

INTERNATIONAL MASTERCLASSES HANDS ON PARTICLE PHYSICS

Clemens Lange (DESY)

Humboldt-Universität zu Berlin
6./7. März 2012



hands on particle physics

<http://www.atlas.ch/angels/antimatter.html>

Wieso macht man sowas?!

- Was ist Teilchenphysik?
- Wie funktioniert Teilchenphysik?
- Was erwarten wir von der Zukunft?



Was ist da drin?

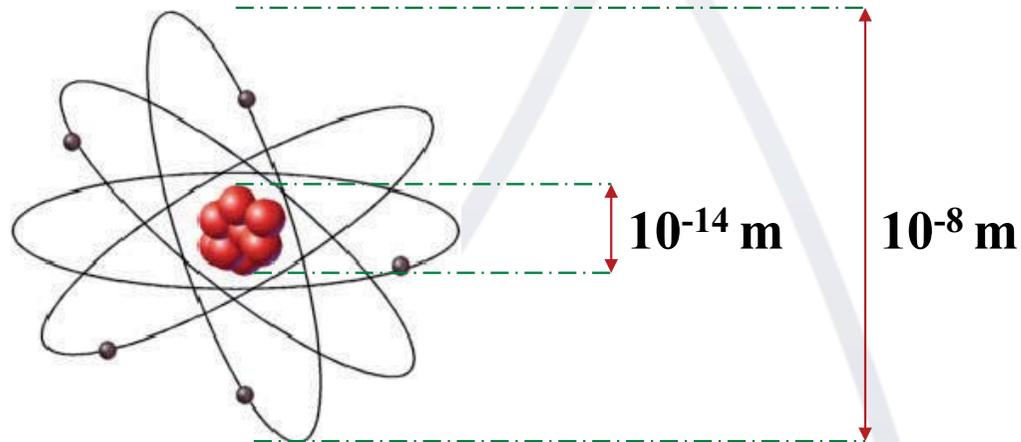


Wer bin ich?

- > Diplomstudium Physik (Humboldt-Universität zu Berlin, 2003-2009)
- > Sommerstudent am DESY (2007)
- > Diplomarbeit am DESY in Zeuthen
- > seit Anfang 2009: Promotion
- > Forschung:
 - Untersuchung von Top-Quarks mit dem ATLAS-Experiment
 - Betrieb des ATLAS-Pixeldetektors



Rutherfords Atommodell



> Kern : Atom = 1: 10000

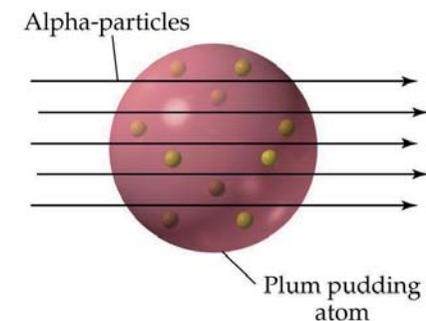
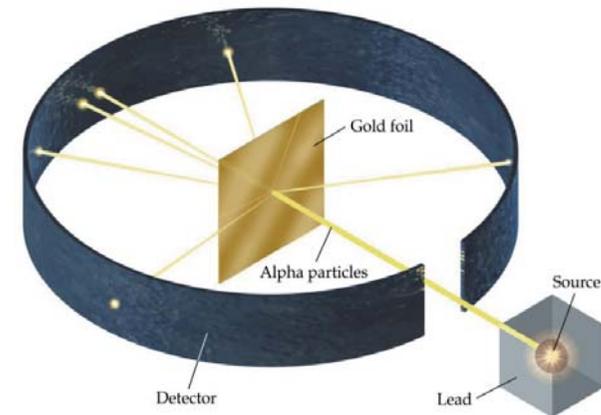
- das Atom ist (fast) leer!

> **Atom nicht unteilbar**

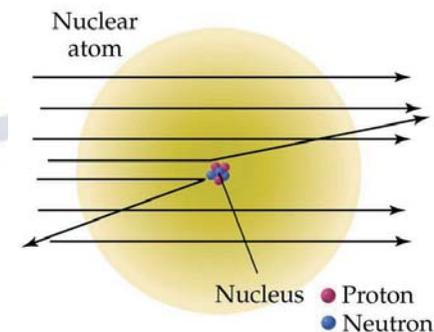
- besteht aus **Elektronen** und **Kern**

> Sind diese wiederum fundamental?

Streuexperimente

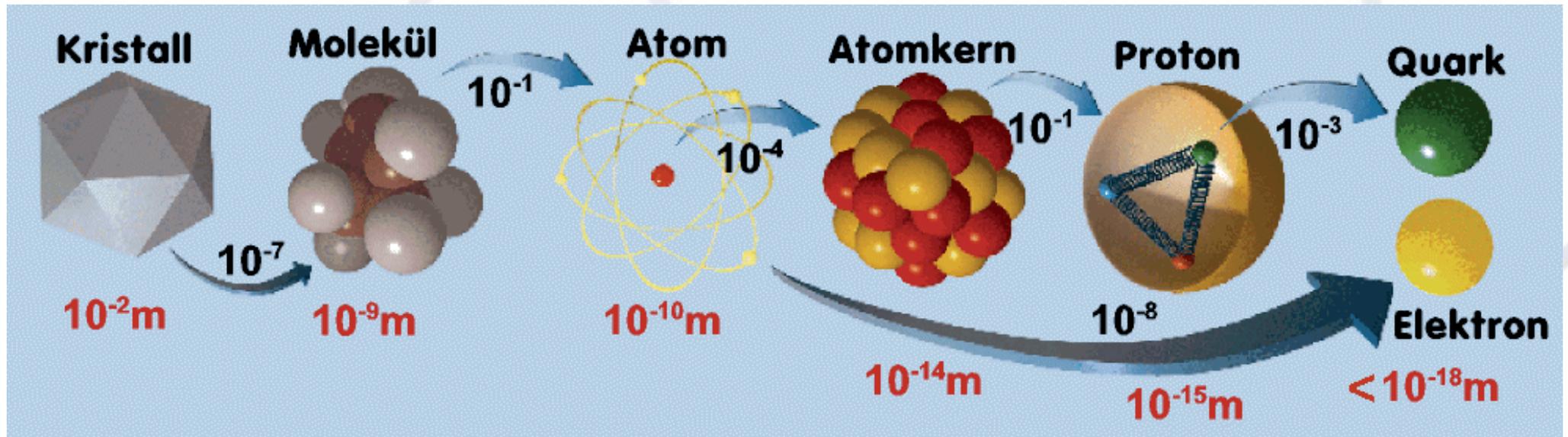


(a) Rutherford's Expected Result



(b) Rutherford's Actual Result

Stecknadelkopf:
 $1\text{mm} = 10^{-3}\text{ m} = 0,001\text{ m}$



Elektron, Quark:
 $< 10^{-18}\text{ m} = 0,0000000000000000001\text{ m}$

> betrachten sehr kleine Teilchen

> Länge:

1 fm = 1 Femtometer („Fermi“) = 10^{-15} m

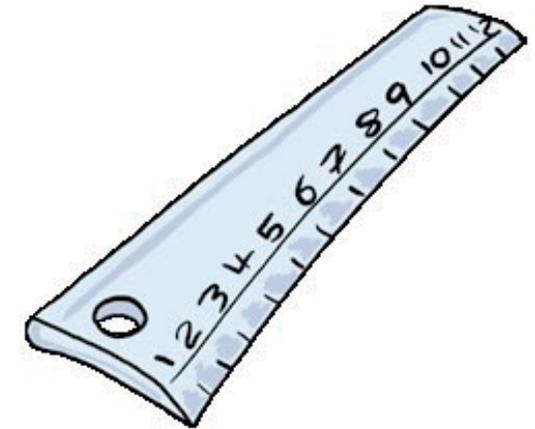
> Energie:

1 eV = 1 Elektronenvolt = $1,602 \cdot 10^{-19}$ J

- kinetische Energie eines einzelnen Elektrons, das im Vakuum die Spannung von 1 Volt durchläuft und dadurch beschleunigt wird
- 1 GeV = 10^9 eV: könnte Taschenlampe (1,6 Watt) für ganze 0,000.000.0001 Sekunden zum Leuchten bringen

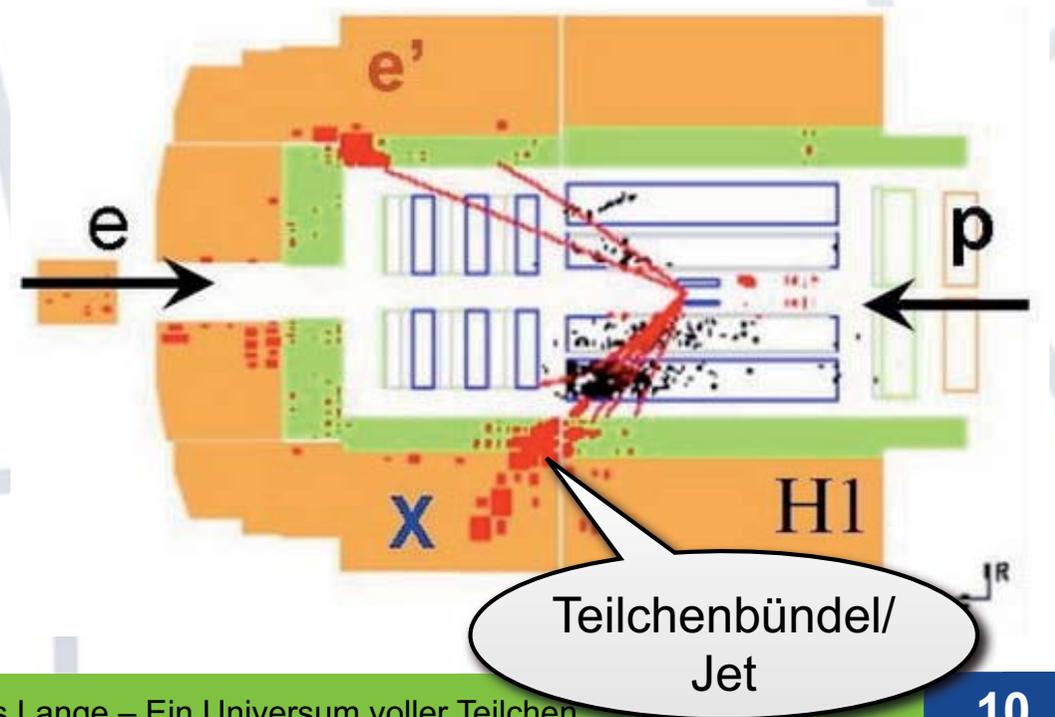
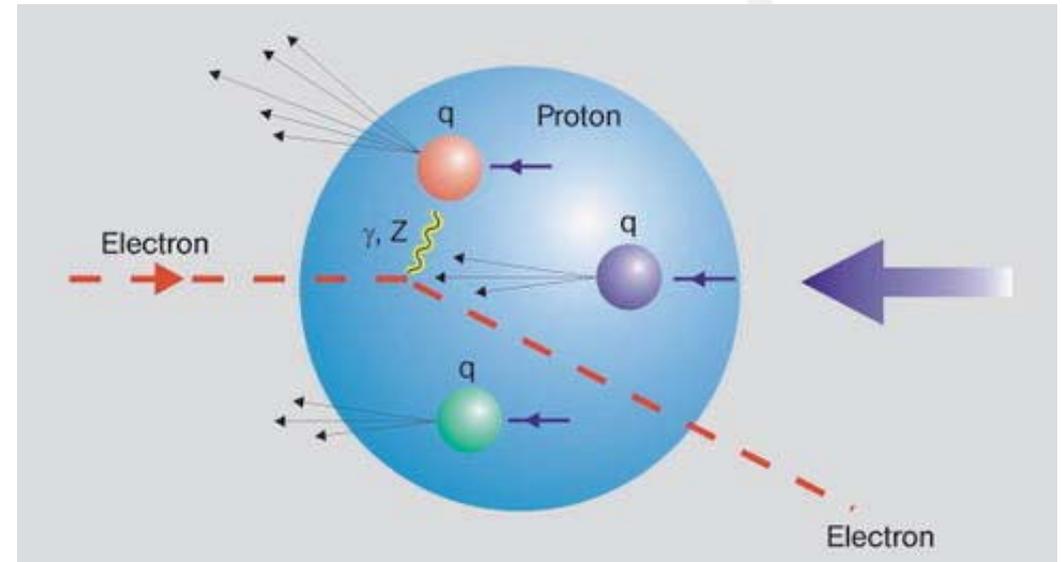
> Impuls: klassisch: $p = m \cdot v$ - aber alle Teilchen, die wir betrachten, haben fast Lichtgeschwindigkeit → brauchen Relativitätstheorie

$$E = \sqrt{(\vec{p} \cdot c)^2 + (m_0 \cdot c^2)^2} \Leftrightarrow p = \sqrt{\left(\frac{E}{c}\right)^2 - (m_0 \cdot c)^2}$$

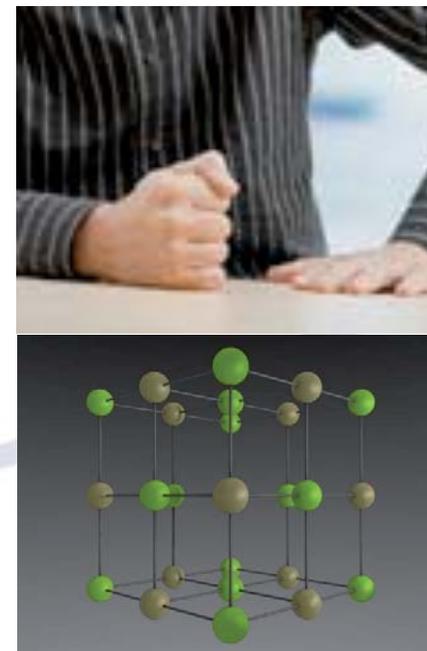
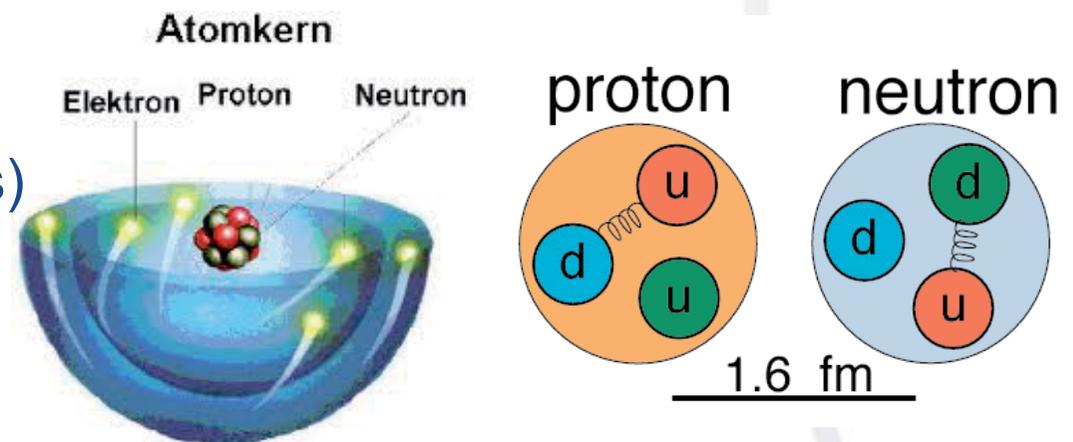


auch hier gilt
Impulserhaltung

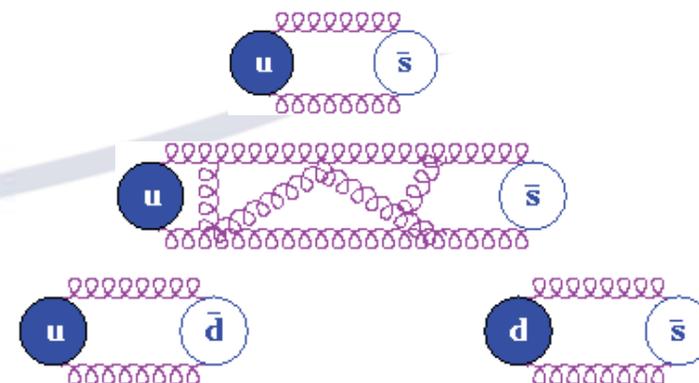
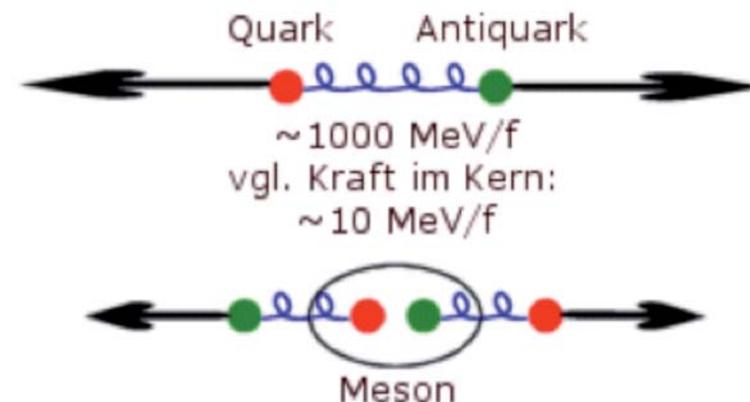
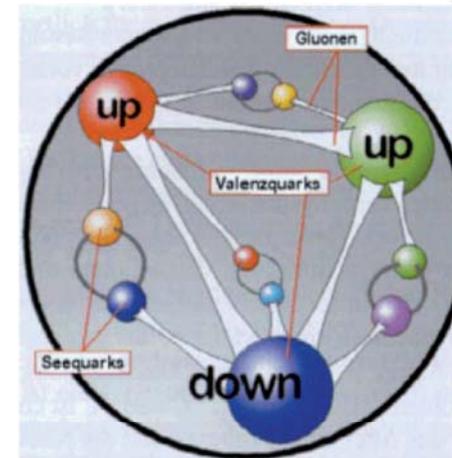
- > mit Teilchenstrahlen
- > mit steigender Energie/Impuls steigt
 - die Fähigkeit, kleine Strukturen zu erkennen:
 $\Delta x \Delta p = \hbar$ (Heisenberg)
 - die Fähigkeit, neue schwere Teilchen zu erzeugen
 $E = mc^2$ (Einstein)
- > ähnlich wie bei Rutherford:
 - schieße Elektronen auf Protonen
 - HERA-Beschleuniger am DESY:
Schwerpunktenergie von 320 GeV
 - entspricht einer **Ortsauflösung** von 10^{-18} m



- > Welt und wir bestehen aus Atomen
 - Protonen und Neutronen (Quarks)
 - Elektronen
- > die kleinsten Teilchen sind winzig oder haben **keine Ausdehnung**
- > d.h., der Raum ist leer
- > Warum wirkt Materie - z.B. ein Tisch - dann massiv?
- > Teilchen üben **Kräfte** untereinander aus!
- > Frage: Was sind die Kräfte, die die Welt **im Innersten** zusammenhalten?



