

Physikalische Aspekte des Fußballspiels - Eine Untersuchung der Wechselwirkung von Kopf und Fußball im Modellexperiment

Jens Wagner * und Angela Fösel *

*Didaktik der Physik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen, jens.wagner@phil.stud.uni-erlangen.de und angela.foesel@physik.uni-erlangen.de

Kurzfassung

Fußball ist in sehr vielen Ländern die attraktivste Sportart, sodass eine physikalische Diskussion fußballerischer Themen meist auf großes Interesse stößt. Eine wichtige Komponente des Spieles, Kopfbälle, sind bislang jedoch noch nicht so ausführlich behandelt worden, obwohl die Frage nach der Gefährlichkeit direkt mit der Bestimmung der Kräfte und Beschleunigungen zusammenhängt. Wir haben die Wechselwirkung von Fußball und Kopf im Modellexperiment untersucht und auch theoretische Modellierungen diskutiert, die die Messdaten erklären sollen. In diesem Artikel werden wir insbesondere die experimentellen Zugänge vorstellen, die von einfachen Versuchen bis zu Videoanalysen und Datenaufnahmen mit Beschleunigungssensoren reichen. Ein Ausblick bezüglich einer Erklärung der Daten durch theoretische Modelle unterschiedlicher Komplexität wird gegeben.

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 sowohl (populär)wissenschaftlichen Büchern als auch fachlichen und fachdidaktischen Artikeln zu diesem Thema verfasst wurden. Neben umfassenden Behandlungen der Sportart Fußball (vgl. beispielsweise [1], [2], [3]) haben einige Teilaspekte spezielle Beachtung gefunden: unerwartete Bahnkurven von Bällen (Bananenflanken), die den Magnuseffekt eindrucksvoll zeigen (siehe [4], [5]); der hohe Anteil des Zufalls bei Fußballresultaten, der eine statistische Behandlung herausfordert (vgl. [6]); die Angst des Torwarts (bzw. des Schützen) vor dem Elfmeter, die kinematisch begründet werden kann (vgl. [7], [8]). Eine weitere wichtige Komponente des Spieles, Kopfbälle, sind noch nicht so ausführlich behandelt worden, 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 - im Vergleich zu [9] neue - experimentelle Zugänge vor, die von einfachen Versuchen bis zu Videoanalysen und Datenaufnahmen mit Beschleunigungssensoren reichen. Zum

anderen wird versucht, diese Daten durch theoretische Modelle unterschiedlicher Komplexität zu erklären.

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 Geschwindigkeiten 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 stehen und auch den Kopf möglichst nicht zu bewegen. Dann wurde ein Ball zentral und annähernd horizontal auf seinen Kopf geworfen. Die Geschwindigkeit

keiten vor und nach dem Stoß waren $v_1 = 4,7 \text{ m/s}$ bzw. $v_2 = 3,5 \text{ m/s}$, was eine Elastizitätszahl von $e = 0,74$ ergibt. - Lässt man einen Fußball auf einen im Vergleich zu Rasen harten Boden fallen, so liegt die Elastizitätszahl bei etwa 0,8. (vgl. [3], S. 11) Nimmt man an, dass sich in unserem Modellexperiment der Kopf des Spielers tatsächlich nicht bewegt hat, kann man aus dem experimentell ermittelten Wert der Elastizitätszahl von $e = 0,74$ ableiten, dass ein Kopf ein eher hartes Hindernis für einen aufprallenden Ball abgibt.

