

Graduiertentagung „Wozu Interdisziplinarität?“ des Cusanuswerks  
20.–24.10.2004 in Papenburg

## Physik der Elementarteilchen

Nobelpreis 2004 & Elektroschwache Schleifen

**Bernd Feucht**

*Institut für Theoretische Teilchenphysik*

*Universität Karlsruhe*

- I Teilchenphysik: Experiment & Theorie
- II Das Standardmodell der Teilchenphysik
- III Physik-Nobelpreis 2004: die starke Kraft
- IV Elektroschwache Physik bei hohen Energien

# I Teilchenphysik: Experiment & Theorie

- Größenordnungen der Materie
- Teilchenbeschleuniger und Detektoren
- Theoretische Grundlagen der Teilchenphysik:  
*Quantenmechanik, Relativitätstheorie → relativistische Quantenfeldtheorie*

## Größenordnungen der Materie: vom Makroskopischen übers Mikroskopische zu den Elementarteilchen

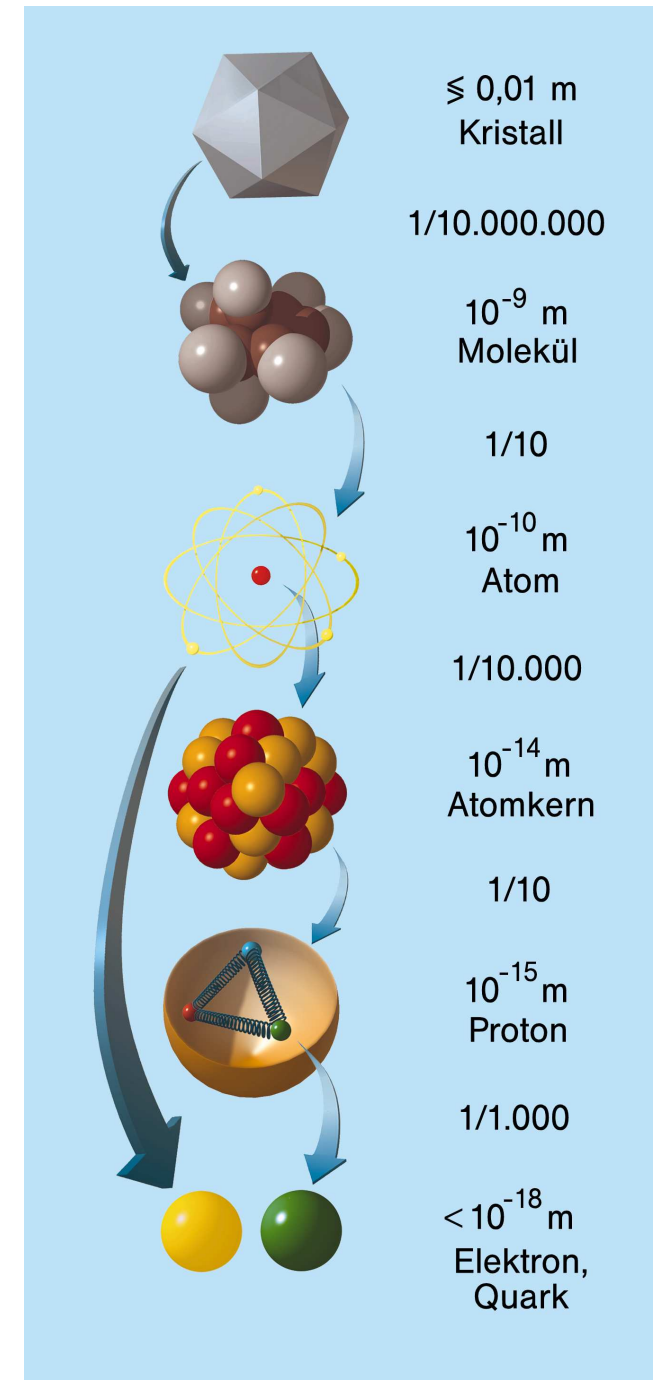
Erkennen von **Regelmäßigkeiten** im Aufbau der Materie  
 ⇒ zurückführen auf zugrunde liegende **Substruktur**.

Mikroskop: Je kleiner die zu untersuchende Struktur, desto höhere Energie braucht die verwendete Strahlung.

„Mikroskope“ der Teilchenphysik:

