

# Gravitomagnetisches Feld nun erstmals im Laborexperiment nachgewiesen?

Felix Scholkmann, Thomas Ganka

FH Isny, Studiengang Physik, 45. Lehrgang, Kontakt: Felix.Scholkmann@web.de

10. März 2007

## Zusammenfassung

Österreichische Forscher um den Physiker Dr. MARTIN TAJMAR berichteten kürzlich, dass sie mit großer Wahrscheinlichkeit erstmals im Laborexperiment mit einem rotierenden Supraleiter eine von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagte Gravitationskraft (gravitomagnetische Kraft) nachweisen konnten. Dabei stellte sich zudem heraus, dass die gemessene Kraft wesentlich größer als erwartet war. Der vorliegende Artikel geht den Fragen nach, was unter einer gravitomagnetischen Kraft zu verstehen ist und welche Bedeutung gravitomagnetische Kräfte für die moderne Physik und Technik haben könnten.

# 1 Gravitoelektromagnetismus (GEM)

Die Begriffe „Gravitoelektromagnetismus“ bzw. „Gravitomagnetismus“ dürften selbst den meisten Physikern immer noch recht unbekannt sein. Dies liegt daran, dass man normalerweise nur dann auf sie stößt, wenn man sich tief mit der *Allgemeinen Relativitätstheorie (ART)* auseinandersetzt. Um sich der Erklärung dieser Begriffe zu nähern, ist es sinnvoll, sich zuerst der Elektrodynamik zuzuwenden. Bekanntermaßen beschreibt die Elektrodynamik den Zusammenhang zwischen der *Bewegungsart* einer elektrischen Ladung und der dadurch induzierten *Feldart*:

- Eine *ruhende* Ladung erzeugt ein *elektrostatistisches Feld* (**E**-Feld)
- Eine *bewegte* Ladung erzeugt ein *magnetisches Feld* (**H**-Feld)

Betrachtet man nun anstatt einer elektrischen Ladung eine *Masse*, so besagt die klassische Mechanik:

- Eine *ruhende* Masse erzeugt ein *Gravitationsfeld* (**g**-Feld)

Über den Effekt einer sich *bewegenden* Masse sagt die klassische Mechanik nichts aus. Es stellt sich somit die Frage, ob nicht auch eine neue Feldart damit verbunden ist (analog zum Magnetfeld einer bewegten Ladung), wenn eine Masse bewegt wird. Hat I. NEWTON eine zweite Art von Gravitationskraft übersehen?

Bereits 1865 spekulierte J. C. MAXWELL über die Existenz dieser Feldart [1]. Um 1870 vermuteten dann die Physiker G. HOLZMÜLLER und F. TISSERAND [2], dass durch die Bewegung der Sonne eine Art „magnetische Komponente“ des Gravitationsfeldes induziert werde, die die Bahnbewegungen der Planeten beeinflusst. 1893 kam O. HEAVISIDE [3] bei der Beschäftigung mit der Frage, wie sich die Energie in einem Gravitationsfeld ausbreitet zu der Schlussfolgerung, es müsse eine Art „gravitativer POYNTING Vektor“ existieren, wodurch es eine Art magnetischen Aspekt der Gravitation geben müsse. 1913 äußerte A. EINSTEIN [4] erstmals auch eine Vermutung über die Existenz einer zusätzlichen Komponente der Gravitation und W. DE SITTER [2] schloss sich 1916 den Vermutungen von G. HOLZMÜLLER und F. TISSERAND an, dass das durch die Sonne verursachte „gravitomagnetische“ Feld Auswirkungen auf die Planetenbahnen hat.

1918 zeigten dann die österreichischen Physiker H. THIRRING und J. LENSE [4], dass nach der 1915 von A. EINSTEIN (1879-1955) fertiggestellten Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) eine bewegte Masse tatsächlich eine neue Art von Feld erzeugen müsse. Würde die Masse rotieren, so hätte dies eine Präzession der Orbits der die Masse umkreisenden Objekte zur Folge (THIRRING-LENSE-Effekt).

1963 vervollständigte der Physiker R. L. FORWARD [3, 5] diesen Ansatz, indem er darlegte, wie die EINSTEINSche Feldgleichung durch Linearisierung in Gleichungen überführt werden kann, die eine analoge Struktur zu den MAXWELL-Gleichungen haben.

Während die MAXWELL-Gleichungen lauten:

$$\nabla \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad \nabla \mathbf{B} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \rho \mathbf{v} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2)$$

mit  $\mathbf{E}$ : elektrisches Feld,  $\mathbf{B}$ : magnetische Induktion,  $\mu_0$ : elektromagnetische Induktionskonstante,  $\rho$ : Ladungsträgerdichte, nehmen die die *Gravitation* beschreibenden MAXWELL-EINSTEIN-Gleichungen die Form an:

$$\nabla \mathbf{g} = -\frac{\rho_m}{\varepsilon_g}, \quad \nabla \mathbf{C} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{g} = -\frac{\partial \mathbf{C}}{\partial t}, \quad \nabla \times \mathbf{C} = \mu_g \rho_m \mathbf{v} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial t} \quad (4)$$

mit  $\mathbf{g}$ : gravitoelektrisches Feld („normales“ Gravitationsfeld)  $\mathbf{C}$ : gravitomagnetische Induktion,  $\mu_g$ : gravitomagnetische Induktionskonstante,  $\rho_m$ : Dichte. Für das Magnetfeld  $\mathbf{H}$  gilt:  $\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu_0$ . Während sich für das gravitomagnetische Feld  $\mathbf{K}$  ergibt:  $\mathbf{K} = \mathbf{C}/\mu_g$ .