Kopfbälle aus realen Spielsituationen heraus zu analysieren ist komplex, weil die zur Interpretation der Messdaten notwendigen Anfangsbedingungen (z.B. Bewegung des Spielers vor dem Stoßprozess, Treffpunkt des Balles) auch aus Videos sehr schwer abzuschätzen sind. Wir haben deshalb die oben beschriebene idealisierte „Kopfballsituation“ zur Datenaufnahme gewählt. Die Messwerterfassung erfolgte dabei mit zwei unterschiedlichen und voneinander unabhängigen Systemen:

Zum einen wurde gleichzeitig die Bewegung des Spielers und auch die des Balles mit einem Hochgeschwindigkeits-Langzeitaufnahme-Kamerasystem vom Typ Motion Traveller 300 der Firma Imaging Solutions (Datenblatt siehe [10]) aufgezeichnet. Die Bildrate lag dabei bei 300 fps bei einer Auflösung von 640×480 Pixel. Im Vergleich zu vorangegangenen Messungen (vgl. [9]) mit einer Hochgeschwindigkeitskamera vom Typ CASIO Exilim EX-FH25 (Datenblatt siehe [11]) bei 120 fps und einer Auflösung von 640×480 Pixel war nun bei der gleichen Auflösung eine Datenaufnahme mit der 2,5-fachen Bildrate möglich: In der „idealisierten Kopfballsituation“ bewegt sich der Kopf in horizontaler Richtung nur um einige wenige Millimeter. Daher ermöglichte letztendlich erst diese Erhöhung der Bildrate bei gleicher Auflösung die Auswertung des Videos bez. der horizontalen Bewegung einschließlich einer zeitlichen Zuordnung des ersten und letzten Kontakts von Ball und Kopf bzw. der maximalen Verformung des Balles (vgl. Abb. 2a und 2c).

Zum anderen wurden, jeweils bei einer Frequenz von 2000 Hz, die Beschleunigungen der Schläfe und des Nackens mit Beschleunigungssensoren der Firma Naturwissenschaftliche-Technische-Lehrmittel NTL [12] messtechnisch erfasst. Am Nacken wurde dazu ein dreiachsiger Beschleunigungssensor (P4210-3B) mit einem maximalen Messbereich von $\pm 5 \text{ g}$ befestigt, an der Schläfe ein eindimensionaler Sensor (P4210-1B) mit einem Messbereich von maximal $\pm 25 \text{ g}$. Abb. 1 zeigt die Anbringung der Sensoren am Kopf des Spielers. Dabei wurde in Abb. 1a das äußerste schwarze Klebeband (\rightarrow Abb. 2c) weggelassen, um die Sicht auf den Sensor freizugeben, Abb. 1b zeigt die fertige Montierung an der Schläfe mit schwarzem Klebeband und inklusive eines „Markers“, der für die Analyse des Videos not-

wendig war. Auch der Nackensensor wurde nach der endgültigen Befestigung mit einem solchen „Marker“ versehen. Die mit den Beschleunigungssensoren aufgenommenen Messwerte wurden über den Datenlogger ULAB (Datenblatt zum Datenlogger ULAB P4910-1U siehe [12]) mit einer Frequenz von 2000 Hz ausgelesen und zur Weiterverarbeitung bzw. Analyse gespeichert.

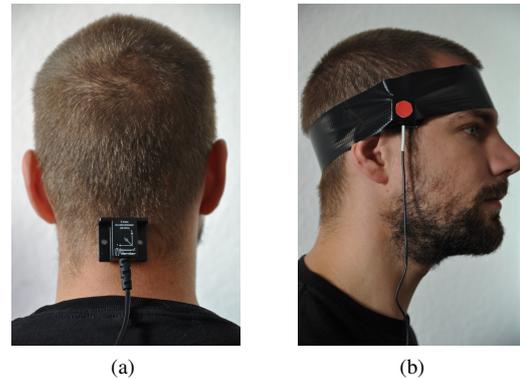


Abb. 1: Anbringung der Beschleunigungssensoren (a) im Nacken, (b) an der Schläfe.

Mithilfe des Videoanalyseprogramms des Messwerterfassungssystems COACH 6 (Handbuch zum Messwerterfassungssystem siehe [12]) wurde das Video insbesondere bezüglich des zeitlichen Verlaufs des Weges, den der Kopf in horizontaler Richtung zurücklegt, ausgewertet. Als Messpunkt wurde der bereits erwähnte „Marker“ am Schläfensensor gewählt. Der Breite eines Pixels der Kamera in horizontaler (und auch in vertikaler) Richtung entsprachen $0,83 \text{ mm}$ im Realen. Die Erfassung der Bewegung des Markers mit Hand bzw. automatisch führte innerhalb einer Genauigkeit von ± 2 Pixel (entsprechend $\pm 1,7 \text{ mm}$ im Ort in horizontaler Richtung) zum selben Ergebnis.

