

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 gestellt. Vielen Dank für die Erlaubnis.

Die exakte Quellenangabe des Zeitschriftenartikels ist:

ZIMMERMANN, F.; WILHELM, T.

Fußball im Physikunterricht – gemessen mit dem Computer

Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 63, Nr. 1, 2014, S. 9 - 17

Fußball im Physikunterricht – gemessen mit dem Computer

F. Zimmermann u. Th. Wilhelm

1 Messwerterfassung mit dem Computer

Bei vielen Themen der Mechanik ist es möglich, sie mit Fußball als alltagsbezogenes Anwendungsbeispiel zu verbinden. Um damit Interesse bei den Schülern zu fördern, reicht es sicher nicht, klassische Aufgaben in einen Fußballkontext einzubetten. Viele echte Untersuchungen und Experimente mit dem Fußball sind heute möglich, wenn man den Computer als Messhilfsmittel verwendet. Dazu eignen sich sowohl Sensoren wie Kraftmessplatte und Beschleunigungssensor als auch Videoanalyseprogramme. Dabei können Schüler aktiv am Experiment teilnehmen und auch ein fächerübergreifender Unterricht mit den Fächern Sport und der Biologie ist möglich, bei welchem primär die Bewegungsabläufe im Vordergrund stehen.

2 Kraft beim Aufprallen auf dem Boden

Fällt ein Ball zu Boden, so übt dieser beim Aufkommen kurzzeitig eine Kraft auf den Boden aus sowie der Boden eine gleich große Kraft auf den Ball. In diesem Zusammenhang spricht man auch vom so genannten Kraftstoß:

$$\int_{t_A}^{t_E} \vec{F} dt$$

Im Kraft-Zeit-Diagramm ist der Betrag des Kraftstoßes die vom Graphen eingeschlossene Fläche. Die mittlere Kraft während des Kontakts mit dem Boden lässt sich daraus berechnen:

$$\vec{F} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_A}^{t_E} \vec{F} dt = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \frac{m \Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

Schon in der Sekundarstufe I kann dies in elementarisierter Form verwendet werden:

$$\vec{F}_{\text{Mittel}} \Delta t = m \Delta \vec{v}.$$

Diese Gleichung kann die zentrale Gleichung im Mechanikunterricht der Sekundarstufe I sein [1+2].

Das Kraft-Zeit-Diagramm lässt sich experimentell leicht ermitteln. Zunächst wird auf dem Klassenzimmerboden eine Kraftmessplatte gelegt und mithilfe eines USB-Links am Computer angeschlossen.

In diesem Fall wurde eine Kraftmessplatte der Lehrmittelfirma *Pasco* und die Software *DataStudio* herangezogen. Es wird ein Ball aus ungefähr einem Meter Höhe auf die Platte fallen gelassen und der Kraftstoß am Computer aufgenommen. Wichtig ist, dass bei der Kraftmessplatte eine möglichst große Abtastrate eingestellt wird, da die Kontaktzeit des Balles mit der Platte nur im Bereich von Millisekunden liegt.

Ein Graph wie in Abb. 1 kann zur Ermittlung verschiedener Werte genutzt werden. Die Kontaktzeit in diesem Versuch betrug $\Delta t = 0,007$ s und die maximal wirkende Kraft $F_{\text{max}} = 1200$ N. Des Weiteren kann über die Mittelwertfunktion von *DataStudio* der Mittelwert der Kraft zu $F_{\text{Mittel}} = 505$ N ermittelt werden.

Aus den gewonnenen Messwerten und der Masse des Balles $m = 411$ g kann die Geschwindigkeitsänderung Δv berechnet werden $\Delta v = F_{\text{Mittel}} \Delta t / m = 8,6$ m/s = 31 km/h und daraus die mittlere Beschleunigung $a_{\text{Mittel}} = \Delta v / \Delta t \approx 1200$ m/s². Aus maximaler bzw. mittlerer Kraft sowie der Masse kann auch direkt die maximale Beschleunigung $a_{\text{max}} \approx 2900$ m/s² bzw. die mittlere Beschleunigung $a_{\text{Mittel}} \approx 1200$ m/s² berechnet werden.

Verwendet wurde hier ein Fußball mit einem Überdruck von 1,0 bar. Bei einem

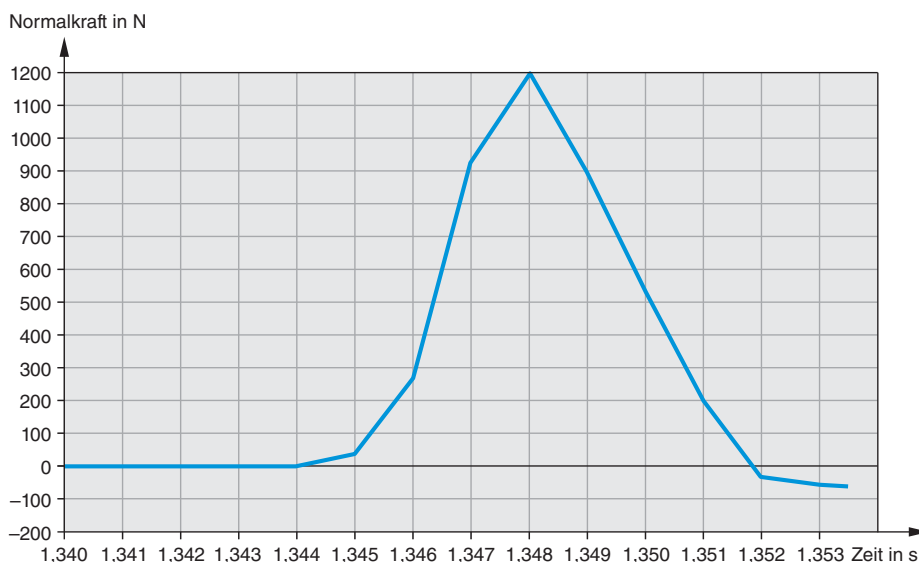
Ball mit nur 0,2 bar Überdruck war der Kraftstoß deutlich kleiner und die Kontaktzeit deutlich größer.

Die durchschnittliche Kraft kann auch per Videoanalyse ermittelt werden. Dabei wird eine Hochgeschwindigkeitsaufnahme [3] von dem auf den Boden aufprallenden Ball erstellt und mithilfe einer Videoanalysesoftware die Geschwindigkeit unmittelbar vor sowie nach dem Kontakt und daraus die Geschwindigkeitsänderung Δv bestimmt. Alternativ kann man anstatt der Geschwindigkeiten auch die Ausgangshöhe des Balles vor dem Fallenlassen und die Sprunghöhe nach dem Aufprall messen und über Energieerhaltung auf die Geschwindigkeiten kurz vor und nach dem Aufprall rückschließen. Macht man nun noch eine Hochgeschwindigkeitsaufnahme mit 1000 fps vom Ball beim Aufprall, kann im Video die Anzahl der Bilder ermittelt werden, bei welchen der Ball im Kontakt zum Boden steht und somit die Kontaktzeit Δt .

3 Energien beim springenden Fußball

Beim herunterfallenden Fußball kann man auch die Energien betrachten. Dazu wurde der Fußball mit einer Casio-Hochgeschwindigkeitskamera (ca. 100 €) mit 210 fps aufgenommen [3] und jedes fünfte Bild ausgewertet. In Abb. 2 sieht man wie

Abb. 1: Kraft-Zeit-Diagramm beim Aufprall eines Fußballs auf dem Boden. Die Fallhöhe beträgt 1 m.



