

Physik anwendungsorientiert lehren

Rainer Müller

Physikdidaktik TU Braunschweig, Pockelsstr. 11, 38106 Braunschweig

Kurzfassung

Dass das Lernen von Physik anhand von möglichst authentischen Anwendungssituationen erfolgen sollte, ist eine alte Forderung. In diesem Beitrag wird untersucht, auf welche Weise es gelingen kann, das Lernen in Kontexten mit der physikalischen Fachsystematik zu verknüpfen. Zur Erläuterung wird der Weitsprung als Alltagskontext zum schrägen Wurf behandelt.

1. Probleme des traditionellen Lernwegs

Jeder, der ein Physikstudium durchlaufen hat, kennt das Gefühl: Am Ende des Semesters, nachdem man die Klausuren zur Vorlesung bestanden hat, kann man sich des Eindrucks nicht erwehren, dass man zwar Einiges gelernt hat, aber nur wenig Praktisches damit anfangen kann. Ladungsverteilungen auf leitenden Kugeln, an masselosen Federn schwingende Punktmassen, ideale Gase, die in Kolben zusammengedrückt werden – das sind nicht die Probleme, weshalb man sich zu einem Physikstudium entschlossen hat.

Natürlich könnte man das Gelernte auf vielerlei praktische Beispiele anwenden – wenn man denn gelernt hätte, es zu können. Man hat etwa den ersten Hauptsatz der Thermodynamik kennengelernt, eines der mächtigsten Werkzeuge der Physik, und man kennt die Gesetze der Wärmeübertragung durch Strahlung. Und trotzdem hat man keine Ahnung, wie man dieses Wissen z. B. auf die Frage anwenden kann, warum man im Sommer lieber helle Kleidung statt dunkler tragen sollte.

Folgende Metapher drängt sich auf: Im Baumarkt hat man sich einen großen Werkzeugkasten gekauft, mit allen Werkzeugen, die man jemals brauchen wird. Aber kann man nun einen Tisch bauen? Das ganze erworbene Handwerkszeug nutzt nichts, wenn man es nicht einsetzen kann. Wir müssen den Umgang damit in praktischen Problemen mitlernen.

Ähnliches gilt für die Physikausbildung – und zwar nicht nur in den Hochschulen, von denen hier die Rede war, sondern auch in den Schulen. Wissen, das abgelöst von seinen Anwendungen gelehrt und gelernt wird, ist in Situationen, wo es gebraucht würde, oft nicht verfügbar, weil seine praktische Nutzung nicht mitgelernt wurde.

Weinert (1998) formuliert das (viel allgemeiner als in einem nur physikalischen Zusammenhang) folgendermaßen [1]: „Wissen wird in der Regel mit einer gewissen sachlogischen Systematik vermittelt und erworben. Lange Zeit galt es als unumstritten, ob die auf diese Weise aufgebauten schulischen Kenntnisse auch im alltäglichen oder beruflichen

Leben genutzt werden können. Inzwischen gibt es gravierende Zweifel. Systematisch erworbenes Wissen – so die These – ist anders strukturiert, anders organisiert und anders abrufbar als es die meisten praktischen Anwendungssituationen erfordern. Prinzipiell verfügbares Wissen bleibt deshalb oft tot, träge und ungenutzt, obwohl man es eigentlich zur Lösung bestimmter Probleme braucht. Die Diskrepanz zwischen Lern- und Anwendungsbedingungen ist in der Regel sehr groß.“

2. Lernen in Kontexten

Der Ausweg aus diesem Missstand scheint auf der Hand zu liegen: Das Lernen sollte in „sinnstiftenden“ Kontexten [2], anhand von praktischen Anwendungsbeispielen erfolgen. Die Forderung nach Alltagsbezüge ist für den Schulunterricht schon fast Allgemeingut geworden. Stellvertretend für viele Empfehlungen sei hier aus [3] zitiert: „Erfolgreiches Lernen sollte aus Problemsituationen heraus erfolgen [...]. Es genügt also nicht, eine beliebige Anwendungssituation herzustellen; die Schüler sollten durch den aufgeworfenen Kontext so intensiv angesprochen werden, dass sie das im Raum stehende Problem zu ihrem eigenen machen.“

Für das Lernen in Kontexten aus Alltag und Technik sprechen zwei Gründe:

- a) die erhoffte motivierende Wirkung von Alltagssituationen, die in der voranstehenden Äußerung deutlich wird,
- b) der oben angesprochene Mangel an Problemlösefähigkeit, dem man möglicherweise mit der Einbettung in anwendungsorientierte Situationen begegnen kann.

Die Steigerung des Interesses an Physik ist in der Tat ein wichtiges Ziel. Es erscheint evident, dass die Behandlung von physikalischen Themen mit Alltagsbezug das Lernen interessanter macht. Berger [4] hat gezeigt, dass dies ohne Leistungseinbußen geschehen kann.

Der zweite Punkt ist in der Physikdidaktik empirisch nicht untermauert. Jedoch sprechen starke Argumen-

te aus der Lernpsychologie dafür. In den modernen konstruktivistisch geprägten Lerntheorien spielt das situierte Lernen eine große Rolle. Beispielsweise schreiben Reinmann-Rothmeier und Mandl [5]: „Ausgangspunkt von Lernprozessen sollten authentische Probleme sein, die aufgrund ihres Realitätsgehalts und ihrer Relevanz dazu motivieren, neues Wissen oder neue Fertigkeiten zu erwerben. Die Lernumgebung ist so zu gestalten, dass sie den Umgang mit realistischen Problemen und authentischen Situationen ermöglicht und anregt. Der Vorteil: Situiertheit und Authentizität sichern einen hohen Anwendungsbezug beim Lernen.“ Authentische Lernsituationen spielen auch in den unter „anchored instruction“ und „cognitive apprenticeship“ bekannten Ansätzen eine große Rolle.

