

Dreht sich die Erde?

Forschungsbericht über ein pädagogisches und physikalisches Experiment zum Nachweis der Erdrotation

Torre degli Asinelli 1791

Der Bremer Fallturm 2003

von

Julia Bähr

Marilen Logé

Kathrin Mechelk

Alexandra-Maria Operhalsky

Freie Universität Berlin 2005

Gefördert durch die Freie Universität Berlin, die Erhard-Höpfner-Stiftung, das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt, den Förderverein des ZARM an der Universität Bremen und weitere Unternehmen

Fachliche Beratung an der Freien Universität Berlin

Univ.-Prof. Dr. Jörg Ramseger

Arbeitsstelle Bildungsforschung Primarstufe
am Fachbereich Erziehungswissenschaft
und Psychologie
Habelschwerdter Allee 45
14195 Berlin
E-Mail: abp@zedat.fu-berlin.de
Homepage: www.fu-berlin.de/abp

Univ.-Prof. Dr. Fischler

Fachbereich Physik
Arnimalle 14
14195 Berlin
E-Mail: fischler@physik.fu-berlin.de

Univ.-Prof. Dr. Bodo Hamprecht

Fachbereich Theoretische Physik
Arminallee 14
14195 Berlin
E-Mail: bodo.hamprecht@physik.fu-berlin.de

Fachliche Betreuung im ZARM der Universität Bremen

Dr. Stefan Odenbach

ZARM Universität Bremen
Am Fallturm
28359 Bremen
E-Mail: odenbach@zarm.uni-bremen.de
Homepage: www.zarm.uni-bremen.de/ferrofluids.html

FAB - Fallturm Betriebsgesellschaft:

Leitung: Christian Eigenbrodt
Manfred Behrens,
Dieter Bischoff,
Frank Göken,
Kai Gehring (studentische Hilfskraft)

Inhaltsverzeichnis

1 Danksagung	4
2 Das Vorhaben	6
3 Historischer Rückblick zum Phänomen der Ostabweichung	9
4 Suche nach einem geeigneten Gebäude	14
4.1 Die Cargolifter Halle	14
4.2 Der Bremer Fallturm	16
5 Versuchsaufbauten	18
5.1 Vormodelle	18
5.2 Endgültiger Versuchsaufbau	18
5.2.1 Abwurfvorrichtung	18
5.2.2 Auffangvorrichtung	19
5.3 Bestimmung des Lotpunktes	20
6 Projektverlauf	22
7 Die Versuchsreihen und ihre Ergebnisse	23
7.1 Vorversuche zur Erprobung von Abwurfvorrichtung und Auffangvorrichtung	23
7.1.1 Vorversuch zum Testen des Auffangmaterials	23
7.1.2 Vorversuch zum Testen der Elektromagnete	27
7.2 Erste Versuchsreihe im Juni 2003	30
7.3 Zweite Versuchsreihe im September 2003	39
8 Diskussion der Befunde	45
8.1 Physikalische Befunde	45
8.2 Pädagogische Befunde	51
9 Literaturverzeichnis	53
10 Anhang	54
Tagung der GDSU im März 2004	
Beitrag in den FU-Nachrichten Nr. 1-3/2004	
Beitrag im Tagesspiegel vom 14.3.2004	

1 Danksagung

Dies ist das Dokument eines studentischen Projektes an der Freien Universität Berlin. Bei unserem Projekt haben wir große Unterstützung erfahren. An dieser Stelle möchten wir allen, die uns geholfen haben, unseren herzlichsten Dank aussprechen.

Dabei ist zuvorderst Professor Dr. Jörg Ramseger, Fachbereich Erziehungswissenschaft und Psychologie an der Freien Universität Berlin, zu nennen, ohne den es dieses Projekt nicht gegeben hätte und ohne dessen Beistand und Ermutigung wir niemals so lange durchgehalten hätten.



Unsere Projektgruppe mit Professor Ramseger in Bremen

Unser Projekt wäre ohne die großzügige finanzielle Unterstützung der Erhard-Höpfner-Stiftung, des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, des ZARM-Fördervereins, der Arbeitsstelle Bildungsforschung Primarstufe und des Dekans des Fachbereichs für Erziehungswissenschaft und Psychologie der Freien Universität Berlin nicht möglich gewesen. Ihnen gilt unser besonderer Dank.

Außerdem möchten wir Prof. Dr. Helmut Fischler und Prof. Dr. Bodo Hamprecht vom Fachbereich Physik der Freien Universität Berlin danken, die uns fachlich beraten und mit uns geduldig zahlreiche Vorversuche durchgeführt haben.

Im Zentrum für angewandte Raumfahrttechnik und Mikrogravitation (ZARM) der Universität Bremen sind wir unserem Betreuer Dr. Stefan Odenbach und Manfred Behrens, Dieter Bischoff und Frank Göken von der Betriebsgesellschaft sowie Kai Gehring, dem studentischen Mitarbeiter, für unermüdliche Hilfe und kreative Lösungsvorschläge zu großem Dank verpflichtet.



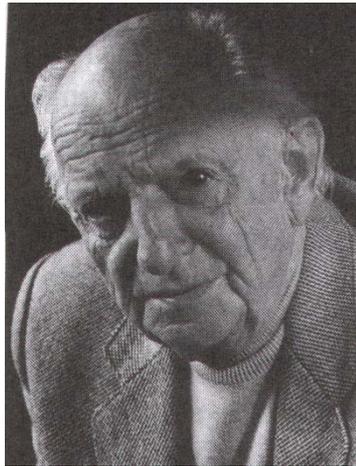
Unsere Projektgruppe mit drei Mitarbeitern der Betriebsgesellschaft

Des weiteren haben uns Manfred Logé mit Konstruktionszeichnungen und Ratschlägen, Herr Köck von der Firma Kolb & Söhne in München mit einer großzügigen Spende von 125 Kilogramm Plastilin und die Firma Opetna in Berlin-Neukölln mit der kostenlosen Bereitstellung des Kupferdrahtes und der Wicklung der Elektromagnete sehr geholfen. Vielen Dank!

Wir bedanken uns vielmals bei Ilja A. Wiese für kompetente physikalische und mathematische Unterstützung und bei Gerald Schmidt und Martin Logé für spontane Krisenbewältigung, organisatorische Hilfe und Materialbeschaffung.

2 Das Vorhaben

Im Wintersemester 2001/2002 besuchten wir ein Hauptseminar zur Sachunterrichtsdidaktik bei Prof. Dr. Jörg Ramseger (Lehrstuhl für Schulpädagogik / Didaktik des Sachunterrichts) an der Freien Universität Berlin mit dem Titel „Verstehen lehren. Die genetisch-sokratisch-exemplarische Methode“.



Martin Wagenschein¹

Diese Methode, die auf den Physiker Martin Wagenschein (1896-1988) zurückgeht, bietet eine zu den herkömmlichen Lehrmethoden alternative Möglichkeit zur Aneignung von physikalischem Wissen. Nach Wagenschein besteht ein Problem naturwissenschaftlichen Unterrichts darin, dass Schülerinnen und Schüler häufig physikalische Phänomene nicht wirklich verstehen, sondern sich darauf beschränken, bloße Formeln auswendig zu lernen. Dies ergibt sich aus der Entwicklung der Didaktik der Naturwissenschaften, die sich dem Zwang unterwirft, den Unterricht mit immer neuem Stoff anzufüllen, um der raschen Entwicklung der Erkenntnisse gerecht zu werden. Die Stofffülle und der damit verbundene Zeitdruck hindert die Lehrer oft daran, den Lernenden individuelle Zugänge zur Physik zu ermöglichen. Die Schüler, deren kognitive Leistung sich darauf reduziert, viele Lerninhalte in kurzer Zeit aufzunehmen, vergessen diese schnell wieder.

Martin Wagenscheins Kritik lässt sich am Beispiel der Vermittlung des Trägheitsgesetzes verdeutlichen. Zu diesem Phänomen können im Unterricht allgemeine Feststellungen festgehalten werden, wie, dass unbewegte Körper unbewegt bleiben, solange man sie nicht antreibt oder dass sich bewegende Körper langsamer werden, solange sie nicht weiter angetrieben werden. Diese Feststellungen entsprechen den Alltagserfahrungen und der

¹Bild entnommen aus: Jank, Werner; Meyer, Hilbert, 2002, S. 204.

physikalischen Wirklichkeit. Jedoch werden im Unterricht diese Feststellungen oft als laienhaft bezeichnet und der Lehrer greift zur, für manchen Schüler unklaren, Formulierung des 1. Newtonschen Axioms: *Ein Körper verharrt in dem Zustand der Ruhe oder in dem der gleichförmig, geradlinigen Bewegung, solange keine Ursache Anlass zur Änderung gibt.* Diese Aussage wird häufig nicht verstanden. Die Trias des Exemplarisch-Genetisch-Sokratischen soll den Schülern die Möglichkeit geben, Physik und das Entstehen von Gesetzmäßigkeiten zu verstehen und Forschergeist zu entwickeln. „Pädagogik hat mit dem Werdenden zu tun: mit dem werdenden Menschen und im Unterricht, als Didaktik – mit dem Werden des Wissens in ihm.“²

Nach Wagenschein ist der Unterrichtsansatz des Anhäufens auswendig gelernten Wissens das eigentliche Problem. Oft geht man im Unterricht vom Grundlegenden zum Komplexeren, wobei das Grundlegende nicht immer das Einfachere ist. Anstelle des additiven Ausweitens stofflicher Bereiche setzt Wagenschein das exemplarische Prinzip. Anhand einzelner ausgewählter Phänomene, die die Schüler in ihrer ganzen Tiefe nacherfahren und mit denen sie sich intensiv auseinandersetzen, sollen sie systematisches Denken lernen. „Das Einzelne, in das man sich hier versenkt, ist (...) Spiegel des Ganzen.“³ Das genetische Prinzip des Lehrgangs bezieht sich auf folgende Aspekte. Der erste Aspekt ist die Vorgehensweise im Unterricht. Dabei steht am Anfang ein Initiationsproblem. Die Schüler werden mit einem Problem konfrontiert, das sie Stück für Stück erkennen und erklären sollen. Dabei sollten verfrühte Abstraktionen entfallen. Die Erkenntnisvorgänge, die von den Schülern selbst geleitet werden, bleiben dabei für sie logisch, übersichtlich und nachvollziehbar. Das genetische Prinzip umfasst auch die Lehrerbildung. So soll sich der Lehrer durch die Lektüre historischer und physikalischer Quellen für Schülerfragen sensibilisieren und sich mit der Wissenschaftsgeschichte auseinandersetzen.

Dem sokratischen Prinzip nach moderiert der Lehrer den Prozess der Erkenntnisgewinnung durch geschickte Fragen, so dass die Schüler die Antworten und Einsichten selbst finden. Nach Wagenschein sind im sokratischen Gespräch die geistigen Kräfte am wirkungsvollsten. Sokrates versuchte, seine Schüler im Gespräch auf neue Ideen zu bringen. Ihre Bemerkungen hinterfragte er so lange, bis sie selbst in der Lage waren, die richtige Gesetzmäßigkeit zu formulieren.

Während des Hauptseminars bei Prof. Ramseger suchten sich die einzelnen Studentengruppen Forschungsvorhaben aus. Wir beschäftigten uns von da an im Sinne

²Wagenschein, Martin, 1982, S. 55.

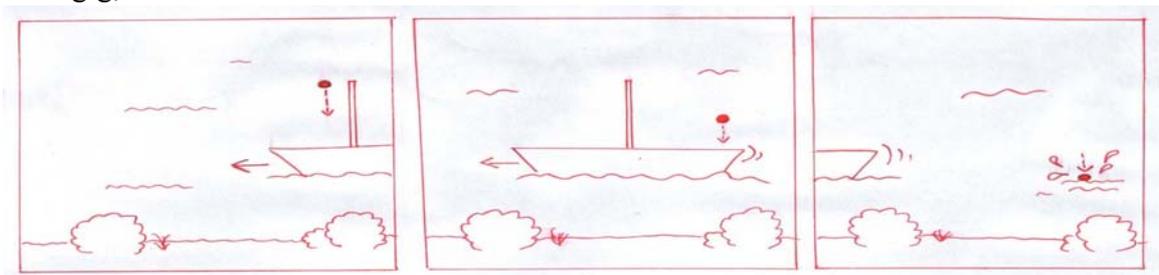
³Wagenschein, Martin, 1982, S. 12.

Wagenscheins mit einem historischen Fallexperiment, das die Erdrotation beweisen soll. Uns schien es interessant, ein jahrhundertealtes Experiment, dessen Ergebnis fundamental für unser Weltverständnis ist, zu hinterfragen, mit moderner Technik experimentell zu wiederholen und dabei nicht nur einen Blick hinter die Kulissen der Forschung zu werfen, sondern selber einmal reale Forschung zu betreiben.

3 Historischer Rückblick zum Phänomen der Ostabweichung

Wir beschäftigten uns zwei Jahre lang mit dem Phänomen der Ostabweichung von aus großer Höhe herabfallenden Kugeln zum Nachweis der Erdrotation. Unsere ersten Überlegungen galten vor allem den Erwartungen, die wir an das Experiment zu stellen hätten. Zunächst wollten wir herausfinden, was passiert, wenn man eine Kugel von einem 100 m hohen Turm fallen lässt, uns also mit dem Phänomen der Ostabweichung vertraut machen. In diesem Zusammenhang informierten wir uns über historische Fallversuche, bei denen Kugeln und ähnliche Gegenstände aus großer Höhe fallen gelassen wurden. Solche Fallexperimente wurden zumeist zu einer Zeit gemacht, in der die Erdrotation noch nicht allgemein anerkannt war.⁴ Bevor wir einen kurzen Überblick über verschiedene historische Fallversuche geben, möchten wir an dieser Stelle das Phänomen der Ostabweichung kurz erklären.

