

Bewegungen des eigenen Körpers – Möglichkeiten der Messwerterfassung im Vergleich

Martin Weidt, Thomas Wilhelm

Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Am Hubland, 97074 Würzburg
martin.weidt@physik.uni-wuerzburg.de, thomas.wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de

Kurzfassung

Um dem sinkenden Interesse vieler Schüler am Fach Physik entgegen zu wirken, wurde immer wieder gefordert, im Unterricht stärker an Alltagserfahrungen von Schülern anzuknüpfen und einen Bezug zum menschlichen Körper herzustellen. Durch das Behandeln von alltäglichen Bewegungen, wie z.B. Gehen, Laufen, Treppensteigen oder einfachen Sprüngen, kann diesen Forderungen Rechnung getragen werden. Die Erfassung der physikalisch relevanten Größen entsprechender Bewegungen der Schüler kann heute durch verschieden computerbasierte Messwerterfassungsmöglichkeiten erfolgen, wie Kraftmessplatte, Funk-3D-Beschleunigungssensoren oder Videoanalyse. Es werden Vor- und Nachteile der verschiedenen Messwerterfassungsmöglichkeiten bei diesem Thema herausgearbeitet sowie Beispiele solcher Messungen vorgestellt.

1. Gründe für die Behandlung von Bewegungen des eigenen Körpers

Die IPN-Interessenstudie [1] zeigt, dass das Interesse am Fach Physik (Fachinteresse) bei Jungen und Mädchen sehr unterschiedlich ausfällt. Vergleicht man das Fachinteresse von Physik, Deutsch, Kunst und Fremdsprachen, so stufen die Mädchen Physik am uninteressantesten, die Jungen Physik am interessantesten ein. Bei der Suche nach den Gründen muss das Interesse an den Inhalten (Sachinteresse) analysiert werden. Neben weiteren Punkten wird dabei der „Bezug zum menschlichen Körper“ und die „Anbindung an alltägliche Erfahrungen“ als sehr förderlich für das Interesse der Mädchen angegeben. Beides ist bei der Betrachtung von Bewegungen des eigenen Körpers, wie z.B. Gehen, Laufen, Treppensteigen oder einfachen Sprüngen gegeben. Die einseitige Fokussierung auf das Interesse der Mädchen wirkt sich dabei aber nicht negativ auf die Jungen aus, da für diese das Fach und seine Inhalte genauso interessant bleiben, auch wenn sich die behandelten Beispiele ändern.

Da die Schüler diese Bewegungen aus ihrem Alltag kennen und sie selbst ohne Probleme ausführen können, eröffnet sich mit diesen Versuchen auch eine Möglichkeit, die Schüler eigenständig experimentieren zu lassen. Zwar benötigen die Schüler zu Beginn eine Einführung in die verwendeten Messgeräte und Programme, im Anschluss kann dann aber jeder selbstständig eigene Aufnahmen analysieren.

Auch der häufigen Forderung von Seiten der Pädagogik oder den Fachdidaktiken [2] sowie von der Bildungspolitik (Bund-Länder-Kommission 1997) nach mehr fächerübergreifendem Unterricht kann in diesem Themenfeld sehr gut Rechnung getragen

werden. So ist alleine aufgrund des Themas „Bewegungen des eigenen Körpers“ ein übergreifender Unterricht mit den Fächern Biologie und Sport sinnvoll. Fragen zum Aufbau des menschlichen Körpers, zur Funktionsweise und Energiebereitstellung der Muskulatur, zur Gestaltung des „richtigen“ Laufstils sowie zu den Grenzen der menschlichen Leistungsfähigkeit ergeben sich aus der Themenstellung und erfordern entweder die gute Vorbereitung einer Lehrkraft oder eine funktionierende Zusammenarbeit des Lehrerkollegiums. Die Nutzung neuer computergestützter Messsysteme schult zudem den zweckgebundenen Umgang mit dem PC. Auch hier wäre ein fächerübergreifender Unterricht mit der Informatik wünschenswert, wenn z.B. Fragen bzgl. der Funktionsweise der Datenerhebung und -verarbeitung aufkommen.

Im Folgenden werden drei verschiedene computergestützte Messmöglichkeiten vorgestellt und einige Vor- und Nachteile erläutert. Es handelt sich hierbei um eine kleine Auswahl aus den vielfältigen Analysemethoden der Biomechanik. Auch die gewählten Geräte und Programme stellen nur eine Stichprobe aus der Vielzahl von Möglichkeiten dar.

2. Videoanalyse

2.1. Möglichkeiten der Videoanalyse

Da die gewonnenen Daten bei der Videoanalyse gleichzeitig mit dem Video der Bewegung gezeigt werden können, eignet sich diese Methode besonders gut für die Schule. Auch Schüler, die Schwierigkeiten bei der Deutung von Graphen haben, können aufgrund der Darstellungsmöglichkeiten im Video qualitative Aussagen über Größen - wie Geschwindigkeit und Beschleunigung - abgeben.

Aus den vielen Analyseprogrammen wurde das Programm *measure dynamics* von PHYWE (Version 1.4 f build 390) [3] exemplarisch ausgewählt, um die Möglichkeiten dieser Messwerterfassung aufzuzeigen. Hiermit können auch „größere“ Videos – z.B. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit 210 Bildern pro Sekunde, welche sich vor allem bei schnelleren Bewegungen anbieten – zeitsparend anhand der „automatischen Analyse“ ausgewertet werden [4]. Dabei ermittelt das Programm die Ortskoordinaten zweidimensional von Punkten, welche zuvor im Video markiert wurden und berechnet daraus weitere Größen, wie z.B. Geschwindigkeit und Beschleunigung. Diese Daten können anschließend auf vielfältige Weise dargestellt werden:

- Mittels „**Filter**“ können - direkt ins Video - Punkte, Linien, Säulen oder Vektoren eingezeichnet werden, welche die physikalischen Größen darstellen (vgl. Abb. 1) [5]. Auch nachträgliche Bearbeitungen des Videos (wie z.B. Spiegeln oder Änderungen der Helligkeit) sind möglich.