Aus den Gleichungen folgt, dass die Gravitation aus zwei Komponenten besteht, die je nach Bewegungsart der Masse induziert werden:

- Eine *ruhende* Masse erzeugt ein *gravitoelektrisches* Feld (**g**-Feld)
- Eine *bewegte* Masse erzeugt ein *gravitomagnetisches* Feld (**K**-Feld)

Dieser Ansatz, der die Gravitation als Summe zweier Komponenten (der gravitoelektrischen und der gravitomagnetischen) ansieht wird als *Gravitoelektromagnetismus* (GEM) bezeichnet. Eine Übersicht über die Analogie zwischen *Elektrizität* und *Gravitation* gibt Abbildung 1.

	<b>Elektrizität</b>	<b>Gravitation</b>
<b>Feldquelle (<math>\alpha</math>)</b>	Ladung ( $q$ )	Masse ( $m$ )
<b>Feldart bei ruhender Feldquelle (<math>\alpha</math>)</b> $\frac{\partial \alpha}{\partial t} = 0, \frac{\partial^2 \alpha}{\partial t^2} = 0$	elektrostatisches Feld ( <b>E</b> -Feld)	gravitostatisches Feld ( <b>g</b> -Feld)
<b>Feldart bei konstant bewegter Feldquelle (<math>\alpha</math>)</b> $\frac{\partial \alpha}{\partial t} \neq 0, \frac{\partial^2 \alpha}{\partial t^2} = 0$	magnetisches Feld ( <b>H</b> -Feld) (= <i>elektrodynamisches Feld</i> )	gravitomagnetisches Feld ( <b>K</b> -Feld) (= <i>gravitodynamisches Feld</i> )
<b>Feldart bei beschleunigt bewegter Feldquelle (<math>\alpha</math>)</b> $\frac{\partial \alpha}{\partial t} \neq 0, \frac{\partial^2 \alpha}{\partial t^2} \neq 0$	elektromagnetisches Feld (elektromagnetische Wellen)	- <i>keine spezielle Bezeichnung</i> - (Gravitationswellen)

Abbildung 1: Während die Elektrizität durch die *klassische Elektrodynamik* beschrieben wird, kann die Gravitation in analoger Form durch den Ansatz der *Allgemeinen Relativitätstheorie* formuliert werden.

Aber nicht nur die ART fordert, dass die Gravitation aus diesen beiden Komponenten besteht. 1992 wies der Forscher O. D. JEFIMENKO [5] darauf hin, dass es einen „magnetischen“ Aspekt der Gravitation geben muss, damit Impuls- und Energieerhaltung bei allen mechanischen Vorgängen uneingeschränkt gewährleistet sind. Dass interessanterweise die Existenz eines gravitomagnetischen Feldes auch aus der NEWTONSchen Mechanik herleitbar ist, zeigte 2006 der Physiker H. BEHERA [1].

Das *gravitoelektrische* Feld entspricht dem „normalen“ Gravitationsfeld (auch als NEWTONSches Gravitationsfeld bezeichnet). Das *gravitomagnetische* Feld (auch gravimagnetisches Feld genannt) ist als Nicht-NEWTONSches Gravitationsfeld anzusehen. Analog dazu gilt für die Kräfte der Felder: So wie ein  $\mathbf{E}$ -Feld und ein  $\mathbf{H}$ -Feld eine Kraft erzeugen ( $\mathbf{E}$ -Feld: COULOMB-Kraft bzw.  $\mathbf{H}$ -Feld: LORENTZ-Kraft) so erzeugen auch ein  $\mathbf{g}$ -Feld und ein  $\mathbf{K}$ -Feld eine Kraft ( $\mathbf{g}$ -Feld: gravitoelektrische Kraft,  $\mathbf{K}$ -Feld: gravitomagnetische Kraft). Die gravitoelektrische Kraft entspricht hierbei der „normalen“, NEWTONSchen Gravitationskraft. Abbildung 2 stellt die analoge Beschreibung der elektrischen bzw. gravitativen Wechselwirkungskräfte dar.

	<b>Elektrizität</b>	<b>Gravitation</b>
<b>statischer Fall</b>	elektrostatische Wechselwirkung (COULOMB-Kraft) $F_{es} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q_1 q_2}{r^2}$	gravitostatische Wechselwirkung (NEWTONSche Gravitationskraft) $F_{gs} = -\gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$
<b>dynamischer Fall</b>	elektromagnetische Wechselwirkung (LORENTZ-Kraft) $F_{em} = \mu_0 q_2 (\vec{v} \times \vec{H})$ $= q_2 (\vec{v} \times \vec{B})$	gravitomagnetische Wechselwirkung $F_{gm} = \mu_g m_2 (\vec{v} \times \vec{K})$ $= m_2 (\vec{v} \times \vec{C})$

Abbildung 2: Vergleich zwischen Elektrizität und Gravitation hinsichtlich der Kräfte.  $\mathbf{H}$ : magnetisches Feld,  $\mathbf{B}$ : magnetische Induktion ( $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ ),  $\mathbf{K}$ : gravitomagnetisches Feld,  $\mathbf{C}$ : gravitomagnetische Induktion ( $\mathbf{C} = \mu_g \mathbf{K}$ ),  $\mu_0$ : elektromagnetische Induktionskonstante ( $\mu = 1/[c^2 \epsilon_0]$ ),  $\mu_g$ : gravitomagnetische Induktionskonstante ( $\mu_g = 4\pi\gamma/c^2$ ) [3, 44].

Während ein magnetisches Feld immer dann entsteht, wenn eine Bewegung der LADUNG erfolgt, entsteht ein gravitomagnetisches Feld immer, wenn sich eine MASSE bewegt. Abbildung 3 (siehe nächste Seite) veranschaulicht diesen Zusammenhang grafisch.