3. Fachsystematik vs. Kontexte

Auch wenn die Forderung nach Lehren und Lernen in authentischen Kontexten sehr einleuchtend erscheint: Wenn es so einfach wäre, wie es sich anhört würde es sicher schon mit weitaus größerer Selbstverständlichkeit praktiziert, als es derzeit der Fall ist. Die Kontextorientierung hat auch problematische Seiten. Vor allem zwei Gefahren sind erkennbar:

a) „Vorgebliche“ Kontexte

Authentische Kontexte werden vorgegaukelt, wo in Wirklichkeit keine sind. Ausgehend vom fachsystematisch durchgeplanten Lernstoff wird ein Kontext als „Feigenblatt“ gesucht, um die Lernsituation für die Lernenden vermeintlich interessanter zu gestalten. Beliebt sind diese vorgeblichen Kontexte in Übungsaufgaben und in der Motivationsphase zu Beginn einer Unterrichtseinheit. (Ein Merkmal für einen vorgeblichen Kontext in einer Motivationsphase ist, dass man später nie mehr auf den Kontext zu sprechen kommt, zu deren Lösung der physikalische Inhalt angeblich eingeführt wurde).

Ein Beispiel für einen vorgeblichen Kontext ist die folgende Aufgabe: „Ein Weitspringer hat eine Abprunggeschwindigkeit von 9,5 m/s und springt unter einem Winkel von 28° ab. Berechne die Sprungweite.“ Obwohl Sport sicher ein motivierendes Thema ist, handelt es sich hier um eine Fragestellung, die so in der Realität niemals auftauchen würde. Bei Sportveranstaltungen werden sicherlich nicht die Abprunggeschwindigkeit und der Abprungwinkel gemessen, um die Sprungweite zu bestimmen. Auch sonst fällt es schwer, sich eine Situation vorzustellen, in der diese Frage gestellt würde. Die primäre Absicht bei dieser Frage ist auch nicht, etwas über Weitsprung zu lernen. Die Formel für die Weite beim schrägen Wurf soll geübt werden, und der Weitsprung dient hier eben als besagtes Feigenblatt. Man merkt die Absicht und ist verstimmt...

Wir werden im Folgenden sehen, dass man mit einer veränderten Frageperspektive die gleiche Aufgabe

auf sinnvolle Weise in einen authentischen Kontext einbetten kann.

b) Episodenhafte Lernsituationen

Ein zweiter problematischer Aspekt beim Lernen in Kontexten ist der möglicherweise episodenhafte Charakter der Lernsituationen. Damit eine tragfähige Wissensbasis entsteht, muss das Gelernte mit bereits vorhandenem Wissen vernetzt werden. Die gelernten Inhalte müssen sich in einen größeren Zusammenhang einbetten lassen. Wenn die Lernsituationen den Lernenden eine solche Vernetzung nicht anbieten, kann das Wissen nur punktuell bleiben. Beim Lernen in Kontexten findet das Lernen – erwünschtermaßen – situiert statt. Das Abstrahieren des Gelernten vom Kontext und das Herstellen von Querverbindungen sind bei dieser Zugangsweise natürlich erschwert.

Die lernpsychologische Empfehlung zum Umgang mit diesem Problem ist das mehrfache Behandeln der gleichen Inhalte in multiplen Kontexten. Aus praktischen (zeitlichen) Gründen dürfte dies in den meisten Fällen jedoch kaum praktikabel sein.

In der Physik kommt – wie in vielen anderen Disziplinen – hinzu, dass das Lernen nicht einfach irgendwo beginnen kann, wie die Kontexte es gerade erfordern. Es gibt elementare Grundlagen und darauf aufbauendes Wissen. Historisch hat sich die Fachsystematik der Physik herausgebildet, eine Organisation des physikalischen Wissens, die den Stoff in eine Reihe von Themenfeldern (wie Optik, Mechanik) gliedert und innerhalb dieser Themenfelder vom Einfachen zum Komplizierten voranschreitet. Im Kopf eines Experten ist die physikalische Fachsystematik ein höchst effizientes Netzwerk an Wissen.

Dieses beeindruckende Wissensnetz bleibt allerdings normalerweise den Experten vorbehalten. Dass es den Lernenden Probleme bereitet, zeigt der normale Physikunterricht, der ja im wesentlichen an der Fachsystematik ausgerichtet ist. Er leidet an der übergroßen Abstraktheit der Fachsystematik, mit der die Effizienz der Wissensorganisation erkauft wird und die sich in den eingangs geschilderten Erfahrungen niederschlägt.

4. Fachsystematik und Kontexte verzahnen

Einzeln betrachtet weisen sowohl das Lernen in Kontexten als auch das fachsystematisch geprägte Lernen Vorzüge wie Gefahren auf. Die Herausforderung besteht darin, die beiden Zugänge so zu kombinieren, dass die Nachteile beider möglichst vermieden und die Vorteile genutzt werden.

Dass es sich bei „Fachsystematik vs. Kontextorientiertheit“ nur um eine scheinbare Dichotomie handelt und für einen erfolgreichen Unterricht beide gebraucht werden, führt auch Weinert [1] an der weiter oben schon zitierten Stelle aus:

„Inzwischen lässt sich die wissenschaftlich fundierte Schlussfolgerung ziehen, dass Lernen sowohl sach-

systematisch als auch situiert erfolgen muss. Mit anderen Worten: Neben einem wohlorganisierten disziplinären Wissenserwerb bedarf es von Anfang an einer Nutzung des erworbenen Wissens in lebensnahen, transdisziplinären, sozialen und problemorientierten Kontexten. Die Förderung sowohl des situierten als auch des systematischen Lernens ist eine wesentliche Bedingung für den Erwerb intelligenten, flexibel nutzbaren Wissens. [...] Nur wer neben der sachlogischen Systematik des Wissens auch die situativen Kontexte seiner möglichen Anwendung mitgelernt hat, erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass es in lebenspraktischen, variablen Kontexten kreativ angewandt wird.“

