Sport

König Fußball

Millionen Zuschauer und Fußball-Experten werden die diesjährige WM verfolgen. An Physik denken dabei zwar die wenigsten, doch das Spiel ist hochphysikalisch.

Jens Falta

War das legendäre Wembley-Tor, mit dem die deutsche Elf vor 40 Jahren das Endspiel gegen England verlor, mit den Naturgesetzen vereinbar? Wie funktionieren Bananenflanken? Auch wenn die Welt des Fußballs oft eigenen Gesetzen zu folgen scheint, für die Kräfte, die zu Toren führen, ist immer noch die Physik zuständig.

Auch wenn man beim Fußballspiel manchmal den Überblick verlieren kann, die Gesetze der Physik lassen sich auch von gewieften Spielern wie Oliver Neuville im WM-Halbfinale 2002 gegen Südkorea nicht überlisten. (Foto: Getty Images)

Zum zweiten Mal nach 1974 findet in diesem Jahr die Fußballweltmeisterschaft in Deutschland statt. Alle Medien berichten über verschiedenste Aspekte dieses sportlichen Großereignisses, und mit jedem Tag nehmen Begeisterung und Erwartungen zu, aber auch die Fragen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der deutschen Mannschaft. Für viele Fußballbegeisterte werden bei dieser Gelegenheit Erinnerungen wach an große Spiele (Bern 1954, Wembley 1966, München 1974, Rom 1990, ...) und große Spieler (Fritz Walter, Uwe Seeler, Pelé, Franz Beckenbauer, Günter Netzer, Maradonna, Michelle Platini, David Beckham, Roberto Carlos...). Wie viel sich in den vergangenen Jahrzehnten in der Welt des Fußballs getan hat, zeigt schon ein Blick auf die ökonomische Bedeutung des Ereignisses Weltmeisterschaft und des Fußballs allgemein. Einen ersten Eindruck vermittelt hier ein Blick auf die Entwicklung der Transfersummen für Spielerwechsel. Während die Rekordtransfersumme der ersten englischen Liga 1945 etwa das 50-fache des durchschnittlichen Jahreseinkommens betrug, lag sie im Jahr 2000 bereits bei seinem 1000-fachen.[1]

Allein mit ihren Fernsehrechten an der Weltmeisterschaft 2006 erwartet die FIFA, der Weltfußballverband, Einnahmen von 1,6 Milliarden Schweizer Franken. Hinzu kommen 688 Millionen Franken für Lizenzvergaben im Zusammenhang mit der WM 2006.[2] Der Bundesminister für Wirtschaft und Technologie, Michael Glos, erwartet für die Jahre 2006 bis 2008 einen gesamtwirtschaftlichen Wachstumsimpuls von 3 Mrd. Euro. Allein München rechnet 2006 mit einem Umsatzplus von 90 Mio. Euro. Die Vorstellung des neuen Fußballs für die WM 2006 war ein Medienereignis. Fußball ist ein wesentlicher Wirtschaftsfaktor geworden, andere Sportarten werden nachziehen. Der Grund hierfür liegt hauptsächlich in der Faszination, die diese Sportart auf viele Menschen ausübt. Auch aus physikalischer Sicht bietet sie zahlreiche interessante Aspekte und die Möglichkeit, jungen Menschen Naturwissenschaften nahe zu bringen, beispielsweise im Rahmen von öffentlichen Vorträgen oder den Kinder-Unis, die sich zunehmender Beliebtheit erfreuen. Zu den physikalischen Gebieten und Gesetzen, die im Zusammenhang mit Fußball relevant sind, gehören die klassische Mechanik mit Impuls- und Energieerhaltung, die Elastizitätslehre und die Strömungsmechanik, aber auch die Mathematik bietet über die Statistik einige interessante Blickwinkel.

Kompakt

Die Physik liefert eine ganze Reihe von Einsichten in das Fußballspiel:

- So hängt die Kontaktdauer zwischen Ball und Fuß ausschließlich von Balleigenschaften wie Masse, Durchmesser und Innendruck ab.
- Ein Schütze kann mit der aerodynamischen Magnus-Kraft den Torwart überlisten. Seitlich zur Schussrichtung lenkt diese den rotierenden Ball ab. Mit genügend Effet sind bei 25 Meter Flugdistanz durchaus Ablenkungen von einem Meter drin.
- Wenn das Wembley-Tor regelgerecht gegeben wurde, muss Schütze G. Hurst eine größere Tordistanz als 3,1 Meter gehabt haben.

Anpfiff!

Um Fußball-Laien nicht von den Pointen auszuschließen, ist zunächst ein kurzer Ausflug in die Regelkunde nötig. Fußball wird auf einem Feld von etwa 105 m Länge mal 70 m Breite gespielt (Für Länderspiele muss die Länge zwischen 100 und 110 m und die Breite zwischen 64 und 75 m liegen). Jedes Team – der Begriff Mannschaft passt irgendwie nicht auf den sportlich ebenfalls

1) John Wesson, selbst begeisterter Fußballer, bietet in „Fußball – Wissenschaft mit Kick" (Spektrum, 2005) viele spannende wissenschaftliche Einblicke in die Fußballwelt, von denen sich einige auch hier wiederfinden.

2) Im Hinblick auf das Urteil des BVG zu den Rechten am Ausdruck „Fußball WM 2006" bleibt abzuwarten, inwieweit sich diese Erwartungen erfüllen werden.

