

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:

EGIDY, B.; WILHELM, T.

Physikunterricht und Tennis

Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 63, Nr. 7, 2014, S. 21 - 29

Physikunterricht und Tennis

B. Egidy u. Th. Wilhelm

1 Motivation

Das Interesse von Schülern am Physikunterricht nimmt im Laufe der Schuljahre ab und die Schüler sehen wenig Zusammenhang zwischen Alltag und Physikunterricht. Eine Möglichkeit, um im Unterricht interessante, alltagsnahe Themenbezüge herzustellen, sind Bezüge zum Sport. So kann auch Tennis, eine der deutschlandweit gefragtesten Sportarten, dazu genutzt werden, um Physik zu behandeln. Mithilfe der Videoanalyse von Bewegungen und mithilfe von computerbasierter Messwert- erfassung können Inhalte des Mechanik- unterrichts der Oberstufe anhand von Tennis angewandt und vertieft werden [1].

2 Kräfte bei Zusammenstößen

Trifft ein Tennisball auf den Boden, so übt er auf den Boden eine Kraft aus. Gemäß dem Wechselwirkungsprinzip übt der Boden ebenso eine gleichgroße Kraft auf den Ball aus. Solche kurzen Stöße werden mit dem

$$\text{Kraftstoß} := \int_{t_A}^{t_E} \vec{F} dt \quad (1)$$

beschrieben [2]. Mit dem zweiten Newton'schen Axiom gilt (da die Masse m konstant ist):

$$\int_{t_A}^{t_E} \vec{F} dt = m(\vec{v}_E - \vec{v}_A) \quad (2)$$

Schon in der Sekundarstufe I kann dies in elementarisierte Form mit der mittleren Kraft verwendet werden:

$$\vec{F}_{\text{Mittel}} \Delta t = m \Delta \vec{v} \quad (3)$$

Diese Gleichung kann die zentrale Gleichung im Mechanikunterricht der Sekundarstufe I sein [3].

2.1 Kraft beim Stoß des Tennisballs mit dem Boden (Kraftmessplatte)

Ein Kraftstoß findet z. B. dann statt, wenn der Tennisball mit dem Boden stößt. Ist der Boden eine Kraftmessplatte, kann der Kraftverlauf gemessen werden. Im Versuch kann ein Tennisball senkrecht fallengelassen oder bei Verwendung einer zweiachsigen Kraftmessplatte (Aufnahme von Normal- und Querkraft) schräg auf die Kraftmessplatte geworfen bzw. auf die Kraftmessplatte aufgeschlagen werden.

Der Kraftverlauf beim Aufprall eines Tennisball auf eine Kraftmessplatte (Fir-

ma Pasco) nach einem regelkonformen Tennisaufschlag wurde mit dem Programm DataStudio aufgenommen (siehe Abb. 1) und analysiert. Es ergaben sich die Mittelwerte $\bar{F}_{\text{normal}} = 129 \text{ N}$ und $\bar{F}_{\text{quer}} = 67 \text{ N}$, die Maximalwerte $F_{\text{normal}} = 275 \text{ N}$ und $F_{\text{quer}} = 128 \text{ N}$ sowie die Kontaktzeit $\Delta t \approx 8 \text{ ms}$. Mithilfe der bekannten Tennisballmasse $m = 0,057 \text{ kg}$ [4] und dem zweiten Newton'schen Axiom in der Form

$$a = \frac{F}{m} \quad (4)$$

ergeben sich die Mittelwerte von $\bar{a}_{\text{normal}} = 2,3 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$ und $\bar{a}_{\text{quer}} = 1,2 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$ sowie die Maximalwerte $a_{\text{normal}} = 4,8 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$ und $a_{\text{quer}} = 2,2 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$.

Bei dieser Kraftbestimmung mittels der Kraftmessplatte gibt es das Problem, dass die Kraftmessplatte bereits während des Kontaktes von Tennisball und Kraftmessplatte mitzuschwingen beginnt. Dieses Mitschwingen führt zu einem unsymmetrischen, nicht-realen Kraftverlauf. Bei schwachen Kraftstößen, d. h. bei niedrigen Geschwindigkeitsbeträgen tritt dieser Effekt besonders in Erscheinung und verfälscht die Ergebnisse. Bei starken Kraftstößen, d. h. bei höheren Geschwindigkeitsbeträgen spielt das Mitschwingen der Kraftmessplatte eine eher untergeordnete Rolle. In solchen Fällen kann demnach der Kraftverlauf sehr gut mittels der Kraftmessplatte bestimmt werden [1].

2.2 Kraft beim Stoß des Tennisballs mit dem Boden (Videoanalyse)

Beim Stoß zwischen Tennisball und Boden kann auch der Ball mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt und mit einem Videoanalyseprogramm analysiert werden. Die Ermittlung der auftretenden Kraft kann dabei auf dreierlei Weisen geschehen:

1. direkt über die Bestimmung der Geschwindigkeiten kurz vor und kurz nach dem Prellen sowie der Bestimmung der Kontaktzeit,
2. indirekt über das Kompressibilitätsverhalten des Tennisball und
3. durch energetische Überlegungen.

Im Versuch wurde ein Tennisball aus ca. 1,0 m Höhe senkrecht auf den Boden fallengelassen. Mithilfe des Videoanalyseprogramms measure dynamics ließen sich die Geschwindigkeiten kurz vor und kurz nach dem Aufprall des Tennisball bestimmen:

$$v_{\text{vorher}} = -4,5 \text{ m/s} \text{ und } v_{\text{nachher}} = 3,3 \text{ m/s.}$$

Betrachtet man den Aufprall des Tennisball in der Einzelbildfunktion (Zeit zwischen zwei Bildern: 1 ms), so lässt sich hieraus die Kontaktzeit des Tennisball mit dem Boden, hier $\Delta t = 0,006 \text{ s}$, bestimmen (siehe Abb. 2).

Hieraus ergeben sich mit der bekannten Tennisballmasse $m = 57 \text{ g}$ und den Glei-

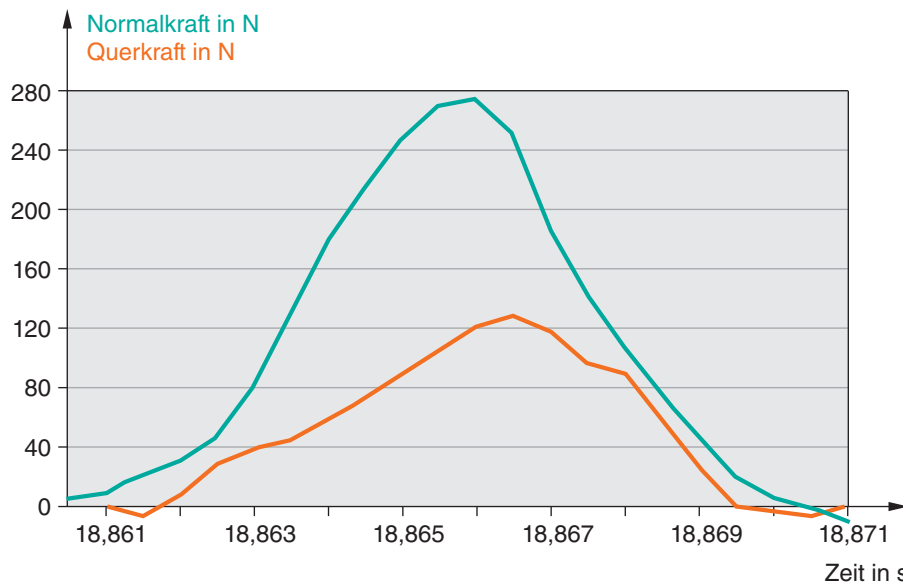


Abb. 1: Zeitlicher Verlauf der Normal- und Querkraft eines auf die Kraftmessplatte aufgeschlagenen Balles