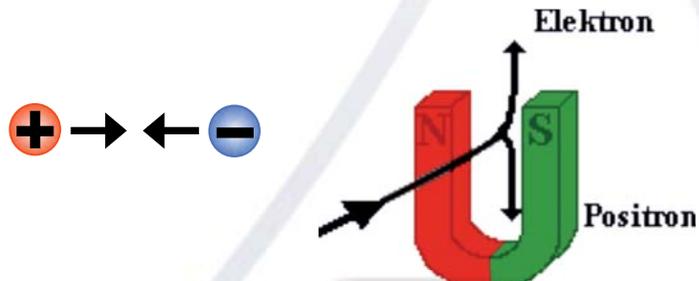
- > Quarks erscheinen nur im Verband (z.B. Proton uud)
- > werden von der starken Kraft zusammengehalten
- > Eigenschaften:
 - die notwendige **Energie** zum separieren von Quarks **wächst mit dem Abstand** (Analogie: Federkraft)
 - Gluonen (Kraftteilchen) tragen Farbladung und koppeln aneinander
 - Quarks sind eingesperrt, es gibt nur farbneutrale Objekte



> Elektromagnetische Kraft

Photon

- wirkt zwischen allen geladenen Teilchen
- verantwortlich für den Zusammenhalt von Atomen



> Schwache Kraft

W-/Z-Boson

- verantwortlich für Umwandlungsprozesse von Elementarteilchen (Zerfälle)



> Starke Kraft

Gluon

- wirkt zwischen den Quarks
- verantwortlich für den Aufbau von Elementarteilchen und dem Zusammenhalt der Kerne

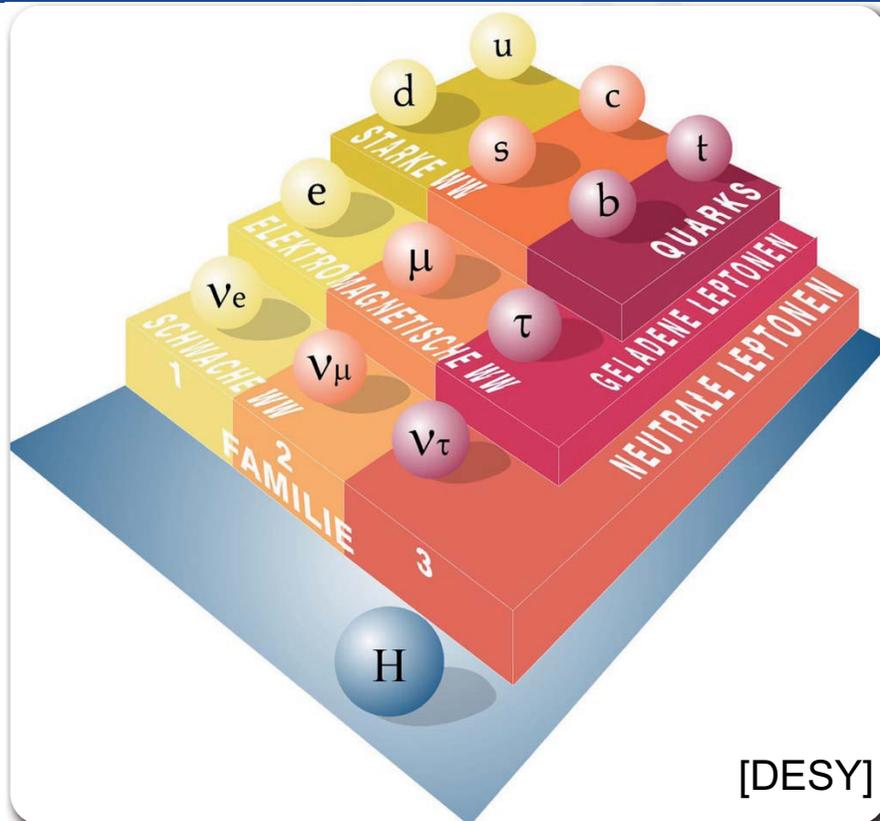


> Gravitationskraft

Graviton

- 10^{36} mal schwächer als die starke Kraft
- spielt in der Teilchenphysik keine Rolle

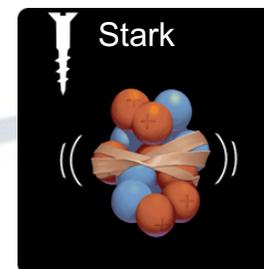
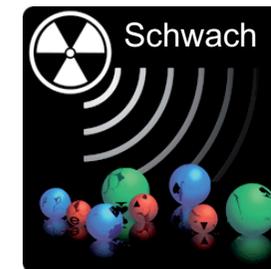
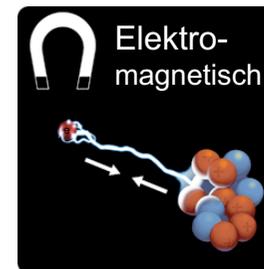




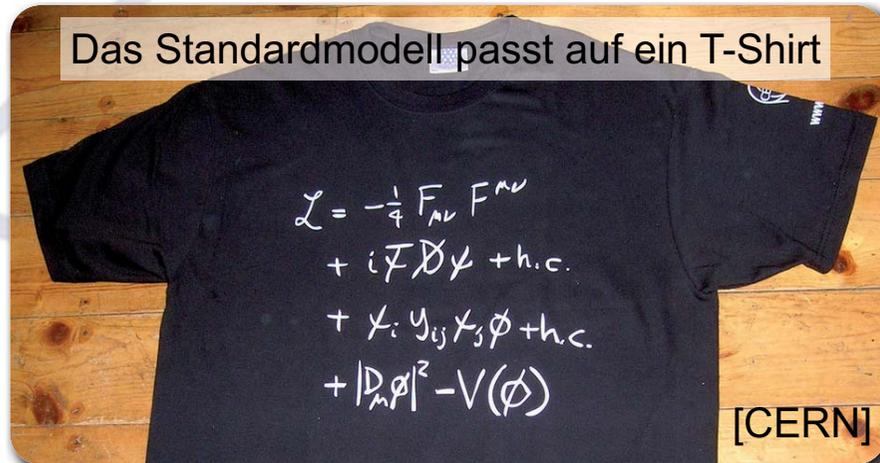
> Teilchen im „Standardmodell der Teilchenphysik“

- 12 Elementarteilchen, jedes mit Antiteilchen
- 6 Quarks und 6 Leptonen
- Anordnung in 3 Familien

> Kräfte im Standardmodell



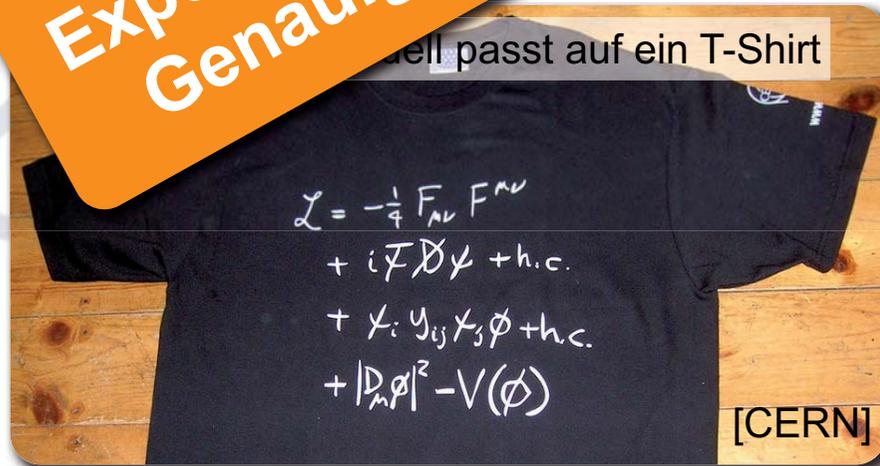
[<http://www.particlephysics.ac.uk/>]





Experimentell mit großer Genauigkeit bestätigt

[DESY]

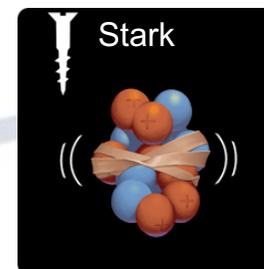
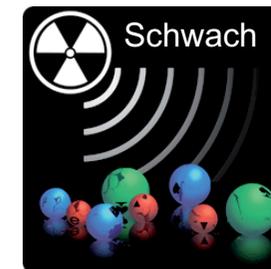
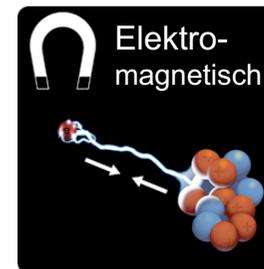


[CERN]

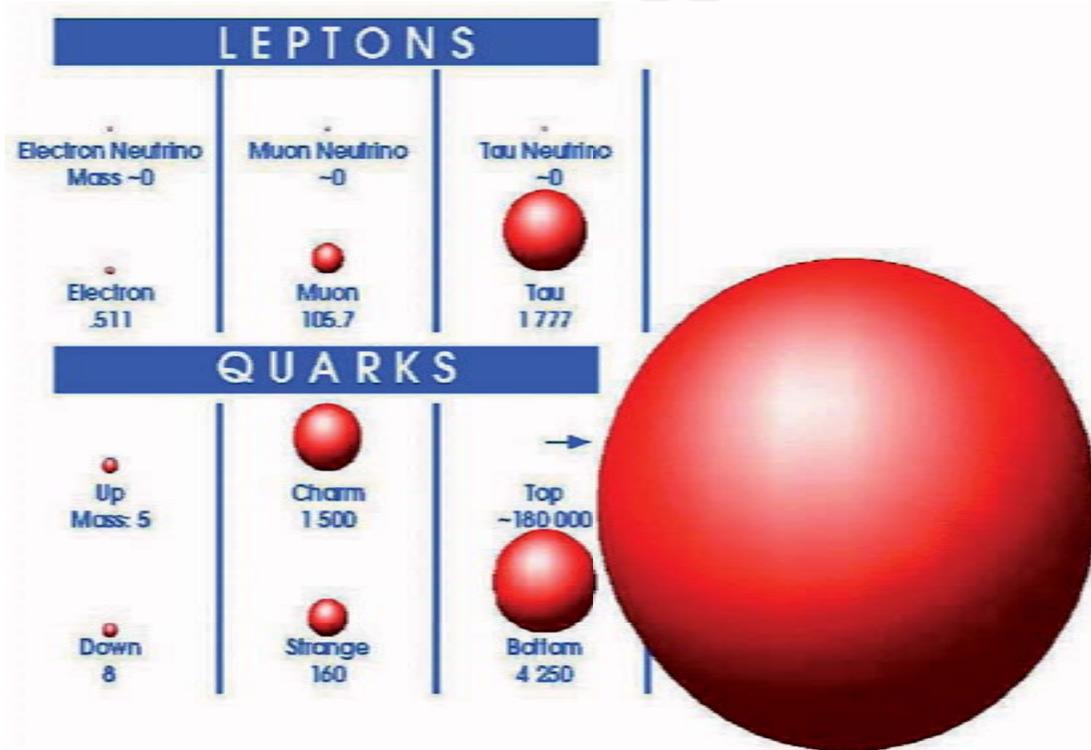
> Teilchen im „Standardmodell der Teilchenphysik“

- 12 Elementarteilchen, jedes mit Antiteilchen
- 6 Quarks und 6 Leptonen
- Anordnung in 3 Familien

> Kräfte im Standardmodell



[<http://www.particlephysics.ac.uk/>]



THE STANDARD MODEL

	Fermions			Bosons	
Quarks	<i>u</i> up	<i>c</i> charm	<i>t</i> top	γ photon	Force carriers
	<i>d</i> down	<i>s</i> strange	<i>b</i> bottom	Z Z boson	
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
	<i>e</i> electron	μ muon	τ tau	<i>g</i> gluon	
				Higgs* Higgs boson	

*Yet to be confirmed

Source: AAAS

> Teilchen sind elementar, haben aber riesige Massenunterschiede

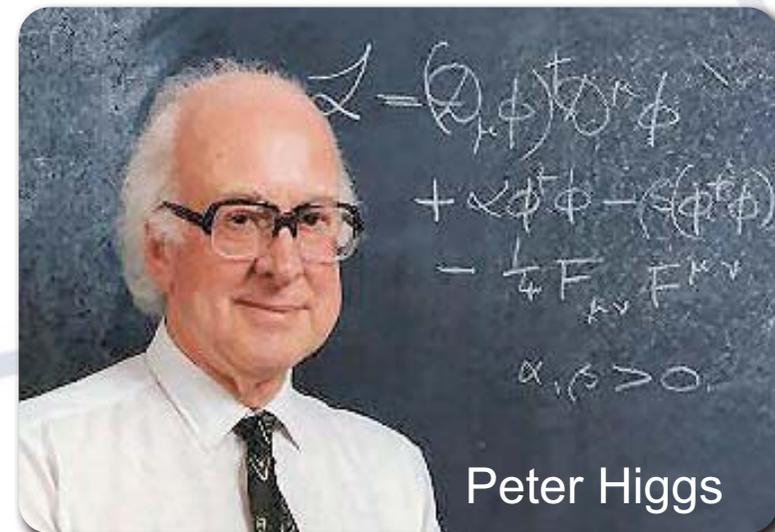
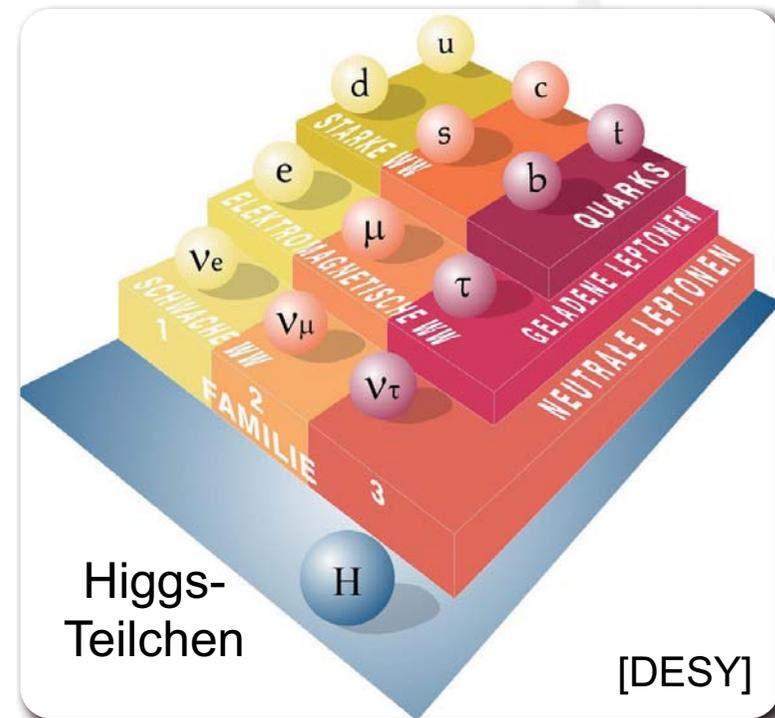
Materie auf der Erde

> Die Massenfrage:

- Warum unterscheiden sich die Massen der Elementarteilchen in den drei Familien?
- Warum haben die Elementarteilchen überhaupt Masse?