Ähnlich argumentieren Häußler et al. [6]: „In manchen fachdidaktischen Diskussionen kommt die Fachsystematik nicht besonders gut weg. Sie gilt vielen als eine Art Bollwerk, hinter dem sich unbelehrbare Lehrkräfte verschanzen, um sich gegen eine Modernisierung des Unterrichts zu wehren. Wir sind dagegen der Auffassung, dass sich eine Erneuerung des naturwissenschaftlichen Unterrichts, die ausschließlich innerhalb der fachsystematischen Grenzen erfolgt, ebenso erschwert ist wie bei einem Verzicht auf die Fachsystematik. Würde sich der Unterricht nämlich nur an der Fachsystematik orientieren, so wäre der Zugang für den überwiegenden Teil der Schülerschaft versperrt [...]. Würde die Fachsystematik dagegen zugunsten einer Orientierung an der Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler gänzlich verbannt werden, so käme ein Unterricht heraus, der wegen seines episodenhaften Charakters ebenfalls nicht besonders effektiv wäre. Es geht vielmehr darum, Unterricht so zu gestalten, dass sowohl eine systematische Entwicklung der Begrifflichkeit als auch eine Anbindung an die Lebens- und Erfahrungswelt der Schülerinnen und Schüler möglich ist.“

Bezogen auf das Lernen von Physik bedeutet das: Es muss gelingen, die gegliederte Struktur des Wissensnetzes von der physikalischen Fachsystematik zu übernehmen, gleichzeitig aber die interessefördernde Wirkung der Kontexte zu nutzen und mit ihnen authentische Lerninhalte bereitzustellen.

Um Missverständnissen vorzubeugen: „Die Struktur der Fachsystematik übernehmen“ bedeutet hier nicht das unreflektierte Festhalten an einer tradierten Abfolge von Inhalten, sondern die Orientierung am logischen Aufbau des physikalischen Gedankengebäudes. Entscheidend ist der „rote Faden“, der das Lernen strukturiert und das Einbetten des Gelernten in das vorhandene Wissensnetz erleichtert.

Die Besonderheit (und Schwierigkeit) des hier vorgestellten Zugangs liegt darin, dass die zu behandelnden Kontexte so ausgewählt und elementarisiert werden müssen, dass die Verzahnung Fachsystematik/Kontexte auch wirklich gelingt. Es sollen sich Fragestellungen und Problemsituationen ergeben, die glaubwürdig und authentisch sind. Gleichzeitig soll ein relativ eng umgrenztes physikalisches Thema anhand der Fragestellung gelernt werden, d. h. der physikalische Inhalt soll im jeweiligen Kontext möglichst „in Reinform“ erschlossen werden.

Zur Illustration ist in Tabelle 1 ein Beispiel gezeigt (es handelt sich um eine zweistündige Vorlesung „Mechanik“ für Lehramt Haupt-/Realschule). Die Gliederung der Lerninhalte erfolgt nach der Systematik der Newtonschen Mechanik. Die verschiedenen Themengebiete werden in möglichst authentischen Kontexten erarbeitet (z. B. der schräge Wurf am Beispiel des Weitsprungs).

Um das Problem der „vorgeblichen Kontexte“ zu vermeiden und die Kontexte glaubwürdig gestalten zu können, ist ein wesentlich größerer Anteil an erzählenden Elementen nötig als im Physikunterricht bisher üblich. Beim Weitsprung (den wir unten ausführlich als Beispiel behandeln werden), sind das z. B. Sportler, Techniken, Rekorde. Im Idealfall sollten die Schülerinnen und Schüler zusammen mit den physikalischen Inhalten auch etwas Neues über den jeweiligen Kontext gelernt haben.

Beim Lernen wird zwischen verschiedenen Phasen unterschieden: solchen, in denen auf die spezielle Problematik des jeweiligen Kontextes eingegangen wird (z. B. Weitsprungstechniken) und solchen, in denen allgemeine physikalische Begriffe und Gesetze eingeführt werden. Zur besseren Vernetzung der

Inhaltsbereich	Kontext
Trägheitsgesetz	Auffahrunfall, Sicherheitsgurte
Geschwindigkeit und Beschleunigung; Zeit-Weg-Diagramme	Videoanalyse eines Bungee-Sprungs
Senkrechter und schräger Wurf	Weitsprung
Zweites Newtonsches Gesetz	Zielen beim Kopfball
Drittes Newtonsches Gesetz	Einfache Beispiele aus dem Alltag
Anwendungen der Bewegungsgleichung	Schieben einer Kiste; Schwerelosigkeit
Mechanische Schwingungen	Analytische Behandlung des Bungee-Sprungs
Gravitation und Himmelsmechanik	Interplanetare Übergangsbahnen (Hohmann-Bahnen)
Energie- und Impulserhaltung	Swingby-Manöver von Satelliten

Tabelle 1: Inhaltliche Gliederung und Kontexte für eine Vorlesung „Mechanik“

Lerninhalte kann dabei auf vorher in einem anderen Kontext erarbeitetes Wissen zurückgegriffen werden.

Eine Schwierigkeit ist unvermeidlich: Das Lernen in authentischen Lernsituationen ist nicht einfacher, sondern schwieriger als das Lernen der schon „destillierten“ Lerninhalte des traditionellen Wegs. Die Gegenstände des wirklichen Lebens sind eben oft „sperrig“ und fügen sich nicht zwanglos in die Struktur der physikalischen Begrifflichkeiten ein. Hierzu sind drei Bemerkungen zu machen:

1. Besondere Sorgfalt bei der Auswahl der Kontexte ist geboten. Sie sollen so beschaffen sein, dass ein einzelner physikalischer Inhalt sich in dem zu Grunde gelegten Kontext besonders erschließt (z. B. schräger Wurf beim Weitsprung, Trägheitsgesetz beim Thema Auffahrunfall/Sicherheitsgurt).

