

## Tennis im Physikunterricht

Benedikt Egidy\*, Thomas Wilhelm<sup>†</sup>

\*Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Universität Würzburg, Emil-Hilb-Weg 22, 97074 Würzburg

<sup>†</sup>Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main  
[benedikt.e@gmx.de](mailto:benedikt.e@gmx.de), [wilhelm@physik.uni-frankfurt.de](mailto:wilhelm@physik.uni-frankfurt.de)

### Kurzfassung

Tennis, eine der deutschlandweit gefragtesten Sportarten, kann im Physikunterricht genutzt werden, um physikalische Zusammenhänge aufzuzeigen. Mit Hilfe der Videoanalyse von Bewegungen kann die Energieerhaltung und -umwandlung eines springenden Tennisballes behandelt werden. Kraftstöße zwischen Tennisball und Boden bzw. zwischen Tennisball und Schläger können mit der Kraftmessplatte, mit der Videoanalyse bzw. mit elektrischen Messungen untersucht werden. Die Bewegung beim Tennisaufschlag kann mit der Videoanalyse und mit einem 3D-Beschleunigungssensor analysiert werden. Für die Untersuchung des Fluges eines Tennisballs ist wiederum die Videoanalyse die geeignete Wahl, wobei sich hier der Magnus-Effekt als ein wichtiger Einflussfaktor herausstellt.

### 1. Begründung

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. Mit Hilfe der Videoanalyse von Bewegungen und mit Hilfe von computerbasierter Messwerterfassung können Inhalte des Mechanikunterrichts der Oberstufe anhand von Tennis angewandt und vertieft werden.

### 2. Springender Tennisball

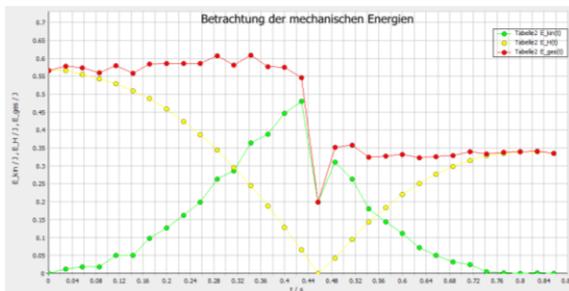


Abb. 1: Darstellung der Umwandlung der mechanischen Energien

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 die Ausgangshöhe erreicht. Dieser Ablauf kann auch mit einem Tennisball behandelt werden. Dazu wird das Springen eines senkrecht fallengelassenen Ten-

nisballes aus einer Anfangshöhe  $h_1$  mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera (hier verwendet: 210 fps) aufgezeichnet und mit einem Videoanalyseprogramm analysiert.

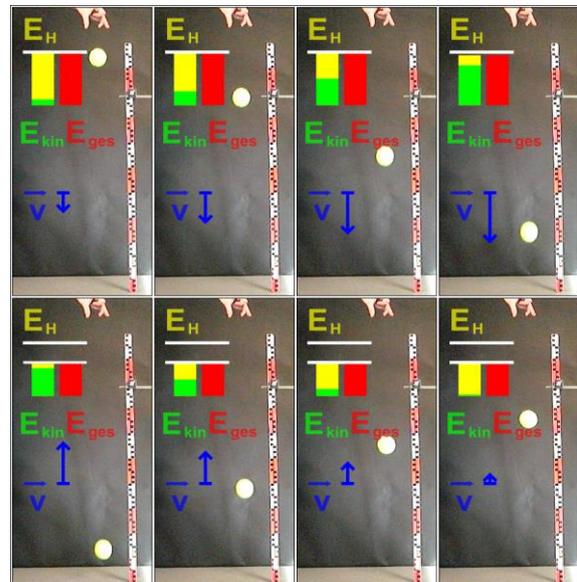


Abb. 2: Serienbild des Versuchsablaufs unter Einblendung dynamisch ikonischer Repräsentationen

Die gegenseitige Umwandlung von Höhenenergie und kinetischer Energie kann mit Hilfe des Videoanalyseprogramms measure dynamics nicht nur als Diagramm, sondern auch mit Hilfe von Säulen im Video visualisiert werden. Aus Abbildung 1 und 2 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 Gesamtenergiemenge 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. Da nur 35 Bilder pro Sekunde analysiert wurden (jedes sechste bei einer Aufnahme mit 210 fps), kann dies nicht abgebildet werden. Die mechanische Gesamtenergiemenge, bestehend 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. Beim Prellen des Balles wird jedoch auch ein Teil der kinetischen Energie in andere Energieformen, wie zum Beispiel in innere Energie, umgewandelt, was mit Hilfe einer Wärmebildkamera sichtbar gemacht werden kann (siehe Abb. 3).

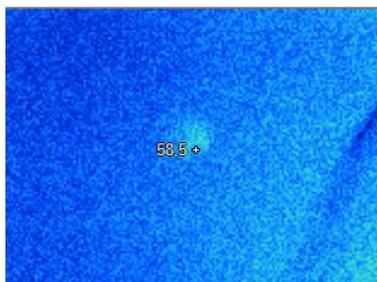


Abb. 3: Wärmebild eines Tennisballabdrucks

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 Prellen, verlässt. Anschließend 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 Prellen sind, kann mit Hilfe des Elastizitätskoeffizienten beschrieben werden. Er berechnet sich gemäß folgender Beziehung [1]:

$$e = \frac{|v_2|}{|v_1|} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \quad \{1\}$$

Mit Hilfe 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. 4) sowie die Geschwindigkeit  $v_1$  kurz vor und die Geschwindigkeit  $v_2$  kurz nach dem ersten Prellen des Balles auf den Boden (siehe Abb. 5) bestimmt und hieraus der Elastizitätskoeffizient  $e$  berechnet. Für eine Fallhöhe von ca. 1,00 m ergibt sich mit Gleichung {1} und den Werten aus Abbildung 1 bzw. 2:

$$e = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} = \sqrt{\frac{0,62 \text{ m}}{1,03 \text{ m}}} = 0,776 \quad \text{bzw.}$$

$$e = \frac{|v_2|}{|v_1|} = \frac{3,20 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{4,25 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,753 .$$