Drehte sich die Erde nicht, gäbe es während des Falls keine Abweichung der Kugel aus der Lotlinie, da die einzige Kraft, die auf die Kugel wirkt, die Erdanziehungskraft wäre, die sie senkrecht nach unten zieht. Wenn man aber von einer Erdrotation ausgeht, ist ein schlüssiger Gedanke, der uns wie vielen Menschen zu früheren Zeiten zunächst gekommen ist, dass die Kugel eine *West*abweichung haben müsste. Denn wenn man davon ausgeht, dass ein Objekt senkrecht nach unten fällt, während sich die Erde weiterdreht (vom Nordpol aus gesehen, dreht sich die Erde entgegen dem Uhrzeigersinn, also Richtung Osten), müsste das Objekt eigentlich westlich des Turmes auftreffen. Am Beispiel eines von West nach Ost fahrenden Schiffes kann man diesen Gedanken recht gut nachvollziehen: Angenommen, man lässt vom Mast eines stehenden Schiffes ein Objekt fallen, wird dieses erwartungsgemäß direkt unten am Mast auftreffen. Bewegt sich das Schiff jedoch fort, während das Objekt vom Mast fällt, müsste das Objekt dieser Theorie zufolge etwas hinter dem Mast des Schiffes aufschlagen, also westlich hinter dem Mast zurück bleiben, weil sich das Schiff unter dem Fallobjekt nach Osten bewegt, während sich die Kugel im freien Fall befindet. Der reale Aufschlagpunkt wäre in diesem Fall natürlich auch davon abhängig, wie schnell das Schiff fährt.

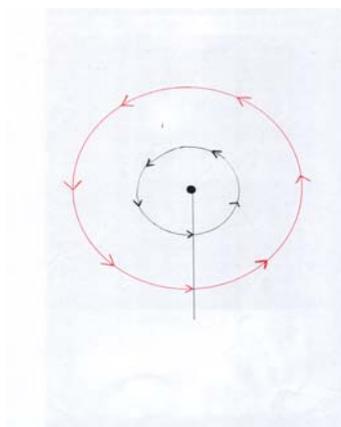


⁴vgl. Wagenschein, Martin, 1970, S. 25-57.

Da es aber offenbar gar keine Abweichung zu geben scheint, wurde das Experiment zu Galileis Zeiten als Beweis gegen eine Erdrotation angesehen. „Aristoteles also behauptet, das sicherste Argument für die Unbeweglichkeit der Erde sei die Beobachtung, daß senkrecht in die Höhe geschleuderte Körper längs derselben Linie an den nämlichen Ort zurückkehren, von dem aus sie geworfen wurden; und zwar auch dann, wenn die Bewegung sich sehr weit in die Höhe erstreckte. Dies aber könnte nicht der Fall sein, wenn die Erde sich bewegte; denn während der Zeit, wo der geschleuderte Körper [...] sich auf- und abwärts bewegt, würde der Ausgangspunkt des geschleuderten Körpers sich infolge der Erdumdrehung ein bedeutendes Stück nach Osten verschoben haben [...]“⁵

Galilei sträubte sich gegen diese Interpretation und widerlegte diese Annahme, indem er auf die Trägheit der Masse verwies. Trägheit ist die Eigenschaft von Körpern, einer Änderung der Geschwindigkeit oder Bewegungsrichtung einen Widerstand entgegen zu setzen. Diese Trägheit spürt man beispielsweise, wenn man in einem Auto sitzt, welches eine Kurve fährt: Man wird nach außen gedrängt, da der Körper eigentlich noch die ursprüngliche Richtung und Geschwindigkeit beibehalten will. Eine Kugel, die von einer Turmspitze hinab fällt, drängt ebenfalls weiter in Richtung der Erddrehung, während sie durch die Erdanziehungskraft gleichzeitig nach unten gezogen wird. Diese Bewegung in Richtung der Erdrotation reicht nach Galilei aus, um die Westabweichung auszugleichen, das heißt, dass die Kugel beim Auftreffen am Boden keine Abweichung zeigen dürfte.

Galilei ging allerdings davon aus, dass der Turmfuß genauso schnell wie die Turmspitze sei.



Jedoch ist es bei einer Rotation so, dass ein außen gelegenes Objekt (siehe Grafik: äußere Kreislinie) eine höhere Geschwindigkeit hat, als ein Objekt, welches dicht an der Rotationsachse liegt (siehe Grafik: innere Kreislinie). Denn je nachdem, wo sich ein Objekt im Verhältnis zur Rotationsachse befindet, muss es mehr oder weniger Weg in der gleichen Zeit zurücklegen. Aus diesem Grund ist beim Fall der Kugel sogar eine kleine Ostabweichung zu erwarten.

Denn wie Galilei schon richtig erkannte, ist die Kugel träge, will also in Richtung der Erdrotation von West nach Ost weiter. Da die Turmspitze aber eine höhere

⁵ Äußerung *Salviatis* in: Galilei, Galileo, 1982, S. 145.

Geschwindigkeit hat als der Turmfuß, reicht dieser Schwung aus, eine Ostabweichung zu bewirken.

1679 äußerte Newton ebenfalls den Vorschlag, mit Fallexperimenten die Erdumdrehung nachzuweisen. Dabei setzte er im Gegensatz zu Galilei richtig voraus, dass ein Körper, aus großer Höhe fallen gelassen, eine größere Rotationsgeschwindigkeit besitzt, als ein Körper, der näher an der Erdachse fallen gelassen wird. Der Körper müsste demnach östlich vom Lotpunkt auftreffen, da er die größere Rotationsgeschwindigkeit aufgrund des Trägheitsprinzips beibehält.

Die ersten Versuche, die diese Vermutungen bestätigen sollten, misslangen, da man eine zu geringe Fallhöhe nutzte, die nur eine Abweichung von weniger als 0,5 mm zuließ.

Erst im Jahre 1791, mehr als 200 Jahre nach den Fallversuchen Galileis, wurden wieder Fallversuche durch den italienischen Geometer Giovanni Battista Guglielmini im *Torre degli Asinelli*, dem höheren der beiden schiefen Türme in Bologna, durchgeführt.

Benzenberg beschreibt die Versuche: „Der Thurm degli Asinelli ist zu diesen Versuchen sehr geschickt: Er ist über 300 Pariser Fuß hoch, er ist mehrere Jahrhunderte alt, und liegt mitten in der Stadt. [...] Oben schließt ihn ein Gewölbe, auf dem ein Thürmchen von 33 Fuß Höhe ist, in welchem sich eine Glocke zu bürgerlichem Gebrauch befindet. [...] Gut gedrehte und polierte Bleykugeln von 1 Zoll Durchmesser waren zu diesen Versuchen bestimmt. [...] Der Faden der Kugel wurde durch eine Spalte der kupfernen Platte gezogen und an den Haken befestigt. Die Kugel hing dann zwey Linien unter der Platte. Sobald sie völlig still hing, wurde der Faden oben an der Platte abgebrannt. Die Platte diente zur Verkürzung der Schwingung, sie bestimmte die Lage der Kugeln und hielt den beym Abbrennen etwa entstehenden Luftzug ab. Die Kugeln sollten unten auf eine Wachsplatte aufschlagen, und Guglielmini hoffte, daß sie dort ziemlich genau an einerley Stelle eintreffen würden.“⁶

Guglielmini berücksichtigte schon bei seinen ersten Versuchen, dass beim Abwurf auf die Kugeln einwirkende Störungen möglichst vermieden werden sollten. Trotz der Führung des Fadens durch die Platte konnte Guglielmini mit Hilfe eines Vergrößerungsglases Schwingungen der Kugeln bemerken, weshalb er eine besondere Abwurfvorrichtung konstruieren ließ. Bei dieser Abwurfvorrichtung wurde die Kugel mit einem eingelassenen Faden an einem kleinen Stift befestigt, der aus einer Platte herausragte. Außerdem war eine Zange an der Platte angebracht, deren Schneiden den Faden unterhalb des Stiftes zusätzlich

⁶ Benzenberg, J.-F., 1804, S. 262ff.

hielten. Zur Einleitung des Falles wurde der Faden oberhalb der Zangenschneiden abgeschnitten, so dass der Faden nur noch von der Zange und nicht mehr von dem Stift gehalten wurde. Anschließend wurde die Zange mittels eines Hebels, mit dem man Druck auf eine Feder ausübte, geöffnet und die Kugel dadurch fallen gelassen. Guglielmini beachtete jedoch nicht, dass sich dieser Hebeldruck negativ auf die Kugeln übertrug und sie daher auch mit dieser Konstruktion nicht aus einer vollkommenen Ruhe heraus fallen konnten. Guglielmini berechnete für die Ostabweichung seiner fallen gelassenen Kugeln einen Mittelwert von 11,3 mm.

1802 führte Benzenberg im Turm der Michaeliskirche in Hamburg das Experiment mit einer Fallhöhe von 76,3 m durch. Er achtete genau auf die Bestimmung des Lotpunktes, indem er ihn einmal vor und einmal nach jeder Beobachtungsreihe feststellte. Störungen, die von der Aufhängevorrichtung und der Art des Abwurfs der Kugeln herrühren konnten, versuchte Benzenberg auszugleichen, indem er nach jeder Beobachtungsreihe die Aufhängevorrichtung um 180° drehte. Benzenberg hingte bei seinen Fallversuchen in der Michaeliskirche, wie Guglielmini, zunächst die Kugeln mit einem Faden an einem Haken auf, nachdem er den Faden durch ein feines Loch in einer Messingplatte unterhalb des Hakens geführt hatte. Mit einer sehr scharfen Schere schnitt er dann den Faden in der Richtung ab, in der dieser in dem Loch der Platte anlehnte, so dass der Faden der Schere nicht ausweichen konnte. Benzenberg versuchte, eine sich auf die Kugeln übertragende Bewegung zu vermeiden, indem er den Schnitt möglichst nah über der Platte ausführte. Da er trotzdem feststellen musste, dass durch das Abschneiden der Kugel ihr Fall zu sehr beeinflusst wurde, ließ er sich eine ähnliche Abwurfvorrichtung anfertigen wie die Guglielminis. Diese war so konstruiert, dass sich die Zangenschneiden durch leichten Druck über den Hebelarm öffneten. Benzenberg ließ die Kugeln auf einer Holzplatte auftreffen, die er aus Pockholz anfertigen ließ, nachdem Platten aus Mahagoni-, Birnbaum- und Eichenholz zerschlagen worden waren.

Bei den Versuchen zeigten sich große Abweichungen zwischen den einzelnen Aufschlagpunkten der Kugeln, trotzdem konnte eine deutliche Tendenz zur östlichen Abweichung vom Lotpunkt nachgewiesen werden. Benzenberg errechnete einen Mittelwert von 8,7 mm.

1804 wiederholte Benzenberg die Versuche im Bergwerk Schlebusch, in dem sich der Vorteil ergab, dass der Lotpunkt im Kohlschacht stabiler als im Holzturm der

Michaeliskirche war. Bei den Versuchen im Bergwerk zu Schlebusch ergänzte Benzenberg die Zangenabwurfvorrichtung mit einem Kasten, der unterhalb der Zange angebracht war. Die abzuwerfende Kugel wurde in den Kasten gehalten, ihr Faden durch einen Spalt in dessen Deckel geführt und der Faden dann, wie gehabt, an einem Stift befestigt und mit der Zange festgehalten. Die Kugel wurde so durch den Kasten vor jeglichem Luftzug, der durch die Bewegungen der Beobachtenden entstehen konnte, geschützt. Benzenberg konnte bei diesen Versuchen eine Ostabweichung von 10,4 mm feststellen.

1831 führte Reich im Dreibrüderschacht zu Freiberg Versuche durch. Dabei verfügte er über eine Fallhöhe von 158,5 m und maß 27,4 mm Abweichung. Durch eine neue Art der Einleitung des freien Falls kam er zu Ergebnissen, die die Ostabweichung nachwiesen, wenn auch immer noch Abweichungen zu erkennen waren. Reich verwandte für seine Versuche Bleikugeln, die in kochendem Wasser erwärmt und nach dem Abtrocknen auf einen Metallring gesetzt wurden. Ihre Abkühlung und die damit verbundene Volumenverminderung bewirkten, dass sie durch den Ring fielen, ohne dass man von außen Einfluss auf sie nehmen musste.

Hall dagegen nutzte eine Fallhöhe von nur 23 m und berechnete als Mittelwert von 948 Beobachtungen eine Abweichung 1,77 mm.

Flammarion benutzte für seine Fallversuche 1903 im Pariser Pantheon einen Elektromagneten zum Abwurf der Kugeln. Dieser Elektromagnet hielt die gut polierten, homogenen Stahlkugeln und ließ sie nach Ausschaltung des Stromes auf eine Bleiplatte von 2,5 mm Dicke mit Stahlunterlage fallen, auf der neben dem Lotpunkt die Nord-Süd- und die Ost-West-Richtung eingezeichnet waren.

Durch die Beschäftigung mit den Ergebnissen der historischen Versuche konnten wir uns darauf einstellen, dass eine Ostabweichung zwar mit hoher Wahrscheinlichkeit bei unseren Versuchen zu beobachten sein würde, dass aber wegen der äußerst kleinen Messwerte jegliche Störfaktoren bedacht und so klein wie möglich gehalten werden mussten.

4 Suche nach einem geeigneten Gebäude

Für unseren Versuch benötigten wir ein sehr hohes Gebäude, damit die geringe Ostabweichung der herabfallenden Kugeln sichtbar werden würde.

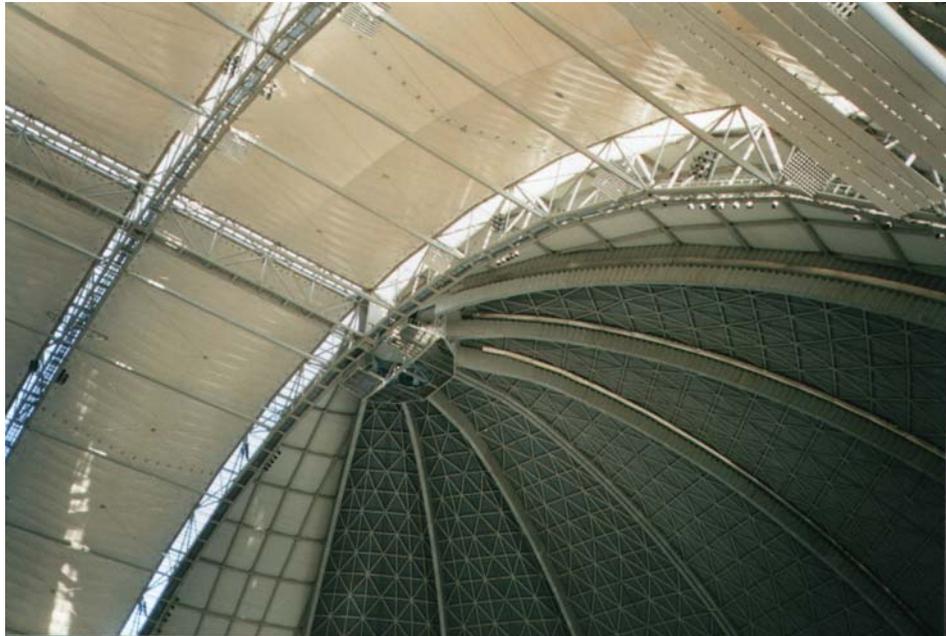
Zunächst dachten wir an den Berliner Dom und die Michaeliskirche in Hamburg, in der schon Benzenberg seine Versuche durchführte. Diese Ideen verwarfen wir jedoch schnell wieder, da die Höhe der Kirchen nicht ausreichte und das wertvolle Interieur hätte beschädigt werden können.