> Lösung: das „Higgs-Teilchen“

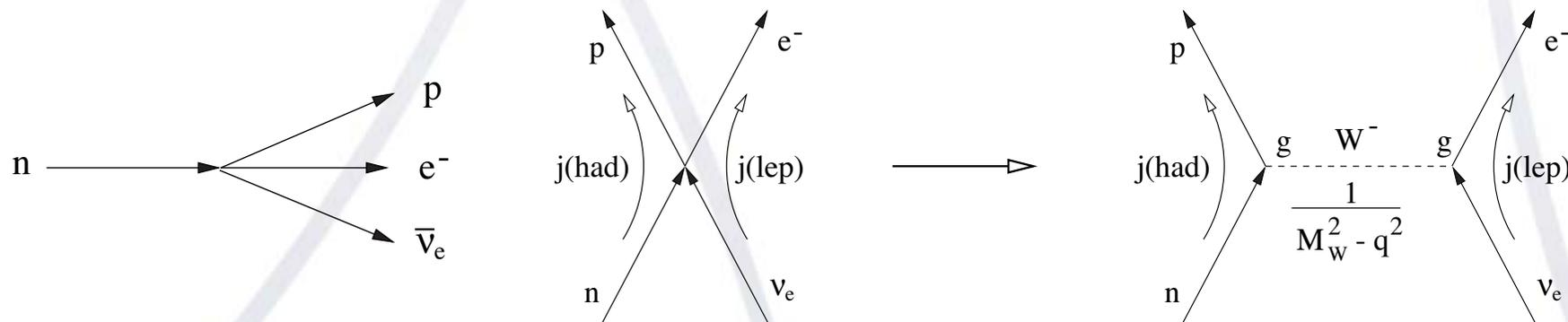
- Postuliert von britischem Physiker **Peter Higgs** (und anderen) im Jahr 1964
- Funktion: Higgs-Teilchen „gibt“ allen **Elementarteilchen Masse** (die Masse zusammengesetzter Teilchen ist komplizierter!)
- Fieberhafte Suche, aber noch **nicht experimentell nachgewiesen**



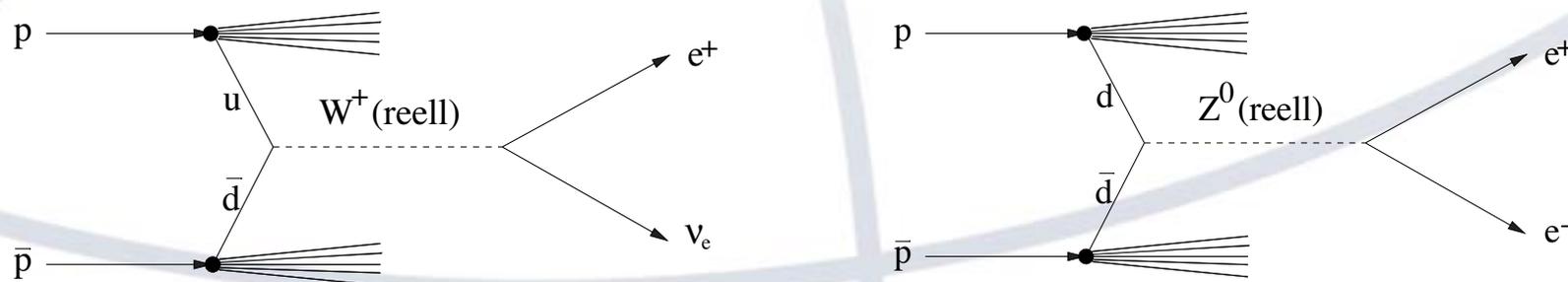
Schwache Wechselwirkung

- Das Z-Boson

- > Zuerst beobachtet im Kernzerfall, z.B. $n \rightarrow pe^- \bar{\nu}_e$
- theoretisch problematisch → Einführung eines Austauschteilchens bzw. geladener Stroms

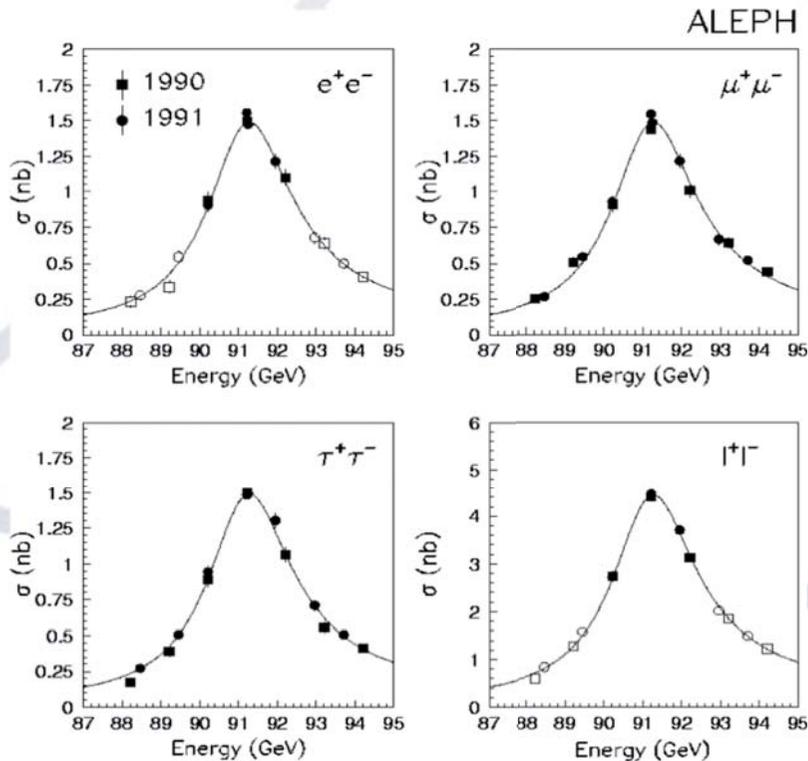
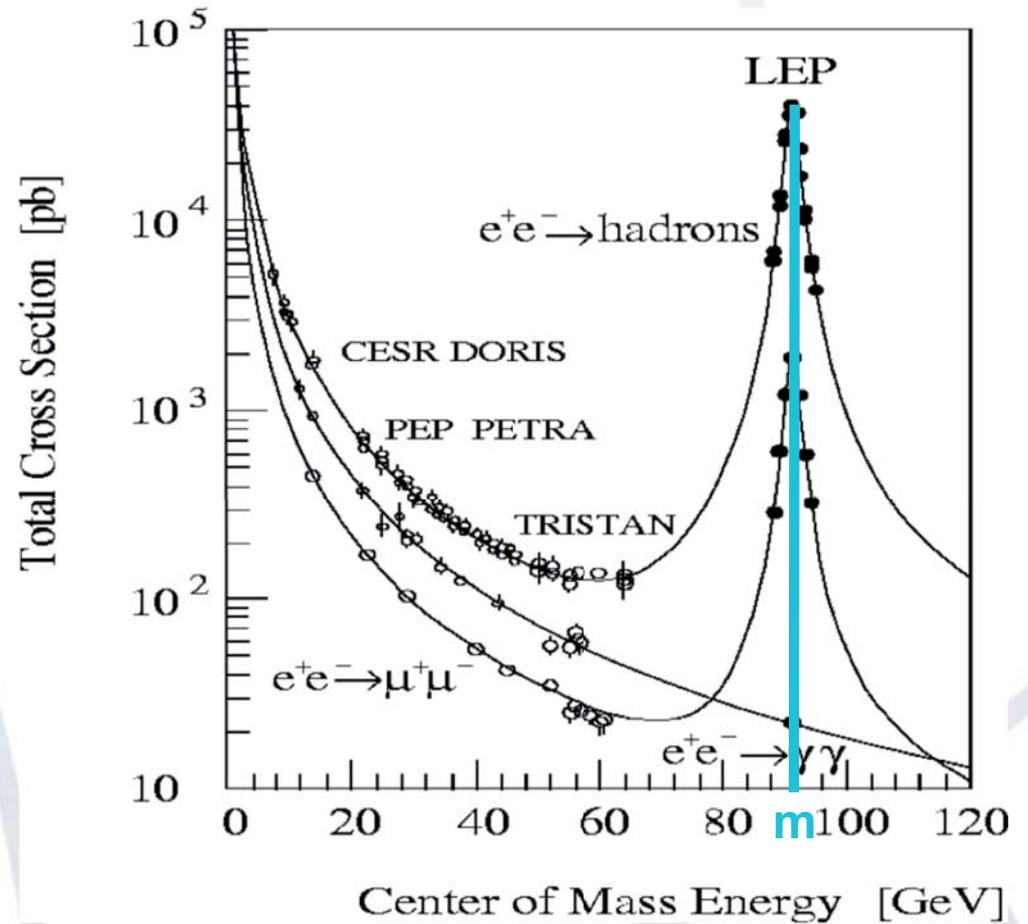


- experimenteller Nachweis (1983) - aber auch gleichzeitig neutrales Austauschteilchen entdeckt (bereits von der Theorie vorhergesagt)



- > LEP-Beschleuniger hat Bereich „abgetastet“
 - Resonanz bei Masse des Z-Bosons
- > LHC: Impulse der Leptonen addieren:

$$p_Z = p_{l^-} + p_{l^+} \Rightarrow m_Z$$



- > „Zerfallskanäle“ wichtig
- > Vorhersage Theorie: Zerfallswahrscheinlichkeit gleich für alle drei Leptonen

> Was ist eine Zerfallsbreite?

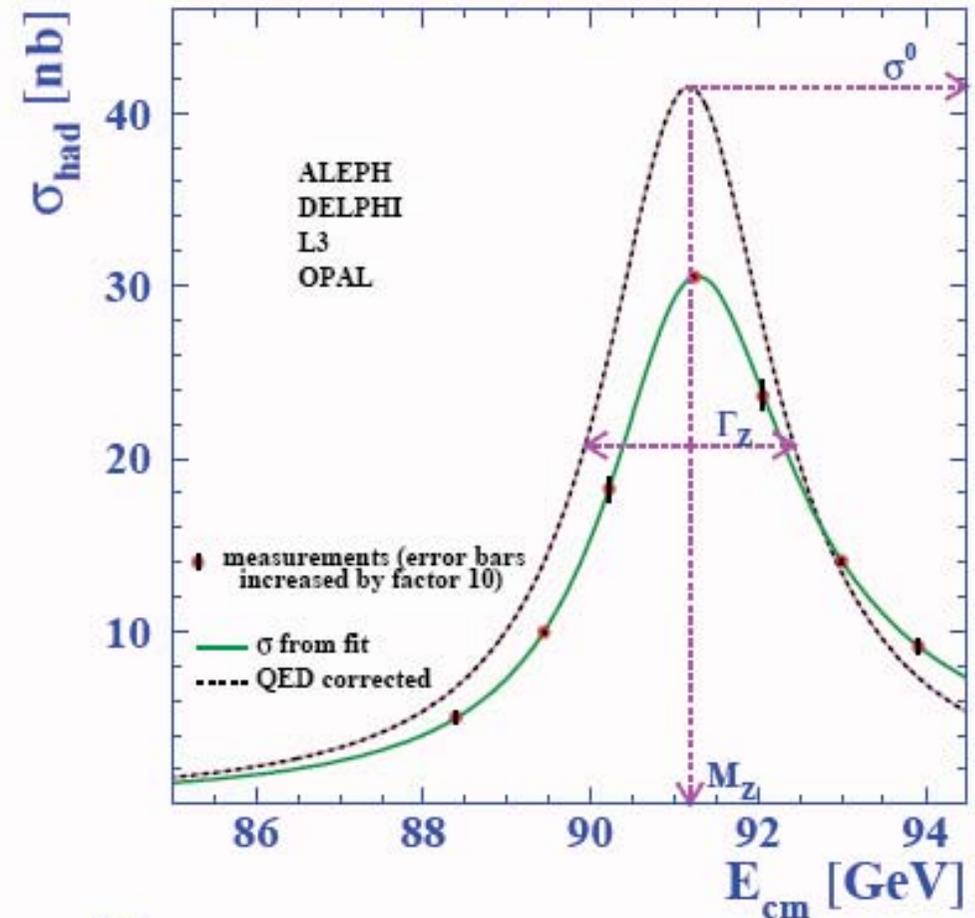
- Heisenberg'sche Unschärferelation:

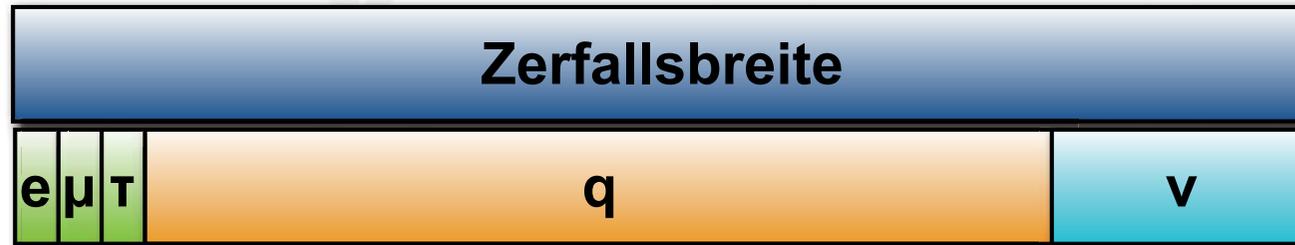
$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

- Masse und Energie sind äquivalent
- jedes instabile Teilchen hat eine Energieunschärfe, die sich als Massenunschärfe bemerkbar macht

> Z-Boson:

- Zerfallsbreite $\Gamma_Z = 2,5 \text{ GeV}$
- Lebensdauer $1/\Gamma_Z = 10^{-25} \text{ s}$





> Messungen:

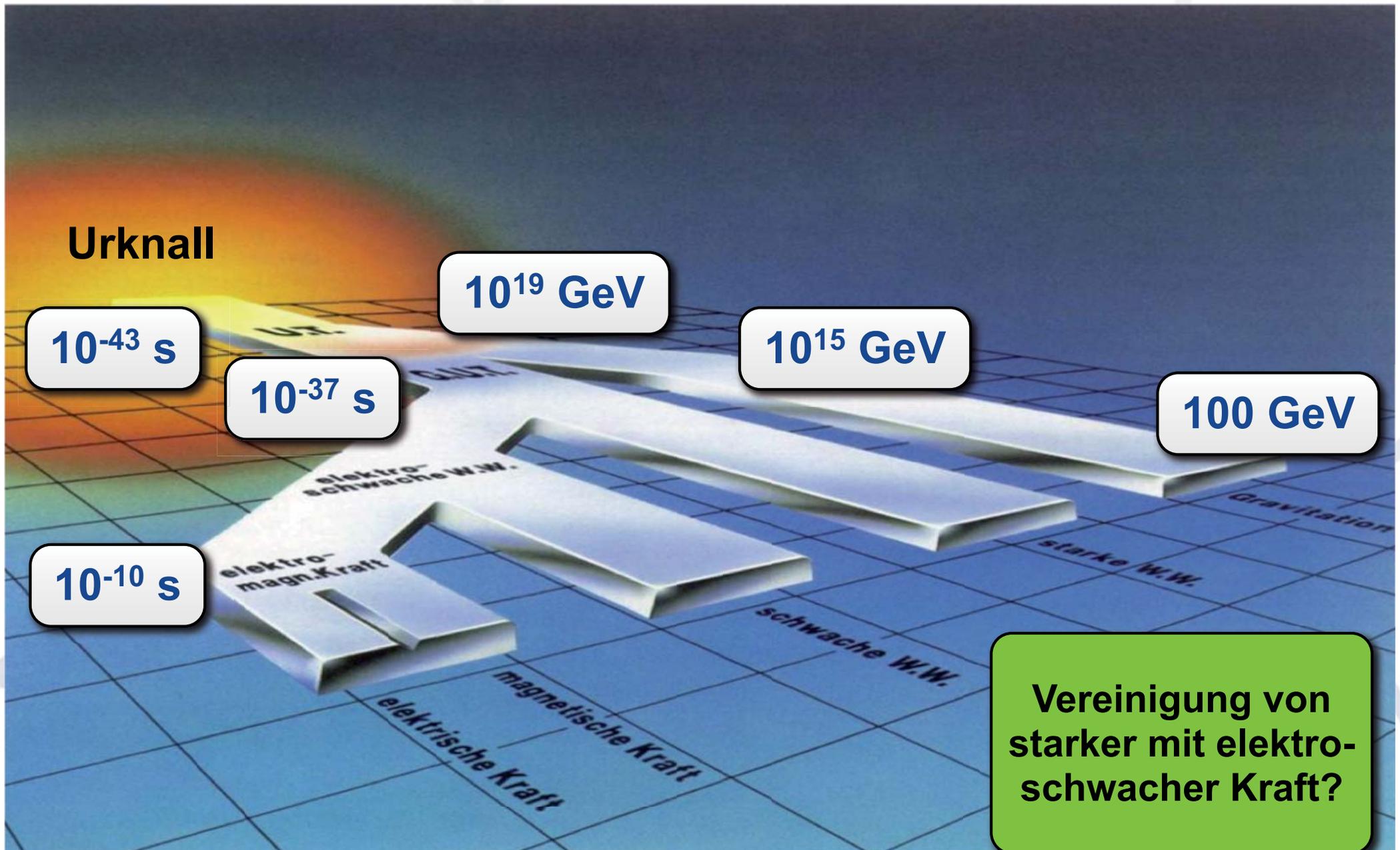
- Auszählen der Zerfallsarten:
 - Wieviele Ereignisse in jedem Zerfallskanal?
 - Stimmen die vorhergesagten Verhältnisse?
- Vergleich mit der Zerfallsbreite:
 - Wieviele Sorten Neutrinos gibt es?
 - Gibt es noch andere (vorher nicht entdeckte) Teilchen, die leichter als die halbe Z-Masse sind?