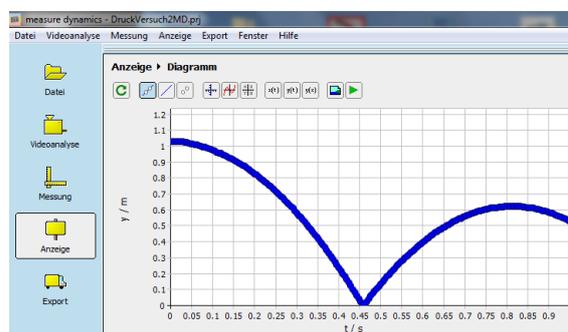


Abb. 4: Ballhöhe in Abhängigkeit der Zeit

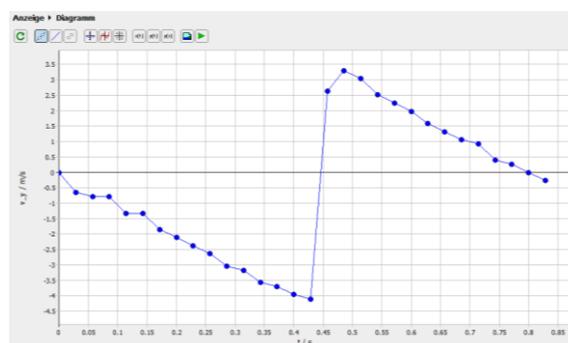


Abb. 5: y-Geschwindigkeitskomponente über der Zeit

Beide Bestimmungsmethoden des Elastizitätskoeffizienten (über Höhen- und über Geschwindigkeitsmessung) liegen also 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 ungenauer. Aufgrund der begrenzten Kameraqualität (bestimmt durch die Bildrate und die Auflösung) ergibt sich bei den hier auftretenden Geschwindigkeiten ein Fehler von ca. 10 %, im Gegensatz zu einem Fehler von ca. 1 % bei der Höhenmessung [2].

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

Aus Abbildung 6 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 höheren 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 [3]. Zudem fällt in Abbildung 6 auf, dass die Rücksprunghöhe bzw. der Elastizitätskoeffizient auf dem Teppichboden der Tennishalle geringer ist als im Klassenzimmer. Der Tennisball wird beim Pellen auf dem Teppichboden folglich stärker gedämpft.

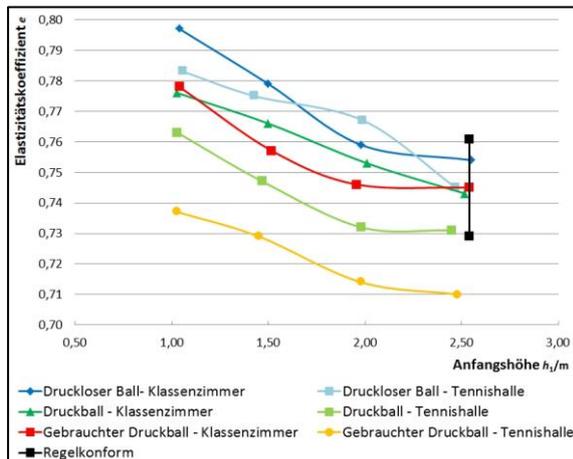


Abb. 6: Elastizitätskoeffizient  $e$  in Abhängigkeit von der Anfangshöhe  $h_1$

### 3. Kraftstoß im Tennis

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

$$\text{Kraftstoß} := \int_{t_A}^{t_E} \vec{F} dt \quad \{2\}$$

beschrieben [1]. Mit dem zweiten Newton'schen Axiom gilt (da die Masse  $m$  konstant ist):

$$\int_{t_A}^{t_E} \vec{F} dt = m \cdot (\vec{v}_E - \vec{v}_A) \quad \{3\}$$

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

$$\vec{F}_{\text{Mittel}} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v} \quad \{4\}$$

Diese Gleichung kann die zentrale Gleichung im Mechanikunterricht der Sekundarstufe I sein [4].

#### 3.1. Kraft beim Stoß Tennisball mit 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. Es wurde der Kraftverlauf eines Tennisballes beim

Aufprall auf die Kraftmessplatte (Firma Pasco) aufgenommen und mit Hilfe des Programms DataStudio Kontaktzeit und mittlere Kraft bestimmt und daraus der Kraftstoß beim Aufprall des Tennisballes berechnet. Für einen regelkonformen Tennisaufschlag ergab sich die Abbildung 7.

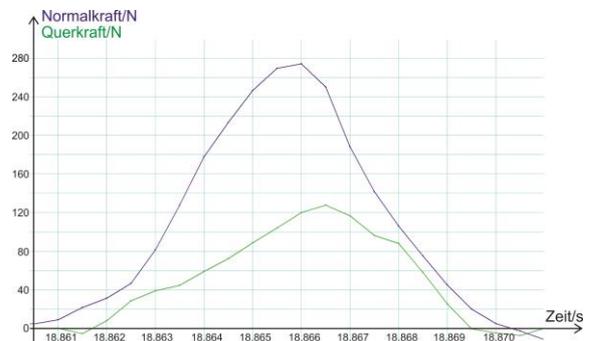


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf der Normal- und Querkraft eines auf die Kraftmessplatte aufgeschlagenen Balles

Aus der Abbildung 7 ergeben sich als Mittelwerte  $\bar{F}_{\text{normal}} = 129 \text{ N}$  und  $\bar{F}_{\text{quer}} = 67 \text{ N}$  und als Maximalwerte  $F_{\text{normal}} = 275 \text{ N}$  und  $F_{\text{quer}} = 128 \text{ N}$  (sowie die Kontaktzeit  $\Delta t \approx 8 \text{ ms}$ ). Mit Hilfe der bekannten Tennisballmasse  $m = 0,057 \text{ kg}$  [5] und dem zweiten Newton'schen Axiom

$$a = F/m \quad \{5\}$$

ergibt sich  $\bar{a}_{\text{normal}} = 2,3 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$  und  $\bar{a}_{\text{quer}} = 1,2 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$  und als 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 der 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 [2].

