

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

BEITRAG AUS DER REIHE:

Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik

Band 2

Anregungen für Unterricht und Lehre

ISBN 3 - 7896 - 0100 - 4

Verlag Palm & Enke, Erlangen 1991

Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.
Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.
Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle
genutzt werden. Auf der Homepage
www.solstice.de
werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Physikdidaktik im Studium

Einstimmung

Die Zeit des Staatsexamens naht wieder und die Prüfungskandidaten verspüren das Bedürfnis, die Sprechstunde des Prüfers in Physikdidaktik zu besuchen. Fast jeder sitzt bald auf der Couch, mit angstgeweiteten Augen und stellt die altbekannte Frage: "... und was soll ich für die Prüfung lernen?" Hier muß man zunächst darauf hinweisen, daß diese Frage eigentlich überflüssig ist, denn ein intensives Studium während der Studienzeit ist sicher die beste Prüfungsvorbereitung; aber gewünscht ist ja die Möglichkeit zur speziellen Nachbesserung.

Eine spezielle Antwort kann man hier nicht geben (es wäre wirklich zu schade, in Zukunft nicht mehr die rührend fragenden Augen zu sehen); stattdessen sei zunächst nur ein äußeres Charakteristikum der Physikdidaktik aufgezeigt: Wäre der Prüfungsbereich z.B. die Experimentalphysik oder die Theoretische Physik, so würde man auf eines der Standard-Lehrbücher, zumindest als Notnagel, hinweisen. Ein ähnlicher Ratschlag für den Bereich Physikdidaktik scheint nicht so einfach zu sein: zwar gibt es einige einschlägige Bücher, deren Studium von Gewinn sein kann, aber es bleibt der Eindruck, daß die Botschaften dieses Studierbereiches nicht leicht vermittelbar und die Fähigkeiten daraus nicht glatt vorzuweisen sind. Der Leser selbst mag dies mit einer der folgenden Aussagen, die vielleicht auch direkt seiner eigenen Erfahrung entsprechen, bestätigen:

- Der an "harte Physik" gewohnte Leser, der sich zum ersten Mal eine typisch fachdidaktisch orientierte Abhandlung vornimmt, wird wahrscheinlich bald aussteigen mit dem Gefühl: "Zu wenig Greifbares, lieber mache ich doch harte Physik..."
- Es gibt viele Fachwissenschaftler, auch Physiker, die einen schwierigen Sachbereich in hervorragender Weise darstellen können und zwar in typischer Weise für jedes Anspruchsniveau. Aber nur höchst selten wird ein solcher beneidenswerter Wissenschaftler sagen, er wende bei seiner Darstellungskunst bewußt bestimmte didaktisch orientierte Überlegungen an; *er kann es einfach.*
- Ich glaube, jedem Naturwissenschaftler fällt es leichter eine Stunde lang über ein fachliches Problem kompetent und interessant zu referieren, als in ebensolcher Weise eine

didaktische Thematik abzuhandeln. Hand aufs Herz: Würden Sie lieber eine Vorlesung z.B. über "Die Planetenbewegung" oder über "Aspekte und Gegenüberstellung der induktiven und der deduktiven Methode" halten oder auch nachempfinden?

- Oft hört man diese oder ähnliche Aussagen: "Didaktik wendet man an, anstatt darüber zu reden" (es soll aber auch Leute geben, die beides gleichzeitig tun!), und "eine geborene Lehrerbegabung braucht keine didaktischen Studien". Hören Sie hier die Tendenz zur Flucht vor dem weniger gut greifbaren Gebiet herausklingen? Oder fühlen Sie sich, als Physiker, vielleicht herausgefordert, denn "ein Physiker kann doch (fast) alles, und wenn er etwas nicht kann (!), dann kann er es wenigstens ziemlich rasch lernen".

Im Ernst: Natürlich gibt es den "geborenen Lehrer"; für ihn sind fachdidaktische Überlegungen eine selbstverständliche Naturbegabung. Aber diese Begabungen sind - im Vergleich zu unserem Lehrbedarf - selten, und überdies muß eine Begabung meist auch erst geweckt und formiert werden (auch in der Physik ist es bekanntlich so). Für die große Masse der Lehrerstudenten jedenfalls bedeuten fachdidaktische Studien eine Art erste Hilfe auf dem Weg zur selbständigen Bewältigung des späteren Unterrichtsauftrags, gewissermaßen Hilfswerkzeuge zum schnelleren und besseren Erreichen einer später mehr oder weniger natürlich auszuführenden Artistentätigkeit.

Die Suche nach Parametern

Wenn ein Studiengebiet als komplex, als schwer greifbar empfunden wird so empfiehlt es sich, nach Strukturierungen zu suchen, die wenigstens näherungsweise das Komplexe in kleinere, überschaubare Bereiche aufteilen. Es ist so ähnlich wie in der Physik: Man sucht Variable oder Parameter, die man möglichst isoliert handhaben und beschreiben kann. Auch für den Studienbereich Didaktik, das Wissen und Arbeiten im Bereich "Darstellen, Lehren, Lernen", hilft dieser Vorschlag, aber er führt wohl nie zu dem in den exakten Naturwissenschaften üblichen scharfen Aussagegehalt. Wie in vielen anderen Bereichen, so scheint auch hier eine gewissermaßen fraktale Struktur vorzuliegen: *Je genauer man hinschaut, desto mehr Detail erkennt man.*

Im Prüfungsgespräch flüchtet sich mancher Kandidat in Aussagen wie: "Ein Lehrer muß gut erklären können", "er muß einen guten Unterricht halten können", "er muß Verständnis für die Sicht des Schülers haben", "er darf es nicht zu schwer und nicht zu leicht machen", u.ä. Dies sind offenbar Binsenweisheiten, die keineswegs allein schon einen Studienerfolg signalisieren. Bei bescheidensten Ansprüchen kann es aber schon als erster Erfolg gewertet werden, wenn die Einsicht vorliegt, daß diese Aussagen operationalisiert, mit sachlichen Inhalten

umgesetzt werden müssen, daß also dazu noch die Frage “und wie erreicht man dieses?” beantwortet werden muß.

Ein wenig leichter zu belegen sind Forderungen wie: “Als Physiklehrer muß ich halt gut mit dem schulischen Experimentiergerät umgehen können”, oder “ich muß eine genaue Vorstellung vom Lehrplan haben” u.ä. Diese eignen sich zur konkreten Behandlung im zweiten Ausbildungsabschnitt (zu durchlaufen an den Seminarschulen). Wenn also der zweite Ausbildungsabschnitt sinnvollerweise u.a. der Anbahnung und Entwicklung von praktischer Routine gewidmet ist, so kann man sich bereits für den ersten Ausbildungsabschnitt (Universitätsstudium) das Anbahnen und Entwickeln einer geistigen Dynamik, mindestens aber einer Einsicht in die später zu bewältigenden Probleme wünschen.