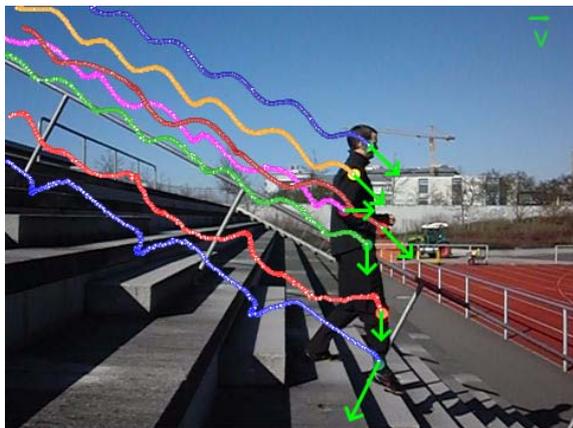


Abb. 1: Treppensteigen mit Ortlinie und Geschwindigkeitspfeilen

- Parallel zum Abspielen des Videos, d.h. gleichzeitig, kann ein **Diagramm** (z.B. t - x -, t - v - oder t - a -Diagramm) erstellt werden, wobei der neu hinzugefügte Diagrammpunkt stets der momentanen Situation im Video entspricht.
- **Serien-** (vgl. Abb. 8) oder **Stroboskopbilder** (vgl. Abb. 2) des Bewegungsablaufes können erstellt werden, um den zeitlichen Verlauf „auf einen Blick“ erfassen zu können.

Trotz einer relativ genauen Ortsbestimmung der Körperpunkte bei der „automatischen Analyse“ kommt es bei der Berechnung von Geschwindigkeits- und vor allem bei den Beschleunigungswerten zu problematischen Fehlern. Vor allem bei der Analyse von Hochgeschwindigkeitsvideos ist der Zeitabstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern sehr gering, was den Fehler in die Höhe treibt. Zwar kann die Schrittweite (und damit die Zeit zwischen zwei Videobildern) in der Videoanalysesoftware beliebig erhöht werden; dies hat aber zur Folge, dass nicht mehr alle Videobilder analysiert werden, was

dazu führt, dass die Feinheit der Bewegung nicht mehr vollständig erfasst wird (weil über zu große Zeitabstände gemittelt wird). Auch ist es für Schüler schwer nachvollziehbar, warum die Schrittweite erhöht werden muss bzw. warum dadurch „richtigere“ Beschleunigungswerte ermittelt werden.

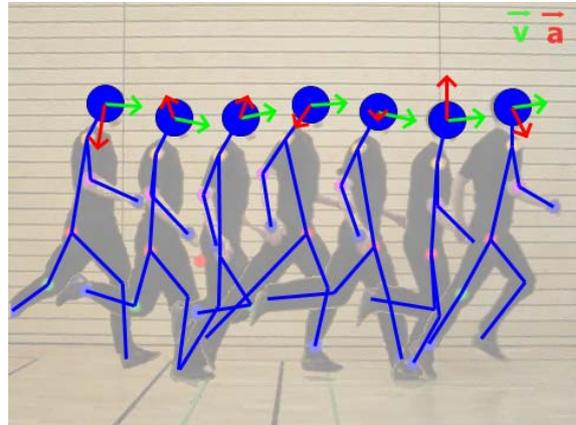


Abb. 2: Stroboskopbild zum Joggen mit Verbindungslinien und Pfeilen (in *measure dynamics* aus einem Video erzeugt)

2.2. Beispiele für Videoanalysen von Körperbewegungen

Abb. 1 zeigt ein Bild aus einem Video, in dem eine Person eine Treppe hinabsteigt. An die Person wurden sieben farbige Punkte befestigt, die dann im Videoanalyseprogramm verfolgt werden können. Die Bahnkurve dieser Punkte wurde farblich ins Video eingezeichnet. Außerdem wird am aktuellen Punkt die Geschwindigkeit als Pfeil eingezeichnet. Man sieht in diesem Video zum Treppensteigen (als Zusatzdatei anbei), dass sich die Geschwindigkeit des Kopfes in Betrag und Richtung nur wenig ändert, während die Geschwindigkeit des Fußes in Betrag und Richtung stark variiert. Von der Hüfte aufwärts bewegen sich die Körperpunkte mit annähernd gleicher Geschwindigkeit. Sie werden von den Beinen mittransportiert, wobei diese aber einen ganz anderen Geschwindigkeitsverlauf besitzen.

Abb. 2 und Abb. 3 zeigen eine joggende Person, an die ebenfalls farbige Punkte angebracht wurden. In Abb. 2 wurden die neun verfolgten Punkte durch Linien miteinander verbunden, so dass ein Strichmännchen entsteht, welches sich im Video bewegt. Das Video wurde mit einem Filter aufgehellt und daraus das Stroboskopbild erzeugt.

Man sieht in diesem Video, dass die horizontale Komponente der Geschwindigkeit des Kopfes fast konstant ist, während der Kopf in vertikaler Richtung eine Schwingung vollführt. Man könnte deshalb eine eindimensionale Schwingung auch an der Höhe des Kopfes statt an einem Federpendel betrachten.

Die Füße haben dagegen beim Bodenkontakt für kurze Zeit die Geschwindigkeit null und dazwischen eine größere Geschwindigkeit als der Kopf. Das

bedeutet, sie müssen langsamer und schneller werden. Man sieht, dass beim Langsamerwerden die Beschleunigung eine Komponente gegen die Geschwindigkeit hat und beim Schnellerwerden eine Komponente in Geschwindigkeitsrichtung (Abb. 3). Hieran kann das Verständnis für die Richtung der Größen behandelt werden.