#### 3.2. Kraft beim Stoß Tennisball mit Boden (Videoanalyse)

Der Kraftstoß zwischen Tennisball und Boden kann auch mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen werden. Die Ermittlung der auftretenden Kraft erfolgt direkt über die Bestimmung der Geschwindigkeiten kurz vor und kurz nach dem Pellen und der Bestimmung der Kontaktzeit oder indirekt über das Kompressibilitätsverhalten des Tennisballes.

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

men:  $v_{vorher} = -4,5 \text{ m/s}$  und  $v_{nachher} = 3,3 \text{ m/s}$ . Betrachtet man den Aufprall des Tennisballes in der Einzelbildfunktion (Zeit zwischen zwei Bildern: 1 ms), so lässt sich hieraus die Kontaktzeit des Tennisballes mit dem Boden, hier  $\Delta t = 0,006 \text{ s}$ , bestimmen (siehe Abb. 8).

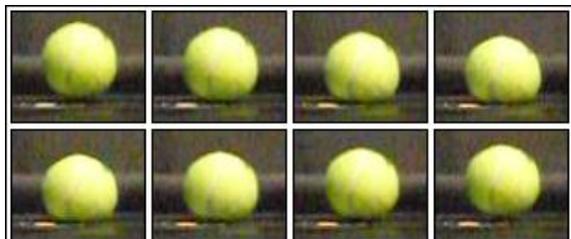


Abb. 8: Serienbild eines prellenden Tennisballes

Hieraus ergibt sich mit der bekannten Tennisballmasse  $m$  und den Gleichungen {4} und {5}:

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

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

Die Kraft vom Boden auf den Tennisball bzw. vom Tennisball auf den Boden kann mittels Videoanalyse auch über die Kompressionseigenschaft des Tennisballes näherungsweise bestimmt werden. Hierzu ist zunächst der Zusammenhang von Kraft und Abplattungsdurchmesser zu ermitteln. Hierfür wird der Tennisball in eine Presse gelegt (siehe Abb. 9), mit Gewichten belastet und die jeweils aus den einzelnen Gewichten resultierende Höhe des Tennisballes bestimmt.

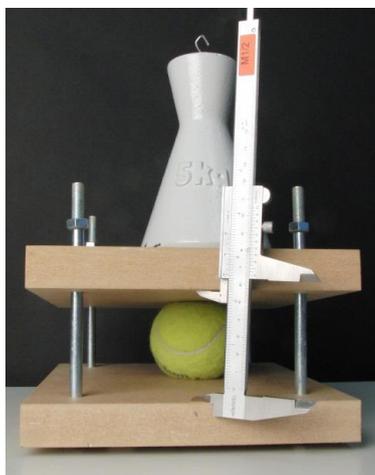


Abb. 9: Tennisball in Presse

Sodann wird die auf dem Tennisball wirkende Gewichtskraft gegen die Abplattungsstrecke des Tennisballes aufgetragen (siehe Abb. 10). Die Messwerte verhalten sich annähernd linear, es kann also die Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes angenommen werden [1, 6].

Im Versuch selbst wird der Tennisball mit moderatem Tempo senkrecht auf den Boden geworfen und der Aufprall des Tennisballs auf den Boden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen.

Mit dem Videoanalyseprogramm measure dynamics lässt sich die minimale Tennisballhöhe während des Kontaktes des Tennisballes mit dem Boden bestimmen (siehe Abb. 11).

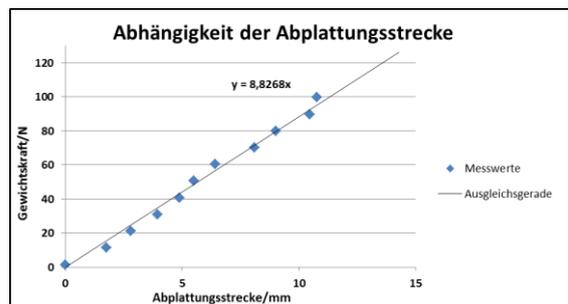


Abb. 10: Abhängigkeit der Abplattungsstrecke von der auf ihn lastenden Gewichtskraft

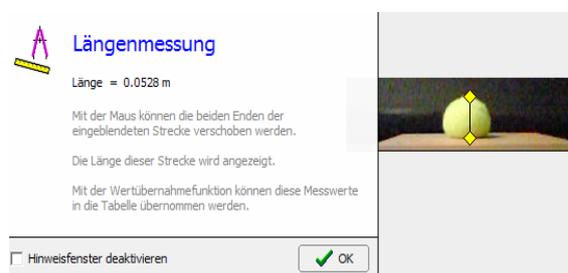


Abb. 11: Messung der Höhe des auftreffenden Tennisballes

Die Kraft zwischen Tennisball und Boden lässt sich nun mit Hilfe von Abbildung 11 bestimmen (Tennisballdurchmesser: 0,066 m [5]). Mit Abbildung 10 ergibt sich  $F_{quasistatisch} \approx 120 \text{ N}$ .