Prof. Dr. Jens Falta, Institut für Festkörperphysik, Universität Bremen, Postfach 33044, 28334 Bremen

 1617-9439/06/0606-35

sehr erfolgreichen Damenfußball – hat elf Spieler (oder Spielerinnen, im Folgenden gehe ich passend zur anstehenden WM von Herren aus). Für das Spiel dürfen nicht nur die Füße, sondern der ganze Körper einschließlich des Kopfs, dieser zum Spielen des Balls *und* zum Denken, nicht aber Hände und Arme, benutzt werden. Ausgenommen von dieser Einschränkung ist nur der Torwart und dies nur im 16-Meter-Raum vor seinem Tor. Das Ziel des Spiels ist einfach: Es gewinnt

„Abseits ist, wenn der Schiedsrichter pfeift.“ (Franz Beckenbauer)

die Mannschaft, der es in zweimal 45 Minuten gelingt, die meisten Tore zu erzielen. Die Tore sind 8 englische Fuß hoch und 8 Yards breit (also 2,44 m × 7,32 m groß). Die Maße eines Fußballs sind genau festgelegt: Sein Umfang muss zwischen 68 und 70 cm betragen, sein Gewicht (Masse) zwischen 410 und 450 g liegen, und der Innenüberdruck ist auf 0,6 bis 1,1 Atmosphären festgelegt. Über die Einhaltung der Regeln wacht der Schiedsrichter zusammen mit seinen Schiedsrichterassistenten (früher „Linienrichter“) und seit 1991 dem „vierten Offiziellen“, der für die Einhaltung der Regeln sorgt, die sich auf den Bereich außerhalb des Spielfelds beziehen, beispielsweise auf die Trainerbank. Wie die Spieler auf dem Feld agieren, um ihr Ziel (Sieg, manchmal auch Unentschieden) zu erreichen, ist Teil der Spieltaktik. Hierzu gehört auch das Spielsystem. Während 1954 noch im sogenannten 2:3:5-System gespielt wurde (zwei Verteidiger, drei Mittelfeldspieler – damals noch „Läufer“ genannt – und fünf Stürmer), gewann Brasilien, das Land der Fußballzauberer, 1958 nicht zuletzt durch die Einführung eines neuen überlegenen Spielsystems (4:2:4, später 4:3:3) den Weltmeistertitel. Das Spiel ist mit der Zeit immer schneller geworden. Heute müssen alle Spieler sowohl Defensiv- als auch Offensivaufgaben wahrnehmen. Insgesamt sind die Spieler wesentlich dynamischer über das Feld verteilt. Wir dürfen gespannt sein, welche Spieltaktik 2006 zum Gewinn des Weltmeistertitels gereichen wird.

Wo kommt nun die Physik ins Spiel? Wir sind eigentlich schon mittendrin, denn die Regeln haben Auswirkungen auf die Physik des Fußballs. Geht man davon aus, dass der Ball beim Kontakt mit dem Fuß nur so wenig eingedrückt wird, dass man die daraus resultierende Druckänderung vernachlässigen kann, so lässt sich unter der vereinfachenden Annahme einer ebenen Kontaktfläche zwischen Fuß und Ball mit Hilfe des 2. Newtonschen Bewegungsgesetzes und einfachen geometrischen Betrachtungen leicht zeigen, dass die Zeit einer Ballberührung (t_B) bereits vollständig durch die Ballparameter Durchmesser (d), Masse (m) und Innendruck (Δp) festgelegt ist:

$$t_B = \pi \sqrt{\frac{m}{d \Delta p}} \ . \qquad (1)$$

Dieser Ausdruck ist interessanterweise unabhängig von äußeren Größen, wie dem Impuls des Fußes, mit dem der Ball getreten wird; die Ballberührung ist also für einen harten wie für einen weichen Schuss in erster Näherung gleich lang.

Abb. 1:
Andreas Brehme erzielt im WM-Endspiel 1990 Deutschland gegen Argentinien das entscheidende 1:0 für Deutschland durch Elfmeter. (Foto: dpa)

Die Angst des Tormanns beim Elfmeter

Foul im Strafraum, großer Aufruhr unter den Spielern, kommt es zum Unvermeidlichen? Unerbittlich zeigt der Schiedsrichter zum Elfmeterpunkt. Welche Chance haben Torwart und Spieler? Rein statistisch betrachtet werden etwa 70 % aller Elfmeter verwandelt (Abb. 1). Warum ist dies so, und warum sind nicht alle Elfmeterschüsse erfolgreich? Der zweite Teil der Frage scheint leicht beantwortet: schlecht geschossen (also zu langsam oder daneben), aber dies ist hier nicht gemeint. Im Folgenden soll es um gut platzierte Schüsse gehen. Und hier spielen nicht zuletzt die Maße des Tores eine entscheidende Rolle.