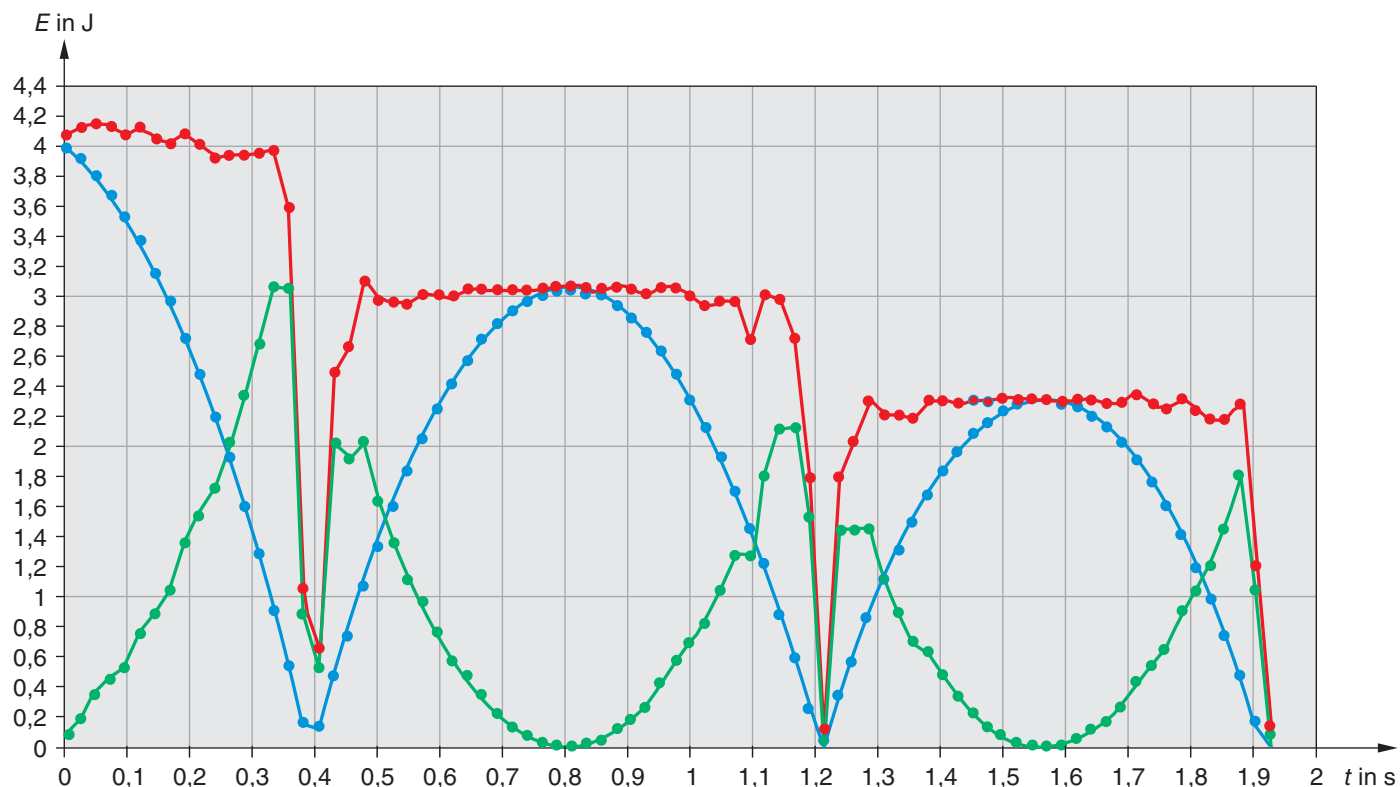


Abb. 2: Energien beim fallenden und hochspringenden Fußball: Potentielle Energie (blau), kinetische Energie (grün) und Summe (rot)

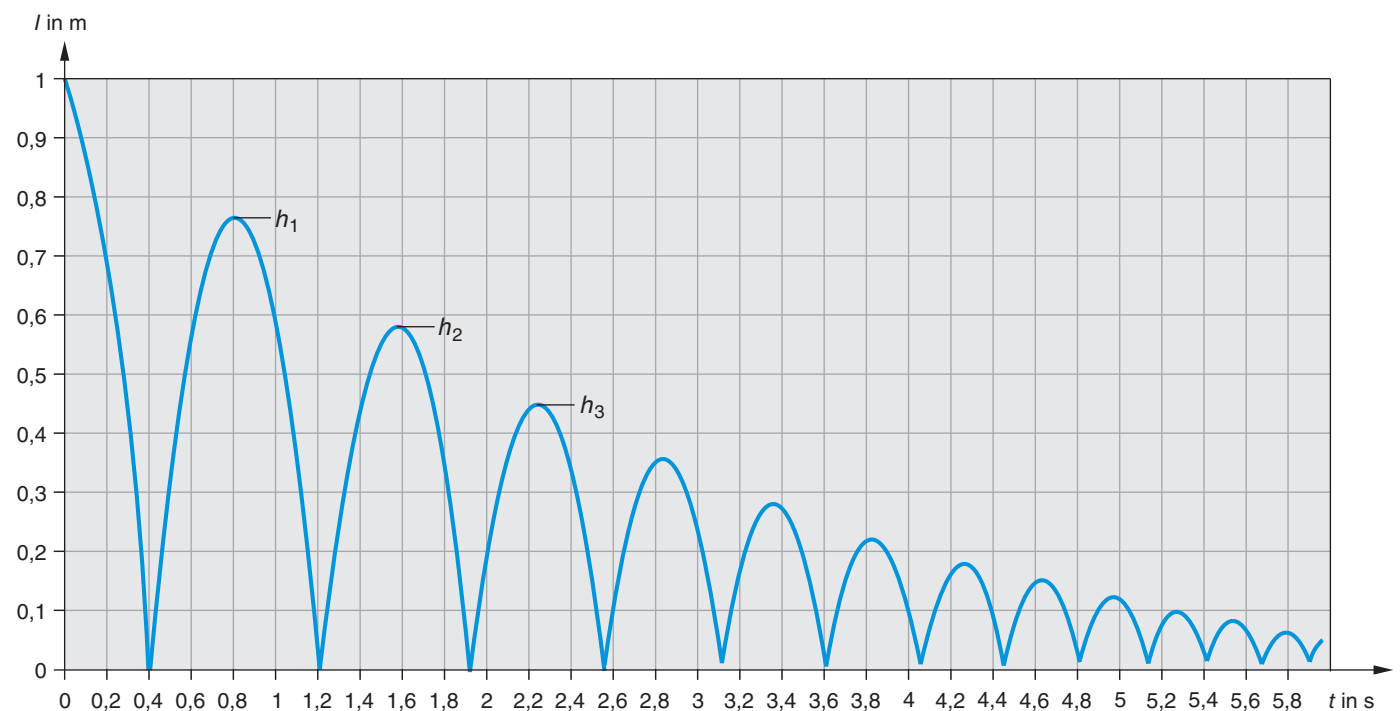


Abb. 3: Höhen zur Auswertung

die Gesamtenergie während jeder Fallbewegung konstant bleibt, aber nach jedem Stoß mit dem Boden ein Teil der Energie in eine nicht gemessene Form übergegangen ist. Die Höhen der Umkehrpunkte nehmen dadurch im Laufe der Zeit ab (siehe Abb. 3). Während dem Stoß selbst scheint die Energie kurzzeitig ganz zu verschwinden, da die Spannenergie nicht gemessen werden kann, in der die Energie kurz zwischengespeichert wird.

Wie viel Energie pro Stoß in eine nicht nutzbare Form übergeht, kann berechnet werden, wenn man den Elastizitätskoeffizienten e kennt. Der Elastizitätskoeffizient gibt an, welcher Anteil des Betrages des Impulses erhalten bleibt:

$$e = \frac{|p_{\text{nachher}}|}{|p_{\text{vorher}}|} = \frac{|v_{\text{nachher}}|}{|v_{\text{vorher}}|}$$

Berücksichtigt man die Energieerhaltung vor und nach dem Stoß, folgt:

$$e^2 = \frac{h_{n+1}}{h_n} \Rightarrow e = \sqrt{\frac{h_{n+1}}{h_n}}$$

Dabei gibt v_{vorher} die Geschwindigkeit direkt vor dem Auftreffen, v_{nachher} die Geschwindigkeit direkt nach dem Auftreffen auf den Boden an. h_n ist die maximal erreichte Höhe nach dem n -ten Aufprall des Balles.

Während e den Anteil des Impulsbetrages bzw. Geschwindigkeitsbetrages angibt,

der nach dem Aufprall erhalten bleibt, gibt e^2 Auskunft über den Anteil der erhaltenen Energie und über die erreichte Höhe h_{n+1} in Relation zur Ausgangshöhe h_n vor dem Aufprall. Die Elastizität e lässt eine Klassifizierung von Stößen zu. Für $e = 1$ spricht man von einem elastischen, für $e = 0$ von einem vollständig inelastischen Stoß. Die meisten Stöße liegen zwischen den beiden Werten. Aufgrund der Energieerhaltung muss bei einem inelastischen Stoß ein Teil der kinetischen Energie in eine andere Energieerscheinungsform umgewandelt werden. Diese sind zum Beispiel Wärmeenergie oder Rotationsenergie.

Im hier vorliegenden Versuch wurde der Ball aus etwa einem Meter Höhe fallen gelassen und die Sprunghöhen h_n nach dem n -ten Aufprall wurden mithilfe des Videoanalyseprogramms *measure dynamics* ermittelt (siehe Abb. 3). Dabei erhält man den gleichen Wert für e , egal für welchen Sprung man sich entscheidet.

Es können verschiedene Messreihen erstellt werden, welche einen Rückschluss auf die Elastizität e des Balles in Abhängigkeit von Luftdruck im Ball, vom Untergrund (Laminat, Rasen) oder von der Qualität (Spielball, Trainingsball) des Balles ermöglichen. Die Messungen auf Laminatboden ergaben, dass die Elastizität e mit zunehmendem Überdruck im Ball zunimmt, wobei ab Überdrücken über 0,8 bar kein signifikanter Anstieg mehr zu erkennen ist (siehe Abb. 4). Des Weiteren besteht vor allem bei geringem Überdruck eine Diskrepanz der Elastizitäten zwischen Spielball und Trainingsball, welche sich bei hohem Überdruck jedoch angleichen. Die Messungen auf verschiedenen Untergrund ergaben, dass auf Rasen die Elastizität e deutlich geringer ist als auf Laminat. Für den Spielball wurde zum Beispiel auf Laminat bei einem Überdruck von 1,0 bar $e = 0,88$ ermittelt, wohingegen bei gleichem Druck auf Rasen ein Wert von $e = 0,73$ erreicht wurde.