In Abb. 2a ist die horizontale Bewegung des Kopfes (der Schläfe) aufgetragen. Der erste Kontakt zwischen Kopf und Ball erfolgte bei einer Zeit von $t_1 = 4,027 \text{ s}$, der letzte Kontakt bei $t_3 = 4,047 \text{ s}$. Die maximale Verformung des Balles war bei $t_2 = 4,040 \text{ s}$. (vgl. Abb. 2c) Dabei liegt aufgrund der Bildrate des Videos eine Ungenauigkeit von maximal einem Bild hinsichtlich dieser zeitlichen Zuordnung vor.

Die anfängliche Richtung des Balles wird als positive Bewegungsrichtung genommen. Dadurch zeigt das Ansteigen der Kurve, dass die Versuchsperson (obwohl angehalten ruhig zu sein) den Kopf vor und auch nach dem Kontakt mit dem Ball nach vorne bewegt hat. Dies kann durch Antizipation und Anspannung der Muskeln erklärt werden. Die Vorwärtsbewegung endet erst kurz vor der stärksten Verformung des Balles.

Die Daten aus den beiden Sensoren sind in Abb. 2b dargestellt. Aufgrund der hohen Genauigkeit der Sensoren ($\pm 2,5 \frac{m}{s^2}$ für den 25 g- und $\pm 0,5 \frac{m}{s^2}$ für den 5 g-Sensor) sind in Abb. 2b keine Fehlerbalken eingezeichnet. Beim ersten Kontakt mit dem Ball ist noch keine Beschleunigung von Schläfe und Nacken sichtbar. Die Beschleunigungskurve der Schläfe ist „zweigipfelig“, und noch während des Ballkontakts kommt es zu einer negativen Beschleunigung (Abbremsung) des Kopfes. Die Beschleunigung des Nackens ist deutlich geringer und setzt erst später ein. Die größten Beschleunigungswerte von Kopf und Nacken treten bei maximaler Verformung des Balles auf. Im Rahmen einer Modellierung werden wir insbesondere die „Doppelgipfeligkeit“ nachfolgend ausführlich diskutieren.

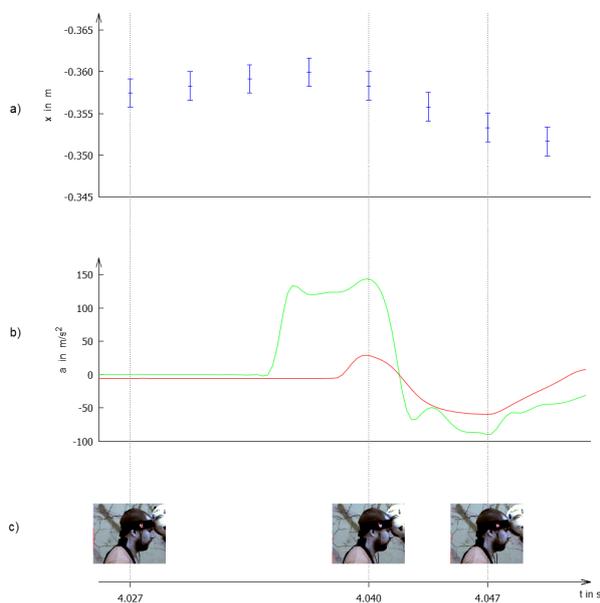


Abb. 2: Stoß eines Balles auf einen annähernd ruhenden Kopf: a) Auswertung des Videos bezüglich der horizontalen Bewegung, b) Daten aus den beiden Beschleunigungssensoren (grüne Linie: Schläfe, rote Linie: Nacken), c) zeitliche Zuordnung des ersten und letzten Kontakts von Ball und Kopf bzw. der maximalen Verformung des Balles.