2. Ein vielfach betontes Anliegen des Physikunterrichts ist das Erlernen der Fähigkeit zur Modellbildung und des reflektierten Umgangs mit Modellen. Beim Lernen in Kontexten ergibt sich die Notwendigkeit dazu auf natürliche Weise. Ohne Modellbildung sind die Probleme (wegen ihres sperrigen Charakters) einer physikalischen Analyse kaum zugänglich. Dieses „Zähmen der Probleme“ durch Modellbildung ist aber auch ganz charakteristisch für die Vorgehensweise von Physikern im „echten Leben“.

3. Das Einarbeiten in die Kontexte, die dazu erforderlichen narrativen Elemente, die Modellbildung und die inhärente Komplexität authentischer Probleme machen das hier beschriebene Vorgehen natürlich sehr zeitintensiv. Das bedeutet: Es muss eine Auswahl sorgfältig zu behandelnder Lerninhalte getroffen werden, anderes wird dafür vernachlässigt. Die Forderung nach exemplarischem Lernen wird seit sehr langer Zeit erhoben; selten wird sie befolgt. Lernen in Kontexten macht das exemplarische Lernen zu einer Notwendigkeit.

Ein recht geglücktes Beispiel für ein solches Konzept ist das Buch von Bloomfield [7], der einen solchen Ansatz seit vielen Jahren verfolgt. Seine an Nebenfächler gerichteten Vorlesungen weisen allerdings für deutsche Verhältnisse ein relativ niedriges physikalisches Niveau auf.

5. Beispiel: Weitsprung

Um die Vorgehensweise beim hier vorgeschlagenen Zugang zu illustrieren und mit Leben zu erfüllen, ist nachstehend ein Beispiel abgedruckt. Es handelt sich um das schon oben angesprochene Kapitel „Schräger Wurf / Weitsprung“, dessen Text leicht gekürzt wurde:

Kommen wir zu einer weiteren Sportart, deren physikalische Analyse lohnend ist: zum Weitsprung in der Leichtathletik. Das Ziel der Disziplin ist leicht formuliert: anlaufen, kurz vor dem Absprungbalken abspringen und in möglichst großer Entfernung dahinter in der Sandgrube wieder zu landen. Das hört sich einfach an, aber zu einem guten Weitsprung gehört viel Technik, Koordination und Schnelligkeit.

Aus Erfahrung wissen Weitspringer, dass ein möglichst schneller Anlauf wichtig ist. Nur sehr gute Sprinter haben Chancen auf große Weiten. Weltklassenspringer erreichen kurz vor dem Absprung Geschwindigkeiten von etwa 10 m/s – damit hätten sie auch beim 100 m-Lauf gute Chancen.

Die Kunst beim Weitsprung besteht darin, die große Anlaufgeschwindigkeit beim Absprung möglichst beizubehalten und noch dazu eine große Sprunghöhe zu erzielen. Flache Sprünge sind keine weiten Sprünge. Es ist aber nicht einfach, einen großen Absprungwinkel zu erreichen, denn mit einem einzigen Schritt muss der Körper sehr stark nach oben beschleunigt werden. Die Sportler haben dafür eine besondere Anlauftechnik entwickelt (die letzten drei Schritte im Rhythmus kurz-lang-kurz), wobei sie für einen möglichst hohen Sprung sogar eine Verringerung der Horizontalgeschwindigkeit in Kauf nehmen.

Nachdem der Weitspringer einmal abgesprungen ist, steht die Flugbahn des Körperschwerpunkts unwiderruflich fest (Abb. 1). Der Sportler kann nichts tun, um sie zu verändern (nach dem 2. Newtonschen Gesetz, das wir in Kürze behandeln werden, müssten dazu externe Kräfte auf seinen Körper wirken – in der Flugphase wirkt aber nur die Schwerkraft).

An welcher Stelle der Körperschwerpunkt in der Sandgrube aufkommt, ist durch die Flugbahn ein-