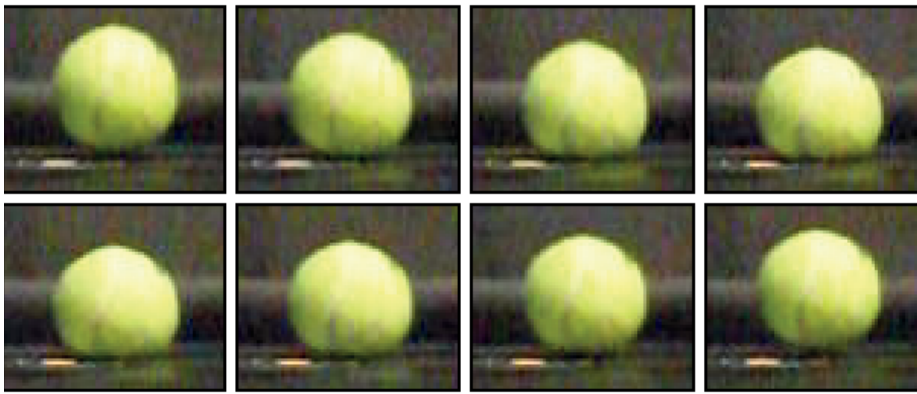


Abb. 2: Serienbild eines prellenden Tennisballes

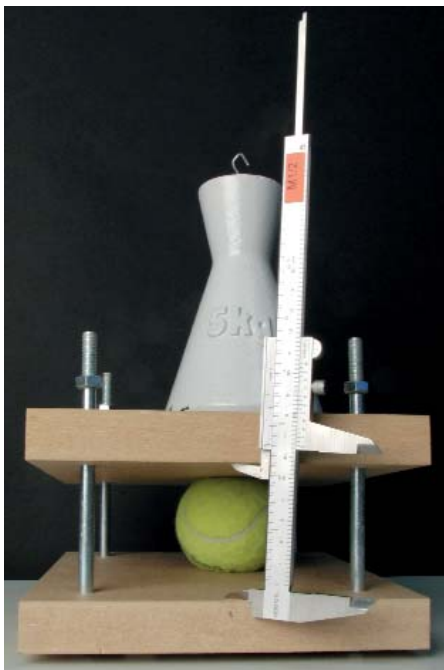


Abb. 3: Tennisball in Presse

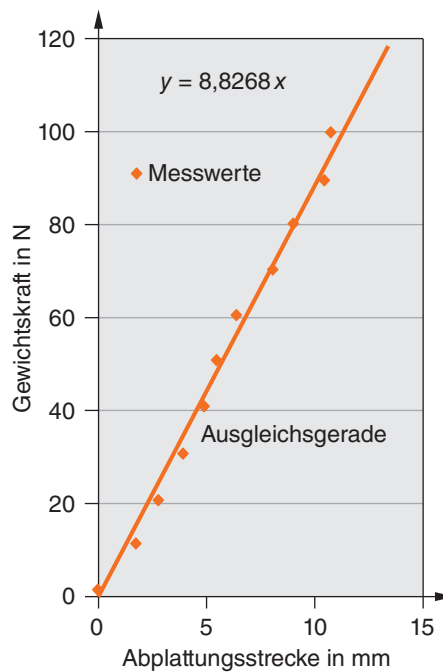


Abb. 4: Abhängigkeit der Abplattungsstrecke von der auf ihr lastenden Gewichtskraft



Abb. 5: Messung der Höhe des auftreffenden Tennisballes

chungen (3) und (4) die Mittelwerte:

$$\bar{F} = \frac{m \Delta v}{\Delta t} = \frac{m(v_{\text{nachher}} - v_{\text{vorher}})}{\Delta t} = 75 \text{ N},$$

$$\bar{a} = \frac{\bar{F}}{m} = 1,3 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

Zur Kraftbestimmung über die Kompressionseigenschaft des Tennisballes ist

zunächst der Zusammenhang von Kraft und Abplattungsdurchmesser zu ermitteln. Hierfür wird der Tennisball in eine Presse gelegt (siehe Abb. 3), mit Gewichten belastet und die jeweils aus den einzelnen Gewichten resultierende Höhe des Tennisballes bestimmt. Sodann wird die auf dem Tennisball wirkende Gewichtskraft gegen

die Abplattungsstrecke des Tennisballes aufgetragen (siehe Abb. 4). Die Messwerte verhalten sich annähernd linear, es kann also die Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes angenommen werden [2, 5].

Im Versuch selbst wird der Tennisball mit moderatem Tempo, hier mit etwa $|v_{\text{vorher}}| = 7,3 \text{ m/s}$, senkrecht auf den Boden geworfen und der Aufprall des Tennisballs auf den Boden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen. Mit einem Videoanalyseprogramm lässt sich die minimale Tennisballhöhe während des Kontaktes des Tennisballes mit dem Boden bestimmen (siehe Abb. 5) (Tennisballdurchmesser $\varnothing = 0,066 \text{ m}$ [4], $s_{\text{max}} = 0,013 \text{ m}$). Die maximal auftretende Kraft zwischen Tennisball und Boden lässt sich dann mithilfe von Abbildung 4 zu $F_{\text{max}} \approx 120 \text{ N}$ bestimmen.

Diese Bestimmungsmethode der Kraft hat den Vorteil, dass die Kraft schnell, einfach und einsichtig bestimmt werden kann, allerdings hat sie auch drei entscheidende Nachteile. Die Ermittlung des Zusammenhangs in Abb. 4 leidet an den niedrigen Referenzgewichten. Außerdem entspricht diese Messung nicht exakt den Bedingungen eines prellenden Tennisballes. Die Belastung erfolgt nämlich in der Tennisballpresse von zwei Seiten (Boden von unten und Gewicht von oben); in der Realität wird der Tennisball nur von einer Seite, nämlich dem Prellboden, belastet. Des Weiteren erfolgt die Belastung in der Tennisballpresse langsam und statisch, während der Tennisball eigentlich stoßartig und dynamisch belastet wird.

Die Maximalkraft zwischen Tennisball und Boden lässt sich weiterhin auch energetisch bestimmen [6], wenn in der Videoanalyse des senkrecht auf den Boden geworfenen Balles die Geschwindigkeiten kurz vor und kurz nach dem Aufprall bestimmt werden (im letzten Versuch: $v_{\text{vorher}} = -7,3 \text{ m/s}$, $v_{\text{nachher}} = 4,4 \text{ m/s}$). Kurz vor dem Bodenkontakt gilt:

$$E_{\text{gesamt}}(\text{vorher}) = E_{\text{kin,vorher}} = \frac{1}{2} m v_{\text{vorher}}^2.$$

Kurz nach dem Bodenkontakt gilt:

$$E_{\text{gesamt}}(\text{nachher}) = E_{\text{kin,nachher}} = \frac{1}{2} m v_{\text{nachher}}^2.$$

Unter Annahme der Gültigkeit des hooke'schen Gesetzes gilt für den Augenblick der maximalen Verformung:

$$E_{\text{gesamt}}(\text{bei maximaler Stauchung}) = E_{\text{Spann}}(s_{\text{max}}) = \frac{1}{2} D s_{\text{max}}^2 = \frac{1}{2} F_{\text{max}} s_{\text{max}}.$$

Ohne Energieverlust wären die Werte zu

den drei Zeiten identisch. Da aber während des Stoßes Energie verloren geht, bestimmt man den Mittelwert \bar{E}_{kin} dieser beiden kinetischen Energien vor und nach dem Stoß und erhält über $E(s_{\text{max}}) = \bar{E}_{\text{kin}}$ eine Abschätzung für die maximal auftretende Kraft zwischen Tennisball und Boden:

$$F_{\text{max}} = \frac{2}{s_{\text{max}}} \bar{E}_{\text{kin}} = 160 \text{ N.}$$

Schätzt man die mittlere Kraft auf ca. 100 N, lässt sich nun zusätzlich über die Newton'sche Bewegungsgleichung (3) die Kontaktzeit Δt abschätzen. Sie beträgt hier ca. 7 ms. Der Fehler bei der energetischen Methode resultiert überwiegend aus Kameraeigenschaften, nämlich aus der geringen Auflösung des Videos sowie aus der begrenzten Anzahl an Bildern pro Sekunde, was zu einer ungenauen Bestimmung des maximalen Tempos führt [1].

2.3 Kraft beim Stoß des Tennisballs mit dem Tennisschläger (elektrisch)

Interessant ist auch die Kraft beim Stoß von Tennisball mit Tennisschläger [7]. Hierfür wird ein Tennisball mit einem Tennisschläger unter einer möglichst horizontalen Flugbahn an die Wand bzw. Tür geschlagen. Tennisball, Tennisschläger und Wand bzw. Tür werden vorher mit elektrisch leitenden Materialien präpariert. Hier wurde der Tennisball in haushaltsübliche Aluminiumfolie gewickelt, auf die Tür wurde ein ca. 1 m² großes Aluminiumfolienstück geklebt und der Tennisschläger mit Stahlsaite besaitet. Alles wird so an einen Stromsensor angeschlossen, dass die Zeiten der Kontakte des Tennisballes mit dem Tennisschläger und mit der Wand aufgenommen werden können (siehe Abb. 6). Als Stromsensor eignen sich computerbasierte Messwerterfassungssysteme. Hier wurde der Spannungs-/Stromsensor der Lehrmittelfirma Pasco verwendet, die aufgenommenen Daten wurden mit DataStudio ausgewertet.

Aus dem aufgenommenen zeitlichen Verlauf (siehe Abb. 7) kann die Stoßzeit des Tennisballes mit dem Tennisschläger (Zeitdauer des ersten Peaks) sowie die Flugzeit, die der Tennisball vom Verlassen des Tennisschlägers bis zur Berührung der Wand bzw. Tür benötigt (Zeitdifferenz zwischen den Peaks), bestimmt werden. Aus Abb. 7 ergibt sich $\Delta t_{\text{Stoß}} = 0,007 \text{ s}$ und $t_{\text{Flug}} = t_2 - t_1 = 0,326 \text{ s}$.