Suchen wir also einen Parameter, einen kleineren, vielleicht überschaubaren, didaktischen Problembereich. Die erste der obigen Aussagen ist “erklären können”. Dies ist sicher ein Bedürfnis das sich, erkennbar typisch, in fast jeder Art von Unterricht lokalisieren läßt und in diesem Sinn wenigstens grob als “Parameter” betrachtet werden kann. Man muß sich aber darüber im klaren sein, daß darin weitere Substrukturen enthalten sind, wie z.B. das “nicht zu schwer und nicht zu leicht” und das “Verständnis für die Sicht des Schülers”.

Wir wollen uns im folgenden dem Parameter “Erklären” widmen, ohne aber dabei auf die Substrukturen zu achten, also gewissermaßen nur eine “erste Näherung” versuchen. Adressat ist der Lehrerstudent, der mindestens einen universitären Einführungskurs in Experimentalphysik durchlaufen hat. Wenn der Student den im Folgenden gebotenen Ausführungen zunächst auch nur in rein rezeptiver Attitüde gegenübersteht, so sollte er sich auch angeregt fühlen, zunehmend selbständig sein Physikgebäude zu durchstreifen und in ähnlicher Weise “Erklärungen” zu finden: *Nicht als Angebot zur Anlage einer Sammlung von Beispielen, sondern als Anregung zu eigenen geistigen Streifzügen sind die folgenden Ausführungen gedacht!*

Erklären

Beim Aufzählen der Begründungen für die Physik als Schulfach sollte man nicht vergessen: “Erwecken und Kultivieren einer Fragehaltung”. Daß “Physik machen” oder “Physik lernen” sehr weitgehend aus einer Fragehaltung heraus geschieht, weiß jeder Leser. Wie wird die Fragehaltung im Verlauf des schulischen Physikunterrichts gewissermaßen permanent erweckt? Beschäftigung mit Physik führt sehr häufig zur Frage “wie geht das?”, “warum ist das so?”, “was steckt dahinter?”. Die typische Antwort darauf ist das, was wir hier unter “erklären” verstehen wollen (das Neue in sinnvolle Beziehung setzen zu bereits Bekanntem). Natürlich ist der Bedeutungsgehalt der Frage und der Antwort in Zusammenhang mit der

Entwicklungsstufe des Schülers zu sehen. Leider findet man, wenn man den Lehrplan oder die Schulbücher durchblättert, neben den orthodoxen Aspekten (beobachten, beschreiben, Zusammenhänge erarbeiten, Anwendungen zeigen) nur wenig an "Erklärungen".

Warum überhaupt erarbeitet man einen gesetzmäßigen Zusammenhang? Um zu zeigen, daß die Natur Gesetzen folgt und daß daraus auch Anwendungen möglich werden, gewiß. Aber ein ebenfalls wichtiger Grund ist, daß man damit die Vorstellungen und Vermutungen "über das, was dahinter steckt" irgendwie bestätigen (oder, sorgfältiger überlegt, ggf. widerlegen) kann!

Ganz natürlich ist hier folgender kritischer Einwand: "Physikalische Erklärungen mit Tiefgang sind meist zu weit abliegend von den schulischen Möglichkeiten und deshalb nicht machbar; vorläufige oder nur bedingt zutreffende Erklärungen entsprechen nicht einem seriösen Wissenschaftsverständnis". Hier irrt der Kritiker! Wer die Arbeitsweise des Wissenschaftlers kennt weiß, daß es geradezu typisch für den wissenschaftlichen Erkenntnisprozeß ist, zunächst vorläufige, ungefähre Vorstellungen zu entwickeln, die dann nach und nach zum ausgeschärften Bild ausreifen, gewissermaßen als intellektuelle Krönung. Warum soll man dem Schüler nur die beiden Möglichkeiten - entweder Krönung oder nichts - bieten? Oft liegt eine "echte Erklärung" oder auch ein vereinfachtes Modell tatsächlich zu weit ab von den schulischen Möglichkeiten. Gerade deshalb ist es nötig, die wenigen sich bietenden Möglichkeiten wirklich zu nutzen: Der Lehrer darf, ja soll sich auch vorläufiger Vorstellungen oder Erklärungen bedienen. Vorläufige Erklärungen verwenden oft eine Analogie, mit welcher der zu erklärende Prozeß modellmäßig derart nachgebildet wird, daß er in einem bereits vertrauten Rahmen abläuft.

Natürlich muß sich der Lehrer Gedanken machen über den Wert einer Analogie oder eines Modells als Erklärung. Allein z.B. eine ad-hoc-Erklärung nützt wohl wenig; man wünscht, daß auch Anlagen zu einer späteren vertiefenden Behandlung bereitgestellt werden. Kurz: *Ein Modell muß anregend und weiterführend sein*. Die folgende Diskussion von drei Beispielen soll helfen, den angehenden Lehrer entsprechend zu konditionieren.

1. *Warum wird der Lichtstrahl gebrochen?* Die Behandlung der Lichtbrechung ist Standardstoff: Zunächst wird das Phänomen vorgeführt (z.B. die hinter dem Becherrand wieder zum Vorschein tretende Münze, der ins Wasser getauchte scheinbar geknickte Stab, das unter einer dicken Glasplatte scheinbar verschobene Schachbrettmuster), dann wird der Weg eines Lichtbündels beim Übergang in ein anderes Medium gezeigt und besprochen (z.B. Laserstrahl schräg auf eine Wasseroberfläche; der Weg des Strahls wird sichtbar gemacht,

entweder durch geringe Streuung, oder durch Vergleich der Auftreffstellen des direkten und des gebrochenen Strahls), und schließlich wird der gesetzmäßige Zusammenhang zwischen Einfallswinkel und Brechungswinkel erarbeitet und damit der Brechungsindex definiert; als anwendende Fortsetzung kann man z.B. den Strahlengang einer bikonvexen Glaslinse bearbeiten.

Im Zentrum dieser Sequenz steht das Brechungsgesetz, gewissermaßen deren wissenschaftliches Kondensat. Die *Wertung* seines Gehalts, ein wichtiger Schritt für den kompletten Lernprozeß, also die Beantwortung der Frage, "was bedeutet das Brechungsgesetz", hat leicht erkennbar zwei Komponenten: Die Frage nach der praktischen Bedeutung und die Frage nach dem, was dahinter steckt. Erstere führt bekanntlich auf die geometrisch-optische Abbildung mit Linsen und wird hier nicht weiter behandelt; letztere zielt auf Einordnung und Erklärung.

