanzielle Kritik an Newtons absolutem Raum und der absoluten Zeit geübt und auch Ansätze für echte Klärungen präsentiert. Der schärfste Kritiker von Newtons absolutem Raum war sicher Ernst Mach, der Trägheit nur bezüglich anderer Massen konzipiert haben wollte. Ein charakteristisches Zitat aus seinem Buch „Die Mechanik in ihrer Entwickelung“ von 1883 lautet (S. 216)[2]: „Die mechanischen Grundsätze können also wohl so gefasst werden, daß auch für Relativdrehungen Zentrifugalkräfte sich ergeben. Der Versuch Newtons mit dem rotierenden Wassergefäß lehrt nur, daß die Relativdrehung des Wassers gegen die *Gefäßwände* keine merklichen Zentrifugalkräfte weckt, daß dieselben aber durch die Relativdrehung gegen die Masse der Erde und die übrigen Himmelskörper geweckt werden. Niemand kann sagen, wie der Versuch quantitativ und qualitativ verlaufen würde, wenn die Gefäßwände immer dicker und massiver, zuletzt mehrere Meilen dick würden.“

Mach hat aber keine konkrete Alternative zu Newtons Formulierungen entwickelt. Einen ersten Schritt in diese Richtung verdanken wir dem Mathematiker Carl Gottfried Neumann, der mit der Bemerkung, wir könnten „nämlich jetzt *gleiche Zeitintervalle* als diejenigen definiren, innerhalb welcher ein sich selbst überlassener Punkt gleiche Wegabschnitte zurücklegt“ [5] Newtons absolute Zeit durch eine konkrete, experimentelle Anleitung ersetzt. Merkwürdigerweise hat Neumann nicht versucht, mit ähnlichen Analysen auch Newtons absoluten Raum zu eliminieren. Angeregt durch Neumann hat Ludwig Lange (**Infokasten**) im Alter von 22 Jahren in mehreren Arbeiten, unter anderem in seiner Dissertation von 1886 an der Universität Leipzig, mit genialen Ideen einen echten Durchbruch erzielt. Er definierte erstmals die heutigen Standard-Begriffe „Inertialsystem“ und „Inertialzeit“ [6]:

- „*Definition I.* „Inertialsystem“ heißt ein jedes Coordinatensystem von der Beschaffenheit, daß mit Bezug darauf *drei* vom selben Raumpunkt projicierte und dann sich selbst überlassene Punkte P, P', P'' – welche aber nicht in einer geraden Linie liegen sollen – auf drei beliebigen in einem Punkt zusammenlaufenden Geraden G, G', G'' (z. B. auf den Coordinatenaxen) dahinschreiten.
- *Theorem I.* Mit Bezug auf ein Inertialsystem ist die Bahn *jedes beliebigen vierten* sich selbst überlassenen Punktes gleichfalls geradlinig.
- *Definition II.* „Inertialzeitscala“ heißt eine jede Zeitscala, in Bezug auf welche *ein* sich selbst überlassener auf ein Inertialsystem bezogener Punkt (etwa P) gleichförmig fortschreitet.
- *Theorem II.* In Bezug auf eine Inertialzeitscala ist *jeder beliebige andere* sich selbst überlassene Punkt in seiner Inertialbahn gleichförmig bewegt.“

Lange bemerkte auch, dass diese beiden Theoreme im Wesentlichen dasselbe aussagen, einmal bezüglich des Raums, einmal bezüglich der Zeit, und sich zu einer kompakten vierdimensionalen Form zusammenfassen lassen. Das Trägheitsgesetz ist ohnehin eines der wenigen Gesetze, die in der nichtrelativis-



Der Mathematiker Carl Neumann (1832 – 1925) regte den Physiker Ludwig Lange (1863 –1936) zu Überlegungen an, die zur Definition des Inertialsystems führten.

