

Dreht sich die Erde wirklich?

S. Draszow, Universität Koblenz, U. Backhaus, Universität Essen

Ein Foucault-Pendel ist ein eindrucksvoller, aber nur schwer zu durchschauender Hinweis auf die Rotation der Erde um ihre Achse. Ein viel leichter zu verstehender Nachweis beruht auf der Tatsache, dass Gegenstände, die aus der Ruhe fallen gelassen werden, nicht etwa nach Westen hinter der rotierenden Erde zurückbleiben, sondern ihr im Gegenteil nach Osten vorauseilen.

Leider ist dieser von Newton vorhergesagte Effekt selbst bei großen Fallhöhen so klein, dass er nur äußerst schwierig nachgewiesen werden kann.

Im Rahmen einer Staatsexamensarbeit wurde trotzdem versucht, die so genannte Ostabweichung im nur 16 m hohen Treppenhaus der Universität Koblenz nachzuweisen. Über Erlebnisse und Ergebnisse wird berichtet.

1 Einleitung

Die Kugelgestalt der Erde ist heute, z.B. durch das aus einer Apollo-Kapsel aufgenommene Bild der „Vollerde“, jedem Kind bekannt. Auch die Rotation der Erde um ihre Achse hat sich herumgesprochen und wird als Ursache für den Tag- und Nachtwechsel angesehen. Beiden Aussagen fehlt jedoch die Einbettung in die eigene Erfahrungswelt. Ist es schon schwierig, sich selbst an die Oberfläche einer Kugel zu versetzen, sich vielleicht sogar in die Lage der „Antipoden“ hineinzudenken, so ist fast unmöglich sich vorzustellen, wie man selbst an der Erdrotation teilnimmt. In den Worten Wagenscheins:

Daran zu glauben, ist nun wirklich für einen unbefangenen und selbständig denkenden Menschen eine noch viel größere Zumutung als die Anerkennung der Kugelgestalt. Hat er jene annähernd, in dem Maße wie Exupéry, sich angeeignet, so fühlt er sich doch am „Leib“ (in Keplers Sprache) der Erde ruhen. Nun soll er aber glauben, wenn er im Schweigen etwa des Gebirges steht, in dem nichts sich regt, er sei in rasender Fahrt; wir alle. Eine wider-

sinnige Behauptung, weil sie aller ungekünstelten Erfahrung widerspricht. (Wagenschein 1967)

Tatsächlich lässt sich aus der Sicht eines einzelnen Erdbewohners nur schwer zwischen Himmelsdrehung und Erdrotation unterscheiden, und die Menschheit hat sich, auch nach Kopernikus, noch lange geweigert, der unmittelbaren Wahrnehmung zum Trotz die Drehung der Erde zu akzeptieren. Als allerdings der erste irdische Nachweis gelang, war dieser Beweis, zumindest für die Experten, nicht mehr erforderlich.

Einen skeptischen Lernenden wird man durch moderne Argumente wie die Abplattung der Erde, die Zunahme der Erdbeschleunigung mit zunehmender geografischer Breite, die Westablenkung der Passatwinde und die unterschiedliche Rotationsrichtung von Zyklonen auf der Nord- und auf der Südhalbkugel der Erde nicht völlig überzeugen können, weil sich alle diese Effekte der unmittelbaren Wahrnehmung entziehen und das Verlassen des irdischen Standortes oder zumindest weite Reisen erfordern.

Bevor Foucault 1851 die Erddrehung mit seinem berühmten Pendelversuch demonstrierte, war der empirische Nachweis, in allerdings schwierigen Experimenten mit nicht völlig befriedigenden Ergebnissen, bereits

mehrfach (Guglielmini, 1791; Benzenberg, 1802, 1804; Reich, 1832, u.a.) mit Fallversuchen geglückt.

Es ist unstreitig der überzeugendste Beweis von der Achsendrehung der Erde, dass genau gedrehte Kugeln, die in großen Höhen mit aller Sorgfalt losgelassen werden, nicht senkrecht fallen, sondern östlich vom Lothe abweichen. Man sieht hiebey einen unmittelbaren Beweis von der Bewegung der Erde, der so überzeugend ist, dass jedermann ihn begreift, und den selbst Ptolomäus, Tycho und Riccioli nicht würden haben läugnen können. (Benzenberg 1804)