Falls letztere, die Frage nach dem Warum und Wieso der Brechung überhaupt anklingt, so wird die Antwort meist in einer für den Schüler leider bedeutungsleeren Aussage gegeben, man kann auch sagen, hinter einer wissenschaftlich klingenden Definition versteckt: Dasjenige Medium, in dem der Strahl zum Lot hingebrochen wird, bezeichnet man als das optisch dichtere (ohne eine dazugehörige Aussage über die Ausbreitungsgeschwindigkeit). Abgesehen von der Möglichkeit zur Verwechslung mit der Massendichte wird diese Definition auch mißverstanden als Erklärung, was aus der sicher nicht seltenen Aussage "der Strahl wird zum Lot hingebrochen, weil er ins optisch dichtere Medium eintritt" abzulesen ist. Wäre es an dieser Stelle nicht natürlicher, anstelle der "optischen Dichte" (in der ja für den Schüler keine explizite Aussage über die Ausbreitungsgeschwindigkeit steckt) die Ursache der Brechung unmittelbar mitzuteilen: Die Brechung zum Lot hin ist eine Folge von verringerter Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts.

Diese Aussage kann schulisch zwar nicht unmittelbar belegt werden, sie ist aber wohl interessanter und anregender als die optische Dichte. Man kann sie jedoch, reduziert auf ein Analogiemodell, in verschiedener Ausschärfung wenigstens plausibel machen, qualitativ (Auftreten der Richtungsänderung, Brechung) und quantitativ (Zusammenhang im Analogiemodell entspricht dem Brechungsgesetz). Dies wird im folgenden besprochen.

Zunächst gilt es, die Richtungsänderung mit einer Geschwindigkeitsänderung qualitativ zu assoziieren. Eine Marschkolonne, die ihre Marschrichtung ändern will, bewirkt dies bekanntlich folgendermaßen: Der in der ersten Reihe rechts außen Marschierende verringert seine Schrittweite (mindestens kurzzeitig), der links außen Marschierende aber nicht (die anderen Marschierer in dieser Reihe verringern ihre Schrittweite linear dazwischen interpoliert);



Fig. 1

damit ändert sich zunächst die Richtung der ersten Reihe (Fig. 1). Wenn der Abstand innerhalb der Reihe konstant gehalten und dabei die Vorwärtsrichtung senkrecht zur Reihe eingestellt wird, so hat die Kolonne nach rechts geschwenkt. Dies legt die Vermutung nahe, daß vielleicht auch beim Lichtbündel, das seine Richtung ändert, eine Geschwindigkeitsänderung mitspielt. Sehr ähnlich ist die Demonstration mit dem Hantel-Roller (zwei Räder, die durch eine Achse in konstantem Abstand gehalten werden, aber nicht starr verbunden sind), der über eine schiefe Ebene herabrollt (schräg zur Richtung der Falllinie) und dessen weiter unten liegendes Rad zuerst ein wenig abgebremst wird (z.B. Filzauflage): Durch das so ausgeübte Drehmoment wird die Orientierung und damit die Rollrichtung des Hantel-Rollers geändert. Beide Modelle liefern zwar qualitativ den richtigen Zusammenhang, aber wenn man sie zu weiterreichenden Aussagen verwenden will, dann muß man genauer hinsehen (auch das ist ein erfreulicher Effekt!) und man erkennt einen Fehler in ihnen: Das Lichtbündel verändert seinen Querschnitt, wenn es in ein anderes Medium übertritt, dagegen in den beiden beschriebenen Modellen ist das nicht so: Der Hantel-Roller stellt einen unveränderlichen Querschnitt dar (Abstand der beiden Räder), und auch die Marschkolonne wird normalerweise ihren Querschnitt (Breite der Kolonne) nicht ändern. Aber man kann das Modell ja verfeinern (und damit in einen höheren Anspruchsgrad wechseln). Zunächst die rein geometrische Aussage, die bei gegebenem Einfallswinkel und Brechungswinkel die Änderung der Strahlbreite beschreibt (Fig. 2; in der Richtung senkrecht zur Zeichenebene bleibt die Strahlbreite unverändert). Bezeichnet man die Strecke AB mit a , so erhält man $d_1 = a \cos \alpha$ und $d_2 = a \cos \beta$, also

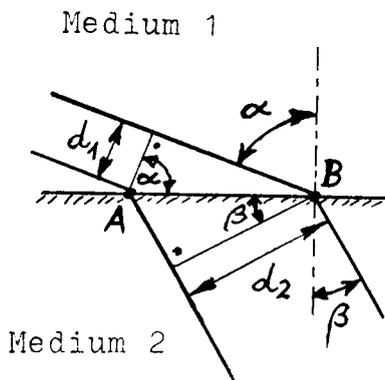


Fig. 2

senkrecht zur Zeichenebene bleibt die Strahlbreite unverändert). Bezeichnet man die Strecke AB mit a , so erhält man $d_1 = a \cos \alpha$ und $d_2 = a \cos \beta$, also

$$d_1/d_2 = \cos \alpha / \cos \beta \quad (1)$$

Diese Regel würde für die Marschkolonne irgendwie gekünstelt wirken, deshalb suchen wir eine mehr realistische Modellierung: Gut zur Vorstellung einer Querschnittsveränderung paßt ein kontinuierliches Medium, und weil es sich auch fortbewegen soll, wählen wir gleich eine nichtkompressible Flüssigkeit: Dem in Fig. 2 gezeichneten geknickten Lichtbündel soll nun ein ebenso geknicktes Rohr entsprechen, in dem z.B. Wasser strömt. Das Ergebnis der folgenden quantitativen Betrachtung wird sein, daß das Verhältnis $\sin \alpha / \sin \beta$ in einem speziellen Sonderfall genau dem sich einstellenden Verhältnis der Strömungsgeschwindigkeiten, v_1/v_2 , entspricht.