> Verifikation der Vorhersagen der Theorie:

- Zerfall in Leptonen gleich wahrscheinlich („Leptonuniversalität“ = Myonen und Taus verhalten sich wie Elektronen)
- Zerfall in Quarks viel wahrscheinlicher als Zerfall in geladene Leptonen
- Summe aller Zerfälle ergibt Zerfallsbreite, können Anzahl unsichtbarer Neutrinos bestimmen

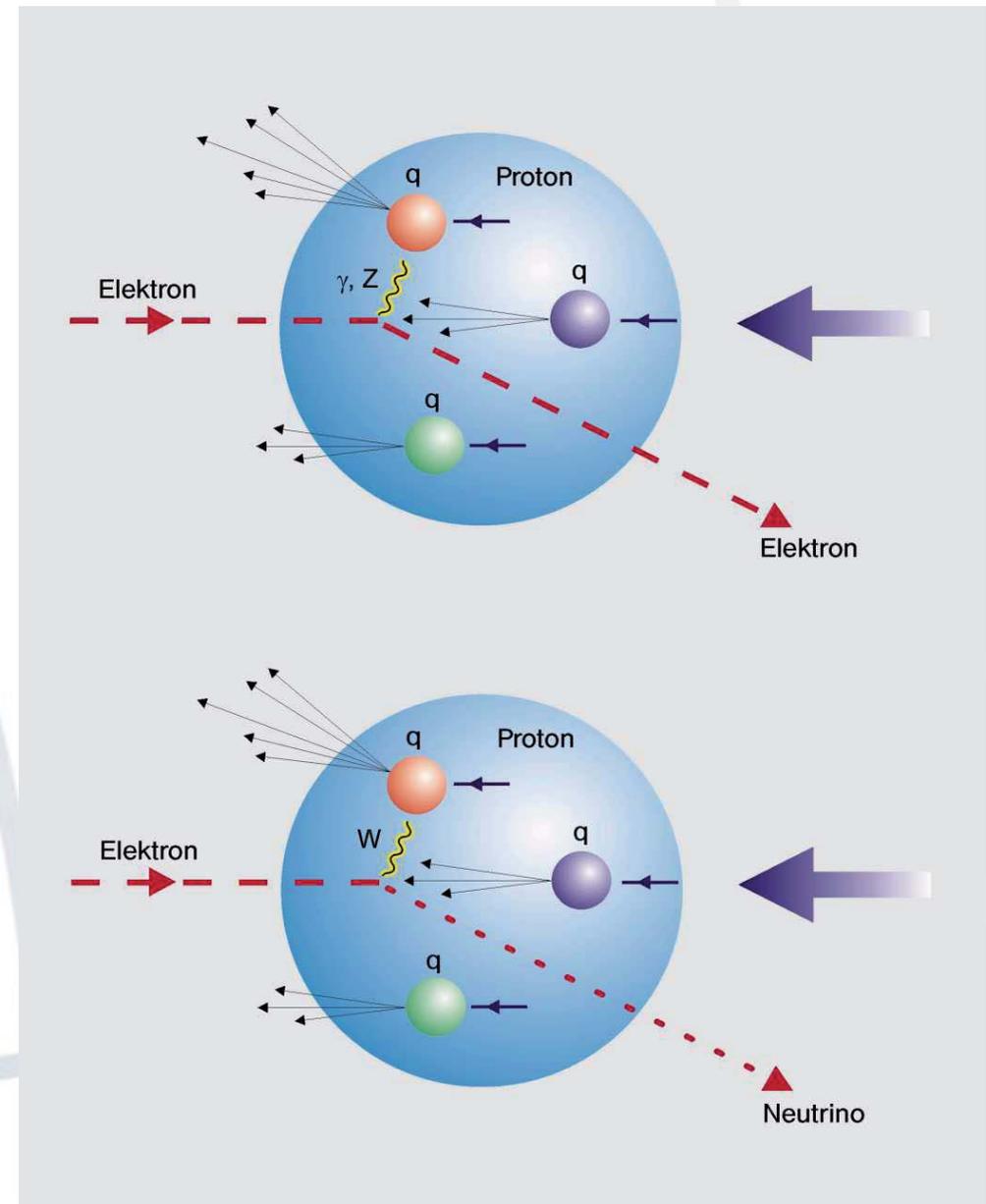
Alles verstanden - wozu ein neuer Beschleuniger?

- Vereinheitlichung der Kräfte

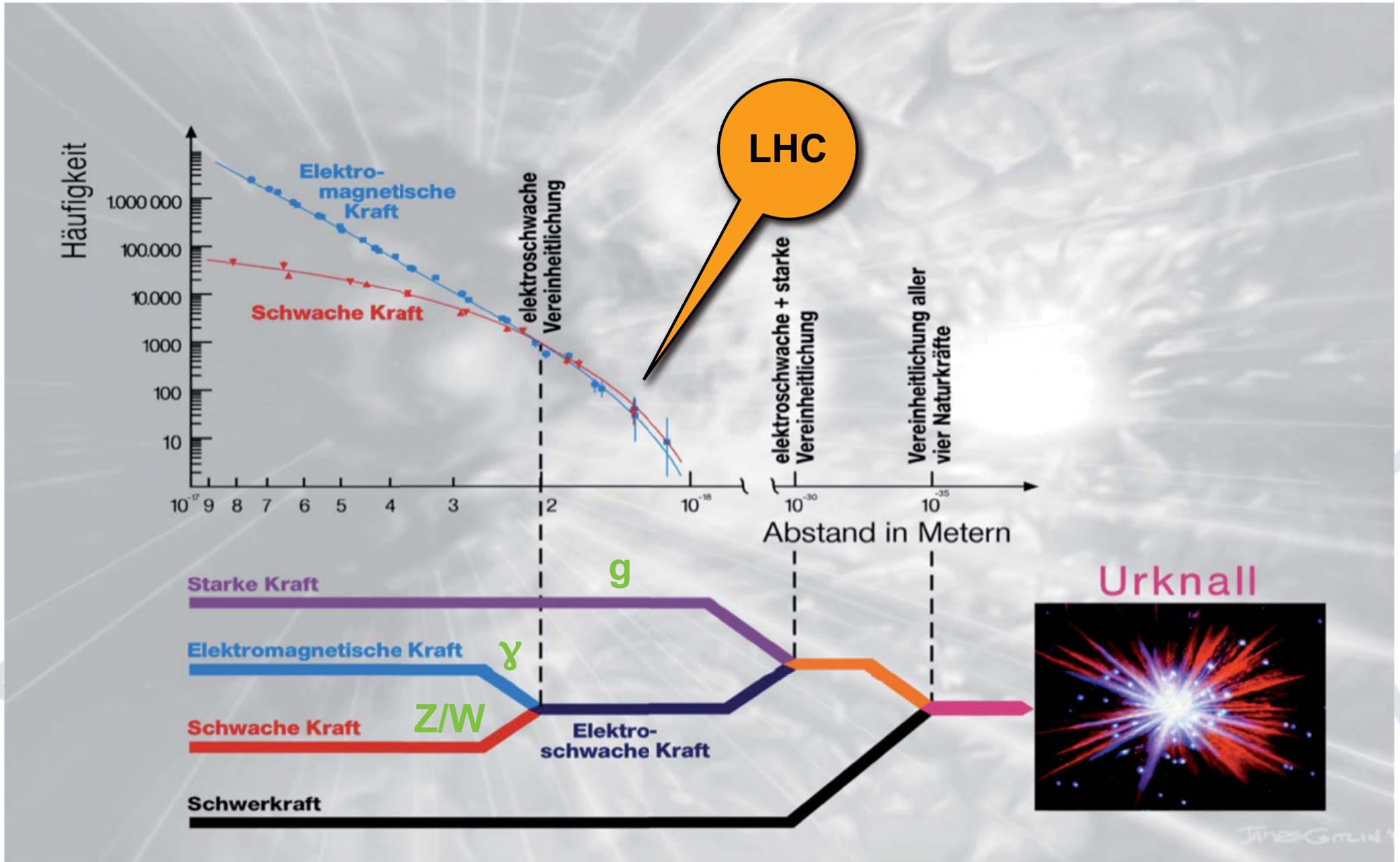


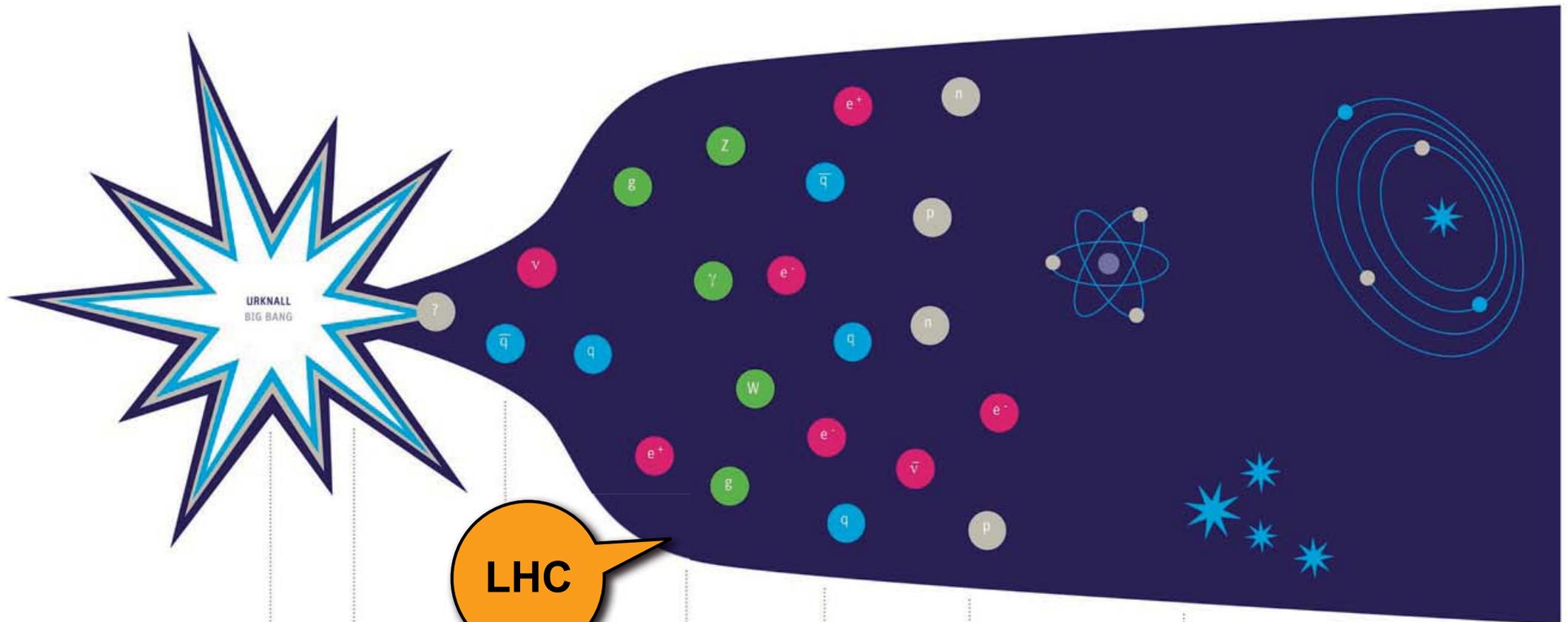
> **neutraler Strom:**
elektro-magnetische oder
schwache Wechselwirkung

> **geladener Strom:**
nur schwache Wechselwirkung



Vereinheitlichung der Kräfte





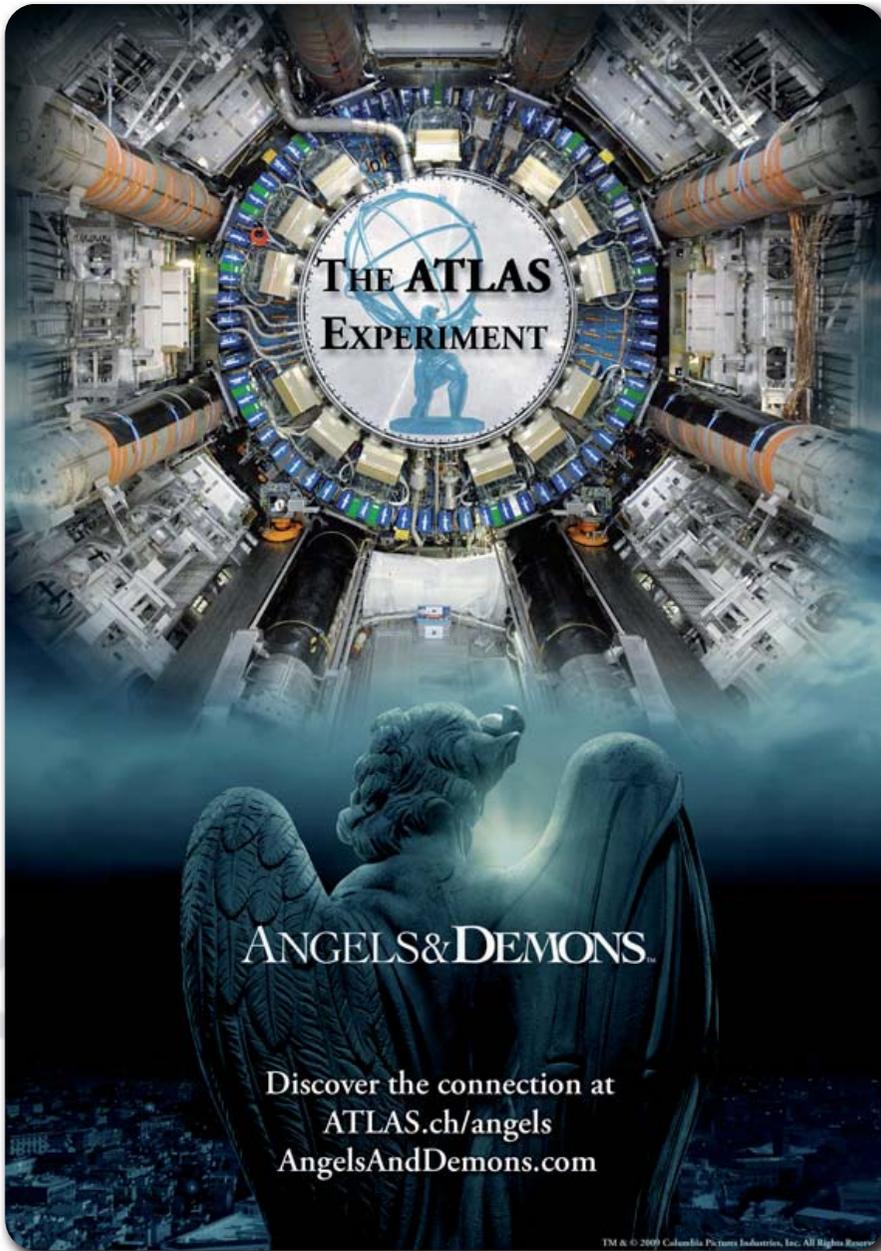
	Urknall	Vereinigte Kräfte	Inflationäre Expansion	Kräfte trennen sich	Nukleonen entstehen	Atome entstehen	Sterne entstehen	Heute
Zeit		10^{-43} s	10^{-35} s	10^{-10} s	10^{-5} s	376000 Jahre	10^9 Jahre	$14 \cdot 10^9$ Jahre
Energie		10^{36} TeV	10^{13} TeV	1 TeV	150 MeV	1 eV	1 meV	0,25 meV

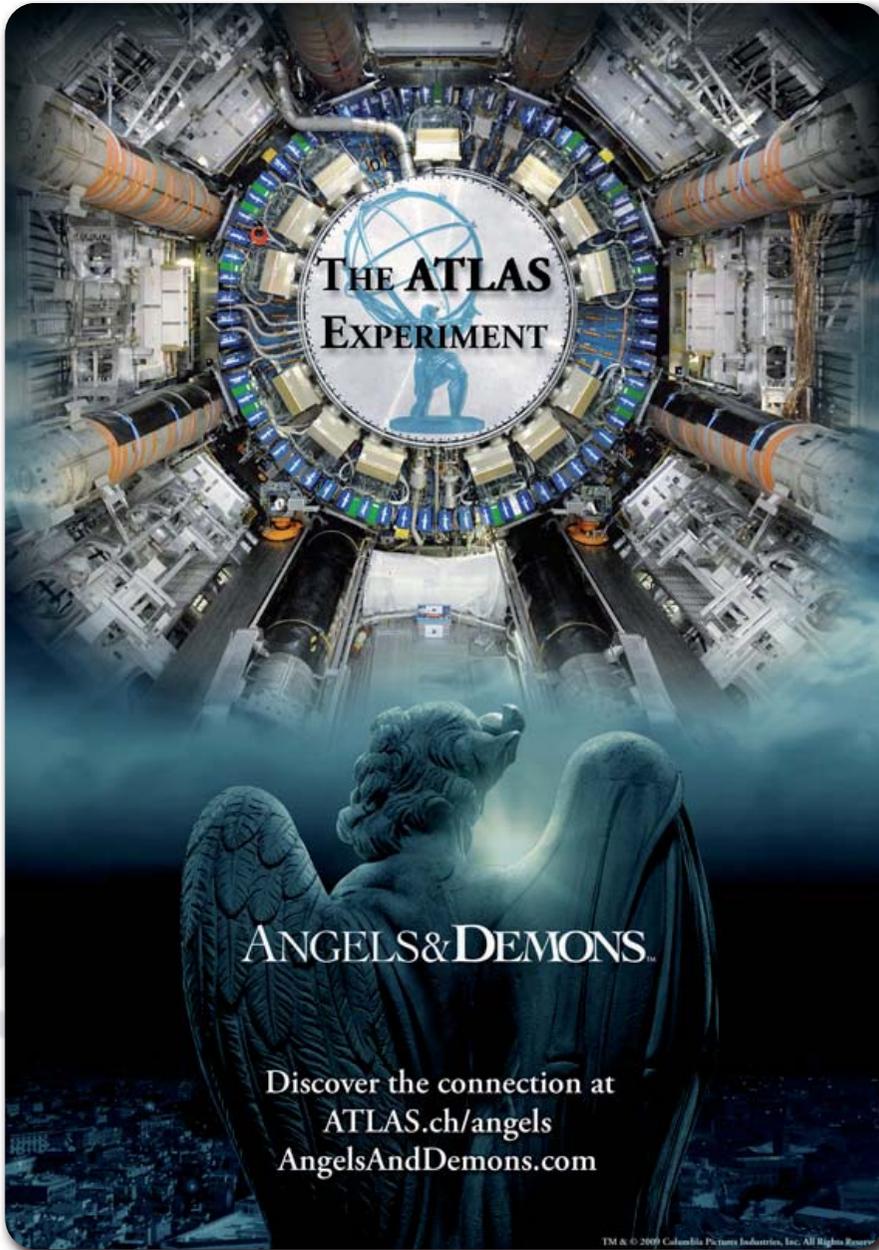
experimenteller Nachweis

- CERN
- Der Large Hadron Collider
- Das ATLAS-Experiment
- Ergebnisse und Ausblick

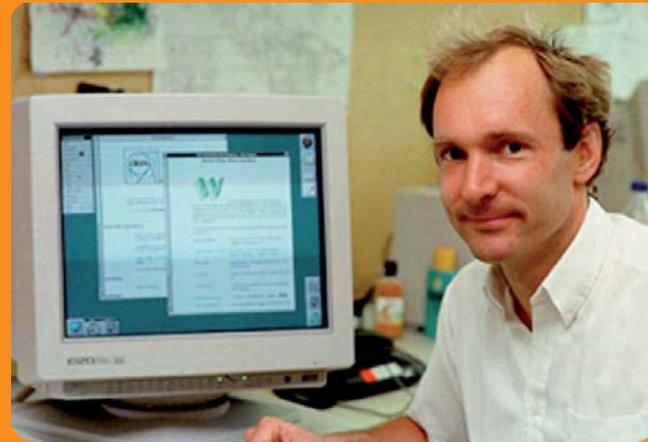
CERN – Habe ich schonmal gehört...