Trotz der wesentlich einfacheren Handhabbarkeit des Foucault'schen Pendelversuches stellen diese Fallversuche, die auf einen Vorschlag Newtons zurückgehen, auch heute noch den unmittelbarsten Beweis für die Drehung der Erde dar, weil der Zusammenhang zwischen Effekt und Schlussfolgerung leicht einzusehen ist:

Wenn nämlich die Erdkugel wirklich wie ein Karussell umläuft, dann müßte beim Sturz eines Steines aus einem sehr hohen Turm sich bemerkbar machen, daß der Stein da oben (da „außen“) einen viel schnelleren Schwung hat als der Erdboden, auf dem er schließlich landen wird. Daß also die Turmspitze den Stein nach Osten vorausschleudern müßte! Vom Stein aus beschrieben: er kann den schnelleren Schwung auch während dieses länger dauernden Falles nicht „vergessen“, er bringt ihn „beharrlich“ mit sich und legt ihn „unten hin.“ (Wagenschein 1967)

Trotzdem sind Versuche, die Erddrehung mit schulischen Mitteln nachzuweisen, unseres Wissens nur von Trittelvitz (1965) und Schmelting/Schön (die 1995 die auf Hagen

(1912) zurückgehende Verfeinerung des Fallexperimentes mit einer Atwood'schen Fallmaschine nachvollzogen) veröffentlicht worden. Deshalb wurde im Rahmen einer Staatsexamensarbeit versucht, die so genannte Ostabweichung im nur 16 m hohen Treppenhaus der Universität Koblenz nachzuweisen.

2 Theorie der Fallversuche

Betrachtet man den Fallvorgang „von außen“, d.h. in einem Inertialsystem, dann wird der aus der Ruhe (bezüglich der Erde) fallen gelassene Körper nach Osten „vorausgeschleudert“, weil der Startpunkt weiter von der Rotationsachse entfernt ist. Der Effekt wird dadurch verstärkt, dass die Horizontalgeschwindigkeit des fallenden Körpers wegen der Drehimpulserhaltung sogar zunimmt.

Auf der Nordhalbkugel weicht der fallende Körper zusätzlich nach Süden vom Lot ab, weil seine Bahnebene nicht senkrecht auf der Rotationsachse steht, sondern den Erdmittelpunkt enthält: Er durchläuft ein Stück einer Kepler-Ellipse mit dem Erdmittelpunkt in einem Brennpunkt.

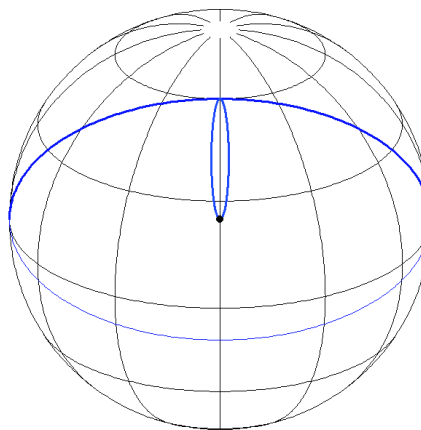


Abbildung 1: Bahnebene und Keplerellipse

Abb. 1 veranschaulicht die Bahnebene für einen Startpunkt bei einer geografischen Breite von 60° . Eingezeichnet ist zusätzlich die Bahnellipse, die der Körper durchlaufen würde, wenn die Gesamtmasse der Erde in ihrem Mittelpunkt konzentriert wäre.

Betrachtet man dagegen die Bewegung im Bezugssystem, das mit der Erde rotiert, dann

	Fallhöhe in m	östl. Abweichung in mm	südl. Abweichung in mm
Hooke 1679	8.20	„südöstliche Abweichung“	
Guglielmini 1789	78.30	11.5	9.8
Benzenberg 1802	76.34	9.0	3.4
Benzenberg 1804	85.10	11.5	0.0
Reich 1831	158	28.4	4.4

Abbildung 2: Historische Ergebnisse für Ost- und Südabweichung

wirkt auf den fallenden Körper die Gesamtkraft

$$F_{ges} = \vec{F}_G + \vec{F}_Z + \vec{F}_C.$$

Die Zentrifugalkraft \vec{F}_Z zeigt nach Süden, das Lot aber auch. Es kommt jedoch nur auf die Abweichung vom Lot an. Deshalb reicht es, den Einfluss der Coriolis-Kraft zu untersuchen.