1) Online verfügbar auf bit.ly/1TntbKI

2) Online verfügbar auf bit.ly/1KUcU7U

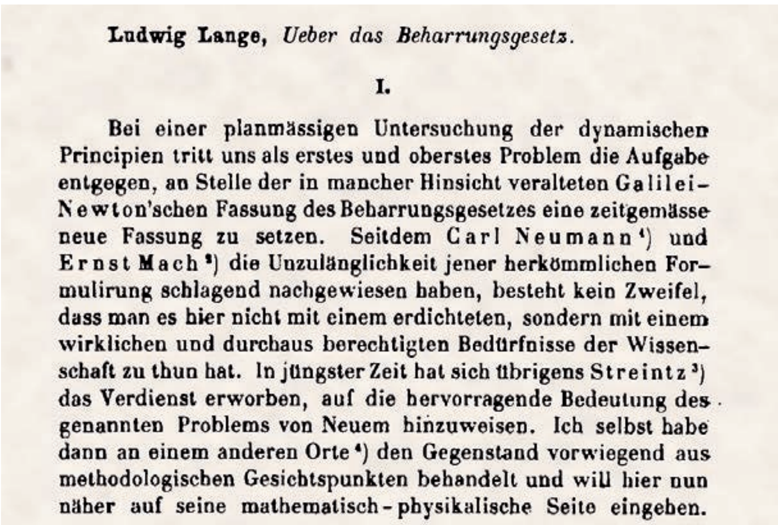
tischen und in der relativistischen Physik gleich lauten! Es ist gewissermaßen die Basis für *alle* Physik, da fast alle physikalischen Gesetze nur in Inertialsystemen gelten oder jedenfalls dort ihre einfachste Form annehmen.

Die große Leistung von Lange ist bis etwa 1910 vielfach und prominent gewürdigt worden, etwa von Mach, vom Astronomen Hugo von Seeliger, vom Logiker Gottlob Frege und vor allem von Max von Laue. Danach ist sie offenbar in Vergessenheit geraten, ohne dass Langes Erkenntnisse Allgemeingut geworden wären.

Freie Teilchen und gerade Linien

Ludwig Langes Formulierung des Trägheitsgesetzes stellt gegenüber früheren Konzepten einen erheblichen Fortschritt dar. Doch ihr hafteten noch Mängel an, wie etwa Frege mit Recht monierte: Die Begriffe „sich selbst überlassener Punkt“ (oder freies Teilchen) und „gerade Linie“ sind konzeptionell und experimentell keineswegs so einfach festzulegen, wie es scheint, sondern sie sind fast ebenso schwer fassbar wie das Trägheitsgesetz selbst. Die auch in Lehrbüchern durchaus populäre Charakterisierung freier Teilchen als „kräftefrei“ beruht auf einem Zirkelschluss, weil Kräfte eben erst in Newtons Gesetz II definiert werden, das aber nur in Inertialsystemen gemäß Gesetz I gilt. Auch die Charakterisierung von freien Teilchen als „weit entfernt“ von anderen Objekten ist nicht wirklich tragbar, da es unmöglich ist zu sagen, welcher Abstand jeweils genügend groß ist, zumal Gravitation und Elektromagnetismus im Prinzip unendliche Reichweite haben. Im Gegensatz zu diesen Versuchen, freie Teilchen durch äußere Bedingungen zu charakterisieren, habe ich vorgeschlagen, eine Charakterisierung durch innere Eigenschaften vorzunehmen [7]: „Freie Teilchen sind inaktive Testobjekte mit nur einer nichttrivialen Eigenschaft: Masse.“

Gerade Linien werden häufig durch starre Körper (Maßstäbe) repräsentiert. Das ist aber sicher kein geeigneter Ausgangspunkt für die Grundlagen der Physik, da starre Körper komplizierte, sekundäre Objekte der Mechanik (wenn nicht der Quantenmechanik) sind. Außerdem bricht in den Relativitätstheorien das Konzept eines starren Körpers weitgehend zusammen. Da die Bahnen von inaktiven Testobjekten durch Anfangsereignis und Anfangs-(Vierer-)Geschwindigkeit eindeutig bestimmt sind, genügen sie in einem beliebigen Koordinatensystem x^μ und mit der Eigenzeit τ den Differentialgleichungen 2. Ordnung $d^2x^\mu/d\tau^2 = f^\mu$ mit geeigneten Funktionen f^μ. Die einfachste Wahl $f^\mu \equiv 0$ führt zu geraden Linien.



Ludwig Lange, *Ueber das Beharrungsgesetz.*

I.