4.1 Die Cargolifter-Halle

Im Januar 2002 fuhren wir zur Cargolifter Halle in Brand (Unterspreewald), um zu untersuchen, ob sich die Halle eignet. Aufgrund ihrer Höhe glaubten wir, dort unsere Versuche durchführen zu können. Von der dortigen Pressestelle erfuhren wir, dass die Hallenbetreiber nicht abgeneigt wären, uns zu unterstützen. Daher schauten wir uns die Gegebenheiten vor Ort an.

Das Werftgelände ist ein ehemaliger Militärflugplatz der russischen Luftwaffe. Die Halle ist 107 m hoch, 360 m lang und 210 m breit. Eigentlich sollten dort Luftschiffe gebaut werden, jedoch wurde die Halle auch für andere Projekte, wie Modellflugzeugwettbewerbe, genutzt.

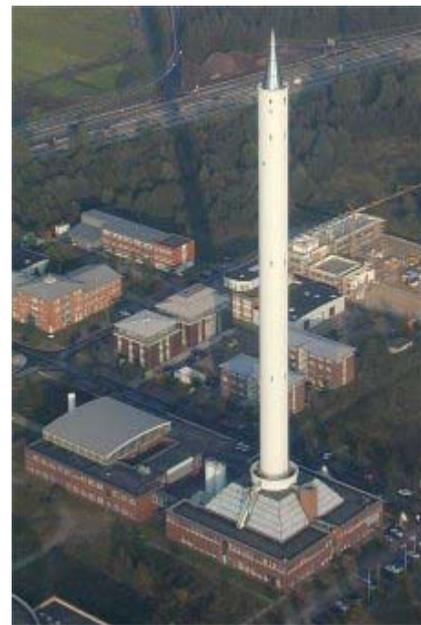
An der Decke der Halle befinden sich Plattformen, von denen man gut die Kugeln hätte fallen lassen können.



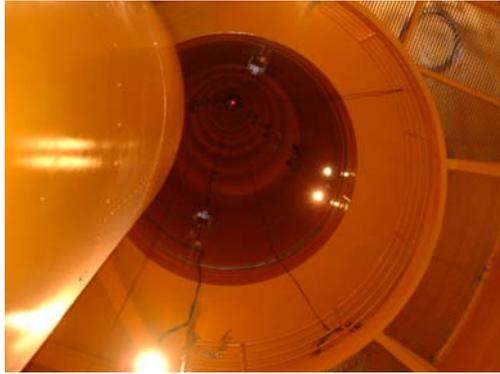
Es sprachen jedoch die starken thermischen Strömungen in der Halle, die die Kugeln zu sehr abgelenkt hätten, gegen den Plan, unsere Versuche dort durchzuführen.

4.2 Der Bremer Fallturm

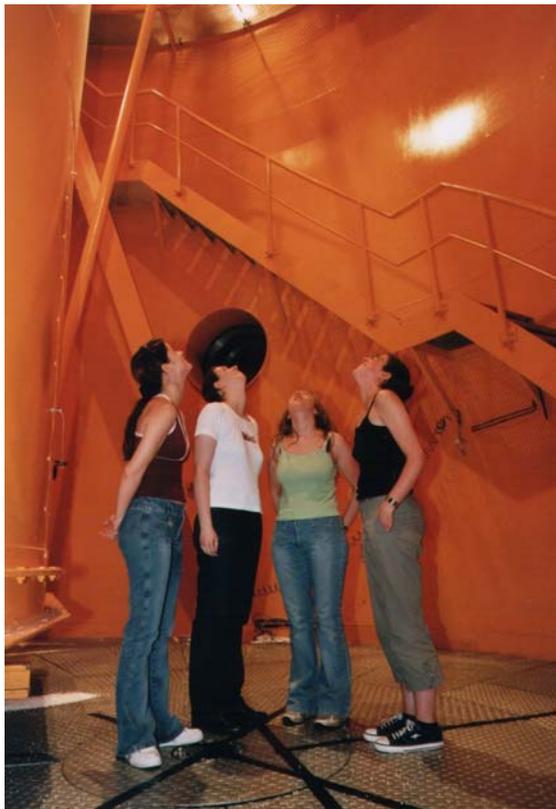
Bei der weiteren Suche nach einem geeigneten Gebäude stießen wir auf den Fallturm der Universität Bremen auf dem Gelände des Zentrums für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM).



Der Fallturm Bremen ist ein in Europa einzigartiges Großlabor, das Wissenschaftlern die Möglichkeit zu erdgebundenen Experimenten unter kurzzeitiger Schwerelosigkeit bietet. Seit Inbetriebnahme im September 1990 steht das 145,5 m hohe Betonbauwerk auf dem Gelände der Universität Bremen und ist eine wichtige Ergänzung zu den bestehenden und geplanten Laboreinheiten der orbitalen und suborbitalen Schwerelosigkeitsforschung. Mit der Anlage ist es möglich, bis zu dreimal täglich für jeweils 4,74 Sekunden den Zustand der Schwerelosigkeit zu erreichen. Um die Schwerelosigkeitszeit auf ca. 9 Sekunden zu verdoppeln, wurde zur Zeit unserer Versuchsreihen unterhalb des Turmfußes damit begonnen, ein Katapult als Abschussvorrichtung zu installieren.



Blick in die Fallröhre (von unten)



Die Fallröhre befindet sich nicht in der Mitte des Turmes, sondern steht exzentrisch, um 1,6 m versetzt, zur Vertikalachse des Betonturmes in einer Höhe von 14 m ohne Verbindung zum Turm auf der 2 m dicken Decke der Abbremskammer. Durch den Betonturm ist die stählerne Röhre vor Umwelteinflüssen wie Wind, Sonne und Nässe geschützt, und die Übertragung von windinduzierten Turmschwankungen auf den sensiblen Experimentierbetrieb kann reduziert werden. Die als Vakuumbehälter ausgelegte Fallröhre kann druckdicht verschlossen werden. Die 1700 m³ Rauminhalt von Fallrohr und Abbremskammer können durch ein Pumpensystem in 1,5 Stunden evakuiert werden. Nach den Versuchen wird der Vakuumbereich mit vorgetrockneter Luft innerhalb von 20 Minuten geflutet. Die Fallröhre bot sich aufgrund ihrer Höhe und ihrer großen Abgeschirmtheit von äußeren Einflüssen für unser Experiment an.

Durch die Möglichkeit der Extrahierung der Luft aus der Röhre gingen wir davon aus, dass unsere Ergebnisse präziser werden würden als die historischen Vorbilder. Denn wenn man die Versuche in einem luftgefüllten Raum durchführte, würde die Luft störend wirken. Die Kugeln, die uns als Fallobjekte dienten, wären in einem luftgefüllten Raum durch die Luftreibung und die um die Kugeln herum entstehenden Luftströme ab einer bestimmten Fallgeschwindigkeit ins Trudeln geraten und unkontrolliert abgewichen. Das hätte die Messergebnisse auf eklatante Weise verfälscht. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass es unserer Kenntnis nach das erste Mal war, dass dieser Versuch unter Luftausschluss stattfand.

5 Versuchsaufbauten

Zunächst überlegten wir uns verschiedene Modelle für eine Abwurfvorrichtung, die wir aus verschiedenen Gründen nicht realisierten, jedoch hier vorstellen möchten.

5.1 Vormodelle

Modell „Gewehrlauf“

Dieses Modell basierte auf der Idee, ein Rohr zu nutzen, welches am oberen Ende u-förmig gebogen ist und dann wieder senkrecht nach unten geht. Auf der linken, längeren Seite wären die Kugeln übereinander gelagert und durch einen Federmechanismus nach oben geschoben worden. Der Mechanismus hätte die Kugeln so weit bewegt, dass jeweils eine Kugel die Rundung überwunden hätte und auf der anderen Rohrseite nach unten gefallen wäre.

Modell „Schrittschaltmotor“

Bei diesem Modell sollte ein Schrittschaltmotor dazu, ein geschlossenes Rad, in dem die Kugeln in einzelnen Kammern gelagert worden wären, stückchenweise zu bewegen. Dabei wäre jeweils eine Kugel durch eine Öffnung in ein Rohr gefallen.

Bei beiden Modellen sollte das Rohr dazu dienen, den Fall der Kugel zu begradigen. Jedoch wäre es nur schwer möglich gewesen, ein passgenaues Rohr herzustellen. Ist das Rohr nur ein wenig zu weit, stoßen die Kugeln an seine Innenwände und werden gerade dadurch abgelenkt. Problematisch erschien uns weiterhin, dass die Kugeln immer auf die gleiche Stelle gefallen wären. Um die nächste Kugel fallen zu lassen, hätten wir die vorherige Kugel entfernen müssen. Dies hätte aber im Bremer Fallturm einen zu großen Zeit- und Kostenaufwand bedeutet, da die Erzeugung eines Vakuums in der Fallröhre ca. 1,5 Stunden dauert.

5.2 Endgültiger Versuchsaufbau

5.2.1 Abwurfvorrichtung

Wir haben uns letztendlich dazu entschlossen, mehrere Kugeln gleichzeitig fallen zu lassen. Wir verwandten eine 1000 x 500 mm große Aluminiumplatte, in der sich 21 Löcher

(\varnothing 8,1 mm) befanden. In diese steckten wir von oben Elektromagnete, die in Reihe geschaltet wurden. Sie bestanden aus 90 mm langem Rundstahl. Die Wicklungen befanden sich auf einer Länge von 60 mm, da wir unten 25 mm freien Rundstahl brauchten, um den Magneten in der Platte zu befestigen, wobei nach oben ein Reststück von ca. 5 mm verblieb. Bei 10,35 m Draht ergab sich beim Herstellen eine Wicklungszahl von 380 Wicklungen. Damit die Wicklungen fest blieben, wurde der Draht zusätzlich mit zwei Kunststoffflanschen begrenzt. Die beiden Drahtenden wurden an einem Ende des Magneten isoliert und farbig gekennzeichnet (Anfang: rot, Ende: blau), um Plus- und Minuspol auseinanderhalten zu können.

Die angeschalteten Magnete zogen je eine von unten in das Loch ragende Kugel (\varnothing 8 mm) an. Eine Sicherheitsklappe hielt die Kugeln, solange die Magnete ausgeschaltet waren. Sie war durch einen Rohrmotor, wie man ihn für Jalousien verwendet, mit der Abwurfplatte verbunden. Dadurch ließ sich die Sicherheitsklappe elektrisch in verschiedene Positionen bewegen. So konnten wir die Steuerung der Sicherheitsklappe außerhalb der Vakuumröhre ermöglichen.

Zur Durchführung eines Versuches wurden die Kugeln zunächst in die Löcher der Sicherheitsklappe gelegt. Dann wurde die Sicherheitsklappe an die Platte mit den Magneten herangefahren und die Kugeln an die Löcher dieser Platte gedrückt. Nach der Evakuierung des Turmes wurde die Platte nochmals herangefahren, falls sie sich durch ihr Gewicht wieder etwas gesenkt hatte. Anschließend wurde der Strom für die Magnete eingeschaltet. Die Magnete zogen die Kugeln an und die Sicherheitsklappe wurde nochmals angedrückt, damit auch wirklich alle Kugeln von den Magneten erfasst wurden. Die Sicherheitsklappe wurde anschließend weggefahren und blieb in einer Position stehen, in der sie die herabfallenden Kugeln nicht störte.

Die oben beschriebene Abwurfvorrichtung wurde für die Versuche am oberen Ende der Fallröhre des Bremer Turmes an einem Geländer befestigt.

5.2.2 Auffangvorrichtung

Die Kugeln wurden im Vakuum fallen gelassen und trafen nach ca. 120 m Fall unten auf einer Plastilinschicht auf, die in einen Trog gebettet war. Dieser war aus Stahl gefertigt und hatte die Maße 1,20 x 1,20 m. Sein Leergewicht betrug 200 kg. Die Auffangwanne haben wir so groß gewählt, weil wir uns nicht sicher waren, wie die Kugeln auftreffen und ob sie

womöglich stark von den vermuteten Aufschlagpunkten abweichen würden. Unter einem U-Trägergestell waren vier Räder sowie vier Gelenkfüße montiert. Das in der Auffangwanne ausgelegte Plastilin hat sich in Vorversuchen als geeignetes Material erwiesen.

Im Fachbereich Physik der Freien Universität Berlin hatten wir zuvor mehrere Auffangmaterialien getestet, um zu sehen, ob die Kugeln auf den Materialien einen gut auswertbaren Einschlagpunkt ergeben. So haben wir Ton, Bienenwachs, Sand und Styropor untersucht. Zunächst hatte Ton das beste Ergebnis gezeigt, da die Kugeln darin im Gegensatz zu den anderen Materialien keine Krater aufwarfen und das Loch einen exakten Rand hatte. Beim Testen der Vakuumtauglichkeit von Ton stellten wir jedoch fest, dass das Material in der Vakuumlöcke trocken und brüchig und somit unbrauchbar wurde. Deshalb entschieden wir uns für Plastilin, da es von seiner Konsistenz her wie Ton beschaffen ist, so dass die Kugeln weder abprallten noch zu tief einsanken und beim Einschlag einen exakten Rand bewirkten. Da aber Plastilin im Gegensatz zu Ton nicht auf Wasser, sondern auf Öl basiert, behält es im Vakuum seine Konsistenz (siehe Versuchsprotokoll in Kap. 7.1.1).