CERN – Habe ich schonmal gehört...





CERN – where the web was born...

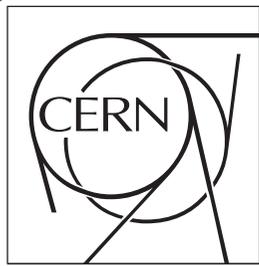


Tim Berners-Lee
(1990)



Der erste
Webserver
(1990)

Was ist CERN?

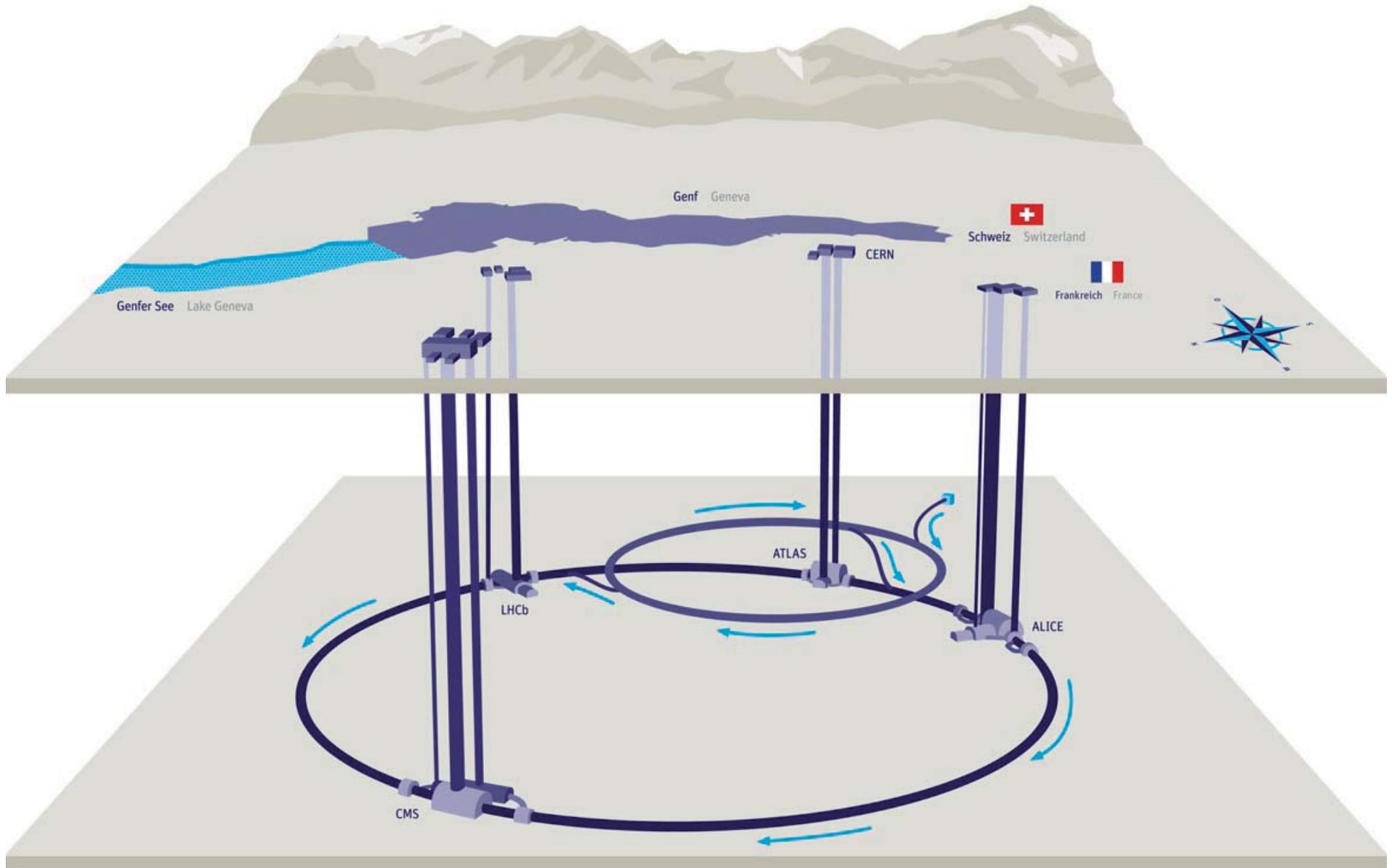


CERN = Europäisches Teilchenphysiklabor
Weltweit größtes Labor für Teilchenphysik, gegründet 1954
Historischer Name: „Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire“
2500 Angestellte, etwa 10000 Gäste (85 Nationalitäten)

Genfer See



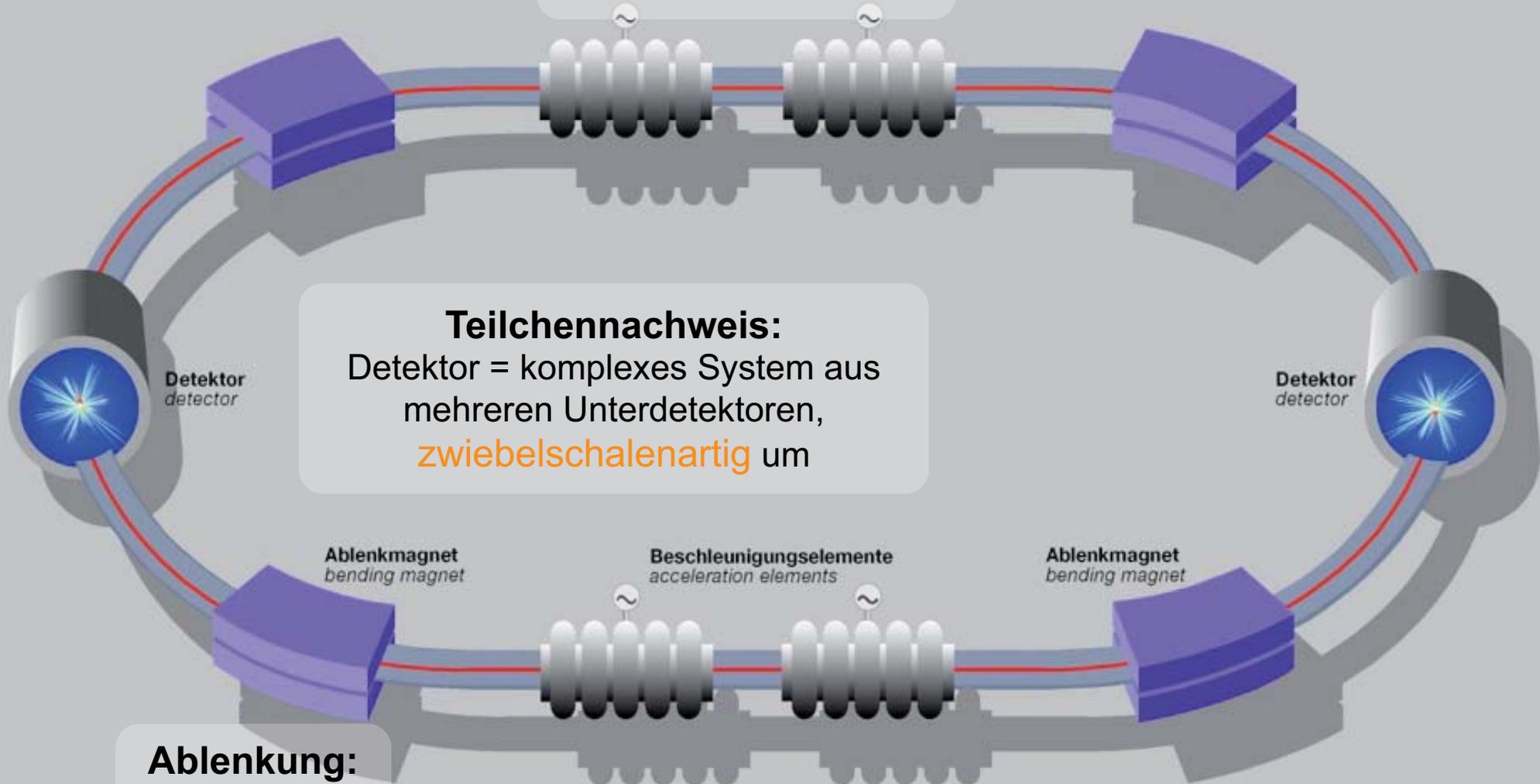
Der LHC-Beschleuniger



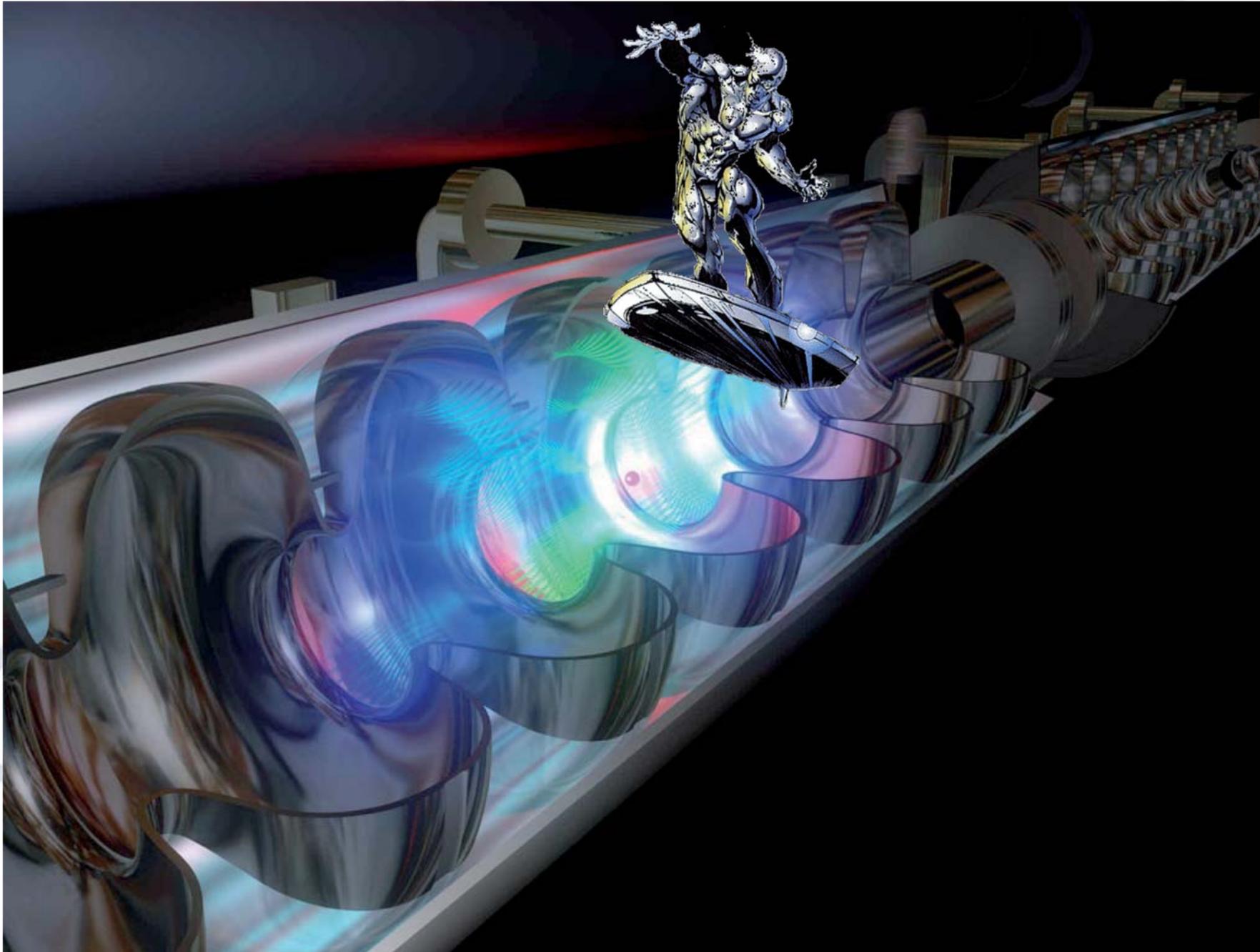
Beschleunigung:
Elektrische Wechselfelder
in **Hohlraumresonatoren**

Teilchennachweis:
Detektor = komplexes System aus
mehreren Unterdetektoren,
zwiebelschalenartig um

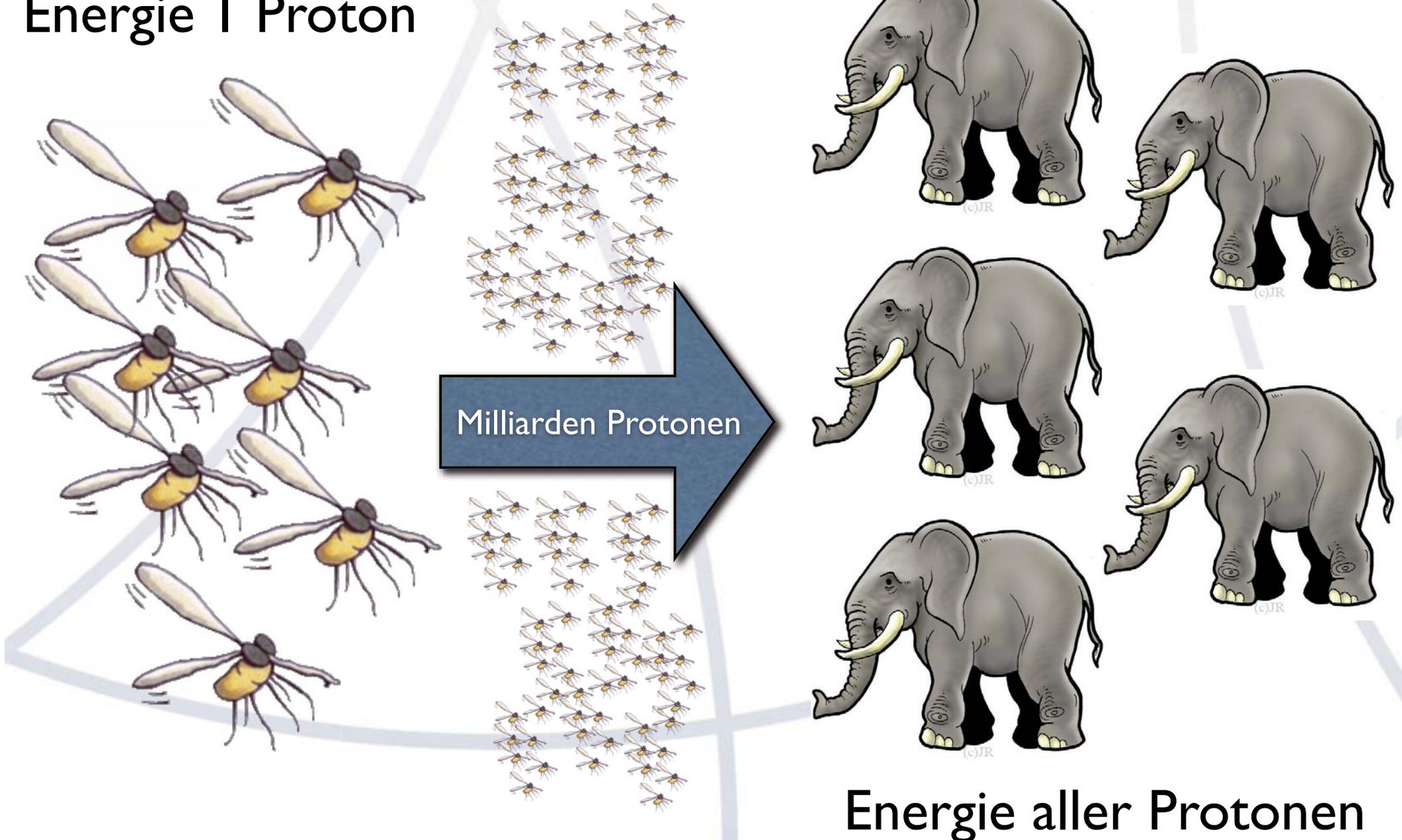
Ablenkung:
Dipolmagnete

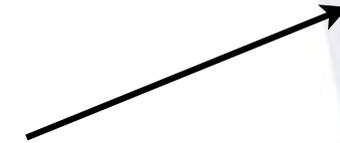
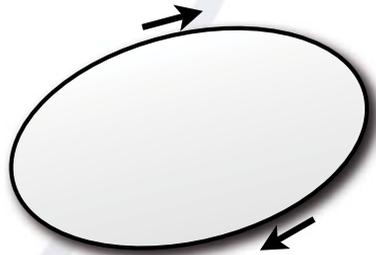


[DESY]