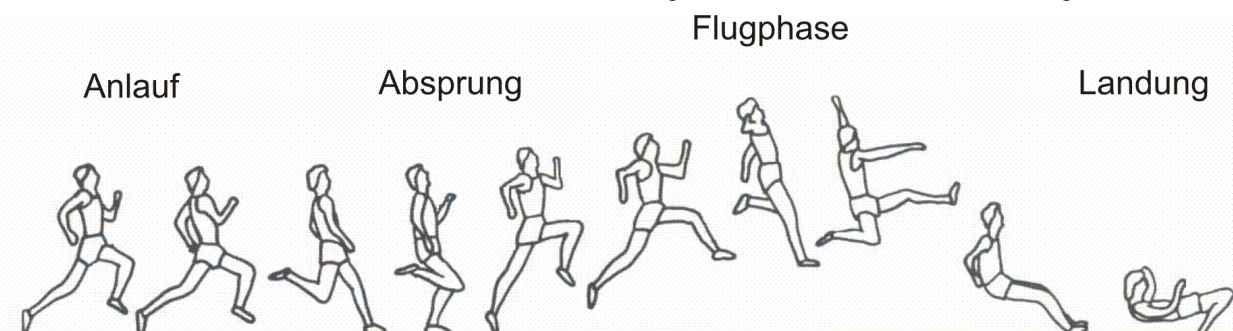


Abb. 1: Phasen des Weitsprungs

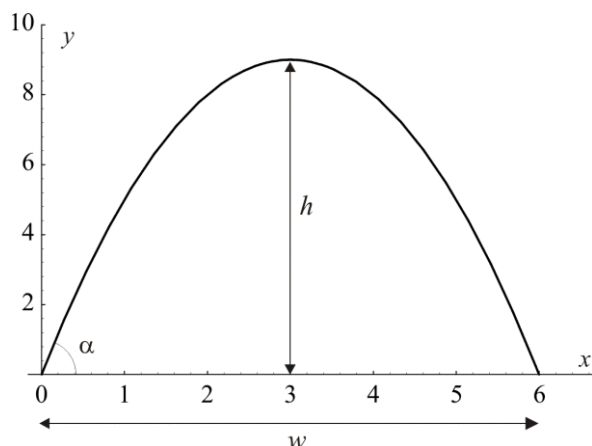


Abb. 2: Schräger Wurf

deutig bestimmt. Trotzdem ist die Landung ein wichtiger Bestandteil des Sprungs. Denn für die Wertung zählt nicht der Körperschwerpunkt, sondern derjenige Körperteil, der im Sand den entscheidenden Abdruck hinterlässt. Der Weitspringer muss also im Flug seine Gliedmaßen so ordnen, dass sie möglichst weit vorn aufkommen.

Die Bewegungen, die ein Weitspringer während des Sprungs ausführt (und die Namen wie Hangsprung- oder Laufsprungtechnik bekommen haben) beeinflussen also gar nicht den Sprung selbst, sondern dienen zur Vorbereitung der Landung. Sie sorgen dafür, dass der Springer so landet, dass die bei der Landung „verschenkte“ Weite möglichst gering bleibt.

Schräger Wurf

Um den Weitsprung physikalisch beschreiben zu können, müssen wir zunächst etwas allgemeiner auf eine Bewegungsform eingehen, die dabei die entscheidende Rolle spielt: der sogenannte „schräge Wurf“.

Schon der Name sagt aus, worum es beim schrägen Wurf geht: Ein Körper wird unter einem Winkel α zur Horizontalen abgeworfen und bewegt sich unter dem Einfluss der Schwerkraft, bis er wieder landet (Abb. 2). Im Gegensatz zu den vorher betrachteten Beispielen handelt es sich hierbei um eine zweidimensionale Bewegung. Das bedeutet, dass man nun zwei Koordinaten, die momentane Weite $x(t)$ und die momentane Höhe $y(t)$, angeben muss, um die Position des geworfenen Körpers anzugeben. In Abb. 2 ist auch kein Zeit-Weg-Diagramm dargestellt, wie man auf den ersten Blick leicht vermutet, sondern die Bahnkurve des Körpers in der x - y -Ebene, die er während der Bewegung durchläuft. Im Fall des schrägen Wurfs hat die Bahnkurve die Gestalt einer Parabel, der bekannten Wurfparabel: Der geworfene Körper steigt an, erreicht in der Höhe h seinen höchsten Punkt und trifft nach der Wurfweite w wieder auf dem Erdboden auf.

Die mathematische Beschreibung des schrägen Wurfs ist einfacher als man meinen könnte. Die Bewegung in x -Richtung verläuft nämlich völlig unabhängig von der in y -Richtung und umgekehrt, so dass wir beide einzeln betrachten können.

In x -Richtung folgt der Körper einfach dem Trägheitsgesetz: Es wirken keine Kräfte in dieser Richtung, also ändert sich seine Geschwindigkeit nicht. Er behält seine Anfangsgeschwindigkeit v_{x0} bei, ungestört vom Auf- und Absteigen in y -Richtung.

In y -Richtung bewegt sich der Körper unter dem Einfluss der Schwerkraft. Die resultierende Aufwärts- und wieder Abwärtsbewegung ist aber auch nichts Neues: Es ist nichts anderes als der freie Fall, die gleichmäßig beschleunigte Bewegung mit der Beschleunigung $-g$.

Die zweidimensionale Bewegung beim schrägen Wurf setzt sich demnach aus zwei einfachen eindimensionalen Bewegungsformen zusammen: gleichförmige Bewegung in x -Richtung und gleichmäßig beschleunigte Bewegung in y -Richtung. Das Zeit-Weg-Gesetz lautet entsprechend.

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0 + v_{x0} t, \\ y(t) &= y_0 + v_{y0} t - \frac{1}{2} g t^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Der Zusammenhang zwischen Betrag $|\vec{v}_0|$, Abwurfwinkel α und den beiden Komponenten v_{0x} und v_{0y} ist:

$$\begin{aligned} v_{0x} &= |\vec{v}_0| \cos \alpha, \\ v_{0y} &= |\vec{v}_0| \sin \alpha. \end{aligned} \quad (2)$$

Was uns am schrägen Wurf interessiert, ist seine Weite w und Höhe h (beide sind in Abb. 2 eingezeichnet). Mit geringem mathematischem Aufwand kann man beide Größen aus Gleichung (1) ermitteln. Man findet:

$$\text{Wurfweite: } w = \frac{|\vec{v}_0|^2 \sin 2\alpha}{g}, \quad (3)$$

$$\text{Wurfhöhe: } h = \frac{v_{0y}^2}{2g} = \frac{|\vec{v}_0|^2 \sin^2 \alpha}{2g}. \quad (4)$$

Weitsprung als schräger Wurf

Was zeichnet einen guten Sprung aus? Wie sieht der „ideale“ Sprung aus, auf den man im Training hinarbeiten sollte? Wie weit kann ein Mensch überhaupt springen? Jahrzehntlang konnte der „Jahrhundert-sprung“ von Bob Beamon (8,90 m, 1968) nicht überboten werden. Im Jahr 1991 gelang Mike Powell ein noch weiterer Sprung, und seitdem liegt der Weltrekord liegt bei 8,95 m. Um wie viel kann diese Weite noch gesteigert werden? Mit physikalischen Mitteln können wir dieser Frage (jedenfalls in Teilaspekten) nachgehen.