Bei einer planmässigen Untersuchung der dynamischen Principien tritt uns als erstes und oberstes Problem die Aufgabe entgegen, an Stelle der in mancher Hinsicht veralteten Galilei-Newton'schen Fassung des Beharrungsgesetzes eine zeitgemässe neue Fassung zu setzen. Seitdem Carl Neumann 1) und Ernst Mach 2) die Unzulänglichkeit jener herkömmlichen Formulirung schlagend nachgewiesen haben, besteht kein Zweifel, dass man es hier nicht mit einem erdichteten, sondern mit einem wirklichen und durchaus berechtigten Bedürfnisse der Wissenschaft zu thun hat. In jüngster Zeit hat sich übrigens Streintz 3) das Verdienst erworben, auf die hervorragende Bedeutung des genannten Problems von Neuem hinzuweisen. Ich selbst habe dann an einem anderen Orte 4) den Gegenstand vorwiegend aus methodologischen Gesichtspunkten behandelt und will hier nun näher auf seine mathematisch-physikalische Seite eingehen.

Ludwig Lange setzte sich in dieser [6] und weiteren Arbeiten kritisch mit dem Newtonschen Trägheitsgesetz und dem absoluten Raum auseinander.

3) Viele der in diesem Beitrag behandelten Argumente sind mehr im Detail ausgeführt im kürzlich erschienenen Buch [15].

Diese Charakterisierung ist aber nicht invariant gegen beliebige Koordinaten- und affine Parameter-Transformationen, was Einstein meisterhaft herausgestellt hat. Galileis Trägheitsgesetz lautet „in ausführlicher Formulierung notwendig so: Voneinander hinreichend entfernte materielle Punkte bewegen sich geradlinig gleichförmig – vorausgesetzt, daß man die Bewegung auf ein passend bewegtes Koordinatensystem bezieht und daß man die Zeit passend definiert. Wer empfindet nicht das Peinliche einer solchen Formulierung? Den Nachsatz weglassen aber bedeutete eine Unredlichkeit." [8]

Eine nichtlineare Koordinatentransformation $x^\mu \to x'^\mu$ und eine affine Transformation der Zeit $\tau \to \sigma$ überführt die freie Bewegungsgleichung $\mathrm{d}^2x^\mu/\mathrm{d}\tau^2 = 0$ in die Geodätengleichung

$$\frac{\mathrm{d}^2x'^\mu}{\mathrm{d}\sigma^2} + \Gamma^\mu_{\nu\lambda}(x'^\rho)\,\frac{\mathrm{d}x'^\nu}{\mathrm{d}\sigma}\,\frac{\mathrm{d}x'^\lambda}{\mathrm{d}\sigma} = 0,$$

mit den Christoffel-Symbolen $\Gamma^\mu_{\nu\lambda}$. Die physikalische Bedeutung dieser Gleichung hat wieder Einstein glänzend charakterisiert [9]: „Die Einheit von Trägheit und Gravitation drückt sich formal dadurch aus, daß wohl die ganze linke Seite [der Geodätengleichung] Tensorcharakter hat (in bezug auf beliebige Koordinatentransformationen), nicht aber die beiden Glieder einzeln genommen, von denen man in Analogie zu den Newtonschen Gleichungen das erste als Ausdruck der Trägheit, das zweite als Ausdruck der Gravitationskraft zu betrachten hätte."

Ein Vergleich der Geodätengleichung mit der ursprünglichen Gleichung $\mathrm{d}^2x^\mu/\mathrm{d}\tau^2 = 0$ zeigt, dass sich solche (Vierer-)Kräfte wegtransformieren lassen, die proportional zu $\mathrm{d}x'^\mu/\mathrm{d}\sigma$ oder bilinear in diesem Ausdruck sind. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass die Lorentzkraft der Elektrodynamik die einfachste nicht-wegtransformierbare Kraft ist. Um der „Peinlichkeit" der obigen koordinatenabhängigen Charakterisierung von geraden Linien zu entgehen (eine rein projektive Fassung des Bewegungsgesetzes findet sich in [7]), kann man sie auch invariant mithilfe der projektiven Geometrie charakterisieren [11]. Schon Lange meinte: „In Hinsicht auf die Eleganz der Systematik mag sich die Mechanik ein Beispiel an der projektiven Geometrie nehmen." Der wesentliche Inhalt des Trägheitsgesetzes ist dann gemäß obigen Analysen das folgende „Wunder der Natur": Die einfachsten und elementarsten Objekte der Natur, die freien Teilchen, bewegen sich (bei Vernachlässigung der Gravitation) auf den mathematisch einfachsten Bahnen in der Raumzeit, den geraden Linien.

