

Physikalisches um das Fussballspiel

1) Einleitung



2) Die Physik beim Elfmeter

3) Wann ist der Ball im Tor?

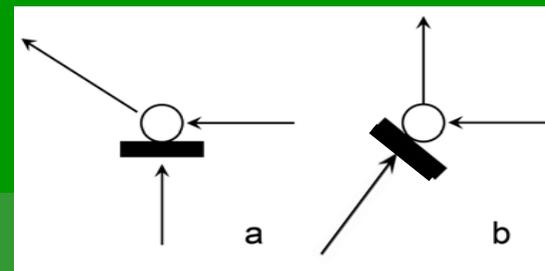
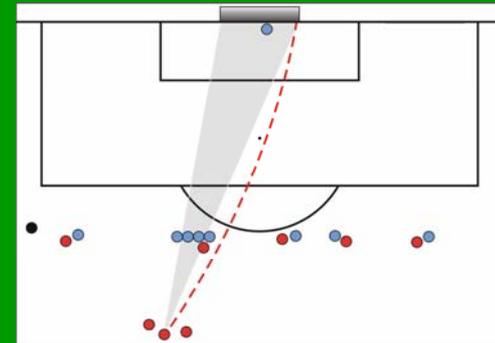
Die Wahrheit über Wembley 1966

4) Die Flanken- und Freistossgötter:

Der Magnus-Effekt

5) Intuition und Vektoraddition:

Wohin geht der Ball nach einer Flanke?



Die Aargauische Juniorenauswahl U15, Juni 1995



Die Aargauische Juniorenauswahl U15, Juni 1995



Schweizer Meister aus dem Aargau

(M.D.) Die U-15-Juniorenauswahl des Aargauischen Fussballverbands gewann den Final des Volksbank-Cups gegen Genf im Elfmeterschiessen 4:2 (1:0, 1:1) und wurde Schweizer Meister der Regionalauswahlen. Das Spiel fand

als Vorspiel zu Schweiz - Italien statt. Die Sieger, stehend von links: Manfred Daum, Moritz Daum, Oskar Derungs (Trainer, Betreuer), Carmine Viceconte, Ivan Previtali, Flavio Schmid, Ralph Stamm, Michi Märkwälder, Andi

Ernst, Marcel Amrein, Martin Kreuzmann, Thomas Erni; vorne: Remo Tovagliari, Alex Kollbrunner, Ivo Dätwyler, Gerri Viceconte, Dino Roselli, Nikki Derungs, Tino Farruggia, Geri Viceconte, Roger Hunkeler. FOTO: AFV

1995

Die Aargauische Juniorenauswahl U14, Juni 1994

U14-Auswahl des Aargauischen Fussballverbandes gewann Schweizer Meistertitel

Glück auf eigene Seite gezwungen

AFV. Beim Finalturnier der regionalen Juniorenauswahlen gewann die U14-Auswahl des Aargauischen Fussballverbandes und wurde sensationell Schweizer Meister. Im Turnier der U15-Auswahlen musste sich die Aargauer Vertretung nach einem hart umkämpften 0:0 im Halbfinal erst im Elfmeterschiessen ihren Alterskollegen aus dem Waadtland beugen.

Im Halbfinal traf die aargauische U14-Mannschaft auf die stark aufspielende Equipe des Kantons Freiburg. Bereits in den ersten Minuten hatten die Aar-



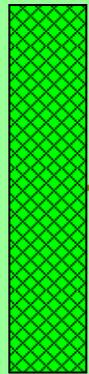
Finalsieg im Penaltyschiessen: Die Aargauer U14-Auswahl mit (stehend, von links) Manfred Dau (Trainer), Remo Tovagliari, Ralph Stamm, Flavio Schmid, Michi Markwalder, Nicki Derungs, Ivan Pretali, Carmine Viceconte, Marc Strasser, Mario Panzeri, Mirko Dapoto, Marcel Amrein, Max Vögel (Co-Trainer), Moritz Daum (Co-Trainer); (sitzend) Patrick Koller, Ivo Dätwyler, Andi Ernst, Louis Müller, Dino Roselli, Andi Oehrli, Martin Kreuzmann, Gerri Viceconte, Gerri Donatiello

Foto: z

1994

Die Angst des Torwarts vor dem Elfmeter

Torbreite: 7,32 m



70-80% aller Elfmeter werden verwandelt
Woran liegt das?



Entfernung zur Torecke $s=11.60$ m

Kräftiger platzierter Schuss: $v=90$ km/h

Maximale Schussgeschwindigkeiten

-> gemessen: bis zu 130 km/h (z.B. Andreas Möller)

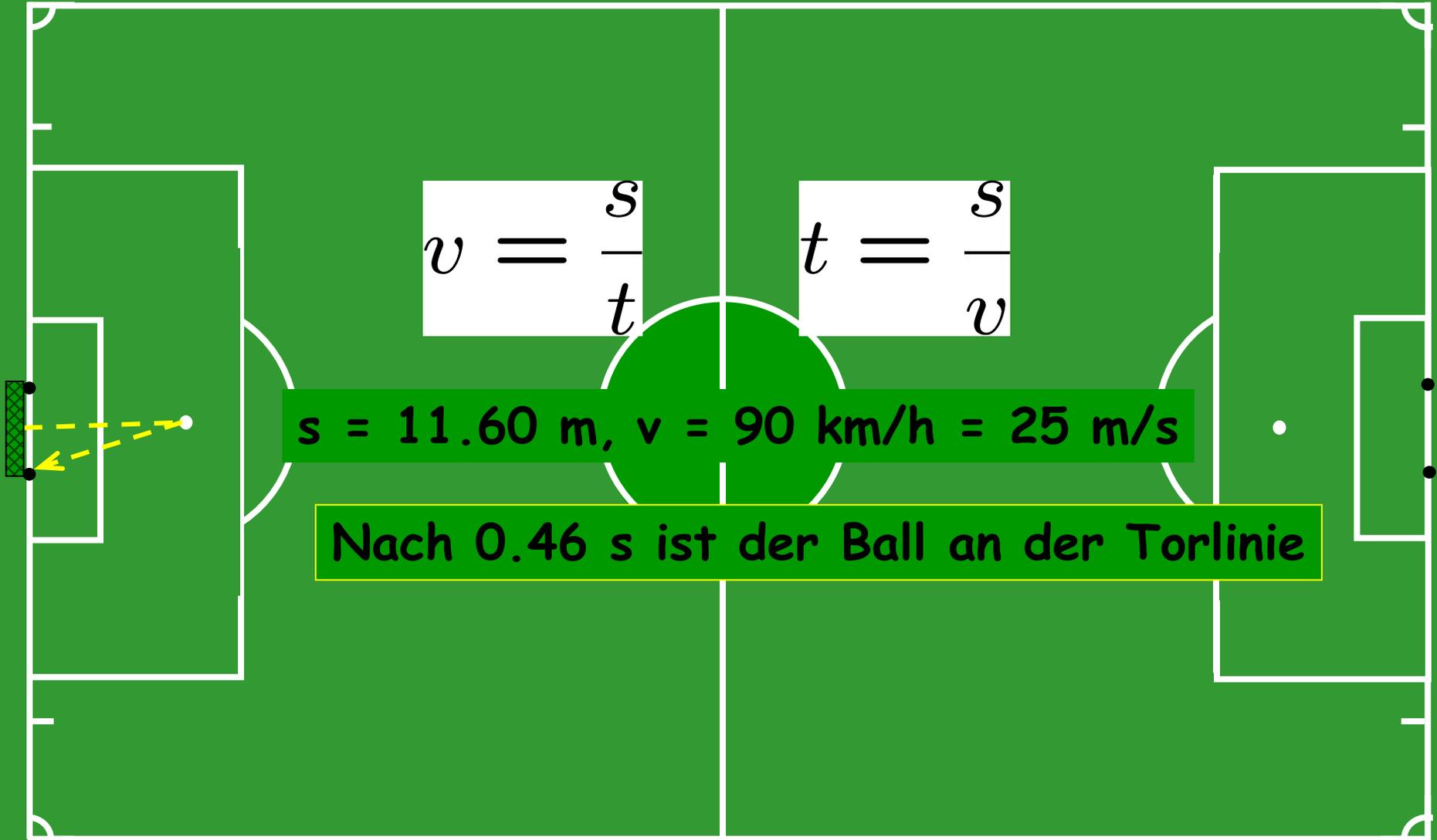
Wie lange braucht der Ball bis ins Tor?

$$v = \frac{s}{t}$$

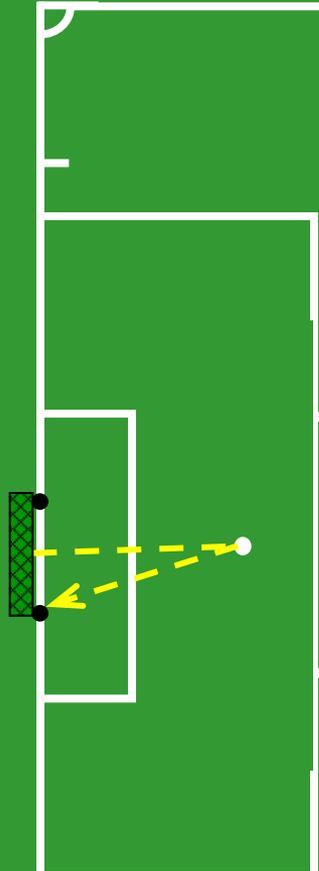
$$t = \frac{s}{v}$$

$s = 11.60 \text{ m}, v = 90 \text{ km/h} = 25 \text{ m/s}$

Nach 0.46 s ist der Ball an der Torlinie



Die Angst des Torwarts vor dem Elfmeter



The diagram shows a soccer goal with a white frame. A ball is positioned in the center of the goal. A goalkeeper is shown on the left side of the goal, with a yellow arrow pointing towards the ball. The goal is divided into three sections by a vertical line and a horizontal line.

Sprung zur Torecke ca. 0.35 s

verbleibende Zeit: $0.46 \text{ s} - 0.35 \text{ s} = 0.11 \text{ s}$

Experimente zu Reaktionszeiten z. B.
bei Saturday Morning Physics und Kinder-Uni:
 $0.16 - 0.19 \text{ s} !$

Reaktionszeit Usain Bolt in Weltklasse ZH:
 0.191 s (29. 8. 2008, 100 m in 9.83 s!)

Germany vs. Argentina (1990, Rome)

Total Video Converter
<http://effectmatrix.com>



<http://www.youtube.com/watch?v=Eh0heOmKJnM>

Chance des Torwarts bei guten Schützen

1) Ecke raten!

2) Etwa 70% der Schüsse erfolgen in die Richtung, in die das Standbein zeigt (Sekundenbruchteile vor dem Schuss)!

Yuri Shevchenko, 1. Elfmeter:

<http://www.youtube.com/watch?v=4aRt0yhOS58>

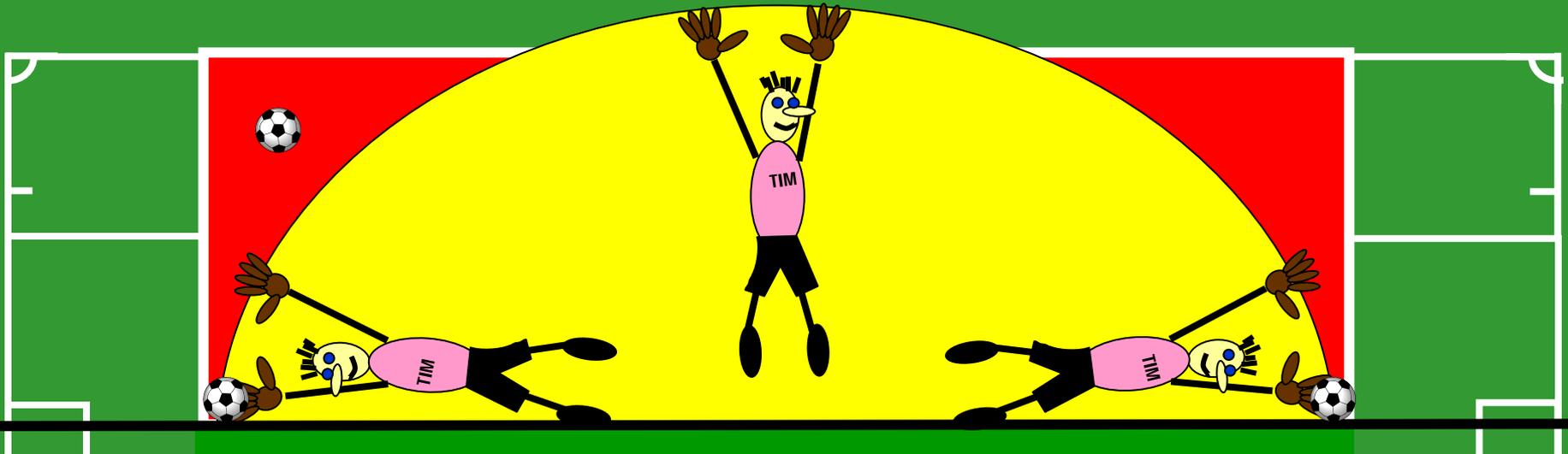
3) Fast jeder Schütze schaut vor dem Schuss ganz kurz in die Ecke, in die er schießen wird!