Ähnlich wie beim schrägen Wurf folgt der Körperschwerpunkt des Springers einer Wurfparabel. Für die Form der Bahn ist unmaßgeblich, dass der Springer im Gegensatz zu einem geworfenen Ball aktiv abspringt. Was zählt, sind die Kräfte, die während der Flugphase auf ihn wirken, und beim Ball wie beim Springer wirkt ausschließlich die Schwerkraft (wenn man vom Luftwiderstand absieht). Die Bewegungen des Springers während der Flugphase beeinflussen die Bahn des Körperschwerpunkts nicht.

Um die ersten qualitativen Erkenntnisse zu gewinnen, betrachten wir Gleichung für die Weite beim schrägen Wurf. Sie hängt von den beiden Parametern Abwurfgeschwindigkeit $|\vec{v}_0|$ und Abwurfwinkel α ab. Wir sehen schon hier, dass für den Weitsprung ein schneller Anlauf besonders wichtig ist, denn die Weite hängt quadratisch von der Abwurfgeschwindigkeit ab. Die Weite vervierfacht sich, wenn die Geschwindigkeit verdoppelt wird.

Nach Gleichung (3) läge der optimale Absprungwinkel bei 45° , denn für diesen Wert hat die Weite als Funktion von α ihr Maximum. Tatsache ist allerdings, dass kein Springer einen so steilen Absprungwinkel erreicht. Selbst die besten Weitspringer, die ihre Sprungtechnik über Jahre hinweg optimiert haben, erreichen nur Absprungwinkel zwischen 20° und 30° .

Grund dafür ist, dass bei einem Absprungwinkel von 45° die Vertikal- und die Horizontalkomponente der Absprunggeschwindigkeit gleich sein müssten (vgl. Gl. (2)). Die Horizontalkomponente kann aber durch einen langen Anlauf aufgebaut werden (genau genommen ist das der einzige Zweck des Anlaufs), während die Vertikalkomponente durch einen einzigen Schritt beim Absprung erzielt werden muss. Obwohl die Weitspringer – wie oben erwähnt – für einen steileren Absprungwinkel sogar etwas von ihrer Horizontalgeschwindigkeit opfern, wird der optimale Absprungwinkel bei weitem nicht erreicht. Wir werden das bei unseren Überlegungen zur maximalen Sprungweite berücksichtigen müssen.

Physikalisches Modell des Weitsprungs

Versuchen wir nun, ein mathematisch handhabbares und doch möglichst realitätsnahes Modell eines Weitsprungs zu entwerfen. Die erste Modellannahme haben wir bereits vorgenommen: Statt des ganzen Springers betrachten wir nur seinen Körper-

schwerpunkt (der beim Menschen etwas über Hüfthöhe liegt). Beim Absprung und während des Flugs bereitet diese Annahme keine Probleme. Die Landung jedoch ist ein komplizierter Vorgang, dessen Details wir nicht modellieren können. In unserer mathematischen Beschreibung können wir nur den Landepunkt des Körperschwerpunkts berechnen. Unsere Abschätzung der Sprungweite sollte unter dieser Vereinfachung aber nicht allzu sehr leiden, denn bei einem guten Sprung muss der Springer darauf hinwirken, dass das letzte Körperteil so wenig wie möglich hinter dem Schwerpunkt landet. Alles andere ist „verschenkte Weite“.

Um die Flugphase zu modellieren, ist es auf den ersten Blick naheliegend, den Weitsprung einfach als schrägen Wurf des Körperschwerpunkts zu betrachten. Das wird aber nicht ausreichen, denn wie man in Abb. 3 erkennen kann, ist die Bahnkurve des Springers nicht symmetrisch. Er springt aufrecht ab und landet im Sitzen oder Liegen. Wir können daher den Weitsprung nicht einfach als einen symmetrischen schrägen Wurf beschreiben, sondern müssen uns einen verfeinerten Ansatz einfallen lassen.

Eine elegante Lösung besteht darin, den unsymmetrischen schrägen Wurf gedanklich in zwei Hälften zu zerlegen und ihn sich aus zwei zusammengesetzten halben Wurfparabeln vorzustellen (Abb. 4). Wir können dann zur Beschreibung der beiden unterschiedlichen halben Parabeln jeweils die Gleichungen für den schrägen Wurf verwenden, und die Gesamtweite des Sprungs ist die Summe der beiden Teilweiten w_1 und w_2 .

Die erste Hälfte des Sprungs ist einfach zu beschreiben. Wir setzen wir den Absprungwinkel α und die Absprunggeschwindigkeit $|\vec{v}_0|$ in die Formel (3) für die Wurfweite ein. Wir wählen $\alpha = 25^\circ$ und $|\vec{v}_0| = 10$ m/s. Mit diesen Werten erhalten wir:

$$w_1 = \frac{1}{2} \frac{|\vec{v}_0|^2 \sin 2\alpha}{g} = 3,90 \text{ m.} \quad (5)$$

Mit dem Faktor $\frac{1}{2}$ berücksichtigen wir, dass wir nur die Hälfte der Wurfparabel betrachten.

Bei der zweiten Hälfte des Sprungs wird es schwieriger. Der „Landewinkel“ α_2 ist ein anderer als α , und auch die Landegeschwindigkeit $|\vec{v}_2|$ hat einen anderen Wert als die Absprunggeschwindigkeit. Wir müssen zwei Gleichungen für die beiden unbekann-

