

Die folgenden Original-Seiten der Zeitschrift „Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule“ wurden mit expliziter Genehmigung des Aulis-Verlages (Dr. Brigitte Abel) und des Friedrich-Verlages (Hubertus Rollfing) auf die Webseite [www.thomas-wilhelm.net](http://www.thomas-wilhelm.net) gestellt. Vielen Dank für die Erlaubnis.

Die exakte Quellenangabe des Zeitschriftenartikels ist:

WEIDT, M.; WILHELM, T.

***Gehen und Laufen im Physikunterricht***

Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 63, Nr. 1, 2014, S. 37 - 46

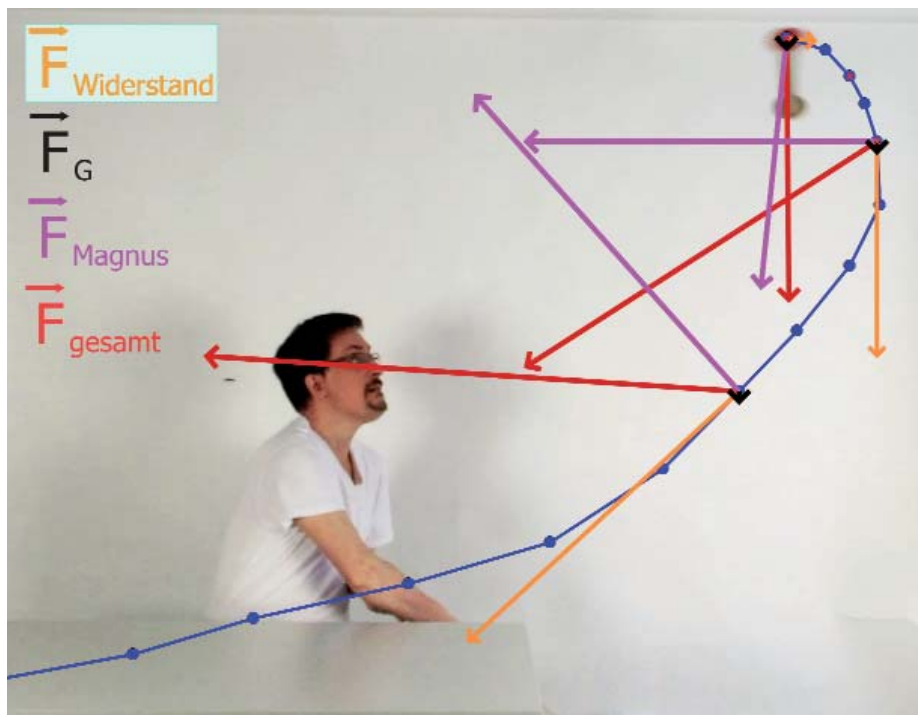


Abb. 22: Kräfte auf die rotierende Rolle in der Luft

Seiten nähern. Anders als in diesem Artikel wird man meist erst mit qualitativen Versuchen die Phänomene vorstellen (Abschnitt 4), dann eventuell quantitative Versuche durchführen (Abschnitt 3) und schließlich die Bewegung modellieren (Abschnitt 2).

#### Literatur

[1] S. Lück & T. Wilhelm, *Modellierung physikalischer Vorgänge am Computer. Modellbildungssysteme als Unterstützung zum Ver-*

*ständnis physikalischer Strukturen*, in: *Unter-richt Physik 22, Heft 122, 2011, S. 26 – 31*

[2] T. Wilhelm, *Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung*, *Studien zum Physik- und Chemielernen*, Band 46, Logos-Verlag: Berlin (2005), online unter [www.opus-bayern.de/uni-wuerzburg/volltexte/2009/3955/](http://www.opus-bayern.de/uni-wuerzburg/volltexte/2009/3955/)

[3] *Newton-II* ist kostenlos downloadbar unter <http://did-apps.physik.uni-wuerzburg.de/>

[Newton-II/index.html](http://Newton-II/index.html)

[4] J. Ludwig, T. Wilhelm, *Mathematisches Modellieren mit Modellus 4*, in: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 62, Nr. 2, 2013, S. 30 - 36*

[5] T. Wilhelm, W. Reusch, P. Jakob, *Physik mit Kick*, in: H.-G. Weigand, *Fußball – eine Wissenschaft für sich*, Königshausen & Neumann, Würzburg, 2006, Seite 137- 159

[6] J. Wesson, *Fußball - Wissenschaft mit Kick. Von der Physik fliegender Bälle und der Statistik des Spielausgangs*, Spektrum-Akademischer Verlag, 2005

[7] M. Tolan, *So werden wir Weltmeister – Die Physik des Fußballspiels*, Piper Verlag GmbH, München, 2010

[8] B. Egidy & T. Wilhelm, *Tennis im Physikunterricht*, in: *PhyDid-B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Jena 2013*, [www.phydid.de](http://www.phydid.de)

[9] H. Hilscher (Hrsg.), *Physikalische Freihandexperimente*, Band 1, *Mechanik*, Aulis Verlag Deubner, Köln, 2004

#### Dank

Besonderer Dank geht an Roland Wenisch für die Hilfe bei den Versuchen aus Abschnitt 4.

#### Anschriften der Verfasser

Prof. Dr. Thomas Wilhelm, Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main, [wilhelm@physik.uni-frankfurt.de](mailto:wilhelm@physik.uni-frankfurt.de), [www.thomas-wilhelm.net](http://www.thomas-wilhelm.net)

StRef Fabian Zimmermann, Ohm-Gymnasium Erlangen, Am Röthelheim 6, 91052 Erlangen, [zimmermann\\_fa@googlemail.com](mailto:zimmermann_fa@googlemail.com)

# Gehen und Laufen im Physikunterricht

M. Weidt u. Th. Wilhelm

## 1 Fortbewegung im Alltag und Sport

Zur Interessensförderung der Schüler und besonders auch der Schülerinnen am Fach Physik wurde immer wieder gefordert, im Unterricht stärker an den Alltagserfahrungen von Schülern anzuknüpfen und einen Bezug zum menschlichen Körper herzustellen [1]. Durch das Behandeln von alltäglichen Bewegungen, wie z. B. Gehen, Laufen, einfachen Sprüngen oder ähnlichen Fortbewegungsarten, kann diesen Forderungen Rechnung getragen werden [2]. Außerdem kann man hierbei leicht fä-

cherübergreifend mit Bezug auf Biologie und Sport unterrichten. Gerade das Laufen ist Teil vieler Sportarten. 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.

Auch Fußball ist ein Laufspiel. Bei der kommenden Fußball-WM wird ein Spieler im Durchschnitt pro Spiel zwischen zehn und elf Kilometern zurücklegen. Dabei

wechselt der Spieler immer wieder zwischen Gehen, langsamem Laufen, das man auch Joggen nennt, und schnellem Laufen, das man auch Sprinten nennt. Beim Gehen ist immer ein Fuß in Kontakt mit dem Boden, während beim Laufen beide Füße über eine bestimmte Zeitspanne in der Luft sind. Im Internet kann man zu jedem Fußball-Bundesligaspiel von jedem einzelnen Spieler die gesamte Laufdistanz, die Anzahl der Sprints, die Anzahl intensiver Läufe u.v.m abrufen [3]. Im Trainingslager kann von einem Bundesligaspieler ein

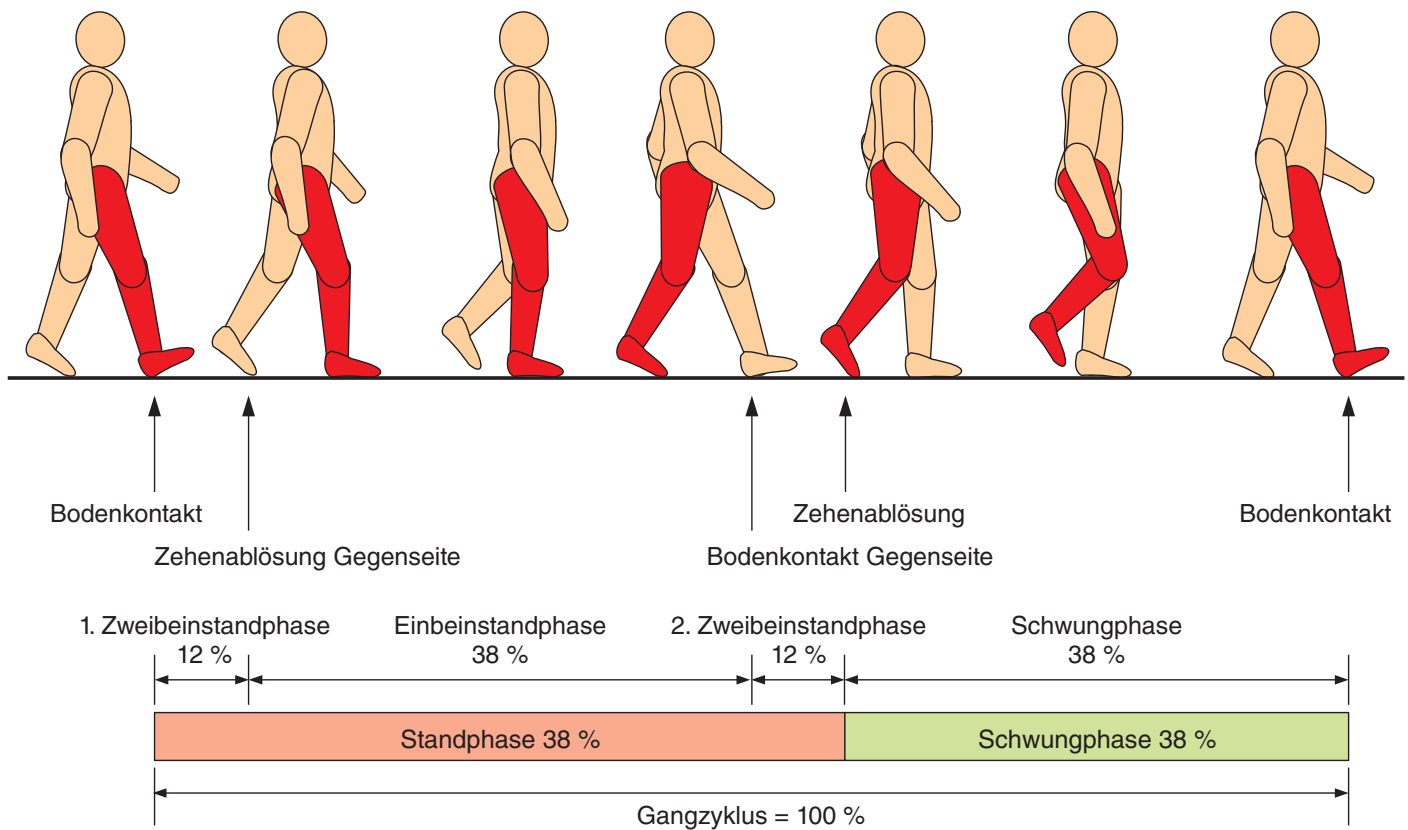


Abb. 1: Phasen des Gangzyklus, nach [6, S. 194]

Lauftraining von bis zu 90 Kilometern pro Woche verlangt werden.