Trägheit allgemeinrelativistisch

Einstein erweiterte das Trägheitskonzept erheblich durch sein Äquivalenzprinzip von 1907: Trägheit und Gravitation bilden eine Einheit und sind zumindest lokal äquivalent. Außerdem tragen gemäß dem Gesetz $E = mc^2$ alle Energieformen zur Trägheit bei. Die obigen Definitionen von freien Teilchen und geraden Linien lassen sich auch auf die Physik in starken Gravitationsfeldern übertragen. Dann gibt es aber aufgrund der Raumzeit-Krümmung keine physikalischen Objekte mehr, die sich global auf geraden Linien bewegen, d. h. es gibt keine globalen Inertialsysteme mehr.

Für das Trägheits-Konzept von besonderer Bedeutung sind (nicht-Newtonsche) Mitführungseffekte, wie Einstein sie bereits 1913 in einer Vorläufer-Theorie der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) berechnet hatte: Beschleunigte Massen induzieren für Testteilchen und Inertialsysteme parallele Beschleunigungen. So induziert eine rotierende Hohlkugel in ihrem Innern die aus der nichtrelativistischen Physik wohlbekannten Coriolis- und Zentrifugal-Kräfte [12]. Bemerkenswert ist aber, dass die rotierenden oder linear beschleunigten Hohlkugeln beliebig groß sein können und immer noch in ihrem ganzen Innern eine flache Raumzeit realisieren. Das hat in [12] Anlass dazu gegeben, ein quasiglobales Äquivalenzprinzip zu formulieren, das in Kurzform lautet: „Jedes Beschleunigungsfeld kann als Gravitationsfeld verstanden werden." Kurioserweise hat Einstein bereits 1912/13 in Diskussionen mit Paul Ehrenfest und Gustav Mie eine solche „Makro-Äquivalenz" in Betracht gezogen, aber letztlich verworfen.

In irdischen Labors und Satelliten sind diese Mitführungseffekte meist sehr klein. Es gelang jedoch sie in jüngerer Zeit – neunzig Jahre nach ihrer theoretischen Voraussage durch Albert Einstein und Hans Thirring – an Satelliten auf Bahnen um die rotierende Erde erstmals zweifelsfrei zu bestätigen: Die LAGEOS-Satelliten erleiden eine kleine Präzession ihrer Knotenlinie von 0,031 Bogensekunden pro Jahr, die mit 10 Prozent Genauigkeit gemessen wurde [13]. Die Rotationsachsen von Kreiseln werden um 0,042 Bogensekunden pro Jahr nachgeführt, was mit 19 Prozent Genauigkeit gemessen wurde [14]. Diese Experimente bestätigen zugleich erstmals den nicht-Newtonschen „Gravitomagnetismus", der durch Massenströme entsteht.

Ein kosmologischer Effekt?

Mach hat als erster und sehr deziert die „Quelle" der Trägheit in den kosmischen Massen vermutet, etwa mit seinem berühmten Satz, den ich oben zitiert habe. Die Newtonsche Physik kann auf diese Machschen Fragen keine Antwort geben, da in ihr bewegte, beispielsweise rotierende Massen keine zusätzlichen Kräfte bewirken. Das leistet aber die ART mit ihren Phä-

LUDWIG LANGE

Ludwig Lange wurde am 21. Juni 1863 in Gießen als Sohn eines Universitätsprofessors geboren. Er lebte lange Jahre in Tübingen und Heilbronn und starb mit 73 Jahren in Weißenhof (Württemberg). Lange studierte Mathematik, Physik und weitere Fächer wie Psychologie in Leipzig und Gießen und promovierte 1886 zu den Prinzipien der Mechanik. Sein Leben war stark beeinflusst durch phasenweise Depressionen, verbunden mit mehreren Klinikaufenthalten. Trotz seiner Krankheit publizierte er neben zu Themen der Physik in Psychologie, Photochemie und der Astronomie und Kalenderkunde. Eine ordentliche Dauerstellung an einer Universität blieb dem „zu Unrecht vergessenen" (Max v. Laue) Universalgelehrten jedoch zeitlebens verwehrt [10].

nomenen der Mitführung und des Gravitomagnetismus. Tatsächlich lassen sich die oben besprochenen Modelle mit rotierenden Hohlkugeln von asymptotisch flachen Raumzeiten auf geeignete kosmologische Modelle verallgemeinern.