Ist die Flugstrecke des Balles bekannt ($\Delta x = 3,9 \text{ m}$), können mit den Gleichungen (3) und (4) die mittlere Kraft \bar{F} und die mittlere Beschleunigung \bar{a} bestimmt werden [7] und es ergibt sich:

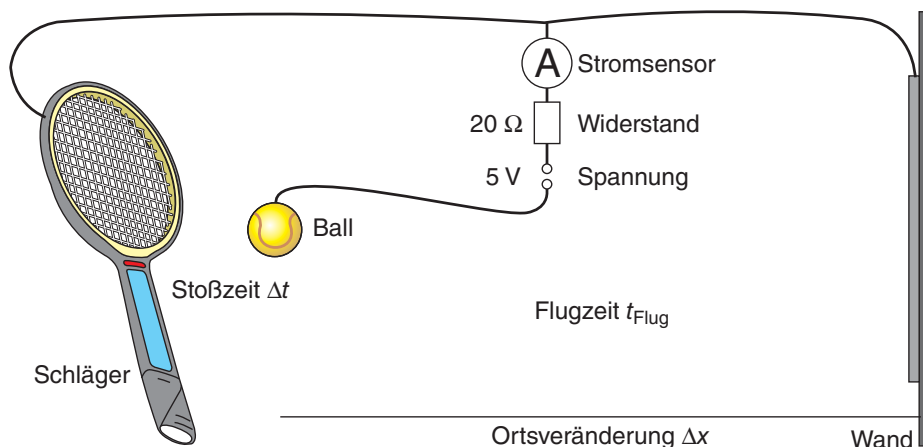


Abb. 6: Schaltbild für den Versuch zum Stoß Ball-Schläger

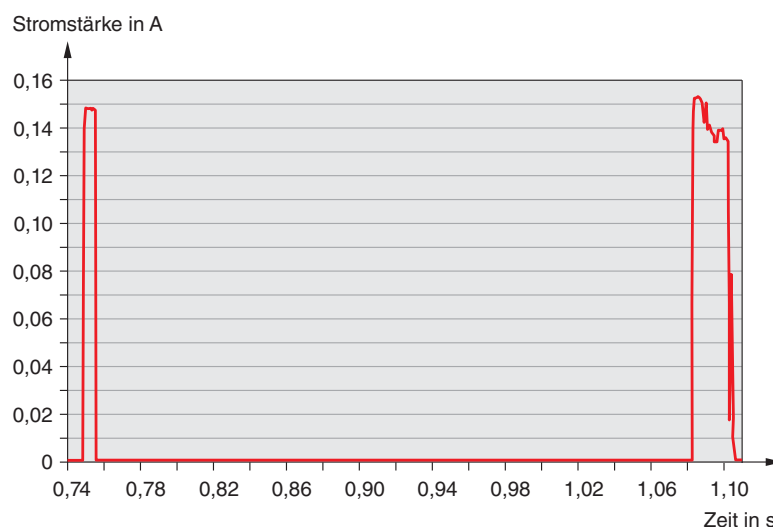


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf des Stromflusses

$$v_{\text{Flug}} = \frac{\Delta x}{t_{\text{Flug}}} = 12 \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

$$\bar{F} = m \frac{\Delta v}{\Delta t_{\text{Stoß}}} = 100 \text{ N und}$$

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t_{\text{Stoß}}} = 2 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

Der Versuch selbst ist relativ unanfällig für Fehler. Das größte Problem ist die begrenzte Abtastrate des Stromsensors (hier 1000 Hz), sodass sich für die Stoßzeit eine Ungenauigkeit von mindestens 1 ms ergibt. Eine zweite Ungenauigkeit ergibt sich durch ein nicht exakt horizontales Fliegen des Tennisballes, was aufgrund der Erdanziehungskraft nicht komplett gelingen kann.

3 Kräfte während des Tennisballfluges

Der Flug eines Tennisballes durch die Luft ist als schräger Wurf ein Standardthema des Physikunterrichts. Während dieses Fluges wirken drei Kräfte auf den Ball ein: die Erdanziehungskraft, die Luftreibungskraft und – sofern sich der Ball um eine Achse

ungleich der Bewegungsrichtung dreht – die Kraft durch den Magnus-Effekt. Die Erdanziehungskraft zeigt dabei immer senkrecht zum Boden.

Bewegt sich ein Tennisball durch die Luft, so löst sich die Luft beim Umströmen von der Oberfläche des Tennisballs ab und es entstehen Wirbel [8+9]. Die Bewegung dieser Luftwirbel benötigt Energie, die aus der kinetischen Energie des Tennisballes genommen wird, wodurch dieser verlangsamt wird. Die Richtung der Luftwiderstandskraft ist dabei immer entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung des Tennisballes, ändert sich also ständig. Beschrieben werden kann der Betrag der Luftwiderstandskraft F_L durch die Newton'sche Widerstandsformel. Nach dieser gilt:

$$F_L = \frac{1}{2} c_w \rho A v^2,$$

wobei ρ die Dichte der Luft, A die Querschnittsfläche des Tennisballs, c_w der Luftwiderstandswert des Tennisballs und v der Betrag der Geschwindigkeit (= Tempo) ist [10].

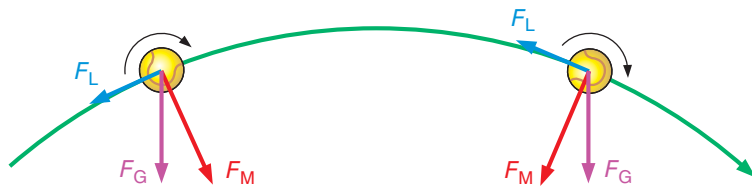


Abb. 8: Kräfte, die auf einen mit Vorwärtsdrall (Topspin) geschlagenen Tennisball wirken

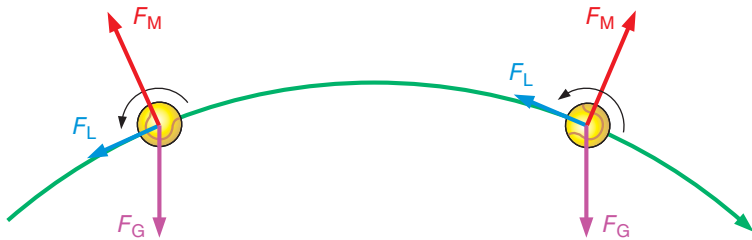


Abb. 9: Kräfte, die auf einen mit Rückwärtsdrall (Slice) geschlagenen Tennisball wirken

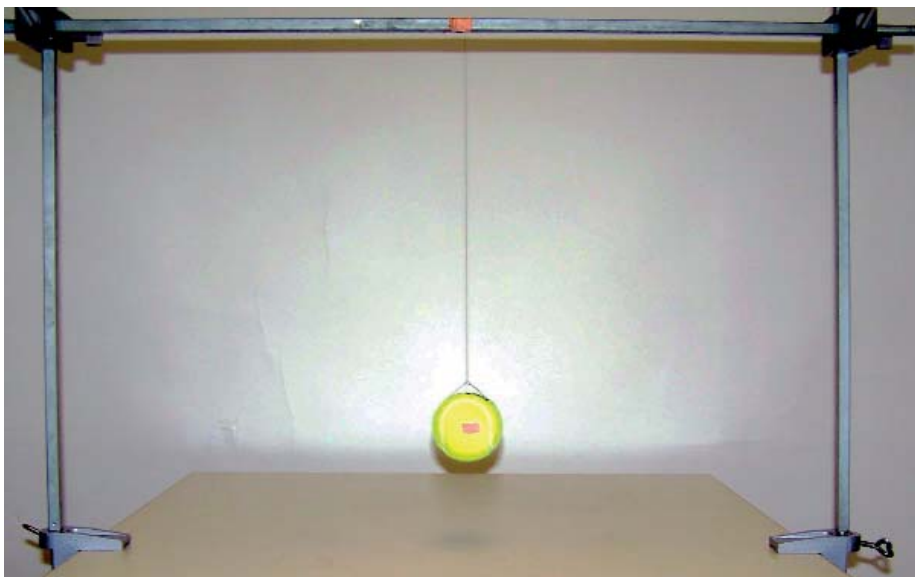
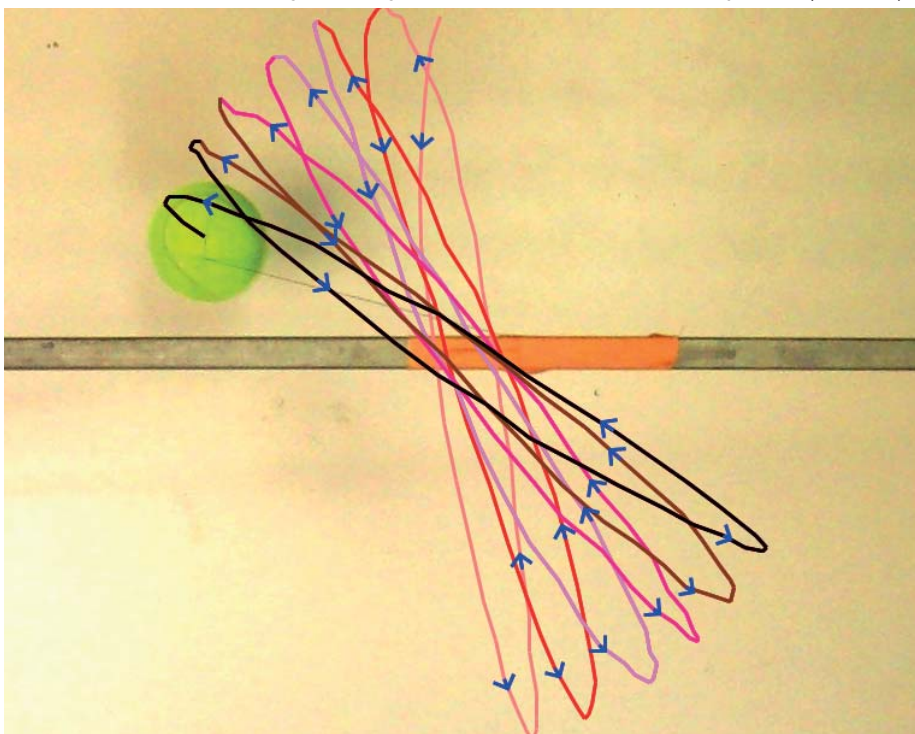