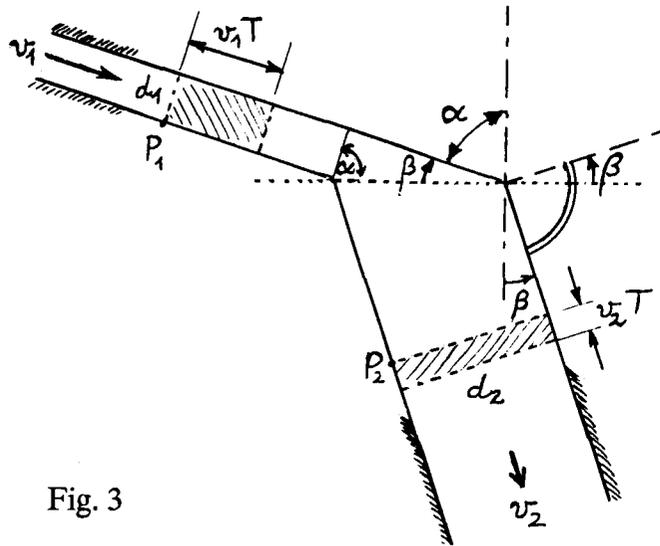


Fig. 3

Um dies zu zeigen (siehe Fig. 3), wählen wir als Sonderfall die Winkel α und β so, daß die vom Reflexionsgesetz gegebene Richtung (gestrichelt gezeichnet, ein Strahl in dieser Richtung tritt aber im gewählten Sonderfall weder beim Licht noch im Strömungsrohr auf) und die des gebrochenen Strahls aufeinander senkrecht stehen (der Optiker erkennt hierin den Brewster'schen Fall). Diese Bedingung bedeutet

$$\cos \beta = \sin \alpha ; \cos \alpha = \sin \beta \quad (2)$$

Nach diesen geometrischen Zusammenhängen nun eine Aussage über die Strömung, welche deren Geschwindigkeiten und Querschnitte beinhaltet: An jeder Stelle (z.B. P_1 und P_2) muß innerhalb einer beliebig zu wählenden Zeitspanne T das gleiche Flüssigkeitsvolumen vorbeiströmen (Kontinuitätsbedingung; die Breite senkrecht zur Zeichenebene sei hier, wie auch im Lichtbündel, unverändert):

$$v_1 T d_1 = v_2 T d_2 \quad (3)$$

(Hier wird klar, warum oben der Brewster'sche Fall gewählt wurde: In jedem anderen Fall müßte auch der reflektierte Strahl modelliert werden, d.h. das Rohr müßte eine Verzweigungsstelle haben, wodurch (3) erheblich komplizierter wäre). Mit (1), (2) und (3) ergibt sich

$$\sin \alpha / \sin \beta = v_1 / v_2$$

Dieses Ergebnis ist zwar keine Erklärung im streng physikalischen Sinn, sondern nur eine Aussage eines Analogiemodells. Man kann daraus vermuten, daß auch die Lichtbrechung mit einer Änderung der Lichtgeschwindigkeit einhergeht und daß im optischen Brechungsgesetz $\sin \alpha / \sin \beta = n$ vielleicht die Bedeutung $n = v_1 / v_2$ steckt.

Das hier beschriebene Strömungsmodell ist sicher ungewohnt. Es sei klargestellt, daß das im Rohr strömende Wasser nur eine Analogie ist, daß man sich also das Lichtbündel nicht direkt als strömende Flüssigkeit vorstellen darf, und daß die Ursächlichkeiten hier gewissermaßen vertauscht sind: Dem Wasser wird ein größerer Querschnitt geboten, und deshalb verringert sich seine Geschwindigkeit; dagegen beim Licht ist die Geschwindigkeit z.B. im Glas verringert,

und deshalb vergrößert sich der Bündelquerschnitt. (Die Frage "warum ist die Geschwindigkeit im Glas geringer als in Luft" liegt zwar nahe, wird aber hier nicht weiter behandelt.) Immerhin aber zeigt das Beispiel, wie in einem Erklärungsversuch verschiedene Stufen durchlaufen und auch weitere physikalische Aspekte angeregt werden. Es sei auch dahingestellt, ob der Aufwand dafür nicht zu hoch ist; das bekannte Huygens'sche Modell liefert das Brechungsgesetz praktisch direkt, erfordert aber Vorkenntnisse aus der Wellenlehre.

Nicht immer gelingt es, ein einigermaßen richtiges und nützliches Modell zu finden. Wie oft, so spricht auch hier ein Vergleich eine deutliche Sprache:

a) Verfehltes Modell (aus einer Examensarbeit): "Eine Bleikugel rollt eine schiefe Ebene herab und wird dabei durch Reibung gebremst. So wird auch das Licht gebremst, was zur Brechung führt". Man sieht, wie hier eine Art ferne Erinnerung an ein anderes Modell vorliegt (der oben beschriebene Hantel-Roller), welches aber so weit verzerrt ist, daß es weder Erklärungswert noch Weiterführung aufweist.

b) Verfehltes Modell (aus einer Examensarbeit): "Die Lichtschwingung wird modellmäßig dargestellt durch eine an einer Feder hängenden Masse, welche schwingt. Übertritt ins optisch dichtere Medium: Die Masse soll in ihrer Schwingung ein wenig in ein viskoses Medium (Honig) eintauchen. Dadurch wird die Schwingung gebremst und der Lichtstrahl gebrochen". Man sieht Fehlvorstellungen und Fehler, die zu grober Sinnentstellung führen.

Die beiden Beispiele a) und b) mögen zeigen, daß es wirklich nötig ist, sich als Lehrerstudent ernstlich mit der Thematik "Erklären" zu befassen; ein wachsendes Verständnis kommt mit der Anzahl der studierten Beispiele. Vielleicht erhellt auch, daß es "wilde Fantasie" (a, b) gibt, die nicht verwechselt werden soll mit den sehr erwünschten "kreativen Ideen mit aufzeigbarem Sinngehalt".

2. *Der Schweredruck.* Im Kapitel "Hydrostatik" kommt das "Gewicht der darüberliegenden Wassersäule" vor. Jeder Student sollte daraus den hydrostatischen Druck, auch in seiner Tiefenabhängigkeit, angeben können, und er sollte die Begründung für die "Wassersäule" kennen. Aus meiner eigenen Schulzeit kann ich mich erinnern, welche Sorgen mir die "Wassersäule" bereitet hat: es war mir zwar formal klar, was gemeint war, aber trotzdem schien es mir nicht begreiflich, wie der so formunbeständige, flüssige Stoff Wasser zu einer klar abgegrenzten Säule mit Eigengewicht wird. Ist hier vielleicht, wie es im Eifer wohl öfter passiert, irgendein Zwischenschritt im Lernprozeß ausgelassen worden?

