

Mit dem

Urknall im Teilchenphysiklabor

zu

Erkenntnissen

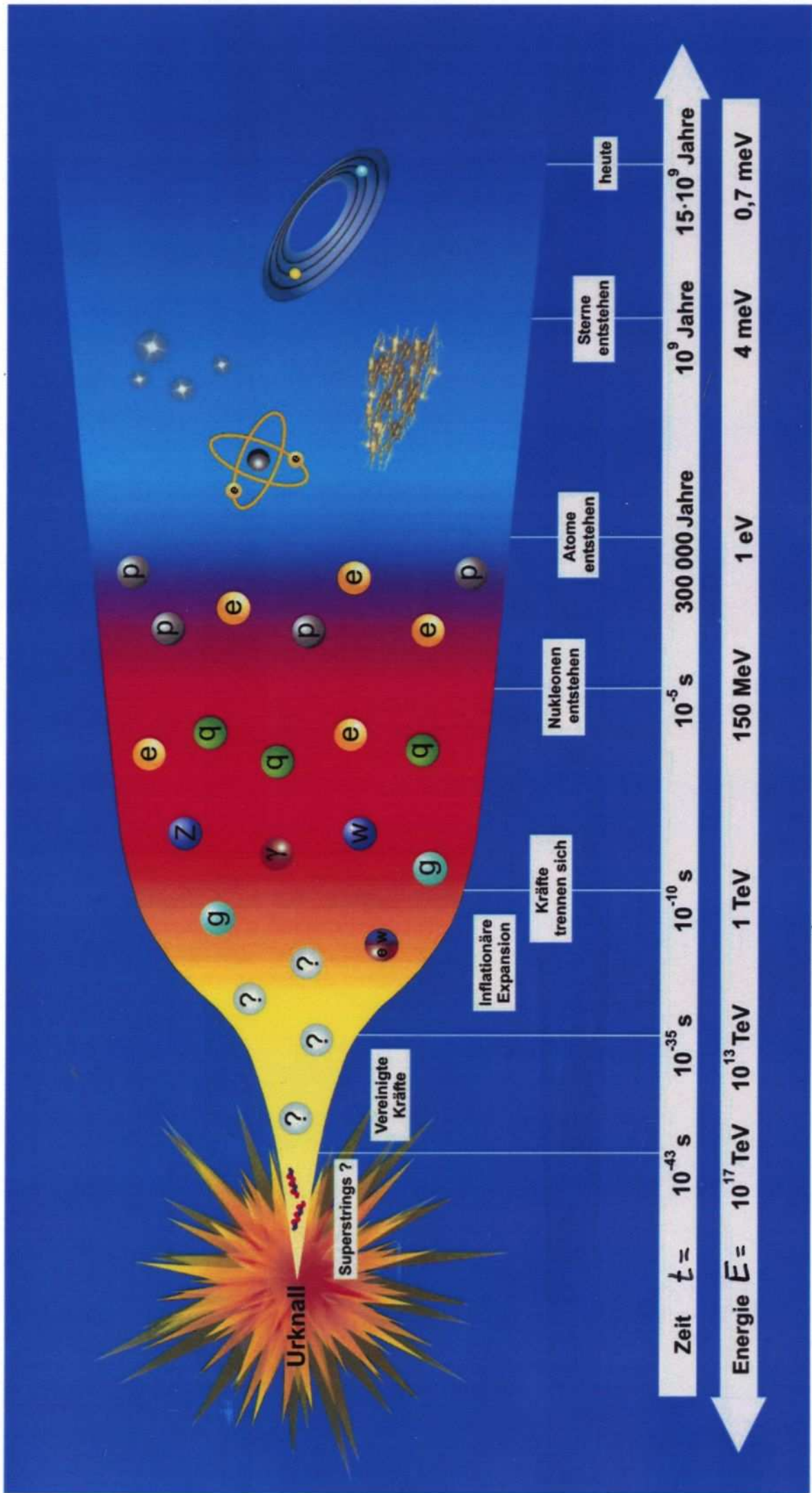
über

Materie, Raum und Zeit

28.02.2007

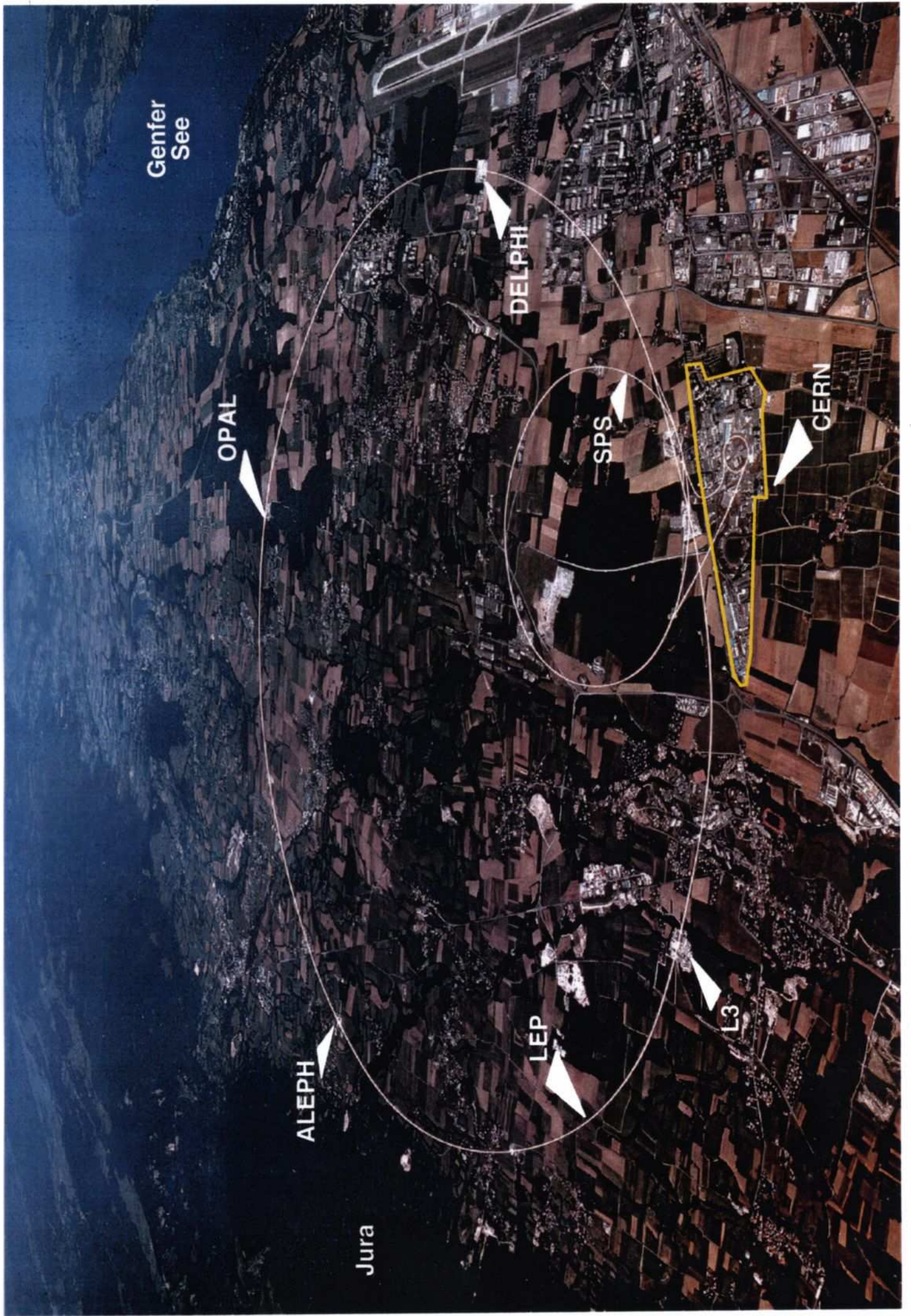
O. Biebel

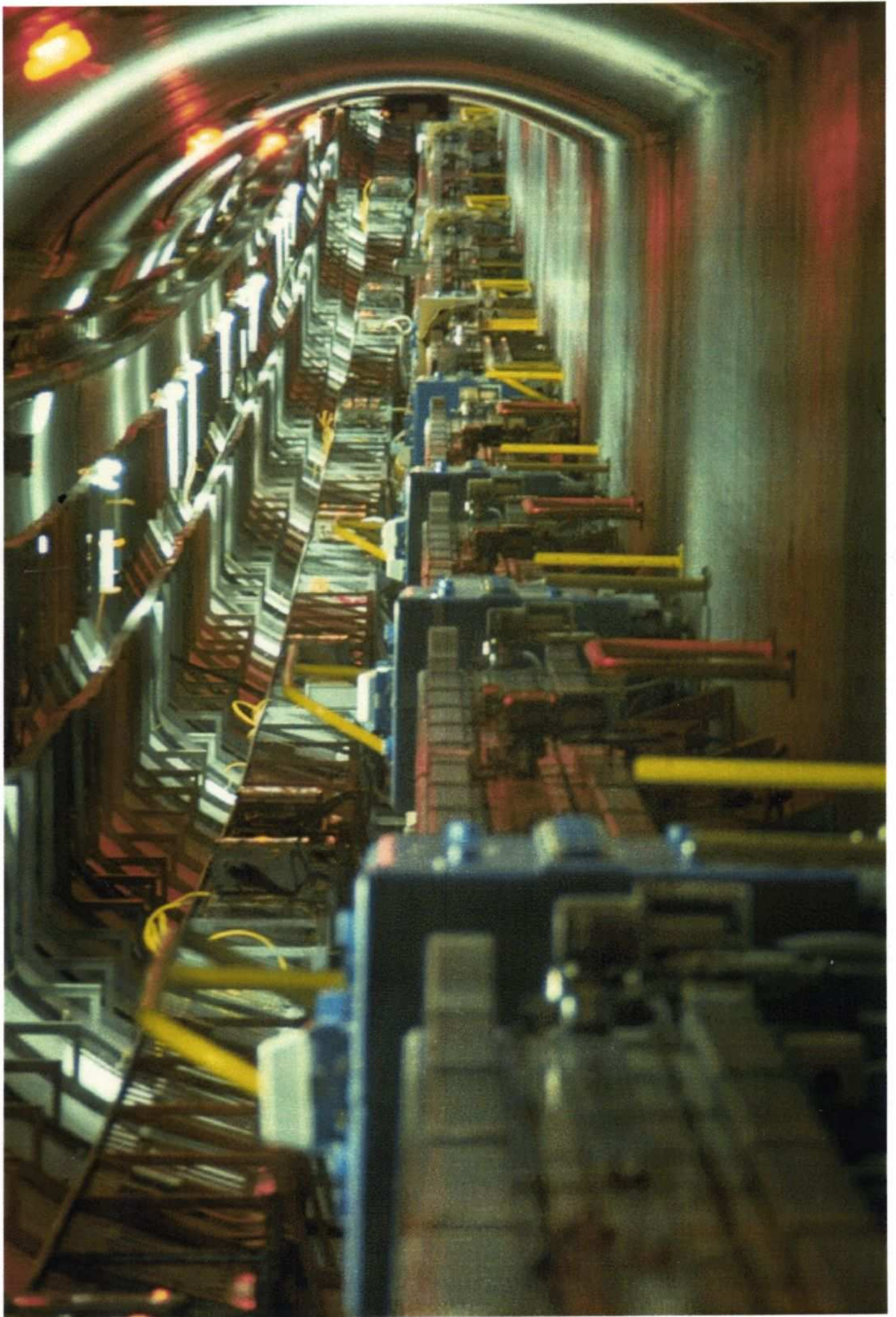
LMU München



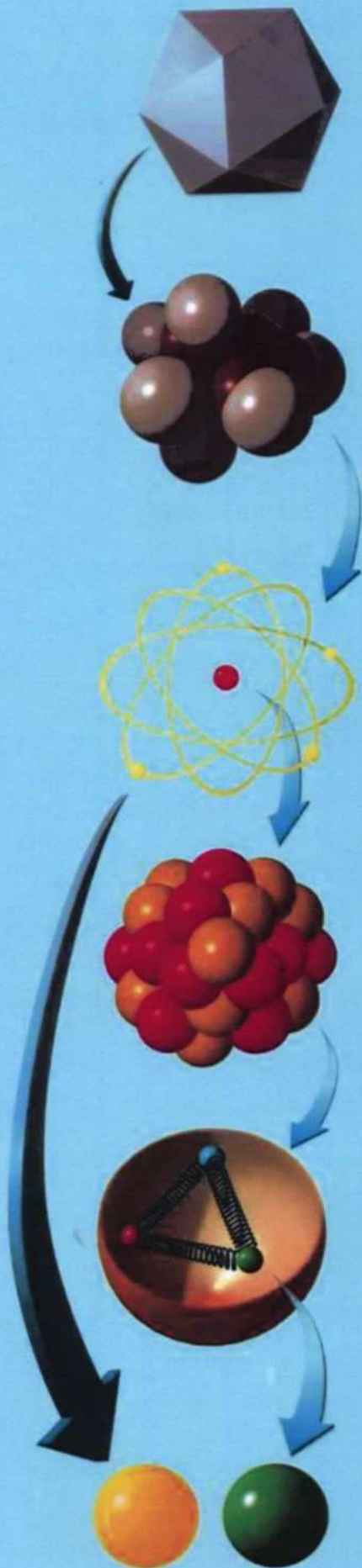
(LHC: 14TeV)

NB: Ludwig Boltzmann:
 $\langle E \rangle \approx k_B \cdot T$





Struktur d. Materie



$\leq 0,01$ m
Kristall
($E \approx \frac{1}{10}$ eV)

1/10.000.000

10^{-9} m
Molekül
($E \approx 1$ eV)

1/10

10^{-10} m
Atom
($E \approx 10$ eV)

1/10.000

10^{-14} m
Atomkern
($E \approx 10$ MeV)

1/10

10^{-15} m
Proton
($E \approx 1$ GeV)

1/1.000

$< 10^{-18}$ m
Elektron,
Quark
($E \approx 1$ TeV)

NB: Werner Heisenberg

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h$$

{ Energie
zur Untersuchung
der Struktur

$$(1 \text{ eV} \approx 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J})$$

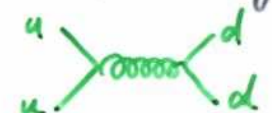

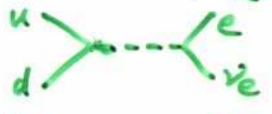
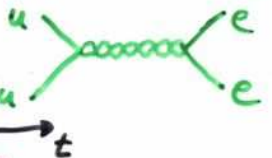
Einleitung

● Bausteine der Materie: Fermionen

| | <u>Familien</u> | | | <u>elektr. Ladung</u> | <u>Kräfte</u> st., em., schw., grav. |
|------------------|-----------------|-----------|------------|-----------------------|---|
| <u>Leptonen:</u> | ν_e | ν_μ | ν_τ | 0 | - x x x |
| | e | μ | τ | -1 | - x x x |
| <u>Quarks:</u> | u | c | t | $+\frac{2}{3}$ | x x x x |
| | d | s | b | $-\frac{1}{3}$ | x x x x |

und ihre Anti-Teilchen

● Kräfte und Vermittler: Bosonen

| <u>Wechselwirkung</u> | <u>Austauschteilchen</u> | <u>relative Stärke</u> | <u>Beispiel für Wechselwirkung</u> |
|-----------------------|--------------------------|------------------------|---|
| stark | Gluon g | 1 |  |
| elektromagnet. | Photon γ | $\frac{1}{137}$ |  |
| schwach | W^+, W^-, Z | 10^{-14} |  |
| gravitativ | Graviton G ? | 10^{-40} |  |

● Erzeugung der Massen:

Higgs-Boson H
wird noch gesucht

Elektroschwache Wechselwirkung

Einheitliche Beschreibung von elektromagnet. und schwacher Wechselwirkung

- 1961-67: S. Glashow, A. Salam, S. Weinberg; P. Higgs

Bosonen:

γ

W^\pm

Z

Kopplungsstärke:

$e_{em} \hat{=} \text{elektr. Ladung}^2$

g_w

g_z

Problem: Massen von W^\pm - und Z -Bosonen

Lösung: Spontane Symmetriebrechung und Higgs-Mechanismus

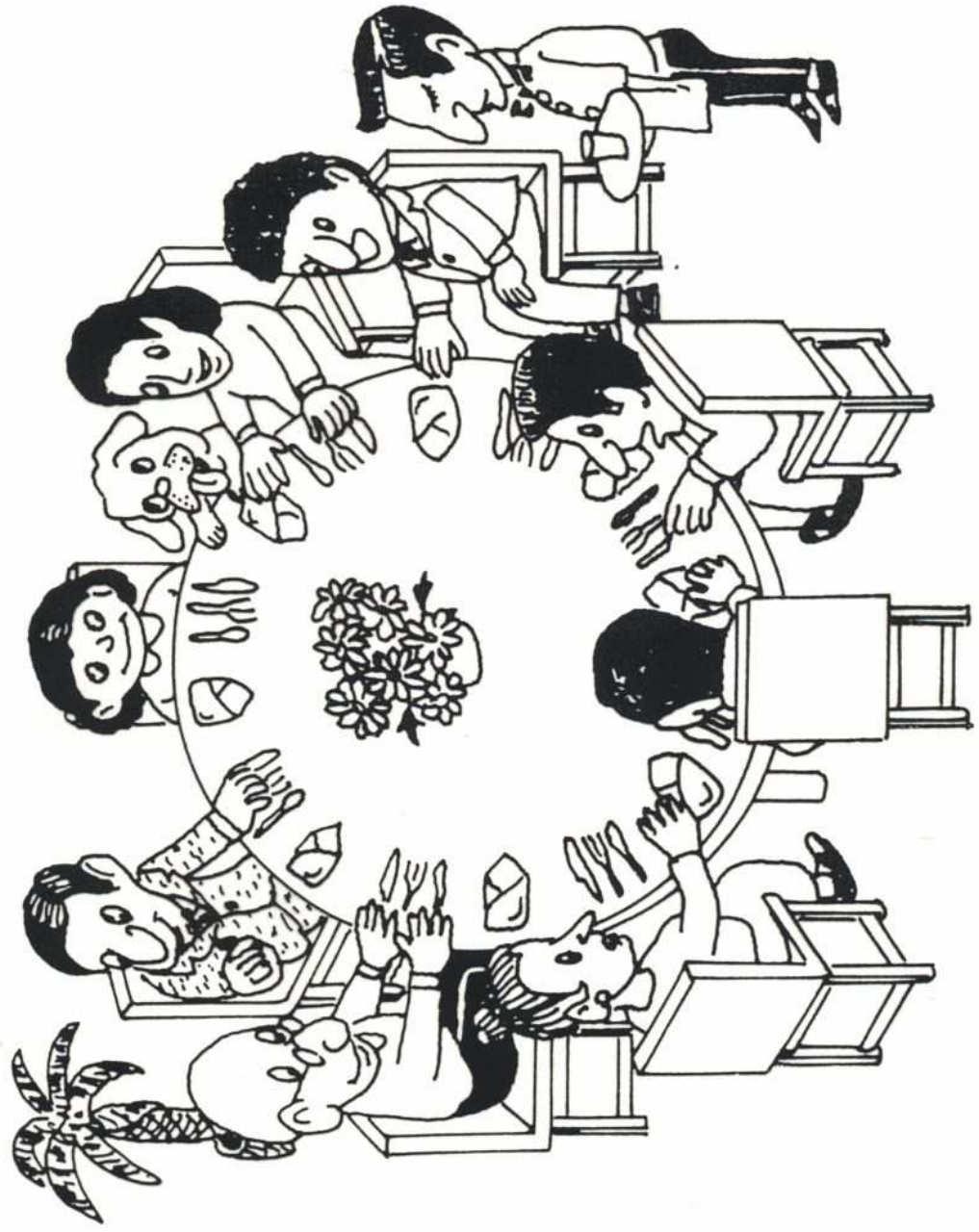
$$\text{H-Boson} \begin{cases} \rightarrow W^\pm\text{-Masse} = \frac{g_w}{2\sqrt{2} \cdot G_F} \\ \rightarrow Z\text{-Masse} \end{cases}$$

\Rightarrow 3 Parameter (e_{em} , G_F , Z -Masse)



Kopplungsstärken, Boson-Massen

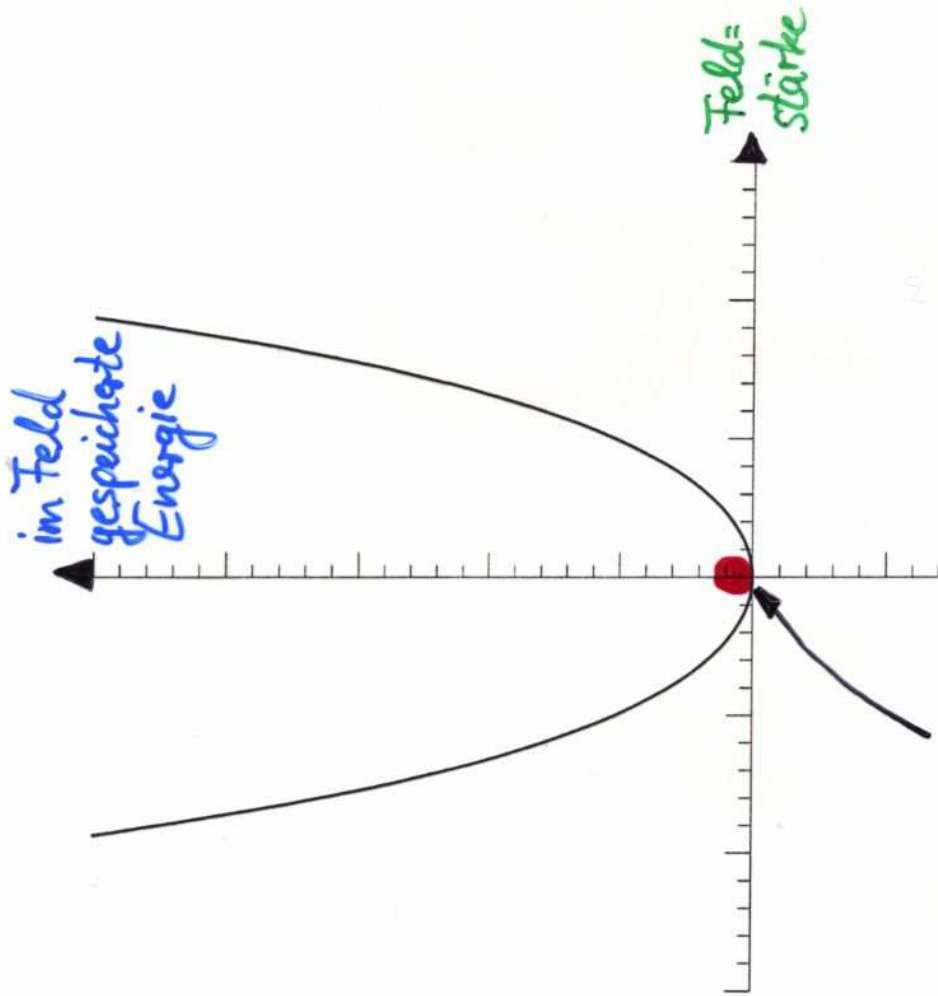
Spontane Symmetriebrechung



Spontaneous symmetry breaking — Salam's analogy.

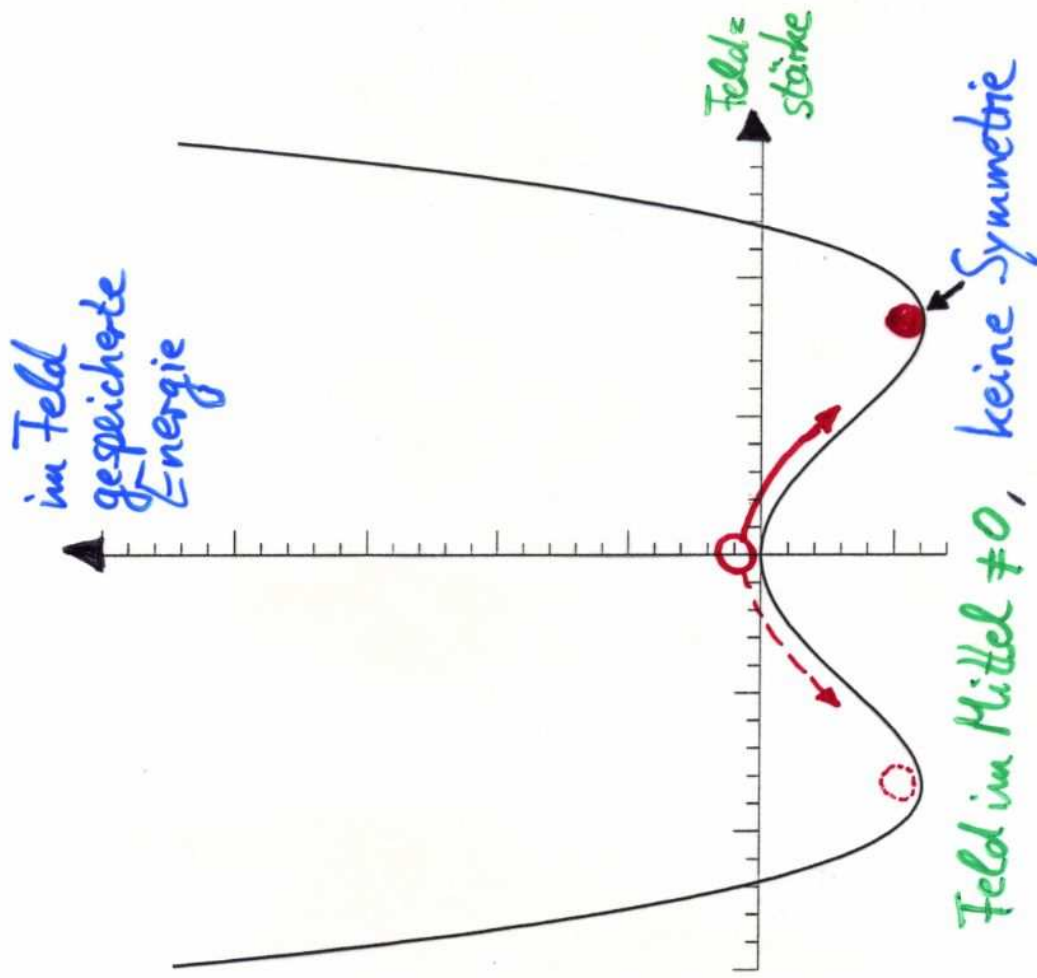
Spontane Symmetriebrechung

Temperatur hoch



im Minimum: Feld im Mittel = 0
Symmetrie um 0

Temperatur niedrig



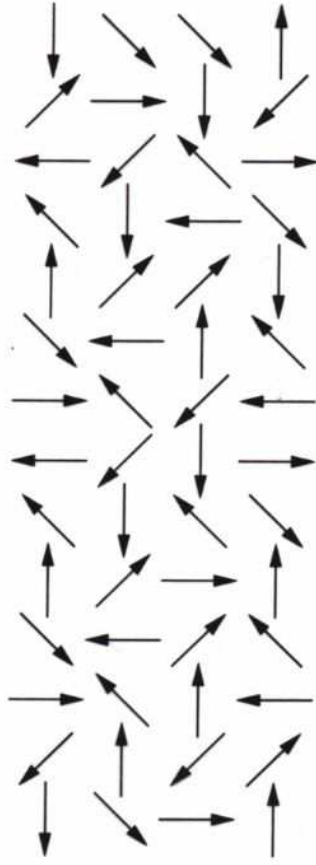
Feld im Mittel $\neq 0$, keine Symmetrie

Spontane Symmetriebrechung

- Analogiebeispiel: Ferromagnetismus

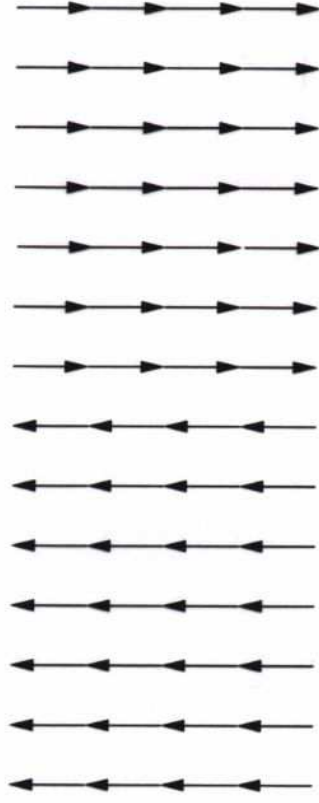
Temperatur hoch

Temperatur niedrig



Magnetfeld im Mittel = 0

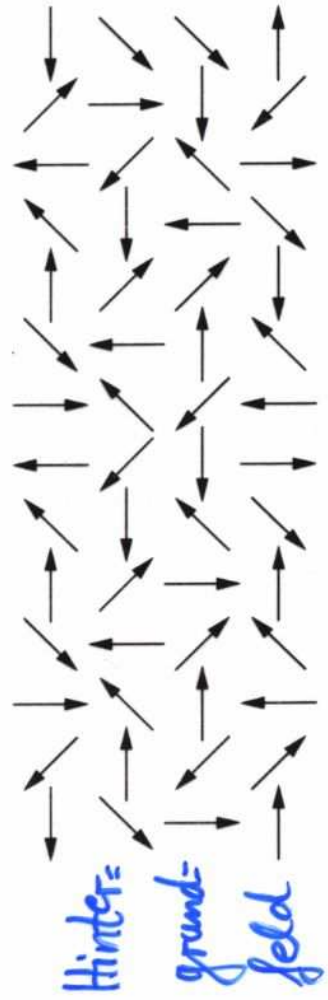
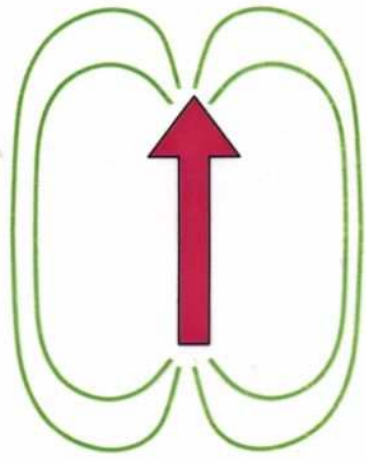
Rotations-symmetrie