„Das Runde muss ins Eckige“ (Sepp Herberger)

Die Elfmetersituation ist ein Spiel Mann gegen Mann (oder Frau gegen Frau!). Wie sind die Chancen verteilt? Ein gut platzierter hart geschossener Elfmeter hat eine Abschussgeschwindigkeit v von etwa 90 km/h, geübte Schützen können zwar noch deutlich schneller schießen, aber dann leidet zumeist die Zielgenauigkeit. Wie sieht die Situation rein physikalisch betrachtet aus? Der Torwart hat es am schwersten, den Ball zu erreichen, wenn dieser genau ins Toreck getreten wird. Für unsere Betrachtungen wollen wir daher einen Abstand vom Ball zur Torecke von ca. 11,59 m annehmen. Auf dieser kurzen Entfernung darf der Einfluss des Luftwiderstands vernachlässigt werden, und aus der Lösung der geradlinigen Bewegungsgleichung $t = s/v$ kann man leicht ausrechnen, dass der Ball dafür 0,46 s benötigt. Kann der Torwart es schaffen, in dieser kurzen Zeit mit den Händen zum Toreck zu gelangen? Die Antwort ist „nein“, jedenfalls dann, wenn er zunächst abwartet, bis er sieht, wohin der Ball sich bewegt. Denn die Zeit, die er benötigt, um aus der Tormitte ins Eck zu gelangen, beträgt bereits 0,35 s. Dies kann man leicht abschätzen, wenn man annimmt, dass der Torwart aus einer leichten Hocke (Schwerpunkt ca. 75 cm über dem Boden) abspringt und flach auf dem Boden aufkommt. Dies entspricht einer mittleren Sprunggeschwindigkeit des Torwarts von über 40 km/h. Damit verbleiben für die Zeit zwischen Schuss und Absprung gerade einmal 0,11 s – zu kurz für die Reaktionszeit der meisten Torwarte. Dennoch gelingt es in immerhin 30 % der Fälle, das Tor zu verhindern, ja es gibt richtige Spezialisten unter den Torwarten, die „Elfmetertöter“. Wo liegt ihr Geheimnis? Hier ist viel Psychologie im Spiel. Gelingt es, den Schützen zu verunsichern, so zielt er nicht mehr so genau, oder er schießt langsamer, beides hilft dem Torwart. Und: Der Torwart muss und wird sich eher für eine Torecke entscheiden. Auch hier hilft die Psychologie: Teils haben die Schützen „Lieblingsecken“, teils kann der Torwart an der Beinstellung erkennen, wohin gezielt wird. Aber dies bietet auch dem Schützen Chancen: Kann er den Torwart täuschen, ist es leicht, in die verlassene Tormitte zu treffen...

Das Wembley-Tor: drin oder nicht drin?

Wenn wir auf eines der berühmtesten Tore der Fußballgeschichte schauen, wird die Physik schon komplizierter. Wir befinden uns im Jahr 1966. Im Endspiel der Weltmeisterschaft stehen sich die Mannschaften von England und Deutschland gegenüber. Nach Anpfiff der Verlängerung läuft die 101. Spielminute, und der Spielstand lautet 2:2 unentschieden.[3)]

„Es war ein Tor. Ich habe es gesehen, meine Herren!“ (Heinrich Lübke, 1966)

Da trifft ein Schuss von Geoffrey Hurst aus etwa 5,5 bis 6 m Entfernung die Querlatte des deutschen Tores (Abb. 2). Der Ball wird nach unten abgelenkt, er prallt auf oder kurz hinter der Linie auf den Rasen, um anschließend wieder zurück in den Torraum (also aufs Spielfeld) zu springen, von wo aus er vom deutschen Abwehrspieler Wolfgang Weber mit dem Kopf über das Tor ins Toraus befördert wird. Der Schiedsrichter zögert, er befragt seinen Linienrichter, und der entscheidet auf Tor. Aus seiner Sicht muss der Ball also die Linie in vollem Umfang überquert haben, denn so will es die Regel. Am Ende war dieses Tor spielentscheidend, England wurde Weltmeister, Deutschland Vizeweltmeister.

Dem „Wembley-Tor“ wurden viele Reportagen und ganze Bücher gewidmet, die sich alle mit der Frage „Tor oder nicht Tor?“ beschäftigen. Das Thema drohte sogar die (deutsche) Nation zu spalten, als sich der Bundespräsident Heinrich Lübke „pro Tor“ äußerte. Am Ende sind alle diese Diskussionen müßig, denn im Sport gilt mit gutem Grund das Prinzip der Tatsachenentscheidung: So, wie der Schiedsrichter entschieden hat, ist es gewesen! (Auch wenn es nicht so gewesen sein sollte.) Trotzdem, oder gerade deswegen, ist es aber interessant, das Problem aus physikalischer Sicht zu betrachten. Hier sollte die Frage lauten: „Kann es ein Tor gewesen sein?“. Um diese Frage zu beantworten, benötigt man gleich eine ganze Reihe grundlegender physikalischer Prinzipien: Impuls- und Drehimpulserhaltung, Energieerhaltung und Reibungskräfte.

Betrachten wir die Ausgangssituation (Abb. 3a): Der Ball wird mit einer Geschwindigkeit von etwa 50 bis 60 km/h an die Querlatte des Tors geschossen. Der Aufprall eines Balls an die Torlatte, die im Allgemeinen (wie auch die von Wembley 1966) einen runden Querschnitt aufweist, lässt sich in guter Näherung beschreiben durch einen Aufprall des Balls auf eine reflektierende Fläche, die durch die Tangentialfläche zwischen Ball und Latte festgelegt ist.