Schlagartig klar wurde mir die Situation aber, als ich mich immer wieder - gequält von meinen Zweifeln - fragte, wie die Verhältnisse wären, wenn es sich nicht um eine Ansammlung von Flüssigkeit, sondern um eine Ansammlung von Stücken fester Materie handeln würde: Z.B.

ein Mensch liegt verschüttet unter einem Haufen sehr großer Felsbrocken, oder unter einem Haufen Ziegelsteine, oder unter einem Haufen feinen Sandes (*realitätsnahes Gedankenexperiment!*). Man sieht sofort, die Gewichtslast an verschiedenen Stellen am Boden hängt stark von der Lage der Felsbrocken ab; so kann für den Verschütteten u.U. ein genügend großer Hohlraum übrig bleiben, und er spürt nichts von dem Gewicht des darüberliegenden Haufens. Unter dem Ziegelsteinhaufen ist dieser besondere Glücksfall schon nicht mehr möglich; es würde jedoch Schwierigkeiten machen, die auf einer bestimmten (kleinen) Grundfläche liegende Last genau vorherzusagen, denn auch die Ziegelsteine verzahnen sich gegenseitig ineinander, und so wird ein Teil der Last seitlich abgestützt. Beim Sandhaufen schließlich (noch ein wenig deutlicher: Sand mit Wasser durchsetzt, Schlamm) ist die Situation am besten überblickbar: Weder ein genügend großer Hohlraum, noch ein nennenswertes, gegenseitiges Abstützen tritt auf (Fig. 4: Ziegelhaufen und Sandhaufen. Wie verändert sich die Gewichtsanzeige beider Waagen, wenn die Gewichte an die Stellen A1 und A2 aufgelegt werden?) Die fehlende Fähigkeit zum gegenseitigen, seitlichen Abstützen (- genau genommen

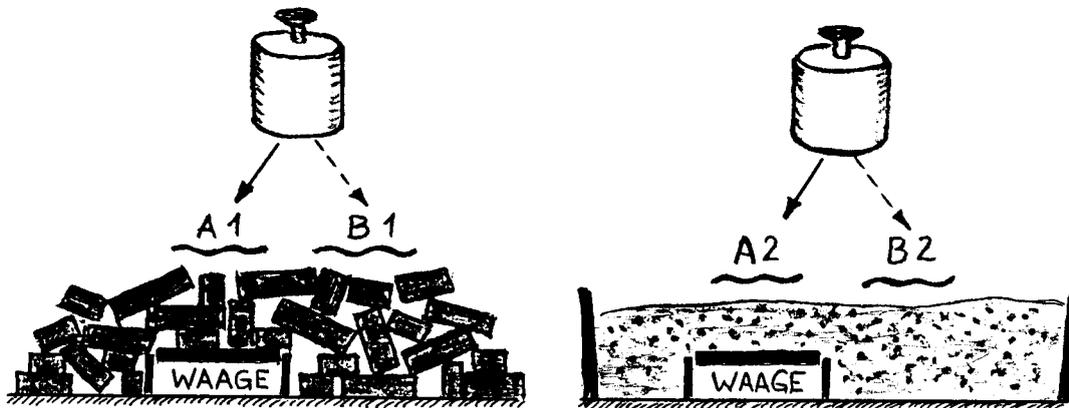


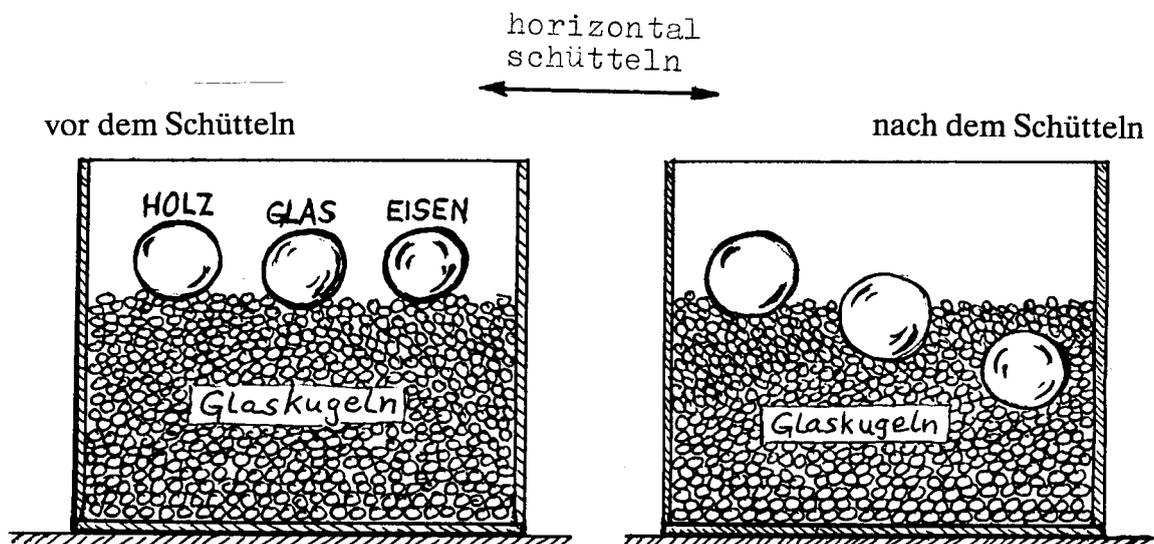
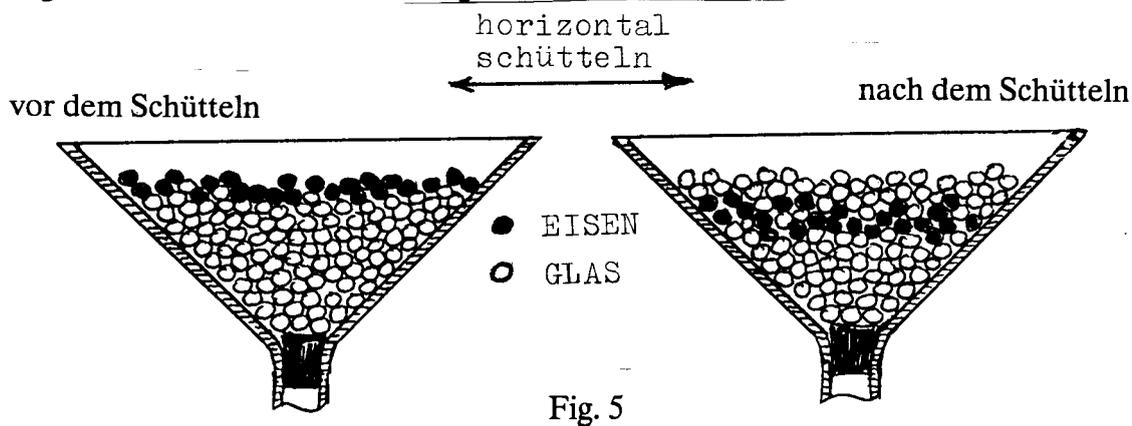
Fig. 4

hat auch feiner durchfeuchteter Sand noch eine Restabstützung, denn ein ganzer Haufen wird durch sein Eigengewicht nicht zum völligen Auseinanderlaufen gebracht, wie es beim Wasser der Fall ist -) beschreibt man auch durch die Aussage: Keine Schubspannung übertragbar (Fig. 4: Wie verändern sich die Gewichtsanzeigen, wenn die Gewichte nun auf die Stellen B1 und B2 umgesetzt werden?).