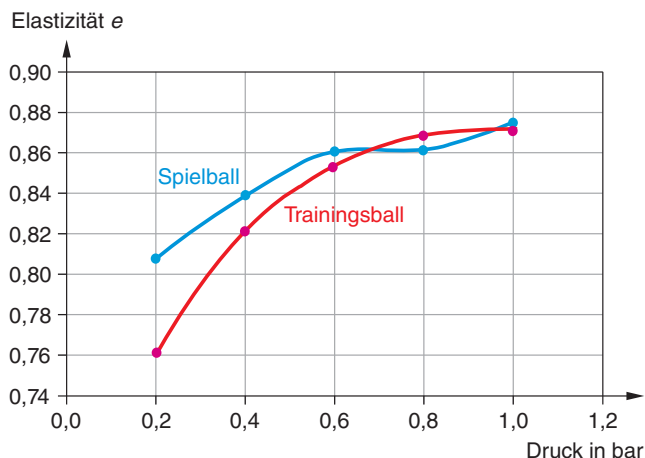


Abb. 4: Elastizität e in Abhängigkeit vom Überdruck

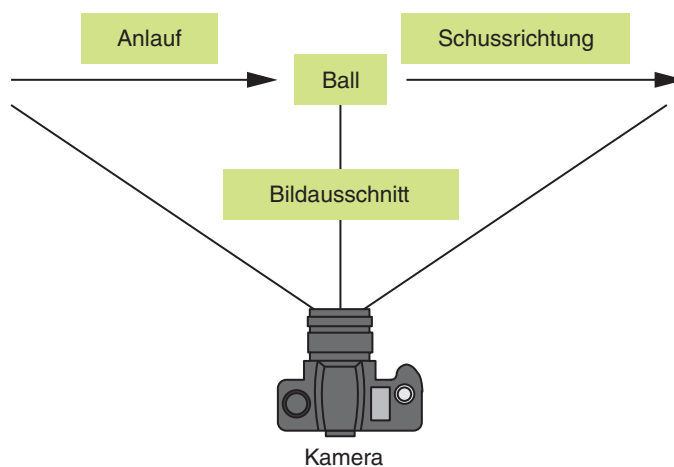


Abb. 5: Skizze vom Versuchsaufbau

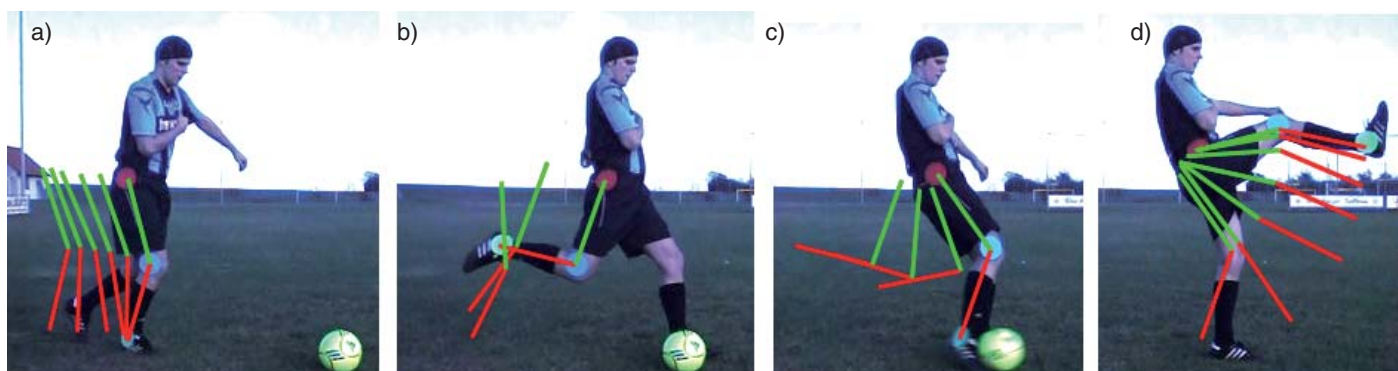
4 Bewegungsanalyse beim Vollspannschuss

Ein Fußball fällt aber selten einfach herunter, sondern wird geschossen. Die Unterteilung der verschiedenen Schussarten beim Fußball erfolgt über den Teil des Fußes, der beim Schuss mit dem Ball im Kontakt steht [4]. Damit lassen sich die wichtigsten Schusstechniken beim Fußball wie folgt untergliedern: Innenseitstoß, Innenspannstoß, Außenspannstoß, Vollspannstoß und Sonderformen (Sohle, Fußspitze, Hacke). Die verschiedenen Techniken finden je nach Spielsituation oder taktischer Überlegung ihre Anwendung. Sie ermöglichen diverse Eigenschaften des

Schusses, wie Richtung, Höhe, Tempo und Drall zu variieren.

Da beim Vollspannstoß die höchsten Balltempi erreicht werden, wird diese Technik häufig zum Torschuss genutzt, aber auch beim Freistoß, beim Abschlag, beim Abstoß oder bei langen Pässen [4]. Für einen harten Vollspannstoß ist es notwendig, dass das Spielbein vorbereitend weit ausholt. Beim Schuss selbst ist der Ball im Bereich der Mittelfußknochen zu treffen, da diese ein relativ festes Widerstandslager darstellen. Nach dem Treffen des Balls sollte das Abbremsen des Spielbeins nicht abrupt erfolgen. Wird das Kniegelenk beim Ausschwingen angewinkelt, so trägt dies

Abb. 6: Vollspannstoß in *measure dynamics*: a) Erster Schritt des Anlaufs b) Ausholen beim Vollspannstoß mit Anlauf c) Schussvorgang beim Vollspannstoß d) Ausschwingung nach dem Schuss



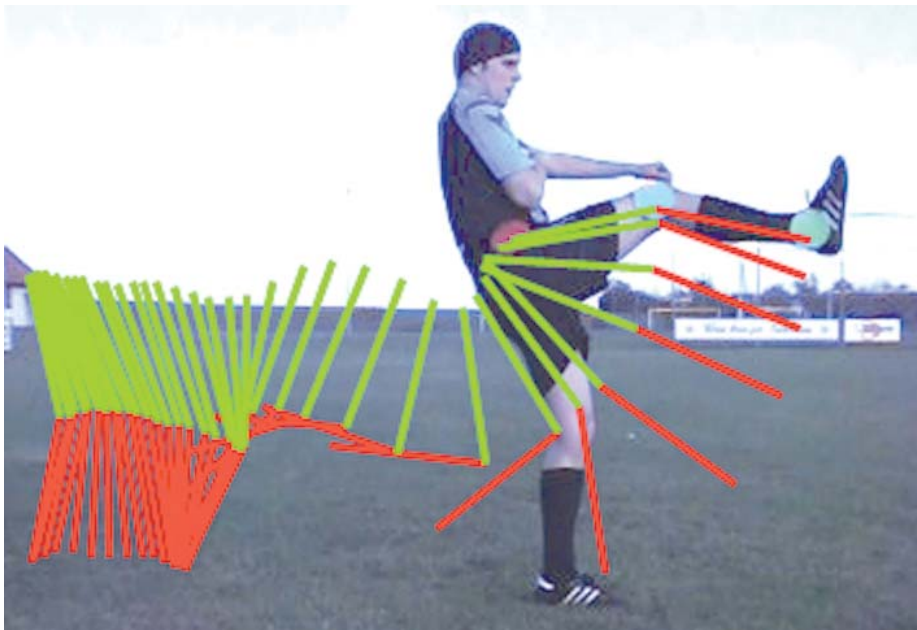


Abb. 7: Gesamter Schussvorgang beim Spannstoß

zum kontrollierten Abbremsen des Unterschenkels und Fußes bei.

Diesen Vollspannstoß kann man nun mithilfe der Videoanalyse veranschaulichen und kinematisch betrachten. Dazu werden zunächst Tonpapierkreise verschiedener Farben mit Klebeband am Schützen angebracht – je ein Kreis an Knöchel, Knie und Hüftgelenk. Wichtig ist, dass die Kreise sich farblich von der Kleidung abheben und in der Seitenansicht des Spielers ganz

zu sehen sind. Die Kamera muss so positioniert werden, dass sowohl ein bis zwei Meter Anlauf, als auch der Ausschwing des Fußes im Bildausschnitt erfasst sind (siehe Abb. 5).

Bei der Auswertung des Videos wird nun eine Bewegungsanalyse der einzelnen Farbkreise und somit der einzelnen Körperteile durchgeführt. Mithilfe von Verbindungslinien zwischen den erfassten Punkten kann der Bewegungsablauf sichtbar

gemacht werden (siehe Abb. 6).