Magnetfeld im Mittel $\neq 0$

keine Rotations-symmetrie

Temperatur hoch



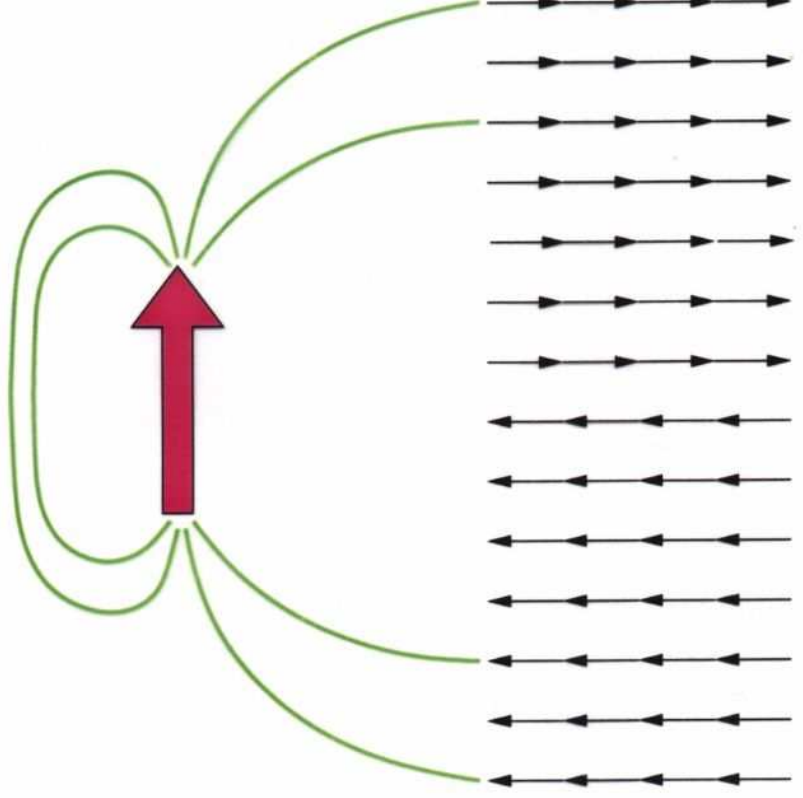
Hintergrundfeld

Magnetfeld im Mittel = 0

keine Wechselwirkung mit Hintergrundfeld

→ gespeicherte Energie im Feld = 0

Temperatur niedrig

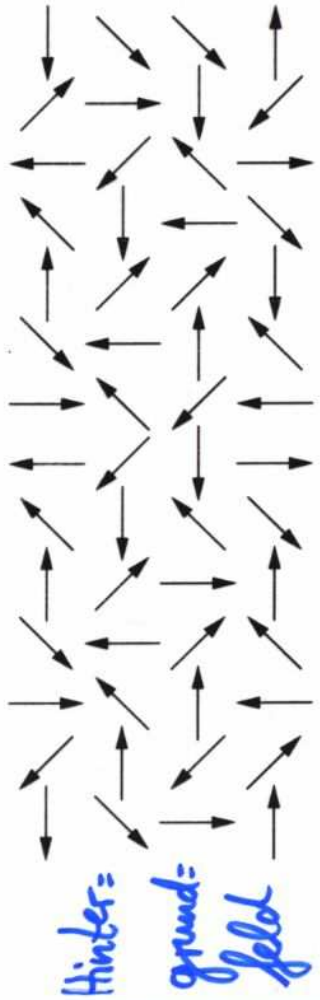


Magnetfeld im Mittel $\neq 0$

Wechselwirkung mit Hintergrundfeld

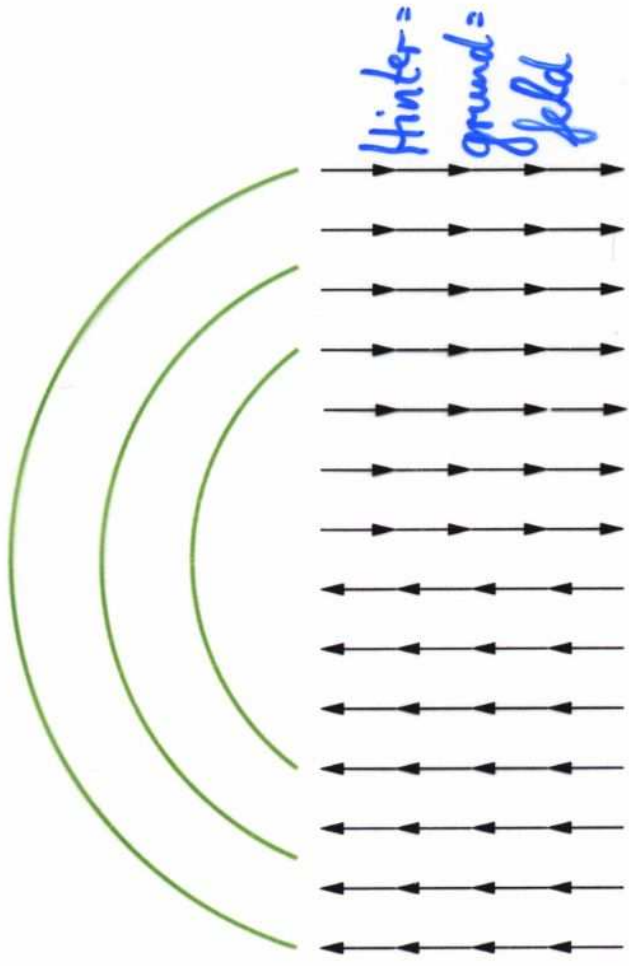
→ gespeicherte Energie im Feld $\neq 0$

Temperatur hoch



Magnetfeld im Mittel = 0

Temperatur niedrig



Magnetfeld im Mittel $\neq 0$

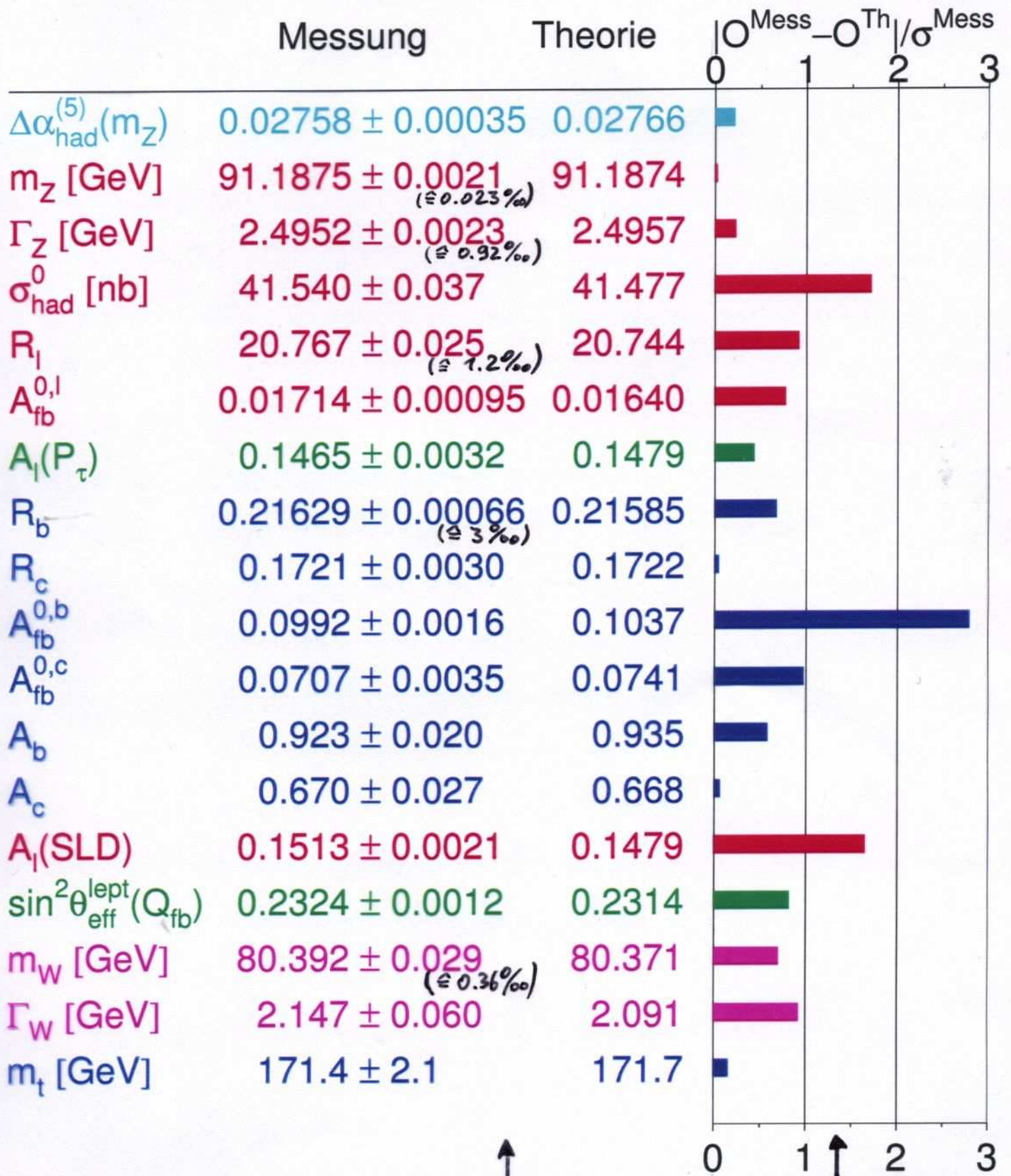
Selbstwechselwirkung
im Hintergrundfeld
→ gespeicherte Energie im Feld $\neq 0$

Elektroschwache Wechselwirkung

- 1961-67: **S. Glashow, A. Salam, S. Weinberg; P. Higgs:**
 - ▶ "Es gibt W^+, W^-, Z -Bosonen"
 - ▶ "Boson-Massen durch spontane Symmetriebrechung und Higgs-Mechanismus"
 - ▶ "Es gibt ein Higgs-Boson"
- 1983: **C. Rubbia et al.:**
Entdeckung der W^+, W^-, Z -Bosonen
- 1989-2000: **LEP-Beschleuniger:** Test dieser Theorie
 - ▶ Massen der W^\pm - und Z -Bosonen
 - ▶ Existenz des Higgs-Bosons?

NB: 3 Parameter \rightarrow W^\pm, Z -Bosonmassen und Kopplungsstärken

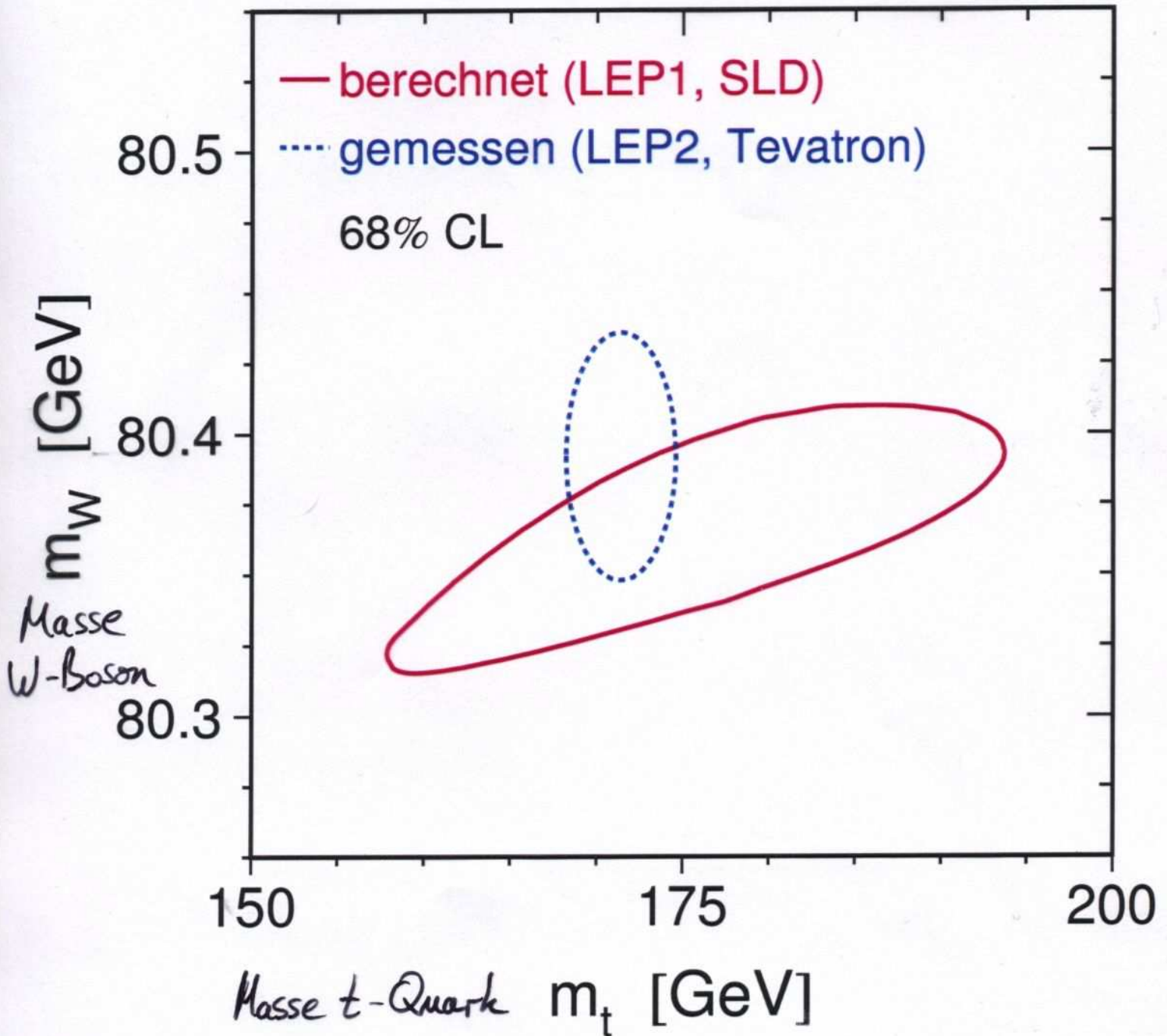
LEP: Präzisionstest der e.schw.Theorie



↑
nahezu perfekte Übereinstimmung.
 zw. Experiment und Theorie auf % genau

Konsistenz der Theorie

- ▶ LEP 1: 3 Parameter (α_{em}, G_F, m_Z) \Rightarrow m_W berechnet
- ▶ LEP 2: bei höherer Energie \Rightarrow m_W gemessen



\Rightarrow Konsistenz!

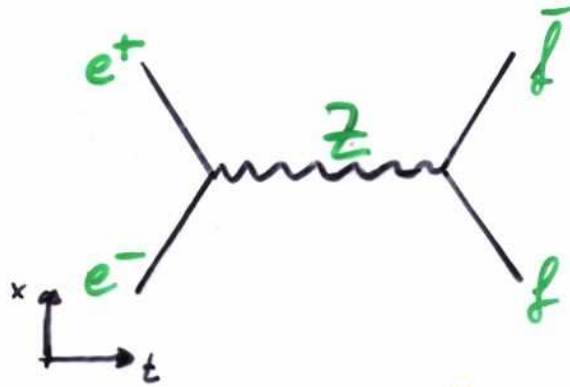
zw. Vorhersage und Beobachtung

Gunst des Vakuums

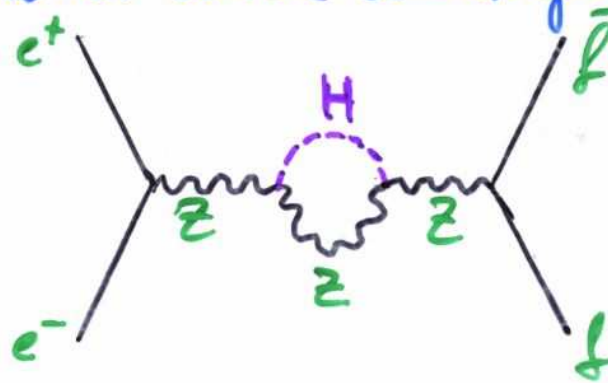
W. Heisenberg: $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$

→ Beiträge durch Quantenfluktuationen im Vakuum

z.B.:

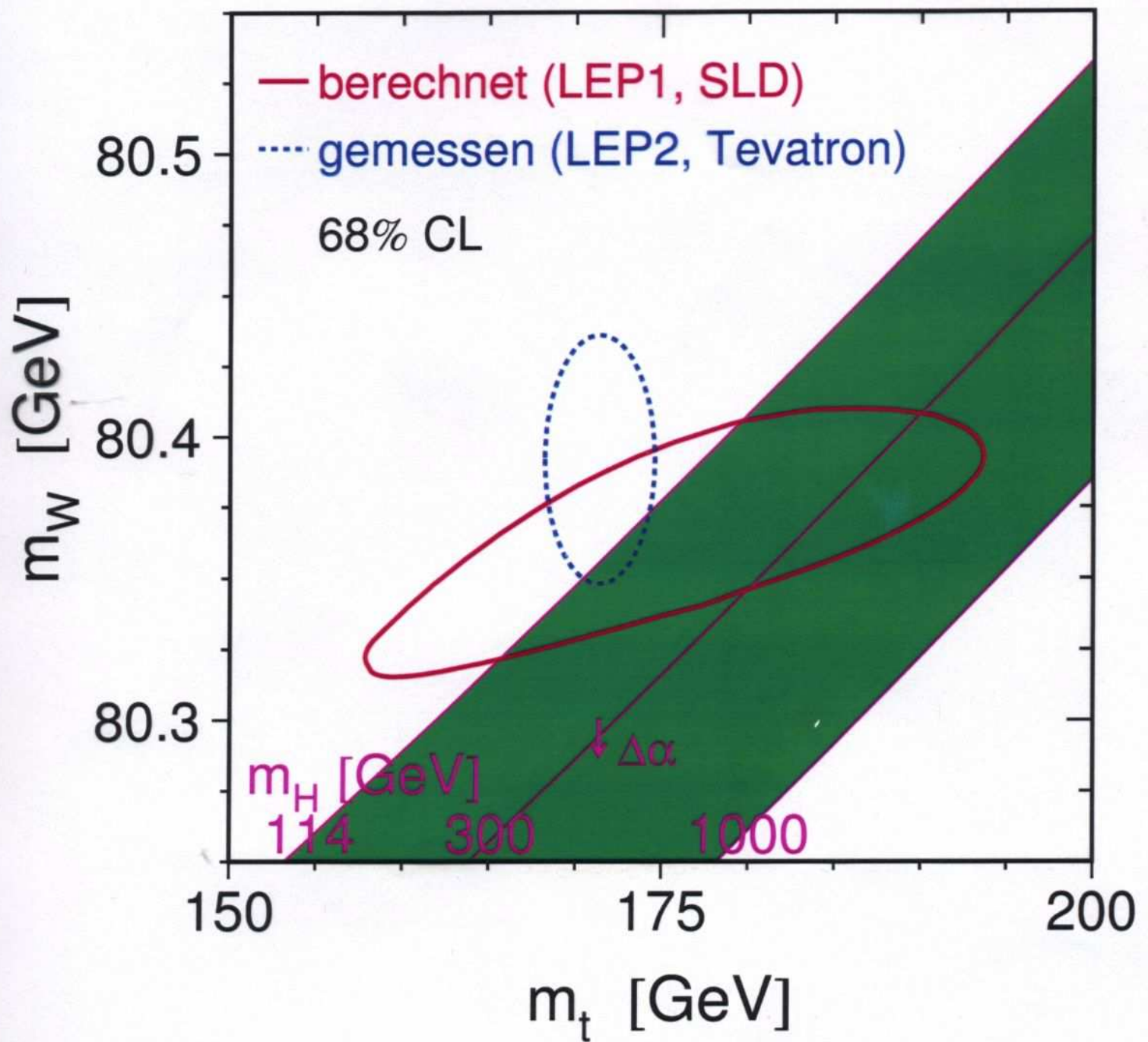


wird durch Quantenfluktuationen beeinflusst



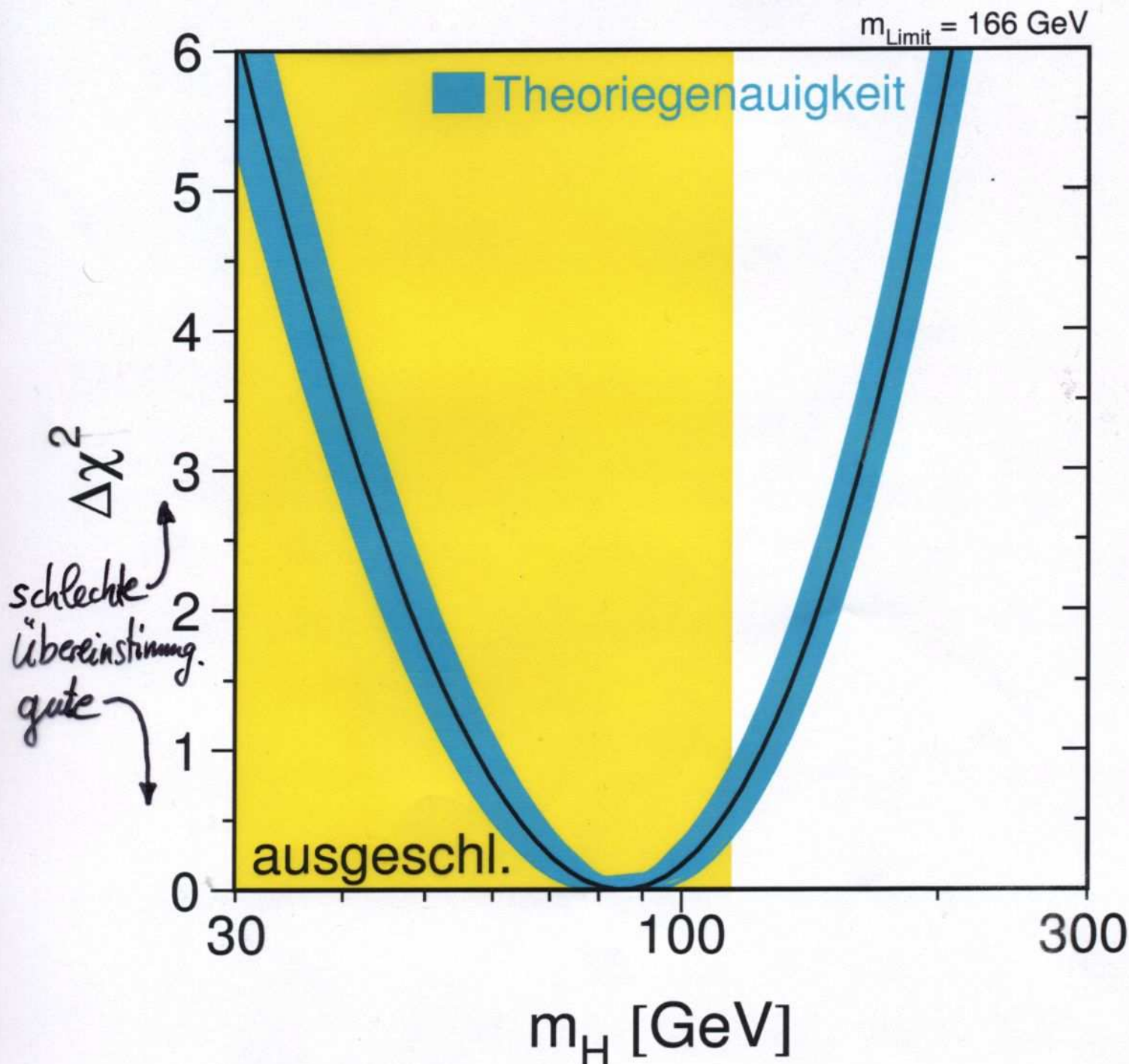
⇒ Masse des Higgs-Bosons trägt bei!

⇒ Aussagen über Higgs-Bosonmasse
aus Präzisionsmessungen möglich!



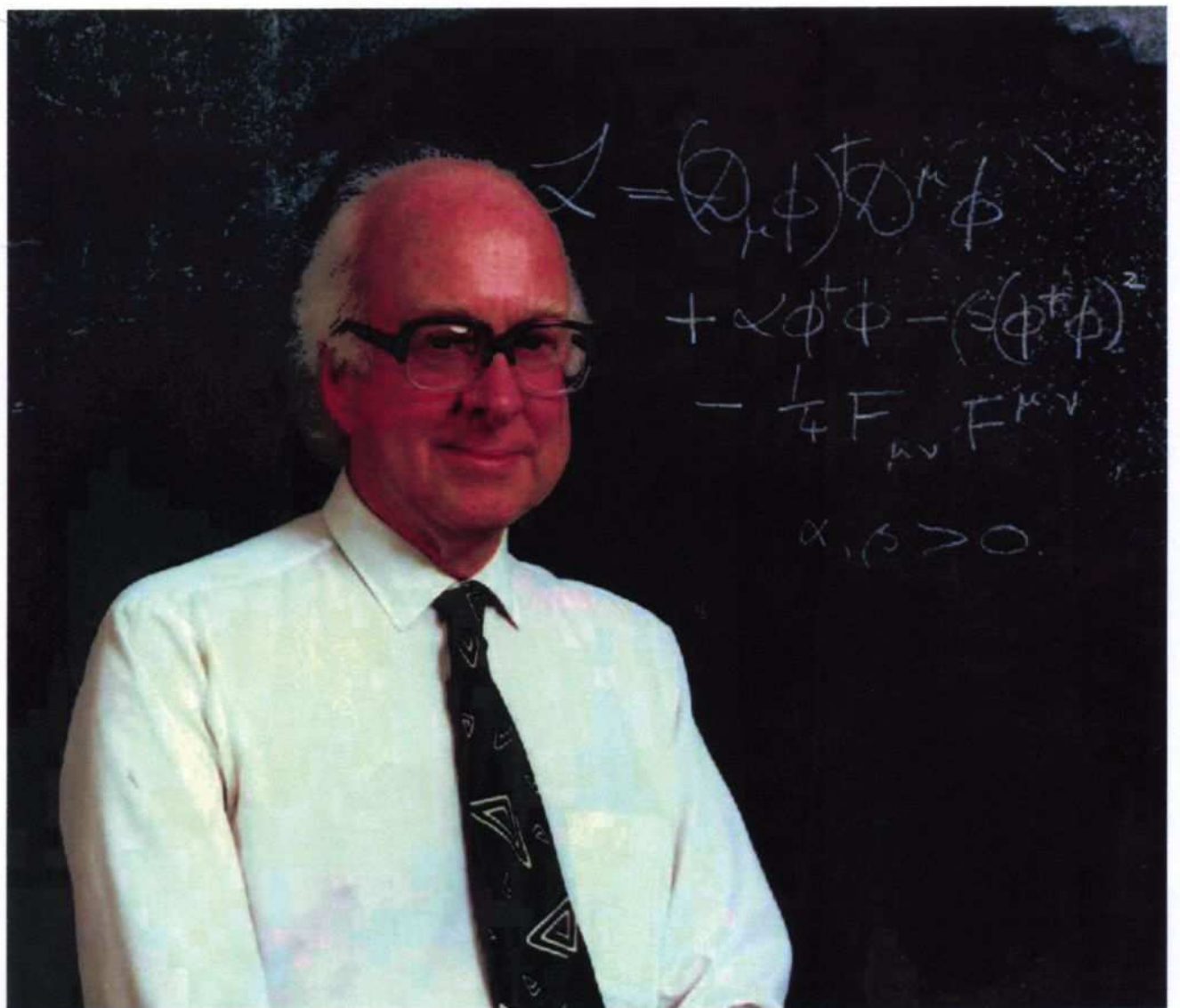
Konsistenz der Theorie

→ Welche Higgs-Bosonmasse passt am besten?



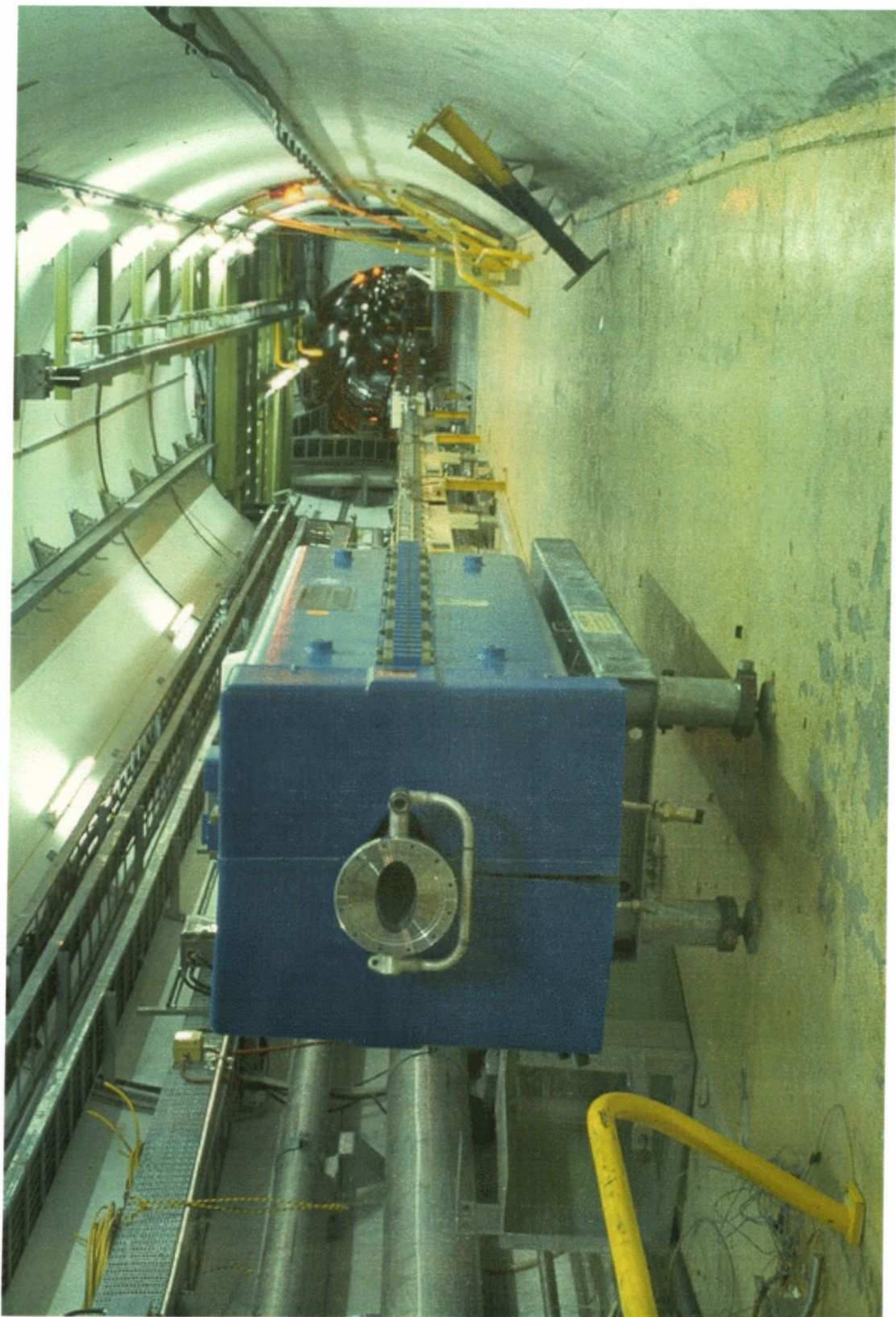
⇒ Wenn elektroschwache Theorie gilt,
dann muss Higgs-Boson leicht sein!
→ direkte Suche nach Higgs-Boson (bei LEP)