Für den Zusammenhang zwischen dem Aufprallwinkel φ_0 auf die Latte und dem Abprallwinkel φ_1, beide gemessen gegen die Horizontale, ergibt sich folgende transzendente Gleichung (Abb. 3b):

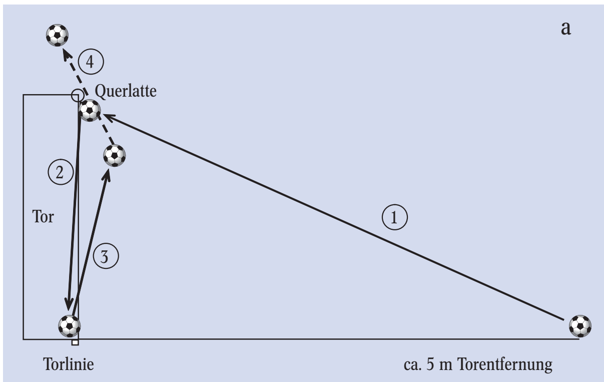
$$\tan(\varphi_1 - \vartheta) = (3/5\eta_1)\,\tan(\vartheta - \varphi_0) \qquad (2)$$

Dabei ist der Aufprallwinkel gemessen zur Normalen der Tangentialfläche $\alpha_0 = \vartheta - \varphi_0$, der Abprallwinkel entsprechend $\alpha_1 = \varphi_1 - \vartheta$. Diese Gleichung erhält man durch die Bildung des Quotienten der lateralen und vertikalen Geschwindigkeitskomponenten unter der Annahme, dass das inelastische Sprungverhalten des Balls erfasst werden kann über eine Änderung der Vertikalkomponente der Geschwindigkeit zur Tangentialfläche des jeweiligen Aufpralls, also $v_1 = \eta_1 v_0$, wobei v_0 und v_1 die vertikale Ballgeschwindigkeit vor und nach dem Stoß beschreiben und $0 \le \eta_1 \le 1$ eine von der Unterlage abhängige Konstante ist. In der Herleitung von Gl. (2) wird vernachlässigt, dass sich durch das Abrollen des Balls auch seine Ortsposition leicht ändert, was durch die gemäß Gl. (1) berechnete kurze Berührungszeit von ca. 8,4 ms gerechtfertigt ist.

Die Lateralkomponente u_1 der Geschwindigkeit nach dem Aufprall auf die Latte (bezogen auf die beschriebene Tangentialfläche) erhält man unter Verwen-

Abb. 2: **Im WM-Endspiel 1966 erzielte Geoffrey Hurst in der 101. Spielminute das umstrittene Wembley-Tor. England gewann gegen Deutschland mit 4:2 (Foto: dpa).**

3) Ausschnitte aus diesem und vielen anderen sehenswerten Spielen vergangener Weltmeisterschaften finden sich unter http://fifaworldcup.yahoo.com.



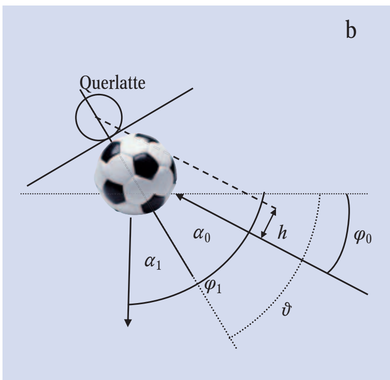


Abb. 3: **Die Flugbahn des Balles beim Wembley-Tor schematisch:**
▶ a) Nach dem Schuss aus etwa 5–7 m Entfernung (1) prallte der Ball von der Querlatte ab (2), sprang kurz hinter oder auf die Torlinie und wieder zurück ins Spielfeld (3), bevor er mit dem Kopf über das Tor hinweg ins Aus gespielt wurde (4).
▶ b) Die in der Rechnung verwendeten Größen zur Beschreibung des Aufpralls des Balls an die Querlatte.

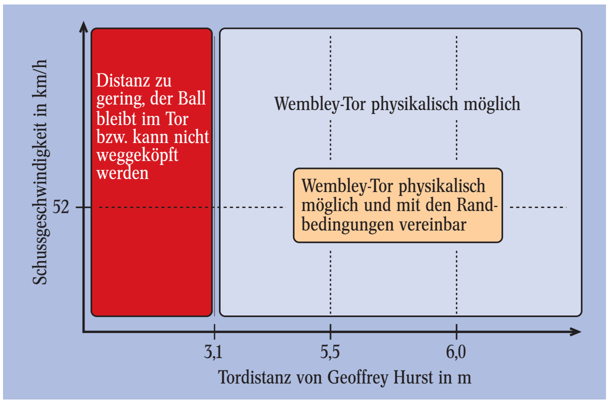


Abb. 4:
Die Simulation des Wembley-Tors zeigt, dass es ab einer Tordistanz von 3,1 Metern physikalisch möglich war.

dung der gut begründeten Annahme, dass zwischen Ball und Querlatte Haftreibung vorliegt. Dann gilt die Rollbedingung $u_1 = \omega_1 a$ während der Berührung und mit dem Trägheitsmoment einer Hohlkugel ergibt sich $u_1 = 2\omega_0/5 + 2u_0/5a$ und als Eingangsgrößen für Gl. (2), entsprechend den Abb. 3a und b:

$$\varphi_0 = \arctan\left(\frac{h-(a+b)\sin(\vartheta)}{d}\right), \quad (3)$$

$$\varphi_1 = \frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{a+w+(a+b)\cos(\vartheta)}{h-(a+b)\sin(\vartheta)}\right). \quad (4)$$

Dabei sind $h = 2{,}44$ m die Höhe der Querlatte, a der Radius des Balls, b der Radius der Querlatte, d der Abstand des Schützen zum Tor und w die halbe Breite der Torlinie.