Besagt der GEM-Ansatz somit, dass es zwei verschiedene Arten der Gravitationskraft gibt? Ja. Die Gravitationskraft besteht aus zwei Komponenten: einer *statischen* Komponente (gravitoelektrisch Kraft) und einer *dynamischen* Komponente (gravitomagnetische Kraft). Wichtig ist zu verstehen, dass die gravitomagnetische Kraft (bzw. das gravitomagnetische Feld) dabei *nichts* mit Magnetismus zu tun hat! Der Begriff „magnetisch“ soll in der Terminologie des GEM Modells in diesem Zusammenhang nur auf die Analogie zwischen der Natur des

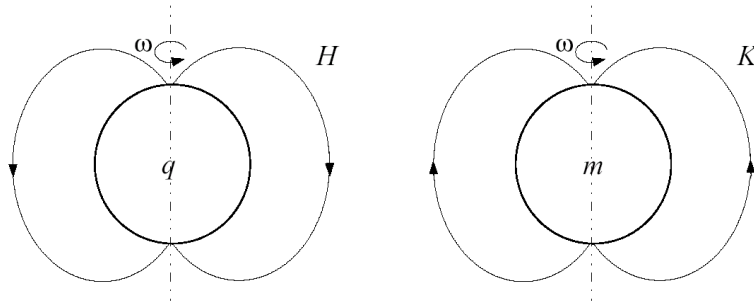


Abbildung 3: Magnetisches Feld ( $\mathbf{H}$ ) einer rotierenden Ladung ( $q$ ) und gravitomagnetisches Feld ( $\mathbf{K}$ ) einer rotierenden Masse ( $m$ ).

Magnetismus und der Natur des Gravitomagnetismus hindeuten – beide Komponenten entstehen erst im dynamischen Fall (d.h. wenn die Ladung bzw. die Masse bewegt wird). Aufgrund dieser Gefahr hinsichtlich der Missinterpretation des Begriffs „gravitomagnetisch“ wäre die Bezeichnung „gravitodynamisch“ unserer Meinung nach im Grunde genommen sinnvoller. Der Begriff *gravitomagnetisch* sollte eigentlich durch den Begriff *gravitodynamisch* ersetzt werden, um Unklarheiten zu vermeiden.<sup>1</sup>

Bisher sind einige physikalische Effekte bekannt, die durch das Konzept des GEM erklärt werden (THIRRING-LENSE Effekt, SAGNAC Effekt, SHIFF Effekt (frame-dragging Effekt), DE SITTER Effekt) [6].

Seit dem Postulat von H. THIRRING und J. LENSE in den 1920er Jahren versuchte man nun, die gravitomagnetische Kraft bzw. das gravitomagnetische Feld experimentell nachzuweisen. Die extrem schwache Stärke eines gravitomagnetischen Effekts stellte jedoch so immense Anforderungen an die Messtechnik dar, dass die bisher durchgeführten Experimente keine befriedigenden Ergebnisse lieferten [7].

Aus diesem Grund wendeten sich die Forscher ziemlich schnell von den Experimenten im Labormaßstab ab und versuchten nun durch die Beobachtung von Bahnabweichungen von Satelliten den Effekt einer gravitomagnetischen Kraft nachzuweisen. Nach vierjähriger Experimentdauer mit dem Satelliten LAGEOS lag 1998 das erste Ergebnis vor: es war in der Tat ein Effekt zu registrieren, der  $110 \pm 20 \%$  so groß war, wie die Theorie vorhersagte. Man wiederholte das Experiment nochmals und steigerte die Präzision erheblich, sodass die Position des Satelliten mittels Laufzeitmessung von Laserimpulsen von der Erde mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  cm detektiert werden konnte! Im Herbst 2004 wurde das Ergebnis veröffentlicht. Die gemessenen Signale entsprachen zu  $99 \pm 5 \%$  dem erwarteten Wert [4, 8]. Eine hervorragende Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment.

<sup>1</sup>Im Folgenden wird jedoch weiterhin der Begriff „gravitomagnetisch“ verwendet, da er ein etablierter Begriff im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie ist.

Trotz dieses augenscheinlichen Erfolgs im Nachweis gravitomagnetischer Felder startete im April 2004 ein neuer Satellit (Kosten: 700 Mio. Dollar), der die bisher präziseste Messung durchführen soll (Gravity Probe B). Das Ergebnis wird mit großer Spannung erwartet und wird in ein paar Monaten vorliegen (Frühjahr/Sommer 2007) [9]. Der Satellit ist mit vier Gyroskopen ausgestattet, deren Präzessionen gemessen werden. Durch das gravitomagnetische Feld der Erde müsse sich eine Winkeländerung in der Größe von 40,9 Millibogensekunden pro Jahr ergeben [10]. Ein unvorstellbar kleiner Wert, der aber dank modernster Messtechnik dennoch zuverlässig gemessen werden kann. Abbildung 4 gibt einen Überblick über die bisher durchgeführten Experimente.

<i>Durchführung</i>	<i>Experiment</i>	<i>Resultat</i>
1994-1998	LAGEOS (Nachweis des Thirring-Lense-Effekts durch Messung der Veränderung der Position des geostationären Satelliten)	<i>positiv</i> (110 % $\pm$ 20 von erwartetem Wert)
1992-2004	LAGEOS II (Nachweis des Thirring-Lense-Effekts durch Messung der Veränderung der Position des geostationären Satelliten)	<i>positiv</i> (99 % $\pm$ 5 % von erwartetem Wert)
2003-2007	GRAVITY PROBE B (Nachweis des Thirring-Lense-Effekts durch Messung der Präzession vierer Gyroskope)	Erstes Resultat erwartet für Frühjahr 2007
2006	Experiment von TAJMAR et al. mit rotierendem Supraleiter	<i>positiv</i>

Abbildung 4: Experimente zur Messung gravitomagnetischer Effekte [4, 8].

Vor diesem Hintergrund muss nun die Meldung des österreichischen Forscherteams verstanden werden. Die Meldung über die Detektion eines gravitomagnetischen Feldes ist deshalb so sensationell, weil dies nun erstmals im Labor gelungen ist. Darüber hinaus zeigte sich, dass die Feldstärke 100 Millionen Billionen Mal größer war, als von den ART vorhergesagt [11]!