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 Abbildung 10 leidet an den niedrigen Referenzgewichten. Außerdem entspricht auch 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 Kraft zwischen Tennisball und Boden lässt sich weiterhin auch energetisch bestimmen [7], wenn in der o. a. Videoanalyse des geworfenen Balles die Geschwindigkeiten kurz vor und kurz nach dem Aufprall bestimmt werden ( $v_{vorher} = -7,3 \text{ m/s}$ ,  $v_{nachher} = 4,4 \text{ m/s}$ ). Unter Annahme der Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes kann die Spannenergie gleich der kinetischen Energie gesetzt werden und es gilt:

$$E_{Spann}(s) = \frac{1}{2} k s^2 = \frac{1}{2} F_{Deformation}(s) \cdot s$$

$$= E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2 \quad \{6\}$$

Hieraus lässt sich für die Kraft zwischen Tennisball und Boden eine obere Schranke (aus  $v_{vorher}$ ) und eine untere Schranke (aus  $v_{nachher}$ ) bestimmen:

$$F_{Deformation} = \frac{m}{s} v_{vorher/nachher}^2 \quad \{7\}$$

Realistischer für die Deformationskraft dürfte der Mittelwert dieser beiden Schranken sein. Hier ergibt sich mit Gleichung {7}:  $\bar{F}_{Deformation} = 160 \text{ N}$ .

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 [2]. Über die Newton'sche Bewegungsgleichung {4} lässt sich nun zusätzlich die Kontaktzeit abschätzen. Hier beträgt sie ca.  $\Delta t = 4 \text{ ms}$ .

### 3.3. Kraft beim Stoß Tennisball mit Tennisschläger (elektrisch)

Interessanter ist die Kraft beim Stoß von Tennisball mit Tennisschläger [8]. 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 metallisch leitenden Materialien präpariert. Hier wurde der Tennisball in haushaltübliche Aluminiumfolie gewickelt, auf die Tür wurde ein ca.  $1 \text{ m}^2$  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 (siehe Abb. 12). Als Stromsensor eignen sich computerbasierte Messwertfassungssysteme. Hier wurde der Spannungs-/Stromsensor der Lehrmittelfirma Pasco verwendet, die aufgenommenen Daten wurden mit DataStudio ausgewertet.

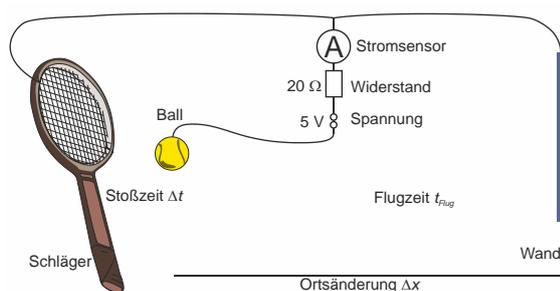


Abb. 12: Schaltbild

Aus dem aufgenommenen zeitlichen Verlauf (siehe Abb. 13) kann die Stoßzeit des Tennisballes mit dem Tennisschläger (Zeitdauer des ersten Plateaus) 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 Abbildung 13 ergibt sich  $\Delta t_{Sto\beta} \approx 0,007 \text{ s}$  und  $t_{Flug} = t_2 - t_1 = 0,326 \text{ s}$ .

Ist die Flugstrecke des Balles bekannt ( $\Delta x = 3,9 \text{ m}$ ), können mit den Gleichungen {4} und {5} die mittlere

re Kraft  $\bar{F}$  und die mittlere Beschleunigung  $\bar{a}$  bestimmt werden [8] und es ergibt sich:

$$v_{Flug} = \frac{\Delta x}{t_{Flug}} = 12,0 \text{ m/s},$$

$$\bar{F} = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t_{Sto\beta}} = 105 \text{ N} \text{ und}$$

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t_{Sto\beta}} = 1,7 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2.$$

Der Versuch selbst ist relativ unanfällig für Fehler. Größtes Problem dürfte die begrenzte Abtastrate des Stromsensors sein (1.000 Hz), so dass sich für die Stoßzeit eine Ungenauigkeit von  $\pm 1 \text{ ms}$  ergibt. Eine zweite Ungenauigkeit ergibt sich durch ein nicht exakt horizontales Fliegen des Tennisballes, was aufgrund der Erdanziehungskraft nicht komplett gelingen kann.



Abb. 13: Zeitlicher Verlauf des Stromflusses

### 4. Bewegungsanalyse von Tennisschlägen

Neben der vorgestellten energetischen (Abschnitt 2) und dynamischen (Abschnitt 3) Betrachtung sind auch kinematische Betrachtungen möglich. Beispielsweise kann die Bewegung von Tennisaufschlägen analysiert werden.

#### 4.1. Bewegungsanalyse per Video

Mit Hilfe des Videoanalyseprogramms measure dynamics und unter Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera (210 fps) können die Bewegung 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. 14 jeder fünfte Ort markiert, also 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, näherungsweise also einem Drehzentrum gleicht. Tennisschlägerspitze und Handgelenk beschreiben so grob eine Kreisbewegung mit der Schulter als Drehzentrum. Aufgrund der größeren Entfernung der Tennisschlägerspitze zum Drehzentrum ist gemäß der Beziehung für Kreisbewegungen

$$v = \omega \cdot r \quad \{8\}$$

mit der Entfernung zum Drehzentrum  $r$  und der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  das Tempo  $v$  der Tennisschlägerspitze größer. In Abbildung 14 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, 210 fps). Die Tennisschlägerspitze erreicht ihr maximales Tempo von  $v = 40 \text{ m/s} \approx 140 \text{ km/h}$  genau im Moment des Ballkontaktes, während das Handgelenk nur ein Tempo von  $v = 11 \text{ m/s} = 40 \text{ km/h}$  erreicht.