Nun zurück zur Flüssigkeitssäule; man versteht jetzt, warum diese so klar definiert ist. In deren Mantelfläche (und überall sonst) passiert das, was man sich näherungsweise auch im Sandhaufen vorstellt: Keine gegenseitige Verzahnung, also keine Schubspannung übertragbar. Es lastet auf der Grundfläche also genau das Gewicht der darüberliegenden Flüssigkeitssäule.

Nun liegt es nahe, mit Hilfe der bisher gewonnenen Einsicht einige makroskopische Beobachtungen an Flüssigkeiten modellmäßig nachzubilden: Auch größere, glatte Kugeln können sich kaum gegenseitig verzahnen, solange sie sich gegeneinander bewegen. Man nehme z.B. einen Trichter, fülle ihn etwa halb mit Kugeln (Durchmesser Größenordnung Millimeter) und schüttele *horizontal*. Am unteren Ende des Trichters ordnen sich die Kugeln dicht gepackt an und verharren so, aber weiter oben im Trichter bewegen sich während der Schüttelei die Kugeln durcheinander: Dieser obere Bereich ist unsere modellmäßige Nachbildung einer Flüssigkeit, mit der nun weiter experimentiert wird.

a) Entmischung von zwei Flüssigkeiten. Man fülle den Trichter etwa halb mit leichten Kugeln (z.B. Glas) und schichte darüber eine Lage schwerer Kugeln (z.B. Stahl). Beginnt man zu schütteln, so ist damit eine Flüssigkeit geringer Dichte, überschichtet mit einer Flüssigkeit großer Dichte, modelliert. Nach einigem Schütteln sind die schweren Kugeln abgesunken (Fig. 5). Man kann auch beginnen mit einer durchmischten "Flüssigkeit" und erreicht nach einigem Schütteln die Entmischung.



b) Schwimmen, Schweben, Sinken. Wenn man wieder die Flüssigkeit modelliert, indem man kleine Glaskugeln horizontal schüttelt, so kann man sehen, wie ein größerer Körper (Kugel) je nach seiner Dichte darauf schwimmt, darin schwebt, oder darin sinkt ^{*)}. Man lege also auf das Ensemble der kleinen Glaskugeln vorsichtig je eine größere Holzkugel, Glaskugel, Eisenkugel und beginne zu schütteln. Das Ergebnis zeigt Fig. 6.

3. *Die sich drehende Erdkugel.* Das folgende Beispiel soll zeigen, wie schon in unteren Schulstufen eine Naturbeobachtung aufgegriffen und mit Hilfe eines realen Modells weiter konkretisiert werden kann und wie weitere Fragestellungen erwachsen. Besonders deutlich ist hierbei, daß der Informationsgehalt absichtlich lange auf der qualitativen oder halbquantitativen Ebene gehalten wird und daß dabei in sehr natürlicher Weise ein Bedürfnis zu der - sonst oft gefürchteten - vertiefenden Quantifizierung erwachsen kann.

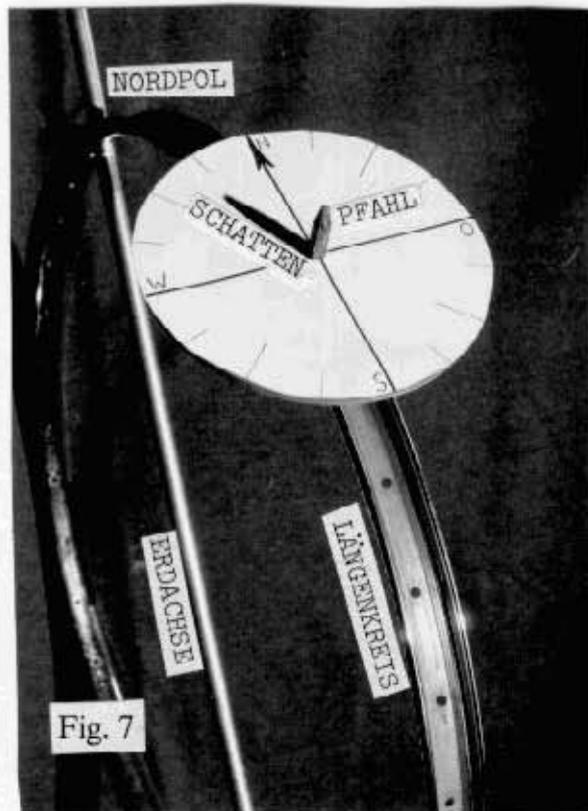
Das Vorhaben, die tägliche Bahn der Sonne irgendwie beschreiben zu wollen (die Idee dazu kann z.B. bei der Beobachtung eines Sonnenuntergangs entstehen), läßt den Wunsch nach einem dazu nötigen, irgendwie in der Nähe der Sonnenbahn liegenden, feststehenden Referenzobjekt aufkommen: Man könnte z.B. dicht neben einem hohen Baum sitzen und beobachten, wie die Sonne am Wipfel des Baumes vorbeizieht. Aber plötzlich hat man eine viel praktischere Idee: Man braucht ja nur den Schatten des Baumes im Verlauf des Tages zu beobachten! Auf die Schule übersetzt: Man braucht im Schulhof, an einer sonnigen Stelle, einen (senkrecht stehenden, z.B. 1 m langen) Pfahl, der in der Mitte einer am Boden horizontal ausgerichteten Scheibe mit eingezeichneter Winkelteilung und Himmelsrichtungen steht. Zunächst wird das Wandern des Schattens beobachtet, und dabei entsteht natürlich das Bedürfnis etwas aufzuschreiben: Man notiert Datum und, am besten in tabellarischer Form, die Schattenlänge (dividiert durch die Pfahllänge) und die dazugehörige Richtung (evtl. auch die dazugehörige Uhrzeit). Nach einigen solcher Beobachtungen sind Veränderungen erkennbar, und gegen Schuljahrsende erfaßt man den kürzesten Mittagsschatten.