Das Plastilin wurde mit Millimeterpapier bedeckt, welches die Kugeln durchschlugen. Im Idealfall sollten die Kugeln in östlicher Richtung zu dem Punkt auftreffen, an dem sie aufkommen würden, wenn sie senkrecht fielen.

5.3 Bestimmung des Lotpunktes

Am Kopf der Fallröhre befindet sich ein starker Laser, den wir als Lot benutzten. Die Mitarbeiter der Fallturm Betriebsgesellschaft (FAB) haben die dafür nötige Erfahrung und justierten den Laser entsprechend unseren Bedürfnissen. Denn die größte Herausforderung bei unserem Versuch stellte die Ausrichtung der Auffang- und Abwurfvorrichtung zueinander dar. Um dies zu bewerkstelligen, haben wir zusätzlich einen zweiten Laser sowie einen exakt waagrecht ausgerichteten Spiegel verwendet. Beide Laser wurden zwischen Abwurfvorrichtung und Auffangwanne solange hin und her geschickt, bis sie sich in sich spiegelten, so dass wir davon ausgehen konnten, dass die Laserstrahlen genaue Senkrechten bilden. Somit konnten wir über zwei fest definierte Punkte verfügen, an denen wir unsere Versuchsvorrichtung ausrichteten.

Zur Auswertung haben wir zunächst für jeden Versuch mit Hilfe eines Kompasses die Ostrichtung festgelegt und auf dem Millimeterpapier eingezeichnet. Da der Kompass in der

Fallröhre durch deren Stahlmantel abgelenkt wurde, haben wir außerhalb der Röhre die Himmelsrichtungen bestimmt, diese mit einem Seil in die Röhre hinein verlängert und dort auf dem Millimeterpapier eingezeichnet. Anhand der Nordrichtung konnten wir auch die anderen Himmelsrichtungen festlegen.

Wir haben für jeden Versuch einen neuen Bogen Millimeterpapier verwendet, der von den herabfallenden Kugeln durchschlagen wurde. So waren die Einschlagpunkte fixiert. Das Papier konnte entfernt und später ausgewertet werden.

6 Projektverlauf

1. Berlin: 18.07.2002

Vorversuch im Fachbereich Physik zum Testen des Auffangmaterials

2. Bremen: 02.08.2002

Vorbesprechung und Besichtigung des ZARM

3. Berlin: 21.11.2002

Vorversuch im Fachbereich Physik zum Testen der erforderlichen Elektromagnete

4. Bremen: 10.06. - 13.06.2003

Erste Versuchsreihe

5. Bremen: 30.08. - 06.09.2003

Zweite Versuchsreihe

6. Bremen: 27.10.2003

Abholen der Versuchsanordnung aus Bremen

7. Potsdam: 13.03.2004

Vortrag bei der GDSU-Jahrestagung (Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts e.V.) in Potsdam

8. Berlin: 12.06.2004

Vortrag bei der Langen Nacht der Wissenschaften in Berlin

9. Berlin: ab Februar 2005

Internet-Darstellung unter www.fu-berlin.de/abp/projekte

7 Die Versuchsreihen und ihre Ergebnisse

7.1 Vorversuche zur Erprobung von Abwurfvorrichtung und Auffangvorrichtung

Wir haben im Fachbereich Physik der Freien Universität Berlin mehrere Vorversuche durchgeführt, bei denen wir das Auffangmaterial und die Magnete getestet haben.

7.1.1 Vorversuch zum Testen des Auffangmaterials am 18.07.2002

Teilnehmer

- Univ.-Prof. Dr. Fischler
- Univ.-Prof. Dr. Hamprecht
- Julia Bähr
- Marilen Logé
- Kathrin Mechelk
- Alexandra Operhalsky

Ziel

Mit dem Versuch wollten wir das geeignete Material für die Auffangvorrichtung herausfinden. Der Versuch sah so aus, dass die Kugeln mit einer Schleuder auf das entsprechende Material geschleudert wurden, um die Geschwindigkeit und damit die Aufprallwucht zu simulieren, die die Kugeln beim Fall aus großer Höhe erreichen können. Die Kugeln sollten am Material weder abprallen, noch darin zu große Krater schlagen. Des Weiteren wollten wir mit den Physikprofessoren diskutieren, inwieweit sich die Materialien bei verschiedenen thermischen Gegebenheiten verändern.

Versuchsaufbau

Für den Versuch verwendeten wir eine Gummischleuder. Diese bestand aus einer langen Gummischnur, welche an einem Gewicht bzw. an einem Stein befestigt wurde. Um die Kugeln in die Schleuder betten zu können, benutzten wir ein Stück Stoff. Die Kugel wurde aus ca. 2 m Höhe senkrecht nach unten zunächst in eine Schüssel geschleudert, in welcher sich das zu testende Material befand.

Um den Versuch für den Fallturm simulieren zu können, mussten wir durch die Gummischleuder eine dem 100 m langen Fall der Kugel im Vakuum entsprechende Geschwindigkeit erzeugen. Dies berechneten wir durch eine Federwaage, mit der wir das Band hochzogen. Dabei stellten wir fest, dass wir bei aller Kraftanstrengung durch die Gummischleuder nur die Hälfte der Kraft simulieren konnten.



Simulation der Fallgeschwindigkeit durch Bau einer Steinschleuder

Erster Versuch mit Ton

Nachdem einige Kugeln die Schüssel verfehlt hatten, traf eine Kugel (\varnothing 1 cm) den Tonblock (5 cm hoch). Die Kugel blieb dort in einer Tiefe von 1,5 cm stecken. Das Einschlagloch wies keine Kraterbildung auf und zeigte einen exakten Rand.

Zweiter Versuch mit Ton auf Holz

Wir legten eine ca. 2 cm dicke Tonmatte auf ein Holzbrett und führten den Versuch in gleicher Weise durch. Die Kugel durchschlug die Tonmatte und wurde durch den Aufprall auf die Holzplatte wieder hoch geschleudert, wodurch sich in der Tonmatte ein Krater bildete. Da der Krater dennoch sehr klare Ränder aufwies, hätte man auch so recht eindeutig den Mittelpunkt des Einschlagloches bestimmen können.



Dritter Versuch mit Sand

Wir füllten in eine große Schüssel 10 cm Sand, drückten diesen sehr fest und führten den Versuch in gleicher Weise durch. Die Kugel warf durch den Einschlag Sand auf, der die Messung der Ostabweichung bei einem Fallversuch sehr erschwert hätte.

Vierter Versuch mit Ton auf Styropor

Wir führten den gleichen Versuch mit einer Styroporplatte durch, die mit einer 1,5 cm dicken Tonplatte bezogen wurde. Die Kugel schlug durch den Ton in die Styroporplatte und durchdrang auch diese bis zum unteren Ende. Es entstand ein Krater, da der Ton sich wegen des Styropors nicht nach unten ausdehnen konnte und nach oben wegdrängte.

Fünfter Versuch mit Ton auf Sand

Beim fünften Besuch verwendeten wir Sand unter einer 1,5 cm dicken Tonschicht. Die Kugel drang durch den Ton in den Sand und hinterließ einen genauen Rand des Einschlagloches im Ton. Jedoch konnten wir bei genauer Betrachtung feststellen, dass der Sand durch den harten Aufschlag der Kugel nachgab. So rutschte der Ton durch das Wegsacken des Sandes ein wenig nach unten nach.

Sechster Versuch mit Wachs

Für den letzten Versuch nahmen wir Bienenwachs als Auffangmaterial. Wir stellten fest, dass der Rand des Einschlagloches sehr unscharf war und das Wachs rissig wurde.

Endergebnis

Wir entschieden uns, Ton als Auffangmaterial zu verwenden, da es die besten Materialeigenschaften für diesen Versuch aufwies. Die Kugel sprang nicht zurück und warf keine Krater auf, sondern hinterließ ein der Größe der Kugel entsprechendes, sehr exaktes Einschlagloch.

Da wir bei unseren Versuchen von einer geringeren Krafteinwirkung ausgegangen sind, als es beim tatsächlichen Versuch der Fall sein würde, überlegten wir uns, bei der Versuchsdurchführung im Bremer Fallturm zwei Tonblöcke übereinander zu legen, was einer Höhe von ca. 10 cm entsprach.

Nachtrag

Nachdem wir uns für Ton entschieden hatten, schickten wir eine Probe an den Fallturm, um sie im Vakuum hinsichtlich einer möglichen Konsistenzveränderung testen zu lassen. Es wurde festgestellt, dass der Ton im Vakuum hart und brüchig und somit für unseren Versuch unbrauchbar wurde.

Nach mehreren Überlegungen entschieden wir uns dann für Plastilin als Auffangmedium, da dies auf Ölbasis, und nicht wie Ton auf Wasserbasis, hergestellt wird und sich in seiner Konsistenz im Vakuum nicht verändert, was wir im Fachbereich Physik mittels einer Vakuumglocke austesteten. Darüber hinaus verfügt Plastilin aber über die gleichen geeigneten Eigenschaften wie Ton.

7.1.2 Vorversuch zum Testen der Elektromagnete am 21.11.2002

Teilnehmer

- Univ.-Prof. Dr. Fischler
- Univ.-Prof. Dr. Hamprecht
- Julia Bähr
- Marilen Logé
- Kathrin Mechelk
- Alexandra Operhalsky

Ziel

Das Ziel dieser Versuchsreihe war herauszufinden, welche Magnetstärke für den Fallversuch geeignet wäre. Dazu mussten die Drahtlänge, die Drahtdicke, die Spannung und die Stromstärke als Faktoren beachtet werden.

Materialien

- Elektromagnet, hergestellt aus einem Stück Rundstahl (\varnothing 8 mm), umwickelt mit Kupferdraht
- Netzgerät (für geglätteten Gleichstrom)
- Widerstand
- Messgeräte für die Spannung, die Stromstärke und den Widerstand
- Vierfüßiger „Dreifuß“
- Eine Kugel aus Stahl (\varnothing 11 mm)
- Ein 10 x 10 cm großes Holzbrett, 13 mm hoch, mit einem Bohrloch (\varnothing 8,1 mm) in der Mitte

Erster Versuch

Beim ersten Versuchsdurchgang brachten wir an das ca. 10 cm lange Stück Rundstahl Schrumpfschlauch an. Darauf wickelten wir 2 mm dicken, isolierten Kupferdraht (35 Wicklungen). Dabei erleichterte der Schrumpfschlauch das Wickeln, da so der Draht weniger verrutschen konnte. Eine Seite des Stahls blieb auf einer Länge von ca. 10 mm frei. Dieses Endstück steckten wir in die Bohrung des Holzstückes und legten dieses auf den Dreifuß, so dass man die Kugel an der freihängenden Unterseite des Holzbrettes an das Loch und damit an den Magneten anlegen konnte.

Zwischen Kugel und Endstück des Magneten sollte ein Abstand von 1 mm sein. Deshalb errechneten wir zuerst, dass die Kugel bei 11 mm Durchmesser in das Bohrungsloch von

8,1 mm Durchmesser 1,78 mm hineinragen und mit den Seiten genau abschließen würde. Da das Holz eine Dicke von 13 mm hatte, musste der Magnet 10,22 mm in das Loch hineinragen, so dass der Abstand von 1 mm zwischen Kugel und Magnet gewährleistet war. Den Magneten richteten wir danach aus.

An die beiden Enden des Kupferdrahtes, bei denen die Isolierung entfernt wurde, schlossen wir die Stromquelle an und stellten fest, dass der Magnet wegen der geringen Wicklungszahl die Kugel nicht halten konnte.

Zweiter Versuch

Im zweiten Versuchsdurchgang wickelten wir um den Rundstahl lackisolierten 0,5 mm dicken Kupferdraht in mehreren Lagen. Wir schlossen die Stromquelle an und stellten fest, dass der Draht zu schnell heiß wurde. Des Weiteren erforderte der Magnet zum Halten der Kugel 5 Volt / 3 Ampere. Da sich die Spannung bei den zu dieser Zeit angenommenen 49 in Reihe geschalteten Magneten addiert, hätten wir beim Originalversuch 250 V geglätteten Gleichstrom gebraucht. Da dies sehr viel ist, nahmen wir für den nächsten Versuch dickeren Draht, um den Widerstand zu verringern.

Dritter Versuch

Für den dritten Versuch wickelten wir 1 mm dicken lackisolierten Kupferdraht in mehreren Lagen um den Rundstahl. Nach dem Anschließen an die Stromquelle stellten wir fest, dass wir die Spannung auf 0,2 Volt und die Stromstärke auf 1,1 Ampere verringern konnten, ohne dass die Kugel bei leichten Erschütterungen herunterfiel. Zwischen 1,1 und 1,4 A hielt die Kugel gut und der Draht erwärmte sich nicht zu schnell.

Bei 49 Magneten im Originalversuch hätte dieser Aufbau ca. 10 V erfordert, was auch durch eine handelsübliche Autobatterie zu gewährleisten gewesen wäre, falls im Bremer Fallturm keine Stromquelle vorhanden gewesen wäre, die Gleichstrom liefert.

	1 Magnet	50 Magnete
Spannung (U)	0,2 V	10 V
Stromstärke (I)	1,0 A	1,0 A
Widerstand (R)	0,2 Ω	10 Ω

Endergebnis

Die Versuche zeigten, dass wir einen 1 mm dicken Kupferdraht von 10,35 m Länge für jeweils einen Elektromagneten nehmen mussten. Bei gleich bleibenden Eigenschaften der Kugel und des Magneten hätten wir im Turm ca. 10 V Gleichspannung benötigt. Da wir

für einen Magneten 0,09 m Rundstahl und 10,35 m Draht brauchten, ergab sich für 50 Magnete die Menge von 517,50 m Draht und 4,50 m Rundstahl insgesamt.

Nachtrag

Aufgrund später veränderter Versuchsbedingungen waren einige Ergebnisse leider unbrauchbar. Im Bremer Fallturm legten wir deshalb die nötige Volt- und Amperezahl endgültig fest.