Energie | Proton

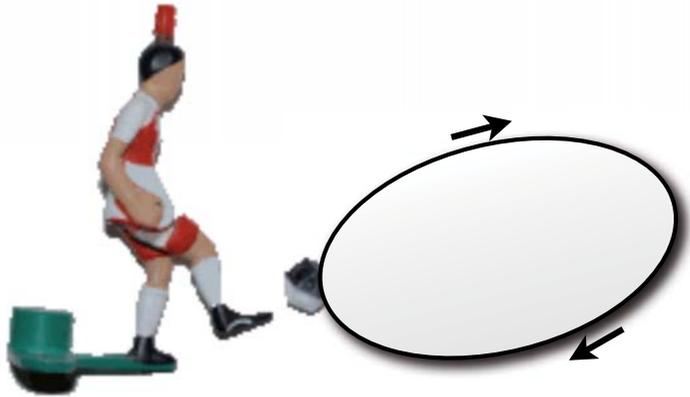




- > Teilchenbündel wiederverwenden
- > jede Runde schneller machen
- > hohe Kollisionsrate
- > müssen Teilchen um die Kurve bekommen

- > Teilchenbündel nur einmal verwendbar
- > brauchen Teilchen nicht ablenken

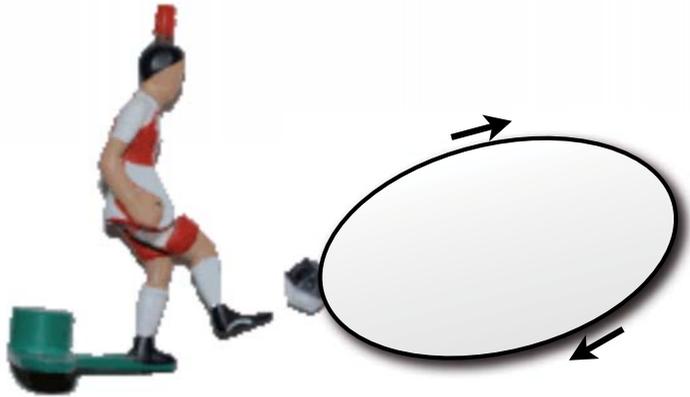
Ringbeschleuniger vs. Linearbeschleuniger



- > Teilchenbündel wiederverwenden
- > jede Runde schneller machen
- > hohe Kollisionsrate
- > müssen Teilchen um die Kurve bekommen

- > Teilchenbündel nur einmal verwendbar
- > brauchen Teilchen nicht ablenken

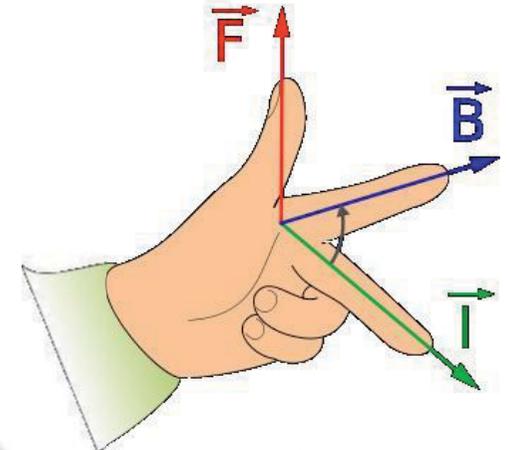
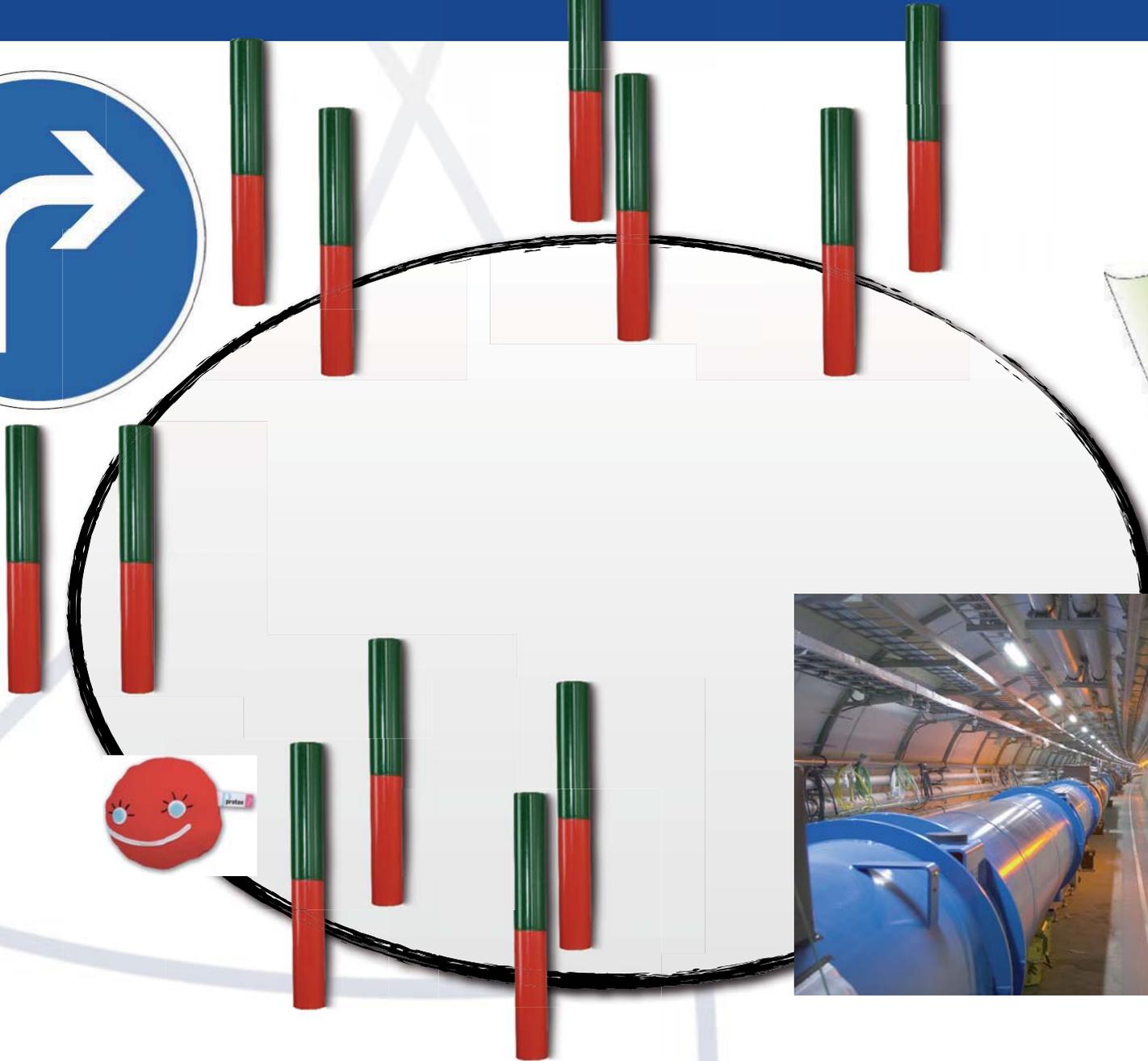
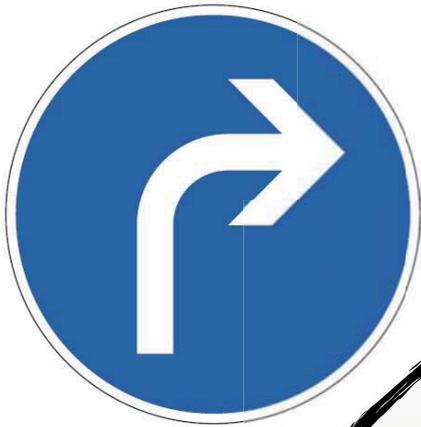
Ringbeschleuniger vs. Linearbeschleuniger



- > Teilchenbündel wiederverwenden
- > jede Runde schneller machen
- > hohe Kollisionsrate
- > müssen Teilchen um die Kurve bekommen

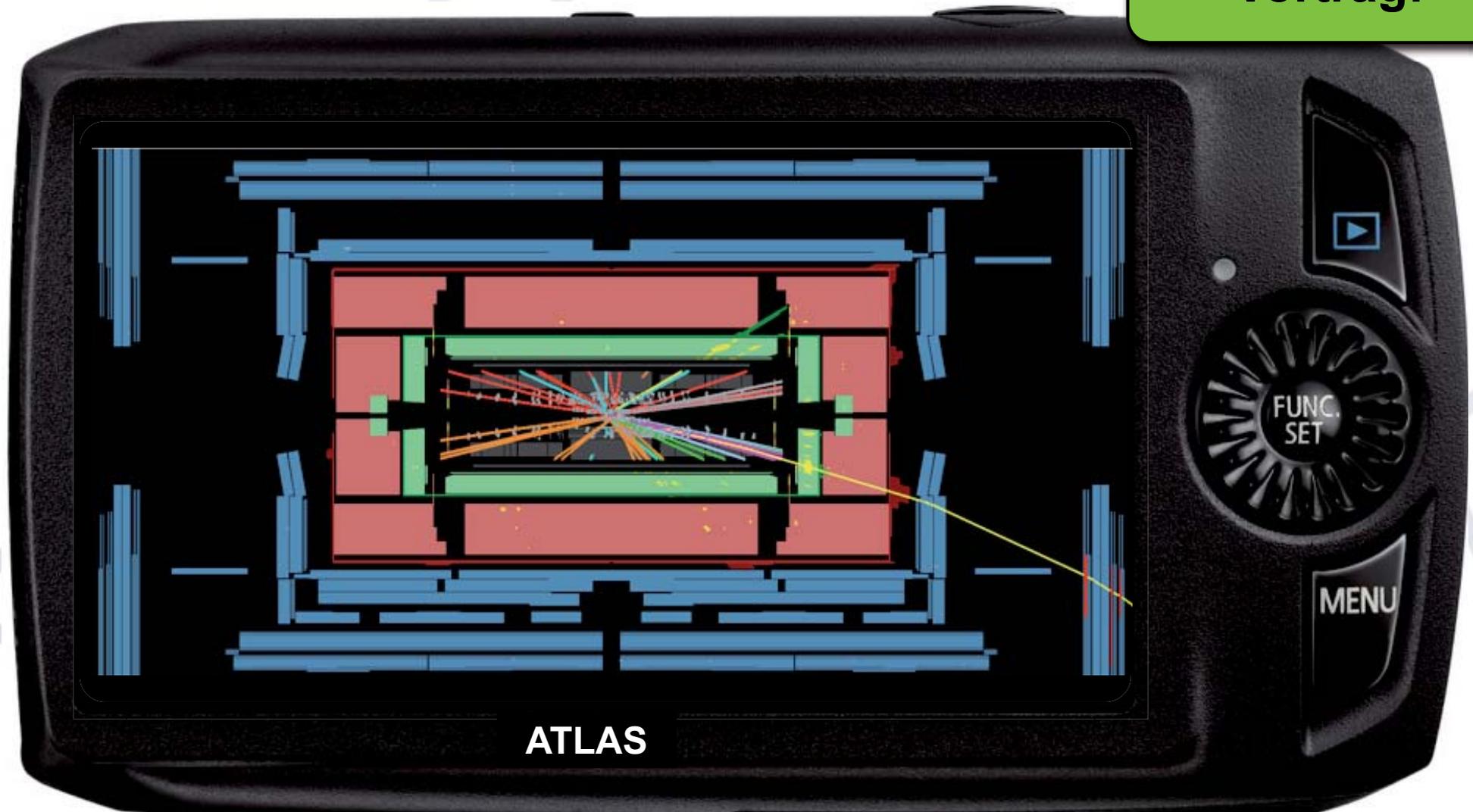
- > Teilchenbündel nur einmal verwendbar
- > brauchen Teilchen nicht ablenken

Teilchen ablenken



- > Digitalkamera mit 100 Megapixeln
- > 40 Millionen Bilder pro Sekunde

**Wie? Nächster
Vortrag!**



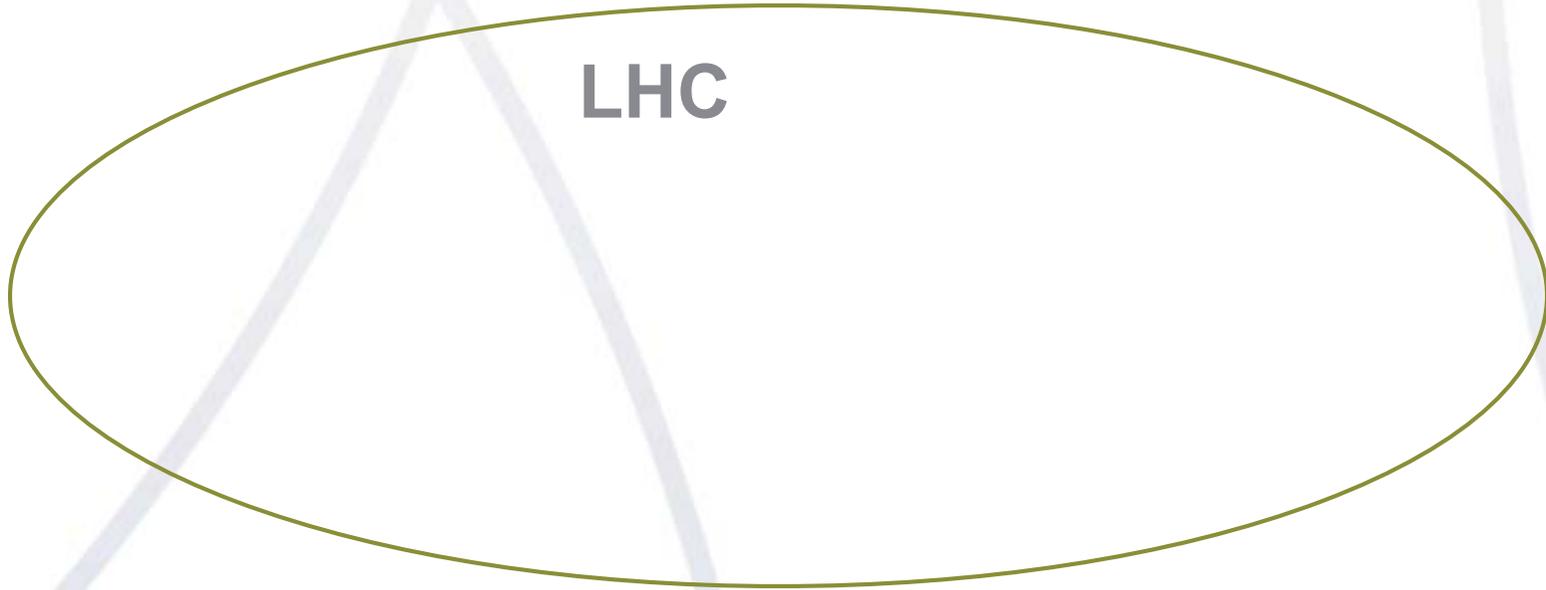
<http://www.youtube.com/watch?v=AHT9RTICqjQ>

- > in der Teilchenphysik suchen wir nach den kleinsten Dingen, aus denen unsere Welt besteht
- > die Theorie dazu, das „Standardmodell der Elementarteilchenphysik“ ist bislang in Übereinstimmung mit Experimenten
- > ...und heute sind Sie an der Reihe, das zu überprüfen!

Backup



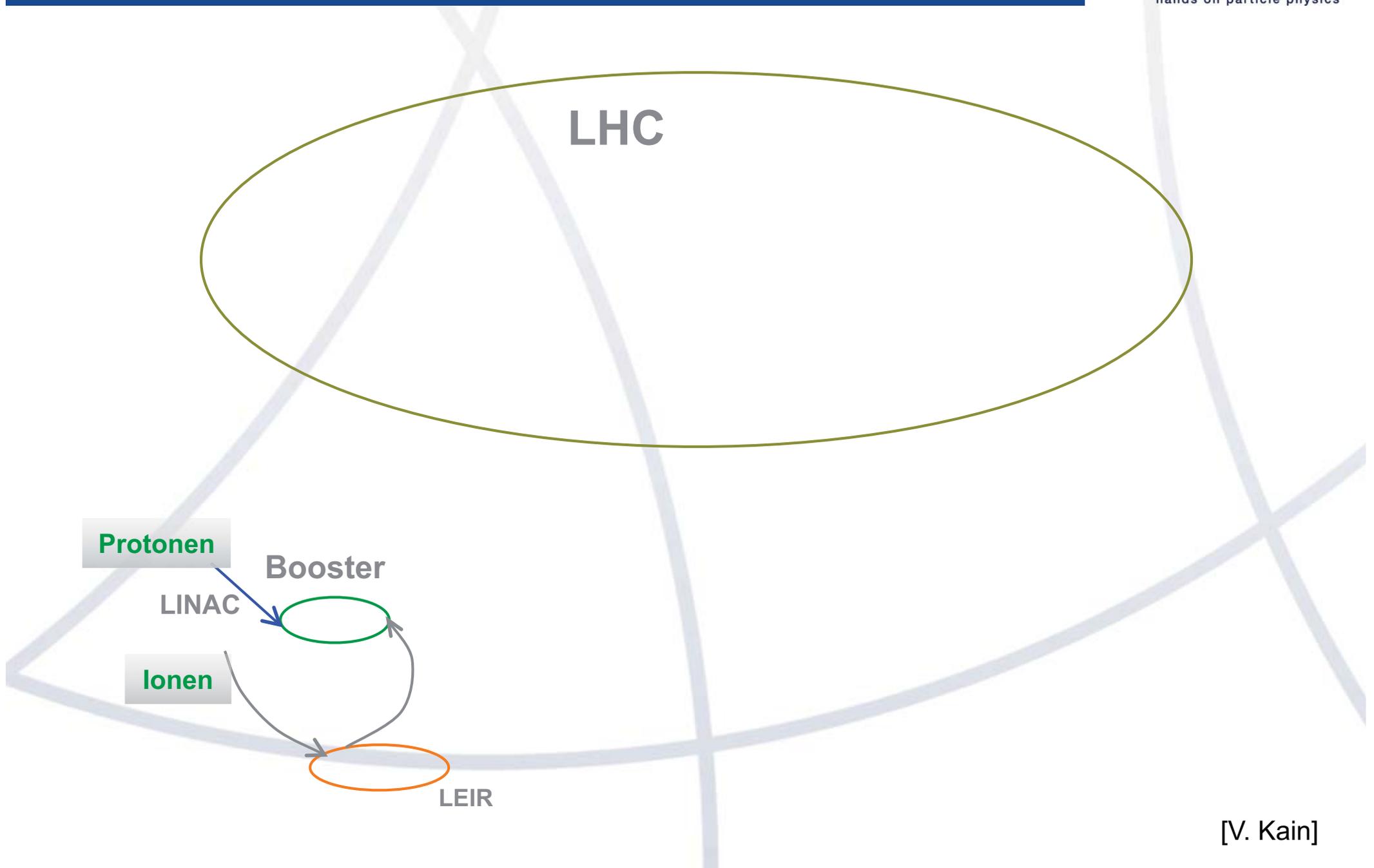
Wie kommen die Protonen in den LHC?