In Abb. 6a macht beim Anlauf das rechte Bein des Schützen einen kleinen Schritt vorwärts. In der Folge bewegt der Spieler seinen linken Fuß (Standfuß) knapp links neben den Ball und der rechte, zu analysierende Fuß holt aus (siehe Abb. 6b). Das Spielbein holt weit aus und ist im Knie angewinkelt. Auf die Ausholphase folgt der Schussvorgang selbst. Da sich beim Schuss der Fuß sehr schnell bewegt, ist es nötig, für die Verbindungslinien die Schrittweite so zu ändern, dass eine ausreichende Anzahl an Linien gezeigt wird (siehe Abb. 6c). Es ist ersichtlich, dass sich beim Schussvorgang selbst zunächst nur der Oberschenkel bewegt und erst später der Unterschenkel (siehe Abb. 6c). Dieser Vorgang bewirkt eine Art „Schleuderbewegung“ des Fußes, wodurch der Fuß möglichst stark beschleunigt wird. Letztendlich ist in Abbildung 6d die Ausschwingphase dargestellt. Dabei wird das Knie leicht angewinkelt. Die Gesamtbewegung ist in Abb. 7 zu sehen.

Weiterhin bietet die Videoanalyse die Möglichkeit zur Betrachtung der Geschwindigkeitskomponente und Beschleunigungskomponente in Schussrichtung beim Vollspannstoß (siehe Abb. 8). Beim Auftaktschritt wird der Fuß erst leicht in x-Richtung schneller und dann leicht abgebremst, bis der Fuß wieder zum Stehen kommt. Zu Beginn der Ausholpha-

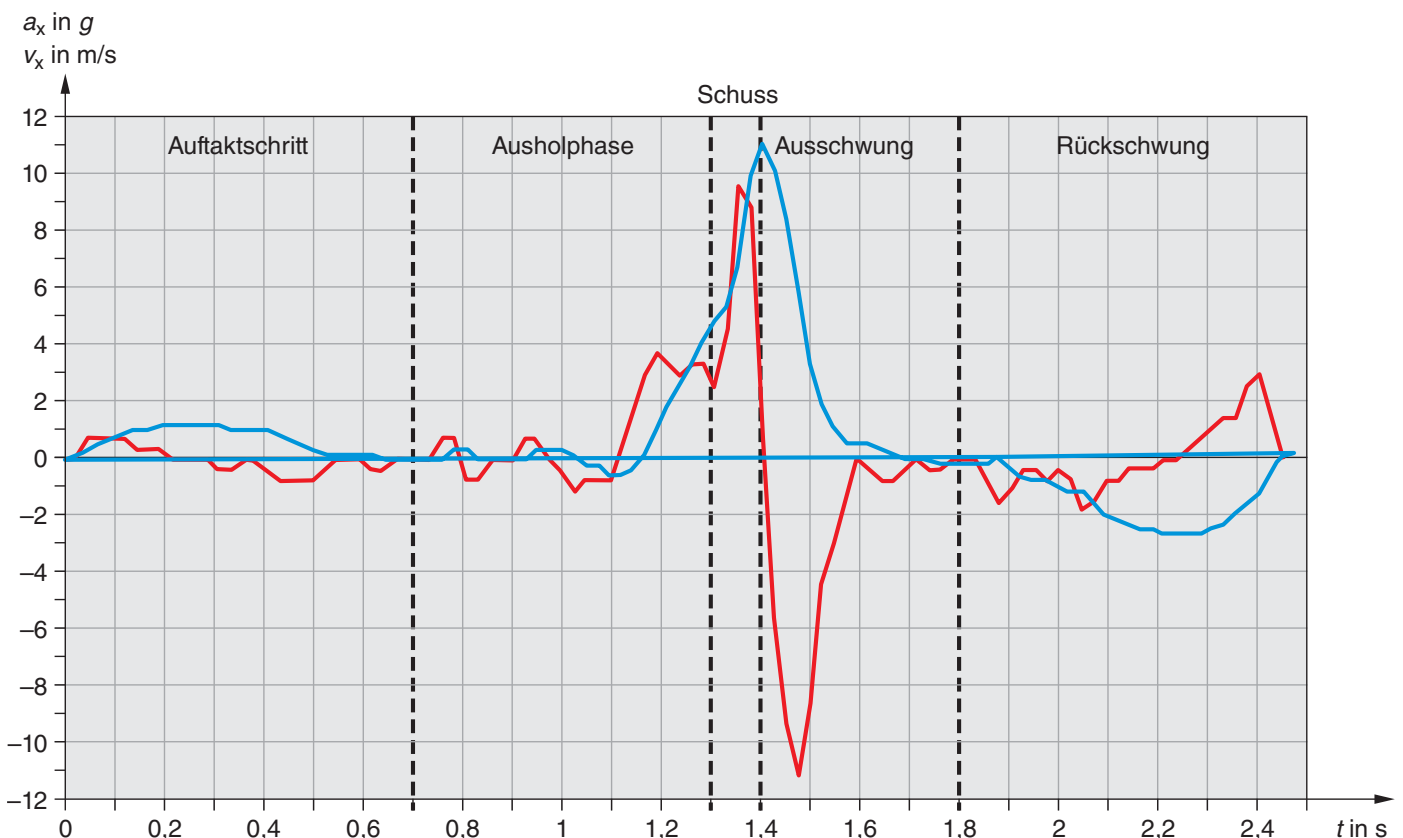


Abb. 8: Geschwindigkeitskomponente des Fußes in x-Richtung (blau) und Beschleunigungskomponente des Fußes in x-Richtung (rot) beim Vollspannstoß

se steht der Fuß am Boden, weshalb dessen Tempo bei $t = 0,5$ s bis $t = 1,05$ s in etwa null ist. Durch die Ausholbewegung wird der Fuß vorerst leicht in negative x -Richtung beschleunigt, wodurch auch die x -Geschwindigkeitskomponente negativ wird. In der Schussphase selbst wird der Fuß stark in x -Richtung beschleunigt, wodurch er enorm schnell wird (bis 40 km/h). Direkt nach dem Schuss wird der Fuß stark abgebremst (negative Beschleunigungswerte) und erreicht beim Zeitpunkt $t = 1,7$ s seinen höchsten Punkt, bei dem er kurzzeitig zum Stehen kommt. Der restliche Verlauf des Graphen beschreibt die Bewegung des Fußes von diesem Punkt bis zurück in den Stand. Dabei erhält der Fuß eine Geschwindigkeitskomponente in negative x -Richtung. Kurz vor dem Stillstand des Fußes wird dieser wieder abgebremst, was durch die positiven Beschleunigungswerte (Beschleunigung gegen die Bewegungsrichtung) zwischen $t = 2,25$ s und $t = 2,4$ s ersichtlich ist.

5 Beschleunigung beim Innenseitstoß

Im Spiel wird häufig der Innenseitstoß verwendet [4]. Er ist zwar nicht besonders hart, dafür aber sehr präzise. Aufgrund dieser Eigenschaften wird der Innenseitstoß

zum Zuspiel über kurze Entfernungen genutzt. Der Nachteil dieser Technik liegt darin, dass die Schusshärte gering ist und die Richtung des Schusses früh zu erkennen ist.

Der Bewegungsablauf [5] beginnt mit der Ausholphase, bei der die Fußspitze des Standbeins in Stoßrichtung zeigt und das Spielbein im Knie leicht angewinkelt ist. Während der Kontaktphase ist die Fußspitze des Spielbeins nach außen gewinkelt und in Richtung Schienbein angezogen. Das Spielen des Balls erfolgt direkt neben dem Standbein, wobei der Ball in der Mitte getroffen wird. Zuletzt schwingt das Spielbein dem Ball nach.

Die einzelnen Phasen des Schusses können mithilfe einer Beschleunigungsmessung des Fußes nachgewiesen werden. Dazu wurde am Schussfuß der 3D-Beschleunigungssensor aus dem System *Cobra4* von *Phywe* angebracht [6]. Zusätzlich wird eine Videoaufnahme angefertigt, um die Phasen des Schusses leichter zuordnen zu können. Wie in Abb. 5 soll der Spieler beim Schuss in der Mitte des Bildfeldes stehen.

Zur Interpretation des Graphen ist es wichtig, dass die Schüler nicht meinen, eine positive Beschleunigung bedeute

Schnellerwerden und eine negative Langsamerwerden. Stattdessen sollten sie wissen, dass ein Körper schneller wird, wenn die Beschleunigung in Bewegungsrichtung zeigt, und langsamer, wenn sie gegen die Bewegungsrichtung geht. Außerdem ist zu bedenken, dass das System *Cobra4* in Bezug zum aufgedruckten Koordinatensystem leider falsche, nämlich entgegengesetzte Vorzeichen ausgibt.