7.2 Erste Versuchsreihe im Juni 2003

10.06.2003

Nach unserer Ankunft im ZARM besprachen wir mit Herrn Odenbach, der dort unser Projekt betreute, das Vorgehen für die erste Versuchsreihe. Bei der Begutachtung der Vorrichtungen bemerkten wir mehrere Mängel und nahmen Veränderungen vor. So musste einer der Standfüße der Auffangvorrichtung entfernt werden, da er zerbrochen war.

Wir tauschten ferner die Sicherheitsklappe der Abwurfvorrichtung aus, da die bisherige zu schwer war, als dass der Motor die Platte bis zum Anschlag hätte heben und dort halten können. Außerdem hätte sich aufgrund der Schwere der Platte ihre Bewegungserschütterung auf die Fallröhre übertragen.

Zum anderen schalteten wir die Magnete in Reihe, da bei einem Ausfallen eines Magneten bei einer Parallelschaltung, die vorher von uns in Betracht gezogen worden war, die anderen Magnete mehr Ampere gezogen hätten. Es wurde außerdem kurzfristig eine neue Steuerbox für den Rohrmotor gebaut, weil einerseits die Kontakte der alten Box offen lagen und so ein Gefahrenpotential darstellten und andererseits auf diese Weise eine Außensteuerung der Setztaste ermöglicht werden konnte. Da wir den Vorversuch nur mit 21 Kugeln durchführten, legten wir nur die Hälfte der Wanne mit drei Lagen Plastilin (ca. 15 cm) aus und füllten die tote Seite mit Styroporplatten.



Die vorbereitete Auffangvorrichtung in der Röhre

11.06.2003

Installation der Magnete

Da nicht alle Flansche und Magnetstifte, wie von uns geplant und von den betreffenden Firmen gefordert, untereinander die gleichen Maße hatten, verglichen wir alle Höhen und Längen miteinander, um die Flanschhöhen auf die Magnetstiftlängen abzustimmen. Wir konnten die Maßunterschiede ausgleichen, indem wir Unterlegscheiben zwischen Spule und Flansch legten. So konnten wir gewährleisten, dass die Magnetstifte den gleichen Abstand zu den Kugeln haben und diese gleichstark anziehen. Um die Magnete in Reihe schalten zu können, brachten wir zwischen den Magneten jeweils zweipaarige Lüsterklemmen an und schraubten die Drahtenden der Magnete ein.

Nach einigen Vorversuchen fanden wir die für unseren Versuch benötigte, geringstmögliche Stromstärke und Spannung heraus. Beim ersten Anschließen der Magnete zogen einige Magnete die Kugeln nicht an. Daher wurde bei diesen Magneten eine Unterlegscheibe entfernt. Bei einem weiteren Durchlauf erkannten wir, dass sich die Kugeln sehr stark magnetisierten und sich daher beim Abschalten des Stromes nicht von den Magneten lösten. Je länger sie am Magneten hingen, desto stärker magnetisierten sich die Kugeln. Deshalb beschlossen wir, bei den Versuchen die Magnete erst nach der Evakuierung des Turmes einzuschalten. Außerdem wären die Magnete zu warm geworden, wenn sie die ganze Zeit unter Strom gestanden hätten. Die Funktion der Magnete und das Bestücken mit Kugeln wurde mehrfach getestet.



Bestücken der Abwurfvorrichtung

Nach mehreren Versuchen, bei denen alle Kugeln angezogen und fallen gelassen wurden, ließen wir den Strom für die Magnete fünf Minuten angeschaltet, um zu überprüfen, wie stark die Kugeln magnetisiert wurden. Die Kugeln fielen schnell und gleichmäßig ab.

Anschließend wurde der Turmlaser mit Hilfe eines Spiegels justiert. Der aus der Wand austretende Laserstrahl wurde mit dem Spiegel auf den Boden gelenkt. Von dort wurde er mit einem weiteren Spiegel zurückgeworfen und musste dann mit dem Ausgangsstrahl genau übereinstimmen. Dieser auf dem Plastilin liegende Spiegel wurde zuvor mit einer Präzisionswasserwaage exakt waagrecht ausgerichtet.



Die Präzisionswasserwaage liegt auf einem Metallbrett, welches durch die beiden Stellschrauben an den Seiten exakt waagrecht ausgerichtet werden kann.

Der Lotpunkt war vom mittleren Loch der Abwurfvorrichtung in einem Winkel von 45° 300 mm entfernt. Das mittlere Loch sollte genau mit dem Mittelpunkt des Turmes übereinstimmen. Diese beiden Punkte stellten unsere beiden Ausrichtungspunkte dar.

Zum Anbringen der Abwurfvorrichtung im Turm wurde ein Gestell aus Bosch-Profilen (Leichtmetall) gebaut, welches auf das Geländer über der Fallröhre montiert wurde. Um das Gestell waagrecht justieren zu können, wurden an der Abwurfvorrichtung drei Stellschrauben angebracht.



12.06.2003

Wir entmagnetisierten die Kugeln, indem wir sie mehrmals auf den Boden warfen. Unter der Abwurfvorrichtung wurde eine Plastiktüte als Sicherheitsnetz angebracht, welches die Kugeln hätte auffangen können, wenn beim Bestücken der Abwurfvorrichtung im Turm eine der Kugeln versehentlich fallen gelassen worden wäre.



Die blaue Plastiktüte als Sicherheitsnetz

Da sich der Laser über Nacht durch die Erwärmung des Turmes verschoben hatte, wurde der Trog noch einmal genau ausgerichtet.

Mit Hilfe einer zweiten Lochplatte, die mit der Abwurfplatte identisch war, markierten wir die Löcher auf einem Papier, das auf das Plastilin gelegt wurde. Diese Punkte zeigten die Stellen an, auf denen die Kugeln aufgetroffen wären, wenn es keine durch die Erddrehung verursachte Abweichung geben würde, sondern sie senkrecht fielen. Wir steckten das markierte Papier auf dem Plastilin mit Stecknadeln fest. Das Papier wurde anhand der beiden oben beschriebenen Ausrichtungspunkte so aufgelegt, dass es mit der am Turmkopf angebrachten Abwurfplatte übereinstimmte.

Des Weiteren befestigten wir ein kleines Stück Millimeterpapier an der Stelle, an der der Lotpunkt durch den Laser angezeigt wurde. Seinen Mittelpunkt zeichneten wir mit einem Stift ein, um das Wandern des Lotes während der Evakuierung festhalten zu können.

Vor der Evakuierung wurde noch die Kamera, die die Abwurfvorrichtung filmen sollte, angepasst. Nach einigen Elektriktests wurde die Abwurfvorrichtung mit den Kugeln bestückt. Die Klappe wurde hochgefahren und das Sicherheitsnetz entfernt.

Durch die Evakuierung veränderte sich der Stahl des Turmes, so dass dieser sich neigte. Dies hatte Auswirkungen auf den Laser: Er wanderte mit der Neigung des Turmes. Um die Veränderung des Lotpunktes festzustellen, wurde der am Turmboden auf dem Millimeterpapier abgebildete wandernde Laserpunkt ab dem Zeitpunkt der Evakuierung auf Video aufgezeichnet.

Nach der Evakuierung hatte sich der Laserpunkt um 2 cm verschoben. In der Turmspitze wurde die Klappe der Abwurfvorrichtung angefahren und der Strom angestellt.

Nach der Bestätigung aus dem Kontrollraum, dass alle Kugeln angezogen worden waren, wurde die Klappe von uns im Turmkopf außerhalb der Röhre elektrisch heruntergefahren und der Strom ausgestellt. Dadurch lösten sich die Kugeln von den Magneten und fielen aus der Turmspitze herab.



Herunterfahren der Klappe

Zum Zeitpunkt des Abwurfes betrug die Windgeschwindigkeit 7 m/s an der Turmspitze. Dies war so gering, dass der Wind den Turm nicht zum Schwanken brachte und so unseren Abwurf kaum beeinflusste. Die Kugeln trafen alle im Plastilin auf, etwas entfernt von den vorher gekennzeichneten Punkten.

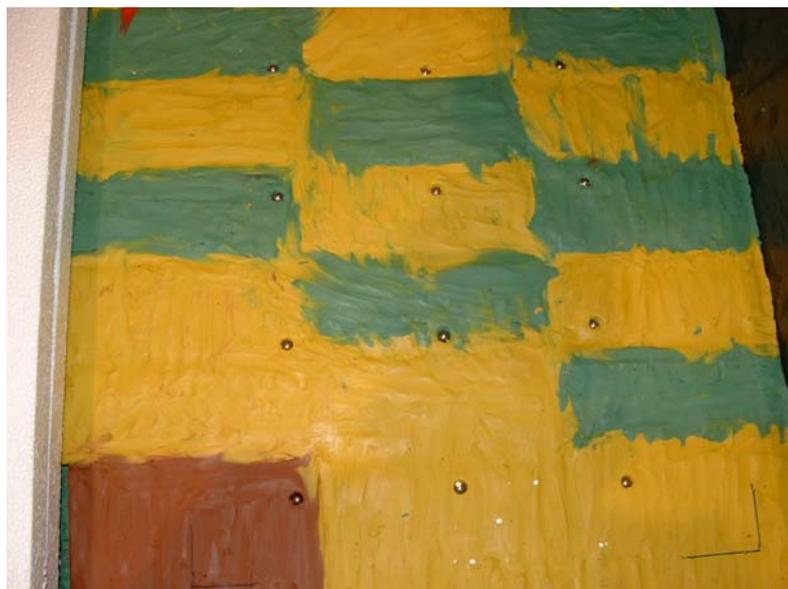
Nachdem der Turm wieder mit Luft geflutet worden war, nahmen wir die Messung vor. Wir maßen die Abstände vom Mittelpunkt der Einschlagpunkte der Kugeln bis zum Mittelpunkt der eingezeichneten Punkte und verbanden diese.



Messung der Abstände der Einschlaglöcher zu den vorher eingezeichneten Punkten



Zur genauen Auswertung entfernten wir das Papier und brachten es in die Werkhalle.



Die Einschlaglöcher direkt auf dem Plastilin. Die Kugeln sind noch in den Löchern zu sehen.

Indem wir die Abstände zwischen Aufschlagpunkt und Lotpunkt errechneten, ermittelten wir die Abweichungen der Kugeln.



Für den zweiten Versuch entfernten wir die Kugeln und glätteten das Plastilin. Ein neues Papier sowie ein neues Millimeterpapier für den Lotpunkt wurden in der Auffangwanne auf dem Plastilin befestigt. Die Kamera am Auffangtrog wurde ausgetauscht, da die alte geflackert hatte. Wir richteten das Laserlot erneut aus, justierten die Abwurfvorrichtung und bestückten sie mit entmagnetisierten Kugeln.

Beim zweiten Versuchsdurchgang beobachteten wir, dass die Sicherheitsklappe zu weit nach hinten schwang und dadurch die Platte mit den Kugeln hochdrückte. Daher wurde die Sicherheitsklappe wieder ein Stück zurückgefahren, bevor wir den Strom ausstellten. Dieses Hochdrücken der Platte erklärte, dass dieser Versuch ein wenig schlechter ausfiel als der erste. Bei der Auswertung gingen wir wie beim ersten Versuch vor.

13.06.2003

Zur Vorbereitung des dritten Abwurfes wurden die Vorrichtungen neu ausgerichtet und neues Papier auf dem Plastilin festgesteckt. Wir programmierten den Motor der Sicherheitsplatte neu, damit dieser die Sicherheitsklappe nicht zu weit nach hinten drücken konnte. Nach dem Versuch konnten wir unregelmäßige Abstände der Löcher erkennen.

Bei der Auswertung stellten wir fest, dass wir bisher beim Berechnen der Ostabweichung vom Lotpunkt nach der Flutung ausgegangen waren, statt vom Lotpunkt zum Zeitpunkt des Abwurfs. Den bisherigen Berechnungen zufolge lagen die Aufschlagpunkte im Süd-Ost-Quadranten. Wären wir aber vom Lotpunkt zum Zeitpunkt des Abwurfs ausgegangen, lägen die Aufschlagpunkte im Südwesten.



Bei der Auswertung mit Herrn Odenbach und Herrn Ramseger

Wir überlegten uns folgende mögliche Ursachen für die unerwarteten Messergebnisse:

- Die Fallröhre und damit auch die Abwurfvorrichtung könnten sich durch die Evakuierung verzogen haben.
- Die Pumpen, die die Luft absaugen, könnten den Turm erschüttert haben.
- Es hätte sich der Spiegel, der das Lot nach unten lenkt, verstellt haben können.
- Der Turmmittelpunkt, den wir als Ausrichtungspunkt verwendeten, hätte oben und unten nicht wirklich exakt übereinstimmen können.

Aufgrund der engen Platzverhältnisse im Turmkopf beschlossen wir, auch bei den Hauptversuchen nur eine Platte mit 21 Magneten zu verwenden und nicht, wie geplant, eine mit 49.

7.3 Zweite Versuchsreihe im September 2003

01.09.2003

Für die zweite Versuchsreihe im September 2003 nahmen wir Änderungen an der Abwurfvorrichtung vor. Wir bauten an der Abwurfplatte einen Neigungssensor ein, um eine mögliche Neigung der Platte zum Abwurfzeitpunkt festzuhalten. Wahrscheinlicher jedoch war eine seitliche Verschiebung.

Für die Ausrichtung und Auswertung bauten wir zunächst an drei Ecken der Abwurfplatte jeweils eine Laserdiode ein, die sich durch Stellschrauben ausrichten ließ. Die Dioden sollten der Darstellung eines Abbildes der Platte zu allen Zeitpunkten des Versuchs dienen. Da jedoch die Laserdioden zu schwach waren und am Turmboden nach dem langen Weg lediglich einen diffusen Punkt bildeten, mussten wir uns etwas anderes einfallen lassen. Eine Überlegung war, einen stärkeren Laser zu kaufen, was allerdings zu teuer, sowie hinsichtlich der Ausrichtung zu aufwändig gewesen wäre. Auch die Idee, den Hauptlaser an zwei verschiedenen Spiegeln nach unten zu leiten, mussten wir verwerfen, da wir zwei justierbare Spiegel gebraucht hätten, die sehr teuer gewesen wären.