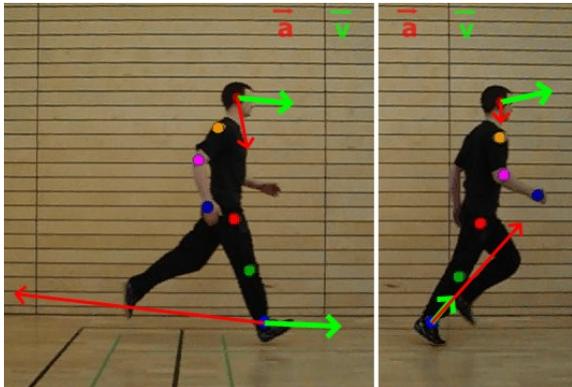


Abb. 3: Joggen mit Geschwindigkeits- und Beschleunigungsfeilen

2.3. Darstellung von Sensordaten in Videos

Durch den einfachen Ex- und Import von Datentabellen in *measure dynamics* kann man das Problem der relativ großen Fehler bei der Ermittlung der Beschleunigungswerte umgehen. Die Daten der folgenden beiden Messmöglichkeiten, gewonnen mit 3D Beschleunigungssensoren oder einer Kraftmessplatte, können in einem Video über die *measure dynamics*-Filter angezeigt werden. Dazu muss man eine Bewegung gleichzeitig filmen und mit einem entsprechenden Sensor messen und danach die Messdaten in das Videoanalyseprogramm importieren, wo sie im Video auf vielfältige Weise dargestellt werden können. Das heißt, hier wird das Videoanalyseprogramm nur als Darstellungsprogramm der Messwerte verwendet. Dies erfordert zwar etwas Zeit, führt aber auch zu einer didaktisch geeigneteren Darstellung der Messdaten der Sensoren.

3. Beschleunigungssensoren

3.1. Möglichkeiten von Beschleunigungssensoren

Mittels Beschleunigungssensoren kann die Beschleunigung einzelner Körperteile bei einer Bewegung auch direkt und nicht über den Umweg der zweifachen Ableitung des Ortes (wie bei der Videoanalyse) bestimmt werden [6]. Am weitesten verbreitet sind dabei die seismischen Beschleunigungssensoren, bei denen die Auslenkung einer Probemasse bestimmt wird, was als Beschleunigung bzw. Kraft interpretiert wird. D.h. es wird die Trägheitskraft ermittelt, welche die bewegliche Probemasse im mitbewegten Bezugssystem des Sensors auslenkt. Die Auslenkung dieser Probemasse kann dabei auf verschiedene Weise ermittelt und in ein elektrisches Signal umgewandelt werden.

Der exemplarisch gewählte Sensor *Cobra4 Sensor-Unit Acceleration: 3D-Beschleunigung* [7] der Lehrmittelfirma PHYWE verwendet hierzu die kapazitive Methode, bei welcher durch die Auslenkung der Probemasse die Kapazität eines Kondensators geändert wird [8]. Um die Beschleunigungskomponente aller drei Raumrichtungen zu erhalten, sind dabei drei Probmassen paarweise orthogonal zueinander anzuordnen. Die Änderung der Kapazität des jeweiligen (Platten-)Kondensators ergibt nämlich nur eine eindimensionale Größe, welche der jeweiligen Auslenkung der Probemasse in diese Raumrichtung entspricht. Somit lässt sich nur in eine Dimension ein Zusammenhang zwischen der Beschleunigung in diese Raumrichtung und der Kapazität des Kondensators angeben. Der Sensor *Cobra4 Sensor-Unit Acceleration: 3D-Beschleunigung* kann mit dem *Cobra4 Wireless-Link* [9] (ebenfalls von PHYWE) gekoppelt werden, so dass die Messdaten des Sensors – ohne störende Kabel – an einen PC übertragen werden können, an welchen der *Cobra4 Wireless Manager* [10] zum Empfang der Daten angeschlossen ist. Insgesamt kann so mit bis zu 99 Sensoren gleichzeitig gemessen werden. Zur Messwerterfassung wird der Sensor an der jeweiligen Körperstelle befestigt (vgl. Abb. 4). Vor allem bei schnelleren Bewegungen ist die Funkübertragung von großer Bedeutung, da keine störenden Kabel auftreten.



Abb. 4: Befestigung des Sensors am Unterschenkel beim Gehen und Koordinatenachsen des Sensors

Am PC erfolgt die Aufnahme der Daten mit der Software *measure Cobra4* [11], in welcher sie als Tabelle oder Diagramm visualisiert werden können. Mathematische Auswertungsmöglichkeiten, wie z.B. Nullstellen, Extrema und Äquivalenzpunkte bestimmen, Integralberechnung, Steigung in einem Punkt ermitteln oder den Mittelwert angeben, stehen ebenso zur Verfügung wie die funktionale Weiterverrechnung der Daten zu neuen Größen. Auch ein Glätten der aufgezeichneten Messkurven ist möglich.