Die Corioliskraft $\vec{F}_C = 2m\vec{v} \times \vec{\omega}$ zeigt bei senkrechtem Fall nach Osten. Aus der daraus resultierenden Beschleunigung

$$a_{Osten} = 2v_{\perp}\omega_{\parallel} = 2g\omega \cos \varphi t$$

erhält man die Ostabweichung durch zweimalige Integration:

$$s_{Osten} = \frac{1}{3}\omega \cos \varphi t_F^3$$

Dabei ist t_F die gesamte Fallzeit, die gemäß

$$t_F = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

mit der Fallhöhe h zusammenhängt.

Durch die Bewegung nach Osten entsteht aber auch eine nach Süden gerichtete Coriolis-Beschleunigung:

$$a_{Süden} = 2v_{Osten}\omega_{\perp} = 2g\omega \cos \varphi \omega \sin \varphi t^2,$$

die die folgende Südabweichung zur Folge hat:

$$s_{Süden} = \frac{1}{6}g\omega^2 \sin \varphi \cos \varphi t_F^4$$

Da die Südabweichung erst eine Folge der, sehr langsamen, Bewegung des Fallkörpers nach Osten ist, ist der zu erwartende Effekt bei vernünftigen Fallhöhen unmessbar klein. Die folgende Tabelle zeigt einige Werte.

h in m	s_{Osten} in mm	$s_{Süden}$ in mm
10	0.45	0.00
20	1.26	0.00
50	4.98	0.00
100	14.07	0.00
200	39.80	0.01
500	157.32	0.04
1000	444.97	0.18

Abbildung 3: Theoretische Werte

Trotz dieser theoretischen Vorhersage trat bei fast allen historischen Experimenten eine Abweichung nach Südosten auf (s. Tabelle, Angaben nach Benzenberg ([1])):

- Hooke berichtete ohne Angabe von Messwerten, eine südöstliche Abweichung gemessen zu haben.
- Guglielmini maß 1789 eine Südabweichung, die fast ebenso groß wie die Ostabweichung war. Nach Einspruch von Laplace stimmt er diesem, jedoch ohne Begründung zu. Das veranlasste Laplace zu der Bemerkung: „... allein (die Ostablenkung) ist nun kein Beweis mehr von der Bewegung der Erde, weil die andere Abweichung nach Süden gar nicht stimmt.“
- Auch Benzenberg stellte zunächst eine Südabweichung fest, die Olbers theoretisch bestätigte. Erst Gauss stellte Übereinstimmung der Ostablenkung mit

der Theorie fest, hielt aber die zu erwartende Südabweichung für völlig unmerklich. Erst bei den darauf folgenden Fallversuchen in einem Bergwerkschacht in Schlebusch fand Benzenberg weder Nord- noch Südabweichung.

- Bei den Fallversuchen Reichs in Freiberg zeigte sich ebenfalls eine, wenn auch kleine, südliche Ablenkung, was Reich veranlasste, Benzenbergs Worte zu wiederholen: „Sonderbar bleibt doch diese Tendenz der Fehler nach Süden.“

3 Die Experimente

Die Fallversuche wurden im Treppenhaus des G-Gebäudes der Universität Koblenz durchgeführt. Die zur Verfügung stehende Fallhöhe betrug 16.50 m. Wegen der großen Empfindlichkeit des Experimentes konnte nur abends und am Wochenende gemessen werden – und das auch nur, wenn es draußen nahezu windstill war! Für die Messungen war die Mitwirkung eines Partners erforderlich, mit dem die Verständigung in dem hallenden Treppenhaus schwierig war.

Als großes Problem erwies sich das Hochhüpfen des Fallkörpers nach dem Aufprall. Dabei prallte er gegen Wände und Decken, trug Beulen davon und „verletzte sich“ an der Aufhängung.

Den hier dargestellten Versuchen gingen zahlreiche Fehlversuche voraus:

- Der Versuch, den Fallkörper einen Faden zum Hochziehen hinter sich herziehen zu lassen, scheiterte.
- Ein zunächst benutzter Zylinder aus Aluminium erwies sich als ungeeignet, weil er keine stabile Fluglage einnahm und beim Aufprall unregelmäßige Dellen davontrug. Er wurde schließlich durch einen etwa tropfenförmigen Fallkörper aus Stahl (Abb. 4) ersetzt. Die Streuung der Messwerte verringerte sich dadurch schlagartig von 50mm auf 30mm.



Abbildung 4: Der Fallkörper

- Eine elektromagnetische Startvorrichtung erwies sich als ungeeignet.