### Teilchenbeschleuniger

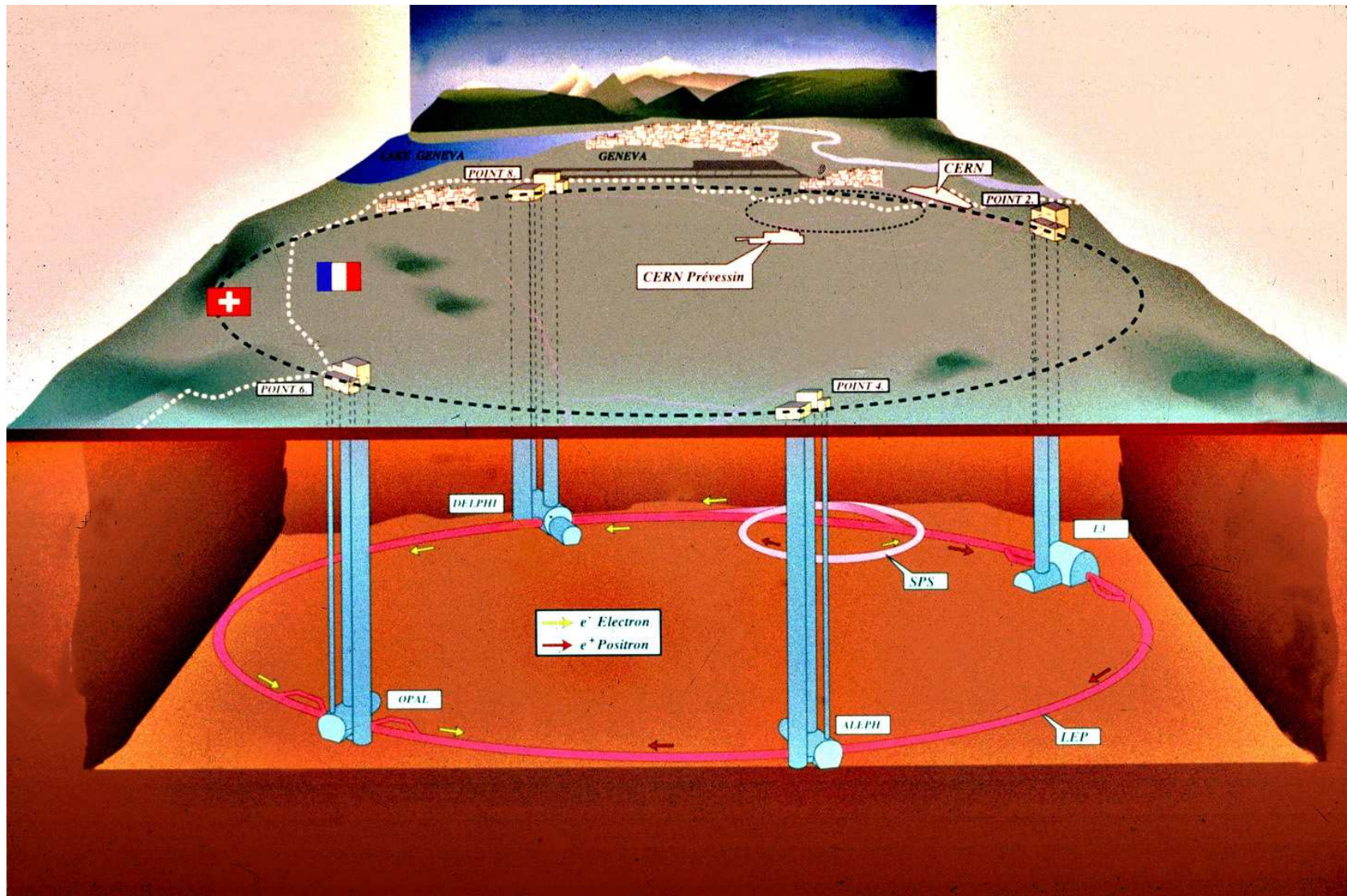
- beschleunigen Teilchen (Elektronen  $e^-$ , Positronen  $e^+$ , Protonen  $p$ ) auf hohe Geschwindigkeiten/Energien,
- bringen sie innerhalb der Detektoren zur Kollision,
- messen die Reaktionsprodukte.



## Teilchenbeschleuniger

**CERN**, Genf:  $e^-e^+$ -Ringbeschleuniger **LEP** (27 km Tunnel, 210 GeV, bis 2000)

Im Bau:  $pp$ -Ringbeschleuniger **LHC** (im LEP-Tunnel, 14 TeV, voraussichtlich ab 2007)



## Detektoren

Ereignis am **DELPHI-Detektor** (im LEP-Ring, CERN, Genf)