Des Weiteren überlegten wir uns, den Hauptlaser am selben, vorhandenen Spiegel an zwei unterschiedlichen Stellen herunter zu leiten. Das ging jedoch nicht, da der Laser nicht exakt in der Horizontalen verschoben werden konnte, sondern eine Neigung aufgetreten wäre. Auch der Turmmittelpunkt, der uns in der ersten Versuchsreihe als Lotpunkt gedient hatte, war für unsere Zwecke unbrauchbar, da er nicht exakt definiert war. Letztendlich entschieden wir uns dafür, den Hauptlaser aus dem Turmkopf und die stärkste der drei Laserdioden als Lotpunkte zu verwenden.



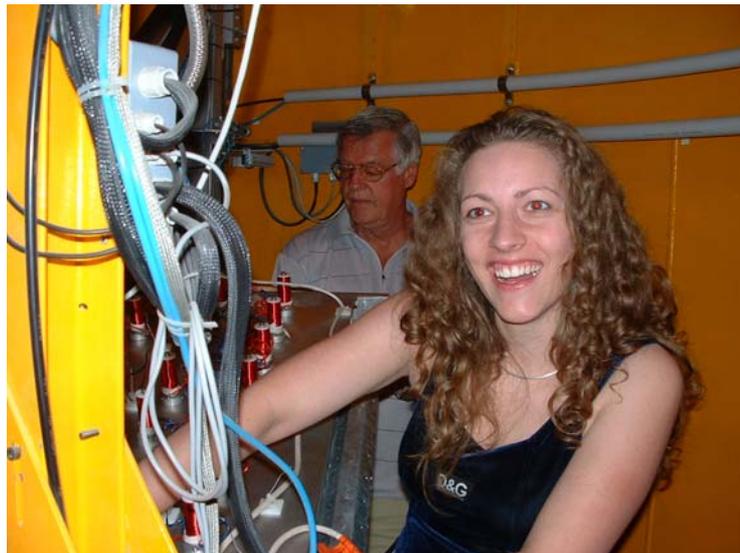
Für die Videoaufnahmen wurden am Turmboden zwei Kameras installiert: Eine am Trog, die andere über dem Trog. Die Kameras nahmen die Laserpunkte bei den Abwürfen auf.

02.09.2003

Im Turmkopf richteten wir die Abwurfvorrichtung mit Hilfe der Präzisionswasserwaage waagrecht aus. Da der Neigungsmesser zu empfindlich war - er maß sogar die Turmschwankungen - musste der Verstärker ausgebaut werden.

Um die Position der Lotpunkte zum Zeitpunkt des Abwurfes festzustellen, wurde unter der Laserdiode ein Magnetschalter angebaut und mit an die Spulen angeschlossen. Unter Spannung war der Magnet weggeklappt. Im Moment des Auslösens der Kugeln, wobei der Strom unterbrochen wurde, ließ die fehlende Spannung den Magneten vor den Laser klappen, was ein kurzes Signal gab. Durch dieses Signal (Flackern des Laserlichts), welches durch die Kameras am Turmboden aufgezeichnet wurde, konnten wir den exakten Abwurfzeitpunkt und die damit verbundenen Laserpunktpositionen feststellen.

Anschließend bestückten wir die Vorrichtung zur Probe mit Kugeln und stellten die Magnete an, wobei wir feststellten, dass ein Spannungsverlust herrschte. Dadurch wurden nicht alle Kugeln angezogen, und wir hoben die Spannung etwas an.



Anschließend wurden die Laser ausgerichtet. Der Hauptlaser ließ sich genau ausrichten, aber mit der Laserdiode hatten wir Probleme: Die Diode erzeugte am Turmboden einen diffusen Punkt, was eine Spiegelung in sich erschwerte. Zudem waren die Stellschrauben an den Dioden nicht fein genug justierbar. Eine Verschiebung um 1 Grad am Turmkopf hatte am Turmboden eine Verschiebung von 5 bis 6 m zur Folge. Daher waren wir gezwungen, den Mittelpunkt des Diodenstrahls als Lotpunkt zu nehmen.

Nach der Lasereinstellung hatten wir zwei definierte Punkte, nach denen wir den Trog am Turmboden ausrichten konnten. Die Lage vom Trog haben wir nach dieser Ausrichtung

nicht mehr verändert. Wir legten den Trog mit Millimeterpapier aus und markierten die Laserpunkte. Es folgten die Evakuierung und danach der erste Abwurf.

Den Abwurf verfolgten alle Projektteilnehmer, außer denen, die im Turmkopf die Sicherheitsplatte steuerten und den Strom für die Magneten ausschalteten, im Kontrollraum, der mit Hilfe von Kameras und Computertechnik die Möglichkeit bot, zu verfolgen, was innerhalb der Fallröhre geschah.



Im Kontrollraum

Um den Abwurf vorzunehmen, befand sich ein Projektteilnehmer im Turmkopf, jedoch außerhalb der Fallröhre, da diese ja evakuiert war. Sobald die Kontrolleure im Computerraum bestätigten, dass die Evakuierung abgeschlossen war, wurde über eine Tonleitung der sich oben befindenden Person das Signal für das Herunterfahren der Klappe gegeben. Zuvor wurde der Strom angestellt, damit die Kugeln von den Magneten angezogen werden konnten.

Anschließend wurde aus dem Computerraum die Bestätigung gegeben, dass sich die Klappe nach unten weggeklappt hatte und alle Kugeln an den Magneten hingen. Erst danach erhielten die am Turmkopf befindlichen Projektteilnehmer die Erlaubnis, den Strom abzuschalten und die Kugeln fallen zu lassen.

Nach der Flutung des Turmes versuchten wir mit einem Kompass die Himmelsrichtungen zu bestimmen. Da jedoch der Stahl der Fallröhre den Kompass beeinflusste, konnten wir nicht direkt in der Röhre messen



Bestimmung der Himmelsrichtungen

Mit dem Kompass peilten wir eine beliebige Richtung in der Fallröhre an und verdeutlichten diese mit einem Seil, welches wir von der Halle bis in die Fallröhre zogen. Vom Seil aus bestimmten wir den Winkel zur Nordrichtung. Anschließend wurde das Seil über den Trog gezogen und der Schatten nachgezeichnet. Anhand dieser Linie und des Winkels zur Nordrichtung konnten wir letztere einzeichnen und somit auch die anderen Himmelsrichtungen bestimmen. Das Papier wurde zur Auswertung aus dem Trog genommen. Wir stellten eine Ostabweichung fest.



Bei der Auswertung

Anschließend wurden für die nächsten Versuche die Kameras neu eingestellt, damit das Millimeterpapier auf den Videoaufnahmen besser sichtbar werden würde. Wir fertigten eine Schablone der Abwurfvorrichtung auf Millimeterpapier an, auf der wir die Kugellöcher und die Punkte der Laserdiode und des Hauptlasers kennzeichneten. Diese wollten wir bei den zukünftigen Versuchen in den Trog legen, um die Laser daran auszurichten.

03.09.2003

Für den nächsten Abwurf legten wir in den Trog die Schablone ein, richteten Haupt- und Nebenlaser neu aus und markierten diese Punkte auf dem Millimeterpapier im Trog. Nun wurden noch die Kameras neu eingestellt. Damit sie ein besseres Bild liefern würden, wurde neben der Kamera an der Auffangvorrichtung eine kleine Halogenlampe angebracht, die das Innere des Troges anstrahlte. Danach bestückten wir die Abwurfvorrichtung für den zweiten Versuch mit Kugeln.

Nach dem Abwurf und der Turmflutung ermittelten wir die nördliche Richtung mittels Kompass und Seil und zeichneten sie auf dem Papier ein. Für die Auswertung verwendeten wir die am Tag davor angefertigte Schablone, die identisch mit der Abwurfplatte war und auf der die Laserpunkte und die Abwurfpunkte verzeichnet waren. Zur Auswertung legten wir den Nebenlaserpunkt der Schablone auf den Nebenlaserpunkt des Papiers und benutzten diesen Punkt als Drehpunkt. Die Schablone schoben wir so lange über das Papier, bis die Reihe der Abwurfpunkte (Löcher der Platte) und die Reihe der Einschlagpunkte parallel zueinander lagen. Die Abwurfpunkte markierten wir auf dem Papier, indem wir Nadeln durch die Punkte steckten und diese kleinen Löcher nachzeichneten. Anhand dieser neuen Ausrichtung erhielten wir eine Ostabweichung und konnten die Ergebnisse auswerten und statistisch darstellen. Wir führten auch noch den dritten Versuch in dieser Form durch (Laserjustage, Kugelbestückung, Evakuierung, Abwurf, Flutung, Kompasspeilung und Auswertung).

04.09.2003

Es wurden nach dem obigen Schema drei weitere Versuche durchgeführt.

05.09.2003

Wir führten den letzten Versuch durch. Bei der Vorbereitung des Abwurfes fuhr die Sicherheitsklappe zu weit nach hinten weg, da die Stop-Position gelöscht wurde, und schlug an das Geländer hart an. Das bewirkte eine starke Erschütterung auf die gesamte Vorrichtung und einen enormen Einfluss auf die Kugeln und deren Fall. Nach der Turmflutung erkannten wir schon beim ersten Betrachten, dass die Kugeln keine regelmäßigen Reihen bildeten und an unüblichen Positionen lagen.

Anschließend werteten wir die Versuche statistisch aus.



Auswertung der Ergebnisse

8 Diskussion der Befunde

Abschließend möchten wir darstellen, inwieweit uns die Beschäftigung mit diesem Fallexperiment in physikalischer und pädagogischer Hinsicht weitergeführt hat.

8.1 Physikalische Befunde

Übergreifende Fragestellungen, die uns bei der Planung und Auswertung unseres Versuches leiteten, waren, ob man den Versuch, den wir mit moderner Technik experimentell wiederholen wollten, mit einem endlichen Aufwand betreiben kann und wie genau die Ergebnisse insgesamt werden würden.

Für die Auswertung zogen wir lediglich die sechs Versuche der zweiten Versuchsreihe im September 2003 heran. Den siebten vernachlässigten wir, da er aufgrund der äußeren starken Störeinflüsse abweichende Ergebnisse aufwies. Die Ergebnisse der sechs Versuche wurden von verschiedenen Faktoren beeinflusst, wie der Turmbewegung und der Geschwindigkeit dieser Bewegung durch Wind, der Turmneigung, der unexakten Laserausrichtung, ungenau gebohrten Löcher sowie der Erschütterungen der Abwurfvorrichtung. Somit können wir nicht von 100%-ig exakten Untersuchungsergebnissen ausgehen, erhielten aber durch die Mittelwerte der sechs Versuche Ergebnisse, die unseren Erwartungen entsprachen und eine Ostabweichung bestätigten.

Während der Versuche machten wir die Erfahrung, dass wir einen immensen finanziellen, materiellen, technischen, personellen und zeitlichen Aufwand hatten, mit vielen Schwierigkeiten kämpfen mussten und keine von Fremdeinflüssen vollkommen freien Ergebnisse erhielten. Um alle störenden Faktoren zu beseitigen, hätten wir den Aufwand insgesamt unvermeidbar erhöhen müssen. Als Beispiel können wir das Problem mit dem Laser anführen, welches durch eine teurere Ausstattung vermutlich hätte verringert werden können.

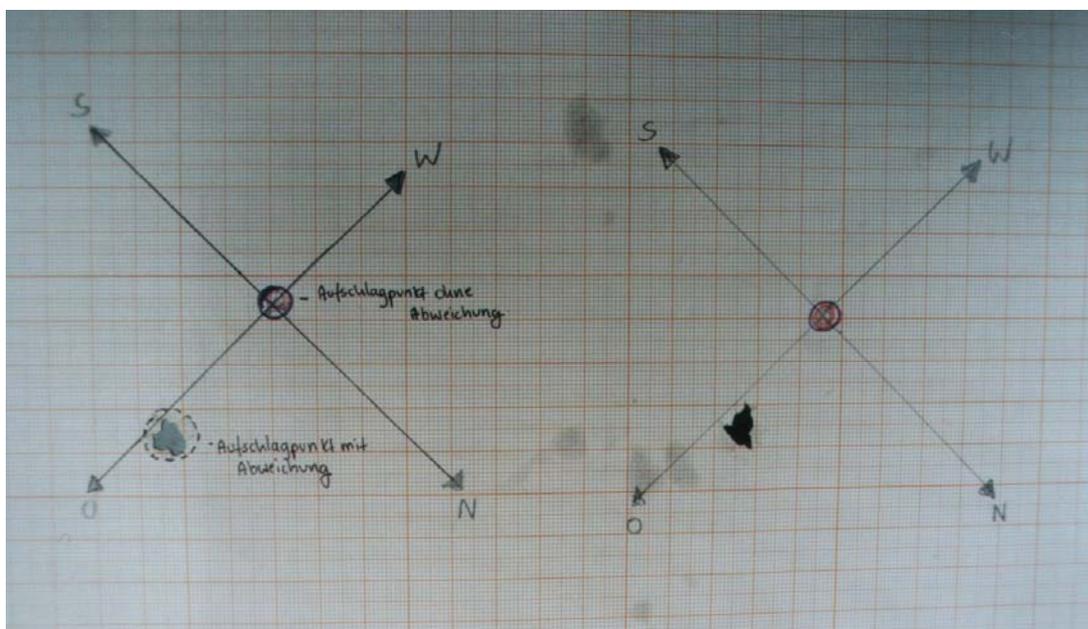
Für die Versuche haben wir folgende Darstellung der statistischen Auswertung gewählt: Den Abstand der Aufprallpunkte zu den Abwurfpunkten zeigten wir in einem Koordinatensystem, jeweils die drei Reihen des Kugelsystems getrennt, um Unterschiede

sichtbar zu machen. Alle Abweichungen zeichneten wir in ein großes Koordinatensystem (s. S. 50) ein, dessen vier Quadranten die Himmelsrichtungen darstellten.

Als Hauptergebnis können wir abschließend festhalten, dass unsere Versuche die These unterstützen, dass sich die Erde dreht und auch in die von uns angenommene Richtung. Alle Versuche wiesen eine Ostabweichung auf, wobei sie zusätzlich eine Nord- oder Südabweichung aufzeigten.

Die ersten sechs Versuche wiesen eine gewisse Regelmäßigkeit auf: Eine Kugel brach aus dem Kugelverbund und dem Reihemuster unerwartet aus. Unsere Erklärung dafür ist, dass es an dem Loch liegen könnte, in der die Kugel anlag. Da dieses Loch sehr unregelmäßige Ränder aufzeigte, hing sie vermutlich schief und bekam eventuell sogar einen Drall beim Abwurf.