Das folgende Verfahren erwies sich schließlich als das Zweckmäßigste:

- Als Fallkörper wurde ausschließlich der tropfenförmige Körper verwendet. Er wurde nach dem Fall in einem Korbchen als „Aufzug“ wieder nach oben gezogen.
- Zunächst musste nach jedem Fall der Fußpunkt des Lotes neu bestimmt werden – eine Prozedur, die bis zu 15 min Zeit in Anspruch nahm. Später reichte dann eine Lotbestimmung pro Serie je etwa acht Fallversuchen.
- Der Fallkörper hing über eine stabile Stativkonstruktion an einem dünnen Faden, der zum Start durchgebrannt wurde, nachdem die Schwingungen des Körpers durch vorsichtiges Dämpfen mit einem Pinsel abgeklungen waren (Abb. 5).



Abbildung 5: Vorbereitung zum Start

- Ausgewertet wurden nur die Versuchsserien, bei denen die Streuung der Messwerte kleiner als 10mm war.

4 Messergebnisse

Abbildung 6 zeigt alle 109 auf diese Weise ermittelten Werte. Mit bloßem Auge ist die Tendenz der Ergebnisse zu positiven x -Werten, d.h. nach Osten zu erkennen. Die Statistik bestätigt diesen Eindruck:

Die mittlere Abweichung nach Osten beträgt 1.8mm.

Leider ergibt sich aber auch eine Abweichung nach Süden von 0.9mm. Das Gesamtergebnis lautet deshalb:

$$\begin{aligned}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) &= (s_{\text{Osten}}, s_{\text{Süden}}) \\ &= (1.8, 0.9)\text{mm} \pm (3.0, 2.2)\text{mm}\end{aligned}$$

Der mittlere Fehler dieses Ergebnisses beträgt:

$$(\bar{\sigma}_x, \bar{\sigma}_y) = (0.3, 0.2)\text{mm}$$

Dabei schätzen wir die Zuverlässigkeit unseres Ergebnisses für die Ostabweichung höher ein als die der Südabweichung, weil die Himmelsrichtungen nur mit Hilfe eines Lageplanes des Gebäudes, also nicht sehr genau, bestimmt wurden. Eine Drehung des Koordinatensystems aber ändert die Südabweichung drastisch, lässt aber den Wert der Ostabweichung weitgehend unverändert.

5 Schlussfolgerungen

Als Ergebnis der Arbeit kann bestätigt werden:

Ja, die Erde dreht sich. Sie schleudert aus der Ruhe fallen gelassene Körper nach Osten voraus.

Mit Benzenberg und Reich muss jedoch zugegeben werden:

Sonderbar bleibt aber die merkwürdige Tendenz der Fehler nach Süden!

Abschließend soll mit kurzen Zitaten aus der Examensarbeit zur Nachahmung (und vielleicht zur Verbesserung) der Versuche angeregt werden:

Die Ergebnisse sind durchaus akzeptabel, die (bei einem im fächerübergreifenden Unterricht durchgeführten Versuch) zu erwartende Begeisterung der Schüler enorm.

Auch meine Helfer waren schon nach kurzer Zeit völlig fasziniert von den Messergebnissen, ... Wie packend ist es aber auch, Physik mal anders zu erleben!

Dieses Physik-Erleben rechtfertigt sämtliche, auch aufwändigere Vorbereitungen.

Literatur

- [1] J. F. Benzenberg, *Versuche über die Umdrehung der Erde*, Düsseldorf 1845
- [2] W. Trittelvitz, *Fallversuche zum Nachweis der Erddrehung*, Praxis der Naturwissenschaften 11/1965, S. 298
- [3] J. Schmelting, L. Schön, *Ein Nachweis der Erdrotation mit der Atwoodschen Fallmaschine*, DPG-Tagung 1995, S. 310
- [4] S. Draszow, *Nachweis der Erdrotation durch Fallversuche*, Examensarbeit, Koblenz 1996
- [5] M. Wagenschein, *Die Erfahrung des Erdballs*, in: *Naturphänomene sehen und verstehen – Genetische Lehrgänge*, Klett, Stuttgart 1988

Ergebnisse der Fallversuche

Fallhöhe 16.51m

$$\begin{aligned} \bar{x} &= 1.79\text{mm}, \sigma_x = 2.95\text{mm}, \bar{\sigma}_x = 0.28\text{mm} & (1) \\ \bar{y} &= -0.91\text{mm}, \sigma_y = 2.24\text{mm}, \bar{\sigma}_y = 0.21\text{mm} & (2) \end{aligned}$$