Abb. 10: Versuchsaufbau zum Zeigen des Magnuseffekts

Abb. 11: Bahnkurve des schwingenden, angedrehten Tennisballes aus measure dynamics (von oben)



Als Magnus-Kraft wird die Kraft senkrecht zur Bewegungsrichtung (siehe Abb. 8 und 9) bezeichnet, die verantwortlich für die Bahnabweichung von Objekten ist, die um eine Achse senkrecht zur Bewegungsrichtung rotieren. Durch die Drehbewegung des Tennisballes verschiebt sich der Ort des Ablösens der laminaren Strömung unsymmetrisch mit der Ballrotation [8+9]. Auf der einen Seite, auf der sich der Ball mit der Luftströmung bewegt, reißt der rotierende Ball Luftteilchen mit; dadurch wird die Grenzschicht später vom Ball abgelöst. Auf der anderen Seite des Balles geschieht das Gegenteil; der rotierende Ball bewegt sich gegen die Luftströmung, wodurch sich die Luftteilchen früher vom Ball ablösen. Der sich drehende Ball hinterlässt damit insgesamt eine asymmetrische Wirbelschlepe und auch die Luft außerhalb der Wirbelschlepe wird vom Ball seitlich abgelenkt. Gemäß dem 3. Newton'schen Axiom erfährt der Ball als Reactio eine ablenkende Kraft in die Gegenrichtung [8+9]. So entsteht eine Kraft quer zur Bewegungsrichtung.

Hat ein Tennisball Vorwärtsdrall (Topspin) (siehe Abb. 8), so landet er früher als ohne den Drall auf dem Boden. Hat der Ball Rückwärtsdrall (Slice) (siehe Abb. 9), so landet er später auf dem Boden.

Auch heute ist es noch schwer, den Magnus-Effekt quantitativ zu beschreiben, es gibt viele verschiedene Formeln dafür. Der Magnus-Effekt bei Bällen wird in einem Modell von S. I. Rubinow und Joseph B. Keller gut beschrieben durch:

$$F_M = \rho A R \omega v, \quad (5)$$

wobei A die Querschnittsfläche, ρ die Luftdichte und v der Geschwindigkeitsbetrag sowie R der Radius des Balles und ω seine Winkelgeschwindigkeit ist [11].

3.1 Magnus-Effekt beim Tennis

Um den Magnus-Effekt bei einem Tennisball zu zeigen, eignet sich ein Versuch mit einem rotierenden und schwingenden Tennisball. Der Tennisball wird mithilfe einer dünnen Schnur (z. B. Nähgarn) an ein Stativ befestigt (siehe Abb. 10). Für eine umfangreiche Versuchsauswertung empfiehlt es sich, eine Videoaufnahme von oben sowie eine Videoaufnahme von der Seite zu machen, wobei für Letzteres eine Hochgeschwindigkeitskamera benötigt wird. Dazu wird auf den Tennisball wie in Abb. 10 seitlich eine farbliche Markierung geklebt.

Im ersten Schritt der Versuchsdurchführung wird der Tennisball ausgelenkt und losgelassen. Man kann beobachten, dass

der Tennisball geradlinig vor und zurück schwingt; die Schwingungsebene bleibt immer gleich.

Anschließend wird der Tennisball möglichst stark um seine vertikale Achse gedreht und im sich drehenden Zustand ausgelenkt, z. B. über ein schnelles Auslenken des Gars. Der Tennisball schwingt nun nicht mehr geradlinig vor und zurück, sondern in Kurven (siehe Abb. 11); die Schwingungsebene dreht sich entsprechend der Bananenflanke beim Fußball. Die Richtung der Kurve ist dabei abhängig von der Drehrichtung des Tennisballes.

Wurde der Versuch auch von der Seite per Video aufgenommen, so lassen sich die Ball- und Winkelgeschwindigkeit bestimmen. In diesem Versuch ergaben sich $\omega = 77,6 \text{ s}^{-1}$ und ein Durchschnittstempo von $\bar{v} = 0,47 \text{ m/s}$. Außerdem kann man mithilfe der Luftdichte ρ (ca. $1,2 \text{ kg/m}^3$) sowie mit dem bekannten Tennisballradius $R = 0,033 \text{ m}$ [4] mithilfe von Gleichung (5) die Magnus-Kraft bestimmen. In diesem Versuch ergab sich als mittlere Magnus-Kraft $\bar{F}_M = 4,9 \text{ mN}$. Mit einer Ballmasse von $m = 0,057 \text{ kg}$ [4] ergibt sich für die mittlere Querbeschleunigung \bar{a}_M des Tennisballes aufgrund des Magnus-Effekts $\bar{a}_M = \bar{F}_M/m = 0,087 \text{ m/s}^2$.

Bei einem realen Tennisschlag eines Profis kann die Winkelgeschwindigkeit $\omega = 310 \text{ s}^{-1}$ betragen und es kann ein Balltempo von $v = 25 \text{ m/s}$ angenommen werden [10]. So ergibt sich mit obiger Tennisballmasse und -radius $F_M = 1,1 \text{ N}$ und $a_M = 19 \text{ m/s}^2$. Die Werte liegen also im Größenbereich der Gravitationskraft für einen Tennisball ($F_{\text{Gravitation}} = 0,56 \text{ N}$ und $a = 9,81 \text{ m/s}^2$), weshalb davon ausgegangen werden kann, dass der Magnus-Effekt die Bahnkurve eines Tennisballes maßgeblich beeinflusst.

3.2 Die Bahnkurve eines Tennisballs

Mit diesem Wissen kann die Bahnkurve eines Tennisgrundschlags untersucht werden. Dabei wird der Tennisball einmal möglichst ohne Spin geschlagen, sodass nur die Gravitations- und die Luftreibungskraft wirken, und einmal mit möglichst viel Spin, sodass die Gravitations-, die Luftreibungs- und die Magnus-Kraft wirken. Senkrecht zur Flugbahn des Tennisballs wird der Versuch mit einer Videokamera aufgenommen.

Interessant ist hierbei zu ermitteln, wie gut die tatsächliche Bahnkurve des Tennisballs mit der theoretischen Bahnkurve des idealen schiefen Wurfs (keine Berücksichtigung der Luftreibungs- und Magnus-Kraft) übereinstimmt. Mithilfe eines Videoanalyseprogramms, hier measure dynamics, lassen sich der Abschlagswinkel φ und

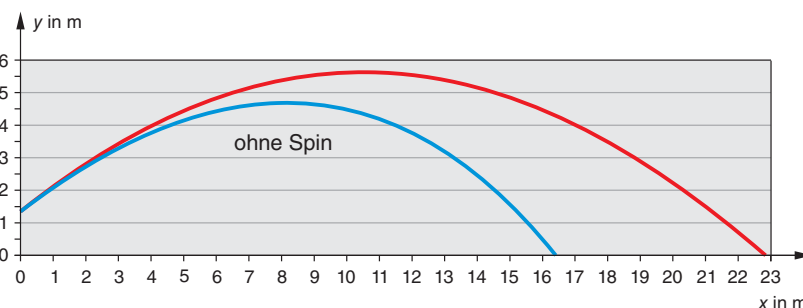


Abb. 12: Ideale Bahnkurve (rot, Berechnung ohne Luftreibung und ohne Magnus-Effekt) und reale Bahnkurve (blau, Messwerte der Videoanalyse) eines Tennisballflugs ohne Spin