In einer dänischen Studie [4] haben ausdaueruntrainierte Männer über einen Zeitraum von 12 Wochen 2-3 mal pro Woche je eine Stunde trainiert: die einen durch Fußballspielen, die anderen durch Joggen. Die Fußballer verloren mehr Fett, verbesserten mehr die maximale Sauerstoffaufnahme und im Gegensatz zu den Joggern gewannen sie Muskelmasse und erhöhten die Knochendichte. Der Grund liegt zum einen im Spaß des Spieles, zum anderen darin, dass die Fußballspieler wechselweise gehen, joggen und sprinten. Fußballspielen ist damit quasi ein hoch intensives Intervalltraining mit unregelmäßigen, hohen Belastungsspitzen.

Gehen und Laufen kann im Physikunterricht behandelt werden, um die kinematischen Grundgrößen Geschwindigkeit und Beschleunigung zu vertiefen, um mit Kräften argumentieren zu üben oder um Schwingungen zu betrachten. Um reale Bewegungen zu messen, eignen sich die Videoanalyse, Kraftmessplatten und Beschleunigungssensoren [5].

## 2 Gehen

Gehen ist die häufigste Form der menschlichen Fortbewegung und eine zyklische Bewegung, was bedeutet, dass ein bestimmtes Grundmuster periodisch wieder-

holt wird. Solche zyklischen Bewegungen werden überwiegend unterbewusst gesteuert. Wie auch das Laufen ist das Gehen eine ausgesprochen gut reproduzierbare Bewegung und läuft unter physiologischen Bedingungen bei allen gesunden Menschen nach demselben Grundmuster im Unterbewussten ab [6, S. 192].

Beim freien Gehen wird die Geschwindigkeit in der Regel automatisch so gewählt, dass eine größtmögliche Ökonomie erzielt wird [7, S. 47]. Bei Erwachsenen ergibt das ein Tempo zwischen  $1,2 \text{ m/s} = 4,3 \text{ km/h}$  und  $1,5 \text{ m/s} = 5,4 \text{ km/h}$  [6, S. 192].

Bei der Beschreibung des Gangzyklus wird jeweils die Bewegung eines Beines (z. B. des linken Beines) betrachtet. Erst wenn sich dessen Bewegung wiederholt, endet der Zyklus und man spricht von einem „Doppelschritt“ [8, S. 3 ff.]. Ein Doppelschritt kann vereinfacht in eine Stand- und eine Schwungphase des betrachteten Beines gegliedert werden (siehe Abb. 1). Hierbei beansprucht die Standphase ca. 62% und die Schwungphase ca. 38% der Gesamtdauer des Doppelschritts [6, S. 194]. Weiter kann man die Standphase in zwei Zweibein- und eine Einbeinstandphase unterteilen (siehe Abb. 1).

### 2.1 Gehen über eine Kraftmessplatte

Eine Möglichkeit, das Gehen zu untersuchen, ist, mithilfe einer Kraftmessplatte die

Kraft vom Fuß auf den Boden bzw. vom Boden auf den Fuß zu messen. Mit einer zweiachsigen Kraftmessplatte (z. B. von Pasco) können sowohl vertikale Kraftanteile (Normalkraft) als auch horizontale Kraftanteile (Querkraft) aufgezeichnet werden, was bei Eigenbau-Kraftmessplatten nicht möglich ist [9]. Die Kraftsensoren dieser Platten nutzen den piezoelektrischen Effekt, um die Kräfteinwirkung auf die Platte in ein elektrisches Signal umzuwandeln [10].

Man kann mit der Kraftmessplatte zwar nicht die gesamte Bewegung analysieren, aber einen entscheidenden Bewegungsabschnitt. Obwohl die einzelnen Gliedmaßen des Körpers beim Gehen unterschiedlich bewegt werden, erfolgt die Beschleunigung des Körperschwerpunktes über die Wechselwirkung mit dem Boden. Problematisch könnte beim Einsatz in der Schule nur sein, dass die Normalkraft Rückschlüsse auf das Gewicht eines Schülers zulässt, was zu beachten ist.

Um den natürlichen Verlauf der Bodenreaktionskraft beim Gehen aufzuzeichnen, sollten vor und nach der Platte ca. vier Schritte ausgeführt werden. Außerdem ist es sinnvoll, Schrittlängenmarkierungen aufzustellen, damit die Platte mittig getroffen wird und kein kurzfristiges Anpassen der Schrittlänge nötig ist. Bei einer erwachsenen Person liegen diese Punkte ca. 70 cm auseinander. Es ist zwar sinnvoll, die

Kraftmessplatte ebenerdig in den Boden zu versenken, weil ein Anheben des Fußes auf die Kraftmessplatte den Bewegungsablauf noch zusätzlich verändert, aber für schulische Zwecke muss es nicht unbedingt sein.

Abb. 2 zeigt die senkrechte Komponente der Kraft vom Boden auf die gehende Person. Die rote Linie gibt dabei den Betrag der Gewichtskraft der Versuchsperson an. Der mit 1 markierte Ausschlag wird als „Impact Peak“ bezeichnet. Er tritt bei einem harten Aufsatz des Fußes mit der Ferse auf. Bei einem weichen Auftritt fällt dieser Peak weg. Peak 2 entsteht beim Abheben des anderen Fußes vom Boden (Bild 5 in Abb. 4) und übersteigt den Betrag der Gewichtskraft um den Faktor 1,2 bis 1,3. Hier wird der Körper zuerst nach oben beschleunigt, um das andere Bein vorziehen zu können. Das Abbremsen dieser Bewegung nach oben – was äquivalent zu einer Beschleunigung nach unten ist – entlastet das Standbein. Aufgrund dieser (Hoch-)Entlastung kommt es zum Minimum 3 (Bild 8 in Abb. 4). 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. Der Körperschwerpunkt sinkt dann wieder ab. Bei Peak 4 (13 in Abb. 4) soll ein weiteres Abfallen des Körperschwerpunktes durch eine stärkere Kraft nach oben durch den Einsatz der Wadenmuskulatur verhindert werden, was einen erneuten Anstieg der Normalkraft bedeutet.

Abb. 3 zeigt die horizontale Komponente der Kraft vom Boden auf die gehende Person. Zunächst gibt es für ca. 0,3 s einen Kraftanteil gegen die Bewegungsrichtung auf den Fuß, so dass der Fuß abgebremst wird (Einzelbilder 2 bis 8 in Abb. 4) [10]. Dann folgt eine sehr kurze Phase fast ohne horizontalen Kraftanteil (Einzelbild 9 in Abb. 4), in der ein Bein auf dem Boden steht und das andere vorgezogen wird. Danach übt der Boden ca. 0,3 s eine horizontale Kraft in Bewegungsrichtung auf den Körper aus, in welcher der Oberkörper nach vorne geschoben wird (Einzelbilder 10 bis 15 in Abb. 4). Beim natürlichen Gehen mit konstantem Tempo ist die Fläche unter der Kraft-Zeitkurve, die dem Impuls entspricht, beim Auftreten und Abstoßen gleich groß.

Für das Verständnis der Graphen ist es sehr hilfreich, den Bewegungsablauf gleichzeitig mit dem Kraftverlauf darzustellen. Hierzu wurden ein Video vom Gehen und die gleichzeitig aufgezeichneten Messwerte einer Kraftmessplatte in das Vi-