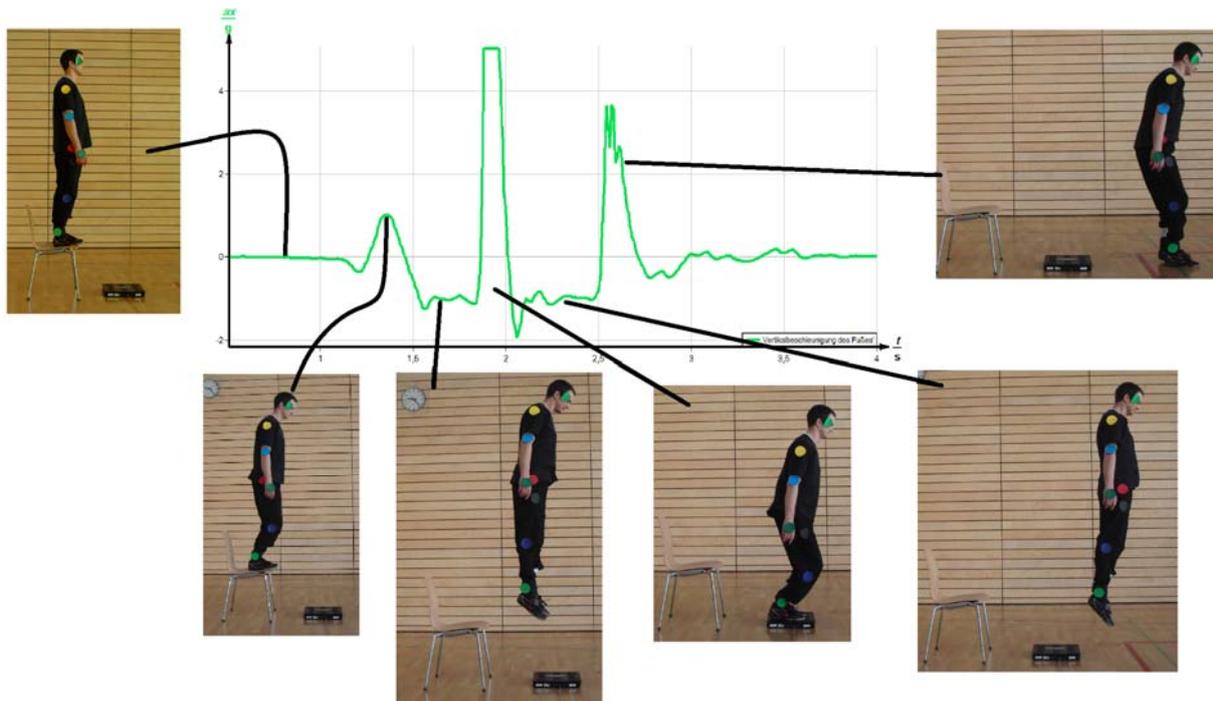


Abb. 5: Zuordnung bestimmter Kurvenabschnitte einer Beschleunigungsmessung mittels Bewegungsbilder beim Sprung vom Stuhl (Beginn in Ruhe, Werte über den Startwert sind Beschleunigungen des Körperschwerpunktes nach oben, Werte unter dem Startwert sind Beschleunigungen des Körperschwerpunktes nach unten).

Damit die aufgezeichneten Messwerte den verschiedenen Bewegungsphasen zugeordnet werden können, ist es sinnvoll, die Messkurven mit Bildern des Bewegungsablaufes zu versehen (vgl. Abb. 5). Auch ein Export der Tabellen in das Programm *measure dynamics* ist mit etwas Aufwand möglich. Hierzu muss neben dem Erstellen des Videos überlegt werden, welche Beschleunigungskomponente wegfällt (Reduzierung auf zwei Dimensionen), wie die Vorzeichen geändert werden müssen (je nach Ausrichtung des Sensors bei der Datenerhebung) und wie die Zeitachsen der beiden Messungen aufeinander abgestimmt werden können.

Bei der Aufnahme der Messdaten für das beigefügte Video zum Gehen mit einem Beschleunigungssensor gab der Sensor am Fuß die Beschleunigungskomponenten so aus, wie in Abb. 4 dargestellt. Bei der Reduzierung auf zwei Dimensionen fallen somit die y-Werte der Sensordaten weg, da dies die Bewegungsrichtung ist, die im Video bei einer seitlichen Aufnahme nicht analysiert werden kann. Bei der Übernahme der Beschleunigungsdaten in *measure dynamics* muss beachtet werden, dass die x-Werte der Beschleunigungsdaten, im Video in die y-Richtung zeigen und die z-Werte des Sensors der x-Komponente des Videoanalyseprogrammes entsprechen. Da die Aufnahme des Videos zu einem späteren Zeitpunkt gestartet wurde als die Datenaufzeichnung mit dem Funksensor, müssen die beiden Zeitachsen angeglichen werden. Da der Fußaufsatz im t-a-Diagramm einen besonders markanten Punkt darstellt und auch im Video gut zu erkennen ist, eignet er sich sehr gut zum Abgleich der Achsen. Beim

Kopieren der Beschleunigungswerte in die *measure dynamics* Tabelle wurde also darauf geachtet, dass der Fußaufsatz, welcher zum Zeitpunkt $t = 2,35$ s mit einem Beschleunigungswert von ca. 2 g erfolgte (vgl. Abb. 6) mit dem Zeitpunkt des Fußaufsatzes im Video überein stimmt.

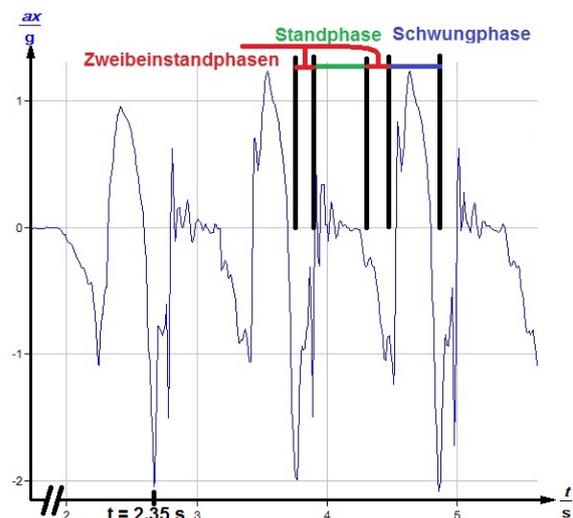


Abb. 6: t- a_x -Kurve des Fußes beim Gehen

Obwohl man mit Hilfe der Sensoren viel genauere Beschleunigungswerte als bei der Videoanalyse erhält, hat diese Methode einen Schwachpunkt. Neben den Beschleunigungen, die aufgrund der Muskelaktivität auftreten, wird auch immer die Erdbeschleunigung mit gemessen. Je nach Neigung des Sensors ist diese unterschiedlich auf die drei Komponenten des Beschleunigungsvektors verteilt.