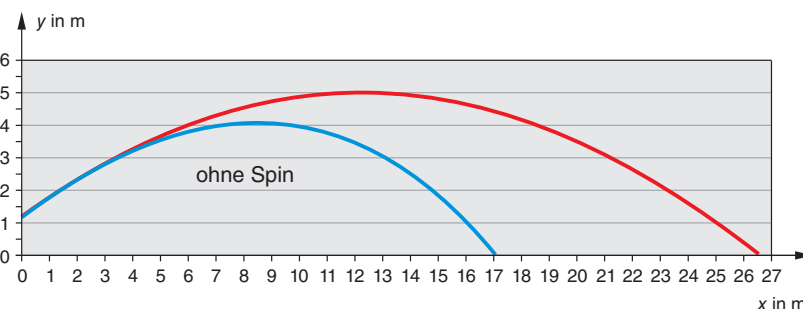


Abb. 13: Ideale Bahnkurve (rot, Berechnung ohne Luftreibung und ohne Magnus-Effekt) und reale Bahnkurve (blau, Messwerte der Videoanalyse) eines Tennisballflugs mit Spin



Abb. 14: Bahnkurve und Ortsmarken im Video

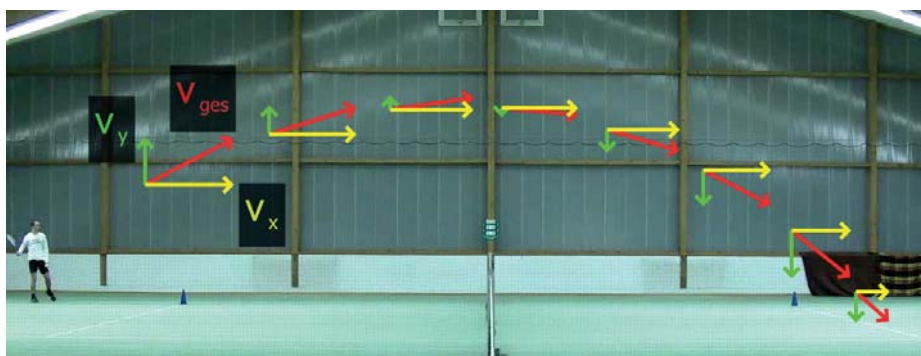


Abb. 15: Einstempeln der Geschwindigkeitskomponenten in das Video

die Anfangsgeschwindigkeitskomponente in Flugrichtung $v_{0,x}$ bestimmen. Hieraus lässt sich nun $v_{0,y}$ mit der Tangensfunktion ermitteln (die direkte Bestimmung von $v_{0,y}$ ist wegen der sich aufgrund der Gravitationskraft stark ändernden Geschwindigkeit schwierig). Sodann kann man gemäß

$$y(x) = -\frac{1}{2} \frac{g}{v_{0,x}^2} x^2 + \frac{v_{0,y}}{v_{0,x}} x + h_0$$

die theoretische Bahnkurve des schiefen Wurfs in das Diagramm der tatsächlichen Bahnkurve eintragen (siehe rote Bahnen in Abb. 12 und 13) und prüfen, wie weit der reale Verlauf dem theoretisch zu erwartenden Verlauf entspricht. Auch ohne Spin ist die reale Flugweite aufgrund der Luftreibungskraft kleiner als im Idealfall (16,4 m statt 22,7 m) (siehe Abb. 12). Bei einem mit Topspin geschlagenen Tennisball ist die Flugweite nochmal deutlich reduzierter

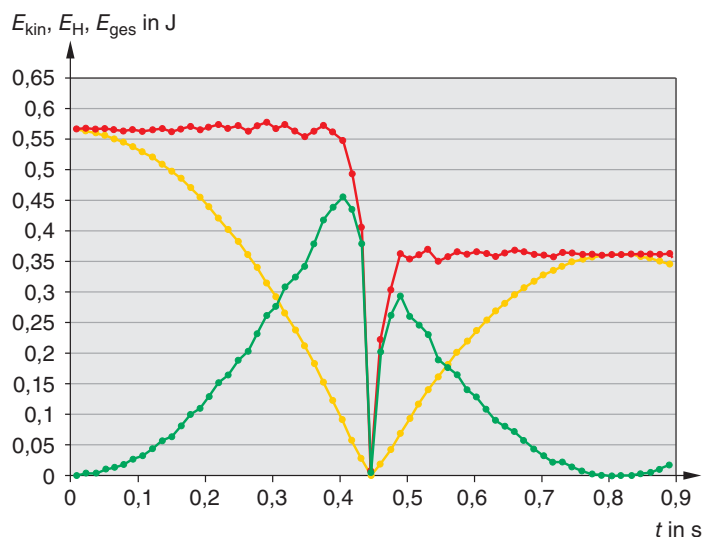


Abb. 16: Darstellung der Umwandlung der mechanischen Energien: Höhenenergie, kinetische Energie und die Summe beider Energien

die Ausgangshöhe erreicht. Dieser Ablauf kann auch mit einem Tennisball behandelt werden. Dazu wird das Springen eines senkrecht fallengelassenen Tennisballes aus einer Anfangshöhe h_1 mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet (hier 210 fps eingestellt, jeder 3. Frame verwendet, entspricht 70 fps) und mit einem Videoanalyseprogramm analysiert.

Die gegenseitige Umwandlung von Höhenenergie und kinetischer Energie kann mithilfe des Videoanalyseprogramms *measure dynamics* nicht nur als Diagramm, sondern auch mithilfe von Säulen im Video visualisiert werden [12]. Aus Abbildung 16 und 17 ist zu erkennen, dass zu Beginn die mechanische Energie ausschließlich in Form von Höhenenergie vorhanden ist. Die Höhenenergie wird im Verlaufe der Bewegung zunächst kontinuierlich in kinetische Energie umgewandelt. Die Gesamtenergie, bestehend aus kinetischer und Höhenenergie, bleibt dabei jedoch konstant, lediglich wegen der etwas ungenauen Bestimmung der Geschwindigkeit ergibt sich ein leichtes Wackeln des Graphen. Kurz vor dem Auftreffen des Balles auf den Boden ist die Höhenenergie vollständig in kinetische Energie umgewandelt worden; die kinetische Energie und das Tempo des Balles erreichen ein Maximum. Wenn der Ball den Boden berührt, wird die kinetische Energie überwiegend in Spannenergie umgewandelt. Die Summe aus nur kinetischer Energie und Höhenenergie muss daher für einen kurzen Zeitpunkt auf 0 J abfallen, da zu diesem Zeitpunkt weder kinetische noch Höhenenergie vorliegen. Werden anders als bei Abb. 16 zu wenig Bilder pro Sekunde analysiert, kann dies nicht abgebildet werden. Beim Pellen des Balles wird jedoch auch ein Teil der kinetischen Energie in andere Energieformen, wie zum Beispiel in innere Energie, umgewandelt, was mithilfe einer Wärmebildkamera sichtbar gemacht werden kann.

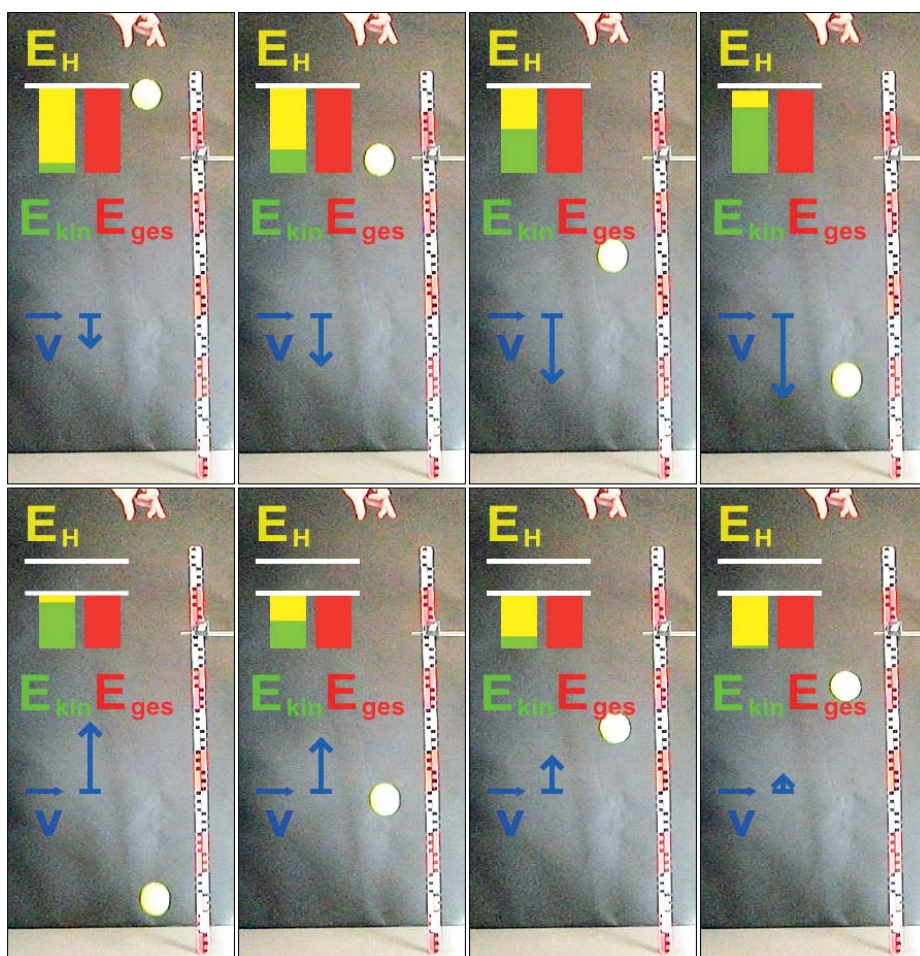


Abb. 17: Serienbild des Versuchsablaufs unter Einblendung dynamisch ikonischer Repräsentationen

(Flugweite 17 m statt 26,5 m) (siehe Abb. 13). Der Tennisspieler kann so auch einen schnellen Ball noch dazu bringen, innerhalb des Spielfeldes aufzukommen.