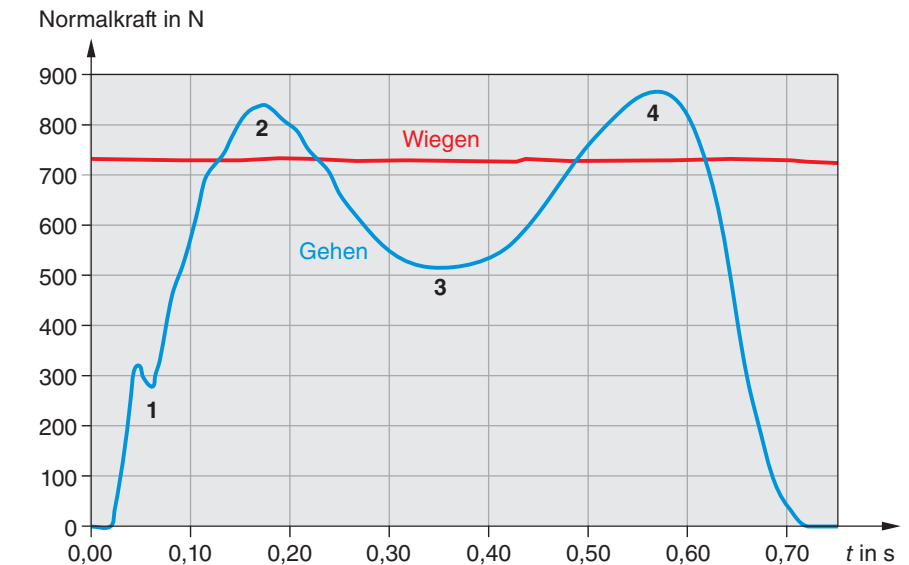


Abb. 2: Normalkraftverlauf beim natürlichen Gehen

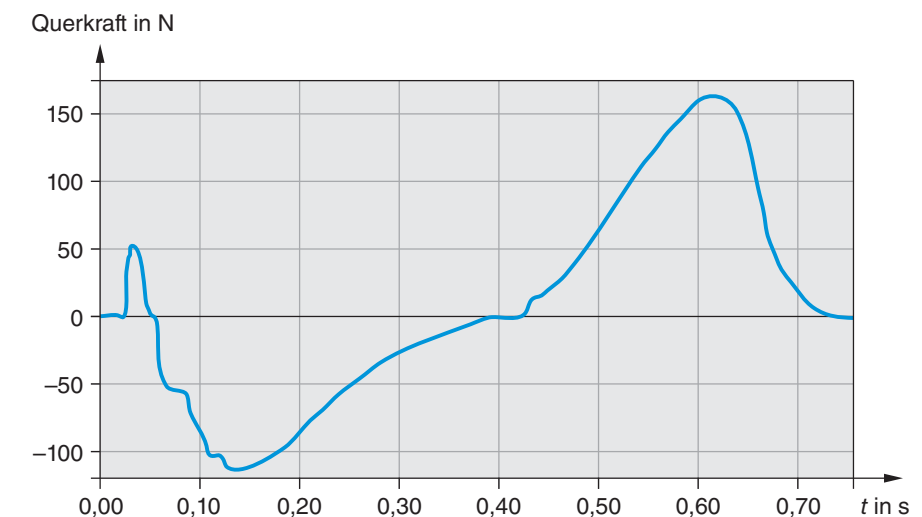


Abb. 3: Querkraft beim natürlichen Gehen (positive Werte entsprechen einer Kraft in Bewegungsrichtung)

deoanalyseprogramm *measure dynamics* importiert. Schließlich wurde die Kraft vom Boden auf die gehende Person als Pfeil in das Video eingeblendet. Abb. 4 zeigt ein Serienbild dieses Videos.

Winter [11] stellte in Vergleichsmessungen fest, dass diese Kurvenverläufe bei einer Person gut reproduzierbar sind, wobei die Normalkraft stets kleinere Variationen aufweist als die Querkraft. Unterschiede ergeben sich aber für unterschiedliche Gangtempo. Bei der Normalkraft ist beim langsamen Gehen der Abstand zwischen den Maxima und dem Minima wesentlich kleiner, die Maxima werden kleiner und das Minimum größer, da kein so starker Abdruck erfolgt [11]. Nach Perry [8] wird zur Reduktion der Gangtempo außerdem die Doppelschrittlänge verkürzt und die Schrittfrequenz erniedrigt.

Abbildung 5 zeigt, wie sich die Normalkraft einer Versuchsperson ändert, wenn diese direkt nach der Platte stehen bleibt (rote Kurve) bzw. direkt vor der Platte los-

läuft und eine hohe Ganggeschwindigkeit anstrebt (grüne Kurve). Beim Abbremsen (rote Kurve) erhöht sich das erste Maximum der Normalkraft, während das kleinere zweite Maximum auf einen schwächeren Abdruck vom Boden hinweist. Beim schneller werdenden Gehen (blaue Kurve) sieht man dagegen beim zweiten Maximum einen verstärkten Abdruck vom Boden [2].

## 2.2 Andere Messverfahren beim Gehen

Mithilfe der kostenlosen Software „Live Video Strobe“ [12+13] erhält man ohne großen Aufwand in Echtzeit ein Stroboskopbild. In Abb. 6 geht eine Person von links nach rechts durchs Bild und trägt zur Verdeutlichung noch einen Maßstab wie ein Gewehr über der Schulter. Man sieht in diesem Stroboskopbild an dem Maßstab, dass die horizontale Komponente der Geschwindigkeit des Kopfes fast konstant ist, während man an den dunklen Haaren sieht, dass der Kopf in vertikaler Richtung eine fast harmonische Schwingung voll-

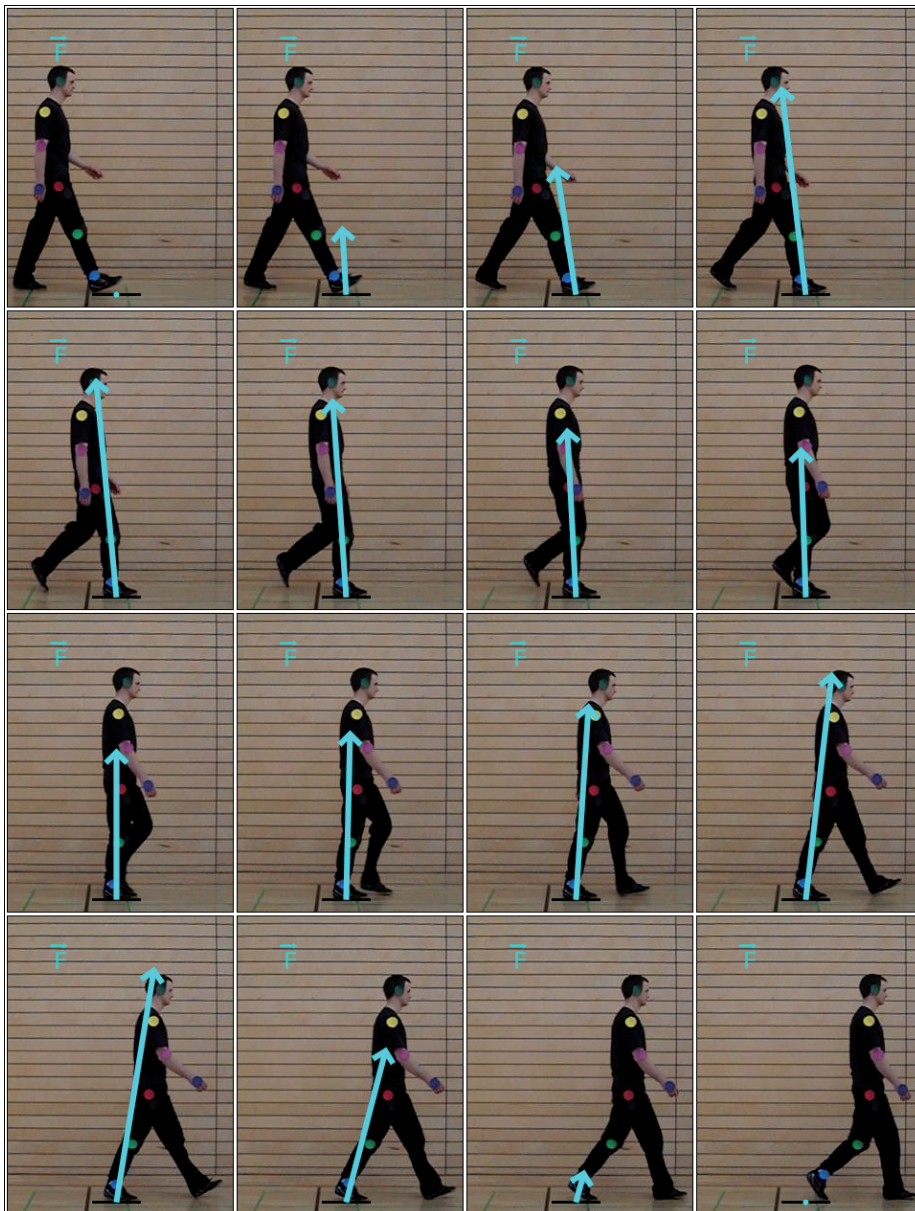


Abb. 4: Serienbild eines Videos der natürlichen Gehbewegung mit eingeblendeter Bodenreaktionskraft (Zeit zwischen zwei Teilbildern  $\Delta t = 47,6$  ms, entspricht 21 fps)

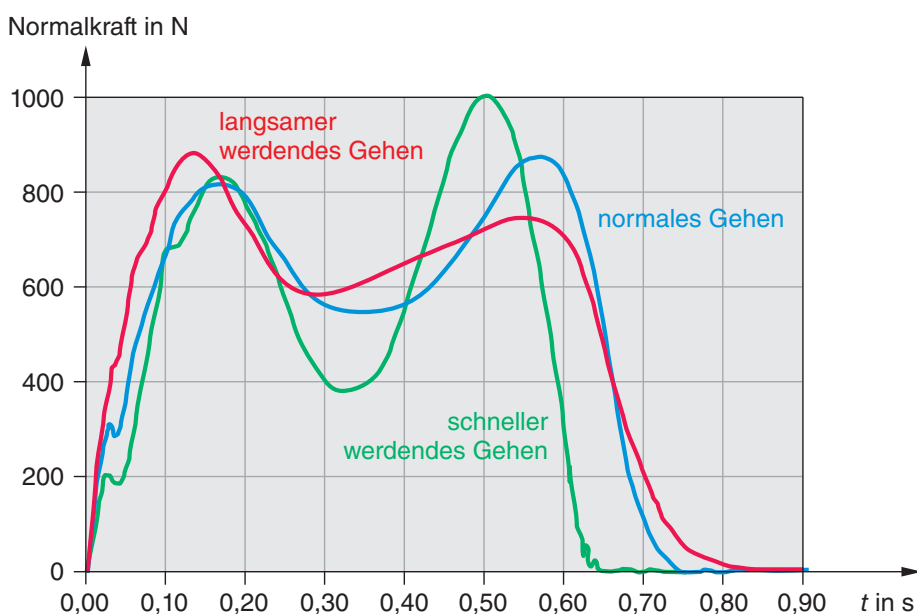


Abb. 5: Normalkraftverläufe bei unterschiedlich beschleunigten Gehschritten

führt. Dies ist sowohl beim Gehen als auch beim Laufen so, damit die Beschleunigungen für das Gehirn möglichst klein sind. Benutzt man ein Videoanalyseprogramm, kann man sogar die Hubhöhe ermitteln. Schlichting und Rodewald ermitteln darüber die Leistung, die der menschliche Körper beim Gehen abgibt bzw. wie viel Energie ihm dafür in Form von chemischer Energie zuzuführen ist [14].

Mit einem Videoanalyseprogramm kann auch die Geschwindigkeit des Fußes bestimmt werden. Die Bewegung des Beines wird beim Gehen häufig mit einer Pendelschwingung verglichen [15-17].