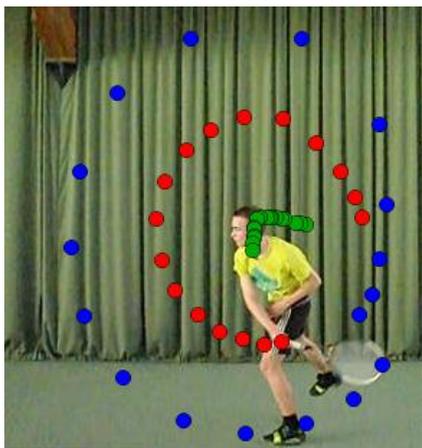


Abb. 14: Bahnkurve von Schulter, Handgelenk und Tennisschlägerspitze

Um den Tennisaufschlag nun weiter zu analysieren, bietet es sich an, die bereits markierten Orte Schulter und Handgelenk sowie Handgelenk und Tennisschlägerspitze jeweils in Form einer Linie verbinden zu lassen (siehe Abb. 15). In Abbildung 15 ist zu erkennen, dass zu Beginn der Aufschlagsbewegung der Tennisschläger im rechten Winkel zum Schlagarm nach rechts zeigt (Zeitpunkt 1). Am Ende der Aufschlagsbewegung zeigt der Tennisschläger im fast rechten Winkel zum Schlagarm, 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  $180^\circ$ . Die stärkste Rotation liegt dabei kurz vor dem Treffpunkt mit dem Ball vor; zwischen Zeitpunkt 1 und Zeitpunkt 2 in Abbildung 15 dreht sich das Handgelenk um ca.  $70^\circ$ .

Sind die Kamera- und Analyseigenschaften bekannt, so lassen sich auch Winkelgeschwindigkeiten gemäß der Beziehung

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \quad \{9\}$$

berechnen. Die mittlere Winkelgeschwindigkeit des Armes um die Schulter (rote Linie in Abb. 15) 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 {8} mit der Entfernung  $r =$

1,3 m zur Schulter nur ein Tempo von  $v = r \cdot \omega = 17 \text{ m/s} = 60 \text{ km/h}$ , während das durchschnittliche Tempo in diesem Zeitintervall 120 km/h beträgt.

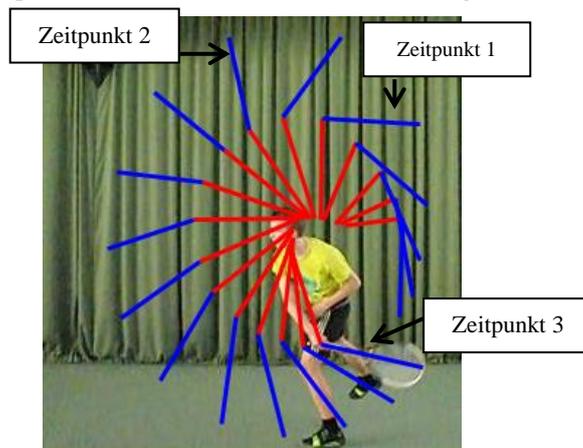


Abb. 15: Bewegung von Arm und Tennisschläger

Die mittlere Winkelgeschwindigkeit des Handgelenks und damit des Schlägers bzgl. des Arms (die blaue Linie in Abb. 15) 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 {8} mit der Entfernung zum Handgelenk  $r = 0,685 \text{ m}$  immerhin schon ein beachtliches Tempo von  $v = r \cdot \omega = 18 \text{ m/s} = 64 \text{ km/h}$ .



Abb. 16: Stroboskopbild eines Tennisaufschlags

Eine alternative Darstellungsmöglichkeit des Tennisaufschlags zur Analyse ist die Erstellung eines Stroboskopbildes. Aus der Abbildung 16 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 viel größeres Tempo besitzt als das Handgelenk.

Der Mehrwert der Veranschaulichung des Bewegungsablaufs mit Hilfe eines Stroboskopbildes ist die hohe Anschaulichkeit für den Schüler. Außerdem erfolgt die Erstellung des Stroboskopbildes im Gegensatz zur vorherigen Analyse ohne größere technische Hilfsmittel, es wird lediglich ein Video aufgenommen und ohne viel Arbeitsaufwand qualitativ analysiert.

#### 4.2. Bewegungsanalyse per Beschleunigungssensor

Man kann mit Hilfe eines am Unterarm befestigten dreidimensionalen Beschleunigungssensors die Beschleunigungen des Unterarms messen, was hier bei zwei Aufschlägen aufgezeichnet und miteinander verglichen wurde. Für eine Durchführung in einer Schulklasse ist das kaum geeignet, da die Auswertung dieses Versuchs einen relativ hohen Abstraktionsgrad für Bewegungen von den Schülern verlangt, weshalb er als sehr komplex eingestuft werden muss. Außerdem verlangt der Versuch relativ viel physikalisches und tennisspezifisches Vorwissen. Nur für Schüler, die entsprechend viel physikalisches und tennisspezifisches Wissen mitbringen, ist dieser Versuch dementsprechend eine Vertiefungsmöglichkeit für die Mechanik, speziell von Kreisbewegungen.



Abb. 17: Versuchsaufbau – Positionierung des Beschleunigungssensors

Hier wurde der Beschleunigungssensor auf den Unterarm geklebt (-z-Achse in Schlagrichtung) (siehe Abb. 17) und ein Tennisaufschlag ohne Spin mit möglichst hohem Balltempo (dies entspricht einem sog. ersten Aufschlag) und ein Tennisaufschlag mit Spin und geringerem Balltempo (dies entspricht einem sog. zweiten Aufschlag) ausgeführt, wobei sich die Beschleunigungsdiagramme der Abbildungen 18 und 19 ergaben.