Marco Streller, Elfmeter:

<http://www.youtube.com/watch?v=d5fK1xQ7mQc&feature=related>

Chance des Torwarts ist gleichzeitig auch Chance des Schützen! („verladen“)

Die Angst des Torwarts vor dem Elfmeter



Körpergrösse: → 1.90 m

mit gestrecktem Arm: → 2.40 m

Sprung (hoch): +0.40 m → 2.80 m

Torhöhe: 2.44 m

Sprung (weit): ~0.80 m → 3.20 m (= 2.40m + 0.80 m)

Beine gespreizt: +0.20 m → 3.40 m

Balldurchmesser: 0.22 m → 3.60 m

Halbe Torbreite: 3.66 m

Einige Ronaldinhos



http://www.myvideo.ch/watch/2385306/Ronaldinho_elfmeter_gegen_Inter

Die Physik des Fussballspiels: Kurioser Elmeter!



Marokko, Coupe du Trone

Maghreb Fez vs. FAR Rabat 7:6 nach Elfmeterschießen

<http://www.youtube.com/watch?v=Q2rK634iuIE>

Kleine Regelkunde (DFB 2008)

10. Ein Tor ist gültig erzielt, wenn der Ball die Torlinie zwischen den Pfosten und unterhalb der Querlatte in vollem Umfang überquert, ohne dass ein vorgängiges Vergehen des Teams vorliegt, das den Treffer erzielt hat.



Kein Tor



Kein Tor



Kein Tor



Kein Tor



TOOOOOR!

WM-Finale 2006: Frankreich vs. Italien



1:0, Elfmeter, Zinedine Zidane, 7. Minute

http://www.youtube.com/watch?v=tO_E1TeT770

WM-Finale 2006: Frankreich vs. Italien



David Trezeguet, 2. Elfmeter für Frankreich im Elfmeterschiessen
<http://www.youtube.com/watch?v=7yQfo7LLLAM>

VfL Bochum - VfB Stuttgart 1:2, 4.4.2009



<http://www.youtube.com/watch?v=nUPoPk3dRNo>

VfL Bochum - VfB Stuttgart 1:2, 4.4.2009



Mit einem kuriosen Treffer startete die zweite Hälfte. Epallé schoss von der linken Eckfahne vors Tor. Lehmann wollte den Ball fangen, was er auch tat, allerdings landet er mit dem Ball in der Hand dann hinter der Linie - 1:0 (48.). Zitat "Kicker"

Tor? Sicht von vorne!



Tor? Sicht von oben



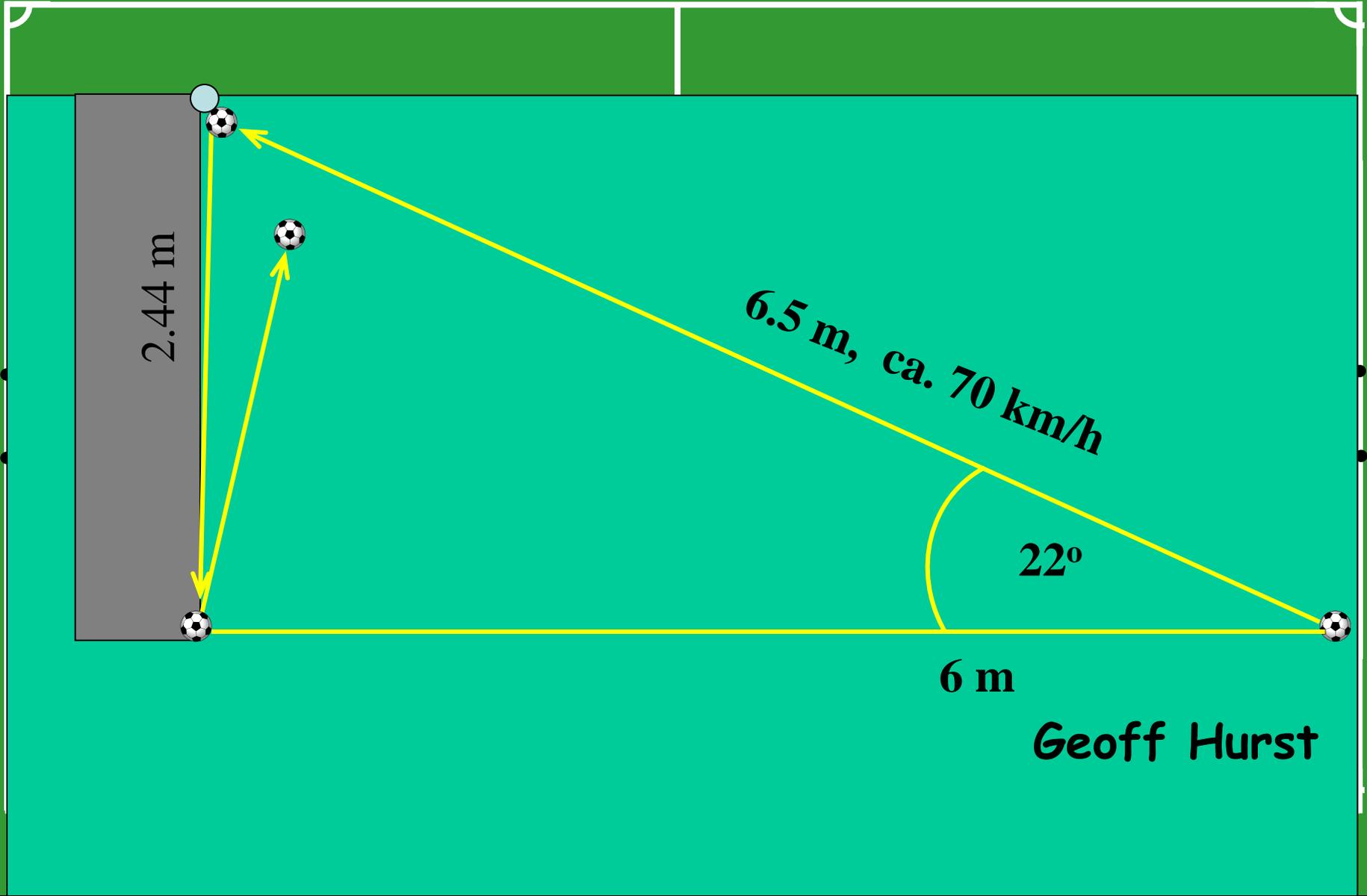
Wembley 1966: Die Wahrheit

<http://www.youtube.com/watch?v=mvxVGMOgmcU&NR=1>

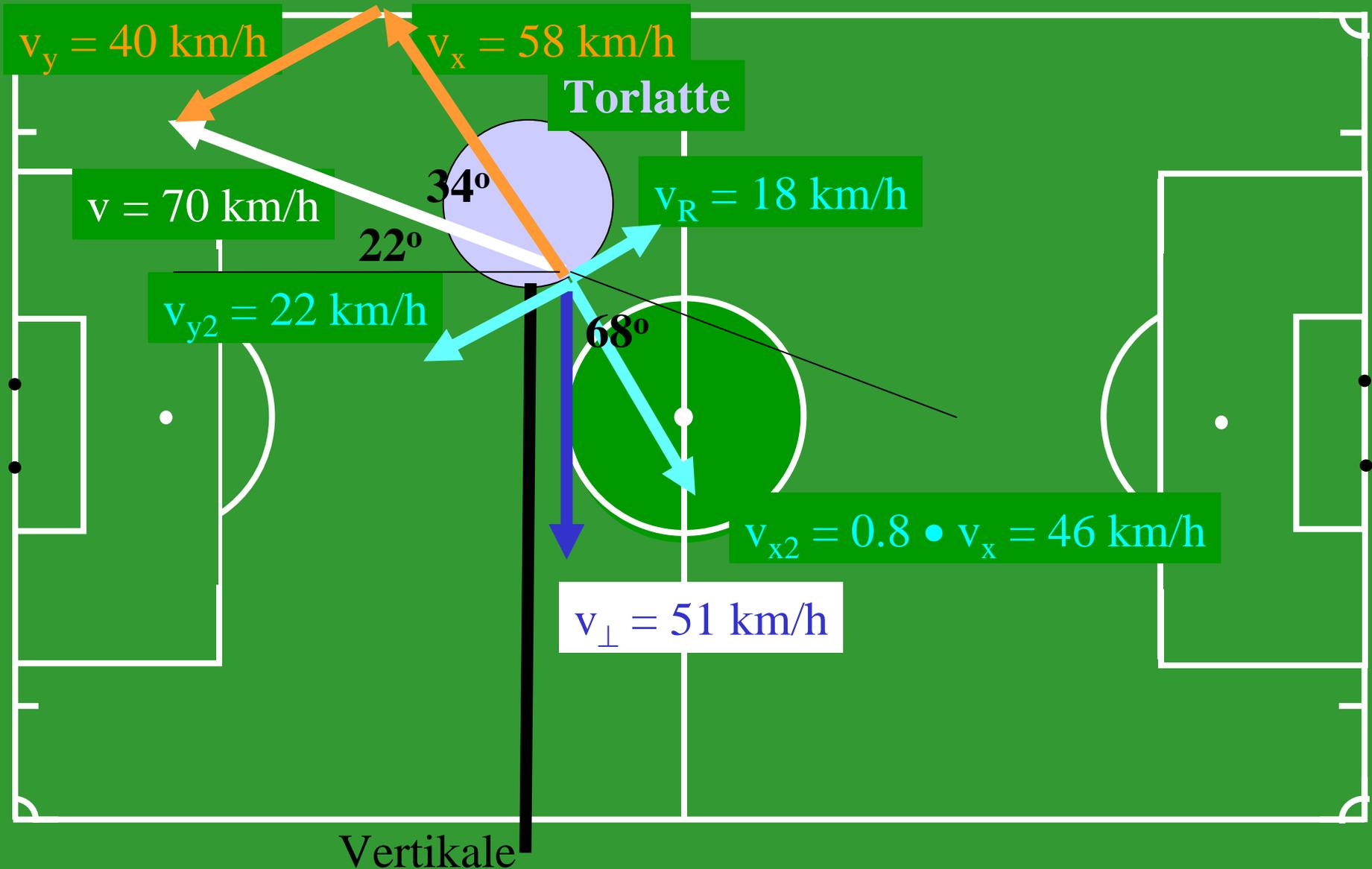
Fifth "goal" by
Geoff Hurst in the
98th minute

(das fünfte "Tor" von Geoff
Hurst in der 98. Minute)