LHC

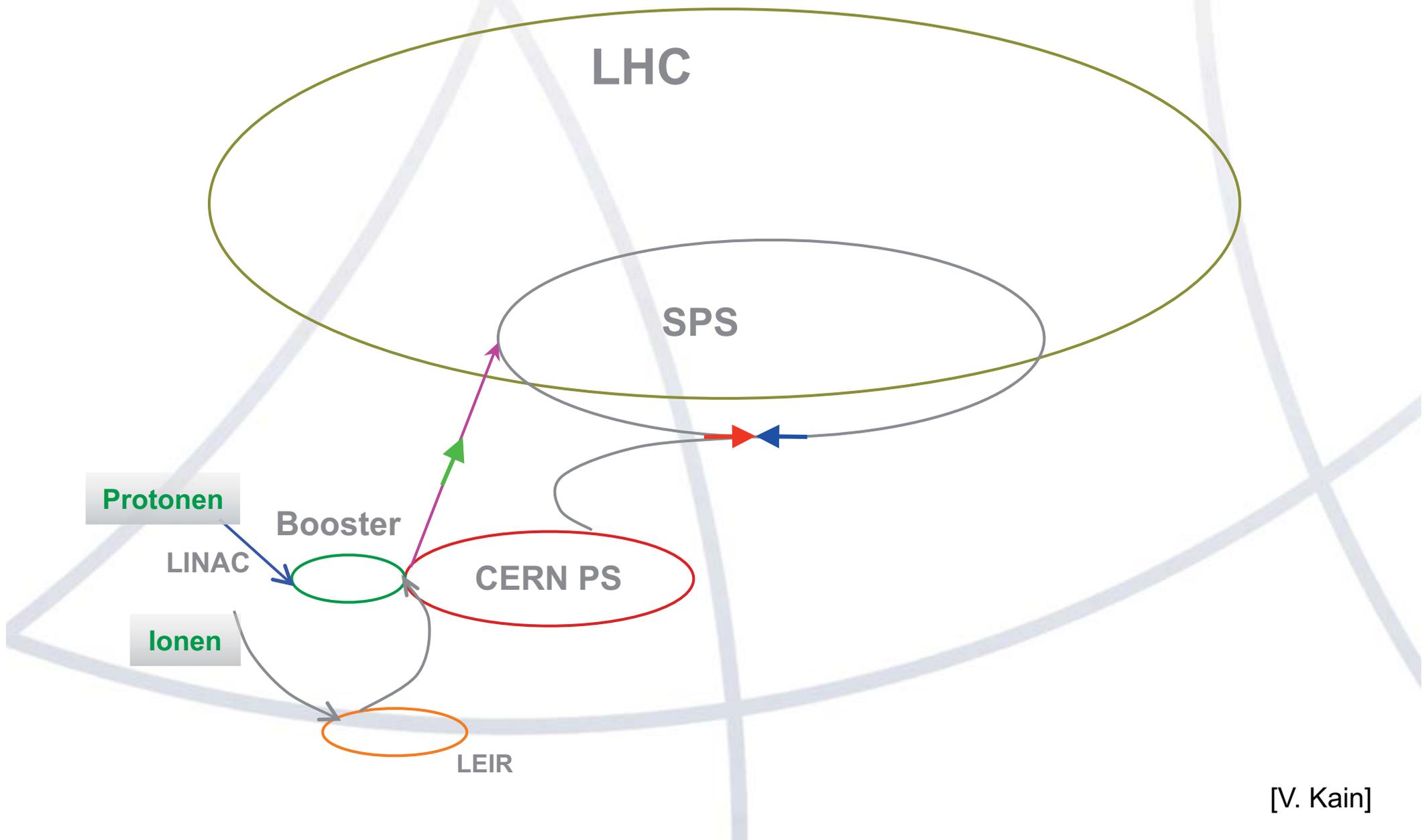
[V. Kain]

Wie kommen die Protonen in den LHC?



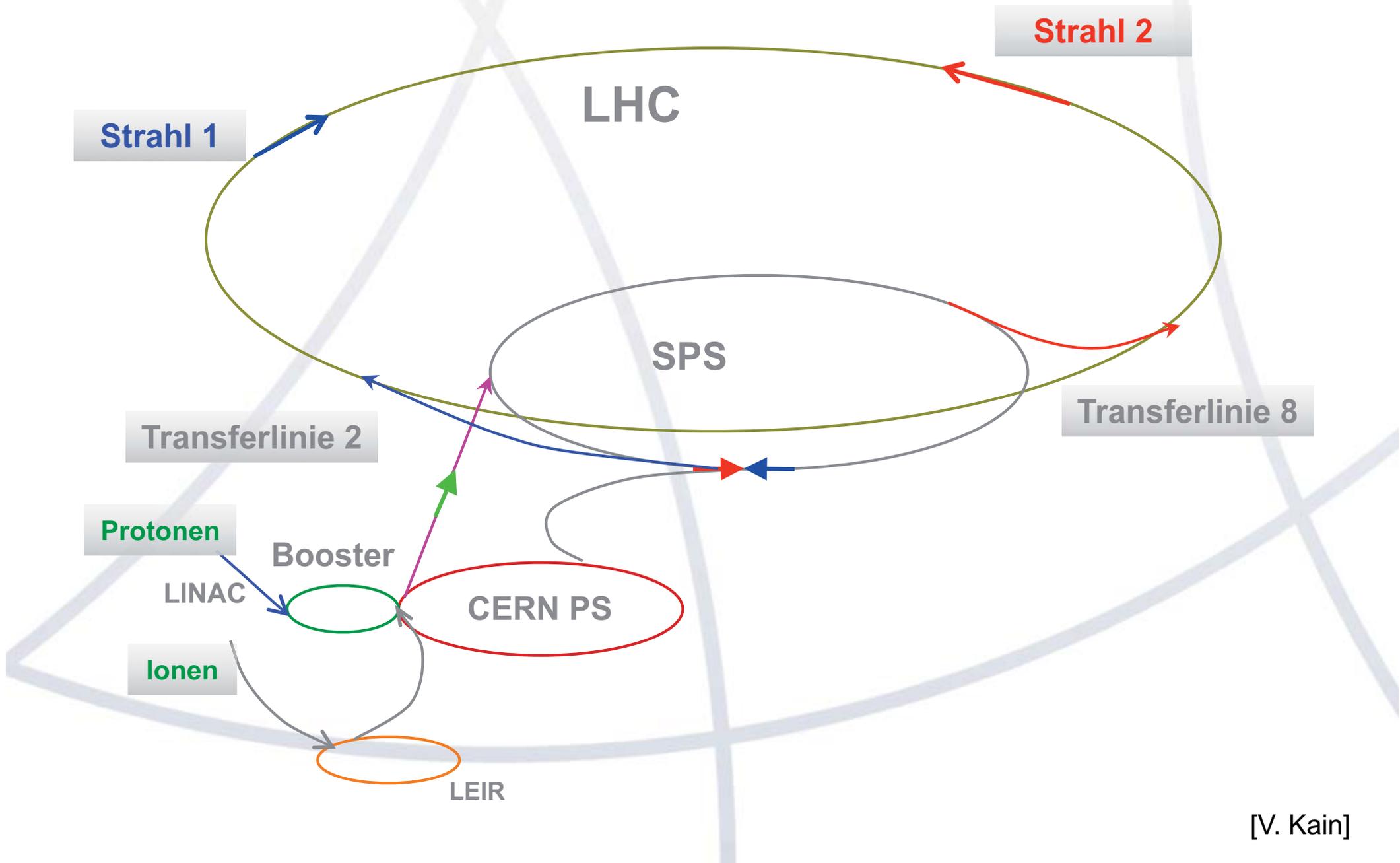
[V. Kain]

Wie kommen die Protonen in den LHC?



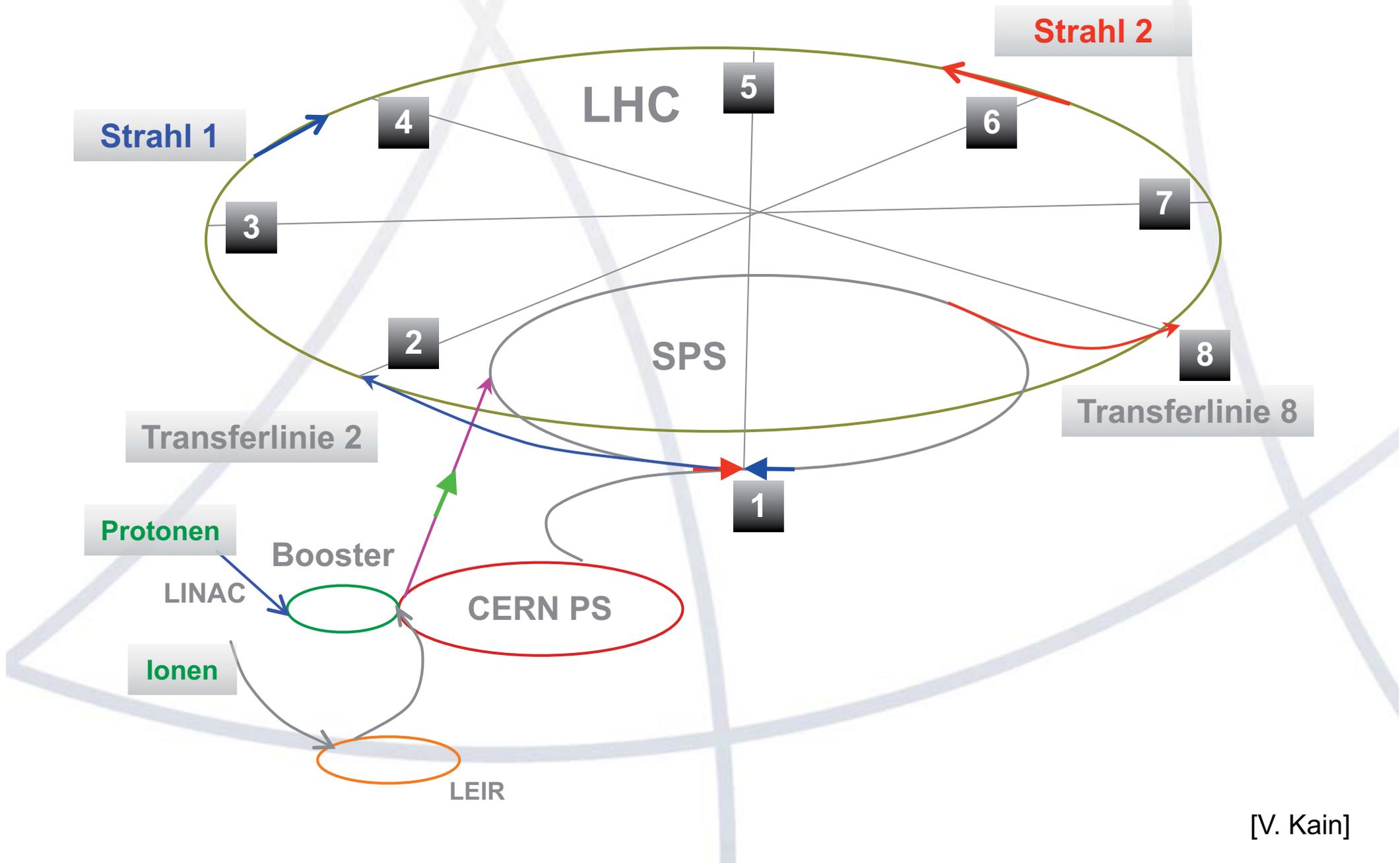
[V. Kain]

Wie kommen die Protonen in den LHC?



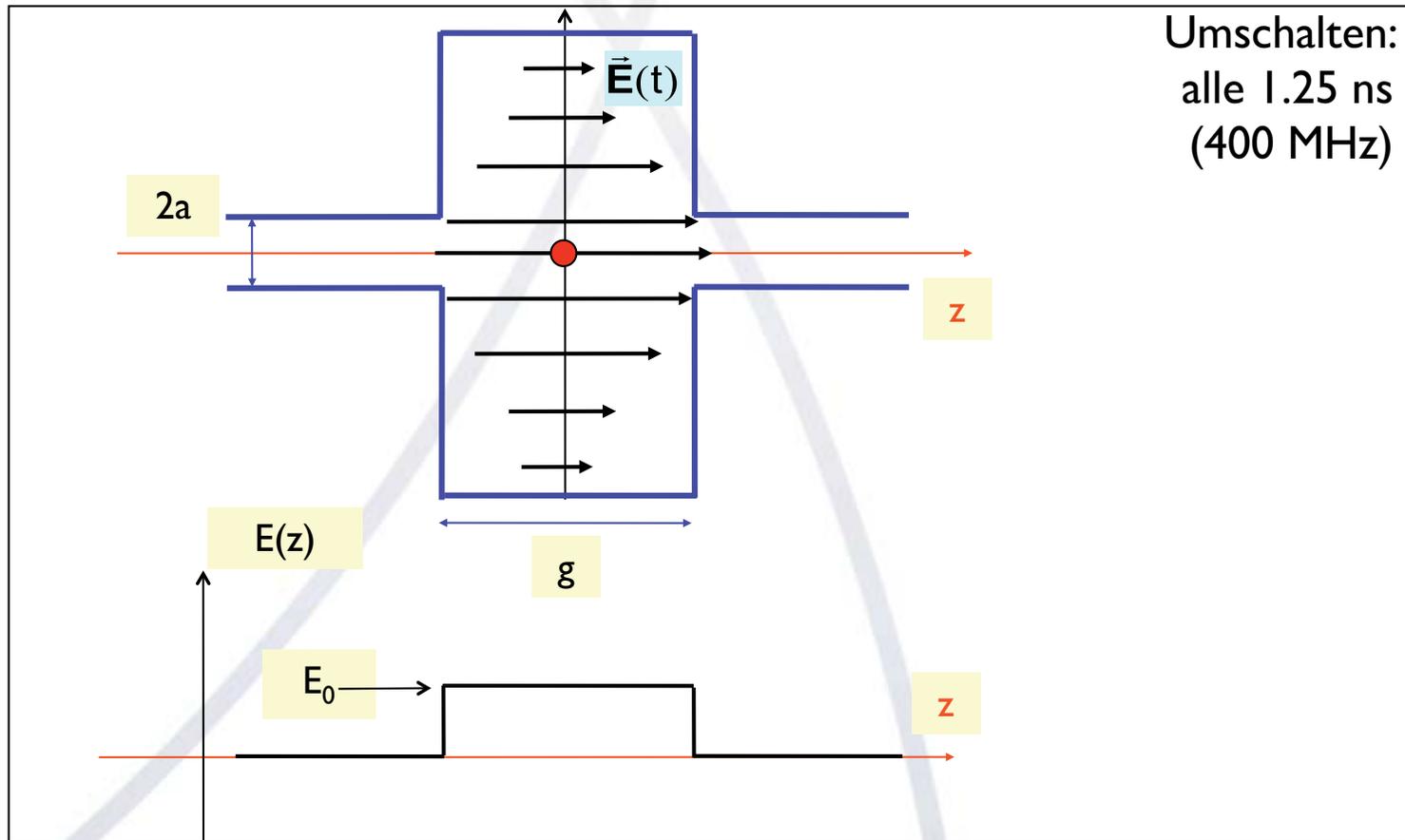
[V. Kain]

Wie kommen die Protonen in den LHC?