Die dem Motor am nächsten gelegene Reihe wies die besten Ergebnisse auf, da sie der erwarteten Ostabweichung mit ihren niedrigen Werten am nächsten kam. Die meisten Aufschlagpunkte ließen sich in südöstlicher Richtung ausmachen. Der Durchschnittswert der Ostabweichung betrug bei uns 26,6 mm. Der rechnerisch erwartete Wert der Ostabweichung liegt bei einer Fallhöhe von 119 m bei 17 mm.



Die roten Löcher im Mittelpunkt der Kreuze markieren die Einschlagpunkte in der Lotlinie ohne Abweichung. Die Löcher links unten sind die realen Einschlagpunkte und weisen, wie man anhand der Himmelsrichtungen sehen kann, eine Ostabweichung auf

Darstellung der Ergebnisse

Erläuterungen zur Tabelle



Die Reihen I, II und III in der Tabelle bezeichnen die Reihen der Aufschlagpunkte der Kugeln von oben nach unten, I ist die obere Reihe, II die mittlere und III die untere Reihe. Die Buchstaben A bis G bezeichnen die sieben Aufschlagpunkte von links nach rechts. Der erste Aufschlagpunkt links oben (Bild links) ist demnach Aufschlagpunkt Reihe I/A in der Tabelle (unten).

Der Motor befand sich hinter den Kugeln in der ersten Reihe (siehe Bild oben).

Die Ergebnisse sind in der Maßeinheit *cm* angegeben. Die dahinterstehenden Buchstaben beziehen sich auf die Himmelsrichtung, O = Osten, N = Norden, S = Süden, W = Westen. Die beiden Werte zu Reihe I/Spalte A sagen demnach aus, dass sich die Kugel während des Falls 3,8 cm in Richtung Osten und 0,7 cm in Richtung Norden vom Lotpunkt während des Falls weg bewegt hat. In gleicher Art und Weise sind alle folgenden Werte zu lesen.

Tabellarische Einzelauswertung**Versuch I**

	A	B	C	D	E	F	G
Reihe I	3,8 O	4,0 O	3,8 O	3,4 O	3,3 O	2,9 O	2,8 O
	0,7 N	1,8 N	1,0 N	0,8 N	1,0 N	1,1 N	0,4 N
Reihe II	3,6 O	3,8 O	3,2 O	2,7 O	3,1 O	2,7 O	2,9 O
	0,6 N	0,5 N	0,5 N	0,7 N	0,4 N	0,6 N	0,4 N
Reihe III		3,2 O	3,0 O	2,6 O	2,6 O	2,7 O	1,7 O
			0,3 N	0,3 N		0,2 S	0,1 S

Ø 3,09 O / 0,466 N

Versuch II

	A	B	C	D	E	F	G
Reihe I	2,7 O	2,7 O	2,5 O	4,0 O	1,6 O	1,3 O	1,7 O
	1,2 S	0,2 S	0,6 S	0,5 S	0,5 S	0,3 N	0,3 S
Reihe II	2,3 O	2,0 O	1,7 O	2,1 O	2,0 O	1,2 O	2,0 O
	1,7 S	1,0 S	0,5 S	0,7 S	0,6 S		0,6 S
Reihe III		1,5 O	1,4 O	1,2 O	1,0 O	1,8 O	1,3 O
		1,2 S	0,4 S	0,5 S	0,5 S		0,3 S

Ø 1,09 O / 0,36 S

Versuch III

	A	B	C	D	E	F	G
Reihe I	4,5 O	4,4 O	4,3 O	5,9 O	3,7 O	3,0 O	3,3 O
	1,3 S	1,2 S	1,0 S	1,1 S	1,0 S	0,9 S	0,7 S
Reihe II	4,2 O	4,2 O	3,6 O	3,1 O	3,5 O	3,3 O	3,3 O
	2,0 S	2,0 S	1,3 S	1,2 S	2,2 S	0,9 S	1,3 S
Reihe III		3,4 O	3,4 O	3,0 O	3,2 O	2,7 O	2,5 O
		2,0 S	1,8 S	1,8 S	1,0 S	0,5 S	1,8 S

Ø 3,62 O / 1,29 S

Versuch IV

	A	B	C	D	E	F	G
Reihe I	3,9 O	4,0 O	3,6 O	5,5 O	3,4 O	3,0 O	3,0 O
	1,5 S	0,8 S	1,0 S	0,9 S	1,1 S	0,6 S	0,9 S
Reihe II	3,8 O	3,6 O	3,3 O	2,6 O	2,4 O	2,7 O	3,2 O
	2,0 S	1,8 S	1,5 S	1,2 S	1,5 S	1,0 S	1,4 S
Reihe III		3,1 O	2,5 O	2,6 O	2,7 O	2,4 O	2,5 O
		1,8 S	1,8 S	1,6 S	0,6 S	1,1 S	1,5 S

Ø 3,16 O / 1,28 S

Versuch V

	A	B	C	D	E	F	G
Reihe I	4,4 O	4,2 O	4,2 O	6,8 O	3,6 O	3,7 O	3,2 O
	3,8 S	2,5 S	1,1 S	2,8 S	2,0 S	1,4 S	1,4 S
Reihe II	3,5 O	3,4 O	3,2 O	2,6 O	3,5 O	3,4 O	3,2 O
	3,0 S	2,5 S	1,9 S	1,8 S	2,6 S	1,6 S	1,8 S
Reihe III		3,0 O	4,5 O	2,2 O	1,7 O	2,8 O	2,3 O
		2,5 S	3,0 S	3,2 S	2,3 S	1,8 S	1,9 S

Ø 3,47 O / 2,25 S

Versuch VI

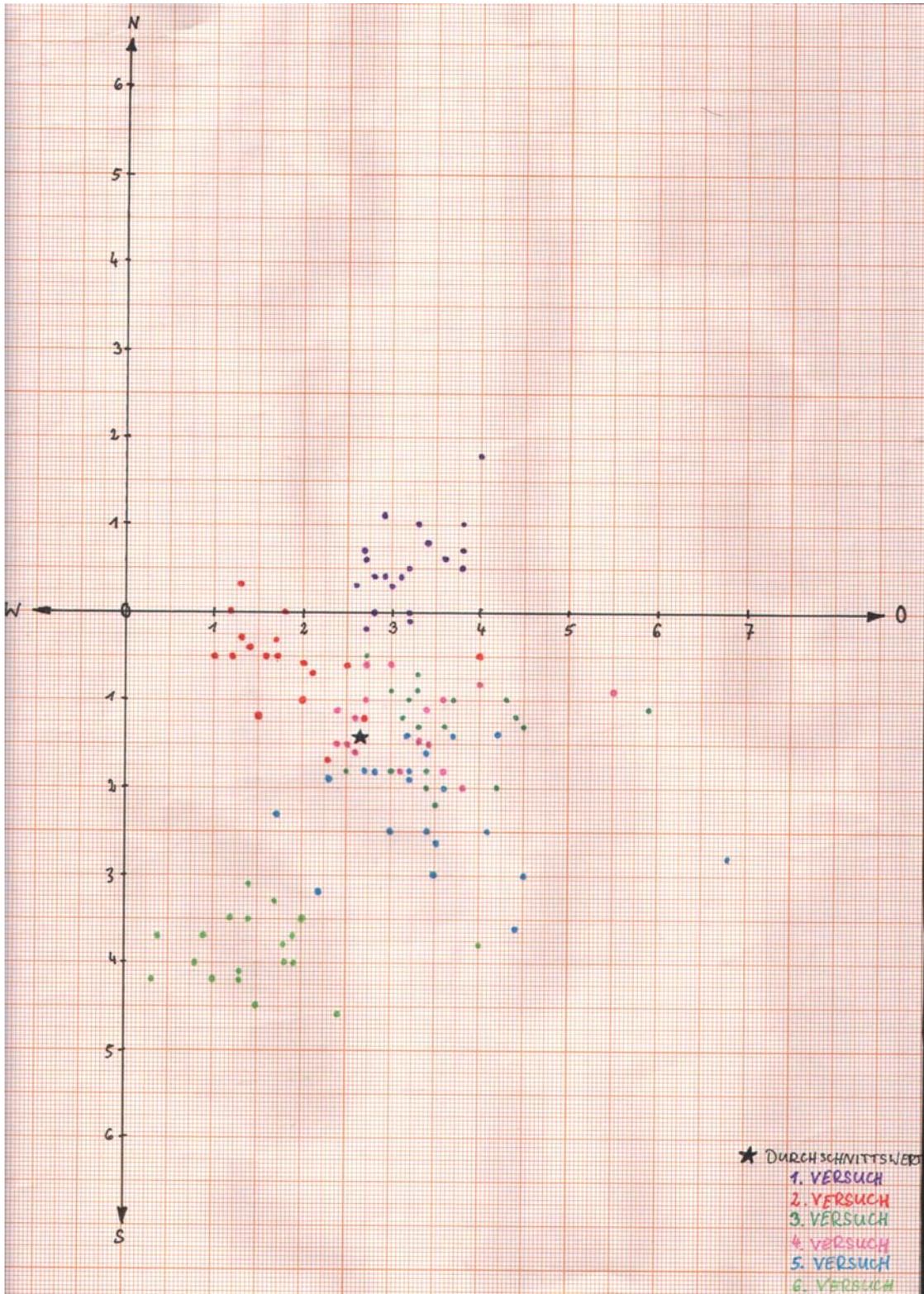
	A	B	C	D	E	F	G
Reihe I	2,4 O	1,9 O	1,8 O	4,0 O	2,0 O	1,4 O	1,7 O
	4,6 S	3,7 S	3,8 S	3,8 S	3,5 S	3,5 S	3,3 S
Reihe II	1,5 O	1,9 O	1,3 O	0,9 O	1,3 O	1,4 O	1,8 O
	4,5 S	4,0 S	4,2 S	3,7 S	4,1 S	3,1 S	4,0 S
Reihe III		1,5 O	1,0 O	0,3 O	0,4 O	1,2 O	0,8 O
		4,5 S	4,2 S	4,2 S	3,7 S	3,5 S	4,0 S

Ø 1,53 O / 3,89 S

Der Durchschnittswert der sechs Versuche liegt bei 2,66 O / 1,434 S

Gesamtauswertung

Das folgende Koordinatensystem zeigt die Gesamtauswertung aller sechs Versuche.



8.2 Pädagogische Befunde

Unser Projekt hat uns sowohl in unserer Rolle als Studierende als auch in der als zukünftige Lehrerinnen vorangebracht.

Ganz nach Wagenschein ging es bei uns nicht - wie so oft in der Schule - darum, bloße Formeln auswendig zu lernen und das Physikbuch zu wälzen. Im Fallturm hatten wir vielmehr die einmalige Gelegenheit, nicht nur einen Blick hinter die Kulissen der Forschung zu werfen, sondern selbst reale Forschung zu betreiben. Die intensive Arbeit an dem Projekt, das ganz verschiedene Bereiche der Physik, wie Magnetismus und Mechanik, tangierte, und das Erlebnis, selbst zu handeln, zu überlegen und zu geeigneten Lösungen und Ergebnissen zu gelangen, half uns, Hemmungen und sogar Abneigungen abzubauen, die durch unsere bisherigen vorwiegend negativen Erfahrungen im Physikunterricht entstanden waren. Dies resultiert unserer Meinung nach daraus, dass wir zu größerem Verständnis gelangt sind, da wir nicht, wie in unserem früheren Physikunterricht, bloße Formeln auswendig lernen mussten, sondern unsere Kreativität angeregt wurde und wir selbsttätig nach Lösungen suchen konnten.

Außerdem haben wir zwei Jahre lang als Gruppe zusammen gearbeitet und viele Erfahrungen zur Teamarbeit und zur Zusammenarbeit mit anderen Professionen, wie Technikern, Ingenieuren und Stiftungsverwaltungen, gewonnen. Neben physikalischen Erkenntnissen haben wir auch unsere Fähigkeiten in Verwaltungs- und Kommunikationsangelegenheiten erweitern bzw. überhaupt erst entwickeln können.

Unser Projekt hat für uns als zukünftige Lehrerinnen zu einer tiefgreifenden Änderung unseres Verständnisses von Unterricht geführt, die sich auf unsere spätere berufliche Tätigkeit auswirken wird: Da wir auch den Schülern solche positiven Erfahrungen, wie wir sie erlebt haben, ermöglichen wollen, werden wir uns bemühen, später induktiv vorzugehen und die Eigentätigkeit der Schüler zu fördern.

Das Fallexperiment, das wir uns ausgesucht haben, ist unseres Erachtens als Lehrgang geeignet, allerdings für Oberstufenschüler und nicht für den Sachunterricht der Grundschule. Wir konnten uns von der Wirksamkeit der Wagenscheinschen Methode überzeugen. Da sie auf unseren eigenen Verstehensprozess gewirkt hat, können wir auf der Grundlage dieser Erfahrung die Konsequenzen dieser Methode für unseren eigenen Unterricht besser abschätzen. Wir haben zum Beispiel erlebt, wie viel Zeit dieses Projekt letztendlich in Anspruch genommen hat, was wir zu Beginn gar nicht hatten voraussehen können. Wir wissen, dass wir diesem Problem im Schulunterricht wieder begegnen werden

und vielleicht durch eine geschickte Auswahl der Phänomene lösen können. Auch wenn unser Projekt so im Grundschulunterricht nicht durchführbar ist, gibt es doch geeignete Phänomene, mit denen genetisch-sokratisch-exemplarisch gearbeitet werden kann. So wäre es beispielsweise sinnvoller, im Sachunterricht eine Erklärung für die Erdrotation anhand des Foucaultschen Pendels zu erarbeiten. Wir denken, dass wir unseren Schülern und Schülerinnen nur dann naturwissenschaftliche Arbeitsformen in der Grundschule nahe bringen können, wenn wir sie einmal selbst von Grund auf durchschaut und ausprobiert haben. Gerade deshalb sollten unseres Erachtens die Universitäten verstärkt ihre Lehrmethoden ändern, so dass nicht nur über didaktische Konzeptionen referiert wird, sondern man die Möglichkeit hat, diese auch praktisch umzusetzen, so wie es uns ermöglicht wurde.