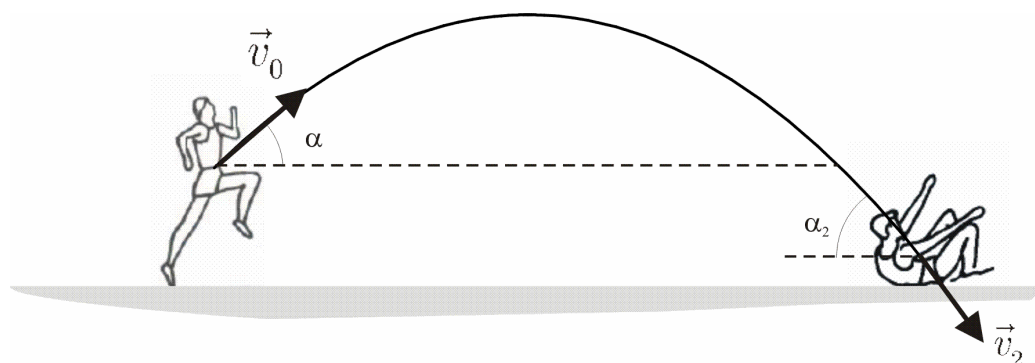


Abb. 3: Bahnkurve beim Weitsprung

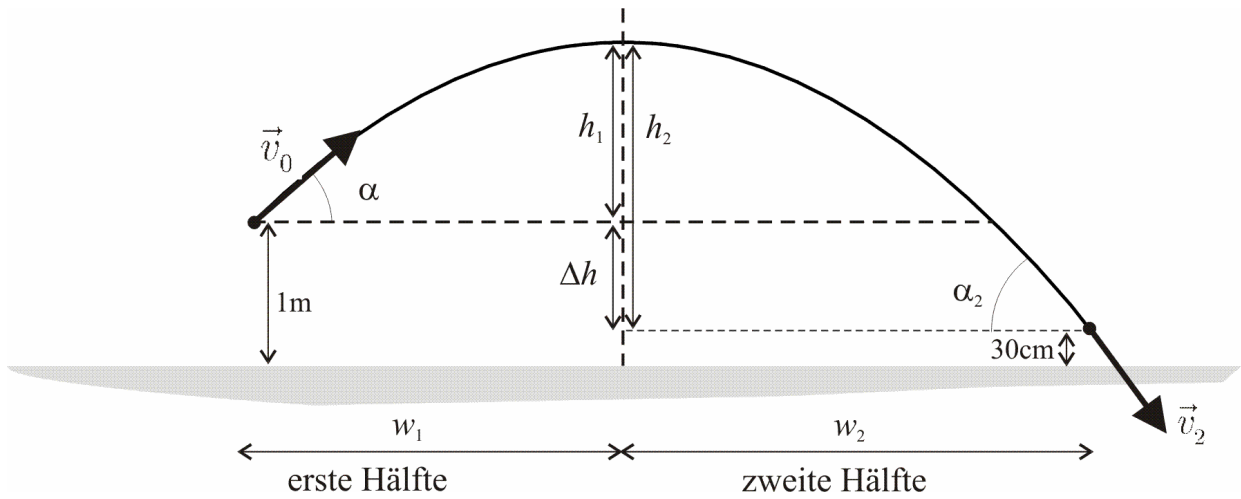


Abb. 4: Modellieren des Weitsprungs mit zwei halben Wurfparabeln

ten Größen $|\vec{v}_2|$ und α_2 suchen, damit wir sie aus bekannten Größen berechnen und in Formel (3) einsetzen können.

Dazu stellen wir zuerst fest, dass die Horizontalkomponente der Geschwindigkeit $|\vec{v}| \cos \alpha$ während des gesamten Sprungs konstant bleibt (wir erinnern uns, dass der Springer sich nach dem Trägheitsgesetz in horizontaler Richtung mit konstanter Geschwindigkeit bewegt). Insbesondere gilt dies auch für die Horizontalkomponente von Absprunggeschwindigkeit \vec{v}_0 und Landegeschwindigkeit $|\vec{v}_2|$. Wir erhalten so die erste der beiden gesuchten Gleichungen (vgl.(2)):

$$|\vec{v}_0| \cos \alpha = |\vec{v}_2| \cos \alpha_2. \quad (6)$$

Die zweite Gleichung ergibt sich aus der Geometrie des Sprungs. Der Körperschwerpunkt befindet sich beim Absprung in einer Höhe von ungefähr einem Meter; im Moment des Aufkommens liegt er niedriger. Die Höhendifferenz Δh beträgt etwa 70 cm (Abb. 2.9). Die Höhen der beiden halben Wurfparabeln sind daher folgendermaßen verknüpft:

$$h_2 = h_1 + \Delta h$$

Einsetzen der Wurfhöhen aus Gleichung (4) ergibt:

$$\frac{|\vec{v}_2|^2 \sin^2 \alpha_2}{2g} = \frac{|\vec{v}_0|^2 \sin^2 \alpha}{2g} + \Delta h. \quad (7)$$

Durch Multiplizieren der Gleichung auf beiden Seiten mit $2g$ erhalten wir:

$$|\vec{v}_2|^2 \sin^2 \alpha_2 = |\vec{v}_0|^2 \sin^2 \alpha + 2g \Delta h. \quad (8)$$

Nun addieren wir auf beiden Seiten $|\vec{v}_0|^2 \cos^2 \alpha$ und benutzen die Relation (6):

$$\begin{aligned} |\vec{v}_2|^2 \sin^2 \alpha_2 + \cos^2 \alpha_2 \\ = |\vec{v}_0|^2 \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha + 2g \Delta h. \end{aligned} \quad (9)$$

Der Ausdruck in Klammern ist aber auf beiden Seiten gleich 1, so dass sich ergibt:

$$|\vec{v}_2|^2 = |\vec{v}_0|^2 + 2g \Delta h. \quad (10)$$

Durch Wurzelziehen erhalten wir die Bestimmungsgleichung für $|\vec{v}_2|$:

$$|\vec{v}_2| = \sqrt{|\vec{v}_0|^2 + 2g \Delta h}. \quad (11)$$

Mit den Gleichungen (6) und (11) liegen nun die beiden Relationen vor, mit denen wir die unbekanntenen Größen $|\vec{v}_2|$ und α_2 berechnen können (die gleichen Relationen hätten wir übrigens durch Anwenden von Energie- und Impulssatz statt wie hier geometrisch gewinnen können).