In dem Graphen aus der Software *measure* (siehe Abb. 9) ist zu entnehmen, dass während der Ausholphase der Fuß nach links schneller wird. Die entstandene Bewegung nach links muss dann abgebremst werden (Beschleunigung nach rechts) und der Fuß dann lange weiter stark nach rechts beschleunigt werden (hier bis ca. 50 m/s^2). Nur während des Kontakts mit dem Ball wird der Fuß kurz abgebremst, was im Graph durch einen kleinen Peak im negativen Bereich zu erkennen ist. Dieser unterbricht jedoch nur kurzzeitig die Beschleunigung in Schussrichtung, welche noch kurze Zeit nach dem Schuss andauert. Nach dem Schuss wird der Fuß abgebremst und nach Erreichen des höchsten Punktes (bei etwa $t = 1,1$ s) kurzzeitig weiter nach links beschleunigt, damit er sich in Richtung der ursprünglichen Ausgangsla-

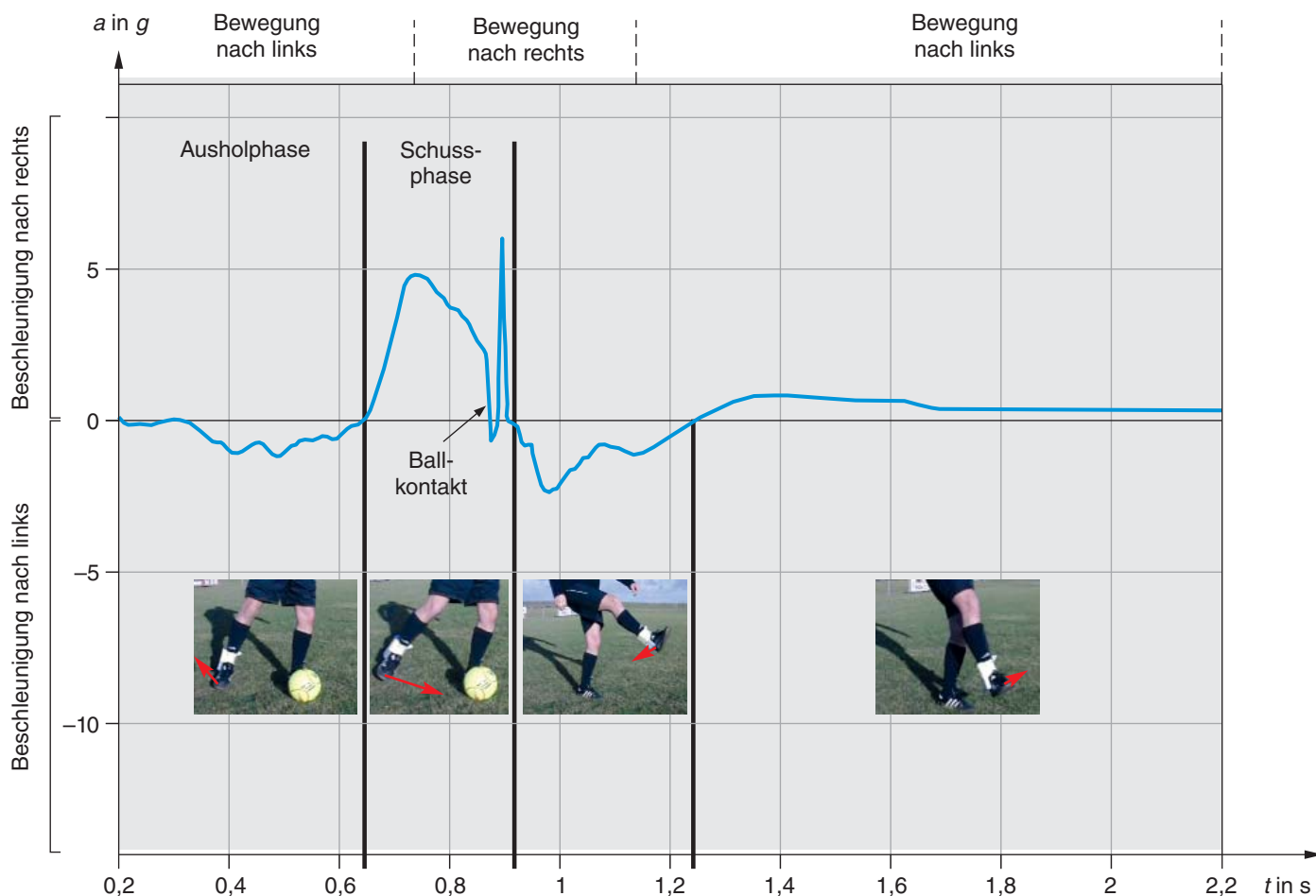


Abb. 9: Verlauf der Beschleunigung in Schussrichtung aus *measure* bei einem Innenseitstoß. Die Einzelbilder stammen aus der Videoaufnahme zum Versuch.

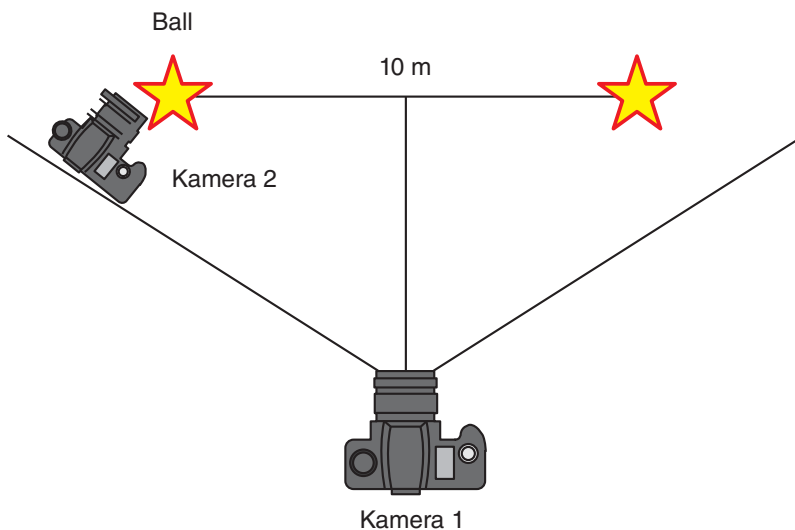


Abb. 10: Skizze zum Versuchsaufbau mit zwei Markierungshütchen

ge zurückbewegt. Anschließend wird der Fuß vor der endgültigen Rückkehr in die Ausgangslage leicht abgebremst (ab $t = 1,25$ s, Beschleunigung nach rechts), was an positiven Beschleunigungswerten erkennbar ist.

6 Leistungsmessung beim Schuss

Die Angabe einer Energieänderung des Fußballes ΔE_{kin} gibt noch keinerlei Auskunft darüber, wie lange dies dauert, obwohl jedem klar ist, dass dies von Bedeutung ist. Interessant ist, welche Leistung während dem Ballschuss vorliegt. Bei der Bestimmung der Leistung P müssen drei Größen ermittelt werden. Zum einen die Kontaktzeit Δt zwischen Ball und Fuß beim Schuss, zum anderen die Änderung der Geschwindigkeit, wobei für einen aus der Ruhe geschossenen Ball das Tempo v direkt nach dem Kontakt mit dem Fuß herangezogen werden kann. Schließlich wird die Masse m des Fußballs benötigt, welche leicht mit einer Waage ermittelt werden kann.

Kontaktzeit und Tempo werden mittels Videoanalyse bestimmt, wobei die Kontaktzeit Δt mithilfe einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme des Balls gemessen wird [3]. Da die Kontaktzeit etwa 0,01 Sekunden beträgt, ist eine Aufnahme mit 1000 Bildern pro Sekunde erforderlich, um Messfehler möglichst gering zu halten. In der Videoanalyse wird der Zeitpunkt des beginnenden Kontakts t_1 und der Zeitpunkt t_2 , zu welchem der Ball den Fuß verlässt, bestimmt. Aus deren Differenz ergibt sich die Kontaktzeit $\Delta t = t_2 - t_1$. Für die Tempomessung wird eine weitere Kamera benötigt, welche einen Bildausschnitt von etwa 10 m zeigt, welcher durch Markierungshütchen gekennzeichnet ist, die zur Skalierung bei der Videoanalyse genutzt

werden (siehe Abb. 10). Die Videoanalyse bietet zwei Möglichkeiten zur Geschwindigkeitsmessung. Zum einen kann die vom Ball nach dem Schuss zurückgelegte Strecke in einem Zeitintervall mittels Längenmessung bestimmt werden und damit auf die mittlere Geschwindigkeit zurückgeschlossen werden. Zum anderen können im Programm direkt die Komponenten v_x und v_y abgelesen werden und daraus das Tempo v berechnet werden.

Im Versuch wurde die Kontaktzeit $\Delta t = 0,007$ s gemessen. Die Tempomessung über die Längenmessung ergab 23,8 m/s und über die Geschwindigkeitskomponenten ergaben sich 24,6 m/s. Mit der Ballmasse $m = 0,411$ kg, der Kontaktzeit $\Delta t = 0,007$ s und einem Tempo von $v = 24,2$ m/s (Mittelwert der beiden Messungen) kann während der sehr kurzen Kontaktzeit eine mittlere Leistung \bar{P} berechnet werden:

$$\bar{P} = \frac{\Delta E_{\text{kin}}}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{\Delta t} \approx 17 \text{ kW} \approx 23 \text{ PS}$$

Eine zusätzliche Angabe in der veralteten Einheit PS ist für Schüler eindrucksvoll, da sich diese dadurch leicht mit der eines Autos vergleichen lässt. Dabei muss jedoch darauf eingegangen werden, dass die gemessene Leistung in einem sehr kleinen Zeitintervall in der Größenordnung von Millisekunden umgesetzt wird.