Die zeitliche Koordination (Synchronisation) der beiden Datensätze erfolgte durch das Ausführen einer Bewegung, die sich signifikant in Ort und Beschleunigung darstellte: Bereits vor dem eigentlichen „Kopfball“ führte der Spieler hierzu einen Sprung in vertikaler Richtung aus. Im Video ist der tiefste Punkt dieses Teils der Bewegung gut zu erkennen, und der entsprechende Zeitpunkt („Videozeit“) lässt sich ermitteln.

Am Kopf des Spielers war neben dem bereits erwähnten eindimensionalen Schläfensensor zur Er-

mittlung der Beschleunigung in horizontaler Richtung ein weiterer baugleicher Sensor an der anderen Schläfe des Kopfes befestigt. Er diente der messtechnischen Erfassung der Beschleunigung des Kopfes in vertikaler Richtung. Die Aufnahme und Speicherung beider Sensordatensätze erfolgte über einen gemeinsamen Datenlogger, so dass diese beiden Sensoren bereits untereinander (zeitlich) synchronisiert waren. Eine zweifach hintereinander durchgeführte numerische Integration der Beschleunigung in vertikaler Richtung liefert den zeitlichen Verlauf des Sprungs in vertikaler Richtung und ermöglicht dadurch in Abgleich mit dem zeitlichen Verlauf des Ortes in vertikaler Richtung aus dem Video eine Koordination von „Schläfenzeit“ und „Videozeit“ mit der bereits erwähnten Ungenauigkeit von maximal einem Bild.

Alternativ ist die Verwendung von kostspieligen Messwerterfassungssystemen möglich, die von vorne herein eine synchrone Aufnahme der beiden Datensätze vorsehen bzw. die Videodaten und Sensordaten mithilfe einer geeigneten Kombination von Hardware und Software synchronisieren.

Die Synchronisation der beiden Datensätze macht einen Vergleich äquivalenter Diagramme möglich:

Wir beginnen mit der Bearbeitung der genaueren und zeitlich höher aufgelösten Werte des Beschleunigungssensors an der Schläfe. Aus den abgelesenen Daten wurden durch einfache numerische Integration die Geschwindigkeit $v(t_{i+1}) = v(t_i) + a(t_i) \cdot \Delta t$ und die Ortskoordinate $x(t_{i+1}) = x(t_i) + v(t_i) \cdot \Delta t$ bestimmt. Dabei wurde mit der Integration für die Geschwindigkeit zu einem Zeitpunkt kurz vor dem ersten Kontakt angefangen. Da im Video eine leicht positive Geschwindigkeit ersichtlich war, wurde der Wert zu Beginn dieses Integrationsintervalls auf etwa $0,1 \text{ m/s}$ gesetzt. Für die Ermittlung der Ortskoordinate durch numerische Integration aus der Geschwindigkeit wurde zum Zeitpunkt $t = 4,027 \text{ s}$ mit einem entsprechenden Wert aus den Rohdaten der Videoanalyse innerhalb des Toleranzbereichs von $\pm 1,7 \text{ mm}$ abgeglichen.

Abb. 3 zeigt den Vergleich dieser berechneten Werte mit den korrespondierenden der Videoanalyse: Lässt die Kurve aus den Videodaten gut erkennen, dass die Versuchsperson den Kopf (vor) und auch nach dem Kontakt mit dem Ball nach vorne bewegt hat, so stützen die berechneten Daten diese Beobachtung: Die Werte der Ortskoordinaten nehmen betragsmäßig zunächst zu. Dabei mag bei der Auswertung des Videos durchaus die Vorwärtsbewegung etwas extremer wahrgenommen worden sein, als es tatsächlich der Fall war. Beide Kurven zeigen in guter Übereinstimmung, dass der Kopf des Spielers erst kurz vor dem Zeitpunkt, zu dem die maximale Verformung des Balles eintritt ($t = 4,040 \text{ s}$), mit der Bewegung nach hinten beginnt: Die Ortskoordinaten werden ab $t = 4,037 \text{ s}$ betragsmäßig kleiner. Die Kurve aus den berechneten Daten weist von etwa $t =$

4,037 s bis $t = 4,042$ s eine positive Krümmung auf: Die Bewegung des Kopfes nach hinten erfolgt also beschleunigt.