## 2 Rotierende Supraleiter

Das gravitomagnetische Feld der Erde liegt in der Größenordnung von  $10^{-14}$  rad/ $s^2$ . Wegen dieser geringen Feldstärke versprochen bisher nur Messungen mit Satelliten Erfolg (LAGEOS, LAGEOS II, Gravity Probe-B).

Weil die Masse der Erde nur solch ein schwaches Feld erzeugt, erschien bisher die Realisierung eines Laborexperiments aussichtslos [7]. Seit den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts erschienen jedoch immer wieder Veröffentlichungen, die über Beobachtungen *abnormalen Verhaltens von Supraleitern* informierten. So berichteten 1989 und 1990 die Physiker J. TATE, B. CABRERA, S. B. FELCH und J. T. ANDERSON [12, 13] von einer experimentellen Bestimmung der Masse der COOPER-Paare eines rotierenden Supraleiters. Dabei stellten sie folgende Anomalie fest: Der experimentell ermittelte Wert stimmte nicht mit dem theoretisch erwarteten Wert überein. Trotz einer intensiven Diskussion dieser Anomalie in der Literatur konnte keine Erklärung gefunden werden.

2002 veröffentlichten die Physiker M. TAJMAR und C. J. DE MATOS [14] eine Arbeit, in der sie aufzeigten, dass die Messergebnisse von TATE et al. erklärt werden könnten, wenn man die Existenz eines starken gravitomagnetischen Feldes annimmt, das durch den Supraleiter erzeugt würde. In weiteren Arbeiten erweiterten sie ihren Ansatz kontinuierlich [15, 16, 17]. Sie konnten aufzeigen, dass bei Verwendung von kohärenter Materie (wie sie ein Supraleiter darstellt) ein wesentlich größeres gravitomagnetisches Feld zu erwarten sei, als bei der Verwendung nichtkohärenter Materie. Durch diese Erkenntnis ergab sich automatisch die Schlussfolgerung: Durch die Verwendung eines Supraleiters ist es doch möglich, ein genügend starkes gravitomagnetisches Feld im Labor zu erzeugen. Ein Experiment wurde geplant und konnte mit finanzieller Unterstützung der ESA und der US Air Force in den Forschungslaboratorien der *Seibersdorf research GmbH* in Seibersdorf, Österreich realisiert werden.

M. TAJMAR, F. PLESESCU, K. MERHOLD und C. J. DE MATOS verwendeten für das Experiment ringförmige Supraleiter verschiedener Materialien (Niobium, Blei, BSCCO, YBCO), die sie bei entsprechenden Temperaturen rotieren ließen. Innerhalb, außerhalb und oberhalb des Supraleiters platzierten sie Beschleunigungssensoren, um das Auftreten einer Beschleunigung und damit das Vorhandensein eines gravitomagnetischen Feldes zu detektieren. Dieser Ansatz ergab sich aus der Vorhersage, dass ein nichtstationäres gravitomagnetisches Feld einen *Induktionsvorgang* bewirkt, wobei ein gravitoelektrisches Feld induziert wird [3]. (vergl. Abbildung 5).

<i>Induktionsvorgänge zwischen E- und B-Feld</i>		<i>Induktionsvorgänge zwischen g- und K-Feld</i>	
stationäres <b>E</b> -Feld induziert:	-	stationäres <b>g</b> -Feld induziert:	-
instationäres (konstante Änderung) <b>E</b> -Feld induziert:	<b>B</b> -Feld	instationäres (konstante Änderung) <b>g</b> -Feld induziert:	<b>K</b> -Feld
instationäres (nichtkonstante Änderung) <b>E</b> -Feld induziert:	<b>B</b> -Feld $\Rightarrow$ <b>E</b> -Feld $\Rightarrow$ <b>B</b> -Feld $\Rightarrow$ ...	instationäres (nichtkonstante Änderung) <b>g</b> -Feld induziert:	<b>K</b> -Feld $\Rightarrow$ <b>g</b> -Feld $\Rightarrow$ <b>K</b> -Feld $\Rightarrow$ ...

Abbildung 5: Induktionsvorgänge zwischen **E**- und **B**-Feld bzw. zwischen **g**- und **K**-Feld.

Das gravitoelektrische Feld bewirkt demnach eine Beschleunigung der Beschleunigungssensoren, die somit als indirekte Detektoren eines gravitomagnetischen Feldes fungieren. Zusätzlich wurden zwei Gyroskope in verschiedenem Abstand über dem Supraleiter platziert (Versuchsaufbau: siehe Abbildung 6, nächste Seite).

Die zu erwartende Feldstärke des gravitomagnetischen Feldes wurde anhand der Formel

$$K = 2\omega \frac{\rho'_m}{\rho_m}$$

vorhergesagt, wobei  $\rho'_m$  die Massedichte der COOPER-Paare und  $\rho_m$  die Volumenmassendichte des Supraleitermaterials ist [18]. Demnach dürften aufgrund

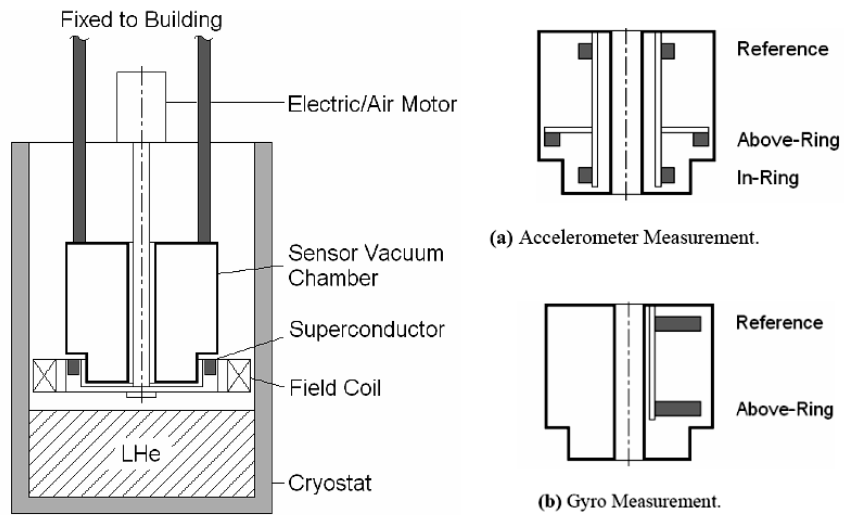


Abbildung 6: Versuchsaufbau. Zu sehen ist die Messkammer mit dem darin befindenden Supraleiter. Um störende Vibrationen zu vermeiden wurde sie mittels Stahlträgern an der Decke fixiert und zusätzlich noch mit Sandsäcken (mit einem Gesamtgewicht von 1,5 t) beschwert. Bildquelle: [18, 19].