Außerdem kann die mittlere Kraft \bar{F} berechnet werden, die der Fuß auf den Ball bzw. der Ball auf den Fuß ausübt:

$$\bar{F} = \frac{m\Delta v}{\Delta t} = 1,4 \text{ kN.}$$

7 Bewegungsabläufe beim Kopfball

In vielen Situationen im Spiel, wie zum

Beispiel bei einer Ecke, einem Freistoß oder einem Abstoß, wird der Ball hoch zum Mitspieler gespielt [4]. Meist muss der Mitspieler die Technik des Kopfballspiels nutzen, um den Ball annehmen oder weiterleiten zu können. Dabei unterscheiden sich Kopfbälle zunächst darin, ob sie entweder aus dem Lauf, Stand oder Sprung ausgeführt werden. Ein weiteres Unterscheidungskriterium ist die Körperstellung. Diese kann entweder frontal oder seitlich zum Ball sein. Die Absprungrichtung kann vor-, seit- oder rückwärts ausgerichtet sein. Zuletzt unterscheidet man, ob der Absprung ein- oder beidbeinig stattfindet. Die Entscheidung, welche Art Kopfball genutzt wird, ist von der Spielsituation abhängig, zum Beispiel davon, wie hoch das Zuspiel erfolgt. Bei der Analyse eines Kopfballs ist nicht nur die Bewegung des Kopfes zu betrachten, sondern die Bewegung des ganzen Körpers [5]. Der Oberkörper wird in eine Hohlkreuzhaltung vorgespannt. Der Kopfstoß selbst erfolgt, indem Oberkörper und Beine gleichzeitig nach vorne bewegt werden (Klappmesserbewegung). Die Landung nach dem Kopfstoß sollte möglichst auf beiden Beinen erfolgen, um Verletzungen zu verhindern.

Für eine Videoanalyse werden wie in Abschnitt 4 verschiedene Körperteile mit farbigen Tonpapierkreisen markiert. In diesem Fall sind dies Knöchel, Knie, Hüfte, Schulter und Kopf. Im Videoanalyseprogramm *measure dynamics* können Verbindungslinien zwischen den einzelnen Markierungen sichtbar gemacht werden. Somit kann man eine detaillierte Betrachtung der Bewegung der einzelnen Körperteile durchführen.

Abb. 11a zeigt die Vorbereitung des Spielers zum Absprung. Hierzu werden die Knie angewinkelt und der Kopf wird nach hinten geneigt, so dass dieser in Richtung des Balls ausgerichtet ist. Darauf folgt der Absprung und die Vorbereitung zum Kopfball (siehe Abb. 11b). Der Absprung gelingt durch das Durchstrecken der Knie. Die Vorbereitung auf den Kopfball äußert sich darin, dass der Spieler den Oberkörper in Hohlkreuzhaltung bringt. Die Ausrichtung des Kopfes ist weiterhin in Richtung des Balles (siehe Abb. 11b). Abb. 11c zeigt die Phase des Kopfballs. Dabei ist die „Klappmesserbewegung“ des Körpers sehr gut zu erkennen. Beim Kopfball werden sowohl die Beine als auch der Oberkörper nach vorne bewegt, während die Hüfte sich nach hinten bewegt. Bei der in Abbildung 11d dargestellten Landung nach dem Kopfball geht der Schütze leicht in die Knie, um den Aufprall abzufedern.

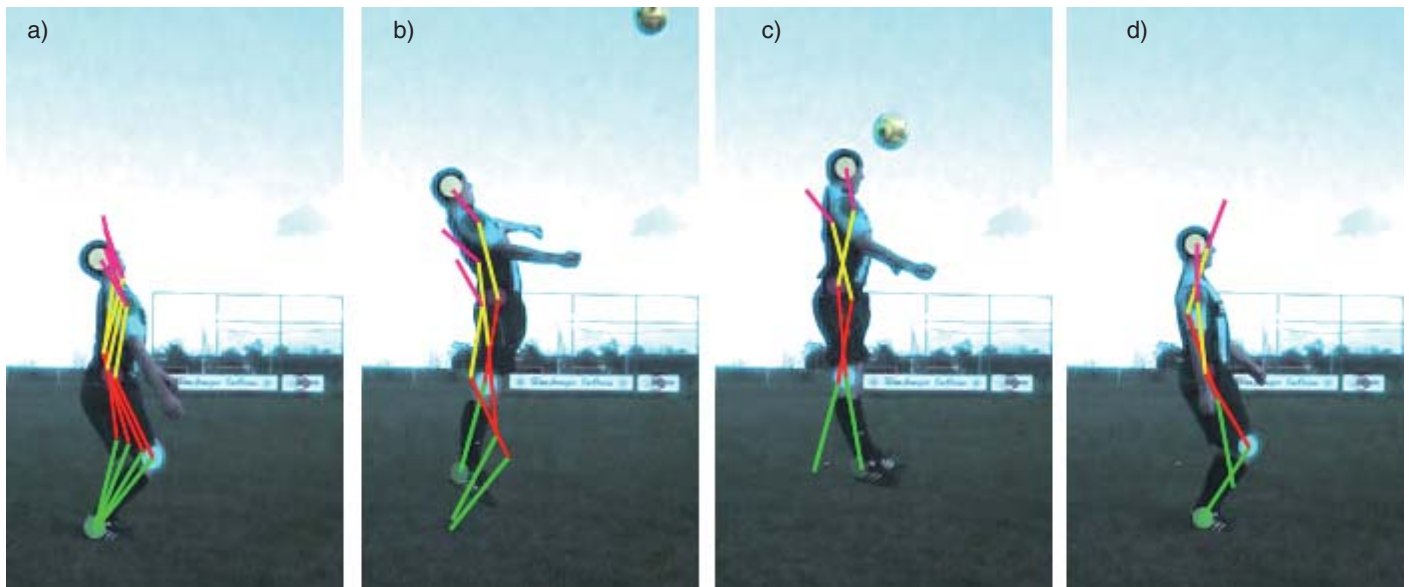


Abb. 11: Bewegungsstudie zum Kopfball in measure dynamics, a) Vorbereitung zum Absprung b) Absprung und Kopfballvorbereitung c) Klappmesserbewegung beim Kopfball d) Abfedern beim Aufkommen