Danach bewegt sich der Kopf der Versuchsperson weiterhin nach hinten: Beträgsmäßig nehmen die Ortskoordinaten auch über den Zeitpunkt, zu dem der Ball den Kopf verlässt ($t = 4,047$ s) hinaus noch ab. Allerdings lässt die Kurve aus den berechneten Daten nun eine negative Krümmung erkennen: Die Rückwärtsbewegung erfolgt in diesem Zeitintervall abgebremst. Diese Interpretation der Ortskurve bezüglich des Krümmungsverhaltens passt zu den Daten des Beschleunigungssensors (Abb. 2b): Im Intervall von $t = 4,037$ s bis etwa $t = 4,042$ s ist die Beschleunigung des Kopfes positiv. Nach einem Nulldurchgang der Kurve liegt bis $t = 4,050$ s signifikant eine negative Beschleunigung vor.

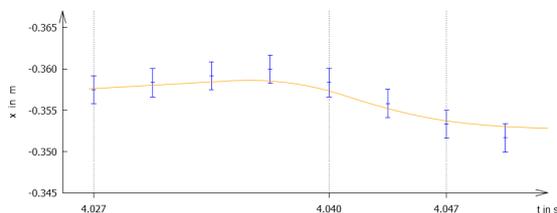


Abb. 3: Vergleich der Weg-Zeit-Diagramme. Analyse des Videos (blaue Messpunkte, mit Fehlerbalken), Berechnung aus den Beschleunigungssensordaten (orange Kurve).

Die Bearbeitung der Daten aus der Videoanalyse gestaltete sich weit unpräziser als diejenige der Werte des Beschleunigungssensors, weil sowohl die geringe Framerate als auch die Unschärfe der Daten zentral in die Berechnung eingehen. Der einfache Differenzenquotient (analog der Integration) führt zu äußerst ungenauen Werten für die Geschwindigkeit: $v\left(\frac{t_{i+1}+t_i}{2}\right) = \frac{x_{i+1}-x_i}{t_{i+1}-t_i}$ liefert für das Zeitintervall vom ersten bis zum letzten Kontakt sieben Werte für die Geschwindigkeit mit einer Ungenauigkeit von $\pm 0,5$ m/s. Wir haben daher jeweils über drei Messwerte hinweg gleitende Mittelwerte gebildet. Dabei ging in dieses mathematische Prozedere insofern bereits eine Interpretation der Situation mit ein, als im Bereich der physikalisch plausibel erscheinenden hohen Geschwindigkeit mit einem linear gewichteten Durchschnitt gearbeitet wurde, ansonsten mit einem einfachen Mittelwert, um das Maximum im Betrag der Geschwindigkeit nicht zu verlieren. Durch die Mittelwertbildung reduziert sich die Ungenauigkeit auf etwa $\pm 0,2$ m/s. Abb. 4 zeigt diese sieben gemittelten Werte (lila) zusammen mit der aus den Werten des Beschleunigungssensors berechneten Geschwindigkeitskurve (türkis).

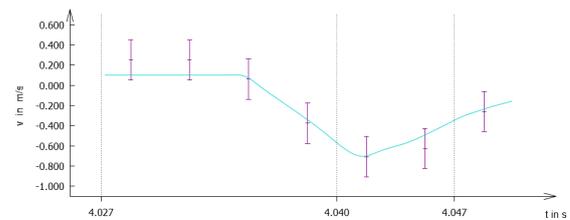


Abb. 4: Vergleich der Geschwindigkeits-Zeit-Diagramme. Lila Punkte, mit Fehlerbalken: berechnete Daten aus dem Video. Türkisfarbene Kurve: Berechnung aus den Beschleunigungsdaten des Sensors.