Zwar ist es möglich, den Sensor in einer frei wählbaren Position auf null zu stellen und somit die Erdbeschleunigung zu unterdrücken. Wird jedoch der Sensor aus dieser Position verkippt, so erhält man doppelt falsche Werte, weil dann die Erdbeschleunigung in den anderen Komponenten gemessen wird, zugleich aber auch das Fehlen dieses Anteils in der Ursprungsposition mit umgekehrten Vorzeichen angezeigt wird.

Je nach Befestigung des Sensors am Körper kann es darüber hinaus noch zu Überlagerungsschwingungen des Sensors kommen. Vor allem beim Anbringen des Sensors in nicht-enganliegender Kleidung sind die Messdaten nur schwer reproduzierbar. Aber auch beim Befestigen des Sensors direkt auf der Haut mit Klebeband kann es vorkommen, dass diese beim Laufen (vor allem beim Fußaufsatz) mitschwingt, was bei der Betrachtung der Daten zu Verwirrung und sehr individuellen Messkurven führen kann. Vollkommen lassen sich diese Schwingungen allerdings nicht vermeiden.

3.2. Beispiel für Beschleunigungsmessung bei Körperbewegungen

Abb. 5 zeigt das Beispiel eines Prellsprunges, bei dem eine Person von einem Stuhl auf eine Kraftmessplatte springt und anschließend sofort einen zweiten Sprung auf den Boden ausführt. Am Fuß der Person wurde ein Beschleunigungssensor befestigt. Welches Vorzeichen seine Messwerte haben, hängt von der Orientierung des Sensors und von Einstellungen in der Software ab. In Abb. 5 ergeben Beschleunigungen nach oben positive Werte.

Zu Beginn ist die Person in Ruhe (Teilfoto 1). Da der Sensor zu Beginn sinnvollerweise auf null gestellt wurde, erhält man auch den Beschleunigungswert Null. Um vom Stuhl abspringen zu können, muss der Körper (nach leichtem in die Knie gehen) nach oben beschleunigt werden (Teilfoto 2, ca. 1 g). Dann erfolgt die Flugphase mit konstanter Erdbeschleunigung nach unten (Teilfoto 3). Beim Auftreffen und sofortigem, erneutem Abspringen gibt es eine sehr große Beschleunigung nach oben, die den Messbereich des Sensors übersteigt (Teilfoto 4, Messwert 5 g). Es folgt wieder eine Flugphase (Teilfoto 5, ca. 1 g) sowie ein erneutes Abbremsen beim Auftreffen (Teilfoto 6, ca. 4,5 g). Zu sehen ist dabei nicht nur die konstante Erdbeschleunigung während den Flugphasen, sondern auch, wie stark die Beschleunigungen bzw. Kräfte beim Aufkommen auf dem Boden sind, die letztlich die Gelenke belasten.

4. Bodenreaktionskraftmessung

4.1. Möglichkeiten von Kraftmessplatten

Kraftmessplatten ermöglichen die Aufzeichnung der – während der Standphase – wirkenden Kraft zwischen Fuß und Boden, d.h. sie messen die Kraft, die der Körper auf den Boden ausübt, die betragsgleich zur Kraft ist, die der Boden auf den Fuß ausübt.

Prinzipiell ist es möglich, sich ein Kraftmessplatte mit Piezokristallen für wenige Euro selbst zu bauen [12].

Exemplarisch für Kraftmessplatten von Lehrmittelfirmen wird hier die *2-Axis Force Platform* der Lehrmittelfirma Pasco betrachtet [13]. Neben der Normalkraft kann damit auch die Kraftkomponente in Bewegungsrichtung aufgezeichnet werden. Die Kraftsensoren nutzen dabei den piezoelektrischen Effekt. Aufgrund des Drucks auf einen Kristall im Sensor, kommt es zu einer Ladungsverschiebung, so dass eine Spannung abgegriffen werden kann [14]. Die Daten der fünf Kraftsensoren können mittels eines USB-Adapters direkt an den PC übertragen und mit der Software *DataStudio* [15] ausgewertet werden. Dieses Programm stellt neben den Darstellungsmöglichkeiten der Daten als Diagramm oder Tabelle noch vielfältige Auswertungsoptionen zur Verfügung. So können unter anderem Mittelwert, Standardabweichung, Maximum und Minimum oder auch das Integral der Messwerte angegeben werden. Auch Glätten oder die Steigungsbestimmung in einem Messpunkt sowie die funktionale Weiterverrechnung der Daten zu neuen Größen ist möglich. Ebenso sind die Messwerte als Tabelle exportierbar, was eine Visualisierungsmöglichkeit der Daten mittels *measure dynamics* direkt in einem Video ermöglicht (vgl. Abb. 8).

Auch wenn man mit dieser Messvorrichtung keine Daten erhält, welche die gesamte (Gang-, Lauf- oder Sprung-) Bewegung begleiten, so wird doch der Fokus auf den entscheidenden Bewegungsabschnitt gelegt. Obwohl die einzelnen Gliedmaßen des Körpers bei Bewegungen unterschiedlich, sogar gegenläufig bewegt und beschleunigt werden, erfolgt die Gesamtbeschleunigung des Systems über die Wechselwirkung mit dem Boden. Somit ist gerade dieser Bewegungsabschnitt entscheidend für den Verlauf der Gesamtbewegung.