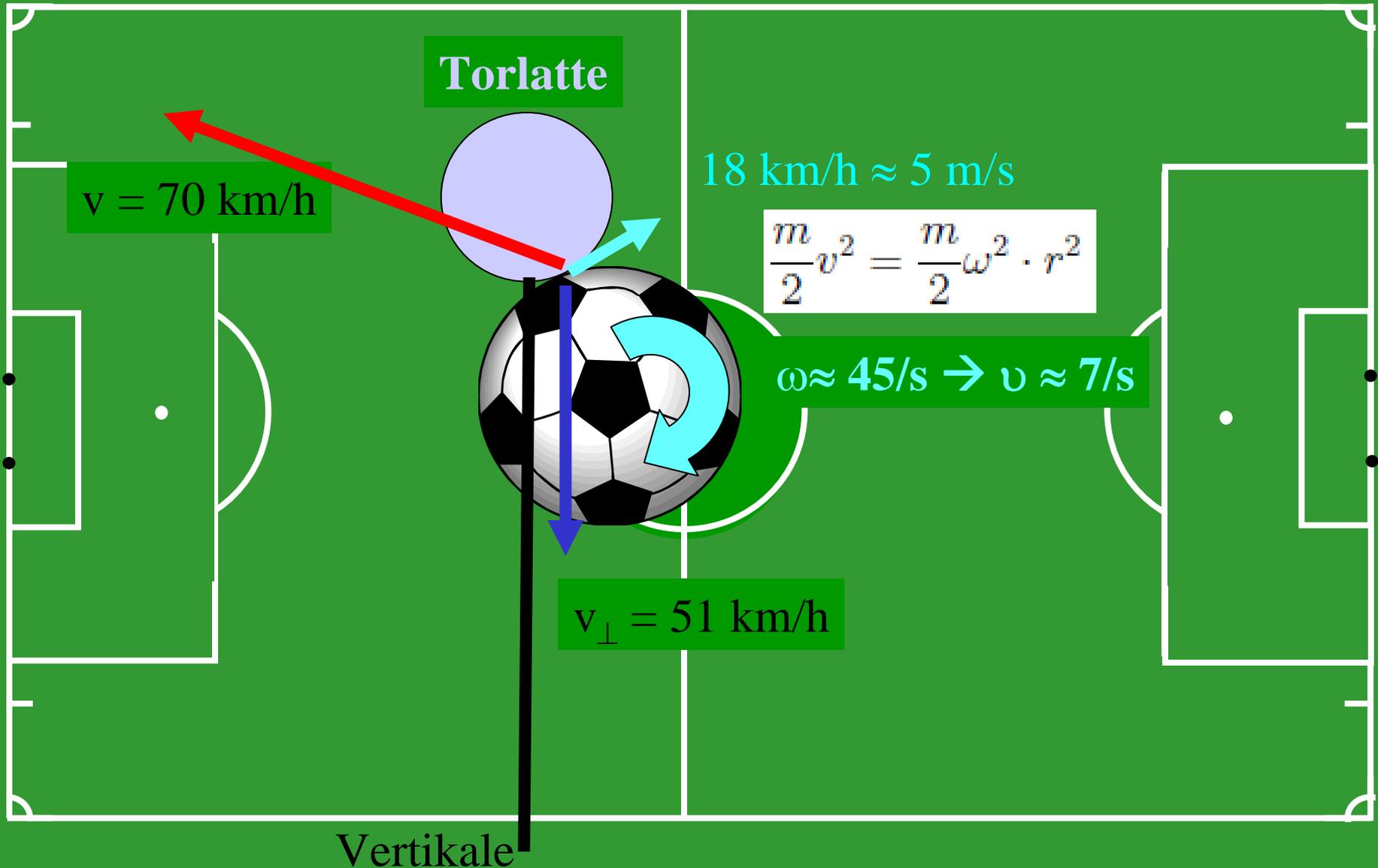
Abprallen von der Torlatte



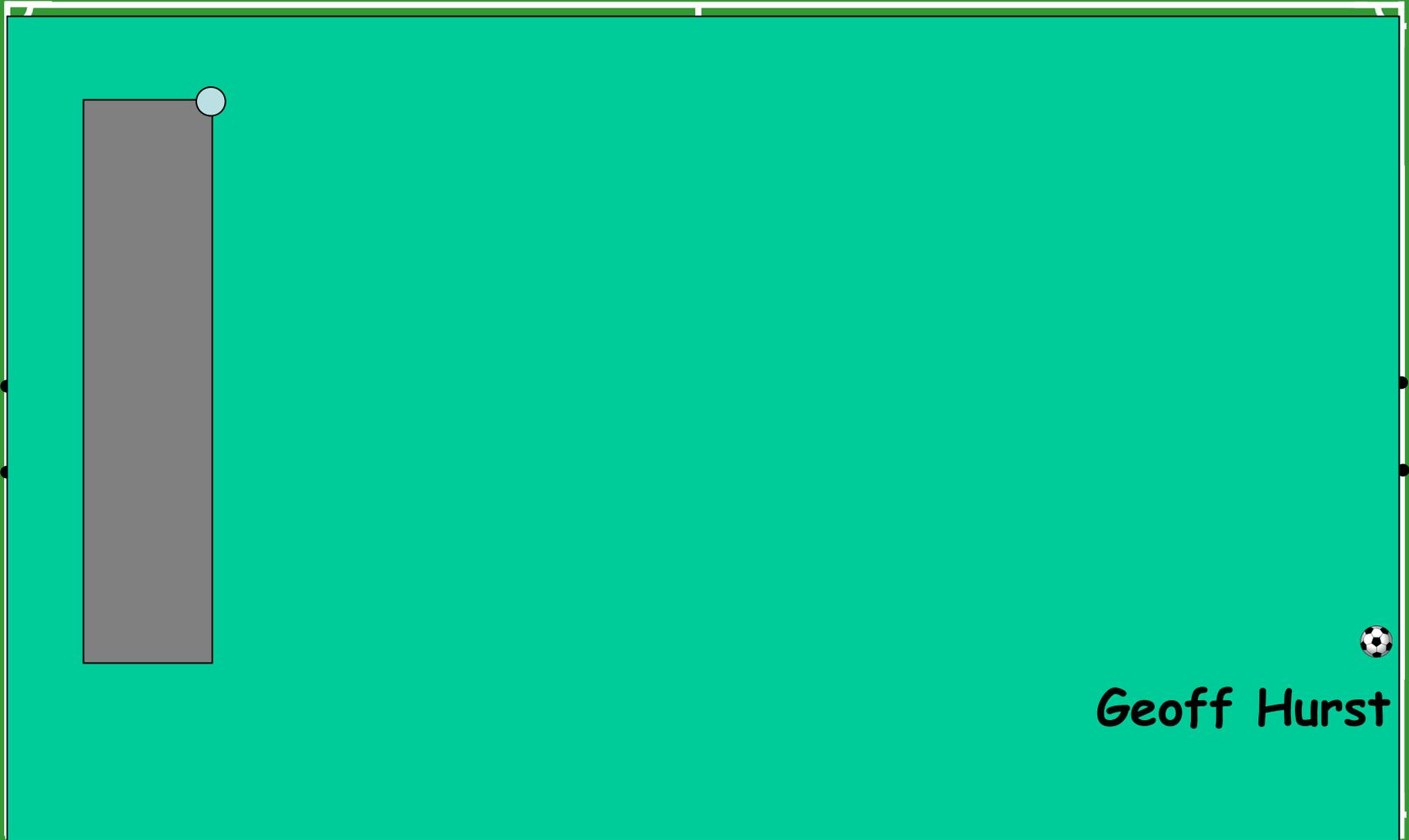
Abprallen von der Torlatte



Abprallen von der Torlatte

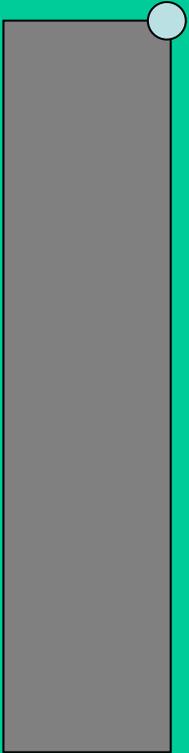


Abprallen von der Torlatte



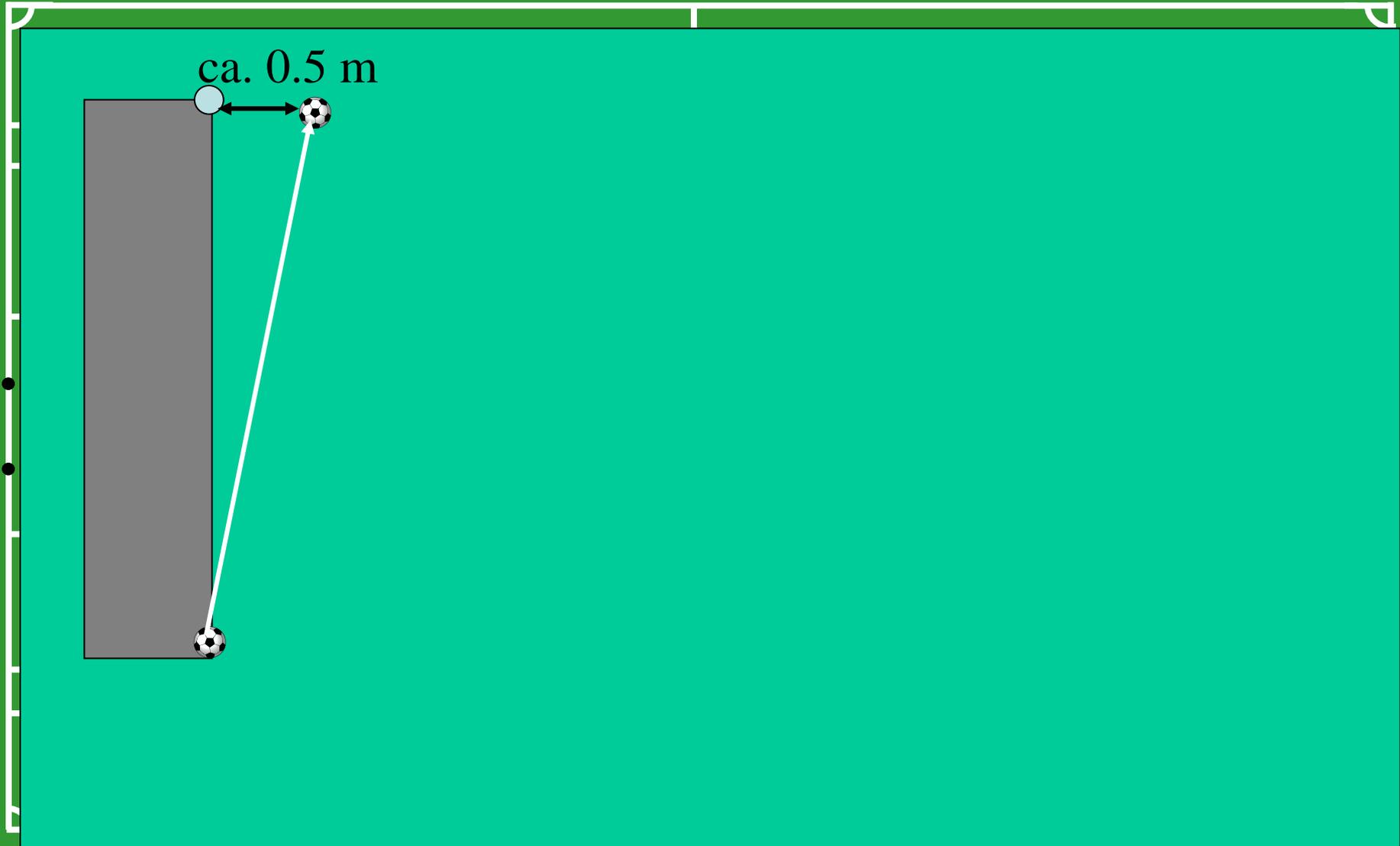
Abprallen von der Torlatte mit Effet

War der Ball in der Luft im Tor?



Geoff Hurst

Abprallen von der Torlatte mit Effet



Wembley 1966, andere Perspektive



<http://www.youtube.com/watch?v=AeyyJo1UC94&feature=related>

<http://www.youtube.com/watch?v=HeXWEVXhdUo&feature=related>

Die Physik des Fussballspiels

$v(\text{Latte}) = 70 \text{ km/h}$ an der Latte

$v(\text{Boden}) = 51 \text{ km/h}$ wenn senkrecht nach unten

Drall: 7 Hz (Umdrehungen pro Sekunde)

Nach Abprallen am Boden:

→ Ball springt ins Spielfeld zurück

Die Messungen aus dem Video

geben einen eindeutigen Schluss: Kein Tor!

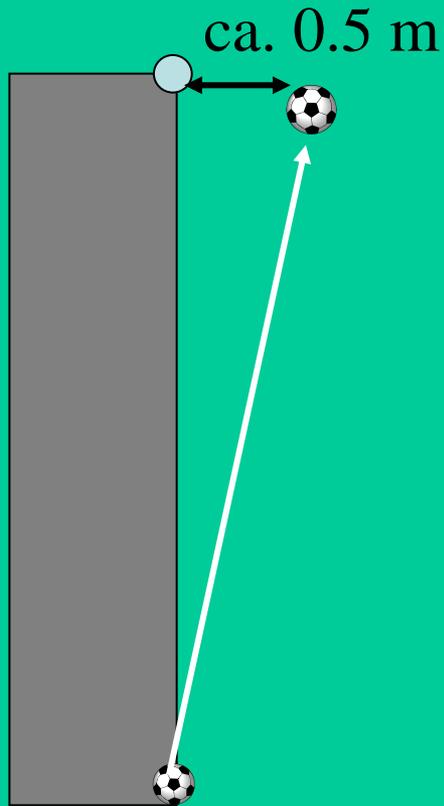
→ **Aber:** Tor ist dann, wenn der Schiedsrichter pfeift!