Vor und auch nach dem ersten Kontakt ist die Geschwindigkeit leicht positiv, während sich der Kopf der Versuchsperson vorwärts bewegt. Ab etwa $t = 4,037$ s (Nulldurchgang der Geschwindigkeitskurve) bewegt sich der Kopf mit (betragsmäßig) zunehmender Geschwindigkeit nach hinten. Die Geschwindigkeit erreicht dabei bei etwa $t = 4,042$ s ein Maximum im Betrag (Beschleunigung Null), um danach wieder (Abbremsung) zu geringeren Werten zurückzukehren.

3. Modellierung

Modellbildung nimmt neben dem Experimentieren eine zentrale Rolle in der Erkenntnisgewinnung ein, und auch die Lehrpläne fordern, dass Schülerinnen und Schüler bereits von Beginn des naturwissenschaftlichen Unterrichts an kontinuierlich und systematisch Modellkompetenz erlangen: dazu gehört Modellverständnis ebenso wie die Fähigkeit, Modelle anwenden zu können. Die Diskussion physikalischer Aspekte von sportlichen Aktivitäten macht die Notwendigkeit von Modellen sehr augenscheinlich, weil durch die Komplexität des menschlichen Körpers nur modellhafte Näherungen zum Einsatz kommen können.

Das einfachste Modell eines Kopfballs besteht darin, dass ein vollkommen elastischer Stoß während des Zeitraums T stattfindet und dass die Impulsänderung des Balles mit Masse m als Kraftstoß auf den Kopf übertragen wird: $F \cdot T = m \cdot (v_2 - v_1)$. Übernimmt man die Werte aus dem vorigen Abschnitt $m = 0,44$ kg, $v_1 = 4,7$ m/s, $v_2 = 3,5$ m/s, $T = 0,02$ s, so ergibt sich ein Wert von $F = 180$ N.

Dies ist allerdings ein Durchschnittswert während der gesamten Zeit T . Um die Maximalkraft zu ermitteln, braucht man wiederum ein Modell, nämlich eines über die zeitliche Veränderung der Kraft. Nimmt man an, dass die Kraft über den Zeitraum von $T/2$ linear bis zu einem Maximalwert F_{max} zu und darauf wiederum während der Zeit $T/2$ linear abnimmt, würde sich eine Maximalkraft von $F_{max} = 2 \cdot F$ und für unser Beispiel $F_{max} = 360$ N ergeben. Aus den Daten ersehen wir jedoch, dass der wirkende Kraftstoß viel

kürzer ist, er entspricht etwa dem Bereich der grünen Kurve in Abb. 2b. Eine Kontaktzeit von $T = 0,008\text{ s}$ ergibt eine Maximalkraft von $F_{max} = 450\text{ N}$.

Will man aus der Kraft $F = m_1 \cdot a$ auf die Beschleunigung des Kopfes schließen, so würde das Einsetzen der Masse des Kopfes ($m_1 = 4\text{ kg}$) eine Beschleunigung von $a = 113\text{ m/s}^2 = 12\text{ g}$ ergeben. Allerdings ist der Kopf mehr oder weniger starr mit dem Oberkörper verbunden, sodass sich damit eine größere effektive Masse und eine reduzierte Beschleunigung ergeben. Im Folgenden soll die relative Wirkung dieser Massen in einer Simulation untersucht werden.

P.E. Riches [13] hat den Einfluss der Nackenmuskulatur als Verbindung zu einem fixen Körper durch eine Feder mit einer bestimmten Federkraft genähert, wobei zusätzlich ein Dämpfungsteil die Bewegung beeinflusst. Wir haben dieses Modell dahingehend erweitert, dass die Dynamik von drei gegeneinander beweglichen Massen betrachtet wird: Die erste Masse (m_1) beschreibt den starren Teil des Kopfes, an dem der Beschleunigungssensor befestigt ist und der Ball auftrifft. Die zweite Masse (m_2) ist elastisch durch eine Federkraft mit m_1 gekoppelt und beschreibt die gegen den Schädelknochen beweglichen Teile in und am Kopf. Die dritte Masse m_3 repräsentiert den restlichen Körper, und sie ist wiederum durch eine Feder mit m_1 gekoppelt. Die Kraft $F(t)$ des Balles während der Kontaktzeit T wird in diesem erweiterten Modell wie bei Riches [13] durch eine halbe Sinusschwingung beschrieben. Setzt man für jede der drei Massen die Newtonsche Bewegungsgleichung an, so ergeben sich drei gekoppelte Differentialgleichungen, die man genähert auch mit jedem Tabellenkalkulationsprogramm schrittweise lösen kann.