The only Higgs found : Peter Higgs



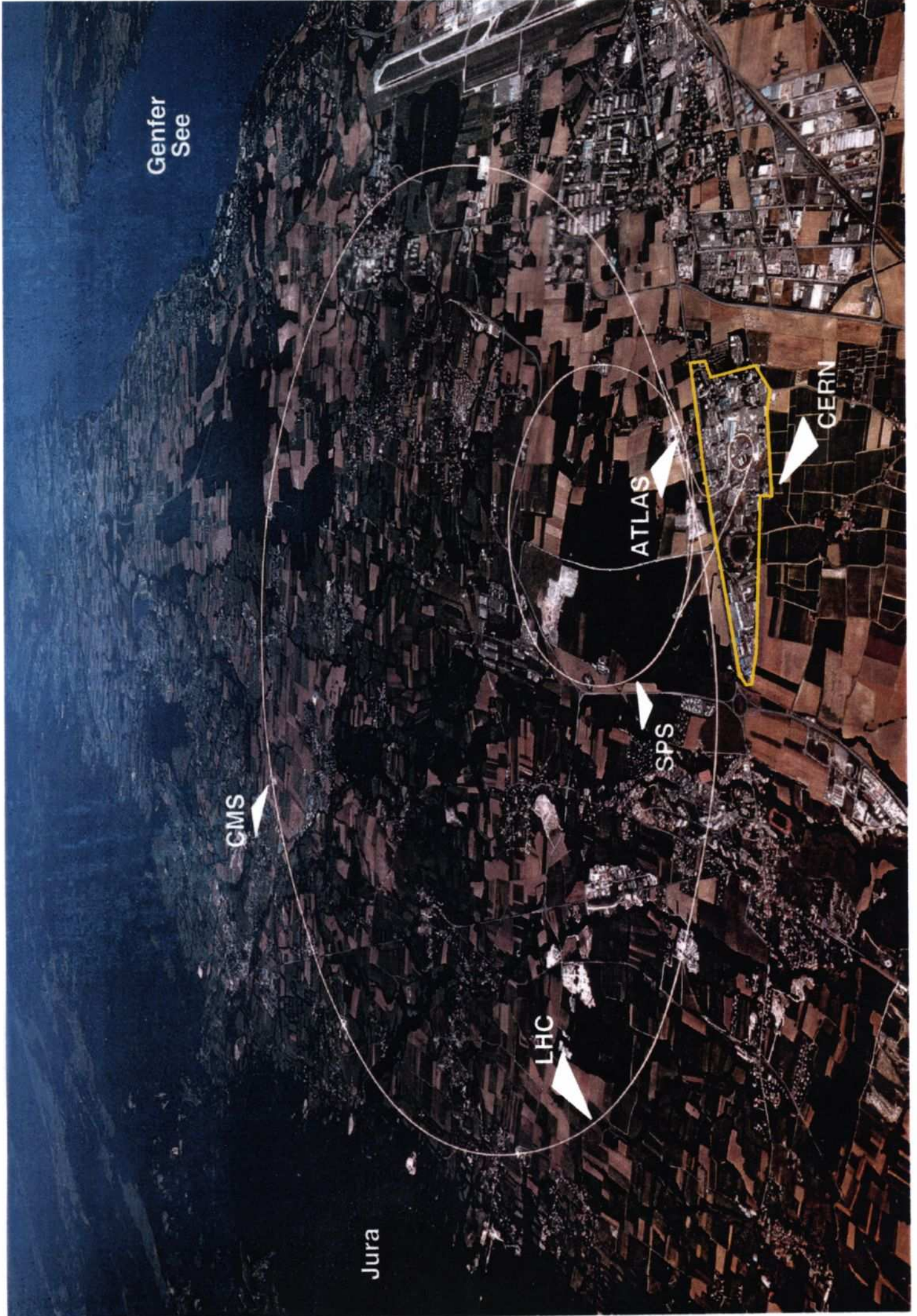
LEP in 2007





LHC - Parameter

| | |
|--|------------------------------|
| Strahlenergie | 7 TeV |
| Dipolmagnetfeld bei max. Strahlenergie | 8.33 Tesla |
| Strahlstrom je Strahl | 0.56 A |
| zeitl. Abstand der Teilchenpakete → Zahl der Pakete im Ring | ~ 25 ns 2 × 2835 |
| Teilchen je Teilchenpaket | $1.1 \cdot 10^{14}$ Protonen |
| Synchrotronstrahlungsverlust | 3.8 kW |
| gespeicherte Strahlenergie | 350 MJ |
| Arbeitstemp. d. Dipolmagnete | 1.9 K (suprafluides Helium) |
| Hochfrequenz d. Beschleunigungsresonatoren | = 400 MHz |
| Füllzeit | ~ 6 min |
| Beschleunigungszeit | ~ 20 min |
| Füllenergie | 450 GeV |
| Zahl der Dipolmagnete (Strom bei max. Feld ≈ 13 kA) | 1232 |