Wembley-Tor in Bloemfontain 2010

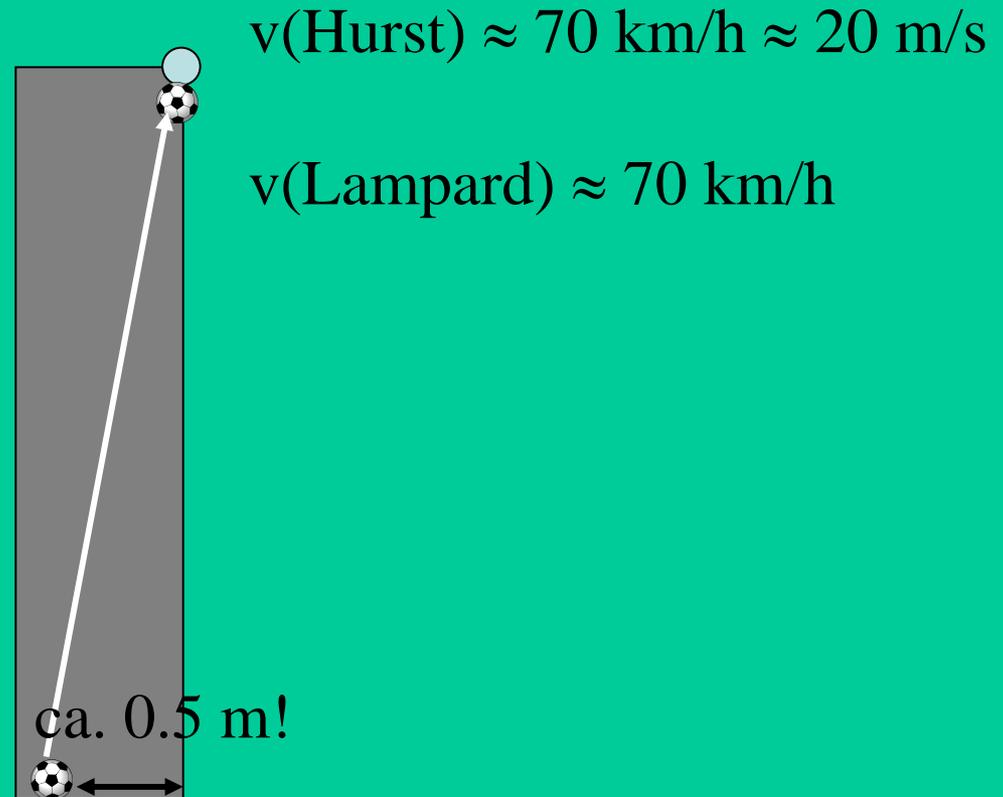


<http://www.youtube.com/watch?v=69JFWdefJ5U>

Abprallen von der Torlatte mit Effet



Wembley 1966

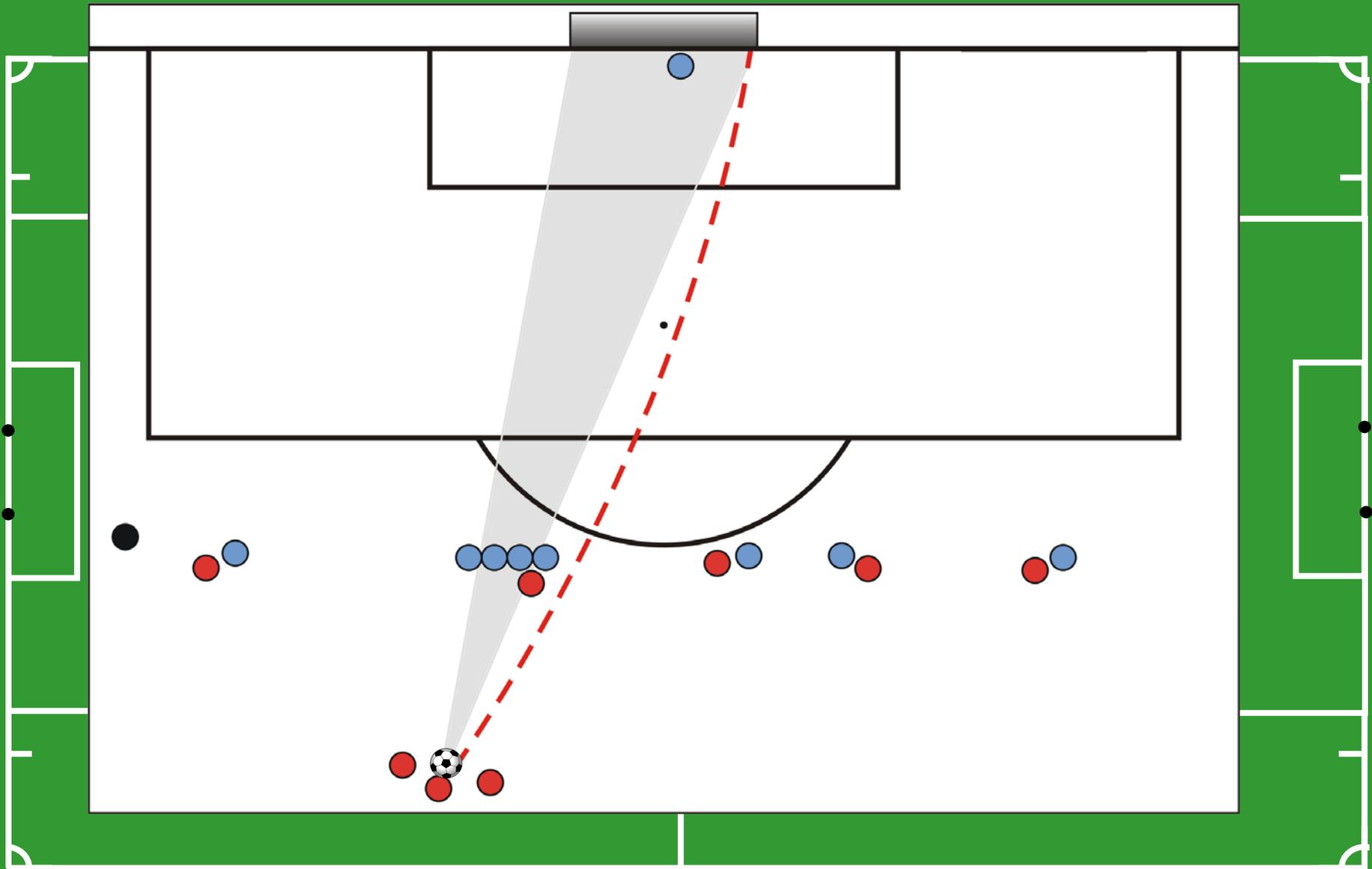


Bloemfontain 2010

Zum Vergleich: Elfmeter Zinedine Zidane, WM-Finale 2006

http://www.youtube.com/watch?v=tO_E1TeT770

Die Physik des Fussballspiels



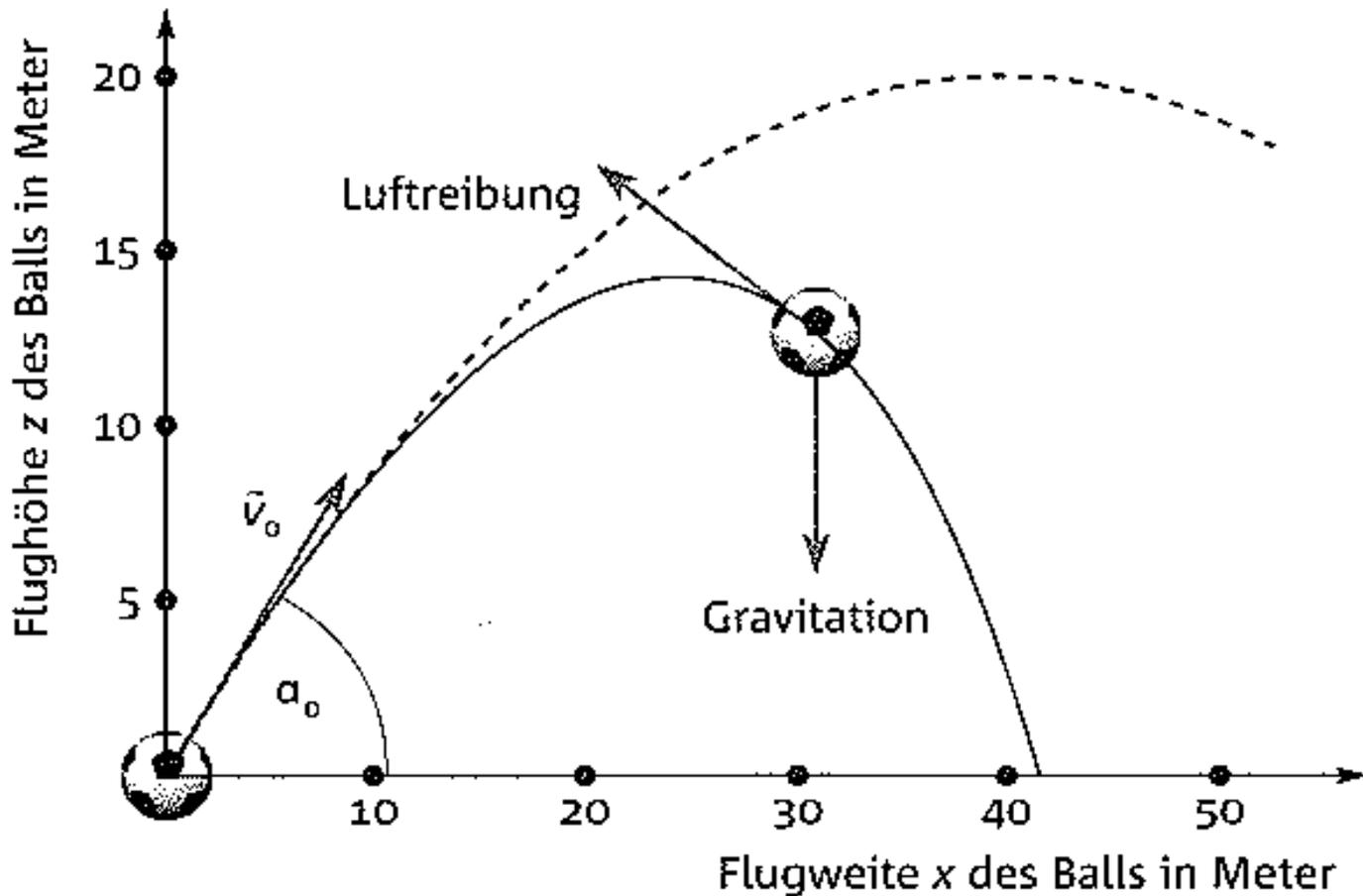
Die Physik des Fussballspiels



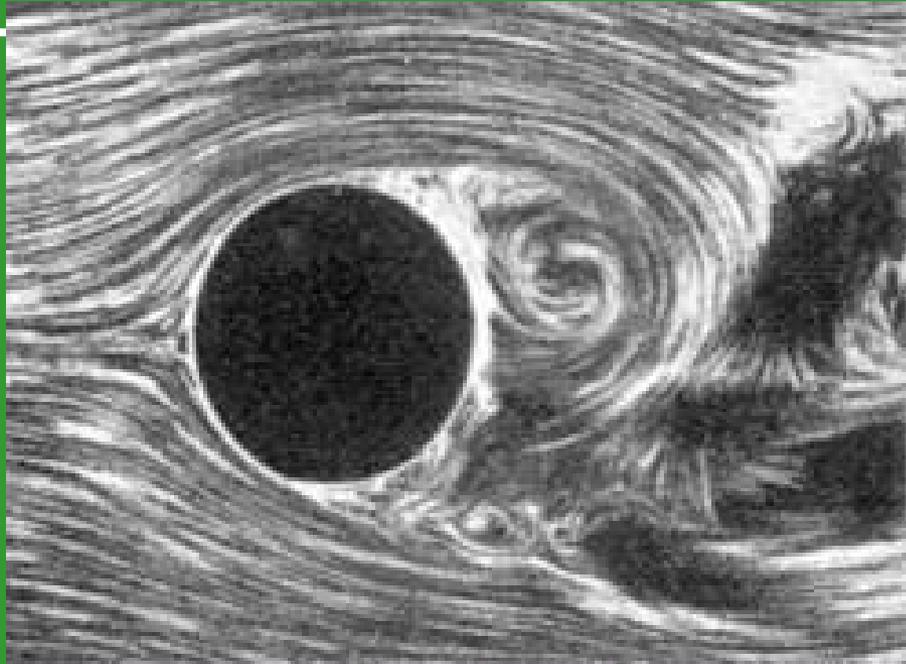
http://www.youtube.com/watch?v=z0LlfgS_EoM&list=PLD38F9F7AD04C5B73&index=8&feature=plpp_video
nach ca. 1 Minute.