9 Literaturverzeichnis

- 1 Benzenberg, J.-F.: Versuche über das Gesetz des Falls, über den Widerstand der Luft und über die Umdrehung der Erde, nebst der Geschichte aller früheren Versuche von Galilei bis Guglielmini. Dortmund: Gebrüder Mallinckrodt 1804.
- 2 Brunner, W.: Dreht sich die Erde? Leipzig und Berlin: B.G. Teubner 1915.
- 3 Benzenberg, J.-F.: Doktor Benzenbergs Versuche über die Umdrehung der Erde, Dortmund bey Mallinkrodt, 1804, S.262ff.
- 4 Galilei, Galileo: Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1982, S. 145.
- 5 Jank, Werner; Meyer, Hilbert: Didaktische Modelle. 5. vollständig überarbeitete Auflage. Berlin: Cornelsen Scriptor 2002.
- 6 Wagenschein, Martin: Verstehen lehren. Genetisch-sokratisch-exemplarisch (1. Auflage 1968). Weinheim, Basel: Beltz, 7. durchges. Auflage. 1982.
- 7 Wagenschein, Martin: Die Erfahrung des Erdballs. Beitrag zu einer genetischen Didaktik der Himmelskunde. In: Ders.: Ursprüngliches Verstehen und exaktes Denken, Bd. II. Stuttgart: Klett Verlag 1970, S. 25-57.

10 Anhang

Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts im März 2004

Am 13. März 2004 haben wir unser Projekt auf der Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU) vorgestellt. Wir haben dazu einen Vortrag gehalten und unsere Ausführungen mit einer Powerpointpräsentation unterstützt. Der Vortrag hat uns sehr viel positive Resonanz gebracht, die uns in unserem Tun bestätigt hat. Ein für uns persönlich besonderer Höhepunkt war die Anwesenheit des Wagenscheinschülers Siegfried Thiel, der uns sagte, dass Wagenschein bei unserem Vortrag vor Begeisterung die Tränen gekommen wären, und uns damit das schönste Geschenk für unsere Mühen bereitere. Er unterstützte unsere Ansicht, dass gerade in der Lehrerbildung pädagogische Methoden von den Studenten selbst ausprobiert werden sollten, und sah in uns ein gelungenes Beispiel für vorbildliche Lehrerbildung, wie sie durch Herrn Ramseger ermöglicht wird.



Nach unserem Vortrag mit Herrn Ramseger und Herrn Thiel

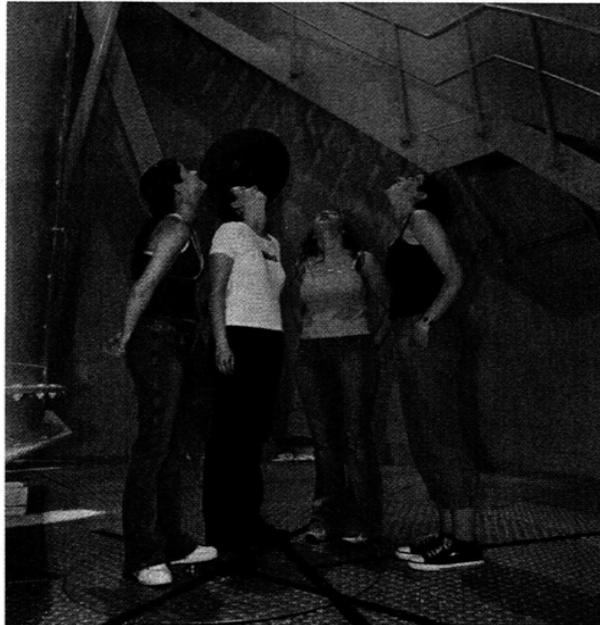
Angehende Grundschulpädagoginnen wagen ein Experiment

Und sie bewegt sich doch

VON ALEXANDRA OPERHALSKY

Zwei Jahre intensiver Vorbereitung, dann konnten vier Studentinnen der Grundschulpädagogik endlich das Experiment wagen: Im Bremer Fallturm warfen sie nicht nur einen Blick hinter die Kulissen naturwissenschaftlicher Forschung, mit sachkundiger Unterstützung führten sie selbst sieben Fallversuche durch. So tauchten die angehenden Lehrerinnen für die deutsche Sprache tief in die Physik ein: Das Experiment galt dem Phänomen der Ostabweichung von aus großer Höhe herabfallenden Kugeln. Daraus lässt sich die Rotation der Erde ableiten und wissenschaftlich nachweisen.

Ganz nach der genetisch-sokratisch-exemplarischen Methode des Physikers Martin Wagenschein ging es bei diesem Seminarprojekt nicht wie häufig in der Schule darum, nur Formeln auswendig zu lernen und das Physikbuch zu wälzen. Die Pädagogen wollten ein Phänomen verstehen und eigenständig Methoden und Erkenntnisse entwickeln. „Während unserer häufigen Treffen ließen wir bewusst sokratische Gesprächsrunden zu, in denen wir lernten, Fragen an den Gegenstand zu stellen und auch scheinbar Gegebenes zu hinterfragen“, erläutert Marilen Logé, eine der vier jungen Frauen. Im Sinne des genetischen Prinzips,



Bereit zum Experiment. Ein prüfender Blick in den Fallturm (Bild rechts).

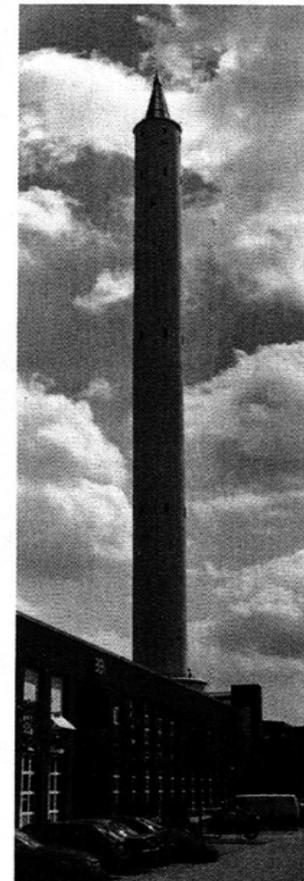
das unter anderem beinhaltet, die Wissenschaftsgeschichte aufzuarbeiten, verfolgten sie die verschiedenen Fallversuche durch die Jahrhunderte. An den besonders genau beschriebenen Fallexperimenten Guglielminis Ende des 18. Jahrhunderts bekamen sie einen Eindruck vom Aufbau dieser Versuche, entwickelten aber in mühevoller Arbeit einen eigenen Versuchsaufbau. „Im Bremer Fallturm konnten wir im Gegensatz zu den

historischen Experimenten auf modernste Technik zurückgreifen“, berichtet Julia Bähr. Den Studentinnen stand eine 120 Meter hohe Fallröhre zur Verfügung. Technische Besonderheiten, wie das in der Röhre erzeugbare Vakuum, mussten bei den Überlegungen für die Versuchsaapparaturen berücksichtigt werden. Kathrin Mechelk sagt rückblickend: „Das war eine unglaublich kreative Zeit, in der wir die verrücktesten Ideen entwickelten, wie

ein Gestell aussehen könnte, mit dem man 21 Kugeln durch elektronische Steuerung möglichst störungsfrei fallen und auffangen lassen kann und wie die Messungen und Auswertungen vorgenommen werden könnten.“

Die benötigten Apparaturen wurden dann in verschiedenen Werkstätten hergestellt. „Es ist ein tolles Gefühl, wenn man seine Ideen verwirklicht sieht“ beschreibt Marilen Logé den Augenblick, als die Studentinnen die Versuchsaufbauten abholten. Die Mittel für das Experiment kamen mit tatkräftiger Unterstützung durch die Erhard-Höpfner-Stiftung, das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), dem Dekanat, Firmen und Privatpersonen zusammen.

Die vier angehenden Lehrerinnen ließen sich von der Faszination treiben. Diese Faszination wollen sie ihren zukünftigen Schülern vermitteln. Sie denken, dass schon im Sachunterricht der Grundschule den Kindern der Weg in die Naturwissenschaften geebnet werden muss, in dem sie Selbstständigkeit, Kreativität und Teamarbeit erfahren. Marilen Logé möchte, „dass auch die Universitäten ihre Lehrmethoden in der Lehrerbildung ändern, indem nicht nur über verschiedene pädagogische Ansätze referiert wird, sondern man die Möglichkeit hat, diese auch auszuprobieren.“

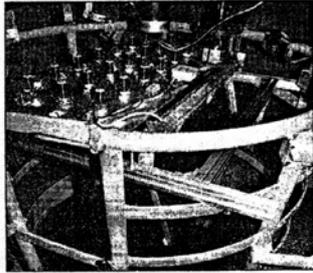


Doch, sie bewegt sich

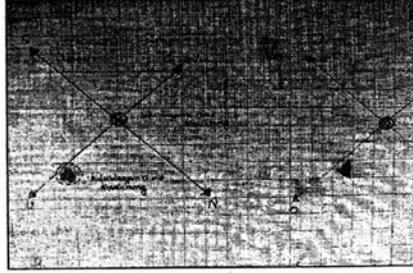
Vier Berliner Lehramtsstudentinnen bewiesen, was Galileo Galilei schon behauptet hatte: die Drehung der Erde
Im Vakuum-Turm ließen sie Kugeln nach unten fallen – in Potsdam stellten sie jetzt ihr Experiment vor



DER FALLTURM der Uni Bremen.



DIE ABWURFVORRICHTUNG oben im Turm.



DIE ABWEICHUNG, festgehalten auf Millimeterpapier.



FÜR UNS soll es Metallkugeln regnen: Marilen Logé, Julia Bähr, Kathrin Mechelk und Alexandra Operhalsky unten im Fallturm. Fotos: privat

VON VOLKER ECKERT

Potsdam. Sie hatten sich das ganz einfach und lustig vorgestellt: auf einen Turm steigen und eine Kugel aus der Hand fallen lassen, dann nachmessen. Die vier Lehramtsstudentinnen von der Freien Universität Berlin (FU) wollten so wie vor gut 400 Jahren Galileo Galilei den Beweis erbringen, dass sich die Erde wirklich dreht. Zwei Jahre und viele Rückschläge später hatten sie laut ihrem Dozenten eine kleine wissenschaftliche Sensation vollbracht: den ersten wissenschaftlich seriösen Beweis mit dieser Methode. Die Ergebnisse stellten die vier gestern auf einer Diktat-Tagung an der Uni Potsdam vor.

Die Idee kam von Jörg Ramseger, Professor der Erziehungswissenschaft an der FU. Er fand, dass die zukünftigen Sachkundelehrerinnen einmal selber ein Experiment von Anfang bis Ende durchführen sollten. So sollen Ramsegers Studenten lernen, dass es interessanter ist, sich etwas selber zu erarbeiten, als es nur von Lehrern oder Dozenten zu hören. Julia Bähr, Marilen Logé, Kathrin Mechelk und Alexandra Operhalsky entschieden sich für die Drehung der Erde.

Galileo wollte beweisen, dass die Erde sich um ihre Achse dreht. Der Legende nach stieg er 1589 auf den Schiefen Turm von Pisa. Wenn man eine Kugel fallen lässt, so seine Überlegung, müsste der Landepunkt nicht senkrecht unter der Abwurfstelle liegen, sondern ein Stück westlich, da die Erde sich in der Zwischenzeit ein Stückchen weiter Richtung Osten gedreht hat. Als die ersten Versuche nicht das erwartete Ergebnis brachten, sahen Galileis Gegner darin schon den Beweis für die Nicht-Bewegung der Erde. Er führte dagegen die Trägheit der Masse an: Die Kugel würde auch im Fallen die Bewegung der Erde mitmachen. Was er nicht bedachte: Die Turmspitze dreht sich schneller als die Erdoberfläche – weil sie weiter vom Erdmittelpunkt entfernt ist. Und diese Vorwärtsbewegung bleibt wegen der Trägheit auch im Fallen erhalten, so die Überlegung der vier Studentinnen. Die Kugel würde dem Turm bei der Drehung also sogar vorausellen und östlich vom zu erwartenden Punkt – in Drehrichtung „weiter vorne“ – auftreffen.

Auf der Suche nach einem geeigneten hohen Gebäude hatten die Studentinnen zuerst die Cargolifter-Halle in Brand im Auge, unter deren Dach eine Plattform in über hundert Meter Höhe hängt. Beim Ostertermin merkte das Team aber, dass der Wind in der Halle zu stark ist. Das hätte die Ergebnisse verfälscht. Auch große Kirchen wurden in Betracht gezogen. Dann erfuhren die Studentinnen vom Fallturm der Uni Bremen.

Im Innern des 145-Meter-Turms kann ein Vakuum erzeugt werden: ideale Bedingungen für eine unverfälschte Fallbahn. Doch damit begannen auch die Kosten auszuufern. „Ein paar mal waren wir kurz davor aufzugeben“, erzählt Kathrin Mechelk. Doch man fand Geldgeber; Stiftungen waren von der Idee so angetan, dass eine fünfstellige Summe zusammenkam.

Mehrere Tausend Euro kostete allein die Haltevorrichtung, von der die kleinen Metallkugeln nach unten fielen. Die stammten übrigens aus Kugellagern von U-Bahntüren. „Zuerst wollten wir sie mit Wachs befestigen, das dann durch Erhitzung zum Schmelzen gebracht wird“, erinnert sich Marilen Logé. Dann entschied man sich aber für eine Kombination aus Magneten und einer Platte, die nach unten wegklappt. Alles musste ferngesteuert funktionieren, da im Vakuum des Turms niemand anwesend sein konnte.

Projektvater Ramseger äußerte am Ende des Potsdamer Vortrages Zweifel an den Ergebnissen der „altvorderen Physiker“. Denn eindeutige Erkenntnisse seien mit den Methoden des 19. Jahrhunderts noch nicht möglich gewesen. Wengleich auch an dem jetzigen Experiment nicht alles Hightech war: Das Gelenk der Haltevorrichtung kauften die Studentinnen in einem Baumarkt. Um Geld zu sparen, wurde die Gefängniswerkstatt Tegel mit dem Zusammenbau beauftragt.

210 Kugeln stürzten schließlich in Bremen in die Tiefe. Und alle landeten ein paar Zentimeter in Richtung Osten.