Um herauszufinden, ob das Wembley-Tor regelgerecht erzielt wurde, muss die Trajektorie des Balls weiter verfolgt werden. Die Regel besagt, dass ein Tor erzielt wurde, wenn der Ball in vollem Umfang die Linie überquert hat, sein Mittelpunkt im vorliegenden Fall folglich etwa 11 cm hinter der Torlinie aufkommt. Bei einer 12 cm breiten Torlinie entspricht dies einem Punkt, der 17 cm hinter der Mittelachse der Querlatte liegt. Bei gegebener Torhöhe von 8 Fuß und einer Entfernung des Schützen vom Tor von ca. 6 m ergibt sich daraus eine Richtungsänderung des Balls an der Querlatte von ungefähr 55°, wobei der Ball unter einem Winkel von etwa $\alpha_1 = 6°$ gegen die Normale auf den Boden auftrifft.

Aus Gleichung (2) lässt sich nun bestimmen, unter welchem Winkel $\alpha_1 = \varphi - \pi/2$ (dies ist gleichzeitig der Winkel des nachfolgenden Aufpralls auf den Boden), mit welcher Geschwindigkeit $\vec{v} = (u_1, v_1)$ mit den lateralen und vertikalen Komponenten u_1 bzw. v_1 und mit welcher Winkelgeschwindigkeit ω_1 sich der Ball nach dem Abprall von der Latte in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern des Balls, also φ_0, ω_0, v_0, u_0 und h, weiterbewegt. Hervorzuheben ist an dieser Stelle insbesondere, dass sich der Ball nach seinem Abprall von der Latte mit einer erheblichen Eigenrotation ω_1 weiterbewegen kann, auch wenn seine Eigenrotation zu Beginn vernachlässigbar war.[4)]

Für die Winkelgeschwindigkeit des Balls nach dem Aufprall ergibt sich folgender Ausdruck:

$$\omega_1 = \frac{3v}{5a}\sin(\vartheta - \varphi_0), \quad (5)$$

wobei ϑ durch Gl. (3) definiert ist. Dabei ist v der Betrag der Geschwindigkeit vor dem Aufprall.

4) Im Folgenden wollen wir auch $\omega_0 \approx 0$ ansetzen. Diese Vereinfachung wird später durch das Ergebnis der Rechnung mit $\omega_1 \gg \omega_0$ gerechtfertigt.

5) Zum gleichen Ergebnis der physikalischen „Machbarkeit" kommt man auch bei der Betrachtung der Zeitlupe des Spiels 1. FC Kaiserslautern gegen Mainz 05 im Achtelfinale des DFB Pokals 2005/2006, in der ein „inverses" Wembley-Tor zu erkennen ist. Im Elfmeterschießen trifft der Schuss von F. Zandi die Querlatte und danach eindeutig hinter der Linie auf. Anschließend springt der Ball aus dem Tor heraus. Diesmal gibt der Schiedsrichter das Tor jedoch nicht.

Damit der von uns verfolgte Ball zum Wembley-Tor werden kann, muss er nach seinem Aufprall auf den Boden aus dem Tor zurück aufs Spielfeld springen. Dies ist nur dann möglich, wenn der Abprallwinkel vom Boden α_2 größer ist als 6°. Aus den Fotos und Fernsehbildern lässt sich der Abprallwinkel grob auf etwa 30° schätzen.

Gesucht ist im Folgenden somit zunächst einmal der Abprallwinkel für einen um seine horizontale Achse rotierenden Ball von einer ebenen Fläche. Aufgrund des steilen Aufprallwinkels auf den Boden (nahezu senkrecht) und des hohen Andrucks des Balls kann man davon ausgehen, dass auch hier Haftreibung vorliegt und damit für die kurze Zeit der Bodenberührung abermals die Rollbedingung Anwendung finden kann. Daraus ergibt sich folgende Gleichung:

$$\tan\alpha_2 = \frac{3}{5\eta_2}\tan\alpha_1 - \frac{6\sin(\vartheta-\varphi)}{25\eta_1\eta_2\cos\alpha_1}, \quad (6)$$

wobei η_2 den inelastischen Abprall vom Rasen beschreibt. Für die Simulation wurde angenommen, dass der Ball vom Rasen weniger elastisch abprallt ($\eta_2 \approx 0{,}6$) als von der Querlatte ($\eta_1 \approx 0{,}8$).

Für die Berechnung der Flugbahn des Balls zwischen Schuss und Bodenberührung haben wir die Gravitationskraft außer acht gelassen. Diese Näherung ist akzeptabel, da sich der Ball auf diesem Weg sehr schnell bewegt. Nach dem Aufprall auf den Boden ist dies nicht mehr der Fall. Die Bilder zeigen, dass der Ball anschließend aber noch eine Höhe von $h \approx 2{,}6$ m über dem Boden erreicht, bevor er über die Querlatte geköpft wird, was einer Mindestgeschwindigkeit von gut 50 km/h für den Schuss entspricht. Damit liegen die Parameter des Balls nach dem Abprall vom Boden fest, die ausgehend von den beschriebenen Eingangsparametern erreicht werden müssen, wenn man prüfen möchte, ob das Wembley-Tor physikalisch möglich war. Abb. 4 zeigt das Ergebnis einer entsprechenden Simulation.