Der Rest ist einfach: Zunächst ermitteln wir die Parameter für die zweite Sprunghälfte aus den als bekannt vorausgesetzten Werten $\alpha = 25^\circ$ und $|\vec{v}_0| = 10 \text{ m/s}$:

$$\alpha_2 = 31,8^\circ \quad \text{und} \quad |\vec{v}_2| = 10,66 \text{ m/s}.$$

Durch Einsetzen dieser Werte in (3) erhalten wir die Weite der zweiten Sprunghälfte (wobei wir den Faktor $\frac{1}{2}$ für die halbe Parabel nicht vergessen):

$$w_2 = \frac{1}{2} \frac{|\vec{v}_2|^2 \sin 2\alpha_2}{g} = 5,18 \text{ m}. \quad (12)$$

Mit diesem Ergebnis können wir zum eigentlichen Zweck unserer Betrachtung zurückkommen: Der Berechnung der Gesamtweite w des Sprungs aus den beiden Teilweiten w_1 und w_2 :

$$w = w_1 + w_2 = 3,90 \text{ m} + 5,18 \text{ m} = 9,08 \text{ m}.$$

Dieses Ergebnis liegt bemerkenswert nahe am gegenwärtigen Weltrekord von 8,95 m. Unser Modell und die Annahmen für die beiden Parameter α und $|\vec{v}_0|$ scheinen also der Realität durchaus recht nahe zu kommen. Man sieht aber auch, dass die Spitzensportler ihre Technik so weit entwickelt haben, dass sie mit ihren besten Sprüngen das unter den gegebenen Bedingungen physikalisch Mögliche fast optimal ausschöpfen.

Wie weit lässt sich der Weitsprungweltrekord noch steigern? Größere Weiten lassen sich durch eine höhere Absprunggeschwindigkeit und einen größeren Absprungwinkel erzielen. In Abb. 5 ist die Sprungweite für verschiedene Absprunggeschwin-

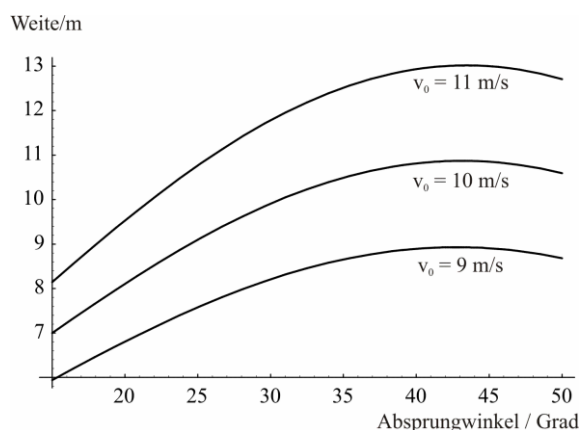


Abb. 5: Maximale Weite beim Weitsprung als Funktion der Geschwindigkeit und des Absprungwinkels

digkeiten und Absprungwinkel gezeigt. Der optimale Absprungwinkel liegt in der Nähe von 45° , bei etwa 42° (dass es nicht genau 45° sind liegt am unsymmetrischen Verlauf des Sprungs). Das bedeutet: Die üblichen flachen Absprungwinkel sind alles andere als optimal. Wie aber schon weiter oben diskutiert wurde, sind steilere Winkel aus physiologischen Gründen wohl kaum zu erreichen. Der eher flache Verlauf der Kurven in Abb. 5 zeigt aber auch, dass die Abhängigkeit der Weite vom Winkel nicht allzu stark ist: Eine Verbesserung beim Absprungwinkel führt nur zu relativ geringfügigen Verbesserungen in der Weite.

Anders sieht es bei der Abprunggeschwindigkeit aus: Wie wir aus der quadratischen Abhängigkeit der Wurfweite von der Geschwindigkeit schon vermutet hatten, führt eine Erhöhung der Geschwindigkeit zu einer deutlichen Verbesserung bei der Weite. Man sieht aber auch, dass man mit etwa 10 m/s schon Weltklasse-Geschwindigkeiten braucht, um auf wirklich gute Weiten zu kommen. Nur erstklassige Sprinter können den Weitsprung-Weltrekord gefährden.

Um mit aller Vorsicht eine Prognose für den „endgültigen Weitsprung-Weltrekord“ zu wagen, gehen wir von unveränderten Absprungwinkeln aus, setzen aber die höchsten bisher gemessenen Momentangeschwindigkeiten beim Sprint an, die bei etwa 11 m/s liegen. Wenn es durch Verbesserungen der Technik gelänge, eine solche Geschwindigkeit beim Absprung beizubehalten, könnten die Springer Weiten von bis zu zehn Metern erzielen.

6. Literatur

- [1] F. E. Weinert, Lehrerkompetenz als Schlüssel der inneren Schulreform, Schulreport 2/98, S. 24 (1998).
- [2] H. Muckenfuß, Lernen im sinnstiftenden Kontext, Cornelsen, Berlin (1995).

[3] Staatsinstitut für Schulpädagogik und Bildungsforschung München (ISB): Methodiküberlegungen für den mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht: Sinnstiftende Kontexte, München (2000)

[4] R. Berger: Moderne bildgebende Verfahren der medizinischen Diagnostik - ein Weg zu interessanterem Physikunterricht, Logos-Verlag Berlin (2000)

[5] Reinmann-Rothmeier und Mandl, Unterrichten und Lernumgebungen gestalten. - In: A. Krapp, B. Weidenmann (Hrsg.): Pädagogische Psychologie. 4. Aufl., Beltz, Weinheim(2001)

[6] P. Häußler et al., Perspektiven für die Unterrichtspraxis, IPN, Kiel (1998), S. 166

[7] L. Bloomfield, How things work – the physics of everyday life, 2nd Ed., Wiley, New York (2001).