der unterschiedlichen Massendichten der COOPER-Paare bzw. Volumenmassendichten bei Verwendung von YBCO und BSCCO nur extrem geringe gravitomagnetische Feldstärken zu erwarten sein, die unter der Messgenauigkeit des Experiments liegen würden. Bei der Verwendung von Blei und Niobium als Supraleiter würden entsprechend stärkere gravitomagnetische Felder zu erwarten sein, die durch den Versuchsaufbau zu registrieren sein müssten.

Nach über 250 Versuchsdurchläufen innerhalb eines Zeitraums von drei Jahren und nach einer achtmonatigen Diskussion der Experimentalergebnisse veröffentlichten TAJMAR et al. ihre Versuchsergebnisse erstmals am 21. März 2006 bei einer Konferenz in den Niederlanden [11]. Die Experimente ergaben folgende Resultate [18, 19]: Die Versuche mit den Supraleitern aus BSCCO und YBCO zeigten wie vorhergesagt keine Erzeugung eines gravitomagnetischen Feldes im Rahmen der Messgenauigkeit an.

Sobald Niobium die kritische Temperatur passierte ( $T_K = 9,4$  K) wurde eine Kraft auf die Sensoren von  $100 \mu\text{g}$  bei einer Winkelbeschleunigung des rotierenden Supraleiters von  $1500 \text{ rad/s}^2$  gemessen. Auch Blei zeigte das gleiche Verhalten: Beim Passieren der kritischen Temperatur ( $T_K = 7,2$  K) registrierten die Sensoren eine Beschleunigung, die 84 % des Effekts ausmacht, der beim Versuch mit Niobium auftritt (vergl. Abbildungen 7 und 8).

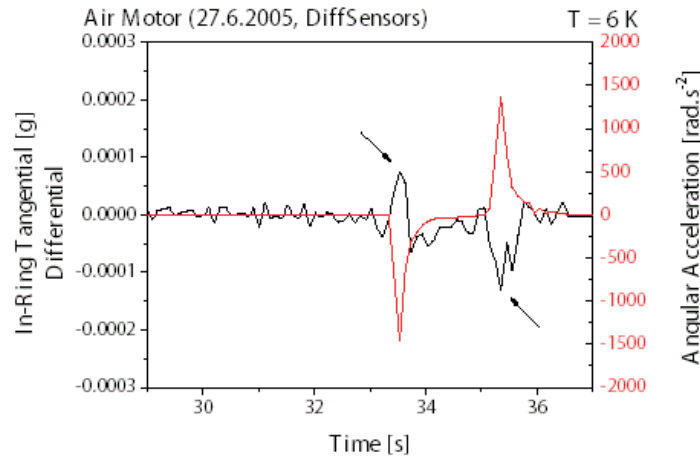


Abbildung 7: Zu sehen ist das Messsignal des innerhalb des Rings platzierten Beschleunigungssensors (schwarze Linie) in Abhängigkeit zur Beschleunigung des Supraleiters (rote Linie). Deutlich ist ein Zusammenhang zwischen der Beschleunigung und der Messsignalstärke zu erkennen: sobald eine Diskontinuität der Beschleunigung vorliegt, ist eine Kraft auf die Sensoren zu verzeichnen, die als gravitomagnetische Kraft zu interpretieren ist. Der Versuch wurde bei 6 K und mit einem Niobium-Supraleiter durchgeführt. Bildquelle: [18].

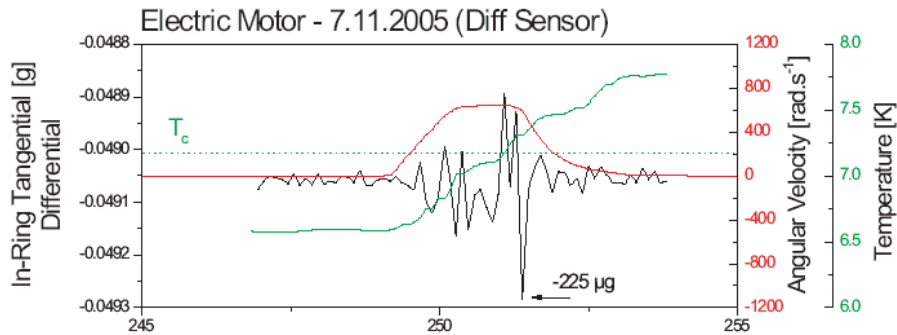


Abbildung 8: In der Grafik ist gut zu erkennen, dass a) sobald der Supraleiter die kritische Temperatur passiert und b) der Supraleiter mit einer nichtkonstanten Geschwindigkeit rotiert (in diesem Fall eine Abbremsung), ein Messsignalpeak der Beschleunigungssensoren zu verzeichnen ist. Bildquelle: [18].

Auch die Gyroskope zeigten die Anwesenheit eines gravitomagnetischen Feldes an (vergl. Abbildung 9). Das Experiment war ein Erfolg! Wie durch die Theorie vorhergesagt, konnte im Fall der BSCCO und YBCO Supraleiter *kein* Effekt registriert werden. Sowohl bei der Verwendung von Niobium als auch bei Blei zeigte sich jedoch ein *deutlicher* Effekt, der durch die Existenz eines gravitomagnetischen Feldes erklärt werden kann.