Problematisch beim Einsatz in der Schule ist die Tatsache, dass die Normalkraft Rückschlüsse auf das Gewicht eines Schülers zulässt. Vor allem beim Vergleich der Kraftverläufe zweier Schüler sollte deshalb unbedingt darauf geachtet werden, dass es nicht zu Hänseleien kommt, wenn Daten vor dem Klassenverband demonstriert werden. Auch eine Normierung der verschiedenen Kurven (z.B. auf den Maximalausschlag) wäre denkbar und beim Vergleich mit Literaturwerten üblich.

Da der normale Bewegungsablauf unter Umständen verändert wird, sobald eine Versuchsperson die Platte (z.B. beim Laufen) treffen muss, empfiehlt es sich, Markierungen für die Schrittlänge aufzustellen (vgl. Abb. 7). Somit kann die Versuchsperson leichter abschätzen, wo die Füße bei den Anlaufschritten aufgesetzt werden sollten, um einen möglichst natürlichen Bewegungsablauf zu gewährleisten. Des Weiteren sollten vor und nach der Platte mindestens vier Schritte gemacht werden, wenn der gewöhnli-

che Bewegungsablauf (ohne zusätzlich Beschleunigungs- oder Abbremsseffekte) aufgezeichnet werden soll. Häufig wird auch empfohlen, die Kraftmessplatte, wie in Abb. 7, ebenerdig in den Boden zu versenken [16]. Dies ist zwar durchaus sinnvoll, weil ein Anheben des Fußes auf die Kraftmessplatte den Bewegungsablauf noch zusätzlich verändert, muss aber nicht unbedingt sein. Nach unseren Erfahrungen beschränken sich die Abweichungen beim Gehen, Joggen oder auch beim Hopselauf lediglich auf leichte Schwankungen in der Peakhöhe, welche aber auch beim zweimaligen Wiederholen eines identischen Versuches auftreten können.



Abb. 7: Schrittweitenmarkierung beim Gehen

4.2. Beispiele für Messungen mit der Kraftmessplatte

Die aufgezeichneten Messwerte beim Gehen über eine Kraftmessplatte, wurden in *measure dynamics*, zusammen mit dem gleichzeitig aufgenommenen Video importiert. Schließlich wurde die Kraft vom Boden auf die gehende Person als Pfeil in das Video eingeblendet. Abb. 8 zeigt eine Serienbild dieses Videos und Abb. 9 und Abb. 10 einen Graphen der Kraftkomponente in Bewegungsrichtung bzw. in senkrechter Richtung.

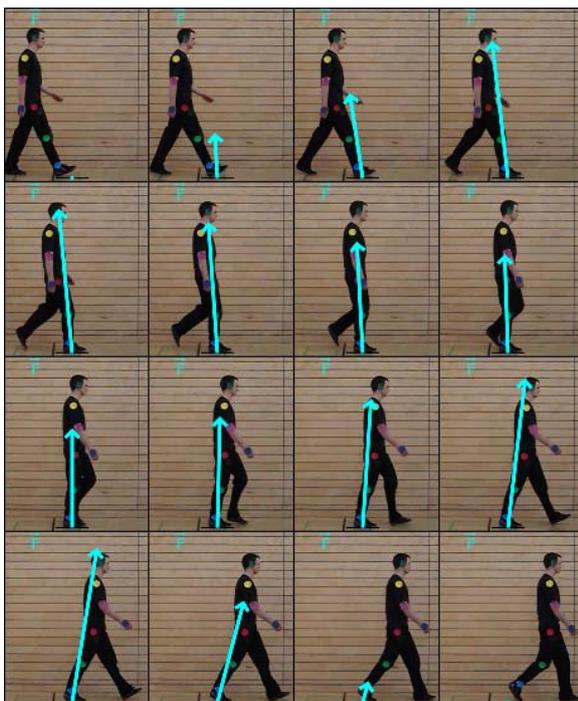


Abb. 8: Serienbild der Darstellung der Bodenreaktionskraft im Video beim Gehen

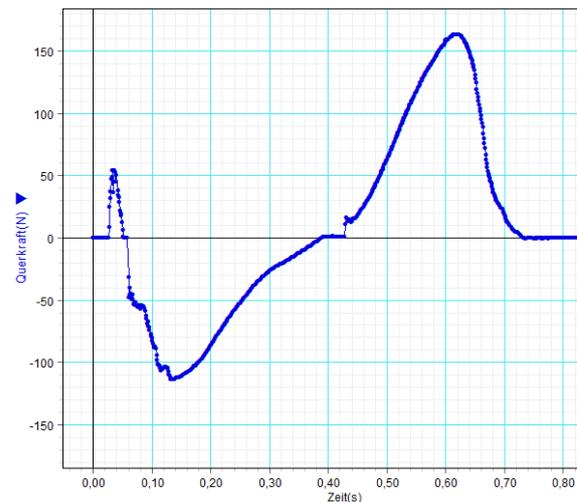


Abb. 9: Horizontaler Kraftanteil beim Gehen über eine Kraftmessplatte (Positive Werte sind Kräfte in Bewegungsrichtung, negative Werte sind Kräfte dagegen)