Die Physik des Fussballspiels

Die Flugbahn eines Fußballs mit Luftwiderstand



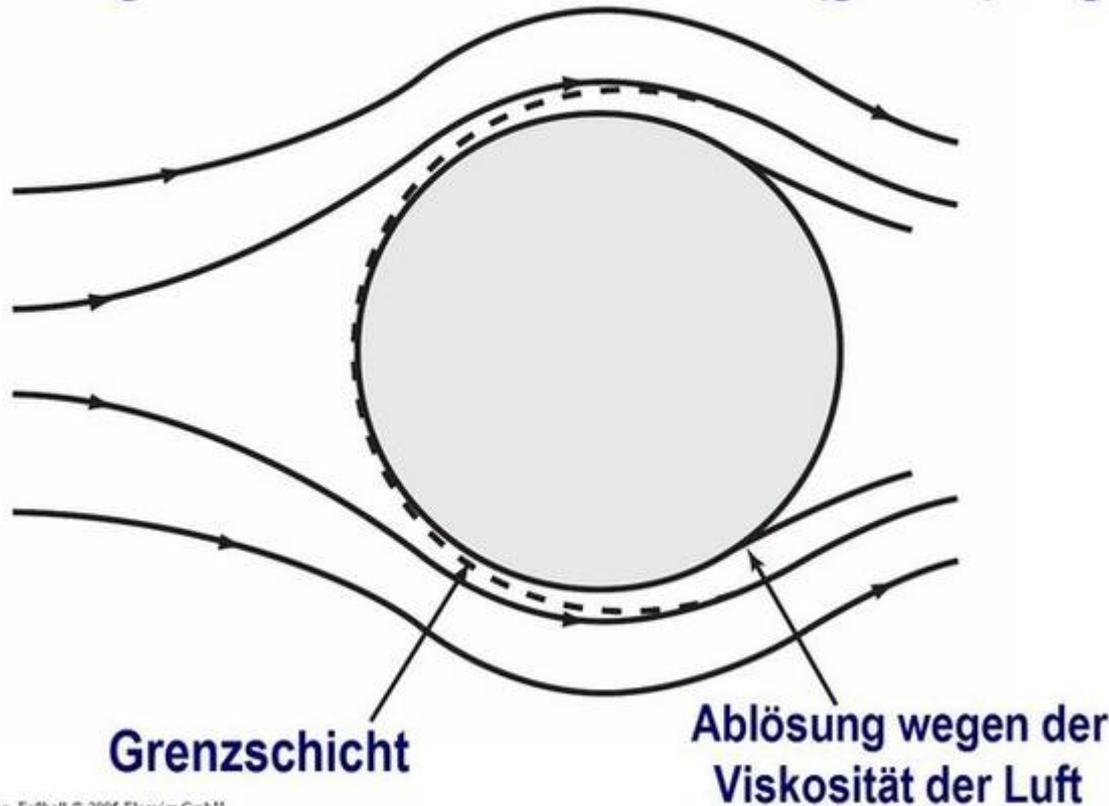
Die Physik des Fussballspiels



Die Ursache des Luftwiderstandes sind Wirbel, die entstehen, wenn die Luft den Ball im Flug umströmt. Die Abbildung zeigt solche Wirbel, die sich hinter einer Kugel bilden, wenn sie sich durch eine Flüssigkeit bewegt.

Die Physik des Fussballspiels

Erklärung für den Luftwiderstand einer (glatten) Kugel



Aus Wesson, Fußball © 2005 Elsevier GmbH

Wieso umströmt die Luft nicht einfach den Ball? Wegen der Zähigkeit löst sich die Luft irgendwann von der Balloberfläche und bildet Wirbel. Das alles passiert in einer dünnen Grenzschicht (bei Luft ca. 0.3 mm!).

Die Physik des Fussballspiels

Innere Reibung von Gasen, Grenzschichtdicke (Ludwig Prandtl):
Die Dicke einer Schicht mit linearem Geschwindigkeitsgefälle kann einen gewissen Grenzwert nicht überschreiten:

$$D = \sqrt{\frac{\eta \cdot l}{\rho \cdot v}}$$

Viskosität (Luft) $\eta = 0.0002 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{s})$

Länge des Balls $l = \text{ca. } 11 \text{ cm}$

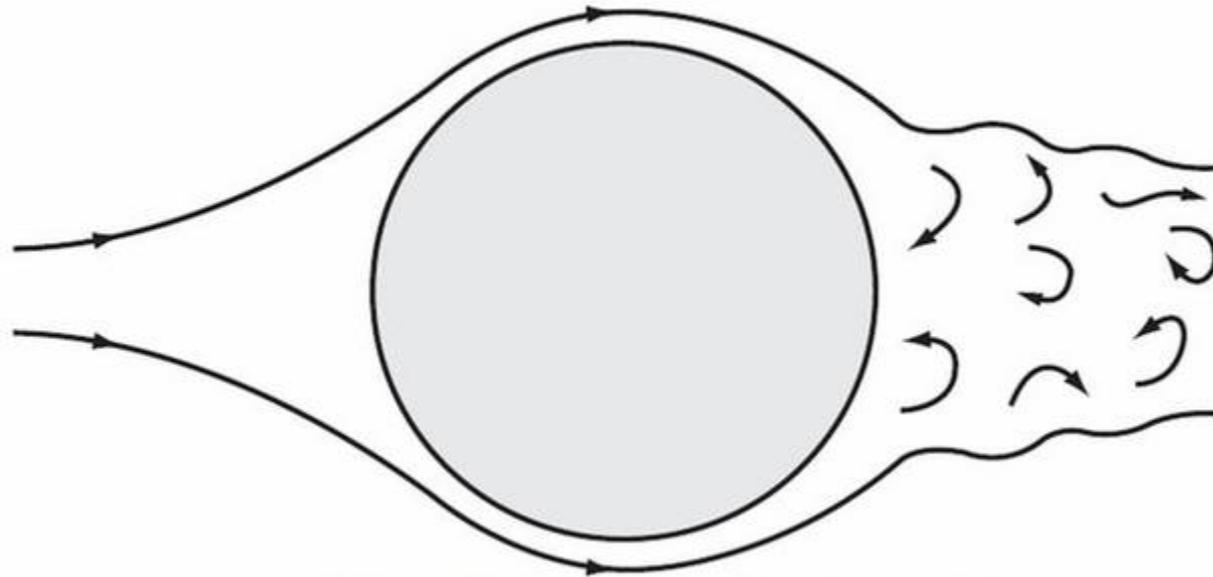
Luftdichte $\rho = 0.0012 \text{ g}/\text{cm}^3$

Ballgeschwindigkeit $v = 70 \text{ km}/\text{h} \approx 2'000 \text{ cm}/\text{s}$

$$D \approx 0.03 \text{ cm} = 0.3 \text{ mm!}$$

Die Physik des Fussballspiels

Erklärung für den Luftwiderstand einer (glatten) Kugel

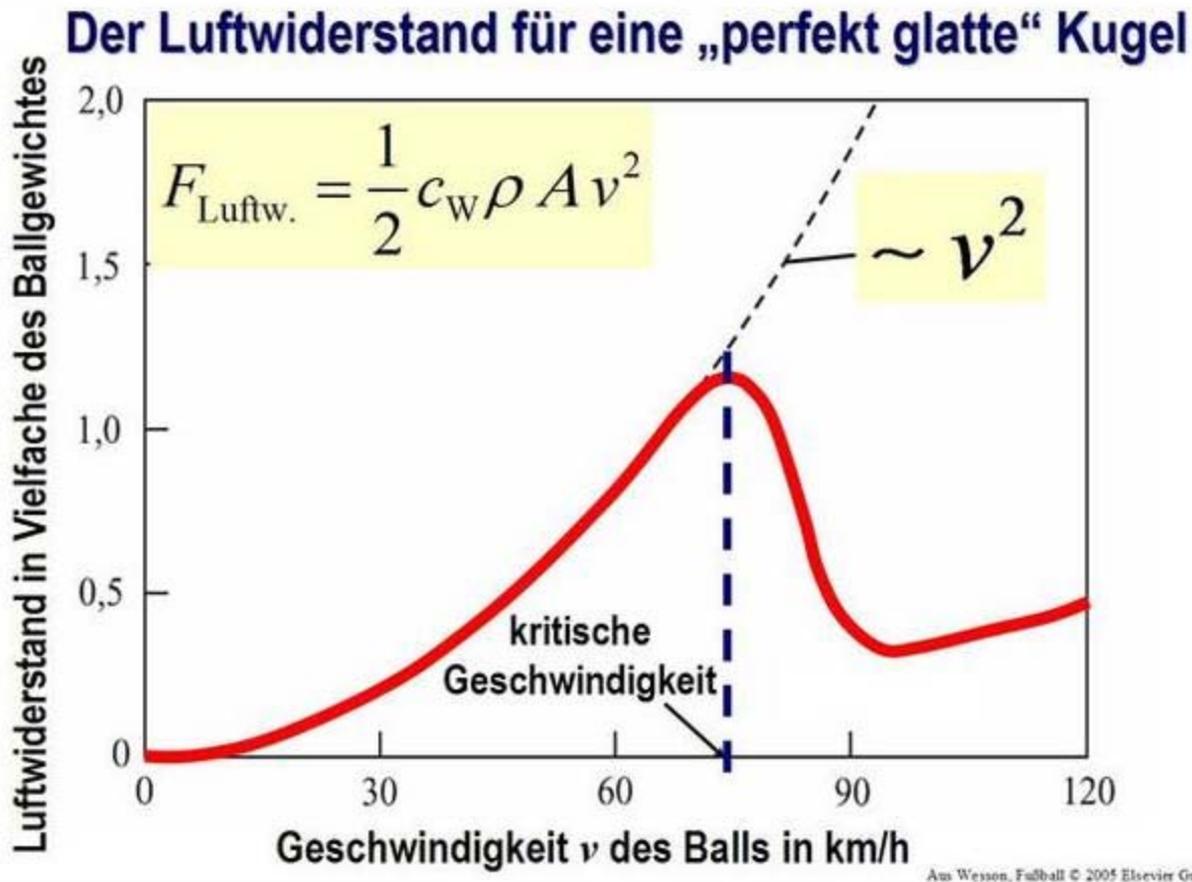


⇒ Der Luftwiderstand hängt von der Geschwindigkeit der Kugel ab !

Aut Wesson, Fußball © 2005 Elsevier GmbH

Durch das Ablösen von einzelnen Luftwirbeln in der Grenzschicht entstehen hinter jeder Kugel, also auch jedem Fußball, der durch die Luft fliegt, immer sog. „Wirbelschleppen“, die dem Ball Energie entziehen und seine Bewegung somit verlangsamen.

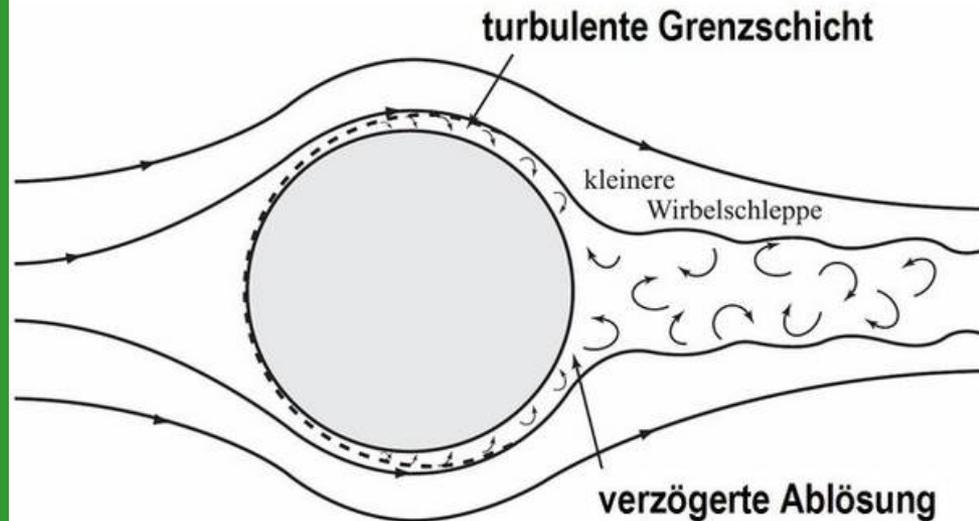
Die Physik des Fussballspiels



Der Luftwiderstand zeigt ein seltsames geschwindigkeitsabhängiges Verhalten: oberhalb einer bestimmten kritischen Geschwindigkeit geht er plötzlich stark zurück!

Die Physik des Fussballspiels

Was passiert bei der „kritischen Geschwindigkeit“ ?