Mit diesen einfachen Modellannahmen lassen sich die gemessenen Daten qualitativ nachvollziehen: In der Messkurve des Sensors an der Schläfe ergeben sich zwei Beschleunigungsspitzen durch den elastisch verbundenen Anteil m_2 . Wie stark die Doppelgipfeligkeit der Kurve ausgeprägt ist, hängt von der Stoßkraft, dem Verhältnis der Massen m_1 und m_2 und deren Kopplung ab, aber auch von der Verbindung zum Körper m_3 . Abb. 5 zeigt eine Simulation mit $F_{max} = 500\text{ N}$ und unterschiedlichen Massenverhältnissen $\frac{m_1}{m_2}$. Als Kontaktzeit wurde $T = 0,01\text{ s}$ genommen, da nur während dieses Zeitraumes der Sensor nennenswerte positive Werte lieferte. Je größer der starre Massenanteil im Kopf, desto geringer die Zweigipfeligkeit der Beschleunigungskurve. Da zuerst hauptsächlich der starre Anteil m_1 des Kopfes beschleunigt wird, zeigt die Beschleunigungskurve bei größerem Massenanteil m_1 zu Beginn einen flacheren Anstieg.

In einer weiteren Simulation haben wir den Einfluss der Anspannung der Nackenmuskulatur auf die Beschleunigung des starren Anteils m_1 des Kopfes untersucht [14]: Je starrer die Verbindung zwischen Kopf und Körper, desto geringer wird die Zweigipfeligkeit

in der Beschleunigungskurve des Kopfes m_1 .

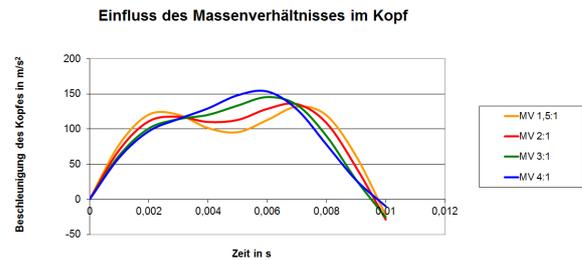


Abb. 5: Einfluss des Verhältnisses zwischen starrer (m_1) und beweglicher (m_2) Masse im Kopf auf die Beschleunigung der starren Masse m_1 bei $F_{max} = 500\text{ N}$ mit einer Kontaktzeit $T = 0,01\text{ s}$.

4. Ausblick

Wir haben gezeigt, dass Kopfbälle experimentell und theoretisch den Physikunterricht bereichern können. Daten können mithilfe von Videoanalyse und durch Beschleunigungssensoren gewonnen werden. Integration und Differentiation entsprechender Datensätze aus Video- und Sensordaten haben eine gute Übereinstimmung gezeigt. Allerdings ist sowohl die Datenaufnahme als auch die Auswertung bei realen Spielsituation ungleich schwieriger als bei labormäßigen Anordnungen. Einfache Modelle erlauben, bestimmte Parameter wie Maximalkräfte abzuschätzen, mit dynamischen Modellen kann auch die zeitliche Abfolge der Aktion simuliert werden.