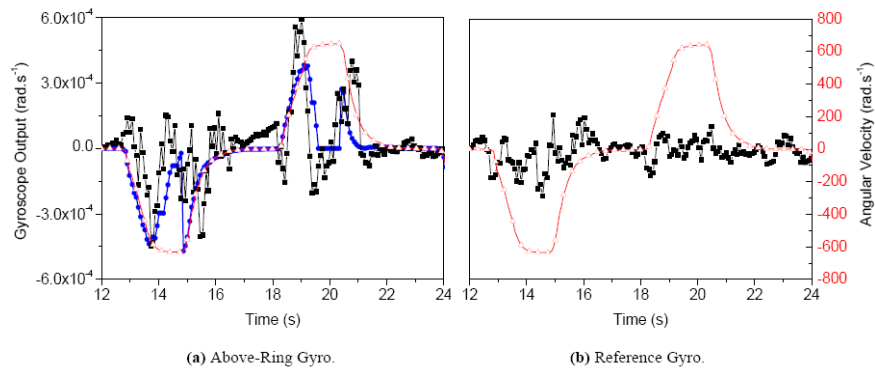


Abbildung 9: Ergebnis der Messung mittels der Gyroskope. Die linke Grafik zeigt die Messwerte des unmittelbar über dem Supraleiter sich befindenden Gyroskops, während die rechte Grafik die Messwerte darstellt, die das weiter oberhalb des Supraleiters angebrachte Gyroskop lieferte. Deutlich zu erkennen ist die Auslenkung des Gyroskops direkt über dem Supraleiter bzw. die Nichtauslenkung des weiter entfernten Gyroskops. Beide Messergebnisse entsprechen den Erwartungen: Da die Feldstärke des gravitomagnetischen Feldes direkt über dem Supraleiter am größten ist, ist auch hier die Auslenkung des Gyroskops maxi-

mal. Die minimale Auslenkung des anderen Gyroskops ist begründet durch die dort vorherrschende kleinere Feldstärke, die im Rahmen der Messgenauigkeit nicht mehr registriert werden konnte. Bildquelle: [19]

### 3 Ausblick

Wie Experimente von verschiedenen anderen Physikern schon aufzeigten, ist die Erforschung des Zusammenhangs zwischen Supraleitern und gravitativen Effekten ein sehr spannendes Forschungsgebiet der Physik. So sorgten die Publikationen von E. PODKLETNOV [20, 21] für Aufsehen, in denen davon berichtet wird, dass eine über einem YBCO Supraleiter sich befindende Masse 0,05 - 2,1 % leichter wird. Leider konnte bisher *keine* erfolgreiche Replikation des Experiments von Seiten anderer Forscher erzielt werden: Im Rahmen eines Forschungsprogramms unter NASA Marshall wurde der erste Replikationsversuch von PODKLETNOVs Experiment von LI et al. [22] unternommen. Der Supraleiter drehte sich dabei nicht; es wurde kein abnormales gravitatives Verhalten festgestellt. Der nächste Versuch der Replikation wurde von BAE Systems gesponsert und von WOODS et al. [23] an der Sheffield Universität in England durchgeführt. Obwohl PODKLETNOV als Konsulent mitwirkte, konnte auch bei einer Umdrehungsgeschwindigkeit bis zu 10000 U/min des Supraleiters kein Effekt nachgewiesen werden. Eine 1996 publizierte Analyse des PODKLETNOV-Experiments von C. S. UNNIKRISHNAN [24] brachte Zweifel über die Richtigkeit der Messungen zur Sprache. 2001 versuchten HATHAWAY et al. [25] mit PODKLETNOV als Konsulent eine Replikation des Versuchs; der Supraleiter konnte bis max. 5000 U/min gedreht werden. Auch hierbei zeigte sich der von PODKLETNOV beschriebene Effekt nicht. Ebenfalls 2001 wurde ein weiteres Experiment zur Überprüfung des PODKLETNOV-Effekts durch die Forscher des NASA Marshall Space Flight Centers G. A. ROBERTSON und R. LITCHFORD, sowie den Forschern B. THOMSON und R. PETERS [26], durchgeführt. Das Experiment mit einem YBCO/PrBCo Supraleiter erbrachte keine Bestätigung einer gravitativen Anomalie.

Weitere Forscher berichteten, dass ein Supraleiter leichter wird, wenn er a) seine kritische Temperatur erreicht [27] oder b) mit niederfrequenten elektromagnetischen Wellen (ELF) bestrahlt würde [28]. Versuche von M. TAJMAR et al. [29] konnten diese Effekte jedoch nicht replizieren. 2001 veröffentlichten E. PODKLETNOV und G. MODANESE [30] eine Arbeit, in der sie von einem Experiment berichteten, in dem es gelungen sei, einen starken „gravitativen Impuls“ zu erzeugen, indem kurzzeitig ein hoher Strom ( $10^4$  A) durch einen Supraleiter geleitet wurde. Nach Recherche der Autoren wurde bisher von keiner anderen Wissenschaftlergruppe versucht, dieses Experiment zu wiederholen.