Bemerkenswert ist, dass der Zusammenhang zwischen den lokalen Trägheitseffekten und den fernen kosmischen Massen in der ART nicht auf kausalem Weg zustandekommt. Er wird stattdessen von den zeitunabhängigen Nebenbedingungen der Einsteinschen Feldgleichungen gesteuert, wie man zunächst an speziellen Modellen, später sehr allgemein beweisen konnte. Solange man sich auf Rotationsstörungen 1. Ordnung beschränkt, folgt das sogar ohne alle Rechnungen aus einem Symmetrie-Argument: Rotationsstörungen 1. Ordnung von kugelsymmetrischen Systemen haben grundsätzlich Dipolcharakter. In der ART gibt es aber keine kausalen Dipolsignale oder -wellen. Die experimentell überzeugendste Bestätigung des Zusammenhangs zwischen Trägheit und Kosmologie ist die „Nicht-Rotation" der lokalen Inertialsysteme gegenüber dem kosmischen Hintergrund, was beispielsweise in den Lehrbüchern von Misner, Thorne, Wheeler (1973) als „miracle of miracles" und von Weinberg (1972) als „remarkable coincidence" bezeichnet wird. Tatsächlich lokale Geräte wie Laser-Kreisel erlauben es heute, dies mit einer Genauigkeit von 10^{-8} der Winkelgeschwindigkeit der Erde zu bestätigen. Bei einem mit GPS und VLBI realisierten erdbasierten Referenzsystem und vermutlich bald mit dem galaktischen Referenzsystem auf Basis des GAIA-Satelliten ist die Genauigkeit noch eine Größenordnung höher.

Unabhängig vom Ursprung der Trägheit zeigt die Diskussion des Trägheitsgesetzes und der Bezugssysteme, in denen es überhaupt gilt, dass das Phänomen der Trägheit eng mit unseren Konzepten von Raum und Zeit verbunden ist. So führt ein direkter Weg von der Newtonschen Annahme eines absoluten Raums zur vollständigen Überwindung dieser Vorstellung in der Allgemeinen Relativitätstheorie. Dass diese den Begriff des Inertialsystems ersetzt, hat Einstein als ihre wesentliche Leistung bezeichnet.[3)]

Literatur

[1] *G. Galilei*, Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, Wiss. Buchgesellschaft, Darmstadt (1982); bit.ly/1Qh0IFY

[2] *I. Newton*, Die mathematischen Prinzipien der Physik, übers. und hrsg. von V. Schüller, W. de Gruyter, Berlin (1999)

[3] *A. Einstein*, Die Naturwissenschaften **15**, 273 (1927)

[4] *J. B. Marion*, Classical Dynamics of Particles and Systems, Academic Press, New York (1965), 4. Aufl.: *J. B. Marion* und *S. T. Thornton*, Harcourt Brace, Fort Worth (1995)

[5] *C. Neumann*, Ueber die Principien der Galilei-Newton'schen Theorie, Teubner, Leipzig (1870); bit.ly/1LpLase

[6] *L. Lange*, Berichte über Verhandl. der Königl. Sächs. Ges. der Wiss. (1885), S. 333; bit.ly/1QhwbBG; engl. übers. und komment. von H. Pfister in: Eur. Phys. J. H **39**, 245 und 251 (2014)

[7] *H. Pfister*, Found. Phys. Lett. **17**, 49 (2004)

[8] *A. Einstein*, Die Naturwissenschaften **8**, 1010 (1920)

[9] *A. Einstein*, Vier Vorlesungen über Relativitätstheorie, Vieweg, Braunschweig (1922)

[10] *M. v. Laue*, Naturwissenschaften **35**, 193 (1948)

[11] *U. Heilig* und *H. Pfister*, J. Geom. Phys. **7**, 419 (1990)

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

[13] *I. Ciufolini* und *E. C. Pavlis*, Nature **431**, 958 (2004)

[14] *C. W. F. Everitt* et al., Phys. Rev. Lett. **106**, 221101 (2011)

[15] *H. Pfister* und *M. King*, Inertia and Gravitation, Springer, Heidelberg (2015)

DER AUTOR

Herbert Pfister (1936 – 2015) war Professor für theoretische Physik an der Eberhard-Karls-Universität Tübingen. Er studierte Mathematik und Physik an der LMU München und promovierte nach seinem Staatsexamen in München bei Fritz Bopp in Theoretischer Physik. In den Assistenzjahren ab 1962 kam es zu ersten Kontakten mit der Einsteinschen Gravitationstheorie, der er sich ab 1977 intensiver zuwandte. 1979 wurde er in Tübingen Professor für Theoretische Physik und blieb es bis zu seiner Emeritierung 2001.