Um diese Beschleunigungsdiagramme besser interpretieren zu können, ist zu empfehlen gleichzeitig ein Video aufzunehmen. So kann z.B. der Zeitpunkt des Ballkontaktes bestimmt werden. Die Beschleunigungsabbildungen von den beiden Aufschlägen ähneln einander sehr. Ein Unterschied liegt im Maximum der z-Komponente zum Zeitpunkt des Ballkontaktes. Beim ersten Aufschlag (siehe Abb. 18) beträgt die maximale Beschleunigung des Unterarms in Schlagrichtung  $70 \text{ m/s}^2$ , beim zweiten Aufschlag (siehe Abb. 19) lediglich  $50 \text{ m/s}^2$ . Auch fällt auf, dass beim zweiten Tennisaufschlag zum Zeitpunkt des Ballkontaktes deutlich mehr Beschleunigungen in Querrichtung auftreten als beim ersten Tennisaufschlag. Zum Erreichen des typischen Spins beim zweiten Tennisaufschlag musste der Schläger stärker gedreht werden, was zu größeren Querbewegungen führt.

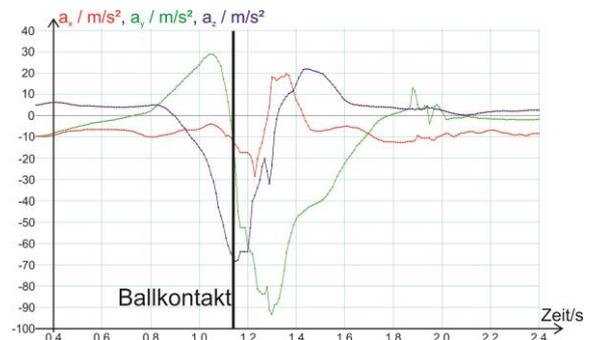


Abb. 18: Komponenten der Beschleunigung bei einem ersten Aufschlag

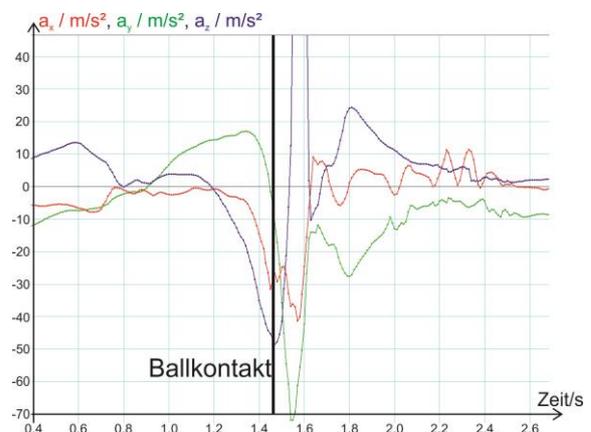


Abb. 19: Komponenten der Beschleunigungen bei einem zweiten Aufschlag

## 5. Flug eines Tennisballes

Der Flug eines Tennisballes durch die Luft ist als schräger Wurf ein Standardthema des Physikunterrichts. Dieser Flug wird von drei Faktoren maßgeblich beeinflusst: der Erdanziehungskraft, der Luftreibungskraft und - sofern sich der Ball um seine Achse dreht - der 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 (siehe Abb. 20). Die Bewegung dieser Luftwirbel benötigt Energie, die aus der 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 Formel gilt:

$$F_L = \frac{1}{2} c_W \rho A v^2, \quad \{10\}$$

wobei  $\rho$  die Dichte der Luft,  $A$  die Querschnittsfläche eines Tennisballs,  $c_W$  der Luftwiderstandswert des Tennisballs und  $v$  der Betrag der Geschwindigkeit (= Tempo) ist [9].

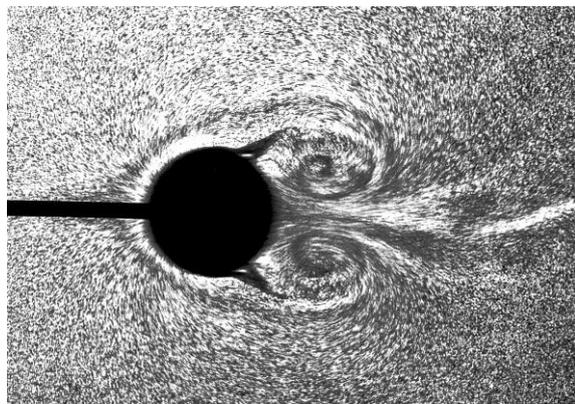


Abb. 20: Strömung um eine Kugel

Als Magnus-Kraft wird die Kraft senkrecht zur Bewegungsrichtung (siehe Abb. 21 und 22) bezeichnet, die verantwortlich für die Bahnabweichung von sich rotierenden Objekten ist. Beim Flug eines um sich rotierenden Tennisballs kann diese Kraft sowohl ein früheres Landen auf dem Boden als auch ein späteres Landen ermöglichen.



Abb. 21: Kräfte, die auf einen mit Vorwärtsdrall (Topspin) geschlagenen Tennisball wirken

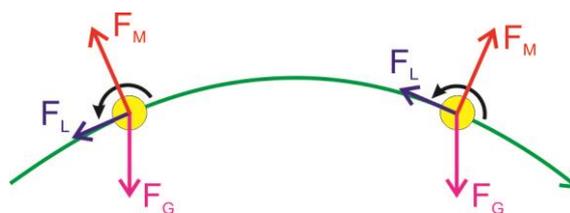


Abb. 22: Kräfte, die auf einen mit Rückwärtsdrall (Slice) geschlagenen Tennisball wirken

Durch die Drehbewegung des Tennisballes verschiebt sich der Ort des Ablösens der laminaren Strömung unsymmetrisch mit der Balldrehung. 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 [10]. So entsteht eine Kraft quer zur Bewegungsrichtung.

Hat ein Tennisball Vorwärtsdrall (Topspin) (siehe Abb. 21), so landet er früher als ohne den Drall auf dem Boden. Hat der Ball Rückwärtsdrall (Slice) (siehe Abb. 22), so landet er später auf dem Boden.