Das Gehen kann man auch mit Beschleunigungssensoren untersuchen [18], deren Funktionsweise ein interessanter Kontext darstellt [19]. Moderne Schrittzähler, z. B. in Apps für Smartphones, verwenden den periodischen Verlauf der Messwerte, um die Schrittzahl zu bestimmen und daraus sogar die Momentangeschwindigkeit und die zurückgelegte Entfernung beim Joggen oder Walken zu berechnen. Die entstehenden Graphen sind aber nicht leicht zu interpretieren [2] und den Bewegungsabschnitten zuzuordnen. Ist der Sensor zudem am Fuß befestigt, wird er ständig leicht verkippt, so dass die störende Erdanziehungskraft nicht durch Tarieren vor der Messung ganz weggerechnet werden kann und die Messung verfälscht ist [20]. Je nach Befestigung des Sensors am Körper kann es darüber hinaus noch zu Überlagerungsschwingungen des Sensors kommen. Vor allem beim Anbringen des Sensors an nicht enganliegender Kleidung sind die Messdaten nur schwer reproduzierbar.

### 3 Laufen

Wie das Gehen zählt auch das Laufen zu den zyklischen Bewegungen. Beim Übergang vom Gehen zum Laufen verkürzen sich sukzessiv die Zweibeinstandphasen des Gehens, bis an ihre Stelle eine Flugphase tritt. Eine grundlegende Beschreibung des Laufens gibt das Zwei-Phasen-Modell, das die Bewegung eines Beines in Stütz- und Schwungphase einteilt. Von dieser Differenzierung ausgehend sind noch weitere Untergliederungen möglich, was bis zu einer Aufspaltung in 20 Bewegungsabschnitte in der sportwissenschaftlichen Literatur führt [21, S. 54-55]. Im deutschsprachigen Raum erfolgt die Strukturierung des Laufzyklus häufig nach dem Vier-Phasen-Modell, bei dem die Stütz- und die Schwungphase jeweils noch einmal in einen vorderen und einen hinteren Abschnitt unterteilt sind.

Abbn. 7 und 8 zeigen zwei Serienbilder von Laufbewegungen. In Abb. 7 joggt eine Versuchsperson mit einer gemütlichen Laufgeschwindigkeit von  $v_x = 2,6 \text{ m/s}$ . Die Teilbilder von Abb. 8 zeigen die Sprintbewegung mit maximaler Geschwindigkeit von  $v_x = 6,8 \text{ m/s}$ . Die Teilbilder 1 zeigen dabei jeweils den Fußaufsatz (des rechten Beines der Versuchsperson in Abb. 7 bzw. des linken Beines der Person in Abb. 8; in allen Teilbildern wird jeweils die Bewegung dieses Beines betrachtet), der den Beginn der vorderen Stützphase darstellt. Im Teilbild 2 ist der Übergang zwischen vorderer und hinterer Stützphase und im Teilbild 3 die hintere Stützphase zu sehen. Beim Sprinten ist der Anteil des Bodenkontaktes an der Gesamtdauer eines Doppelschrittes kürzer als beim Joggen. Deshalb verliert die Versuchsperson des Serienbildes in Abb. 8 schon früher den Bodenkontakt (Teilbild 3) als die Joggerin im Serienbild der Abb. 7 (Teilbild 4). Nach [21, S. 76-77] verringert sich der Anteil der Stützphase am Gesamtzyklus von 38% bei einem Lauftempo von  $2,78 \text{ m/s}$  auf dann 27% bei eine Tempo von  $5 \text{ m/s}$ . Dabei bleibt die Dauer der Schwungphase in einem Bereich von  $3 \text{ m/s}$  bis  $5,5 \text{ m/s}$  annäh-

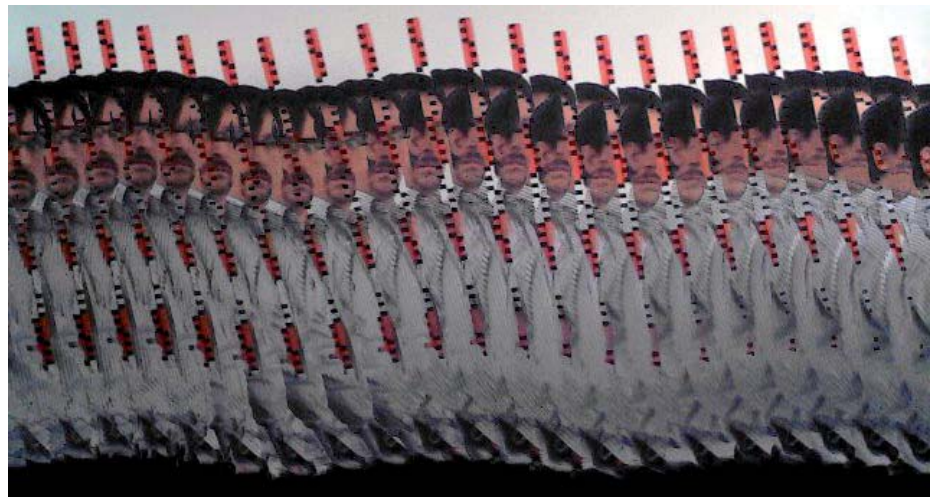
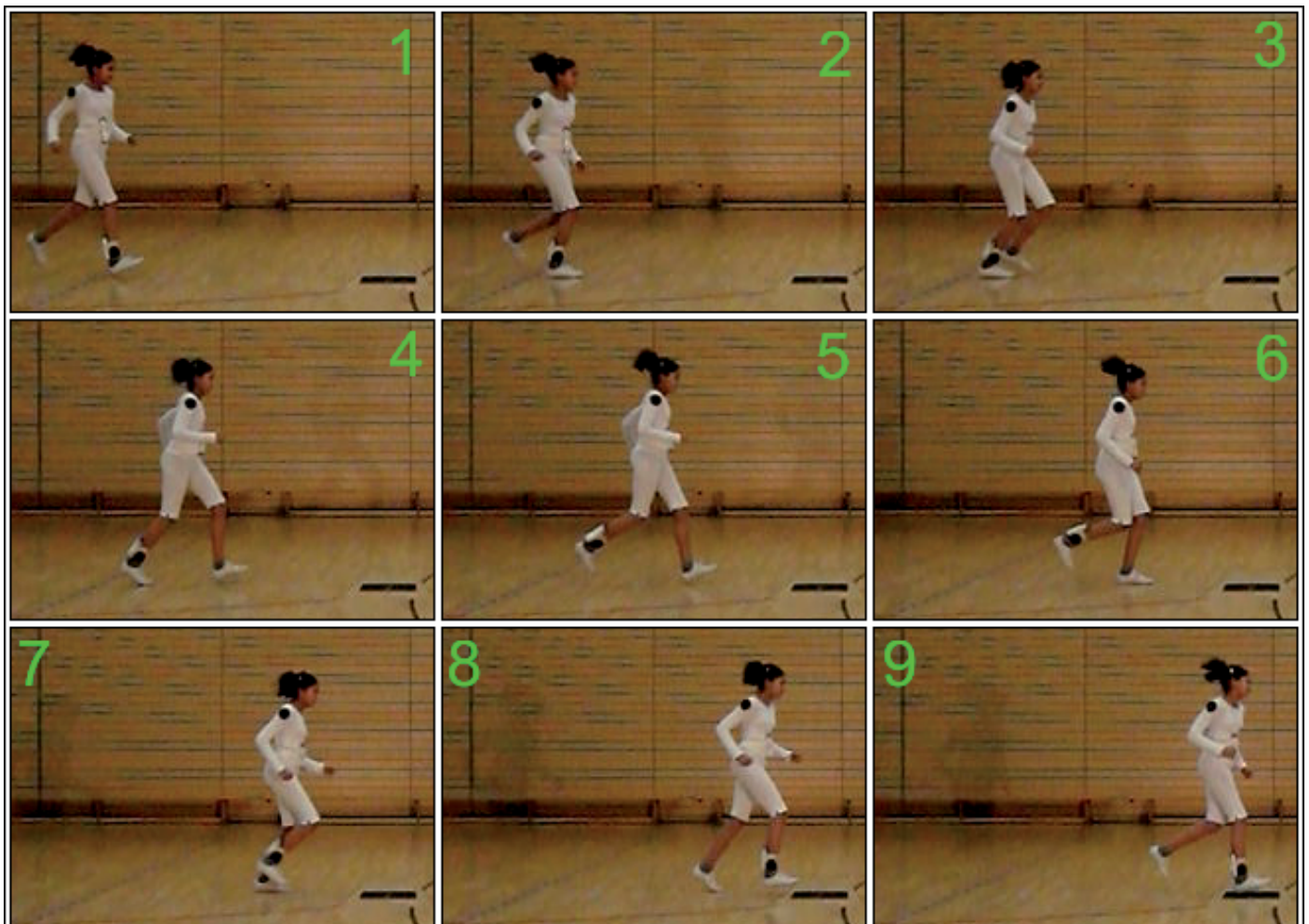


Abb. 6: Gehen einer Person von links nach rechts mit Maßstab im Arm

rend konstant. Die Erhöhung der Schrittfrequenz wird demnach durch einen verkürzten Bodenkontakt erreicht. Nach dem Verlassen des Bodens geht das Bein in die hintere Schwungphase über (jeweils Teilbilder 4 und 5). In der Schwungphase fällt beim Sprinten die starke Beugung des Kniegelenkes auf (Anfersen des Unterschenkels in den Teilbildern 5 und 6 des Serienbildes von Abb. 8). Damit wird – durch die Zentrie-

rung der Masse um das Drehzentrum – die Winkelgeschwindigkeit vergrößert (Drehimpulserhaltung). Daneben verkleinert sich das Trägheitsmoment, was eine ökonomischere Bewegungsausführung ermöglicht. Nach dem Passieren der Körperachsen beginnt die vordere Schwungphase (jeweils Teilbilder 7 und 8), an welche sich ein erneuter Fußaufsatz (jeweils Teilbild 9) anschließt.