Für Schüler ist es visuell ansprechender, die Bahnkurve des Tennisballs mit Ortsmarken in das Video (siehe Abb. 14) einzuzichnen. Außerdem ist es sinnvoll, die Geschwindigkeitskomponente in x -Richtung, die Geschwindigkeitskomponente in y -Richtung sowie die resultierende Geschwindigkeit ebenfalls in das Video ein-

zuzeichnen (siehe Abb. 15). Im Gegensatz zu einer Flugbahn ohne Luftreibung und Magnus-Effekt sieht man hierbei, wie die Geschwindigkeitskomponente in x -Richtung immer kleiner wird.

4 Energie beim springenden Tennisball

Energieumwandlungen und Energieerhaltung sind Standardthemen im Physikunterricht. Häufig wird ein fallender und wieder hoch springender Ball betrachtet, wobei jeder weiß, dass der Ball nicht mehr

Anschließend wird die kurz vorher entstandene Spannenergie wieder in kinetische Energie zurückgewandelt, weshalb der Ball stark beschleunigt wird und den Boden mit maximalem Tempo, das nun jedoch aufgrund der mechanischen Energieverluste geringer ist als vor dem Pellen, verlässt. Dann steigt der Ball wieder und wird langsamer; kinetische Energie wird in Höhenenergie umgewandelt. Jedoch wird aufgrund des geringeren Starttempos nicht mehr die ursprüngliche Höhe erreicht.

Wie stark die Verluste beim Pellen sind, kann mithilfe des Elastizitätskoeffizienten

beschrieben werden [13]. Er berechnet sich gemäß folgender Beziehung [2]:

$$e = \frac{|v_2|}{|v_1|} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}. \quad (6)$$

Mithilfe des Videoanalyseprogramms measure dynamics werden die Anfangshöhe h_1 und die maximale Höhe h_2 nach dem ersten Prellen des Balles auf den Boden (siehe Abb. 18) sowie die Geschwindigkeit v_1 kurz vor und die Geschwindigkeit v_2 kurz nach dem ersten Prellen des Balles auf den Boden (siehe Abb. 19) bestimmt und hieraus der Elastizitätskoeffizient e berechnet. Für eine Fallhöhe von ca. 1,0 m ergibt sich mit Gleichung (6) und den Werten aus Abbildung 18 bzw. 19:

$$e = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} = \sqrt{\frac{0,645 \text{ m}}{1,01 \text{ m}}} = 0,799 \text{ bzw.}$$

$$e = \frac{|v_2|}{|v_1|} = \frac{3,21 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3,99 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,803.$$

Die Ergebnisse aus beiden Bestimmungsmethoden des Elastizitätskoeffizienten (über Höhen- und über Geschwindigkeitsmessung) liegen im gleichen Bereich. Der Vorteil in der Bestimmung über die Geschwindigkeitsmessung liegt in der höheren Anschaulichkeit für die Schüler, allerdings sind die Ergebnisse im Vergleich zur Bestimmung über die Höhenmessung viel ungenauer. Aufgrund der begrenzten Kameraqualität (bestimmt durch die Bildrate und die Auflösung) ergibt sich bei den hier auftretenden Geschwindigkeiten ein Fehler von bis zu 10 %, im Gegensatz zu einem Fehler von ca. 1 % bei der Höhenmessung [1].

Um den Elastizitätskoeffizienten verschiedener Tennisbälle miteinander vergleichen zu können, wurde deren Elastizitätskoeffizient aufgrund der höheren Genauigkeit über die Höhenmessung bestimmt. Zur Bestimmung wurden ein fabrikneuer Tennisball ohne Druck (ein sog. druckloser Ball), ein fabrikneuer Tennisball mit Druck (ein sog. Druckball) sowie ein gebrauchter Druckball aus unterschiedlichen Fallhöhen senkrecht auf verschiedene Böden, nämlich einem Klassenzimmerboden und einem Tennishallenboden, fallengelassen.

Aus Abb. 20 ist zu erkennen, dass der Elastizitätskoeffizient für jeden Ball und jeden Bodenbelag bei steigender Anfangshöhe deutlich sinkt, der mechanische Energieverlust also steigt. Dies könnte einerseits an höheren Reibungskräften beim Prellen des Tennisballes oder aber an der größeren Luftreibung wegen dem hö-

Abb. 18: Ballhöhe in Abhängigkeit der Zeit

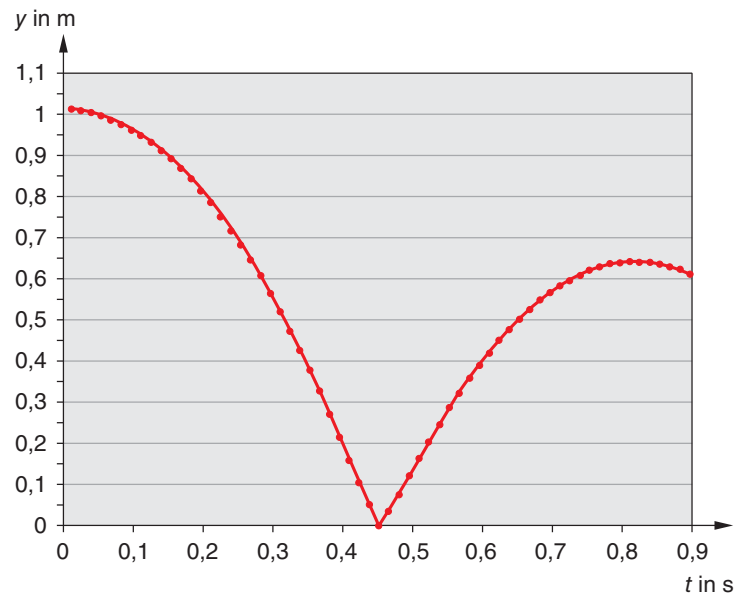
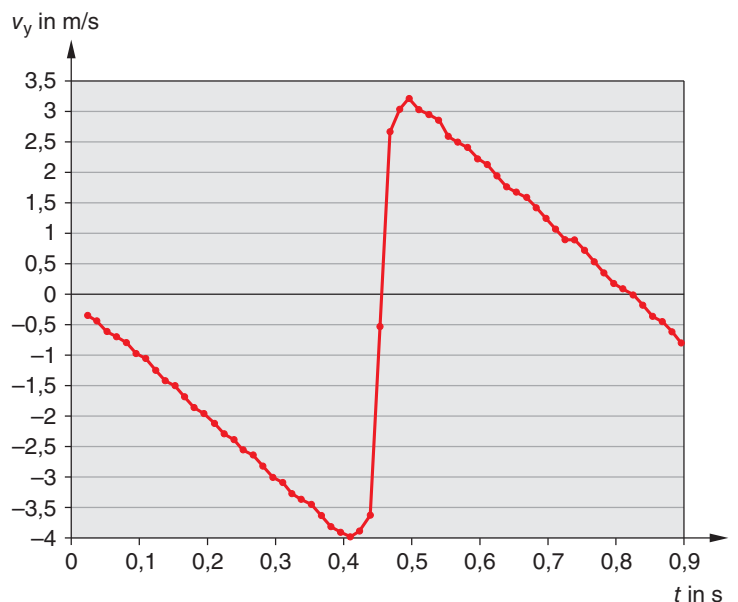


Abb. 19: y-Geschwindigkeitskomponente über der Zeit



heren Tempo liegen. Um einen Tennisball auf Regelkonformität zu testen, ist es demnach zwingend erforderlich, ihn wie beim Versuchsaufbau des Internationalen Tennisverbandes aus 254 cm fallenzulassen [14]. Zudem fällt in Abb. 20 auf, dass die Rücksprunghöhe bzw. der Elastizitätskoeffizient auf dem Teppichboden der Tennishalle geringer ist als im Klassenzimmer. Der Tennisball wird beim Prellen auf dem Teppichboden folglich stärker gedämpft.