Auch heute ist es noch sehr 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 sehr gut beschrieben:

$$F_M = \rho A R \omega v, \quad \{11\}$$

wobei  $A$  die Querschnittsfläche,  $\rho$  die Luftdichte und  $v$  der Geschwindigkeitsbetrag sowie  $R$  der Radius des Balles und  $\omega$  seine Winkelgeschwindigkeit ist [11].

### 5.1. Magnus-Effekt beim Tennis

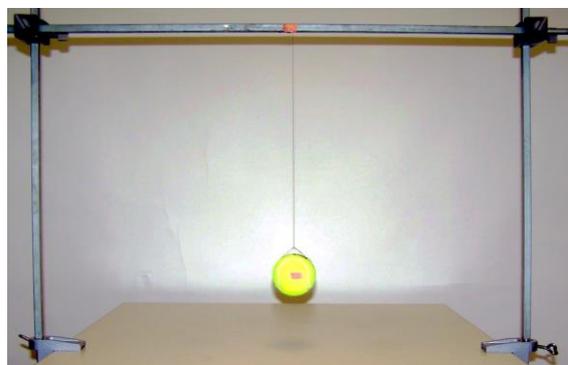


Abb. 23: Versuchsaufbau

Um den Magnus-Effekt bei einem Tennisball zu zeigen, eignet sich ein Versuch mit einem rotierenden und schwingenden Tennisball. Der Tennisball wird mit Hilfe einer dünnen Schnur (z.B. Nähgarn)

an ein Stativ befestigt (siehe Abb. 23). 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 Abbildung 24 seitlich eine 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 angedreht und im sich drehenden Zustand ausgelenkt, z.B. über ein schnelles Auslenken des Garns. Der Tennisball schwingt nun nicht mehr geradlinig vor und zurück, sondern in Kurven (siehe Abb. 24); die Schwingungsebene dreht sich. Die Richtung der Kurve ist dabei abhängig von der Drehrichtung des Tennisballes.

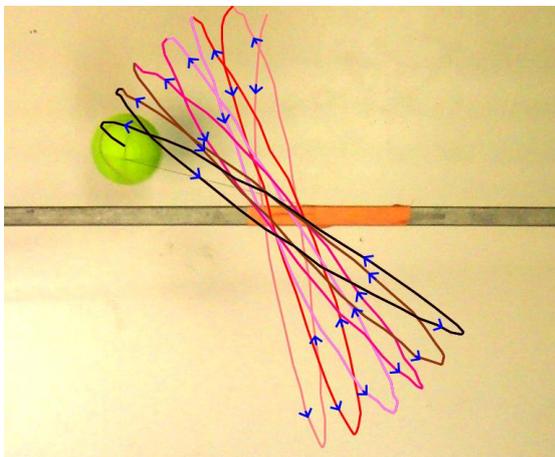


Abb. 24: Bahnkurve des schwingenden, angedrehten Tennisballes aus measure dynamics (Aufnahme von oben)

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  $v = 0,47 \text{ m/s}$ . Außerdem kann man mit Hilfe der Luftdichte  $\rho$  (ca.  $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ ) sowie mit dem bekannten Tennisballradius  $R = 0,033 \text{ m}$  [4] mit Hilfe von Gleichung {11} die Magnus-Kraft bestimmen. In diesem Versuch ergab sich als Magnus-Kraft  $F_M = 4,94 \text{ mN}$ . Mit einer Ballmasse von  $m = 0,057 \text{ kg}$  [4] ergibt sich für die Beschleunigung  $a$  des Tennisballes aufgrund des Magnus-Effekts  $a = F_M/m = 0,087 \text{ m/s}^2$ .

Bei einem durchschnittlichen realen Tennisschlag beträgt die Winkelgeschwindigkeit  $\omega = 314 \text{ s}^{-1}$  und es kann ein Balltempo von  $v = 25 \text{ m/s}$  angenommen werden. So ergibt sich mit obiger Tennisballmasse und -radius  $F_M = 1,064 \text{ N}$  und  $a = 19 \text{ m/s}^2$ . Die Werte liegen also im Größenbereich der Gravitationskraft für einen Tennisball ( $F_{\text{Gravitation}} = 0,56 \text{ N}$  und  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ), weshalb davon ausgegangen werden kann, dass der

Magnus-Effekt die Bahnkurve eines Tennisballes maßgeblich beeinflusst.

## 5.2. Bahnkurve eines Tennisballes

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

Interessant ist hierbei zu ermitteln, wie gut die tatsächliche Bahnkurve des Tennisballes mit der theoretischen Bahnkurve des idealen schiefen Wurfs (keine Berücksichtigung der Luftreibungs- und Magnus-Kraft) übereinstimmt. Mit Hilfe eines Videoanalyseprogramms, hier measure dynamics, lassen sich der Abschlagwinkel  $\varphi$  und 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 schwieriger). Sodann kann man gemäß

$$y(x) = -\frac{1}{2} \frac{g}{v_{0,x}^2} x^2 + \frac{v_{0,y}}{v_{0,x}} x + h_0 \quad \{12\}$$

die theoretische Bahnkurve des schiefen Wurfs in das Diagramm der tatsächlichen Bahnkurve eintragen (siehe Abb. 25 und 26) und prüfen, wie weit der reale Verlauf den 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. 25). Mit Spin ist die Flugweitenreduzierung nochmal deutlich größer (Flugweite 17 m statt 26,5 m) (siehe Abb. 26). Der Tennisspieler kann so auch einen schnellen Ball noch dazu bringen, innerhalb des Spielfeldes aufzukommen.