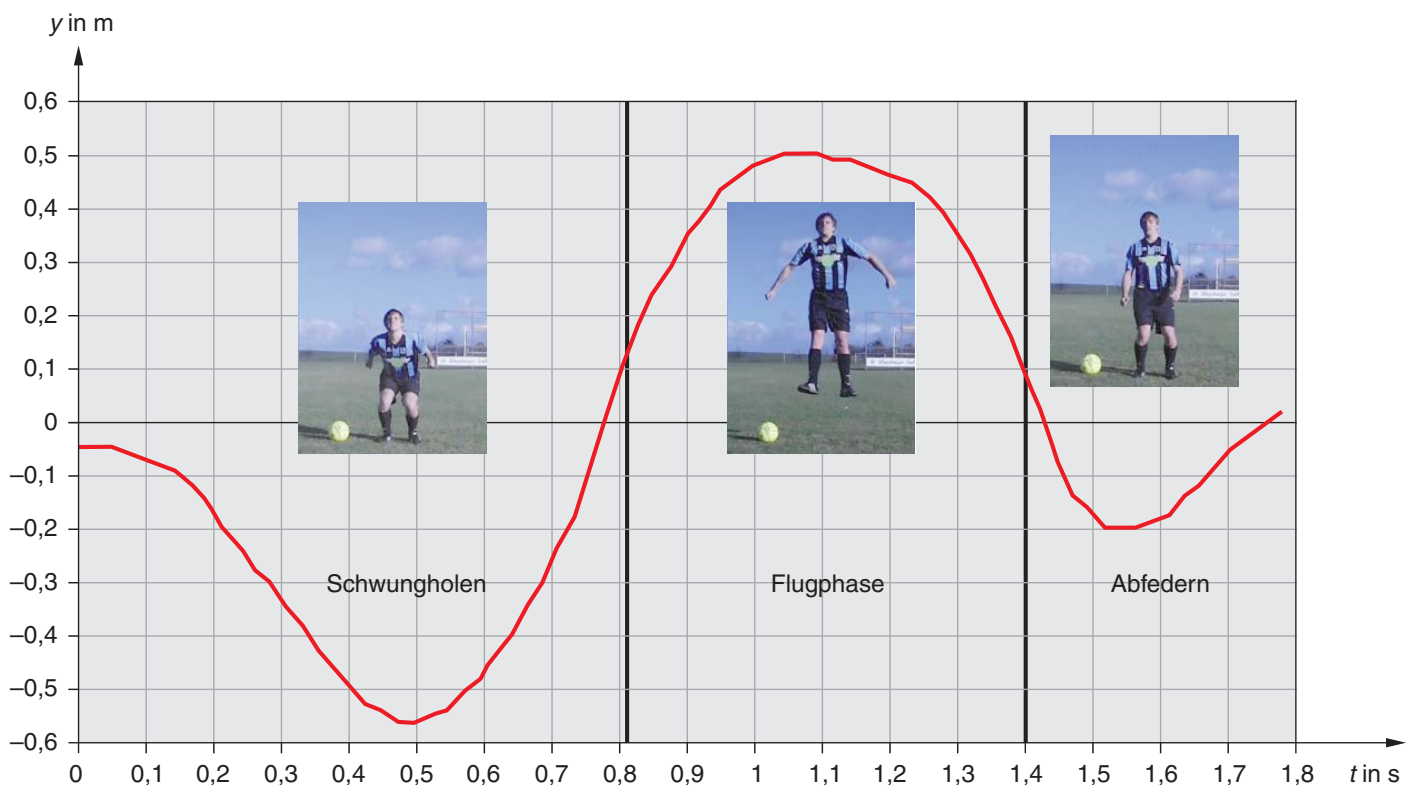


Abb. 12: Höhenverlauf beim Kopfballsprung

8 Sprunghöhe beim Kopfball

Schließlich kann auch noch die Sprunghöhe im zeitlichen Verlauf betrachtet werden, wozu eine Videoanalyse von einem Sprung beim Kopfball durchgeführt wird. Hierfür wird auf der Brust des Spielers ein Tonpapierkreis befestigt, der zur späteren Analyse dient. Die Videoaufnahme geschah mit 210 fps, aber es wurde nur jedes fünfte Bild ausgewertet (entspricht 42 fps). Im Ergebnis (siehe Abb. 12) ist zu sehen, dass der Fußballer zunächst zum Schwungholen in die Hocke geht, dann erst hochspringt und

am Ende zum Abfedern wieder in die Knie gehen muss [7].

Da der Verlauf ein wenig an eine Schwingung erinnert, lohnt sich hier eine Diagramminterpretation und die Überlegung, wann der Fußballer in Ruhe war (bei 0,50 s, 1,07 s und 1,55 s) und wann er maximales Tempo hatte (bei 0,33 s, 0,77 s und 1,45 s). Für das Geschwindigkeitsdiagramm in Abb. 13 wurde nur jedes zehnte Bild verwendet.

Damit kann auch die Frage geklärt werden, warum der Spieler beim Kopfball in

der Luft zu stehen scheint. Wir betrachten zunächst einen starren Körper, der sich ohne Luftreibung nach oben bewegt. Aus $h(t) = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2$, $v_0 = g t_{\max}$ und $h_{\max} = \frac{1}{2} g t_{\max}^2$ ergibt sich, dass ein gewisser Höhenanteil $a = h(t) / h_{\max}$ dann erreicht ist, wenn mit dem vergangenen Zeitanteil $z = t / t_{\max}$ gilt:

$$a = 2z - z^2$$

oder

$$z = \frac{t}{t_{\max}} = 1 - \sqrt{1 - a}$$

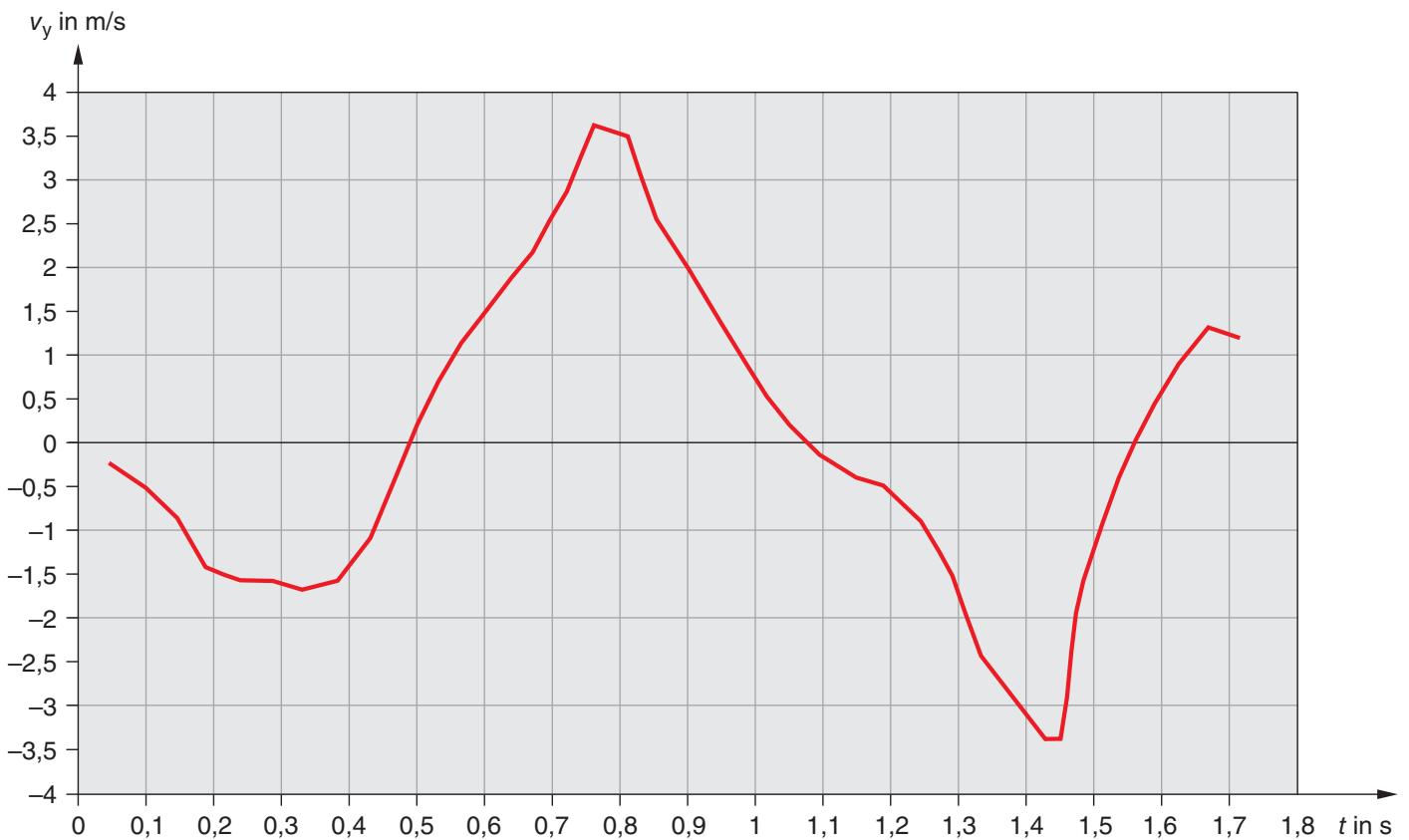


Abb. 13: Geschwindigkeit beim Kopfballsprung

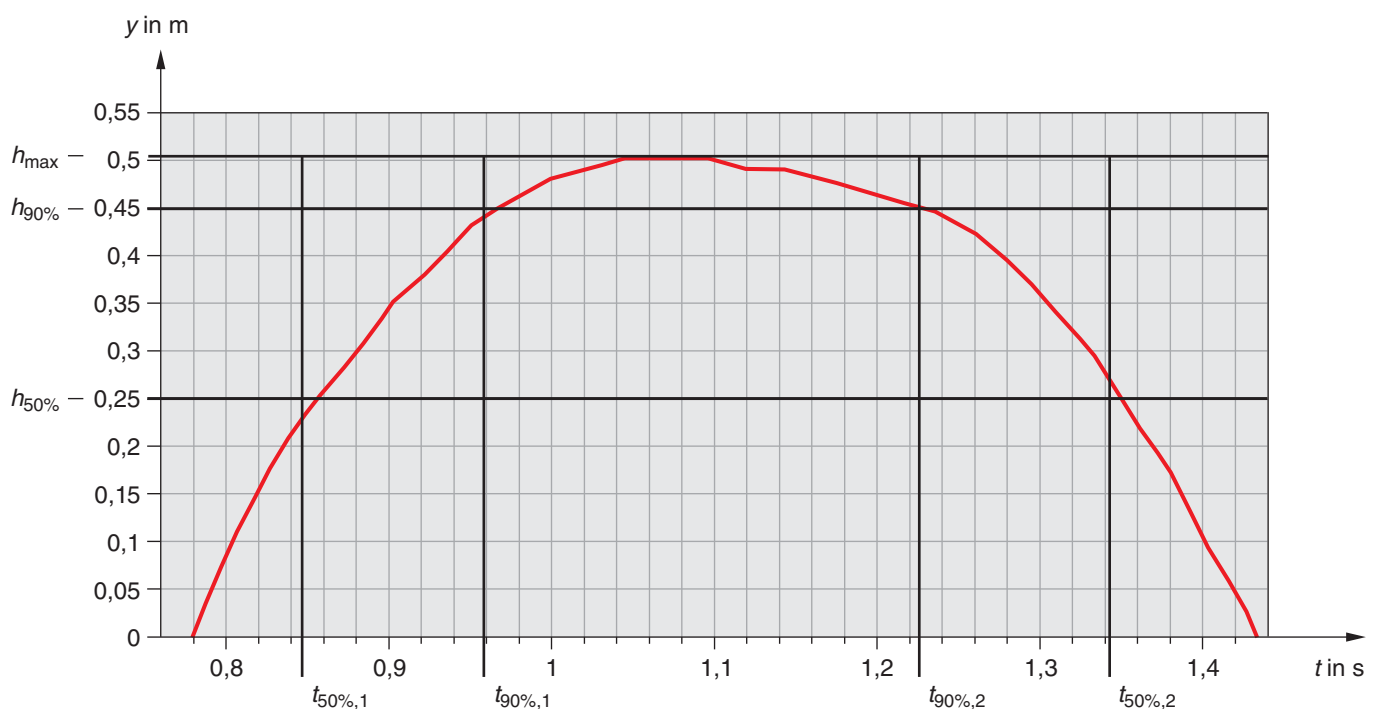


Abb. 14: Zeit-Höhendiagramm des markierten Punktes auf der Brust des Fußballers beim Kopfballsprung (Null = entspanntes Stehen)

(Lösung der quadratischen Gleichung). Die Zeit, in der sich der Körper über dem Höhenanteil a befindet, ist dann

$$1 - \frac{t}{t_{\max}} = \sqrt{1 - a}.$$

Damit befindet sich ein Spieler zu 71 % seiner Sprungzeit über einer Höhe von 50 % der maximalen Höhe. Zu etwa einem Drit-

tel der Sprungzeit (32 %) befindet er sich über 90 % der maximalen Höhe, wodurch leicht der Eindruck entsteht, dass der Spieler in der Luft steht.

Beim Fußballspieler handelt es sich aber nicht um einen starren Körper; bei ihm bewegen sich Arme und Beine anders als der Rumpf und Auf- und Abbewegung der Markierung an der Brust müssen nicht

symmetrisch erfolgen. Deshalb wird nicht nur die Aufwärtsbewegung, sondern die gesamte Bewegung betrachtet. Außerdem stören wir uns nicht daran, dass während den ersten und letzten zehn Zentimeter die Fußspitzen noch bzw. schon Kontakt zum Boden haben.

Aus Abb. 14 ergibt sich, dass sich der Punkt auf der Brust zu etwa 76 % der ges-

amten Flugzeit über seiner halben Sprunghöhe befand (idealer Wert: 71 %) und zu 38 % der Flugzeit über 90 % seiner Sprunghöhe (idealer Wert 32 %). Diese Werte sind ein Indiz dafür, dass es häufig den Anschein hat, ein Spieler würde beim Kopfball in der Luft „stehen“.

8 Fazit

Insgesamt kann festgehalten werden, dass Fußball als Anwendungsbeispiel im Physikunterricht gut einsetzbar ist und sehr facettenreich ist. Heutige Messwertfassungsmöglichkeiten ermöglichen es, nicht nur über die Physik des Fußballs zu reden, sondern selbst Messungen durchzuführen, wozu sich vor allem die Videoanalyse eignet, mit der Bewegungen von Bällen und Körperteilen analysiert werden können.

Literatur

- [1] H. Wiesner, T. Wilhelm, C. Waltner, V. Tobias, A. Rachel & M. Hopf, *Mechanik I: Kraft- und Geschwindigkeitsänderung, Reihe Unterricht Physik, Band 5*, Aulis Verlag, 2011
- [2] T. Wilhelm, H. Wiesner, M. Hopf & A. Rachel, *Mechanik II: Dynamik, Erhaltungssätze, Kinematik, Reihe Unterricht Physik, Band 6*, Aulis-Verlag, 2013
- [3] M. Michel & T. Wilhelm, *Dynamik mit Hochgeschwindigkeitsvideos*. in: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 59, Nr. 7, 2010, S. 23 - 30
- [4] E. Kollath, *Fußball – Technik und Taktik*. 2. überarbeitete Neuauflage, Meyer und Meyer, Aachen, 1998
- [5] D. Brüggemann & D. Albrecht, *Schulfußball: spielen – lernen – mitgestalten*, Karl Hofmann, Schorndorf, 1986
- [6] M. Weidt & T. Wilhelm, *Bewegungen des ei-*

genen Körpers – Möglichkeiten der Messwertfassung im Vergleich, in: *PhyDid-B*, 2011, <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/260/415>

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

Anschriften der Verfasser

StRef Fabian Zimmermann, Ohm-Gymnasium Erlangen, Am Röthelheim 6, 91052 Erlangen, zimmermann.fa@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, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de, www.thomas-wilhelm.net

Mit Kopf – im Fußball und im Physikunterricht

A. Fösel, L. Mathelitsch, S. Thaller, J. Wagner

1 Einleitung

Die Einbindung sportlicher Themen in den Physikunterricht bietet eine Möglichkeit das Interesse und die Motivation von Schülerinnen und Schülern zu steigern, mit der Messung und Erklärung sportlicher Aktivitäten können aber auch grundlegende physikalische Inhalte vermittelt werden. Fußball ist in sehr vielen Ländern die attraktivste Sportart, sodass eine physikalische Diskussion fußballerischer Themen meist auf großes Interesse stößt. Dies ist wohl auch der Grund, dass eine Reihe von (populär)wissenschaftlichen Büchern und fachlichen und fachdidaktischen Artikeln zu diesem Thema verfasst wurden.

Neben umfassenden Behandlungen der Sportart Fußball [1, 2, 3] haben einige Teilaspekte spezielle Beachtung gefunden: unerwartete Bahnkurven von Bällen (Banannenflanken), die den Magnuseffekt eindrucksvoll zeigen [4, 5]; der hohe Anteil des Zufalls bei Fußballresultaten, der eine statistische Behandlung herausfordert [6]; die Angst des Torwarts (bzw. des Schützen) vor dem Elfmeter, die kinematisch begründet werden kann [7, 8]. Eine weitere wichtige Komponente des Spieles, Kopfball, sind noch nicht so ausführlich behandelt wor-

den, obwohl die Frage nach der Gefährlichkeit direkt mit der Bestimmung der Kräfte und Beschleunigungen zusammenhängt.

In diesem Artikel wollen wir die Wechselwirkung von Fußball und Kopf aus verschiedenen Blickwinkeln untersuchen: Zum einen stellen wir experimentelle Zugänge vor, die von einfachen Versuchen bis zu Videoanalysen und Datenaufnahmen mit Beschleunigungssensoren reichen. Zum anderen wird versucht, die Daten durch theoretische Modelle unterschiedlicher Komplexität zu erklären. Zum Abschluss wird auf Gesundheitsaspekte im Zusammenhang mit intensivem Kopfballsport eingegangen, gerade junge Spielerinnen und Spieler sind diesbezüglich besonders gefährdet und sollten darüber informiert sein.

2 Experimente

Die Wechselwirkung von Ball und Kopf ist physikalisch gesehen ein Stoßprozess, wobei sich sofort die Frage stellt, wie (in)elastisch der Stoß vor sich geht. In erster Näherung kann dies durch die Bestimmung der Ballgeschwindigkeit vor v_1 und nach v_2 dem Kontakt mit dem Kopf errechnet werden. Das Verhältnis der beiden Ge-

schwindigkeiten wird dabei als Restitutionskoeffizient oder Elastizitätszahl e bezeichnet:

$$e = \frac{v_2}{v_1}$$

Ist dieser Wert eins, so handelt es sich um einen vollkommen elastischen Stoß. Diese Situation tritt aber nur ein, wenn der Ball auf einen unendlich massiven und zugleich ruhenden Körper trifft. Hat ein ruhendes Hindernis jedoch dieselbe Masse wie der Ball, so bewirkt ein (zentraler) elastischer Stoß, dass der Ball den gesamten Impuls weitergibt und deshalb die Geschwindigkeit Null annimmt. Bei einem Kopfball ist die Masse des „Hindernisses Kopf“ weder unendlich groß noch gleich der Masse des Balles. Auch ruht der Kopf in der Regel nicht vor dem Stoßprozess: Vielmehr geht der Spieler dem Ball meist mit dem Kopf entgegen, sodass es sein kann, dass der „reflektierte“ Ball sogar eine (betragsmäßig) größere Geschwindigkeit hat als zuvor.

In einem Modellexperiment haben wir eine sehr idealisierte „Kopfballsituation“ nachgestellt. Dabei wurde die Geschwindigkeit des Kopfes auf (nahezu) Null „gesetzt“: Ein Spieler wurde gebeten, ruhig zu