Die Frage, ob ein Aufprall eines Fußballes auf den Kopf Schädigungen nach sich ziehen kann, führt zunächst zu einer Betrachtung der Voraussetzungen unseres Modellexperiments „idealisierte Kopfballsituation“ im Vergleich zu einer realen Kopfballsituation: In unserem Modellexperiment wurde der Ball mit der Hand zugeworfen, und dementsprechend waren die Geschwindigkeiten nicht sehr hoch. Die daraus resultierenden Kräfte und Beschleunigungen sind innerhalb der kurzen Zeit der Einwirkung sicher nicht gesundheitsgefährdend. In Wettkampfsituationen können die Bälle jedoch Geschwindigkeiten von $100\frac{\text{km}}{\text{h}}$ und mehr erreichen. Allerdings hängt die Antwort auf die Frage nach der Gefährlichkeit des Kopfballspiels nicht nur von der Geschwindigkeit des Balles ab, sondern von vielfältigsten Faktoren. Neben einer kurzen Zusammenfassung wesentlicher Aspekte unter [14] findet sich weiterführende Literatur hierzu beispielsweise unter [15], [16].

5. Literatur

- [1] Tolan, Metin: Manchmal gewinnt der Bessere - Die Physik des Fußballspiels. Piper Verlag. München, Zürich 2011.

- [2] Tolan, Metin: So werden wir Weltmeister - Die Physik des Fußballspiels. Piper Verlag. München, Zürich 2010.
- [3] Wesson, John: Fußball - Wissenschaft mit Kick: Von der Physik fliegender Bälle und der Statistik des Spielausgangs. (übers. von Michael Zilgitt und Carsten Heinisch) Spektrum Akademischer Verlag. München, Heidelberg 2006.
- [4] Mathelitsch, Leopold und Thaller, Sigrid: Fußball mit Wissenschaftlichem Maß: Bananenflanken, Flatterbälle und Kopfbalkämpfe. In: Physik in unserer Zeit 37(3), S. 122-125. Wiley-VCH Verlag. Weinheim 2006.
- [5] Zimmermann, Fabian: Physik und Fußball - Schulversuche. Hausarbeit Universität Würzburg. <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Fussball.pdf> (02.11.2014)
- [6] Heuer, Andreas: Der perfekte Tipp - Statistik des Fußballspiels. Wiley-VCH Verlag. Weinheim 2012.
- [7] Mathelitsch, Leopold und Thaller, Sigrid: Praxis Schriftenreihe Physik/Sport und Physik. Band 64. Aulis Verlag. Hallbergmoos 2008.
- [8] Labudde, Peter: Alltagsphysik in Schülerversuchen. Die Angst des Tormanns beim Elfmeter. S. 15-16. Dümmler-Verlag. Bonn 1989.
- [9] Ritzer, Pilar und Fösel, Angela: Physikalische Aspekte des Fußballspiels - Kopfbälle. PhyDid B - Didaktik der Physik. Frühjahrstagung Jena 2013. ISSN 2191-379X, 2013. <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/474> (02.11.2014)
- [10] Imaging Solutions GmbH, 72800 Eningen. <http://imaging-solutions.de> (02.11.2014)
- [11] CASIO Europe GmbH, 22848 Norderstedt. <http://de.exilim.eu/de/> (02.11.2014)
- [12] Fruhmann GmbH NTL Manufacturer und Wholesaler, A-7343 Neutal/Austria. <http://ntl.at> (02.11.2014)
- [13] Riches Philip E.: A dynamic model of the head acceleration associated with heading a soccer ball. In: Sports Engineering 9, S. 39-47. Springer Verlag. London 2006.
- [14] Fösel, Angela et al.: Mit dem Kopf - im Fußball und im Physikunterricht. In: Praxis der Naturwissenschaften 64(1), S. 17-23. Aulis Verlag. Hallbergmoos 2006.
- [15] Zhang Marsha R. et al.: Evidence of Cognitive Dysfunction after Soccer Playing with Ball Heading Using a Novel Tablet-Based Approach. In: PloS ONE 8(2), e57364. 2013.
- [16] Witol Adrienne D. und Webbe Frank M., Soccer heading frequency predicts neuropsychological deficits. In: Archives of Clinical Neuropsychology 18(4), S. 397-417. 2003.