Man stellt fest, dass ein Wertebereich für die Ausgangsparameter existiert, der zum gesuchten Ergebnis (Wembley-Tor) führt. Wir können (oder müssen) somit feststellen, dass das Wembley-Tor durchaus regelgerecht erzielt worden sein *kann*.[5)] Ob dies tatsächlich der Fall gewesen ist, lässt sich anhand der hier angestellten Betrachtungen jedoch nicht klären, denn es existiert auch ein Wertebereich von Ausgangsparametern, für die der Ball eben nicht hinter, sondern auf der Torlinie aufgeprallt ist. Die Rechnung und die Simulationen zeigen auch, dass ein Wembley-Tor umso wahrscheinlicher wird, je weiter der Schütze vom Tor entfernt ist. Für Abstände unter 3,1 m wurden keine gültigen Lösungen des Gleichungssystems gefunden.

Am Ende sei noch auf die vielen Unwägbarkeiten verwiesen, die einer solchen Rechnung innewohnen, beispielsweise könnten Unebenheiten des Rasens das Absprungverhalten des Balls drastisch ändern. Es bleibt festzuhalten, dass – wie immer auch die Trajektorie des Balls gewesen sein mag – natürlich die Tatsachenentscheidung des Schiedsrichters gilt. Hier sollte auch keineswegs versucht werden, den Schiedsrichter zu widerlegen. Am Ende lebt der Fußball auch von seinen Geschichten und Mythen – das Wembley-Tor gehört mit Sicherheit zu den spannendsten – auch in Bezug auf die Physik.

Traumtore und Bananenflanken

Welcher Fußballfreund kennt diese Situation nicht? Freistoß aus 24 m Entfernung, eine gut aufgestellte Mauer, und versierte Schützen wie Michael Ballack, David Beckham, Roberto Carlos oder Günter Netzer zirkeln den Ball um die Mauer herum unhaltbar auf einer gekrümmten Flugbahn ins Tor (Abb. 5). Auch von der Eckfahne werden hin und wieder Tore erzielt. Wie ist dies physikalisch möglich? Die Antwort liegt in dem nach Heinrich Gustav Magnus (1802–1870) benannten Magnus-Effekt; der Fußballer wird sagen, er habe den Ball angeschnitten. Was verbirgt sich dahinter? Ein angeschnittener Ball wird beim Schuss mit dem Fuß seitlich getroffen, nicht mittig. Dadurch beschreibt der Ball während seines Flugs nicht eine einfache geradlinige Bahn, sondern er dreht sich währenddessen auch um seine eigene Achse. Die Rotation führt dazu, dass die Luft den Ball auf der einen Seite schneller und auf der anderen Seite langsamer umströmt (Abb. 5). Dort, wo die Luft schneller strömt, sinkt der Luftdruck, da nach Daniel Bernoulli (1700–1782) für ein inkompressibles strömendes Medium die Summe aus statischem Druck und Staudruck gleich dem Gesamtdruck p_0, also konstant ist:[6)]

„Deutschland wird auf Jahre hin unbesiegbar sein“ (Franz Beckenbauer, 1990)

$$p + (1/2)\varrho\, u^2 = p_0. \tag{7}$$

Der gleiche Effekt verleiht Flugzeugen und Vögeln Auftrieb und ermöglicht so das Fliegen. Je größer der Geschwindigkeitsunterschied der Luft auf der Ober- und der Unterseite einer Tragfläche, desto größer ist die Auftriebskraft, die das Flugzeug in der Luft hält. Für den rotierenden Ball bedeutet dies, dass er je nachdem, wie er sich dreht, seitlich oder nach oben und in speziellen Fällen auch nach unten abgelenkt wird. Abbildung 5 zeigt, wie sich mithilfe dieses Effekts ein Ball ins Tor befördern lässt, selbst wenn der direkte Weg versperrt ist.

Die Magnus-Kraft F_M ist proportional zum Vektorprodukt der Winkelgeschwindigkeit ω des Balls und seiner Translationsgeschwindigkeit v und lässt sich ausdrücken als:

$$F_M = (1/2)\, c_M\, \varrho\, A\, a\, \vec{\omega} \times \vec{v}, \tag{8}$$

wobei c_M der Magnus-Koeffizient, ϱ die Dichte der Luft, $A = \pi a^2$ die Querschnittsfläche und a der Radius des Balls sind. Der Magnus-Koeffizient für verschiedene Kugeln liegt zwischen 0,25 und 1 und wird für einen Fußball im Folgenden als 0,5 angenommen.[7)] Damit ergibt sich für einen Ball, der mit 70 km/h und einer Eigenrotationsfrequenz von $\nu = 3{,}2$ Hz ($\omega = 20\ \mathrm{s}^{-1}$) über eine Distanz von 25 m fliegt, eine seitliche Ablenkung von 1 m! Während seines Flugs rotiert der Ball dabei viermal um seine senkrechte Achse.

Die Physik ist jedoch noch raffinierter: Der Magnus-Effekt greift nämlich nicht bei allen Fluggeschwindigkeiten gleich. Fliegt der Ball sehr schnell, so bilden sich rund um den Ball viele kleine Luftwirbel. Diese schirmen den Ball so von der umströmenden Luft ab, dass sich der Magnus-Effekt nicht oder nur abgeschwächt ausbilden kann. Die Folge: Der Ball fliegt zunächst geradeaus, und erst, wenn er durch den Luftwiderstand so weit abgebremst worden ist, dass die Luftwirbel langsam verschwinden, beginnt die Magnus-Kraft zu wirken. Die gleichen Turbulenzen haben für den Schützen noch eine zweite positive Auswirkung: Sie vermindern die Luftreibung. Der Ball wird bei hohen Geschwindigkeiten geringer abgebremst, als dies nach der Extrapolation der Luftwiderstandsentwicklung bei niedrigen Geschwindigkeiten zu erwarten wäre.[8)]

Für den Torwart ist eine solche Situation kaum mehr zu meistern: Ein ohnehin sehr schnell geschossener Ball wird nicht nur kaum abgebremst, sondern er setzt seine zunächst gerade Flugbahn plötzlich auch noch gekrümmt fort: Traumtor!