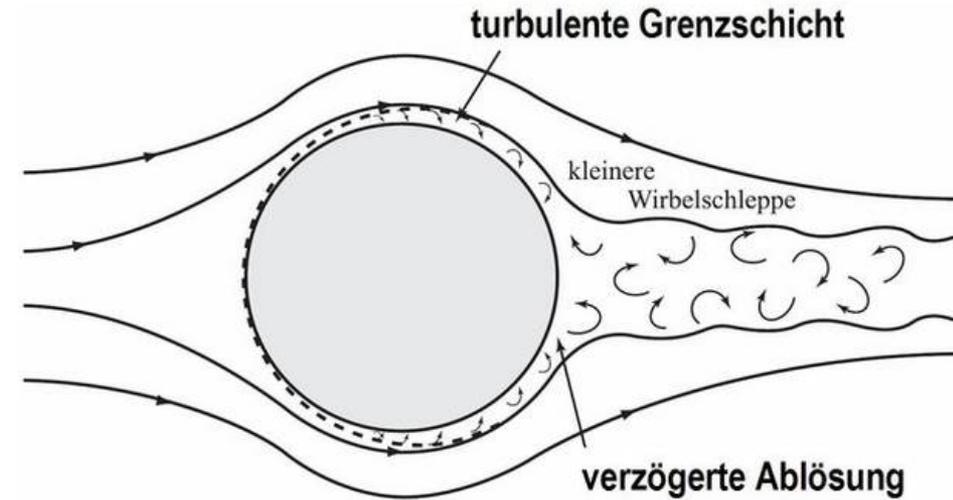
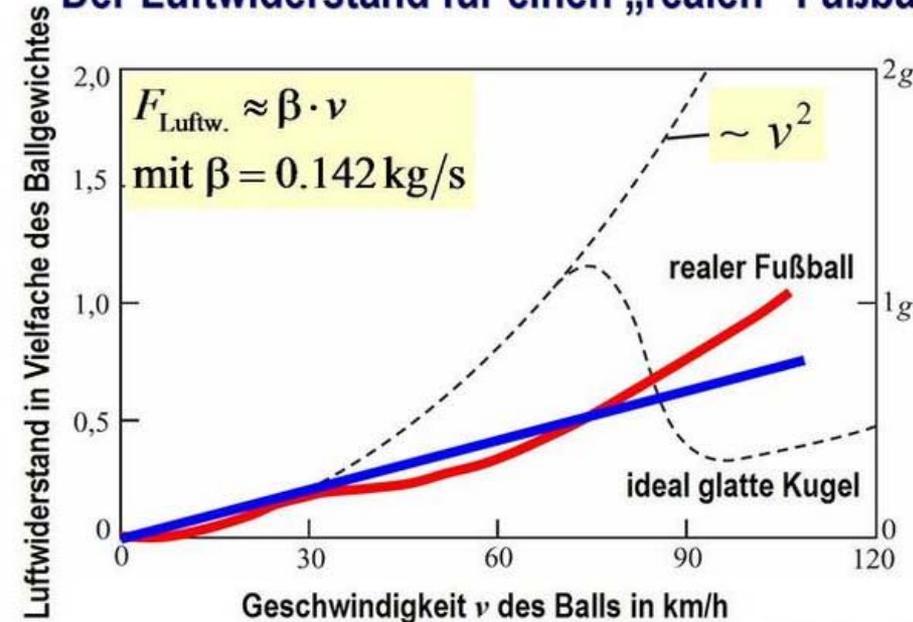


Bei der kritischen Geschwindigkeit wird die Luft in der Grenzschicht selber turbulent, das heißt die Grenzschicht selber beginnt mikroskopisch zu verwirbeln. Dies hat paradoxerweise zum Resultat, dass sich nun die größeren Wirbel viel später von der Balloberfläche ablösen können als vorher, da die mikroskopischen Wirbel die Grenzschicht dominieren und diese den Luftwiderstand bestimmt. Als Ergebnis folgt dann, dass die Wirbelschleppe kleiner wird und der Luftwiderstand insgesamt drastisch abnimmt.

Die Physik des Fussballspiels

Der Luftwiderstand für einen „realen“ Fußball

Was passiert bei der „kritischen Geschwindigkeit“ ?



Aus Wesson, Fußball © 2005 Elsevier GmbH

Aus Wesson, Fußball © 2005 Elsevier GmbH

Jeder moderne Fußball hat deshalb Aufrauungen an der Oberfläche. Dadurch bilden sich schon bei sehr geringen Geschwindigkeiten mikroskopische Wirbel in der Grenzschicht, die verhindern, dass sich die großen Wirbel bilden, die den Luftwiderstand ansonsten bestimmen. Insgesamt ergibt sich ein Netto-Gewinn, denn die verwirbelte Grenzschicht bewirkt eine Verringerung des gesamten Luftwiderstandes. Weiterhin wird auch verhindert, dass es so etwas wie eine „kritische Geschwindigkeit“ gibt, oberhalb der der Luftwiderstand abnimmt. Der Luftwiderstand ist dann eine monoton steigende Funktion der Geschwindigkeit,

Die Physik des Fussballspiels

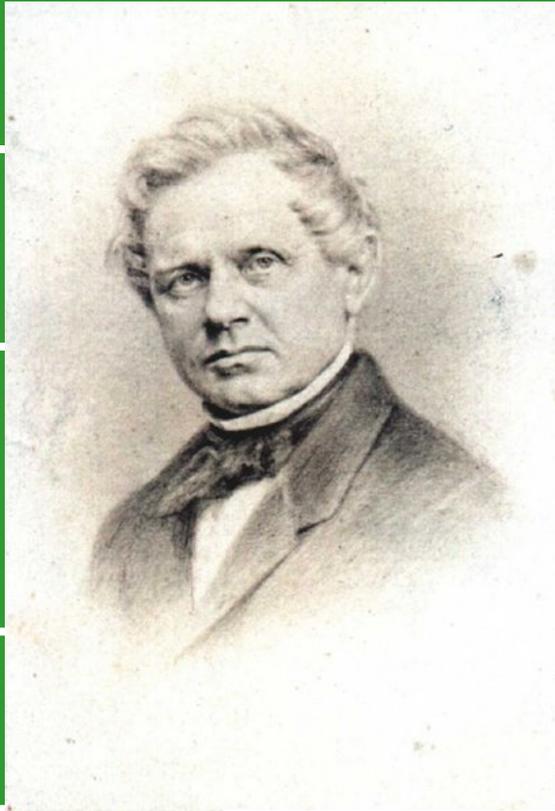


Wembley 1966



Euro 2008

Der Magnus-Effekt



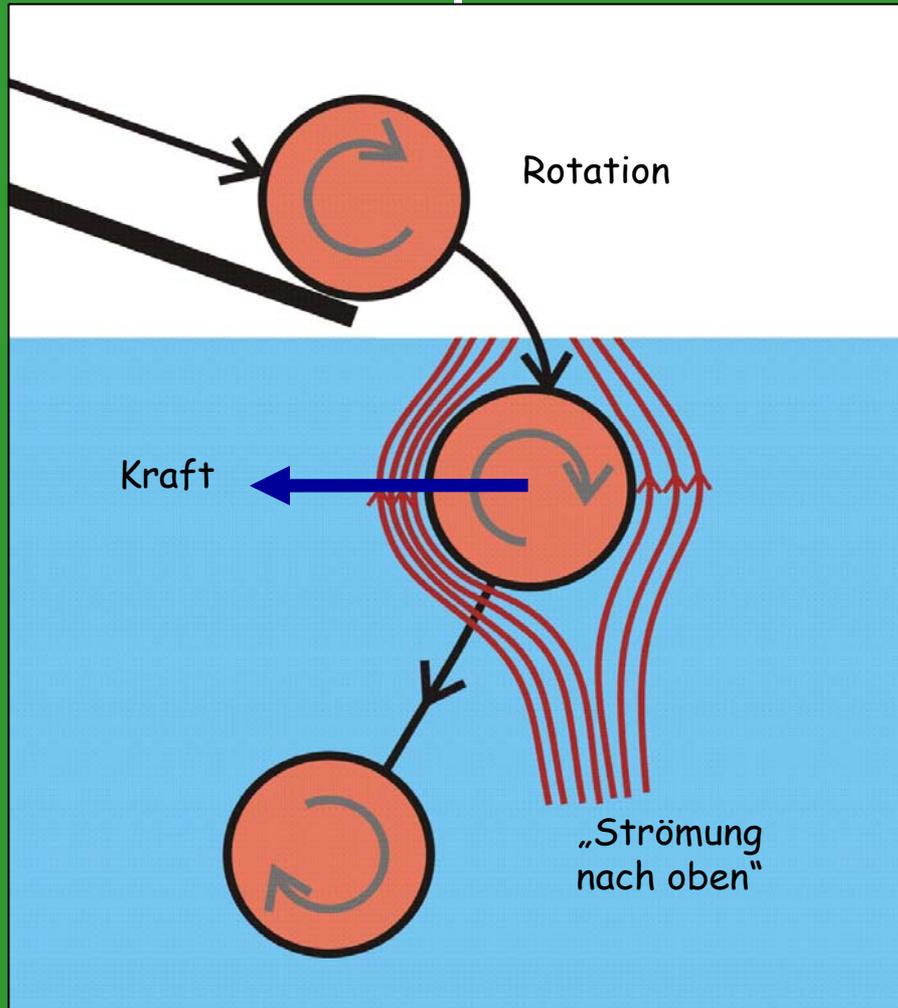
Heinrich Gustav Magnus
1802-1870

Born	2 May 1802 <u>Berlin, Germany</u>
Died	4 April 1870 (aged 67) <u>Berlin, Germany</u>
Residence	<u>Germany</u>
Nationality	<u>German</u>
Fields	<u>Chemist</u> and <u>Physicist</u>
Institutions	<u>Berlin University</u>