5 Drehbewegungen bei Tennisschlägen

Neben der vorgestellten dynamischen (Abschnitt 3) und energetischen (Abschnitt 4) Betrachtungen sind auch kinematische Betrachtungen möglich. Beispielsweise kann die Bewegung von Tennisaufschlägen analysiert werden.

Mithilfe des Videoanalyseprogramms measure dynamics können die Bahnkur-

ven und die Geschwindigkeit des Handgelenks und der Tennisschlägerspitze betrachtet werden. Vieles ist schon anhand einer Abbildung erkennbar, bei der in konstanten zeitlichen Abschnitten die Schulter, das Handgelenk sowie die Tennisschlägerspitze markiert werden (siehe Abb. 21, bei 210 fps jeder fünfte Ort markiert, also effektiv 35 fps). Aus dieser Abbildung ist zu erkennen, dass sowohl die Tennisschlägerspitze (blau) als auch das Handgelenk (rot) grob eine Kreisbahn beschreiben. Die Bahnkurve des Handgelenks ist dabei nicht geschlossen, während die Bahnkurve der Tennisschlägerspitze fast geschlossen ist. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Schulter (grün) sich während des Aufschlags nur wenig bewegt. Tennisschlägerspitze und Handgelenk beschreiben so grob eine Kreisbewegung mit der Schulter als Drehzentrum. Aufgrund der größeren Entfernung der Tennisschlägerspitze zum

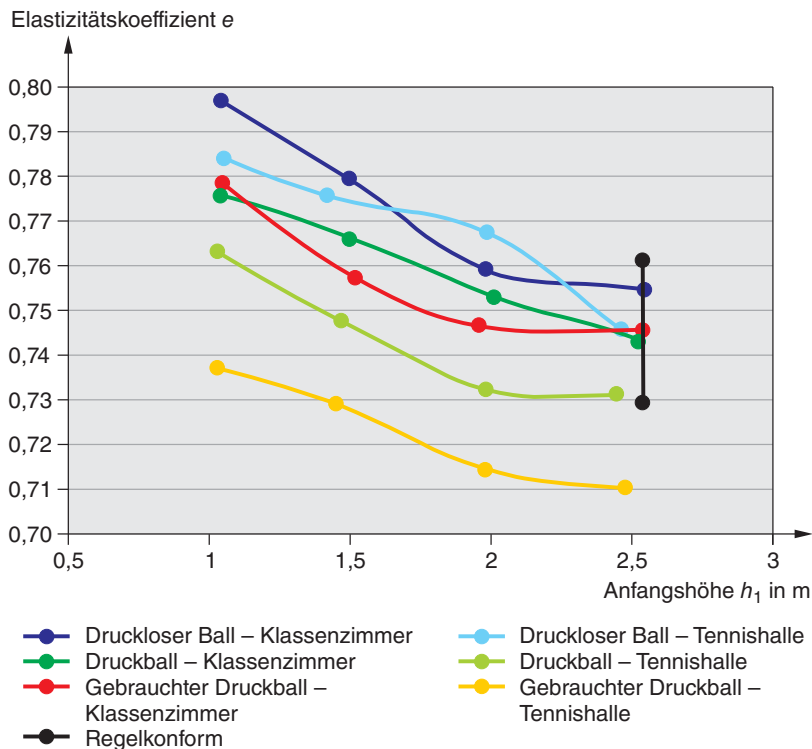


Abb. 20: Elastizitätskoeffizient e in Abhängigkeit von der Anfangshöhe h_1

Drehzentrum ist gemäß der Beziehung für Kreisbewegungen

$$v = \omega r \quad (7)$$

mit der Entfernung zum Drehzentrum r und der Winkelgeschwindigkeit ω das Tempo v der Tennisschlägerspitze größer. In Abb. 21 ist dies daran zu erkennen, dass die Orte der Tennisschlägerspitze weiter auseinander liegen als die Orte des Handgelenks. Um das Momentantempo zu berechnen, sind jedoch mehr Messwerte nötig (alle Bilder bei 210 fps). Die Tennisschlägerspitze erreicht ihr maximales Tempo von $v = 40 \text{ m/s} = 140 \text{ km/h}$ genau im Moment des

Ballkontaktes, während das Handgelenk nur ein Tempo von $v = 11 \text{ m/s} = 40 \text{ km/h}$ erreicht.

Um den Tennisaufschlag nun weiter zu analysieren, bietet es sich an, die bereits markierten Orte von Schulter und Handgelenk sowie von Handgelenk und Tennisschlägerspitze jeweils in Form einer Linie verbinden zu lassen (siehe Abb. 22). In Abb. 22 ist zu erkennen, dass zu Beginn der Aufschlagsbewegung der Tennisschläger im rechten Winkel zum Schlagarm steht und vom Schlagarm aus nach rechts zeigt (Zeitpunkt 1). Am Ende der Aufschlagsbewegung steht der Tennisschläger wieder im fast rechten Winkel zum Schlagarm,

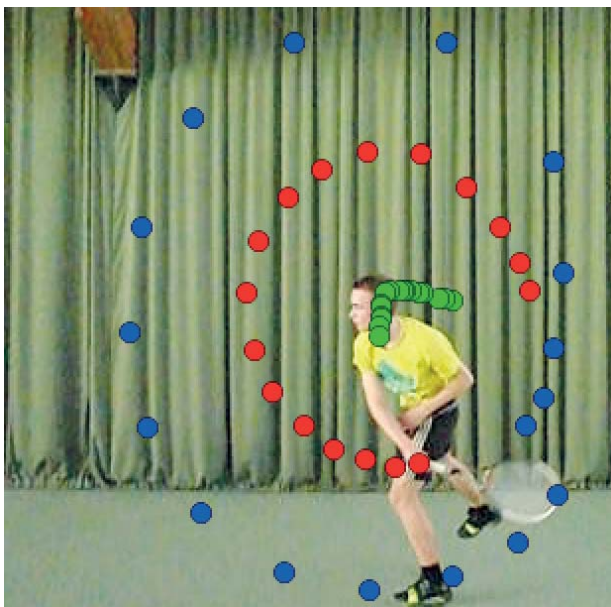


Abb. 21: Bahnkurve von Schulter (grün), Handgelenk (rot) und Tennisschlägerspitze (blau), $\Delta t = 29 \text{ ms}$

zeigt diesmal jedoch nach links (Zeitpunkt 3). Der Tennisschläger hat das Handgelenk quasi „überholt“. Dies liegt an der Einwärtsrotation des Handgelenks während der Durchführung des Aufschlags. Die Rotation des Handgelenks während des gesamten Tennisaufschlags beträgt insgesamt fast 180° . Die stärkste Rotation liegt dabei kurz vor dem Treffpunkt mit dem Ball vor; zwischen Zeitpunkt 1 und Zeitpunkt 2 in Abbildung 22 dreht sich das Handgelenk um ca. 70° .

Sind die Zeitintervalle Δt bekannt, so lassen sich auch Winkelgeschwindigkeiten gemäß der Beziehung

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

berechnen. Die mittlere Winkelgeschwindigkeit des Armes um die Schulter (rote Linie in Abb. 22) ergibt sich zwischen den Zeitpunkten 1 und 2 mit $\Delta\varphi = 36^\circ$ zu $\bar{\omega} = 13 \text{ s}^{-1}$. Wäre der Schläger nur die geradlinige Verlängerung des Armes, hätte die Schlägerspitze gemäß Gleichung (7) mit der Entfernung $r = 1,3 \text{ m}$ zur Schulter nur ein Tempo von $v = r\omega = 17 \text{ m/s} = 60 \text{ km/h}$, während das durchschnittliche Tempo in diesem Zeitintervall 120 km/h beträgt.

Die mittlere Winkelgeschwindigkeit des Handgelenks und damit des Schlägers bzgl. des Arms (die blaue Linie in Abb. 22) ergibt sich zwischen den Zeitpunkten 1 und 2 zu $\bar{\omega} = 26 \text{ s}^{-1}$. Gäbe es nur diese Einwärtsrotation des Handgelenks ohne die Rotation des Armes um die Schulter (ruhender Arm), hätte die Tennisschlägerspitze gemäß Gleichung (7) mit der Entfernung zum Handgelenk $r = 0,685 \text{ m}$ immerhin schon ein beachtliches Tempo von $v = r\omega = 18 \text{ m/s} = 64 \text{ km/h}$.