Abb. 7: Serienbilder aus neun Teilbildern der Joggbewegung,  $\Delta t = 10 \text{ ms}$



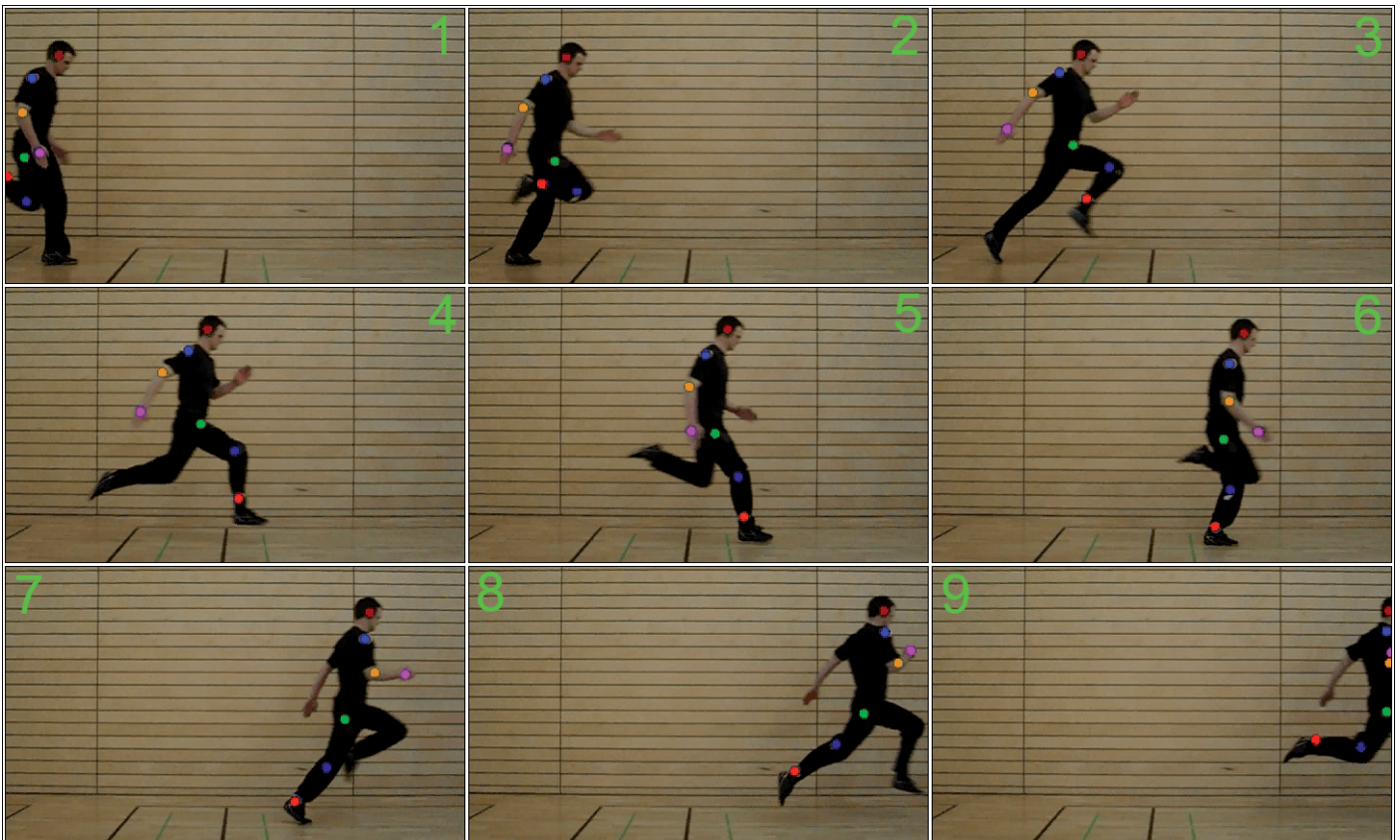
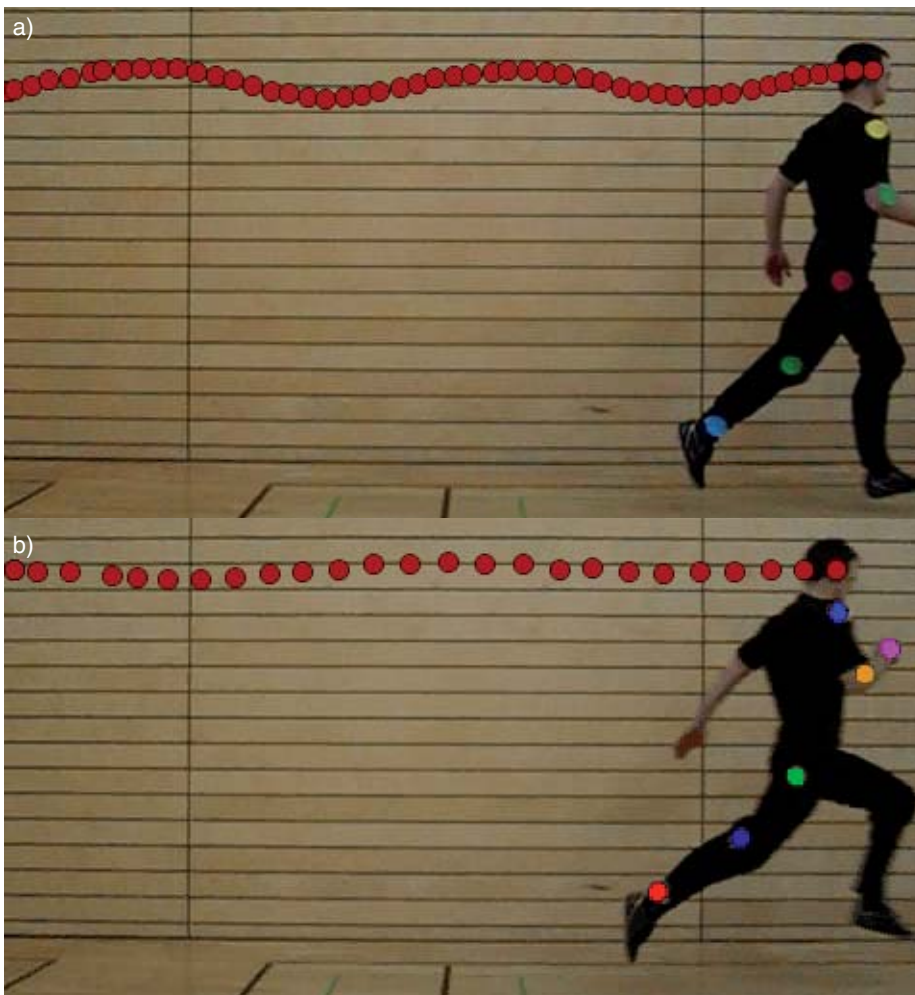


Abb. 8: Serienbilder aus neun Teilbildern der Sprintbewegung,  $\Delta t = 10 \text{ ms}$

Abb. 9: Spur des Kopfes beim Joggen (a) und Sprinten (b),  $\Delta t = 19 \text{ ms}$



Anhand des Fußaufsatzes werden drei verschiedene Abrolltechniken unterschieden [21, S. 89-93]. Die Fußsohle wird zur Zuordnung der Länge nach in drei gleich große Stücke unterteilt. Je nachdem, welcher Teil des Fußes den initialen Bodenkontakt ausführt, unterscheidet man zwischen Rückfuß- (= Fersenlauf; Aufsatz des hinteren Fußdrittels), Mittelfuß- (Aufsatz des mittleren Fußdrittels) und Vorfußaufsatz (= Ballenlauf; Aufsatz des vorderen Fußdrittels).

### 3.1 Videoanalyse des Kopfes beim Laufen

Wie beim Gehen können im Physikunterricht Videoanalysen des Laufens durchgeführt werden. Mit zunehmendem Tempo empfiehlt sich die Verwendung einer kostengünstigen Casio-Hochgeschwindigkeitskamera [22], die u.a. den Vorteil hat, dass sehr kurze Belichtungszeiten für die Einzelbilder verwendet werden.

Zunächst empfiehlt es sich, die Bewegung des Kopfes zu analysieren, da diese recht gut der Bewegung des Körperschwerpunktes entspricht. So kann z.B. das Tempo beim langsamen Laufen und beim Sprinten ermittelt werden. Diese Spur (x-y-Diagramm, siehe Abb. 9) des Kopfes zeigt beim Joggen wie beim Gehen eine Art Sinuskurve; die gleichförmigen Bewegung in Laufrichtung wird von einer Schwingung in vertikaler Richtung überlagert. In der

Mitte der Flugphase durchläuft der Schwerpunkt jeweils seine maximale Auslenkung in vertikaler Richtung und sinkt dann wieder ab, bis er ca. in der Mitte der Standphase den tiefsten Punkt erreicht hat. Die vertikale Amplitude hängt dabei unter anderem vom Lauftempo ab. Bei hohem Tempo ist sie kleiner als bei niedrigem [21, S. 84]. Ein rückfußlaufendes Joggen ergibt außerdem eine größere Amplitude als der Ballenlauf. Beim Sprinten ist entsprechend nur noch eine ganz leichte vertikale Oszillation beobachtbar. Möchte man im Unterricht Schwingungen vertiefen, so ist ein langsames Lauftempo zu wählen.

In einem Videoanalyseprogramm kann man sich den zeitlichen Verlauf der Höhe  $y$ , der vertikalen Komponente der Geschwindigkeit  $v_y$  und der vertikalen Komponente der Beschleunigung  $a_y$  anzeigen lassen. Bei einer Schülerin wurde bei der Höhe eine Amplitude von 5 cm gemessen, d. h. ein Höhenunterschied zwischen Maxima und Minima von 10 cm. Die vertikale Komponente der Geschwindigkeit schwang mit einer Amplitude von 0,8 m/s und die vertikale Komponente der Beschleunigung hatte eine Amplitude von ca. 15 m/s<sup>2</sup>.