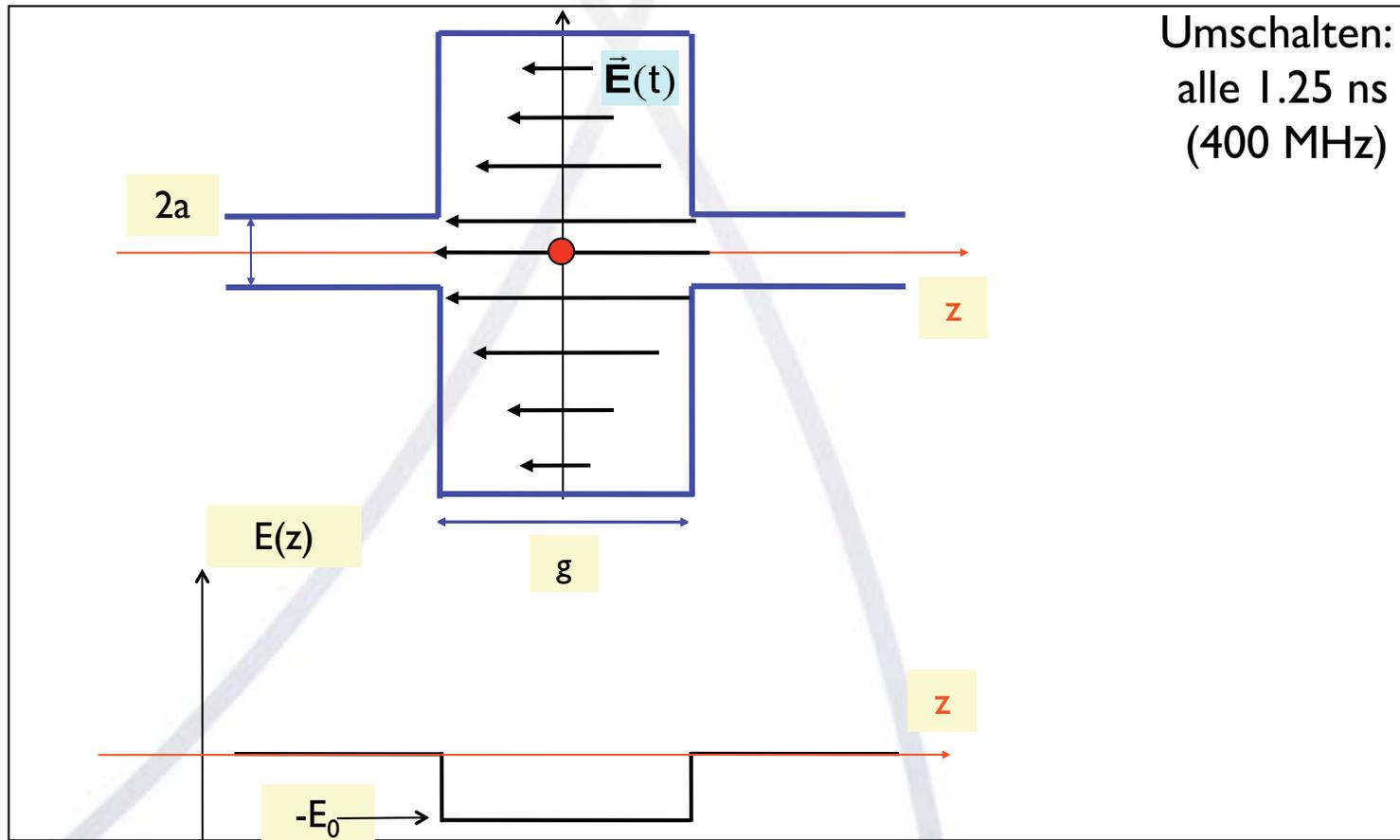
[V. Kain]

Beschleunigung: Hohlraumresonatoren



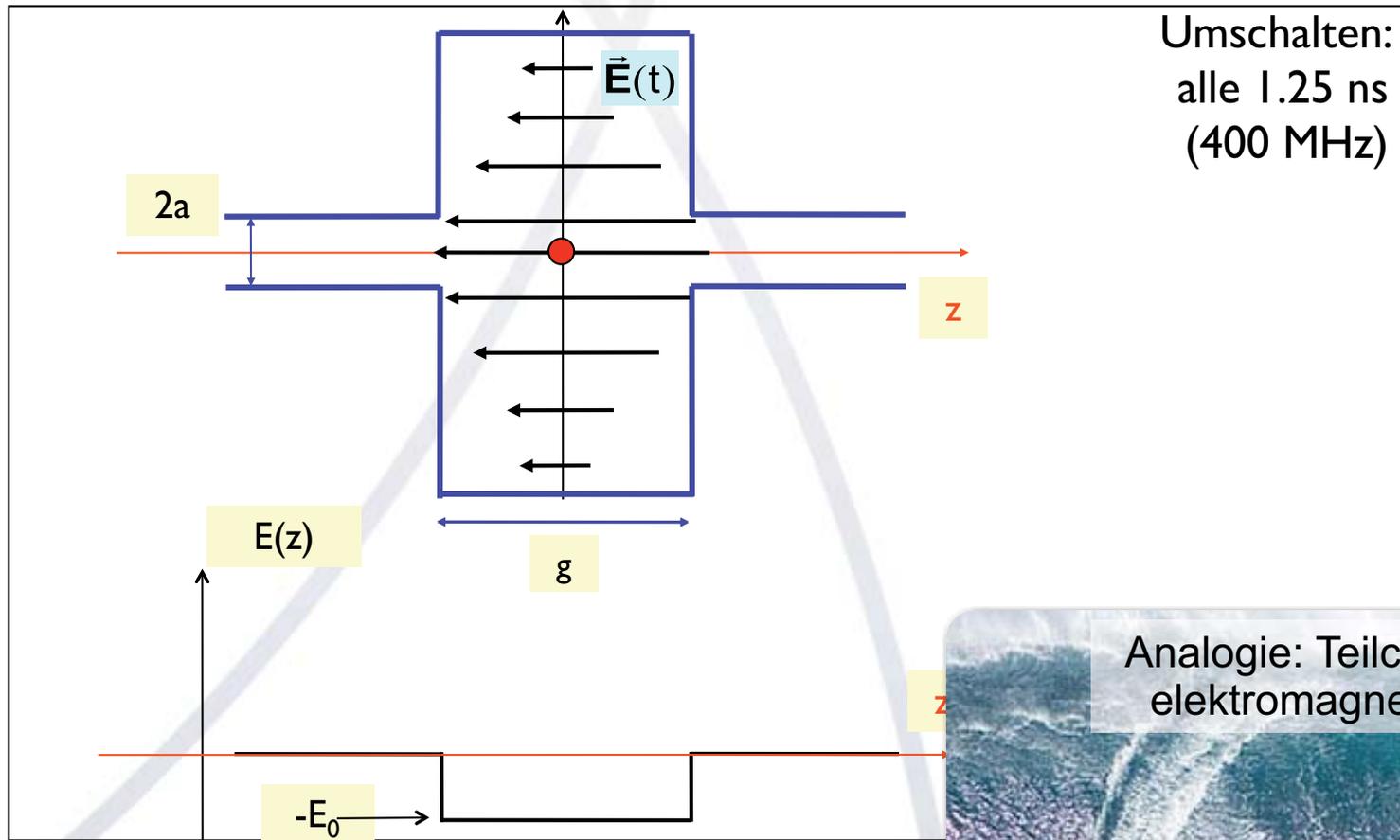
Umschalten:
alle 1.25 ns
(400 MHz)

[V. Kain]



[V. Kain]

Beschleunigung: Hohlraumresonatoren

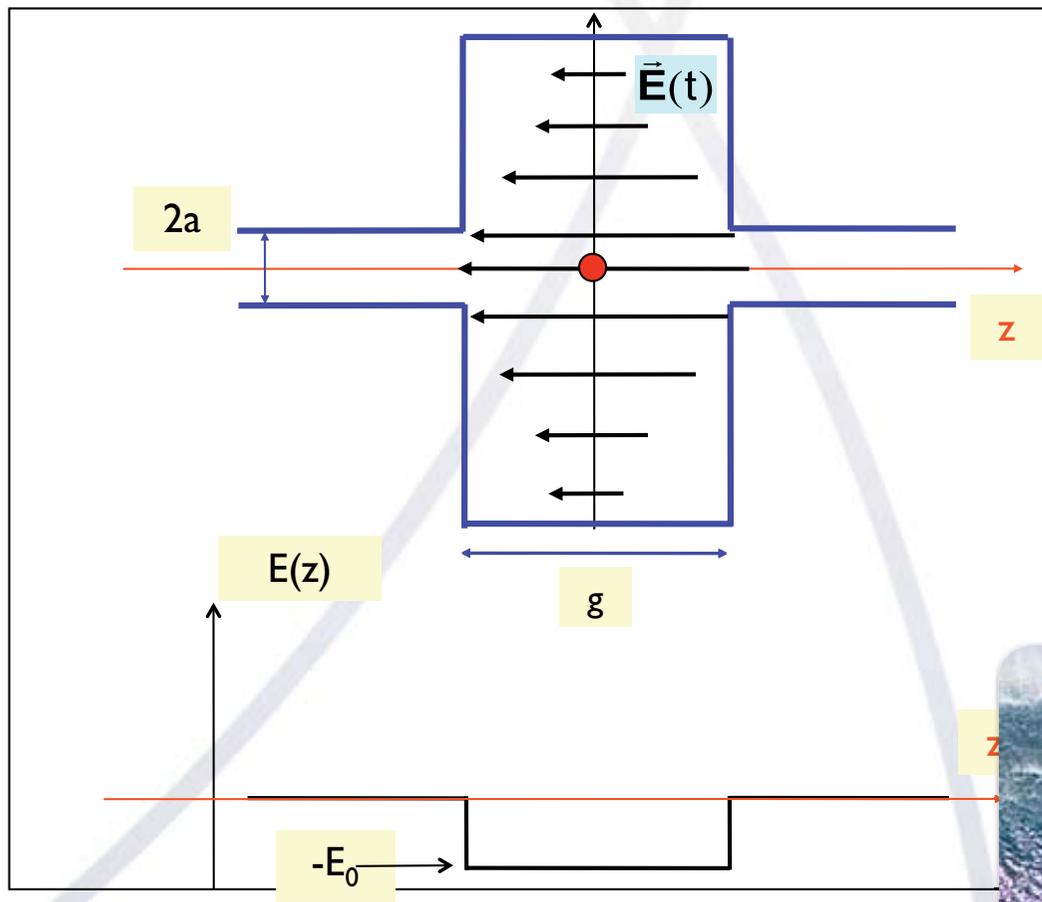


Umschalten:
alle 1.25 ns
(400 MHz)

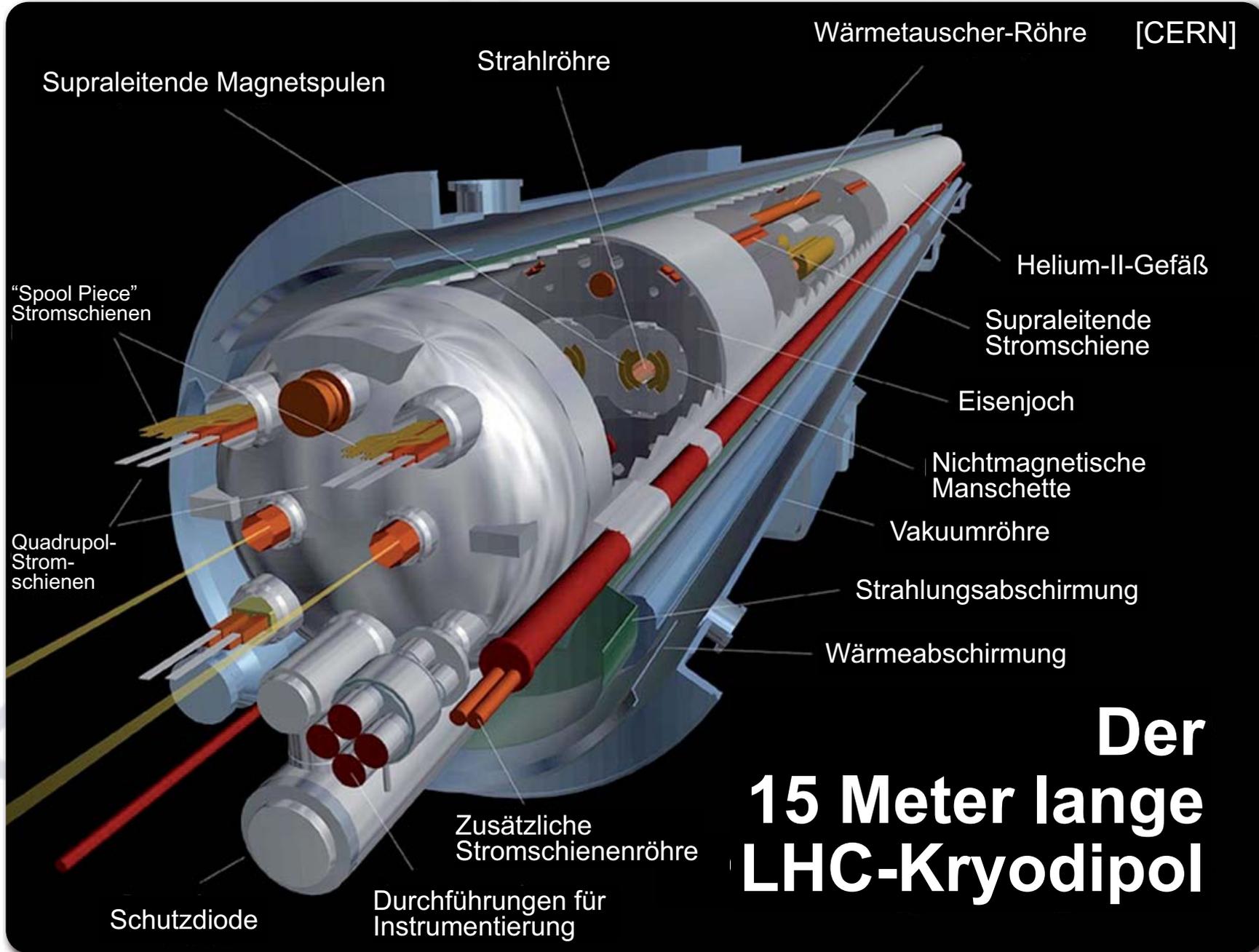


[V. Kain]

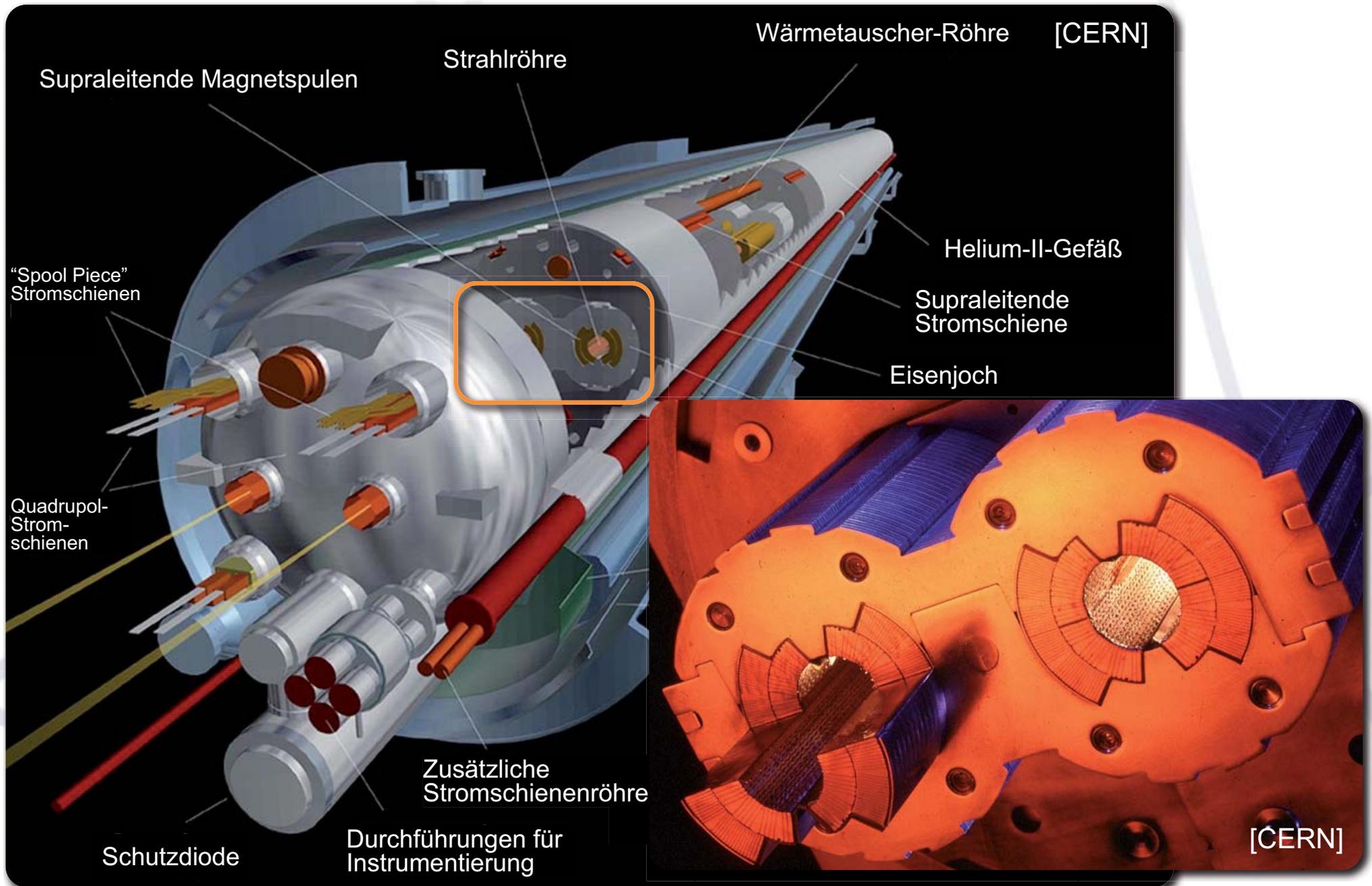
Beschleunigung: Hohlraumresonatoren



[V. Kain]



Ablenkung: Dipolmagnete



> Protonen durchlaufen LHC als **Pakete** (kein kontinuierlicher Strahl)

- LHC: etwa **2800 Paketen** mit jeweils etwa 100 Milliarden Protonen (vgl. 100 Milliarden Sandkörner $\approx 25 \text{ m}^3$)
- **Starke Dipolmagnete** (8,3 Tesla) halten Strahl auf Kreisbahn
- Protonen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit minus 10 km/h: ca. 11.000 Umläufe pro Sekunde

> Gespeicherte Strahlenergie: **360 MJ**

- Einzelnes Proton: kinetische Energie einer **Mücke**
- Alle Protonen zusammen: kinetische Energie etwa wie **ICE3** mit 150 km/h