Eine alternative Darstellungsmöglichkeit des Tennisaufschlags zur Analyse ist die Erstellung eines Stroboskopbildes. Aus der Abb. 23 (jeder siebte Frame bei 210 fps ist effektiv 30 fps) ist auch die kreisförmige Bewegung des Handgelenks und der Tennisschlägerspitze zu erkennen, während der Rumpf sich nur relativ wenig bewegt. In diesem Stroboskopbild fällt auch auf, dass im Bereich des Balltreffpunkts größere Abstände zwischen den Einzelbildern vorliegen als zu Beginn und zum Ende der Aufschlagsbewegung. Hat das Objekt zwischen zwei Einzelbildern nun eine größere Strecke zurückgelegt, so war sein Tempo größer. Werden auf dem Stroboskopbild das Handgelenk und die Tennisschlägerspitze betrachtet, so erkennt man auch hier anhand der unterschiedlichen Abstände im Bereich des Balltreffpunkts, dass die Tennisschlägerspitze ein

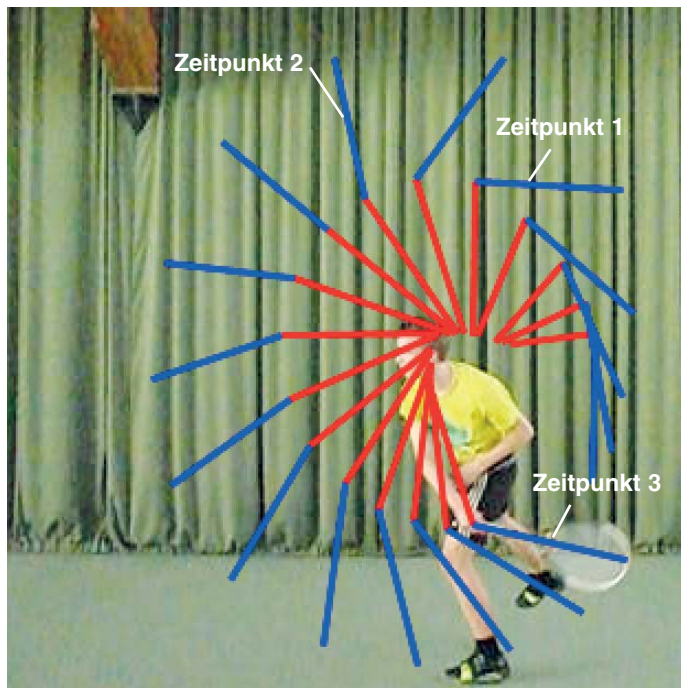


Abb. 22: Bewegung von Arm und Tennisschläger

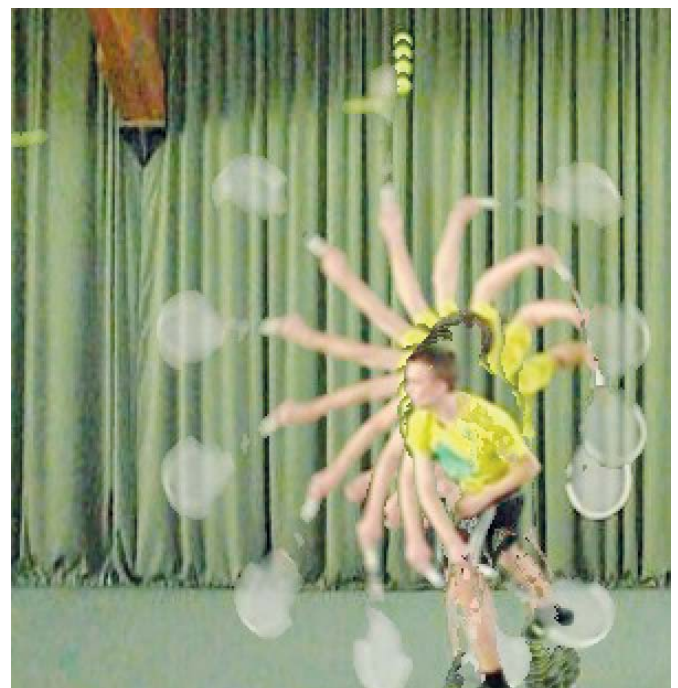


Abb. 23: Stroboskopbild eines Tennisaufschlags, $\Delta t = 3,3 \text{ ms}$

viel größeres Tempo besitzt als das Handgelenk.

Der Mehrwert der Veranschaulichung des Bewegungsablaufs mithilfe eines Stroboskopbildes ist die hohe Anschaulichkeit für Schüler. Außerdem erfolgt die Erstellung des Stroboskopbildes im Gegensatz zur vorherigen Analyse ohne größere Einstellungen in einer Videoanalysesoftware; es wird lediglich ein Video aufgenommen und ohne viel Arbeitsaufwand qualitativ analysiert. Besonders einfach können solche Stroboskopbilder in Echtzeit mit der Freeware-Software „Live Video Strobe“ und einer Webcam erstellt werden, bei der man vorher kein Video aufnehmen muss [15].

6 Fazit

Tennis eignet sich sehr gut zur Anwendung im Physikunterricht, wodurch verschiedene Themenbereiche der Mechanik, wie zum Beispiel Kräfte, die Energieerhaltung und -umwandlung, der schiefe Wurf, der Magnus-Effekt und Kreisbewegungen behandelt werden können. Die dargestellten Versuche sind weniger zur Einführung, sondern vielmehr zur Anwendung, zur Vertiefung sowie zur Herstellung eines Praxisbezugs geeignet.

Der Physikunterricht kann hier auch durch einen Ortswechsel belebt werden, da die Versuche teilweise außerhalb des Klassenzimmers durchgeführt werden müssen. Hier bietet sich speziell eine fachübergreifende Zusammenarbeit mit dem Schulfach Sport an, da die erzielten Ergebnisse sowohl für die Physik als auch für den Sport interessant sind. ■

Literatur

- [1] Egidy, Benedikt (2013): *Game, Set and Match. Schulversuche zu Tennis im Physikunterricht, Staatsexamensarbeit, Universität Würzburg*, www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/tennis.htm
- [2] Tipler, Paul A.; Mosca, Gene (2009): *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. 6. Deutsche Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg*
- [3] Wiesner, Hartmut; Wilhelm, Thomas; Waltnner, Christine; Tobias, Verena; Rachel, Alexander; Hopf, Martin (2011): *Mechanik I: Kraft- und Geschwindigkeitsänderung, Reihe Unterricht Physik, Band 5 Aulis Verlag*
- [4] Deutscher Tennisbund e.V.: http://www.dtb-tennis.de/content/download/680/8523/version/2/file/Tennisregeln_der_ITF.pdf, zuletzt aufgerufen am 22.11.2013
- [5] Demtröder, Wolfgang (2008): *Experimentalphysik 1 – Mechanik und Wärme. 5. neu bearbeitete und aktualisierte Auflage, Springer, Berlin Heidelberg New York*
- [6] Ziebur, Fredi (1999): *Übungsaufgaben. Teil 5. Physik in der Schule 6/37, S. 388 - 392*
- [7] Wiesner, Hartmut (1994): *Zum Einführungsunterricht in die Mechanik: Fachmethodische Überlegungen und Unterrichtsversuche zur Reduzierung von Lernschwierigkeiten. In: Naturwissenschaften im Unterricht – Physik, Stuttgart, Klett Verlag, Seite 16 - 23*
- [8] Wilhelm, Thomas; Zimmermann, Fabian: *Die Luft beim Fußballflug - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 63, Nr. 1, 2014, S. 28 – 37*
- [9] Wilhelm, Thomas; Reusch, Wolfgang; Jakob, Peter: *Physik mit Kick. In: Weigand, H.-G. (Hrsg.): Fußball – eine Wissenschaft für sich, Verlag Königshausen & Neumann, Würzburg, 2006*

[10] Brody, Howard; Cross, Rod; Lindsey, Crawford (2002): *The Physics and Technology of Tennis. USRSA, Racquet Tech Pub. Vista, California USA*

[11] Tolan, Metin (2010): *So werden wir Weltmeister – Die Physik des Fußballspiels. 1. Auflage, Piper Verlag GmbH, München*

[12] Michel, M.; Wilhelm, T.: *Dynamik mit Hochgeschwindigkeitsvideos - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 59, Nr. 7, 2010, S. 23 - 30*

[13] Zimmermann, F.; Wilhelm, T.: *Fußball im Physikunterricht – gemessen mit dem Computer - In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 63, Nr. 1, 2014, S. 9 – 17*

[14] The International Tennis Federation: <http://www.itftennis.com/technical>, zuletzt aufgerufen am 22.11.2013

[15] Suleder, M.; Wilhelm, T.: *Stroboskopbilder in Echtzeit - In: PhyDid-B – Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Jena 2013, 2013, www.phydid.de*

Online-Ergänzung

Einige der hier vorgestellten Videos findet man mit den entsprechenden Einblendungen in den Online-Ergänzungen dieser Ausgabe 7/63 unter www.aulis.de.

Anschriften der Verfasser

Prof. Dr. Thomas Wilhelm, Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt
E-Mail: wilhelm@physik.uni-frankfurt.de;
StRef Benedikt Egidy, E.T.A. Hoffmann-Gymnasium Bamberg, Sternwartstr. 3, 96049 Bamberg,
E-Mail: benedikt.e@gmx.de.