Die Versuchsergebnisse des Experiments aus Seibersdorf sind insofern vielversprechend. Zum ersten Mal konnte mit hoher Wahrscheinlichkeit in einem Labor ein gravitomagnetisches Feld nachgewiesen werden. Die relativ hohe Feldstärke ergab sich aus der Verwendung von supraleitenden Festkörpern, die durch ihren kohärenten Quantenzustand gekennzeichnet sind, sobald sie die jeweilige

kritische Temperatur unterschreiten. Die Entdeckung, dass der *kohärente Zustand* der Materie für eine *Verstärkung* des gravitomagnetischen Feldes ausschlaggebend ist, gibt Hoffnung, weitere Mechanismen zu entdecken, durch die eine noch größere Verstärkung erzielt werden kann. Angenommen, dies wäre der Fall, dann könnte auch über eine technische Nutzung von gravitomagnetischen Feldern nachgedacht werden. Die Nutzung im Bereich der Antriebstechnologien wäre naheliegend. Obwohl dadurch zwar keine „Revolution“ in diesem Technologiebereich zu erwarten wäre — wie es O. BERTOLAMI und M. TAJMAR [30] in einer Analyse aufzeigten —, so wäre es dennoch ein weiterer Schritt in der Entwicklung zukünftiger Antriebstechnologien.

Auch die theoretische Physik profitiert durch das Experiment von M. TAJMAR et al. Um die Experimentalergebnisse zu erklären, sind neue Konzepte in der Gravitations- und Festkörperphysik gefragt. M. TAJMAR und seine Kollegen konnten auch auf diesem Gebiet schon beachtliche Ergebnisse vorlegen [31, 32, 33, 34]. Da gegenwärtig bekanntermaßen aber noch keine einheitliche Theorie der Gravitation vorliegt, sind vor allem neue Ansätze gefragt. Nach Meinung der Autoren scheinen besonders diejenigen Konzeptionen interessant zu sein, die die Gravitation auf der Grundlage klassischer feldtheoretischer und fluidmechanischer Prinzipien erklären [35, 36, 37, 38, 39, 40]. In diesem Zusammenhang könnte auch eine erneute Analyse der Arbeiten A. EINSTEINS [41, 42] zu einer einheitlichen Theorie der Elektrizität und Gravitation sinnvoll sein. Dass der THIRRING-LENSE-Effekt auch aus einem fluidmechanischen Modell herleitbar ist, zeigte kürzlich der australische Physiker R. T. CAHILL [43]. Nach seinen Berechnungen müsste das Gravity Probe B Experiment a) einen stärker als erwarteten THIRRING-LENSE-Effekt nachweisen und b) auch sich eine Variation der Präzessionsstärke in Abhängigkeit der Orbitposition des Satellits zeigen.

Das Thema „Gravitoelektromagnetismus“ birgt in sich noch ein großes Potential. Man darf gespannt sein auf das in den nächsten Monaten präsentierte Ergebnis des Gravity Probe B Experiments. Spätestens dann dürfte der Begriff „gravitomagnetisch“ an Bekanntheitsgrad gewinnen. Das Experiment des Forscherteams um M. TAJMAR hat dafür schon eine gute Vorarbeit geliefert.

**Danksagung:** Wir danken Dr. MARTIN TAJMAR (ARC Seibersdorf research GmbH) für die Unterstützung in unserer Einarbeitung in das Thema „Gravitomagnetismus“ indem er sich wiederholt für Fragen freundlicherweise zur Verfügung stellte. Dank geht auch an Dr. ANDREAS HELLMANN und KURT SCHNEIDER für die hilfreichen Diskussionen.

## Literatur

- [1] BEHERA, H. (2006). Newtonian Gravitomagnetism and Analysis of Earth Satellite Results. arXiv: gr-qc/0510003.
- [2] MASHHOON, B. (2003). Gravitoelectromagnetism: A Brief Review. arXiv.org: gr-qc/0011014.
- [3] TAJMAR, M. & De Matos, C. J. (2001). Coupling of Electromagnetism and Gravitation in the Weak Field Approximation. arXiv: gr-qc/0003011.
- [4] RUMPF, H. & Urbantke, H. (1999). Der Thirring-Lense-Effekt – nach 80 Jahren jetzt im Experiment? Pluslucis.univie.ac.at/Plus Lucis/992/s1417.pdf
- [5] TAJMAR, M. & DE MATOS, C. J. (2001). Induction and Amplification of Non-Newtonian Gravitational Fields. *AIAA Joint Propulsion Conference*, AIAA Paper, 2001-3911, arXiv: gr-qc/0107012.
- [6] SCHÄFER, G. (2002). Gravitomagnetic Effects. *Proc. Hyper Symposium*, arXiv: gr-qc/0407116.
- [7] BRAGINSKI, V. B., CAVES, C. M. & THORNE, K. S. (1977). Laboratory Experiments to Test Relativity Gravity. *Phys. Rev. D*, **15** (5), 2047-2068.
- [8] EMBACHER, F. (2004). Die experimentelle Bestätigung des Thirring-Lense Effekts. <http://homepage.univie.ac.at/Franz.Embacher/Rel/Thirring-Lense/ThirringLense2.pdf>
- [9] einstein.stanford.edu
- [10] SCHEPPACH, J. (2005). Wie Einstein seine Erben zur Verzweiflung bringt. *PM*, **6**, 61-67.
- [11] ESA Portal. Toward a new test of general relativity?. [esa.int/SPECIALS/GSP/SEM0L6OVGJE0.html](http://esa.int/SPECIALS/GSP/SEM0L6OVGJE0.html)
- [12] TATE, J., CABRERA, B., FELCH, S. B. & ANDERSON, J. T. (1989). Precise Determination of the Cooper-Pair Mass. *Phys. Rev. Lett.*, **62** (8), 845-848.
- [13] TATE, J., CABRERA, B., FELCH, S. B. & ANDERSON, J. T. (1990). Determination of the Cooper-Pair Mass in Niobium. *Phys. Rev. B*, **42**(13), 7885-7893.
- [14] TAJMAR, M. & DE MATOS, C. J. (2003). Gravitomagnetic Field of a Rotating Superconductor and of a Rotating Superfluid. *Physica C*, **385**, 551-554.
- [15] TAJMAR, M. & DE MATOS, C. J. (2004). Extended Analysis of Gravitomagnetic Fields in Rotating Superconductors and Superfluids. arXiv: gr-qc/0406006.