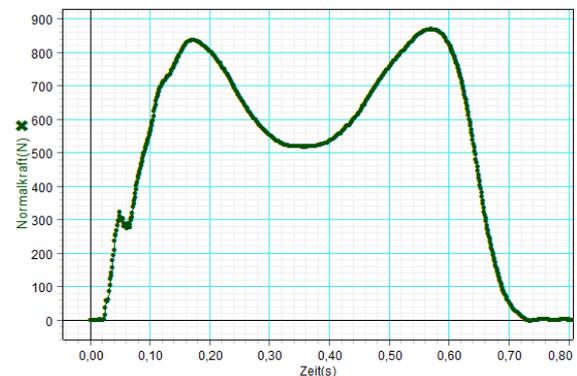


Abb. 10: Vertikaler Kraftanteil (Normalkraft) beim Gehen über eine Kraftmessplatte

In horizontaler Richtung, parallel zum Boden, sieht man zunächst einen Kraftanteil gegen die Bewegungsrichtung auf den Fuß, in welcher der Fuß abgebremst wird (Einzelbilder 3 bis 6 in Abb. 8 und Abb. 9) [16]. Dann folgt eine Phase fast ohne horizontalen Kraftanteil, in der ein Bein auf dem Boden steht und das andere vorgezogen wird (Einzelbilder 7 bis 10 in Abb. 8). Danach übt der Boden eine horizontale Kraft in Bewegungsrichtung auf den Körper aus, in der der Oberkörper nach vorne geschoben wird (Einzelbilder 11 bis 15 in Abb. 8).

In senkrechter Richtung hat die Kraft vom Boden auf die gehende Person zwei Maxima (Bild 5 und Bild 13 in Abb. 8 bzw. Abb. 10): beim Abheben des zweiten Fußes vom Boden und beim Abstoßen des ersten Fußes von der Kraftmessplatte kurz vor dem Verlassen der Platte. Dazwischen gibt es ein Minimum (Bild 8 und 9 in Abb. 8). Da der Körperschwerpunkt vorher einen Geschwindigkeitsanteil nach oben bekommen hat, drückt der Körper während dieser Zeit nicht so fest auf den Boden, so dass auch der Boden nicht so fest auf die Person drücken muss.

Hat man eine Kraftmessplatte, welche wie eine Waage nur die Normalkomponente der Bodenreaktionskraft anzeigt, so kann man z.B. den Kraftverlauf beim Seilspringen einer Person aufzeichnen. Abb. 11 zeigt den Verlauf der Normalkraft, wenn eine Person 20-mal auf der Kraftmessplatte springt. Hierbei kann man erkennen, dass die Flugzeiten abwechselnd einmal länger (ca. 0,3s) und dann wieder kürzer (ca. 0,2s) sind.

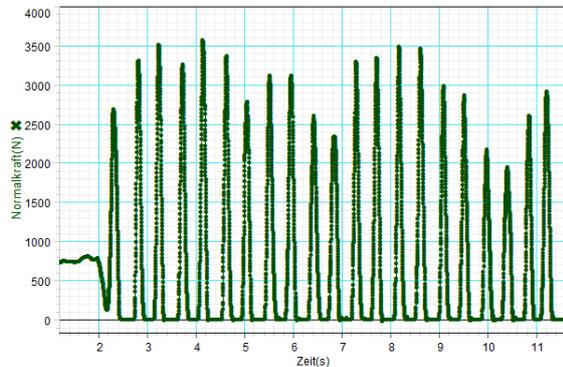


Abb. 11: Normalkraft einer Person beim Seilspringen. 10 Seildurchschläge und 10 Zwischensprünge ergeben 20 Flugabschnitte, welche bei der Anzeige 0 N gut zu erkennen sind.