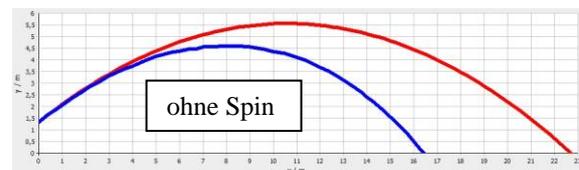


Abb. 25: Ideale Bahnkurve (rot, Berechnung ohne Luftreibung und ohne Magnus-Effekt) und reale Bahnkurve (blau, Messwerte der Videoanalyse) eines Tennisballflugs ohne Spin

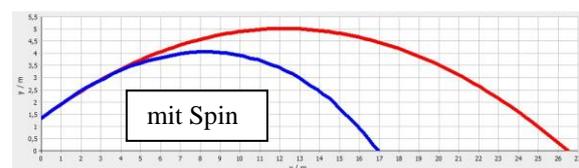


Abb. 26: Ideale Bahnkurve (rot, Berechnung ohne Luftreibung und ohne Magnus-Effekt) und reale Bahnkurve (blau, Messwerte der Videoanalyse) eines Tennisballflugs mit Spin

Für Schüler ist es visuell ansprechender die Bahnkurve des Tennisballes mit Ortsmarken in das Video (siehe Abb. 27) einzuzeichnen. Außerdem ist es sinnvoll, die Geschwindigkeitskomponente in  $x$ -Richtung, die Geschwindigkeitskomponente in  $y$ -Richtung sowie die Geschwindigkeit ebenfalls in das Video einzuzeichnen (siehe Abb. 28). Im Gegensatz zu einer Flugbahn ohne Luftreibung und Magnus-Effekt sieht man hierbei, wie die Geschwindigkeitskomponente in  $x$ -Richtung immer kleiner wird.

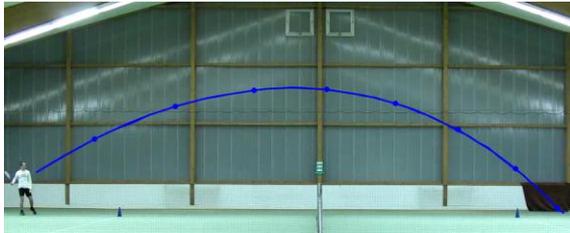


Abb. 27: Bahnkurve und Ortsmarken im Video

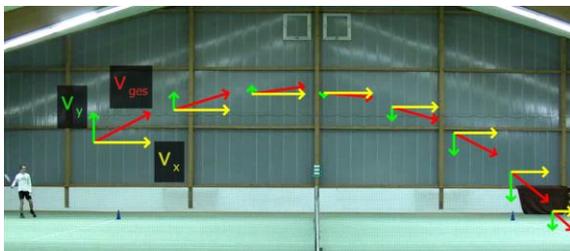


Abb. 28: Einstampeln der Geschwindigkeitskomponenten in das Video

Anhand der Abbildungen 25 bis 28 ist zu erkennen, dass sowohl die Luftreibungskraft als auch der Magnus-Effekt die Bahnkurve des Tennisballes massiv beeinflussen und deshalb bei Betrachtungen der Bahnkurve eines Tennisballes berücksichtigt werden müssen.

## 6. Fazit

Tennis eignet sich sehr gut zur Anwendung im Physikunterricht, wodurch verschiedene Themenbereiche der Mechanik, wie zum Beispiel die Energieerhaltung und -umwandlung, der Kraftstoß, Kreisbewegungen, der schiefe Wurf und der Magnus-Effekt 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. So können z.B. Sportplatz oder Sporthalle sowohl für Sport als auch für Physik genutzt werden. Weiterhin ist davon auszugehen, dass die hierbei erzielten Ergebnisse sowohl für die Physik als auch für den Sport interessant sein dürften.

## 7. Literatur

- [1] Tipler, Paul A.; Mosca, Gene (2009): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. 6. Deutsche Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- [2] Egidy, Benedikt (2013): Game, Set and Match. Schulversuche zu Tennis im Physikunterricht, Staatsexamensarbeit, Universität Würzburg, [www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/tennis.htm](http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/tennis.htm)
- [3] The International Tennis Federation: <http://www.itftennis.com/technical>, zuletzt aufgerufen am 22.11.2013
- [4] Wiesner, Hartmut; Wilhelm, Thomas; Waltner, Christine; Tobias, Verena; Rachel, Alexander; Hopf, Martin (2011): Mechanik I: Kraft- und Geschwindigkeitsänderung, Reihe Unterricht Physik, Band 5 Aulis Verlag
- [5] Deutscher Tennisbund e.V.: [http://www.dtb-tennis.de/content/download/680/8523/version/2/file/Tennisregeln\\_der\\_ITF.pdf](http://www.dtb-tennis.de/content/download/680/8523/version/2/file/Tennisregeln_der_ITF.pdf), zuletzt aufgerufen am 22.11.2013
- [6] Demtröder, Wolfgang (2008): Experimentalphysik 1 – Mechanik und Wärme. 5. neu bearbeitete und aktualisierte Auflage, Springer, Berlin Heidelberg New York
- [7] Ziebur, Fredi (1999): Übungsaufgaben. Teil 5. Physik in der Schule 6/37, S. 388-392.
- [8] 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
- [9] Brody, Howard; Cross, Rod; Lindsey, Crawford (2002): The Physics and Technology of Tennis. USRSA, Racquet Tech Pub. Vista, California USA
- [10] Wilhelm, Thomas; Reusch, Wolfgang; Jakob, Peter: Physik mit Kick. In: Weigand, H.-G. (Hrsg.): Fußball – eine Wissenschaft für sich, Verlag Königshausen & Neumann, Würzburg, 2006, ISBN 3-8260-3352-3, S. 137 - 159
- [11] Tolan, Metin (2010): So werden wir Weltmeister – Die Physik des Fußballspiels. 1. Auflage, Piper Verlag GmbH, München