Der Magnuseffekt

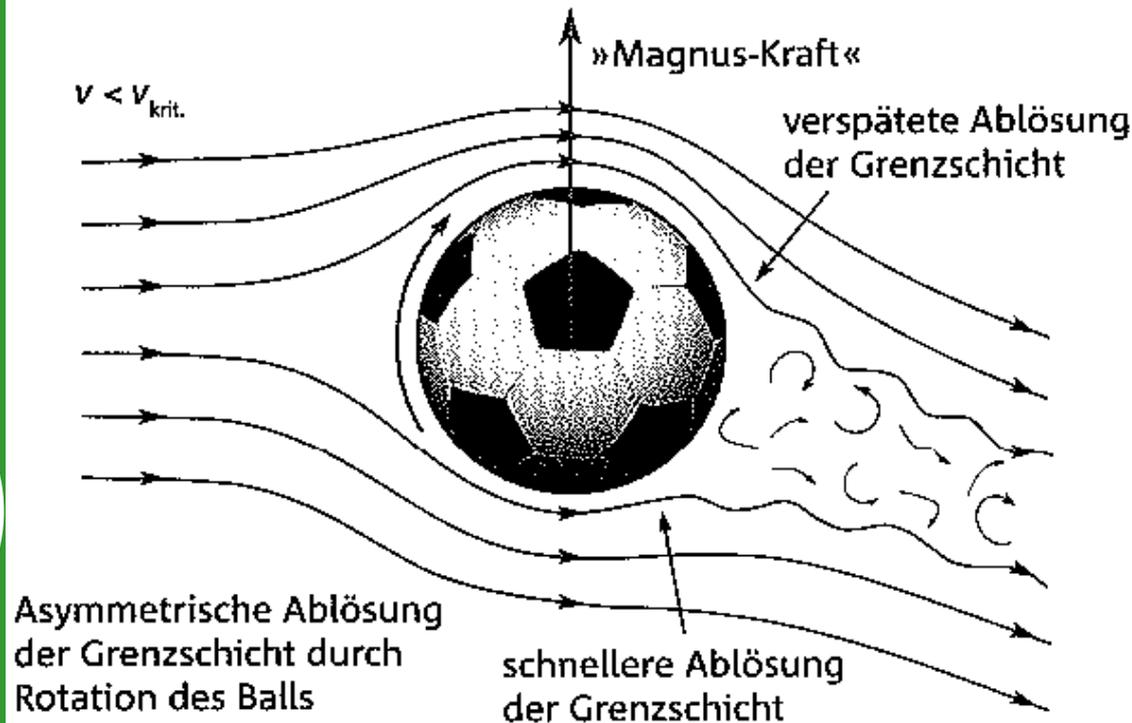


Der Magnuseffekt



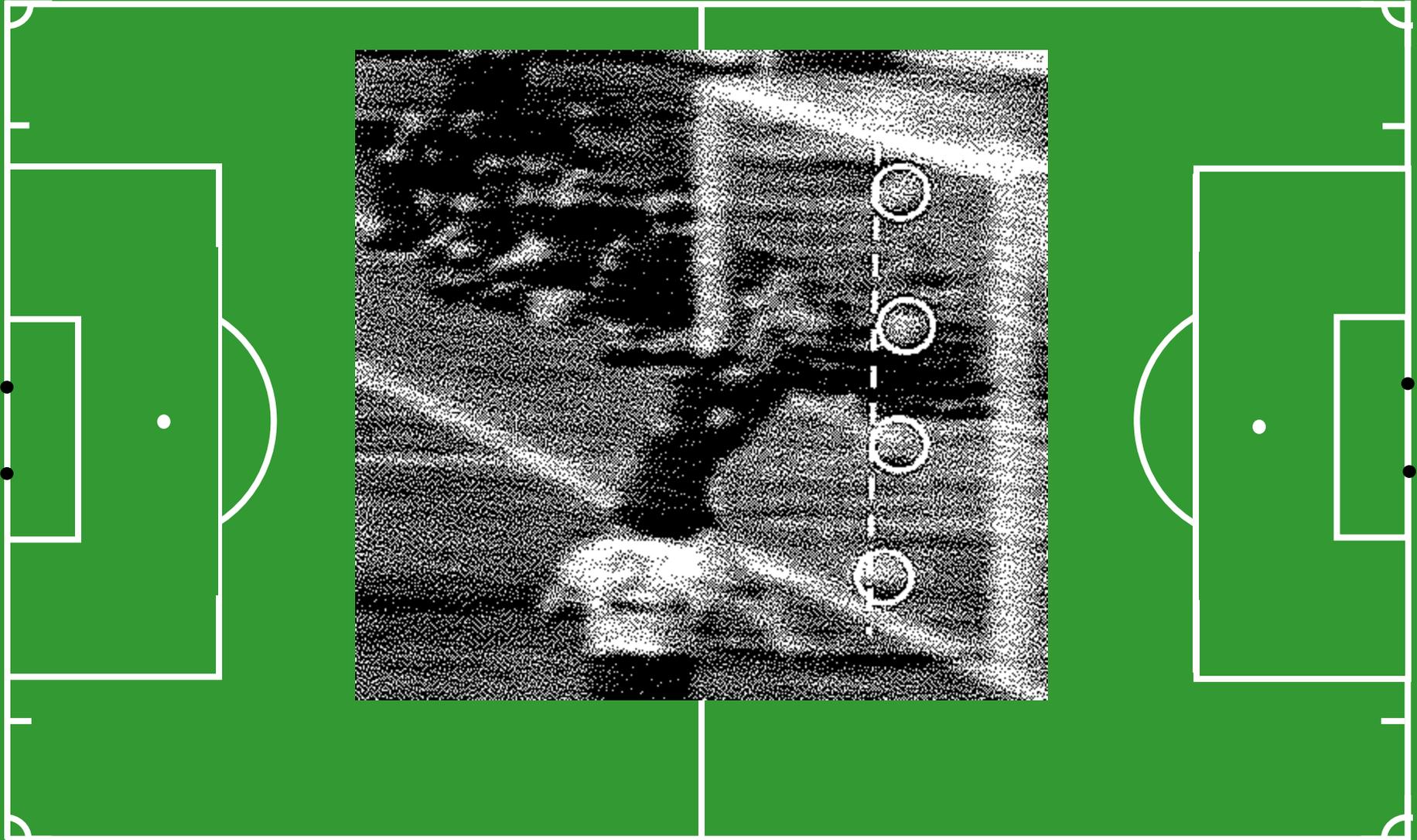
Der Magnuseffekt

Richtige Erklärung des Magnus-Effekts

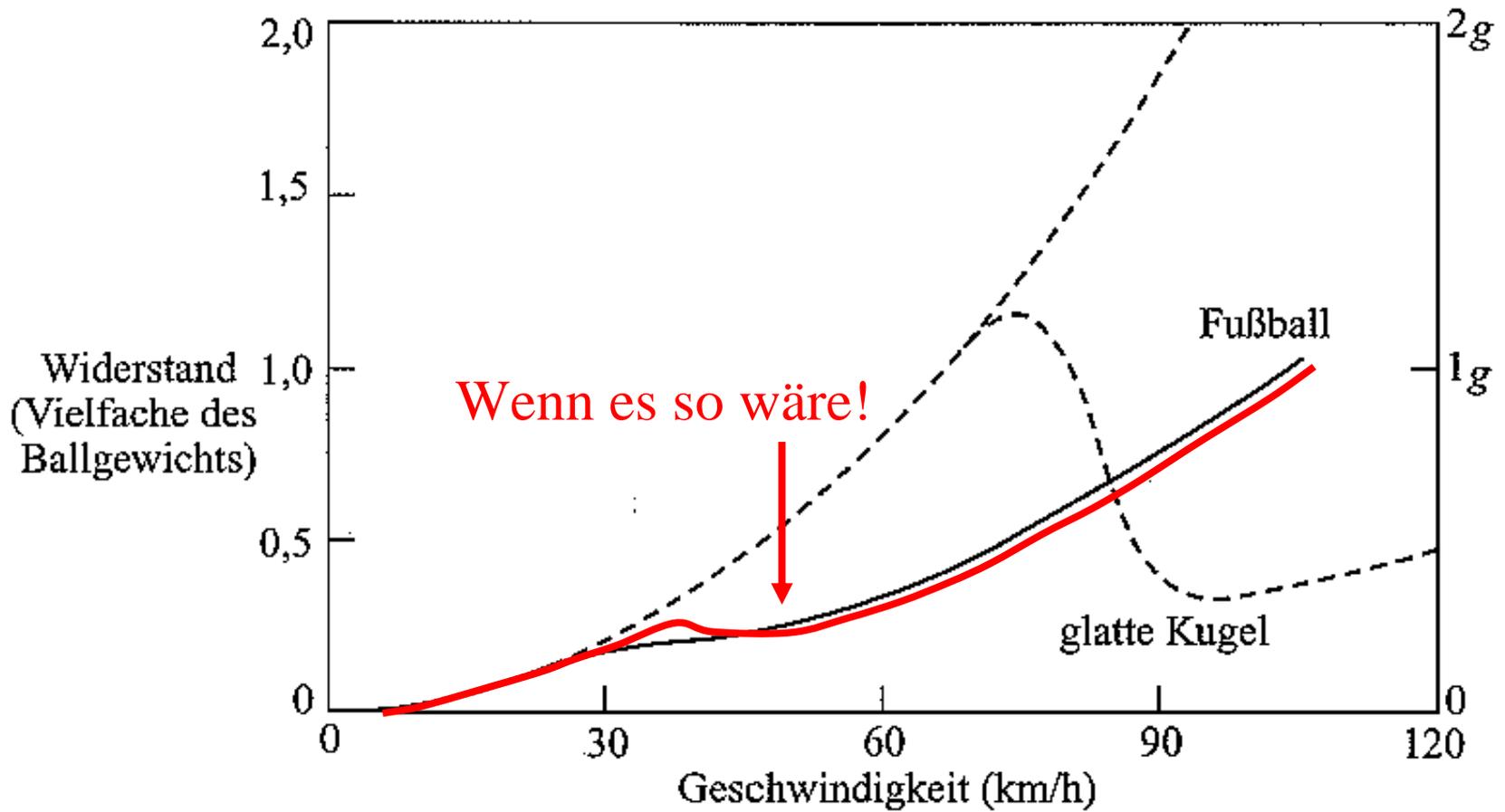


Die vom Ball mitgeführte Luft wird in der Grenzschicht von der entgegenkommenden Luft verwirbelt und löst sich daher schneller ab. Bei der verspäteten Ablösung wird die Luft weiter um den Ball herumgeführt, bei der schnelleren Ablösung weniger weit. Als Konsequenz wird die Luft abgelenkt (hier nach rechts).

Inverser Magnus-Effekt?

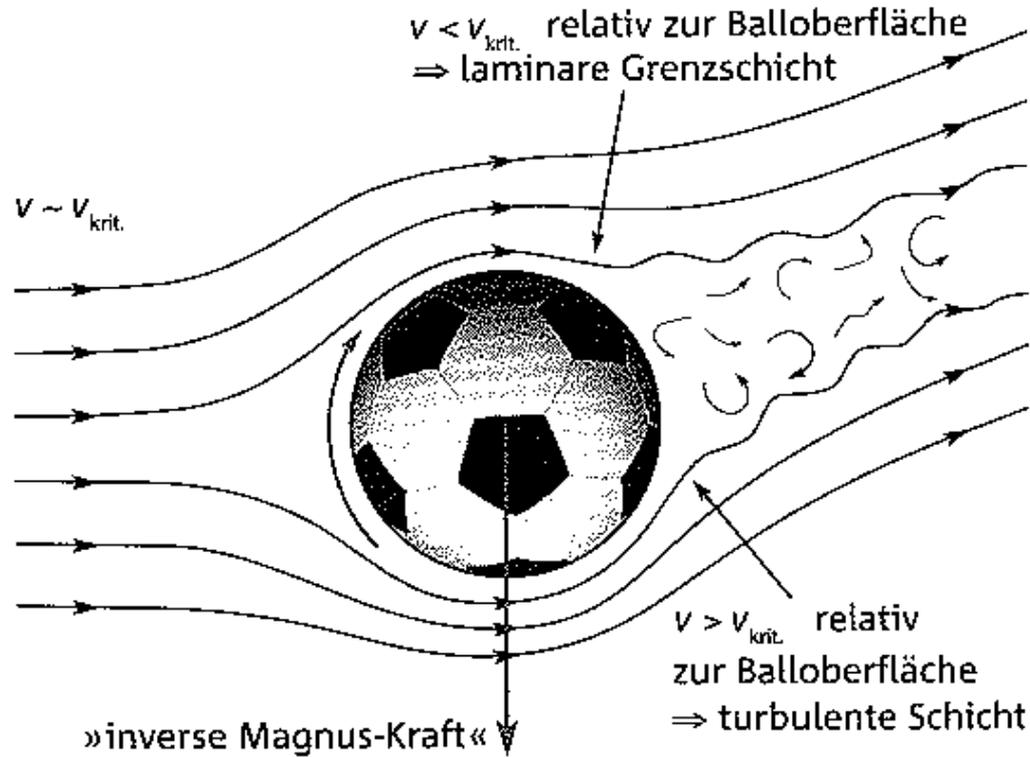


Der inverse Magnuseffekt



Der inverse Magnuseffekt

Wieso kann sich der Magnus-Effekt umkehren?



Für $v < v_{\text{krit}}$ ist der Luftwiderstand grösser, d.h. die Luft löst sich früher ab und bildet eine grosse Wirbelschlepe.