Genfer See

CMS

LHC

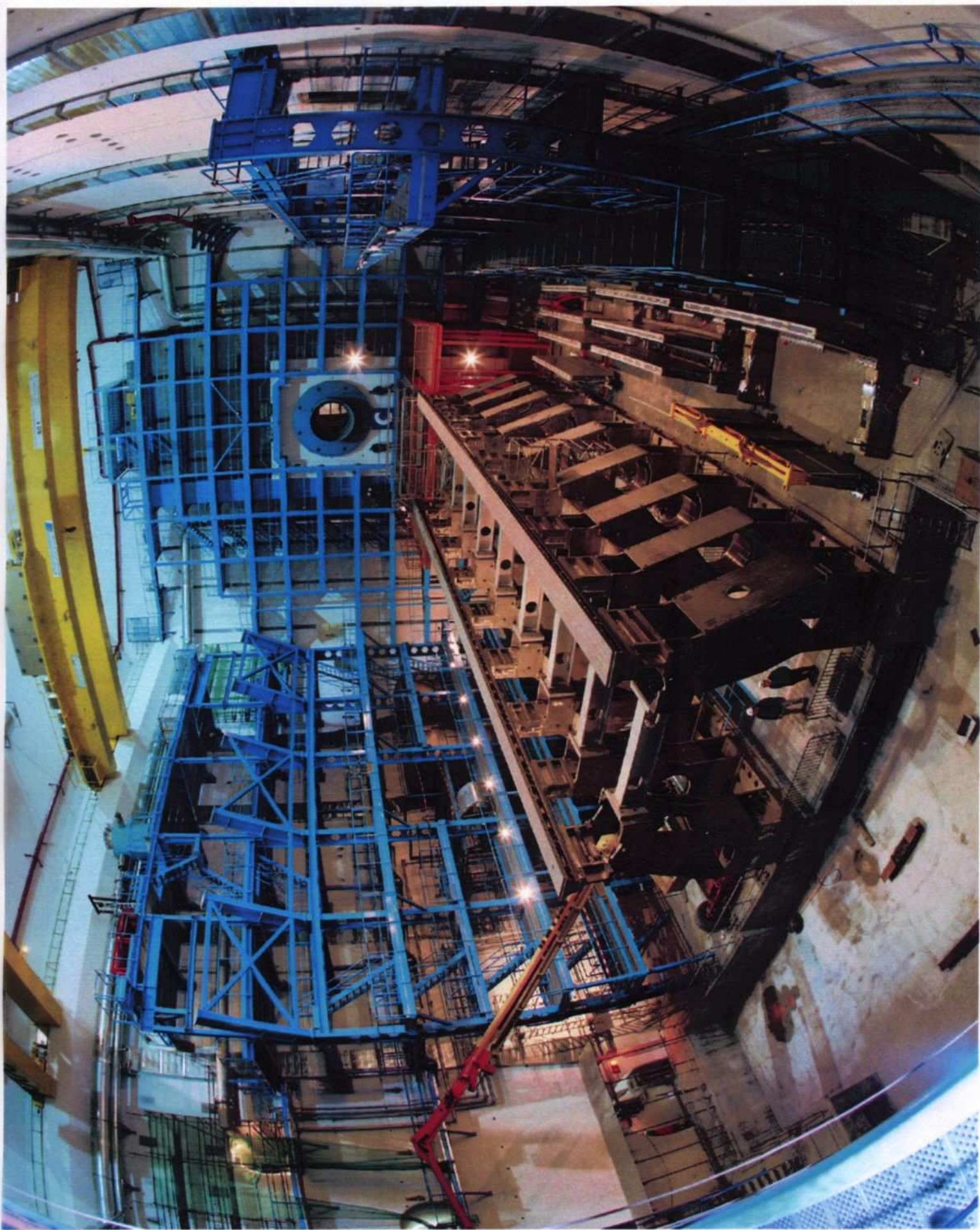
SPS

ATLAS

CERN

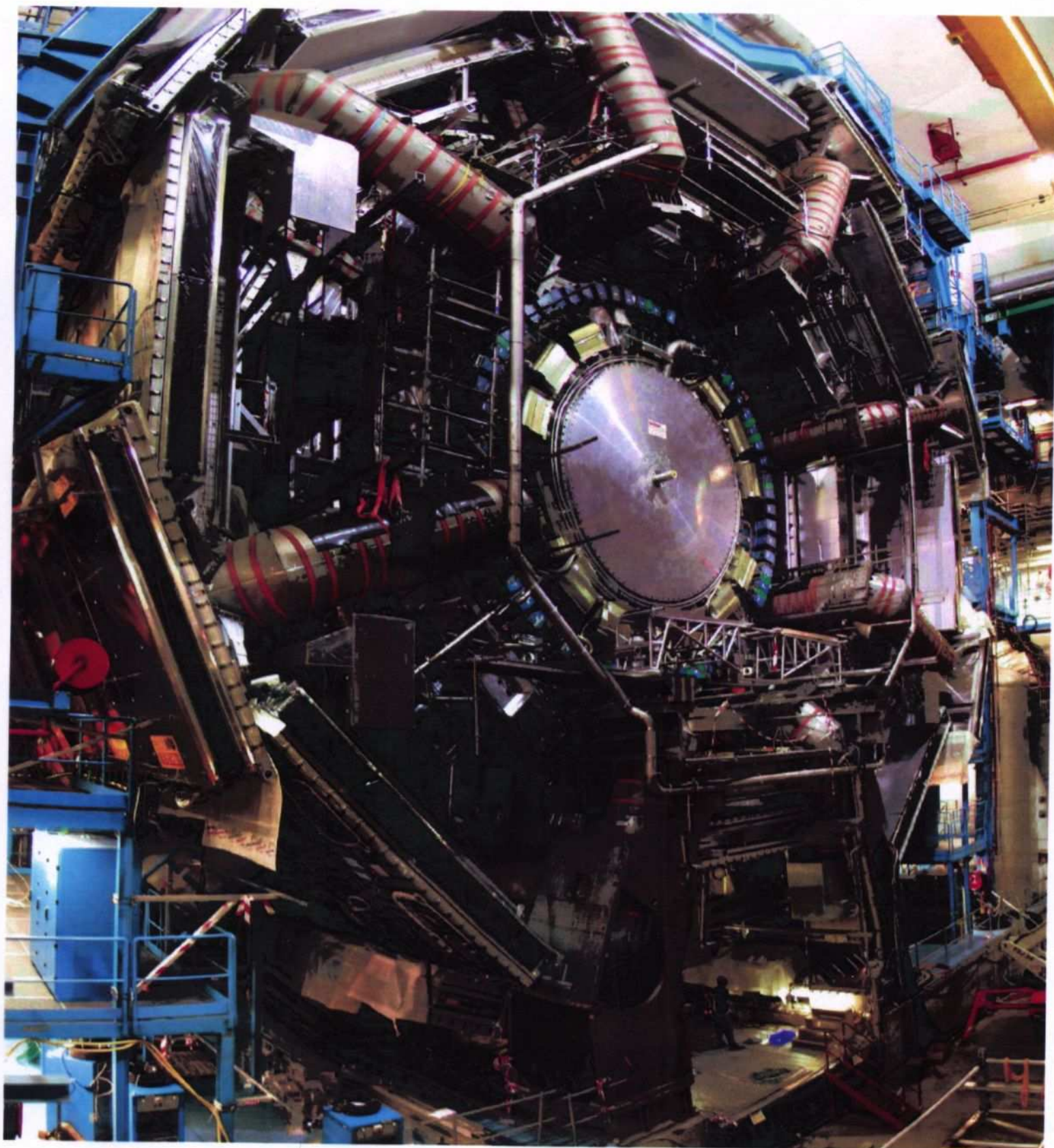
Jura

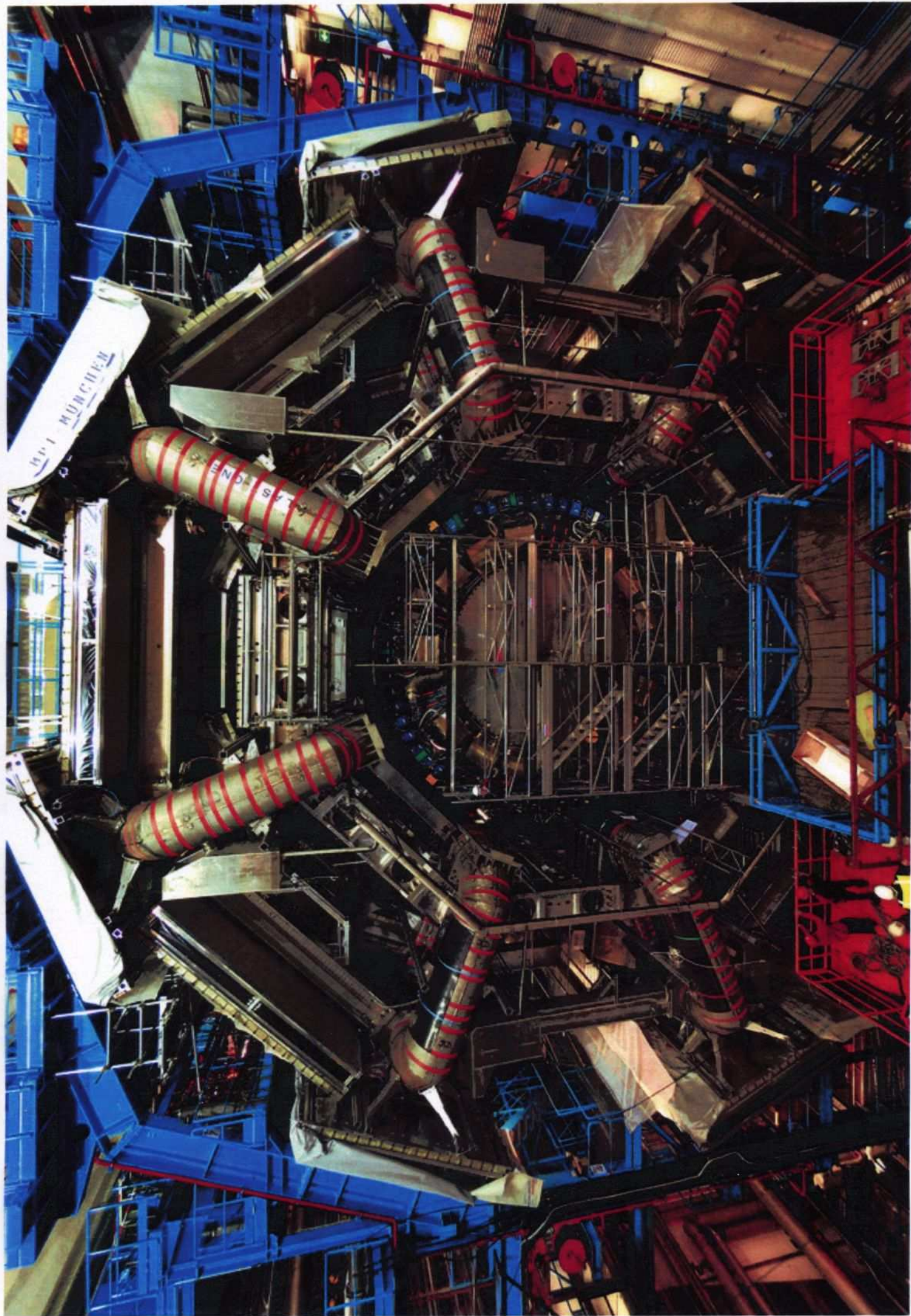




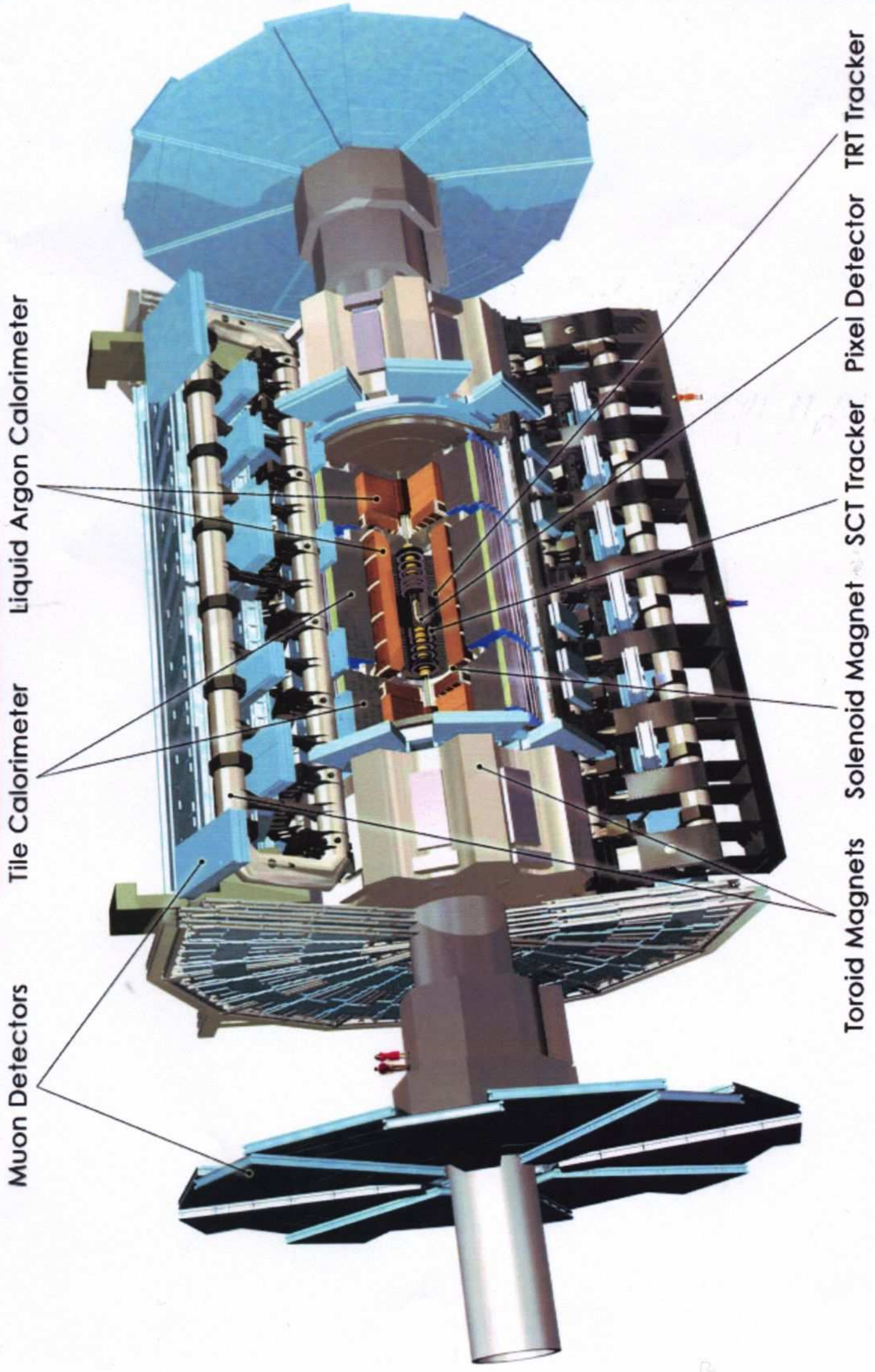
ATLAS
Detektor=
halle

ATLAS - Detektor

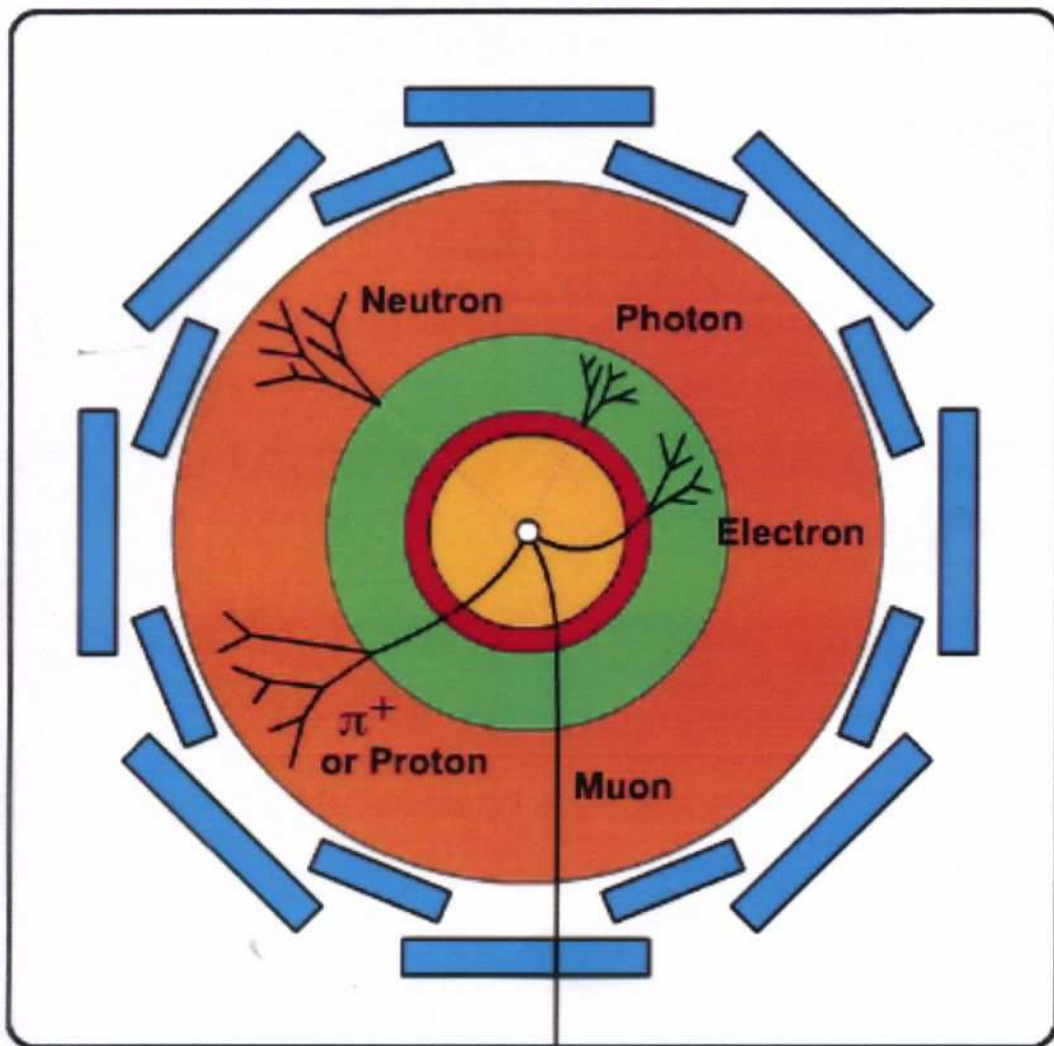










ATLAS-Detektor



Prinzipieller Aufbau des ATLAS-Detektors



-  Muon Detector
-  Hadron Calorimeter
-  Electromagnetic Calorimeter
-  Solenoidal Magnet
-  Tracking Detector
-  Beam Pipe

Teilchenphysik komplett ...

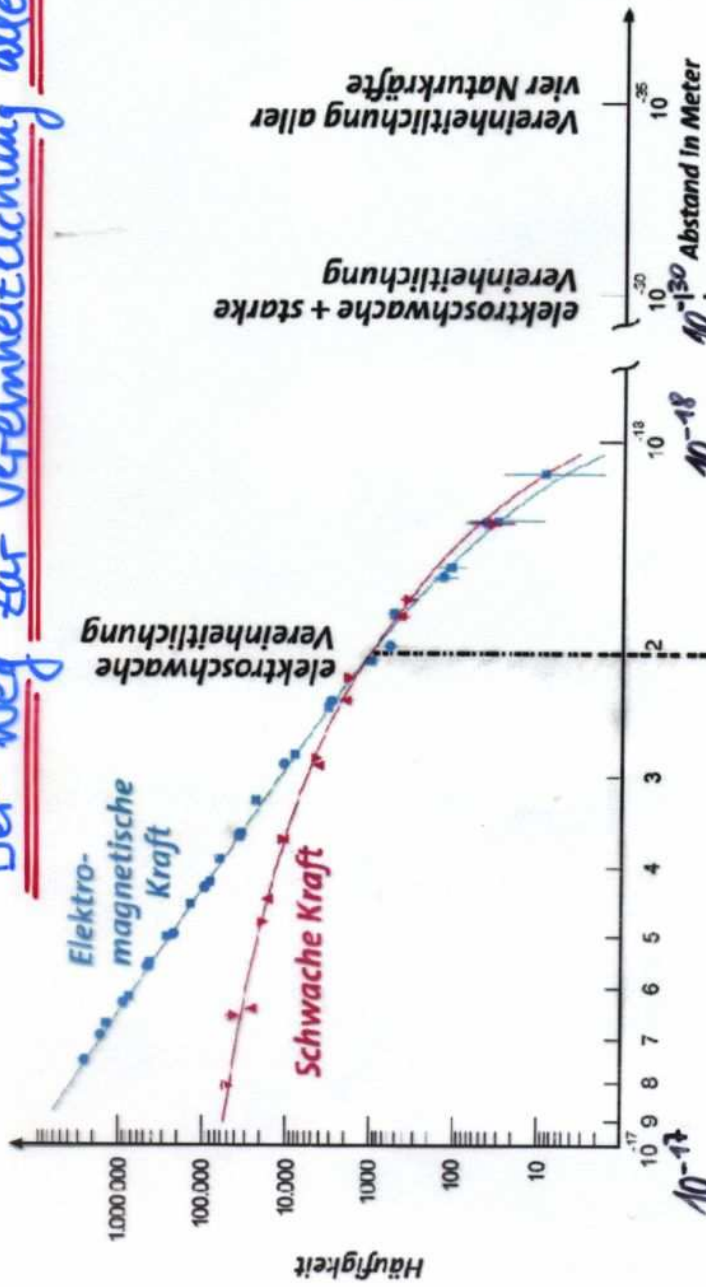
... wenn Higgs-Boson gefunden?

Motivation für Erweiterungen der Theorie

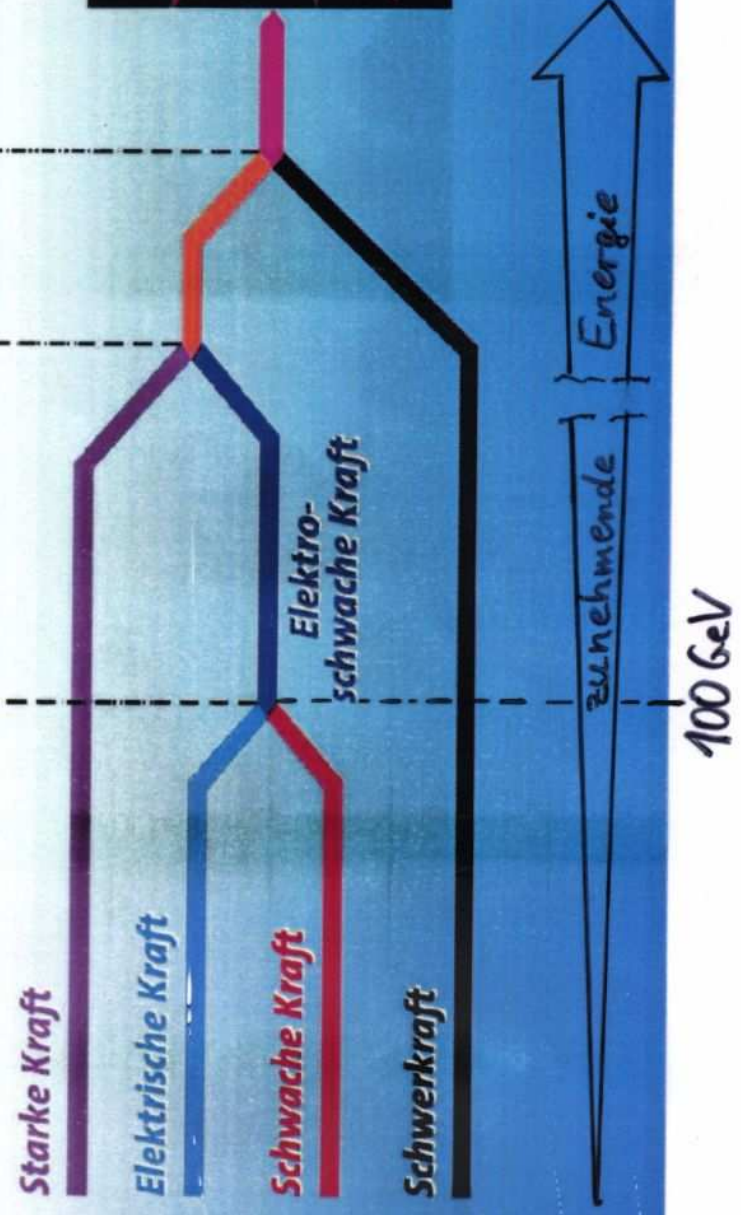
- Anzahl der freien Parameter: **18**
(wenn Neutrinos massiv, dann + 7 weitere Parameter)
- und viele offene Fragen:
 - (1) Warum 6 Quarks und 6 Leptonen?
 - (2) Ist Higgs wirklich Ursprung der Teilchenmassen?
 - (3) Woher kommt die Massenhierarchie? (Neutrinos sehr leicht
t-Quark extrem schwer)
 - (4) Was ist die Ursache der Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Weltall?
 - (5) Was ist die Natur der "Dunklen Materie" im Universum?
 - (6) Gibt es eine weitere Vereinheitlichung der vier Kräfte?
 - (7) Gibt es zusätzliche Raumdimensionen?
...
- und Probleme:

Theorie versagt bei extrem hohen Energien

Der Weg zur Vereinheitlichung aller Kräfte?



Urknall



Vereinheitlichung der Kräfte?

- Kräfte werden durch Kopplungsstärken α beschrieben

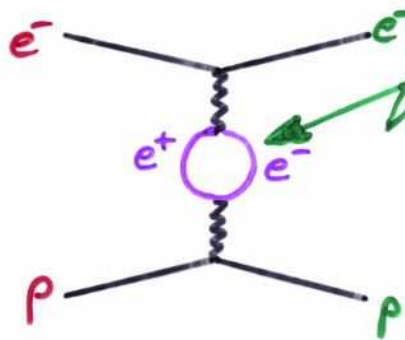
el. magn. Kraft α_{em} Feinstrukturkonstante

starke Kraft α_s

schwache Kraft α_w

- Stärke der Kräfte ist energieabhängig

Grund: \blacktriangleright Vakuumpolarisation



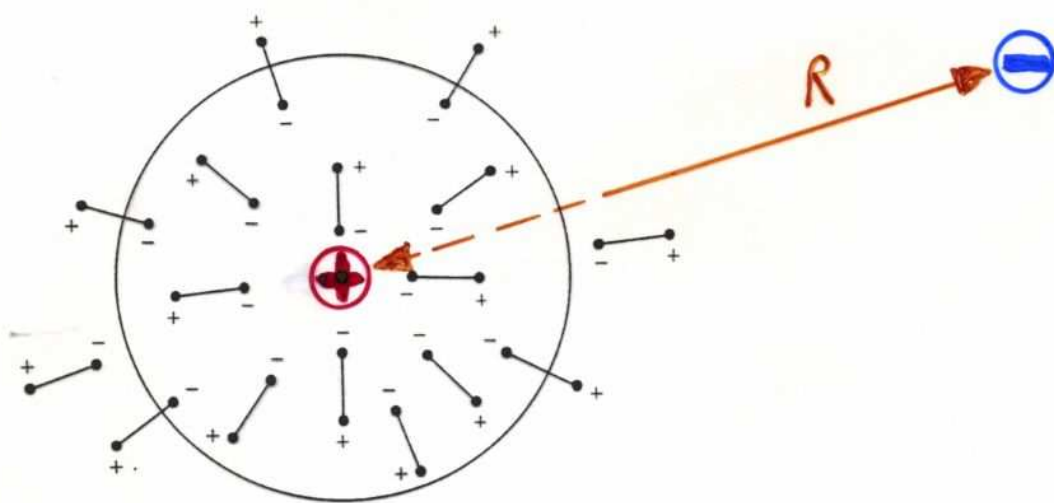
\blacktriangleright Renormierung der Ladung