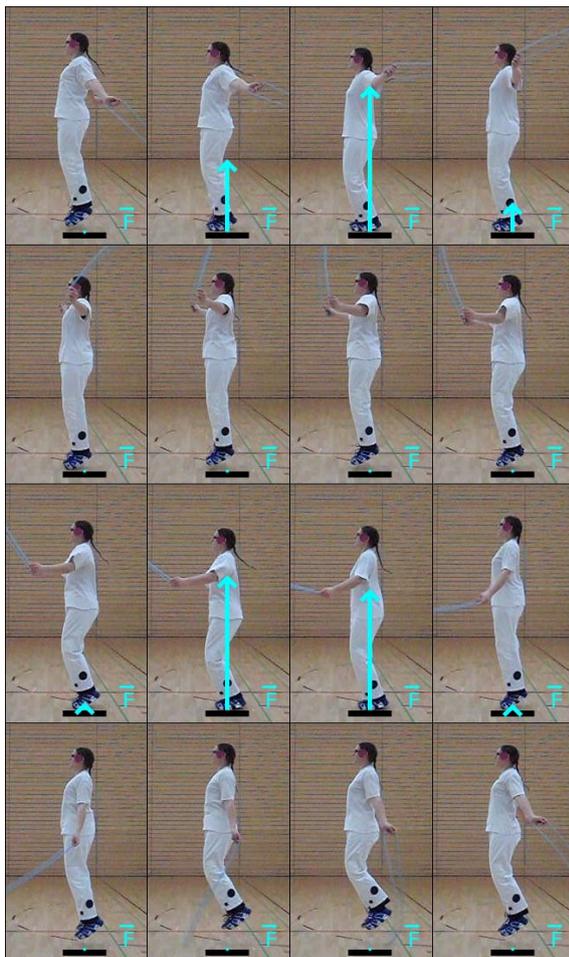


Abb. 12: Serienbild eines Seildurchschlages mit Zwischensprung

Dies kommt daher, dass nur jede zweite Flugzeit einem Seildurchschlag entspricht (vgl. Abb. 12, Teilbilder 13 bis 16) und die darauf folgende, kürzere Flugzeit nur ein Zwischensprung ist (vgl. Abb. 12, Teilbilder 5 bis 8). Aus der so gemessenen Sprungdauer t kann dann z.B. die Sprunghöhe errechnet werden. Die hierfür benötigte Gleichung $h = 1/8 \cdot g \cdot t^2$ lässt sich aus der Energieerhaltung und $g = (v_0 - 0) / (t_{\text{Flug}}/2)$ herleiten. Setzt man die Flugdauer von $t = 0,3$ s ein, so erhält man eine Sprunghöhe $h = 11$ cm, welche z.B. anhand eines Videos überprüft werden kann. Der anhand von *measure dynamics* gemessene Wert von $h_{\text{vid}} = 14$ cm liegt dabei leicht über dem errechneten Wert, da die Beine beim Springen angehoben werden, wodurch der Abstand zum Boden erhöht wird. Die Sprunghöhe von $h = 11$ cm bezieht sich auf die Höhendifferenz, welche der Schwerpunkt überwindet, weswegen sich die beiden Werte nicht widersprechen, sondern das Verständnis der Schüler für den berechneten Wert verbessern.

5. Resümee

Mit Hilfe der drei aufgezeigten Messwerterfassungsmöglichkeiten können vielschichtige Daten über Bewegungen des menschlichen Körpers gewonnen werden. Durch die Zusammenführung der Ergebnisse ergänzen sich hierbei die Systeme gegenseitig, so dass Schwächen ausgeglichen werden können. Die Betrachtung von Schülerbewegungen stellt dabei einen sinnvollen Unterrichtsgegenstand dar. Ein tiefergehendes Verständnis der Zusammenhänge von Ort, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kraft, sowie eine Verknüpfung mit Alltagserfahrungen und -wahrnehmungen der Schüler werden damit angestrebt.

6. Zusatzdateien

Dem Artikel sind als Zusatzdateien sich fünf Videos im avi-Format beigelegt, die aus *measure dynamics* exportiert wurden:

- Gehen mit eingeblendeten Beschleunigungen eines Funkbeschleunigungssensors
- Gehen mit eingeblendeter Bodenreaktionskraft einer Kraftmessplatte
- Laufen mit eingeblendetem Strichmännchen
- Treppensteigen mit eingeblendetem Strichmännchen
- Seilspringen mit eingeblendeter Bodenreaktionskraft

7. Literatur

- [1] Hoffmann, Lore; Häußler, Peter; Lehrke, Manfred (1998): Die IPN-Interessenstudie Physik. Kiel
- [2] Labudde, Peter (2009): Fachunterricht und fächerübergreifender Unterricht: Grundlagen. In: Arnold, Karl-Heinz (Hrsg.): Handbuch Unterricht, Klinkhardt, Bad Heilbrunn

- [3] Videoanalyseprogramm *measure dynamics* der Firma PHYWE. Informationen unter: <http://www.phywe.de/51/pid/4988/Software-measure-Dynamics,-Einzellizenz-.htm> (Stand 05/2011)
- [4] Michel, M.; Wilhelm, T. (2010): Einsatzmöglichkeiten von Hochgeschwindigkeitskameras im Physikunterricht. In: PhyDid-B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Hannover 2010, <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/145/181>
- [5] Benz, M.; Wilhelm, T. (2008): *measure Dynamics* – Ein Quantensprung in der digitalen Videoanalyse. In: Nordmeier, V.; Grötzebauch, H. (Hrsg.): *Didaktik der Physik* - Berlin 2008, Lehmanns Media, Berlin
- [6] Scheler, S.; Wilhelm, T. (2009): Neue Möglichkeiten durch Funksensoren. In: Nordmeier, V.; Grötzebauch, H. (Hrsg.): *Didaktik der Physik* - Bochum 2009, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin
- [7] *Cobra4 Sensor-Unit Acceleration: 3D-Beschleunigung* der Firma PHYWE. Informationen unter: <http://www.phywe.de/51/pid/4247> (Stand 05/2011)
- [8] Scheler, Stefan (2009): Neue Möglichkeiten mit Funksensoren. Staatsexamensarbeit, Universität Würzburg <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/arbeiten/funksensoren.pdf> (Stand 05/2011)
- [9] *Cobra4 Wireless-Link* der Firma PHYWE: Informationen unter: <http://www.phywe.de/51/pid/4189/Cobra4-Wireless-Link-.htm> (Stand 05/2011)
- [10] *Cobra4 Wireless Manager* der Firma PHYWE: Informationen unter: <http://www.phywe.de/51/pid/4188/Cobra4-Wireless-Manager-.htm> (Stand 05/2011)
- [11] *measure Cobra4* der Firma PHYWE. Informationen unter: <http://www.phywe.de/51/pid/5062/Software-measure-Cobra4,-Einzelplatz-und-Schullizenz-.htm> (Stand 05/2011)
- [12] Wilhelm, T.; Geßner, T.; Suleder, M.; Heuer, D. (2003): Sportaktivitäten vielseitig analysieren und modellieren – Video und Messdaten multimedial aufbereitet. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 52, Nr. 2, S. 23 - 30
- [13] *2-Axis Force Platform* der Firma Pasco. Informationen unter: http://www.conatex.com/shop/product_info.php?products_id=138 (Stand 05/2011)
- [14] Waltner, Christine; Seidel, Samuel; Tobias, Verena; Wiesner, Hartmut (2009): Experimente mit der Kraftmessplatte für den Physikunterricht. In: Nordmeier, V.; Grötzebauch, H. (Hrsg.): *Didaktik der Physik* – Bochum 2009 Lehmanns Media – LOB.de, Berlin
- [15] *DataStudio* der Firma Pasco. Informationen unter: <http://www.pasco.com/datastudio/> (Stand 05/2011)
- [16] Seidel, Samuel; Waltner, Christine; Wiesner, Hartmut (2009): Kräfte messen beim Gehen und Laufen. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 58, Nr. 1, S. 23 - 26