Die Physik des Fussballspiels



http://www.youtube.com/watch?v=Pb2qykj6_ZU

Intuition und Vektoraddition



<http://www.youtube.com/watch?v=EAogr3-OKtg>

Szene nach ca. 1:00 min

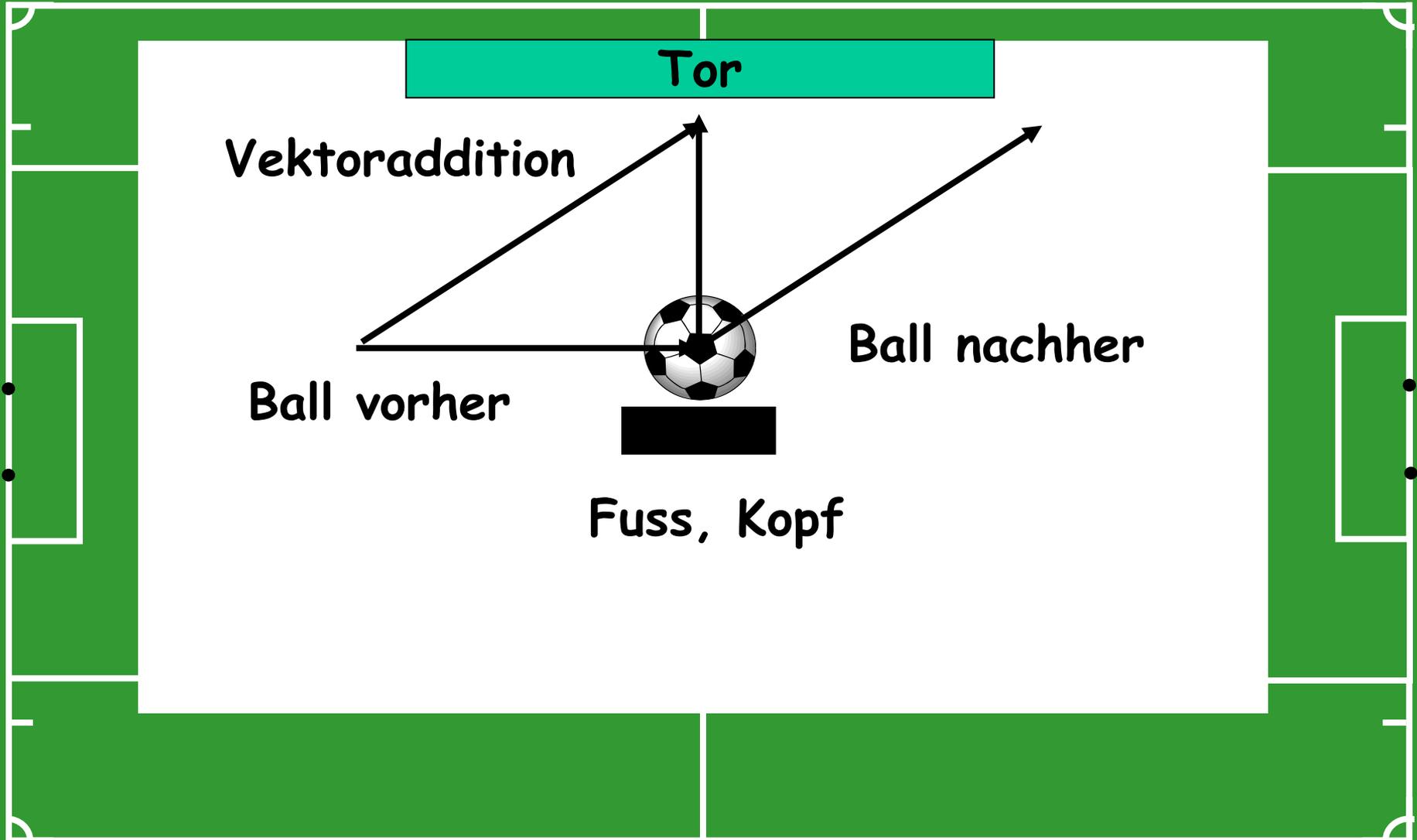
Intuition und Vektoraddition



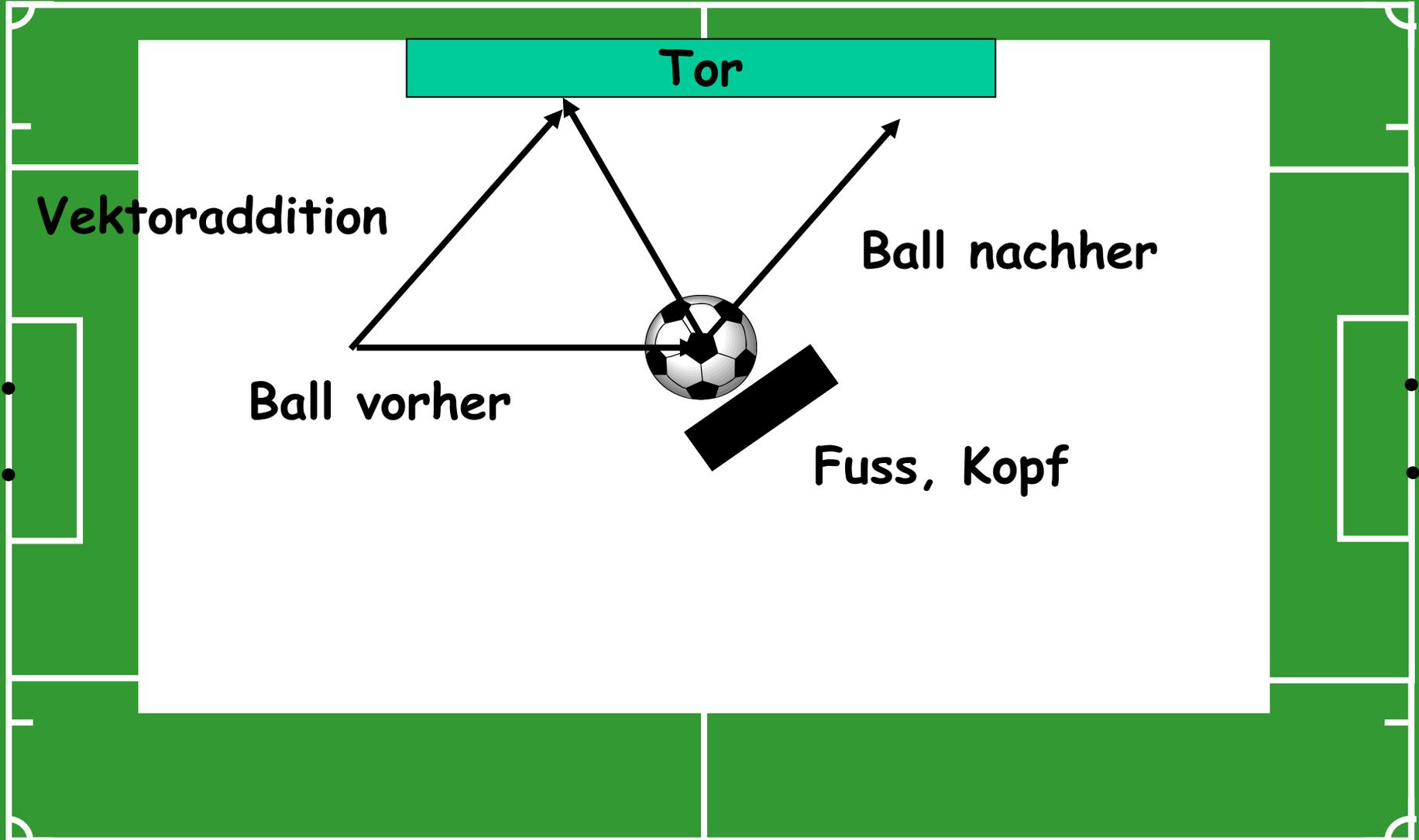
<http://www.youtube.com/watch?v=u1-izrafPU>

Szene nach ca. 1:00 min

Vektoraddition im Fussballspiel



Vektoraddition im Fussballspiel



Intuition und Vektoraddition

World-class football players miss the goal due to a misconception about a law of physics

Moritz M. Daum¹ & Friedrich Wilkening²

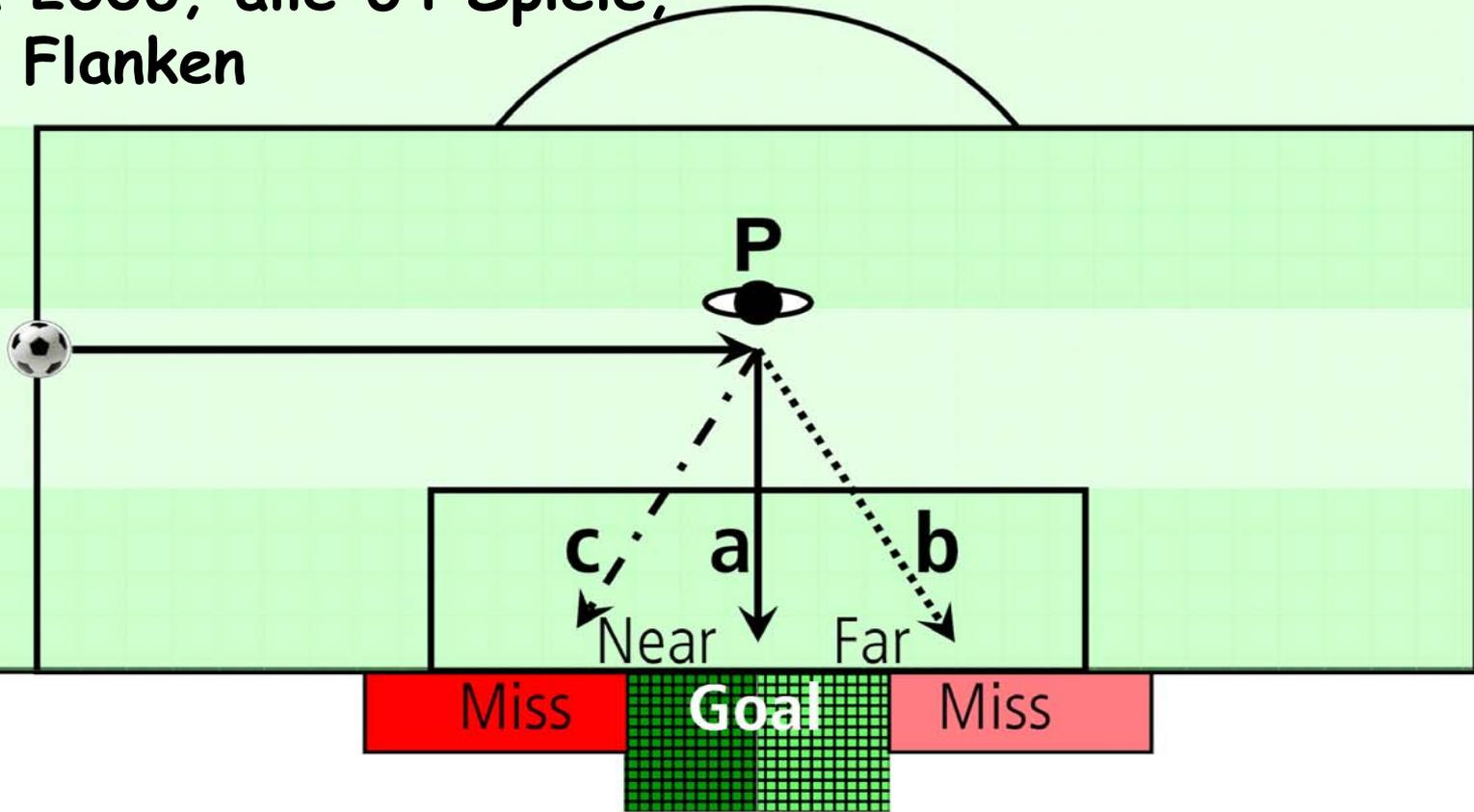
¹Max Planck Institute for Human Cognitive and Brain Sciences, Department of Psychology, Leipzig, Germany

²University of Zürich, Department of Psychology, Zürich, Switzerland

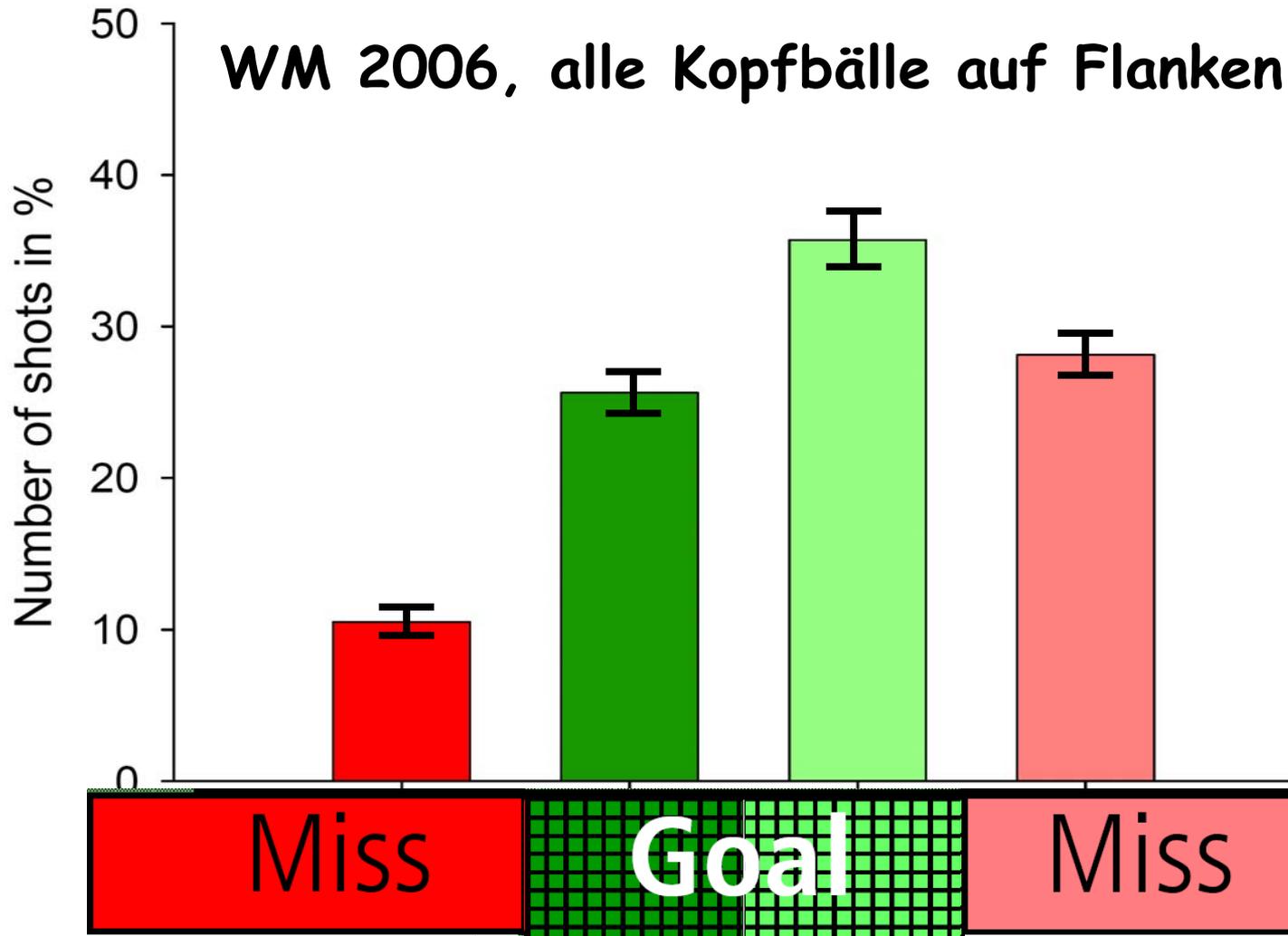
**Aus MYTHS AND FACTS ABOUT FOOTBALL:
THE ECONOMICS AND PSYCHOLOGY OF
THE WORLD'S GREATEST SPORT
Cambridge Scholar Publishing, S. 39 ff (2008).**

Intuition und Vektoraddition

WM 2006, alle 64 Spiele,
378 Flanken



Intuition und Vektoraddition



Intuition und Vektoraddition



Thomas Häßler

Herzlichen Dank

- für Ideen und Mithilfe an:
- Moritz Daum, MPI Leipzig*)
- Roland Blättler, Niklaus Baumann,
- Michael Meier, Fritz Burri, PSI

Einige der Abbildungen stammen von

- John Wesson, Uni Leicester ----->
- Jens Falta, Uni Bremen
- Karsten Heyne, FU Berlin
- Metin Tolan, Uni Dortmund
- Moritz Daum, MPI Leipzig

*) MPI for human cognitive and brain sciences
demnächst Department of Psychology University ZH