In der Videoanalysesoftware measure dynamics kann man zusätzlich Funktionen definieren. Um die Parameter dieser Funktion an die gemessene Kurve anzupassen, kann man Schieberegler für die Parameter definieren und über diese Schieberegler die Parameter einstellen [23]. Abb. 10 zeigt neben den gemessenen Höhen (schwarz) eine daran angenäherte Sinuskurve (lila) sowie neben den gemessenen Geschwindigkeitskomponenten (grün) eine daran angenäherte Sinuskurve (blau). Die Näherungskurve für die Geschwindigkeitskomponente ist dabei recht gut die Ableitung der Näherungskurve für die Höhe und sie ist um  $\pi/2$  verschoben. Auch der Verlauf der vertikalen Beschleunigungskomponente lässt sich durch eine Sinuskurve annähernd beschreiben. Abb. 11 zeigt neben den Geschwindigkeitskomponenten (grün) die daran angenäherte Sinuskurve (blau) sowie neben den gemessenen Beschleunigungskomponenten (rot) eine daran angenäherte Sinuskurve (orange). Wieder entspricht die Näherungskurve für die Beschleunigungskomponente gut der Ableitung der Näherungskurve für die Geschwindigkeitskomponente.

### 3.2 Videoanalyse des Fußes

Die Füße haben beim Bodenkontakt für kurze Zeit die Geschwindigkeit null. Vor bzw. nach dem Bodenkontakt muss die Ge-

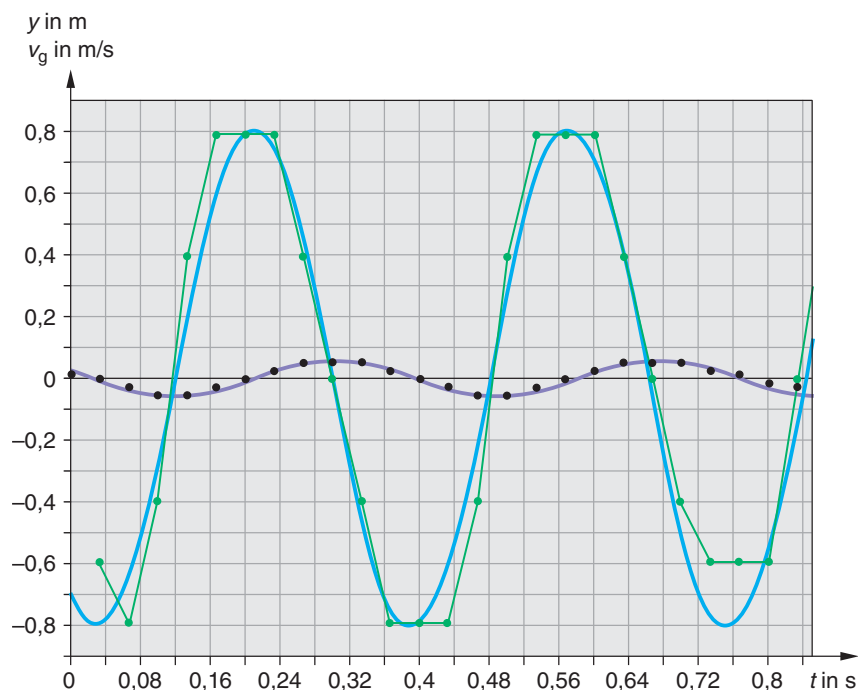


Abb. 10: Vertikale Orts- und Geschwindigkeitskomponente des Kopfes beim Joggen mit Näherungskurven für Orts- und Geschwindigkeitsverlauf

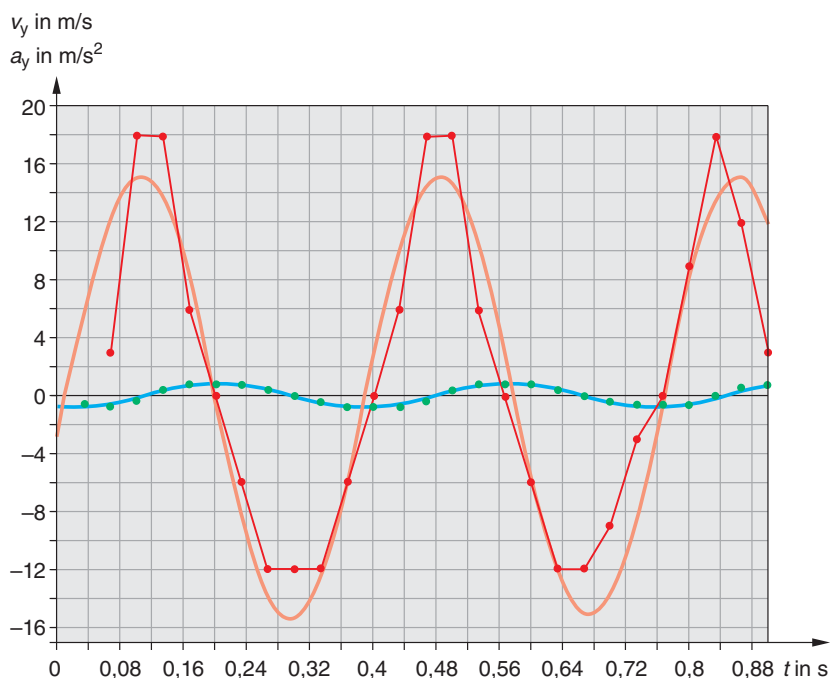
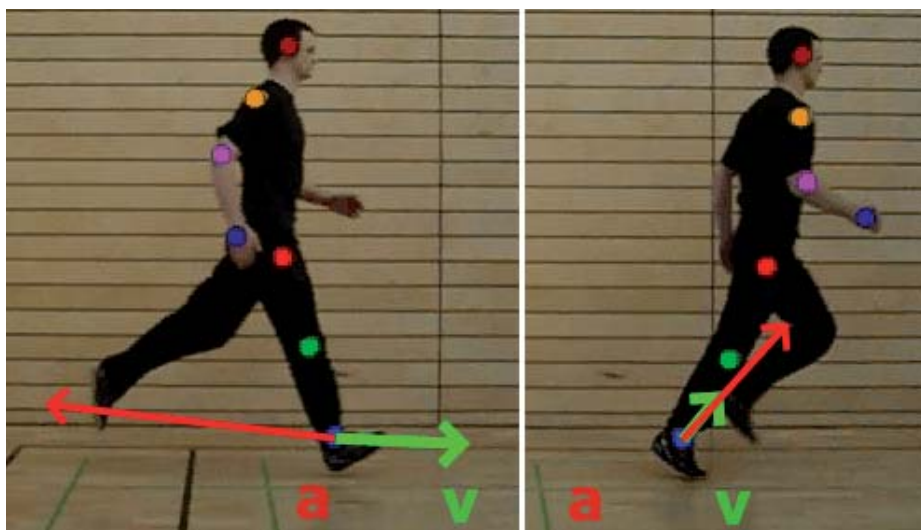


Abb. 11: Vertikale Geschwindigkeits- und Beschleunigungskomponente des Kopfes beim Joggen mit Näherungskurven für Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf

schwindigkeit des Fußes demnach größer sein als die des Kopfes. Also müssen die Füße im Gegensatz zum Kopf in horizontaler Richtung immer wieder stark schneller und langsamer werden. Während der Standphase ruht der Fuß kurzzeitig auf dem Boden. Im Anschluss daran wird er so stark beschleunigt, dass ein Überholen des Kopfes möglich ist. Vor und während dem Aufsetzen auf dem Boden muss diese Geschwindigkeit wieder abgebremst werden, was eine Beschleunigung in die entgegengesetzte Richtung bedeutet. In measure

dynamics kann man sich auf Knopfdruck einen Geschwindigkeits- und einen Beschleunigungspfeil an das analysierte Objekt anzeigen lassen, was sich hier für den Fuß anbietet (siehe Abb. 12). Man sieht dann, dass beim Schnellerwerden des Fußes die Beschleunigung eine Komponente in Richtung der Geschwindigkeit hat. Wird der Fuß langsamer, so hat die Beschleunigung eine Komponente gegen die Richtung der Geschwindigkeit. So kann das Verständnis für die Richtung von Größen vertieft werden.



**Abb. 12:** Geschwindigkeits- und Beschleunigungspfeil am Fuß beim Joggen: Beim Aufsetzen wird der Fuß abgebremst, beim Anheben wird er wieder schneller.



**Abb. 13:** Stroboskopbild zum Joggen mit Verbindungslinien und Pfeilen (in measure dynamics aus einem Video erzeugt)

### 3.3. Videoanalyse des gesamten Körpers

Im Rahmen von Arbeitsgruppen, „Jugend forscht“ oder Seminararbeiten der Oberstufe ist es auch möglich, mehr als nur einen Punkt des Körpers zu analysieren. Dazu bringt man farbige Kreise (etwa in der Größe einer CD) an verschiedenen Stellen des Körpers an. In measure dynamics ist es nun möglich, diese Punkte nach der Analyse miteinander zu verbinden. Abb. 13 zeigt eine joggende Person, bei der neun verfolgte Punkte durch Linien miteinander verbunden wurden, so dass ein Strichmännchen entsteht, welches sich im Video bewegt. Das Video wurde mit einem Filter aufgehellt und daraus das Stroboskopbild erzeugt. So können verschiedene Laufstile verglichen und analysiert werden.

### 3.4 Laufen über eine Kraftmessplatte

Beim Laufen über eine Kraftmessplatte müssen vor und nach der Platte mindestens vier Schritte ausgeführt werden und die empfohlenen Schrittlängenmarkierungen müssen bei größeren Lauf tempi weiter auseinander stehen (Bei einer erwachsenen Person wurde beim Joggen ein Ab-

stand von ca. 160 cm und beim Sprinten von 180 cm verwendet).

Abb. 14 zeigt die Normalkraft beim Joggen (Rückfußlaufen mit  $v_x \approx 2,5$  m/s) und Sprinten (Vorfußlaufen mit  $v_x \approx 6,8$  m/s). Beim Sprinten wirkt demnach in vertikaler Richtung eine fast dreimal so große Kraft auf den Fuß ein wie beim Stehen. Erkennbar ist außerdem die Verkürzung der Bodenkontaktzeit bei höherem Lauf tempo. Beim Sprinten mit maximalem Lauf tempo ist diese nur ca. halb so lang wie beim Joggen. Bei der ersten Kraftspitze beim Rückfußlauf („Impact Peak“) werden überwiegend passive Strukturen des Körpers belastet, wogegen beim eigentlichen Maximum die jeweilige Muskulatur kontrahiert und damit einen Abdruck vom Boden erzielt [6].