NB: Schon in Atomphysik bekannt: Lamb-Shift

- Energieabhängigkeit in Experiment gemessen

Vakuum polarisation

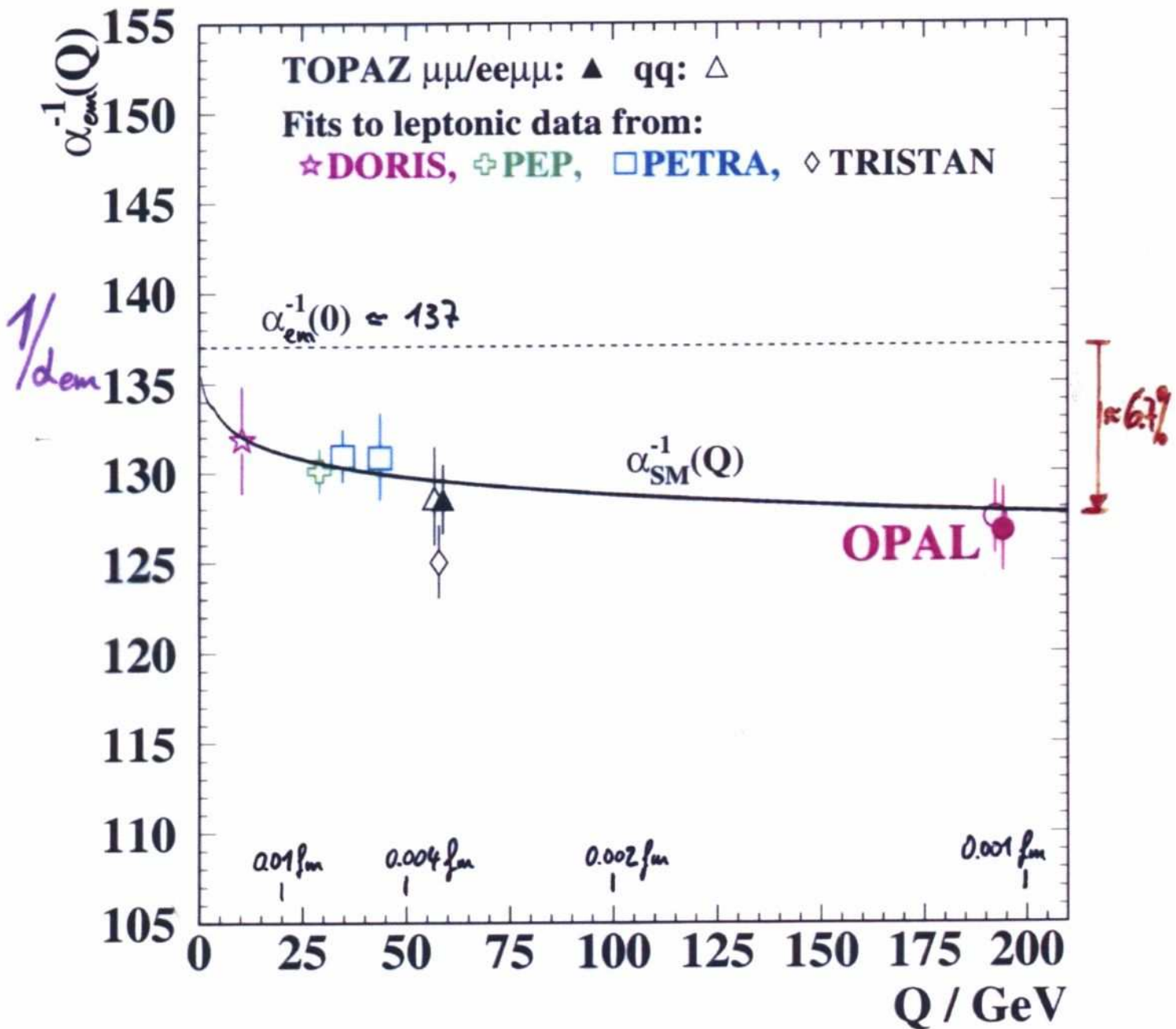
- Ladungen umgeben von virtuellen Ladungsträgerpaaren



- Vakuum polarisation schirmt "nackte" Ladung[⊕] ab
 - beobachtbare Ladung hängt vom Abstand R ab
 - Stärke der Kraft hängt vom Abstand R ab
 - Stärke der Kraft hängt von Energie ab

Elektromagn. Kopplung vs. Abstand

$$\alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c}$$

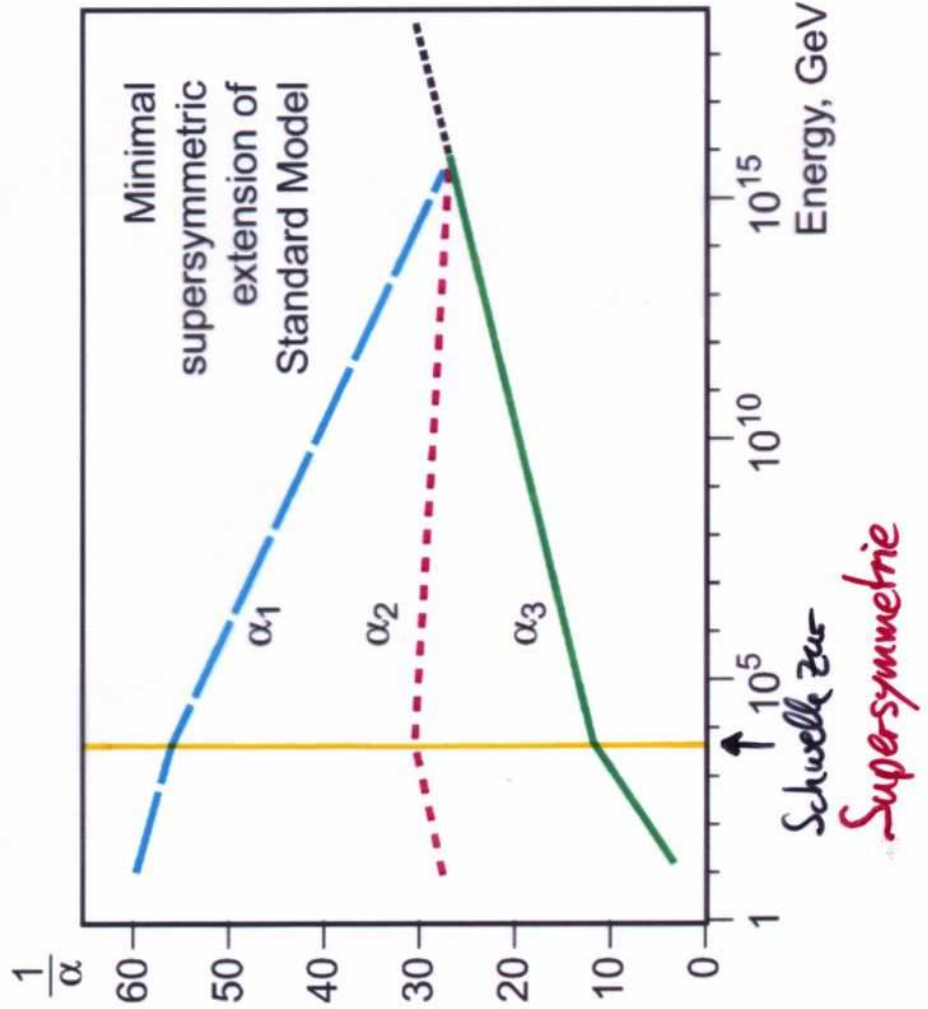
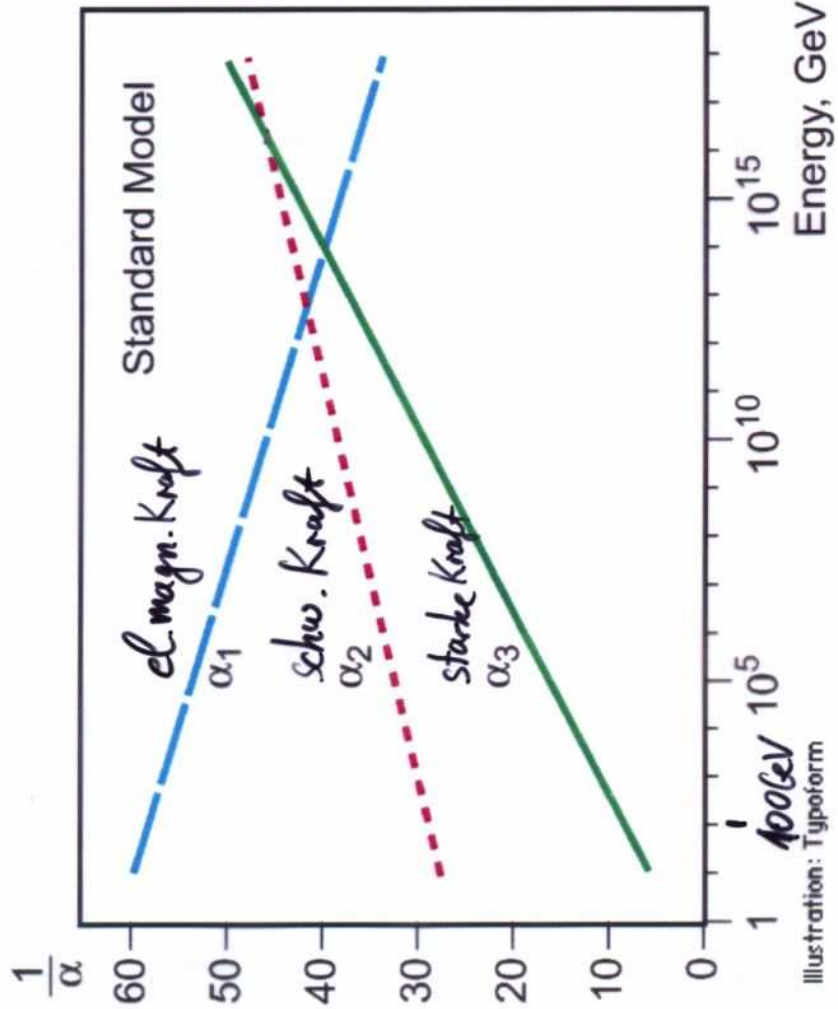


\Rightarrow elektr. Ladung $e = e(Q^2)$

Vereinheitlichung der Kräfte?

- Extrapolation der Kopplungsstärken α
zu extremen Energien
- Startpunkt: $Q = 100 \text{ GeV}$
- Annäherung der Kopplungsstärken bei $Q \approx 10^{14} \text{ GeV}$
- Vereinigung der Kopplungen durch geeignete Zusätzl.
Schwelle bei $\approx 10^3 \text{ GeV}$
Vereinigung bei $\approx 10^{16} \text{ GeV}$
- Schwelle $\hat{=}$ Energiebereich neuer physikal. Prozesse
→ Supersymmetrie!

Vereinheitlichung der Kräfte?



Supersymmetrie

... zwischen Bosonen und Fermionen
(\cong Kräfte) (\cong Materie)

- bisheriges Modell super-symmetr. Modell

| | | |
|-------------|-----------------------|---------------------------------|
| Fermion f | \longleftrightarrow | skalares Fermion \tilde{f} |
| Boson b | \longleftrightarrow | fermionisches Boson \tilde{b} |

- Eigenschaften der SUSY-Partnerteilchen

- ▶ identische Eigenschaften wie Standard-Teilchen
bis auf Spin

- ▶ Unterschied im Spin: $\frac{1}{2}$

z.B.: Elektronenspin = $\frac{1}{2}\hbar$ \longleftrightarrow skalares Elektron Spin = $0\hbar$

- ▶ leichtestes der SUSY-Partnerteilchen (LSP)

ist stabil! (\leadsto Kandidat für "Dunkle Materie"?)

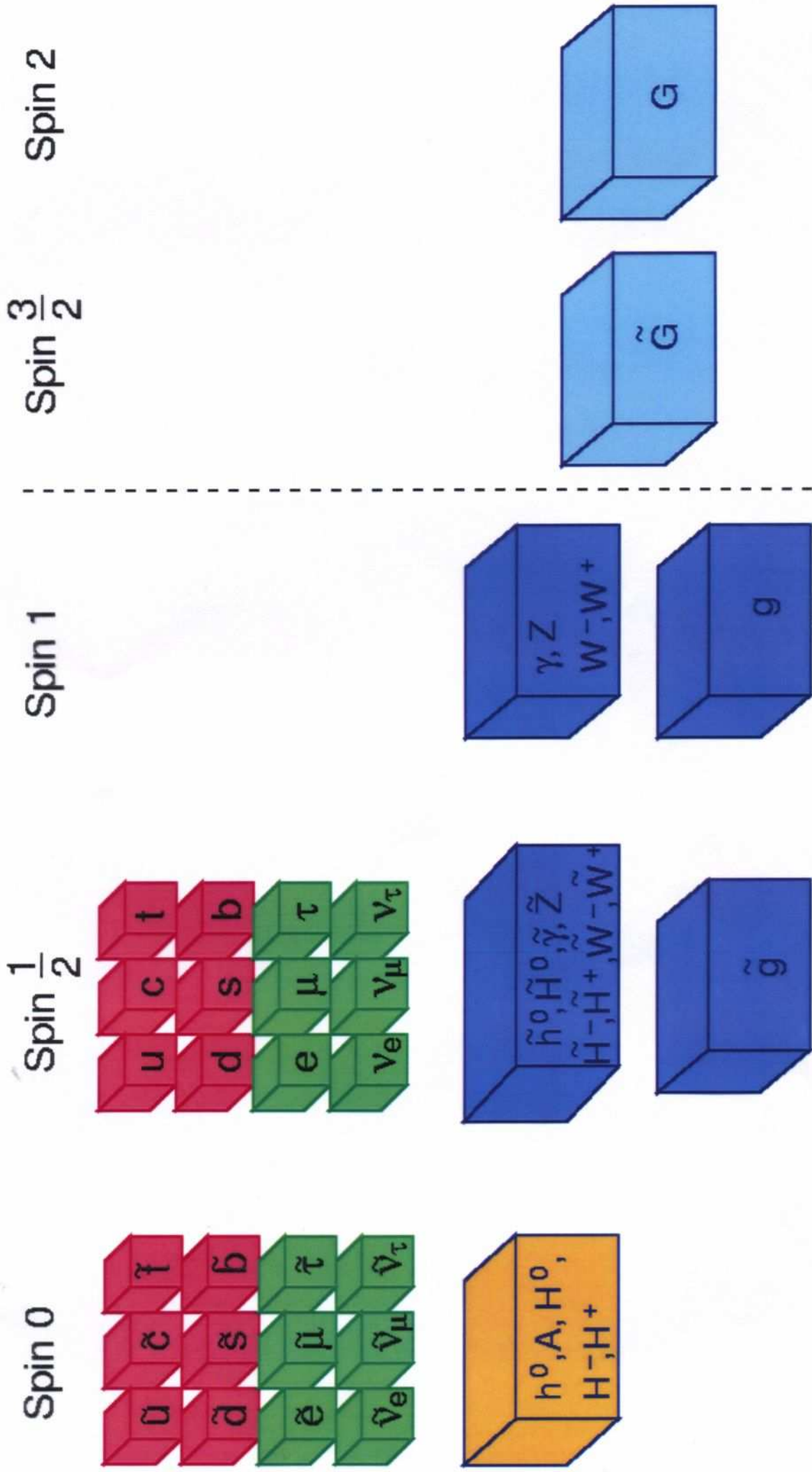
Aber: Supersymmetrie ist gebrochen

kein skalares Elektron mit Elektronenmasse beobachtet

\Rightarrow SUSY-Partnerteilchen viel schwerer als Standard-Teilchen

Standard-Teilchen und SUSY-Partner

$Q|fermion\rangle = |boson\rangle, \quad Q|boson\rangle = |fermion\rangle$



Supersymmetrie

Vorteile:

- Enthält präzise getestete Standard-Theorie
- kann berechnet werden
- bringt Vereinigung der elektromagn., schwachen und starken Kräfte
- hilft, theoretische Probleme der Standard-Theorie zu lösen
- bietet Teilchen zur Erklärung der "Dunklen Materie"
- sagt viele neue Teilchen vorher

...