Auch eine nach oben gekrümmte Flugbahn hat ihren fußballerischen Reiz: Ein von außen in den Strafraum gespielter Flankenball kann, unterschnitten gespielt, eine unerwartete Flugbahn nehmen. Durch den Auftrieb der Magnus-Kraft wird die Gravitation teilweise kompensiert. Der Ball verfolgt eine Flugbahn, die der ohne Luftwiderstand ähnelt. Jedoch nimmt die Geschwindigkeit des Balls mit zunehmender Flugdauer ab, sodass er am Ende mit geringer lateraler Geschwindigkeit einen Mitspieler erreicht, was für diesen zusätzlich sehr vorteilhaft sein kann, da der Ball auf diese Weise besser spielbar wird. Manfred Kaltz vom HSV war in den 80er-Jahren ein Meister dieser sog. Bananenflanken.

Statistische Spekulationen

Zum Abschluss wollen wir uns von den physikalischen Details entfernen und einen Blick auf die Statistik wagen. Auch hier gibt es interessante Aspekte

6) Für den vorliegenden Fall können wir den hydrostatischen Druck $p_h = \varrho g h$ unberücksichtigt lassen, da er auf beiden Seiten gleich ist.

7) in 1), S. 196

8) Bei anderen Sportarten, z. B. Golf (vgl. Helmut Appel, Phys. Bl., Oktober 2000, S. 25) führt dies sogar zu einem abnehmenden Luftwiderstand mit zunehmender Geschwindigkeit oberhalb einer kritischen Geschwindigkeit, für Fußbälle wird dieser negative differentielle Luftwiderstand jedoch nicht beobachtet.

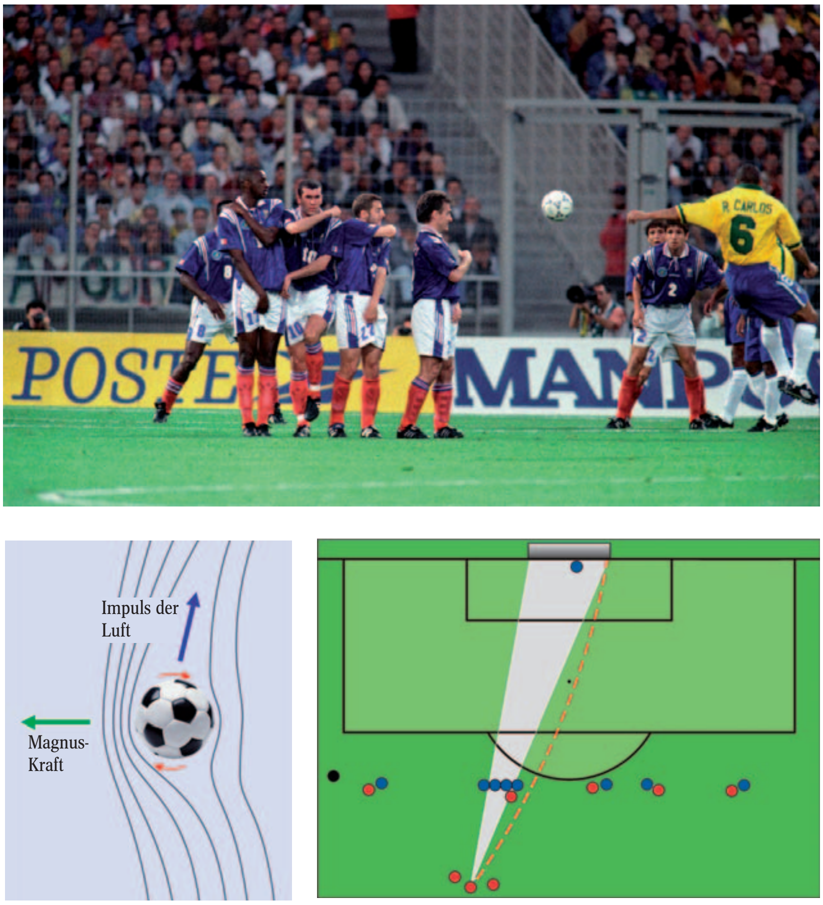


Abb. 5:
In einem legendären Freistoß schoss Roberto Carlos 1997 in einem Spiel Brasilien gegen Frankreich an der Mauer vorbei und traf dennoch das Tor (oben, Foto: Witters Sport-Presse-Fotos). Möglich ist dies dank der Magnus-Kraft (links), die dem Ball eine gekrümmte Flugbahn beschert (rechts).