Abb. 15 zeigt die zu Abb. 14 gehörenden Querkraftverläufe, die gleichzeitig aufgezeichnet wurden. Hierbei entsprechen positive Messwerte einer Kraft vom Boden auf den Fuß in Bewegungsrichtung; negative Messwerte zeigen eine Kraft auf den Fuß gegen die Bewegungsrichtung an. Wie bei Bewegungen mit konstanter Ge-

schwindigkeit zu erwarten ist, ist das Kurvenintegral beim Joggen ungefähr 0 Ns. Beim Sprinten fallen dagegen sehr große beschleunigende Querkräfte auf. Für die Kurve in Abb. 15 wurde ein Integralwert von 7,17 Ns ermittelt.

### 3.5 Laufen mit einem Beschleunigungssensor

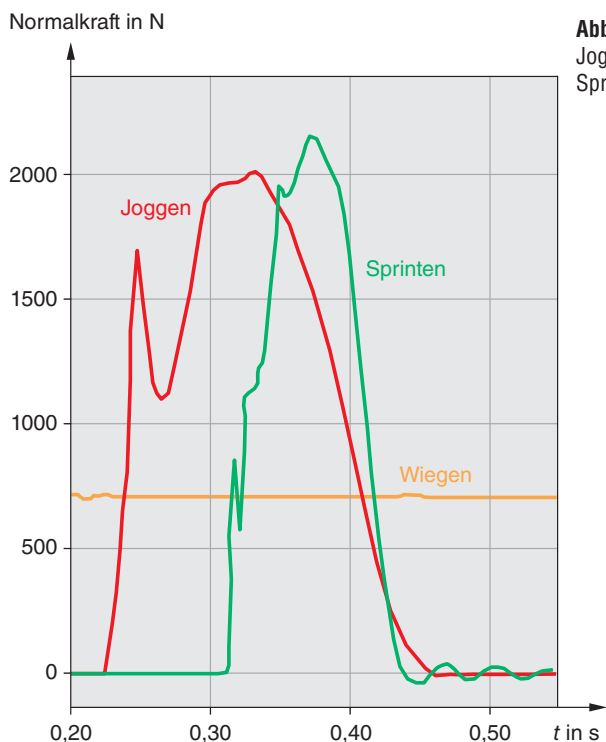
Um die Bewegung des Schwerpunktes beim Laufen zu untersuchen, kann ein Beschleunigungssensor am Bauch befestigt werden. Hier wurde der Sensor „Acceleration: 3D-Beschleunigung“ des Messwerterfassungssystems „Cobra4“ gewählt und mit dem „Cobra4 Wireless-Link“ (jeweils von PHYWE) gekoppelt, so dass die Messdaten des Sensors per Funk ohne störende Kabel an einen PC übertragen wurden, an dem der „Cobra4 Wireless Manager“ zum Empfang der Daten angeschlossen war [5]. Der Sensor sollte vor Messbeginn tarieren werden, gut befestigt sein und so orientiert, dass positive Werte eine Beschleunigung nach oben bedeuten.

Die Beschleunigungsverläufe beim Laufen hängen sehr stark vom jeweiligen Lauf tempo und dem Laufstil ab. Die Abb. 16 und 17 zeigen die vertikale Komponente der Beschleunigung beim Joggen, während Abb. 18 sie beim Sprinten mit ca. 6,8 m/s zeigt. Jeweils ergeben sich ungefähr periodische Verläufe. Während beim Gehen nur Beschleunigungswerte zwischen  $-0,4$  g und  $+0,8$  g auftreten, werden beim Joggen Werte von  $-2$  g bis  $+5$  g gemessen und beim Sprinten Werte von  $-3$  g bis  $+5$  g.

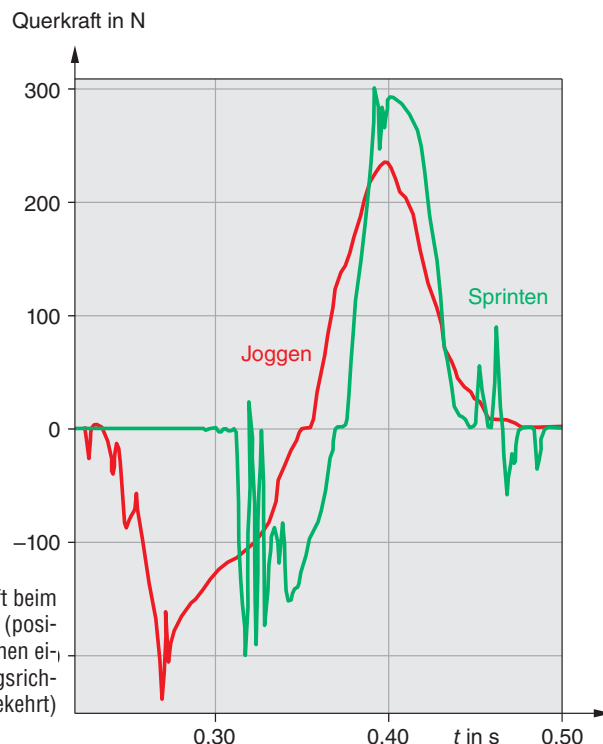
In Abb. 16 sieht man, dass sehr kurze Flugzeiten vorhanden sind (maximal 0,1 s), bei denen sich der Körper im freien Fall befindet. Hier wirkt nur die Erdbeschleunigung auf den Körper, weswegen ein Beschleunigungswert von  $-1$  g zu erwarten ist.

In Abb. 17 ist die Flugphase mit ca. 0,15 s etwas länger. Zu Beginn der Flugzeit fällt der Körper sogar stärker beschleunigt nach unten (bis zu  $-2$  g). Dies kann daran liegen, dass hier das Bein schnell nach oben gezogen wird (siehe Teilbild 5 im oberen Teil der Abb. 7), was eine Beschleunigung des Rumpfes nach unten zur Folge hat. Der Schwerpunkt des Körpers kann natürlich nur mit  $-1$  g fallen. In Abb. 18 werden beim Sprinten noch größere Werte erreicht (bis  $-3$  g). Hier werden die Beine in der Flugphase besonders stark gehoben und angewinkelt (siehe Teilbild 4 bis 6 im unteren Teil der Abb. 7).

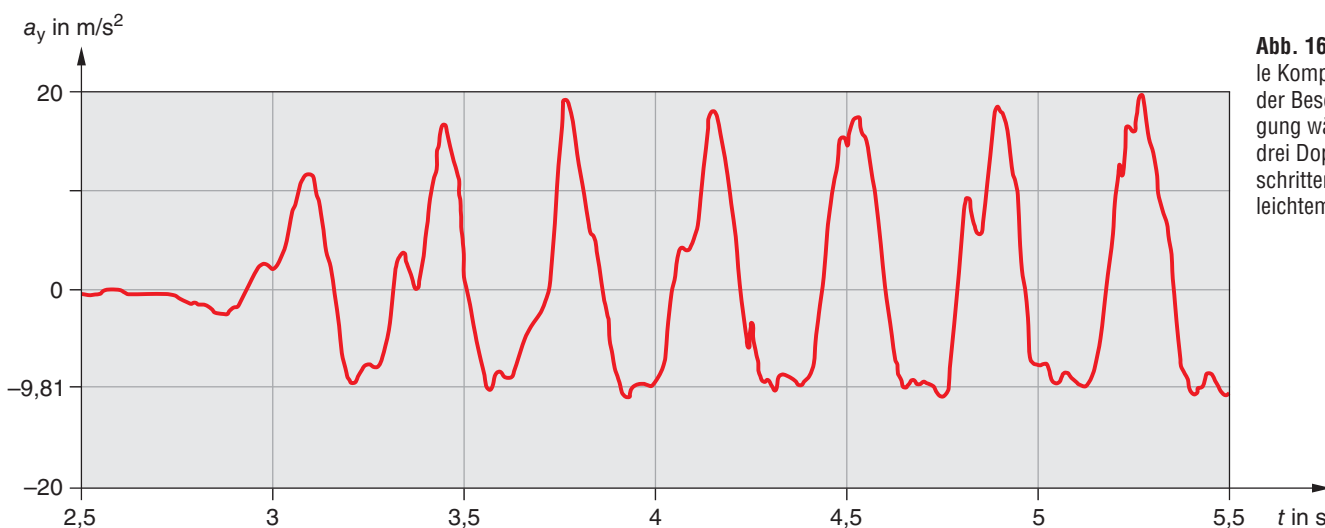
Die großen Werte für die Beschleunigungskomponente treten beim bzw. kurz nach dem Fußaufsatz auf. In Abb. 17 und



**Abb. 14:** Normalkraft beim Joggen ( $v_x \approx 2,5$  m/s) und Sprinten ( $v_x \approx 6,8$  m/s)



**Abb. 15:** Querkraft beim Joggen und Sprinten (positive Werte entsprechen einer Kraft in Bewegungsrichtung und umgekehrt)



**Abb. 16:** Vertikale Komponente der Beschleunigung während drei Doppelschritten bei leichtem Joggen

18 setzte die Versuchsperson den Fuß mit annähernd gestrecktem Fuß auf. Diese Lauftechnik ist beim Rückfußlaufen üblich [21, S. 91], führt aber zu starken Belastungen im Stütz- und Bewegungssystem. Über den gestreckten Fuß wird die Erschütterung relativ ungedämpft auf die Wirbelsäule übertragen. Vor Profifußballspielen wird der Rasen stark gewässert; dieser weichere Boden, der nachgibt, reduziert diese Beschleunigungsspeaks.

#### 4 Fazit

Aus physikalischer Sicht sind die beiden Fortbewegungsarten beim Fußballspiel – Gehen und Laufen – sehr komplexe Bewegungen. Trotzdem können etliche Aspekte in der Schule behandelt und damit das Verständnis für die Mechanik vertieft werden. Man stellt dabei fest, dass beim Fußball-

spiel die Muskeln während dem vielen Gehen und Laufen viel zu tun haben und es vor allem beim Sprinten zu starken Belastungen der Gelenke kommt.