Supersymmetrie

Nachteile:

- Symmetrie offensichtlich gebrochen (Mechanismus?)
- zusätzlich 106 Parameter
(Massen der SUSY-Partnerpartikel, ...)
- sagt Reaktionen vorher, die nicht beobachtet werden oder viel schwächer sind

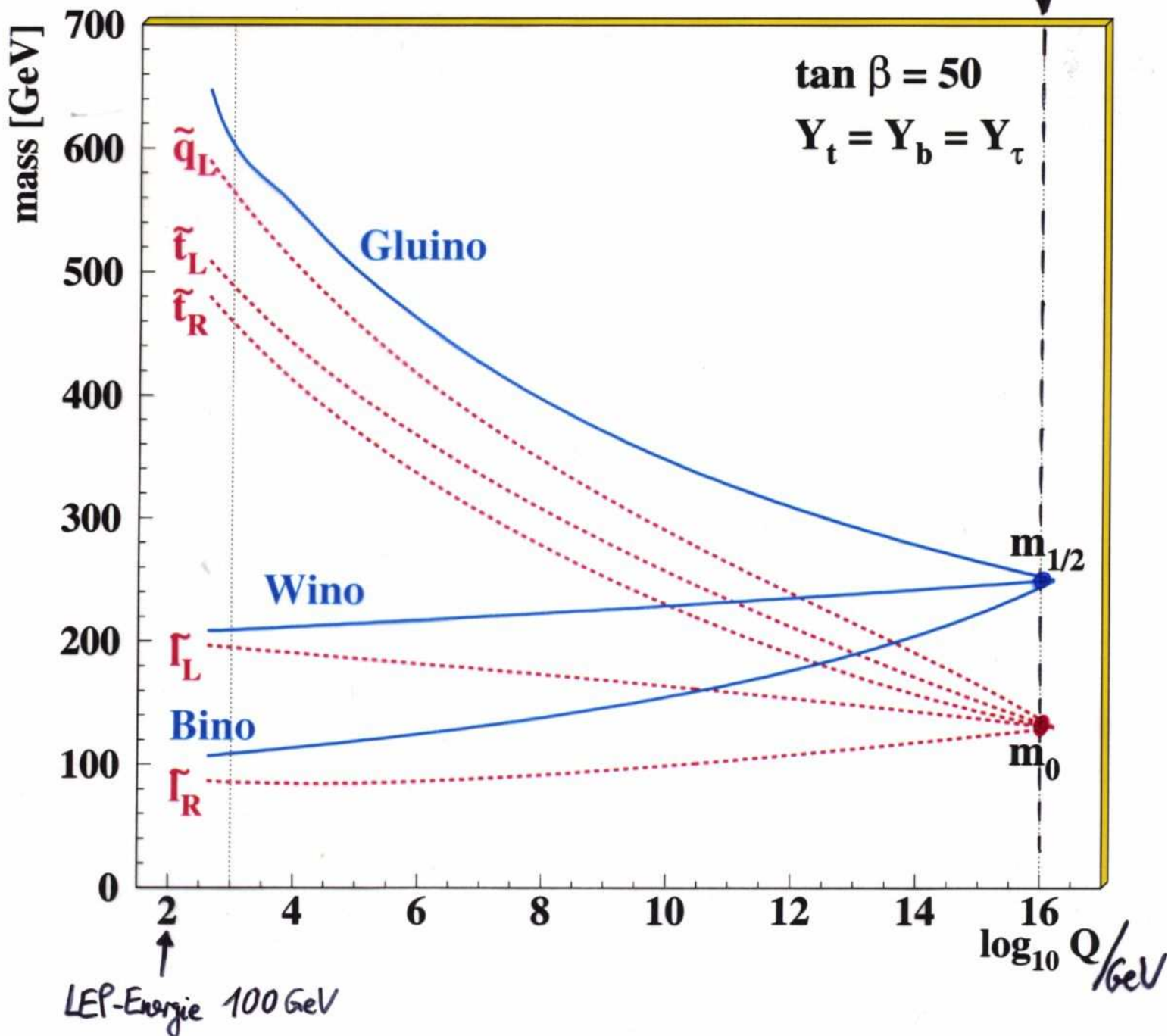
⇒ Nahezu gesamter 106+18 dimensionaler Parameterraum der SUSY-Theorie ausgeschlossen!

- weitere Reduzierung der Parameter: Annahmen
 - ▶ gemeinsamer Massenwert aller SUSY-Partner von W^\pm, Z, γ, g bei Vereinigungsenergie \rightarrow $m_{1/2}$
 - ▶ Vereinigung der Massen aller skalaren Fermionen bei Vereinigungsenergie \rightarrow m_0

Massen der SUSY-Partnerteilchen

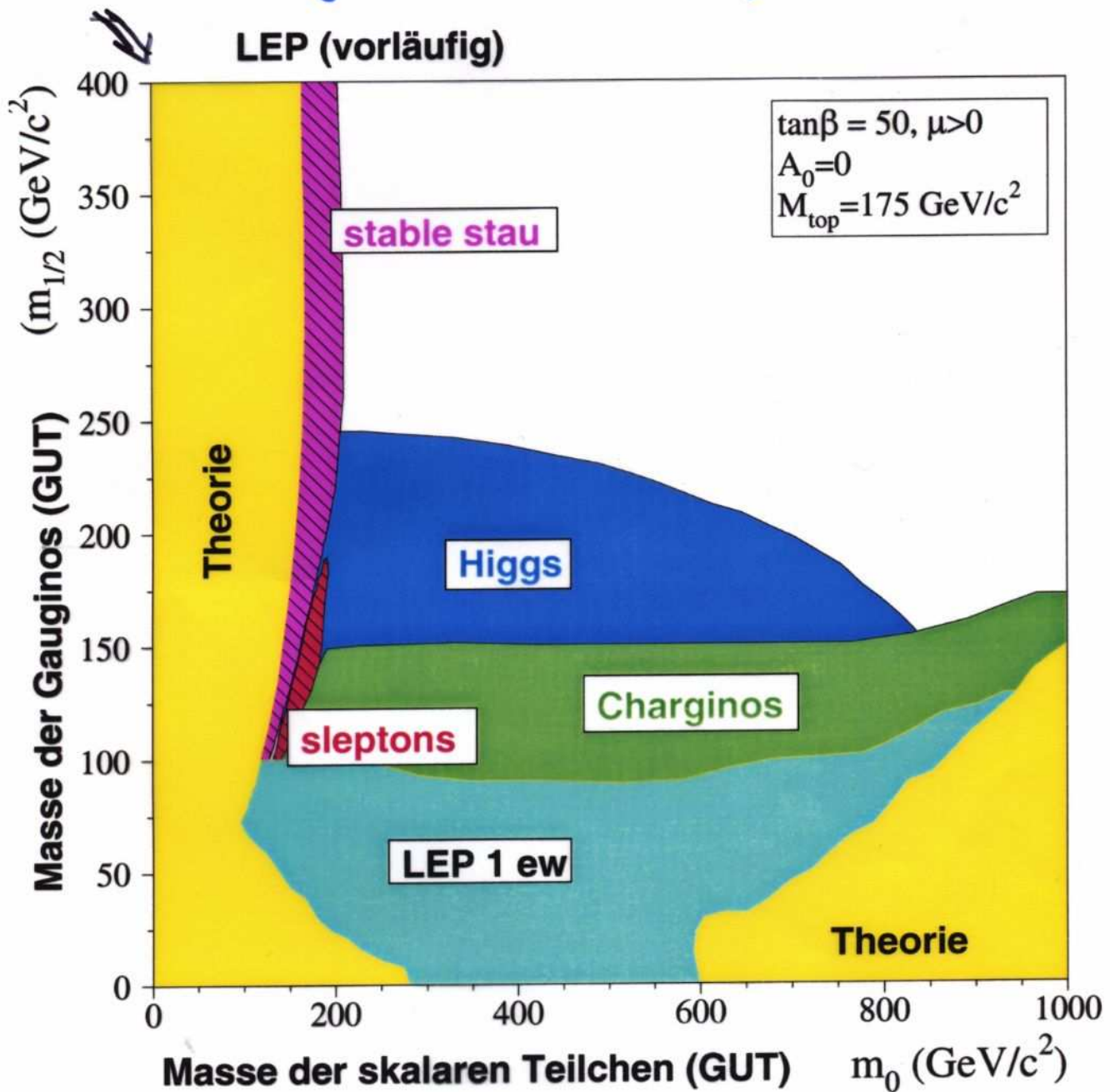
... können durch vereinfachende Annahmen für die Werte gewisser Parameter berechnet werden, z.B.

Startpunkt $m_{1/2}$ und m_0 bei 10^{16} GeV



Suche nach Supersymmetrie

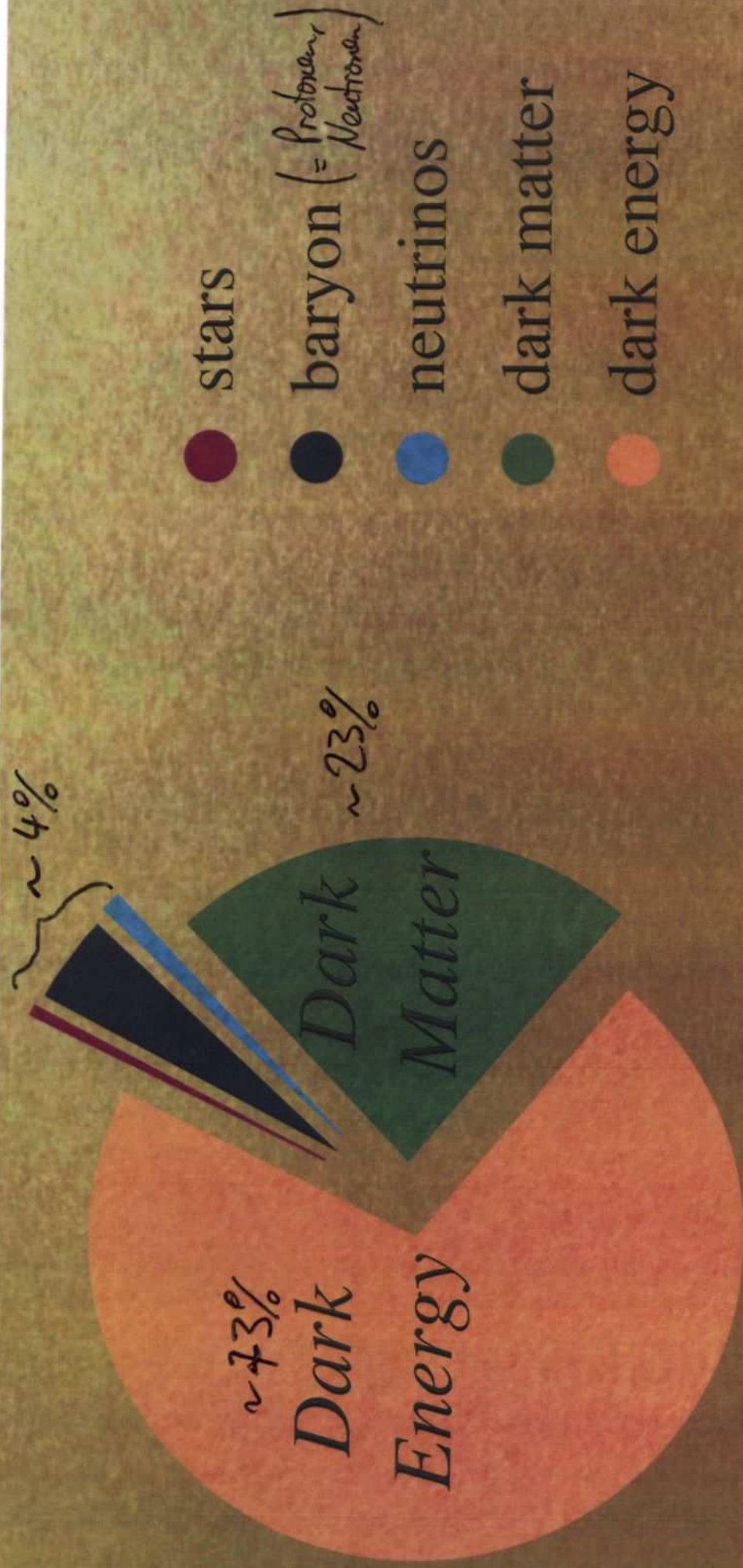
... bislang ohne Anzeichen für SUSY-Teilchen



- viele verschiedene Einzelanalysen der Messdaten tragen zum Ausschluss der Massenbereiche in $m_0, m_{1/2}$ bei.
- alle zusammengefasst: LSP-Teilchen schwerer als $50 \frac{\text{GeV}}{c^2}$

SUSY und Dunkle Materie

- Astrophysik: Universum besteht aus:



- Leichtestes SUSY-Teilchen: stabil, massiv, gering wechselwirkend
⇒ "idealer" Kandidat für Dunkle Materie (so gen. WIMP - Teilchen = weakly interacting massive particle)

SUSY und Dunkle Materie

- Astrophysik: Universum besteht aus:

- ~27% Materie

- ▶ ~4% baryon. Materie

- ▶ ~23% nicht-baryon. " } Dunkle Materie

- ~73% Dunkle Energie

- Nicht-Baryon. Materie:

- ▷ Neutrinos (zu leicht)

- ▷ Axionen (zur Lösung des starken CP-Problems)

- ▷ WIMP-Teilchen ($\hat{=}$ Weakly Interacting Massive Particles)

- Leichtestes SUSY-Teilchen (LSP)

- ▷ stabil (wenn R-Parität erhalten)

- ▷ massiv (≈ 100 GeV)

- ▷ gering wechselwirkend

⇒ "idealer" WIMP-Kandidat

→ Suche nach WIMP-Teilchen aus Urknall

Zusammenfassung & Ausblick

• Urknall im Teilchenphysiklabor

▷ Hochenergie-Teilchenbeschleuniger

Untersuchung der Physik 10^{-12} s nach Urknall

▷ Standard-Theorie der Teilchenphysik:

exzellente Übereinstimmung mit experimentellen
Resultaten

• Ursprung der Masse

▷ Higgs-Mechanismus und spontane Symmetriebrechung

▷ Higgs-Teilchen noch nicht entdeckt

▷ Masse bereits stark eingegrenzt

• Super-symmetrie (Materie-Kraft-Symmetrie)

▷ erlaubt Vereinheitlichung dreier Kräfte

▷ jedes Standard-Teilchen erhält SUSY-Partner

▷ SUSY-Teilchen noch nicht entdeckt

Ausblick & Outreach

- nächste Zukunft der Teilchenphysik
 - ▷ LHC-Beschleuniger ab Ende 2007
 - ▷ 7-fach höhere Energie als derzeit leistungsfähigster Beschleuniger (TeVatron, FNAL)
 - ▷ kann Higgs-Boson, Super-symmetrie, Extra-Dimensionen, ... entdecken!
- Outreach der (dt.) Teilchenphysik
 - ▷ <http://www.teilchenphysik.org>
Informations- und Schulmaterial
 - ▷ Besuchsprogramme für Schulklassen
 - + DESY, Hamburg
 - + CERN, Genf

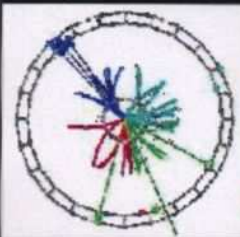
http://www.teilchenphysik.de

File Edit View Go Bookmarks Tools Window Help

Back Forward Reload Stop <http://www.teilchenphysik.org/schulmaterial.htm>

Search Print

Lehrstuhl Schall... LEP EW WG Pl... ATLAS PHOTOS lehrerfortbildung... Schulmaterialien Multimedia, etc. Large Hadron C...



Teilchenphysik Deutschland

Die deutschen Web Seiten der European Particle Physics Outreach Group

- Startseite
- Teilchenphysik für alle
- Teilchenphysik nach Themen
- Teilchenphysik in der Schule
- Materialien**
- Organisation
- Institute
- Kontakte
- Aktuelles
- Impressum

Teilchenphysik in der Schule Schulmaterialien



EPS High Energy Physics Outreach Prize 2002 for bringing high energy particle physics into schools in Germany

Web-Basierte Lernsysteme



Teilchenphysik in der Sek.I
(Universität Bonn)

Eine Reise durch die Welt der kleinsten Teilchen



Teilchenphysik im Kontext
(Universität Bonn)

Kosmologie und Medizin



Teilchenphysik in der Schule
(Gymnasium am Ölberg,

Königswinter-Oberpleis)

Von Schülern für Schüler



Grundlagen der Teilchenphysik
(Uni Erlangen)

Interaktive Animationen, Quiz und Videos

DESY's KworkQuark
Teilchenphysik für alle!

DESY's KworkQuark
Teilchenphysik, Foren, Aktuelles



Lehrsystem zur Teilchenphysik
(Uni Mainz)

Vom spielerischen Experiment zur Kosmologie

Erprobte Unterrichtsreihen

Kern- und Teilchenphysik Anwendungen in Kosmologie, Medizin, und Energiegewinnung
(27 Stunden, Siegburg, 10. Jgst, 2002)

Radioaktivität, Wechselwirkungen und Elementarteilchen
(9 Stunden, Köln, 10. Jgst, 2002)

Materieaufbau und Wechselwirkungen
(9 Stunden, Königswinter, 10 Jgst, 2001)

Einführung in die Elementarteilchenphysik anhand eines medizinischen Diagnoseverfahrens (PET) (10 Stunden, St. Augustin 2004, 10. Jgst. I)



Video Atlas Experiment