- [16] TAJMAR, M. & DE MATOS, C. J. (2006). Gravitomagnetic Fields in Rotating Superconductors to Solve Tate's Cooper Pair Mass Anomaly. *PP-roceedings of the Space Technology and Applications International Forum (STAIF-2006)*", AIP Conference Proceedings 813, Issue 1, American Institute of Physics, New York, 2006, 1415-1420.
- [17] DE MATOS, C. J. & TAJMAR, M. (2005). Gravitomagnetic London Moment and the Graviton Mass inside a Superconductor. *Physica C*, **432**, 167-172.
- [18] TAJMAR, M., PLESESCUL, F., MARHOLD, K. & DE MATOS, C. J. (2006). Experimental Detection of the Gravitomagnetic London Moment. arXiv: gr-qc/0603033, Submitted to *Physica C*.
- [19] TAJMAR, M., PLESESCUL, F., SEIFERT, B. & MARHOLD, K. (2006). Measurement of Gravitomagnetic and Acceleration Fields Around Rotating Superconductors. arXiv: gr-qc/0610015.pdf, To appear in the proceedings of the STAIF-2007 conference published by AIP.
- [20] PODKLETNOV, E. & NIEMINEN, R. (1992). A Possibility of Gravitational Force Shielding by Bulk  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  Superconductor. *Physica C*, **203**, 441-444.
- [21] PODKLETNOV, E. (1997). Weak Gravitational Shielding Properties of Composite Bulk  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  Superconductor Below 70 K under EM Field. arXiv: cond-mat/9701074.
- [22] LI, N., NOEVER, D., ROBERTSON, T., KOCZOR, R. & BRANTLEY, W. (1997). Static test for gravitational force coupled to type II YBCO superconductors. *Physica C*, **281**, 260-267.
- [23] WOODS, C., COOKE, S., HELME, J. & CALDWELL, C. (2001). Gravity Modification by High-Temperature Superconductors. 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 8-11 July 2001, Salt Lake City, Utah, 1-10.
- [24] UNNIKRISSNAN, C. S. (1996). Does a superconductor shield gravity?. *Physica C*, **266**, 133-137.
- [25] HATHAWAY, G., CLEVELAND, B. & BAO, Y. (2003). Gravity Modification Experiment using a Rotating Superconducting Disc and Radio Frequency Fields. *Physica C*, **385**, 488-500.
- [26] ROBERTSON, G. A., LITCHFORD, R., THOMPSON, B. & PETER, R. (2001). Exploration of anomalous gravity effects by magnetized high-Tc superconducting oxides. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1-11.
- [27] ROUNDS, F. N. (1997). Anomalous Weight Behavior in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  Compounds at Low Temperature. arXiv: physics/9705043.

- [28] DE AQUINO, F. (2004). Effects of Extreme-Low Frequency Electromagnetic Fields on the Weight of the Hg at the Superconducting State. [www.greaterthings.com/News/FreeEnergy/Directory/AntiGravity/HgExperiment.pdf](http://www.greaterthings.com/News/FreeEnergy/Directory/AntiGravity/HgExperiment.pdf)
- [29] TAJMAR, M., HENSE, K., MARHOLD, K. & DE MATOS, C. J. (2004). Weight Measurements of High-Temperature Superconductors during Phase Transition in Stationary, Non-Stationary Condition and under ELF Radiation. Proceedings of the Space Technology and Applications International Forum (STAIF-2005), AIP Conference Proceedings 746, Issue 1, American Institute of Physics, New York, 2005, 1290-1297.
- [30] PODKLETNOV, E. (2001). Impulse Gravity Generator Based on Charged  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  superconductor with Composite Crystal Structure. arXiv: physics/0108005.
- [31] BERTOLAMI, O. & TAJMAR, M. (2005). Hypothetical Gravity Control and Implications for Spacecraft Propulsion. *Journal Propulsion Power*, **21**, 692-696, arXiv: gr-qc/0207123.
- [32] DE MATOS, C. J. & TAJMAR, M. (2003). Gravitoelectromagnetic Properties of Superconductors – A Brief Review. arXiv: cond-mat/0406761.
- [33] TAJMAR, M. & DE MATOS, C. J. (2006). Local Photon and Graviton Mass and its Consequences. arXiv: gr-qc/0602591.
- [34] DE MATOS, C. J. & TAJMAR, M. (2001). Gravitational Poynting Vector and Gravitational Larmor Theorem in Rotating Bodies with Angular Acceleration. arXiv: gr-qc/0107014.
- [35] ARMINJON, M. (2004). Ether theory of gravitation: why and how? arXiv: gr-qc/0401021
- [36] LEVY, J. (2006). Basic Concepts for a Fundamental Aether Theory. arXiv: physics/0604207
- [37] RUGHEDE, O. D. (2006). On the Theory and Physics of the Aether. *Progress in Physics*, **1** (1), 52-56.
- [38] CAHILL, R. T. (2003). Gravity as a quantum foam in-flow. *Apeiron*, **11**, 1-52, arXiv: physics/0307003.
- [39] LAIDLAWA, A. (2004). On The Electromagnetic Basis for Gravity. *Apeiron*, **11** (3), 19-57.
- [40] EVANS, J. (2002). Gravity in the Century of Light. In: EDWARDS, M. E. (2002). Pushing gravity: new perspectives on Le Sage's theory of gravitation. Montreal: *Apeiron*, 9-40.
- [41] EINSTEIN, A. & MAYER, W. (1932). Einheitliche Theorie von Gravitation und Elektrizität. *Annalen der Physik*, 130-137.

- [42] EINSTEIN, A. (1925). Einheitliche Feldtheorie von Gravitation und Elektrizität. *Annalen der Physik*, 414-419.
- [43] CAHILL, R. T. (2005). Novel Gravity Probe B Frame-Dragging Effect. *Progress in Physics*, **3**, 30-33.
- [44] TURTUR, C. W. (2004). An easy way to Gravimagnetism. arXiv: physics/0406078.