Zur Behandlung im Unterricht liegen verschiedenste Messwerterfassungsmöglichkeiten vor, wie Kraftmessplatte, Videoanalyse und Beschleunigungssensoren. Die Daten, die mithilfe der Videoanalyse gewonnen wurden, sind dabei am vielfältigsten im Unterricht einsetzbar. Das verwendete Programm *measure dynamics* ist einfach zu bedienen, bietet aber gleichzeitig vielfältige Visualisierungsmöglichkeiten für physikalische Sachverhalte. Bei den heute in Smartphones stets vorhandenen Beschleunigungssensoren ist es dagegen am schwierigsten, gute Diagramme aufzunehmen, die im Unterricht ergiebig auswertbar sind.

#### Literatur

- [1] L. Hoffmann, P. Häußler & M. Lehrke, M., *Die IPN-Interessenstudie Physik*, Kiel: IPN, 2009
- [2] M. Weidt, *Gehen, Laufen, Springen und weitere Fortbewegungsarten des Menschen im Physikunterricht*, Staatsexamensarbeit, Universität Würzburg, 2011, <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/gehen.htm>
- [3] <http://www.bundesliga.de/de/statistik/spieltag/index.php>
- [4] P. Krustup, J. J. Nielsen, B. R. Krustup, J. F. Christensen, H. Pedersen, M. B. Randers, P. Aagaard, A. M. Petersen, L. Nybo & J. Bangsbo, *Recreational soccer is an effective health-promoting activity for untrained men*, *British Journal of Sports Medicine* 43(11), 2009
- [5] M. Weidt & T. Wilhelm, *Bewegungen des eigenen Körpers – Möglichkeiten der Messwert-erfassung im Vergleich*, in: *PhyDid-B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Münster 2011*,

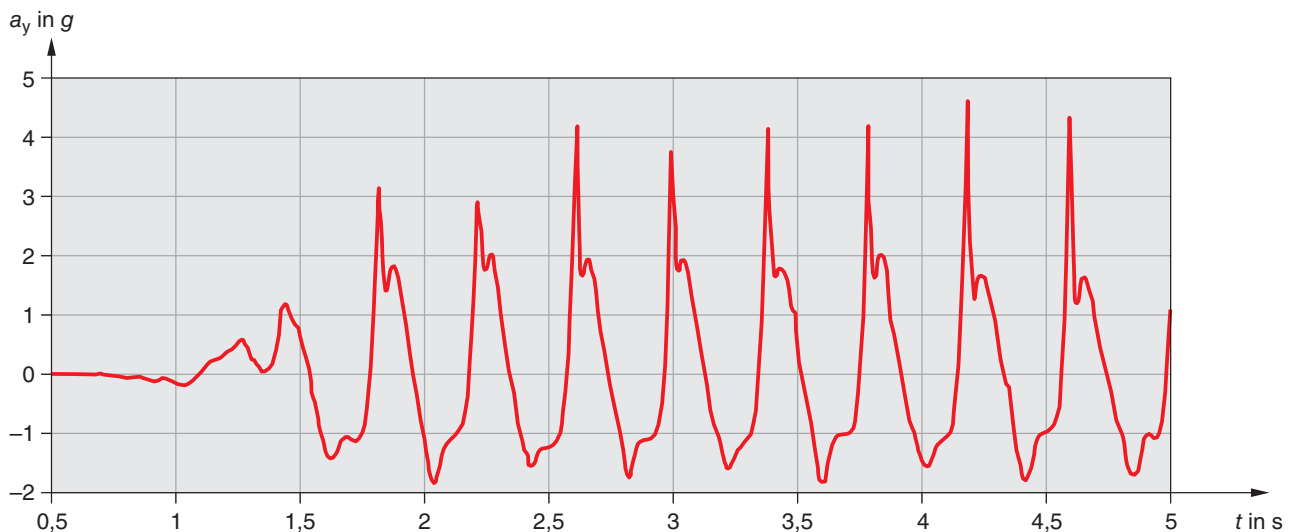


Abb. 17: Vertikale Komponente der Beschleunigung einer anderen Person während vier Doppelschritten bei Joggen mit ca. 2,5 m/s

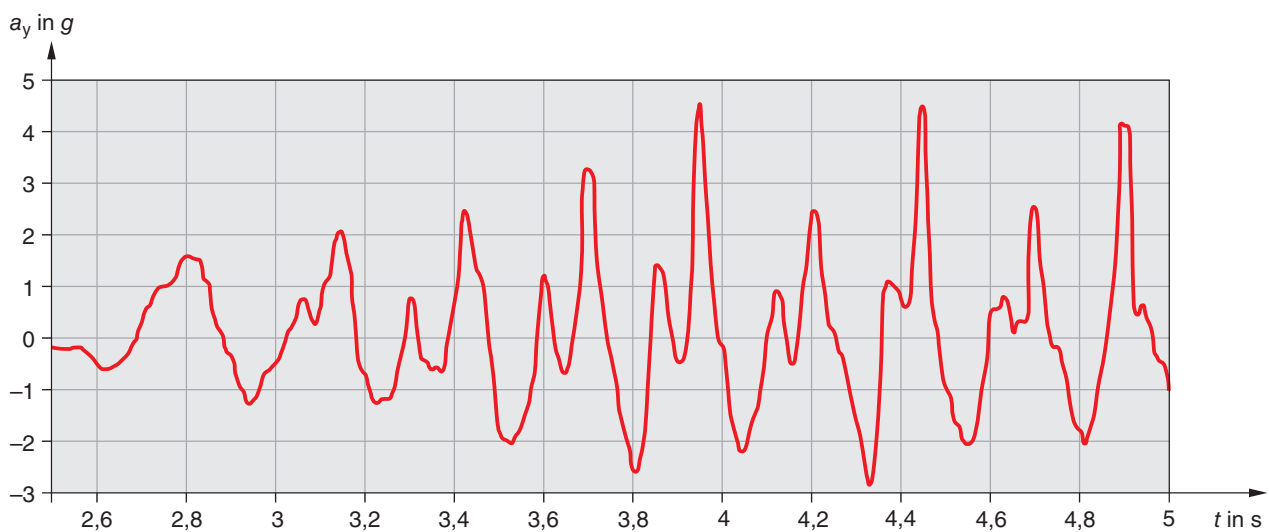


Abb. 18: Vertikale Komponente der Beschleunigung während vier Doppelschritten beim Sprinten mit ca. 6,8 m/s

2011, <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/260/415>

[6] I. Kramers-de Quervain, A. Stacoff & E. Stüssi, Gehen und Laufen, in: A. Gollhofer & E. Müller, *Handbuch Sportbiomechanik*, Schorn-dorf: Hofmann, S. 192-213, 2009

[7] J. Rose & J. G. Gamble, *Human Walking*, 2. Auflage, Baltimore: Williams & Wilkins, 1994

[8] J. Pery, *Ganganalyse*, München: Urban & Fischer, 2003

[9] T. Wilhelm, T. Gessner, M. Suleder & D. Heuer, Sportaktivitäten vielseitig analysieren und modellieren – Video und Messdaten multimedial aufbereitet, in: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*, 2/52, 2003, S. 23-30

[10] S. Seidel, C. Waltner & H. Wiesner, Kräfte messen beim Gehen und Laufen, in: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*, 1/58, 2009, S. 23-26.

[11] D. A. Winter, *The biomechanics and motor control of human gait*, Waterloo, Ontario: University of Waterloo Press, 1988

[12] M. Suleder & T. Wilhelm, Stroboskopbilder in Echtzeit, in: *Phy-Did-B – Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Jena 2013*, [www.phydid.de](http://www.phydid.de)

[13] Die Software wird für nichtkommerzielle Zwecke unter <http://www.thomas-wilhelm.net/software.htm> und <http://www.videoanalyse.lima-city.de> kostenlos zur Verfügung gestellt.

[14] H. J. Schlichting & B. Rodewald, Springen, Gehen, Laufen, in: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik* 37/5, 1988, S. 12 – 14

[15] L. Mathelitsch & S. Thaller, *Sport und Physik*, *Praxis Schriftenreihe Physik*, Köln: Aulis-Verlag Deubner, 2008

[16] E. Schwaiger, *Größenordnungen in der Natur*, Köln: Aulis-Verlag Deubner, 1994

[17] R. Müller, Die Physik des Gehens im Unter-richt, in: *Naturwissenschaften im Unterricht* 1+2/05 (2005), S. 40

[18] B. Watzka, S. Scheler & T. Wilhelm: Beschleunigungssensoren, in: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 61, Nr. 7, 2012, S. 25 - 33

[19] S. Scheler & T. Wilhelm, Neue Möglich-keiten durch Funksensoren, in: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 58, Nr. 7, 2009, S. 28 - 35

[20] T. Wilhelm, Chancen und Probleme von Be-schleunigungssensoren, in: S. Bernholt (Hrsg.),

*Inquiry-based learning - Forschendes Lernen, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Phy-sik, Jahrestagung in Hannover 2012, Band 33, Münster, 2013, S. 443 - 445*, [http://www.gdcp.de/images/tagungsbaende/GDCP\\_Band33.pdf](http://www.gdcp.de/images/tagungsbaende/GDCP_Band33.pdf)

[21] G. Neumann & K. Hottenrott, *Das große Buch vom Laufen*, 2. Auflage, Aachen: Meyer & Meyer, 2005

[22] M. Michel & T. Wilhelm, Dynamik mit Hochgeschwindigkeitsvideos, in: *Praxis der Na-turwissenschaften – Physik in der Schule* 59, Nr. 7, 2010, S. 23 – 30

[23] M. Sauer: Ein Tutorial zu measure dynamics, [www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/tutorial.htm](http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/tutorial.htm)

#### Anschriften der Verfasser

StRef Martin Weidt, Röntgen-Gymnasium Würzburg, Sanderring 8, 97070 Würzburg, E-Mail: [martin.weidt@googlemail.com](mailto:martin.weidt@googlemail.com); Prof. Dr. Thomas Wilhelm, Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main, E-Mail: [wilhelm@physik.uni-frankfurt.de](mailto:wilhelm@physik.uni-frankfurt.de), [www.thomas-wilhelm.net](http://www.thomas-wilhelm.net)