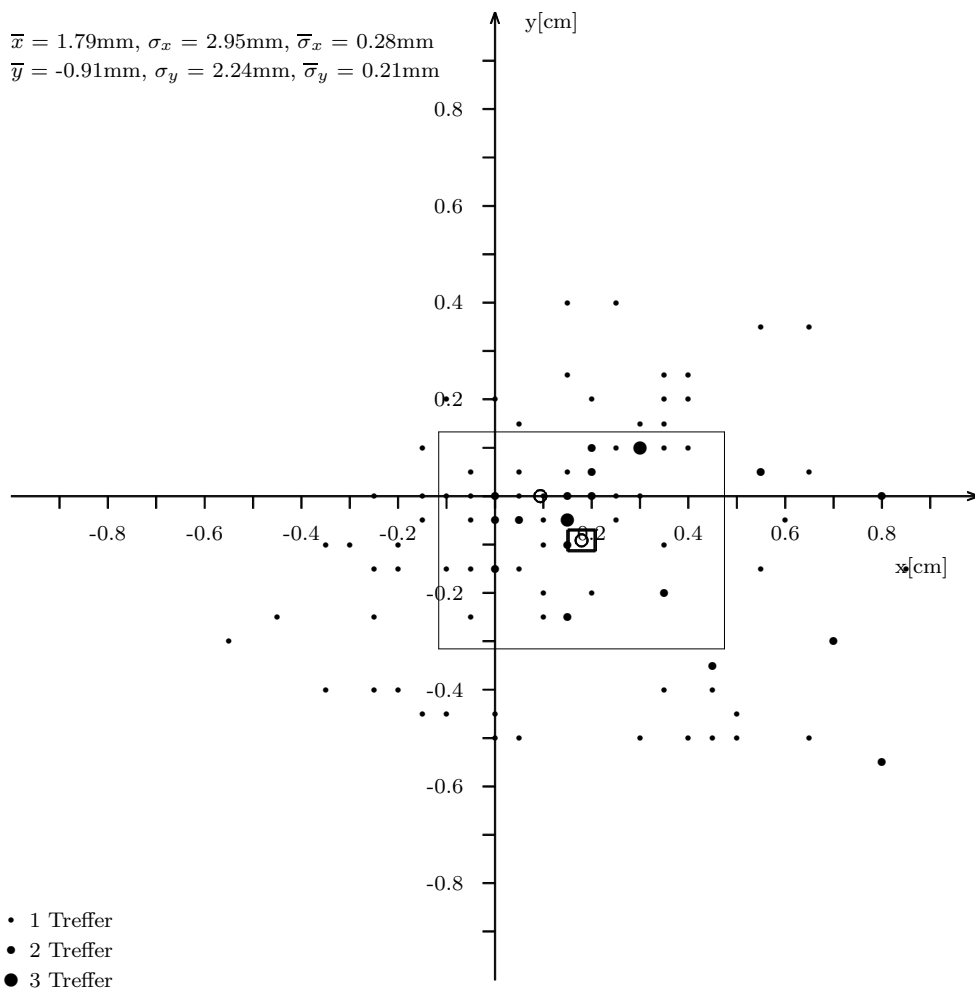


Abbildung 6: Ergebnisse der ausgewerteten Fallversuche

Beobachter und Zeit	Ort (geogr. Breite)	Zahl der Versuche	Fallhöhe in m	Östl. Abweichung in mm	
				beobachtet	berechnet
Guglielmini 1791/92	Bologna $\varphi = 40^{\circ}30'$	16	78,3	19±2,5 <small>wahrscheinl. Fehler</small>	11,3
Benzenberg 1802	Hamburg $\varphi = 53^{\circ}33'$	31	76,34	9,0 ± 3,6	8,7
Benzenberg 1804	Schlebusch $\varphi = 51^{\circ}25'$	29	85,1	11,5 ± 2,9	10,4
Reich 1831	Freiburg i.S. $\varphi = 50^{\circ}33'.1$	106	158,5	28,3 ± 4	27,4
Hall 1902	Cambridge (Mass.) $\varphi = 42^{\circ}22'.8$	948	23	1,5 ± 0,05	1,77
Flammarion 1903	Paris $\varphi = 48^{\circ}50'.8$	144	68	6,3	8,1
Draszow 1996	Koblenz $\varphi = 50^{\circ}$	109	16.5	1.8 ± 2.8	0.9

Abbildung 7: Das aktuelle Ergebnis im historischen Kontext (nach Wagenschein [5])