Man kann nun eine Projektionsfläche aufstellen (einen Zylindermantel mit der Scheibe als Grundfläche und den Pfahl als Achse) und von jedem Schattenendpunkt eine Linie über die Pfahlspitze bis zur Projektionswand legen. So erhält man, punktweise, ein Abbild des jeweiligen Sonnenstandes (mit Uhrzeit).

Wesentlich interessanter als die Projektion ist der Übergang zum Modell: Man nimmt einen Globus, befestigt darauf (z.B. in der Position München) eine verkleinerte Version der Anordnung im Schulhof (Scheibe mit Winkelteilung und Pfahl; der Verkleinerungsfaktor

*) Vorschlag R. Pippig

spielt keine Rolle) und beleuchtet das Ganze mit einer kleinen Lichtquelle aus einiger Entfernung (welche Orientierung, wenigstens ungefähr, die Erdachse dabei haben soll, weiß der zukünftige Lehrer natürlich aus seinem Fachstudium). Dabei wirft der Pfahl einen Schatten auf die Winkelteilungsscheibe, was nicht verwunderlich ist. Nun aber beginnen Sie bitte den Globus um die Nord-Süd-Achse langsam zu drehen. Dabei verändert sich der Schatten: Er ändert seine Länge und er dreht sich gegenüber der Winkelteilung! *Er verhält sich genau so, wie der Schatten im Schulhof!* Aus der Gegenüberstellung von Modell und Realität kann man sich nun vorstellen, daß die Erde sich dreht (daß sie ungefähr eine Kugel ist,



kann man unmittelbar aus den bekannten Satellitenfotos ersehen). Soweit die qualitative Stufe. Anstelle des kompletten Globus genügt es später auch, nur einen Längengrad darzustellen, auf dem die Scheibe montiert wird. Hierzu eignet sich z.B. eine Fahrradfelge *) (Fig. 7).

Natürlich wird man die Messungen auf dem Schulhof (z.B. vom Tag der Sommersonnenwende) vergleichen mit Messungen am Globus. Wenn die Einstellungen einigermaßen stimmen (Pfahl und Winkelteilungsscheibe in Realität und Modell müssen richtig orientiert sein und auf der gleichen geografischen Breite stehen, Globusachse muß richtig orientiert sein), dann stimmen die Meßwerte von Schulhof und Globus auch überein.

Die Bedeutung dieser Übereinstimmung wird rasch klar, wenn man die Position von Winkelteilungsscheibe und Pfahl auf dem Globus in andere geografische Breiten verschiebt (z.B. Rom und Stockholm). Es genügt, jeweils nur die Länge des Mittagsschattens (kürzester Schatten) zu messen: Nun stimmen die Globuswerte nicht mehr mit dem Schulhofwert überein. Das Experimentieren am Globus (variieren der geografischen Breite) ermöglicht es also, die Übereinstimmung mit der Realität (Schulhof) aufzusuchen; damit ist die geografische Breite des Schulhofes am Globus abzulesen.

Man kann noch einen anderen interessanten Schluß ziehen aus den verschiedenen Schattenlängen (Mittagsschatten) bei verschiedener geografischer Breite (z.B. München und

*) Vorschlag R. Pippig

Rom; zunächst Anschauung am Globus, dann aber Erstellung der Realdaten durch Kooperation zweier Schulklassen hier und dort!): Die beiden Pfähle bilden einen Winkel; da sie aber lokal genau senkrecht stehen, muß die Erdoberfläche in München anders orientiert sein als in Rom. Die Pfähle weisen auch die Richtung zum Erdmittelpunkt. Fig. 8 zeigt, wie sich hieraus der Abstand zum Erdmittelpunkt ermitteln läßt: Dies geschieht entweder durch Anwendung des Zusammenhangs $R = \ell / \varphi$, oder elementar durch "Probieren" mit kleinen verschiebbaren Modellzeichnungen. Die hierzu nötigen Realdaten sind: Schattenlänge (am 1 m Pfahl) am gleichen Tag mittags in München und in Rom und die Entfernung München - Rom. Es dürfte für (fast) jeden Schüler ein (wahrscheinlich) unvergeßliches Erfolgserlebnis sein, praktisch selbständig den Erdradius bestimmt (oder begründet abgeschätzt) zu haben und dies, ohne einen Bohrer zum Erdmittelpunkt angesetzt zu haben!

Schließlich noch eine Möglichkeit, die sich für höhere Schulstufen eignet: Der kürzeste Mittagsschatten (Sommer) L_1 und der längste Mittagsschatten (Winter) L_2 sind zwei reale Maßgrößen aus dem Schulhof, die noch weiter ausgewertet werden können. Wie man am Modell sieht, hängt die Länge des Mittagsschattens ab

von der geografischen Breite α des Pfahls und von der Neigung β der Erdachse gegen ihre Bahnebene (wenn Ihr Schüler nach der früheren Beschäftigung mit dem Globus diese unmittelbare Anschauung hier nicht mehr braucht, so hat das Modell seinen Zweck erfüllt: Die äußere Anschauung ist zur inneren Anschauung geworden, "er kann es sich vorstellen"). Mit den beiden Meßwerten L_1 und L_2 lassen sich die beiden Unbekannten α und β bestimmen (siehe Fig. 9). Es ist erstaunlich, wie durch zwei fast trivial erscheinende Beobachtungen zwei andere Aussagen erhalten werden, die dem direkten Zugriff praktisch unerreichbar scheinen:

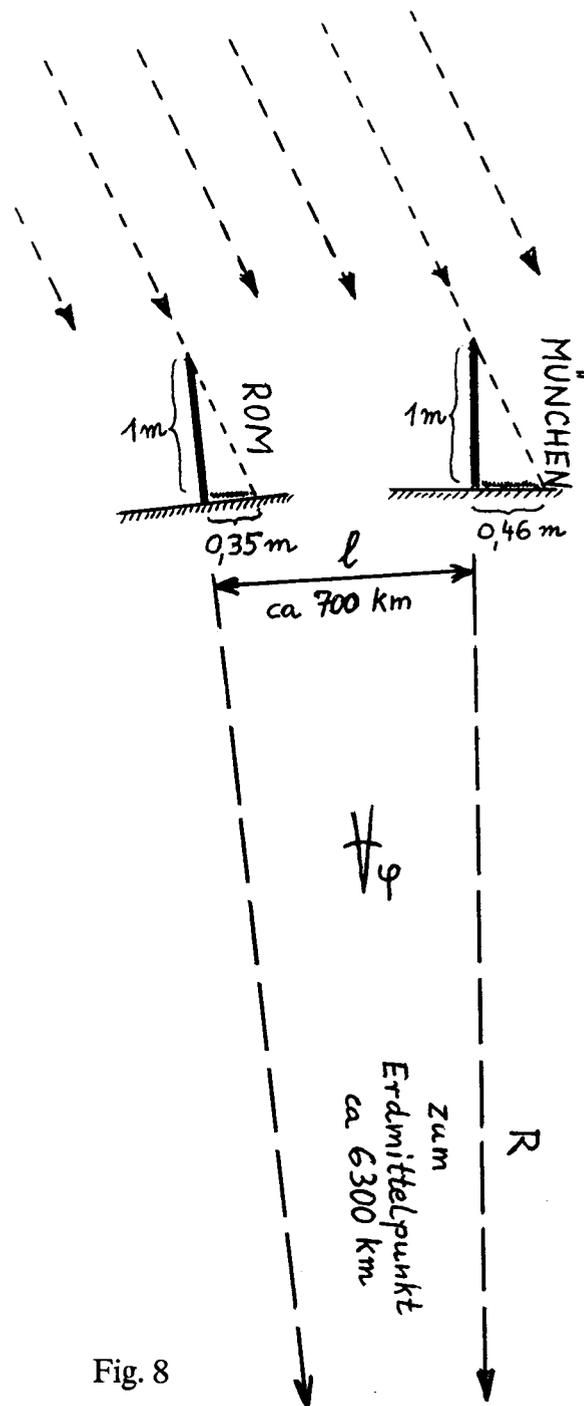


Fig. 8

Beobachtet:

L_1 (Sommerschatten)

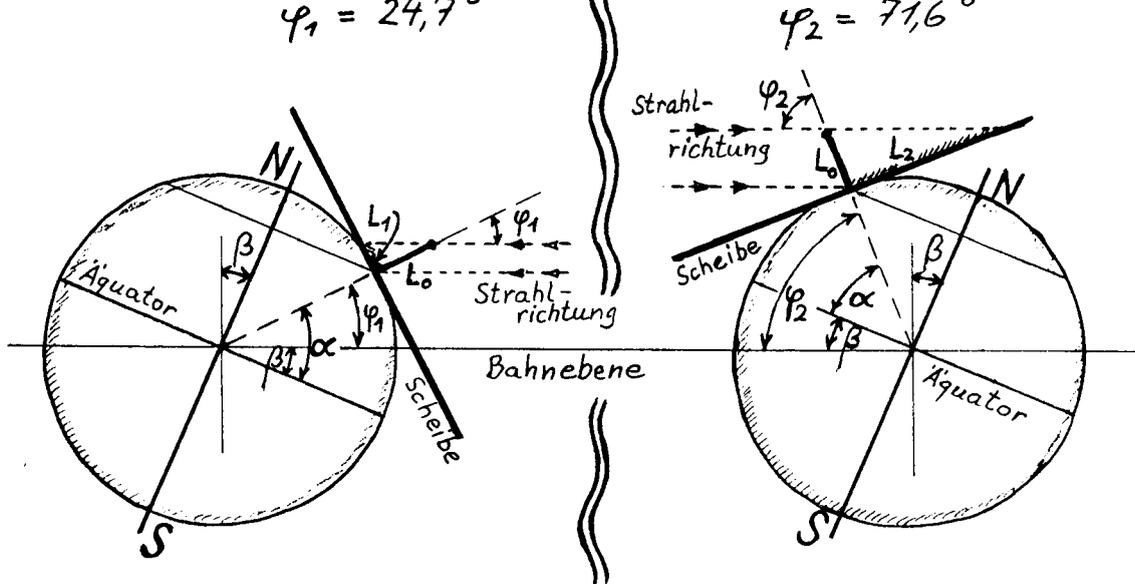
$$\tan \varphi_1 = \frac{L_1}{L_0} = 0,46$$

$$\varphi_1 = 24,7^\circ$$

L_2 (Winterschatten)

$$\tan \varphi_2 = \frac{L_2}{L_0} = 3,0$$

$$\varphi_2 = 71,6^\circ$$



Daraus berechnet:

α (geografische Breite)

β (Neigung der Erdachse)

$$\alpha = \varphi_1 + \beta; \quad \alpha = \varphi_2 - \beta$$

$$\alpha = \frac{\varphi_2 + \varphi_1}{2} = \underline{\underline{48,6^\circ}}$$

$$\beta = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} = \underline{\underline{23,5^\circ}}$$

Fig. 9

Die Verwendung von Modellvorstellungen hat dazu geführt. (Es gibt noch weitere interessante Beobachtungen an diesem Modell, z.B. in der Nähe des Nordpols, die Sie unbedingt selbst auffinden sollten. Beobachten Sie sich selbst dabei: Benötigen Sie dazu das reale Modell, oder reicht Ihre "innere Anschauung"?)

Schluß

Weiß der aufmerksame Leser jetzt, wie das "Erklären" funktioniert? Wahrscheinlich wird die Antwort sein: Man kann es nachempfinden, aber eine leicht greifbare Lehre daraus, ein Rezept, kann man aus den Beispielen kaum entnehmen (so wie eingangs auch beschrieben). Aufforderungen, wie "zurückführen auf einfache, physikalische Aussagen und Vorstellungen" allein reichen kaum. Es ist wichtig für den Lehrerstudenten (möglichst früh) einzusehen, daß eigene Kreativität dazugehört: Eigene Ideen entwickeln, diese bewegen und in einen gesicherten, physikalischen Rahmen einbringen. Versuchen Sie zu erklären (nicht zu verwechseln mit "leiten Sie her"), z.B. warum bei der Parallelschaltung die reziproken Werte des Widerstands addiert werden, wie die Joule'sche Wärme entsteht, warum es die thermische Ausdehnung gibt, woher man die Größe von Atomen kennt, woher die Lorentz-Kraft kommt, usw. Vielleicht finden Sie auch selbst weitere Fragen und vielleicht auch solche, die noch weitab im Forschungsbereich liegen.

Natürlich soll der Lehrerstudent über dem Bedürfnis eigene Ideen zu entwickeln nicht vergessen, daß sein späterer Unterricht auch die formale Seite der Physik darstellen muß. Aber der besondere Reiz physikalischen Denkens liegt ja darin, daß dann und wann richtige Überraschungen auftreten. Wie aber soll eine Überraschung auftreten, wenn man nicht vorher eine bestimmte Vermutung, eine eigene Vorstellung entwickelt hat? Versuchen Sie, diesen besonderen Reiz, wenn Sie ihn selbst schon erkannt haben, auch in Ihrem späteren Unterricht zu vermitteln!