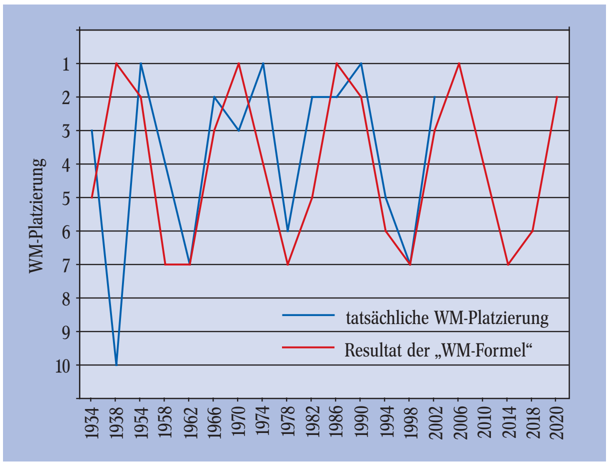


Abb. 6:
Für 2006 beste Prognosewerte: Die Platzierung der deutschen Nationalelf zwischen 1934 und 2002 sowie die beste Anpassung der Daten nach Gl. (9) stimmt optimistisch (mit freundlicher Genehmigung von M. Tolan).

zu entdecken. Im bereits erwähnten Buch zeigt John Wesson am Beispiel der ersten vier englischen Ligen auf, dass auch eine zwar stark streuende, aber dennoch deutlich erkennbare direkte Korrelation zwischen dem Zuschauerpotenzial (in einfachster Annahme proportional zur Größe der Stadt) eines Vereins und seinem

„Der Ball ist rund...“
(Sepp Herberger)

Erfolg, also der zu erwartenden Tabellenplatzierung, existiert. Die Ursache hierfür ist natürlich die Einnahmensituation eines Vereins, die unmittelbar mit seiner Zuschauerzahl zusammenhängt. Allerdings können hier regionale Einflüsse und Besonderheiten wie ein großes Hinterland, mehrere konkurrierende Vereine, ein finanzkräftiger Sponsor oder ein kleines Stadion zur deutlichen Abweichungen führen. Auch sozialwissenschaftlich Interessierte finden hier spannende Aussagen. So zeigt Wesson auf, dass die Verteilung der Geburtsmonate der Spieler in der Premier League gegenüber der Statistik für die Gesamtbevölkerung eine signifikante Überhöhung im Oktober/November aufweist, während das Minimum dieser Verteilung im April/Mai liegt. Ein Zusammenhang von fußballerischer Begabung und Geburtsmonat scheint kaum vorstellbar. Eine plausible Erklärung hierfür ergibt sich jedoch, wenn man in Betracht zieht, dass die älteren Schüler eines Jahrgangs in Schule und Vereinen allein aufgrund ihrer leichten altersbedingten körperlichen Überlegenheit im Mittel öfter in Mannschaften aufgestellt werden und somit eine etwas bessere Förderung erfahren.

Einen anderen, etwas weniger ernsten Ausflug in die Statistik wagt der Kollege Metin Tolan (Universität Dortmund) in der Ausgabe des Spiegel vom 31. Januar 2006. Basierend auf den Platzierungen der deutschen Nationalelf von 1938 bis 2002 zeigt er, was Statistik auch leisten kann. Für die Zeitabhängigkeit der Platzierung $P(n)$ der DFB-Elf bei der n-ten Weltmeisterschaft leitet er folgenden Zusammenhang her:

$$P(n) = \left(\bar{P} + \frac{1}{2}\right) + \left(\bar{P} - \frac{1}{2}\right)\cos\left(\frac{2\pi}{N}n\right), \qquad (9)$$

Abbildung 6 zeigt diese Funktion für die Vergangenheit und die Zukunft. Dabei sind $\bar{P} = 3{,}7$ die mittlere Platzierung und $N = 4{,}5$ (entspricht 18 Jahre) die Periode „starker“ deutscher WM-Teams. Danach bleibt kein Zweifel: Allen Zweiflern und Kritikern zum Trotz wird die deutsche Mannschaft 2006 den Weltmeistertitel erringen. Üblicherweise drückt sich der Heimvorteil einer Mannschaft in einer erhöhten Torrate aus. Nimmt man für die deutsche Mannschaft einen Motivationsbonus von nur einem Tor oder zwei Toren pro Spiel an, so wird sie mit 33- bzw. 56prozentiger Wahrscheinlichkeit den Weltmeistertitel erringen. Wir dürfen uns also auf den Juni und Juli dieses Jahres freuen und dabei auf ein weiteres Zitat eines berühmten Fußballers vertrauen: „Fußball ist ein Spiel, bei dem 22 Spieler hinter einem Ball herjagen, und am Ende gewinnt immer Deutschland“ (Gary Lineker, 1990).

*

Für ihre Beiträge, die Diskussionen und die kritische Durchsicht dieses Manuskripts möchte ich allen Mitarbeitern meiner Arbeitsgruppe herzlich danken, insbesondere Dr. Jan-Ingo Flege und Dr. Thomas Schmidt. Mein besonderer Dank gilt meiner Frau Ulrike, die mich ermutigt hat, dieses Thema aus physikalischer Sicht aufzugreifen, und meinem Vater, dem ich die Begeisterung für den Fußball verdanke.

Der Autor

Jens Falta hat in Hamburg und Hannover Physik studiert, wo er 1991 mit einer experimentellen Arbeit zur Oberflächenphysik promoviert hat. Nach wissenschaftlichen Wanderjahren an den IBM T. J. Watson Research Laboratories in Yorktown Heights, New York, dem HASYLAB am DESY sowie der Uni Hamburg erhielt er 1999 einen Ruf an die Uni Bremen, wo er sich mit Wachstumsvorgängen an Halbleiter-Oberflächen beschäftigt. In seiner Fußballkarriere ist Falta über eine Kreismeisterschaft nicht hinausgekommen, seit über 30 Jahren verfolgt er aber den nationalen und internationalen Fußball mit großer Begeisterung. Das WM-Endspiel 1966 mit dem berühmten Wembley-Tor ist seine früheste Erinnerung an eine Fußballübertragung im Fernsehen.