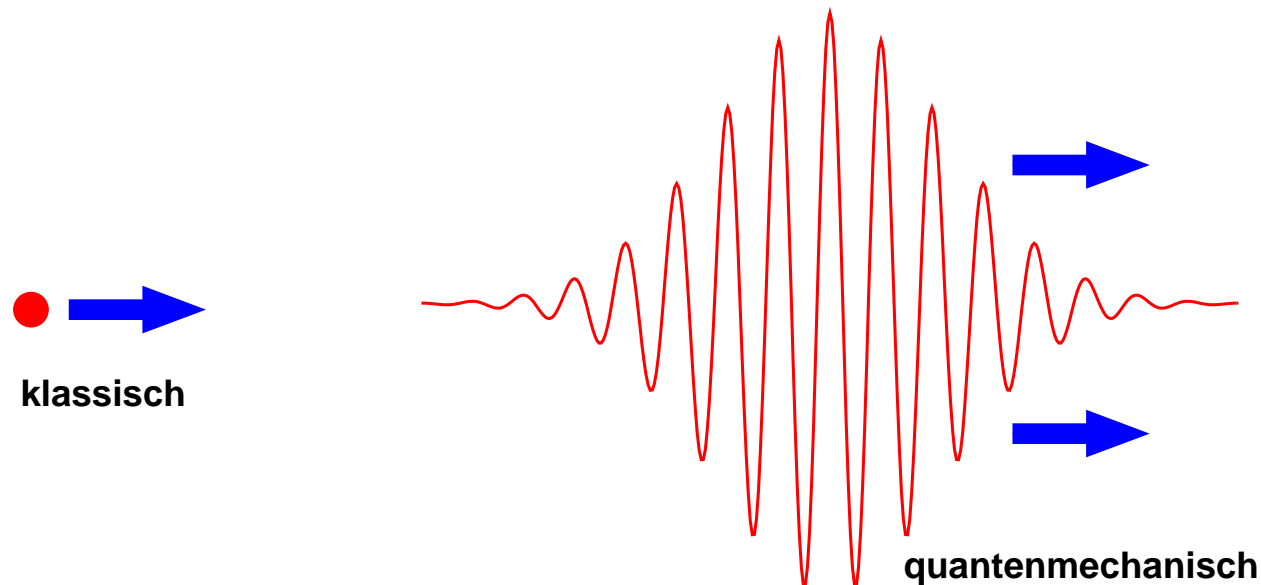
# Theoretische Grundlagen der Teilchenphysik

## Quantenmechanik

Max Planck (1858–1947)  
Werner Heisenberg (1901–1976)

**Elementarteilchen** (z.B. Elektron):

- klassisch = punktförmig, Ort & Geschwindigkeit präzise bekannt
- quantenmechanisch = **Wellenpaket**, ausgedehnt, Wahrscheinlichkeitsverteilung



## Welle-Teilchen-Dualismus:

- Teilchen haben Welleneigenschaften ( $\sim$  Licht)
- Wellen (Licht, elektromagnetische Strahlung) sind „gequantelt“ (**Photonen**)  
→ Teilcheneigenschaften

## Beschreibung der Wirklichkeit durch quantenmechanischen Zustände

Quanteneffekte sind relevant bei **kleinen Abmessungen**  $\Rightarrow$  **Teilchenphysik**

Auswirkungen auf **Messung & Wirklichkeit**:

- Der Zustand des Systems legt nur die **Wahrscheinlichkeiten** für Messgrößen wie Ort, Geschwindigkeit, Energie, ... fest.
- Welcher Wert konkret gemessen wird, ist **nicht deterministisch** vorhersagbar.  
 $\Rightarrow$  Die Zukunft ist (naturwissenschaftlich) nicht durch die Gegenwart vorherbestimmt.
- Experimente messen **Statistik**  $\rightarrow$  Wahrscheinlichkeitsverteilung.

## Spezielle Relativitätstheorie

Albert Einstein (1879–1955)

Lichtgeschwindigkeit im Vakuum:  $c = 299\,792\,458 \frac{m}{s}$

↪ universelle Naturkonstante, **absolute Obergrenze für Geschwindigkeiten**

Beispiel: Vergleich für ein Elektron

Geschwindigkeit in % von $c$	kinetische Energie in eV
10 %	2 570
86,6 %	511 000
99,9 %	10 900 000
99,999 999 998 82 %	105 000 000 000

Auch die **Masse** des Teilchens ist eine Form von Energie → **Ruhenergie**:

$$E_0 = m c^2 \Rightarrow \text{Elektron: } E_0 = 511\,000 \text{ eV}$$

Die Energie, die in der Masse eines Teilchens steckt, kann zur **Erzeugung neuer Teilchen** dienen oder sich in kinetische Energie wandeln.

Beispiel: LEP (CERN, Genf, bis 2000)

Elektronen/Positronen auf **105 GeV** beschleunigt  $\Rightarrow$  2 Elektronen (210 GeV) können z.B. ein **Z-Boson** ( $E_0 = 91 \text{ GeV}$ ) und ein **Higgs-Teilchen** (Anzeichen bei 115 GeV) erzeugen.



## Relativistische Quantenfeldtheorie

↪ vereinigt Quantenmechanik und spezielle Relativitätstheorie.

- Beschreibung von Teilchen und Wellen durch **Felder**
- **Wellencharakter** in Feldbeschreibung enthalten
- Teilchen als **Anregungen des Feldes**
- relativistische Beschreibung: Raumdimensionen & Zeit kombiniert

⇒ **Grundlage der modernen Teilchenphysik**

### Analogie:

Gitarrensaite ↔ Feld

fester Grundton ↔ Teilchensorte des Feldes (z.B. Elektron)

Schwingungsanregung der Saite ↔ Teilchen

verschiedene Klänge (Oberton-  
schwingungen) je nach Anzupfen } ↔ { verschiedene Energien/  
Geschwindigkeiten des Teilchens

Überlagerung der Obertöne ↔ Überlagerung verschiedener Teilchenzustände

## II Das Standardmodell der Teilchenphysik

*„Der Name ‚Standardmodell‘ ist so ein bisschen unser Problem:*

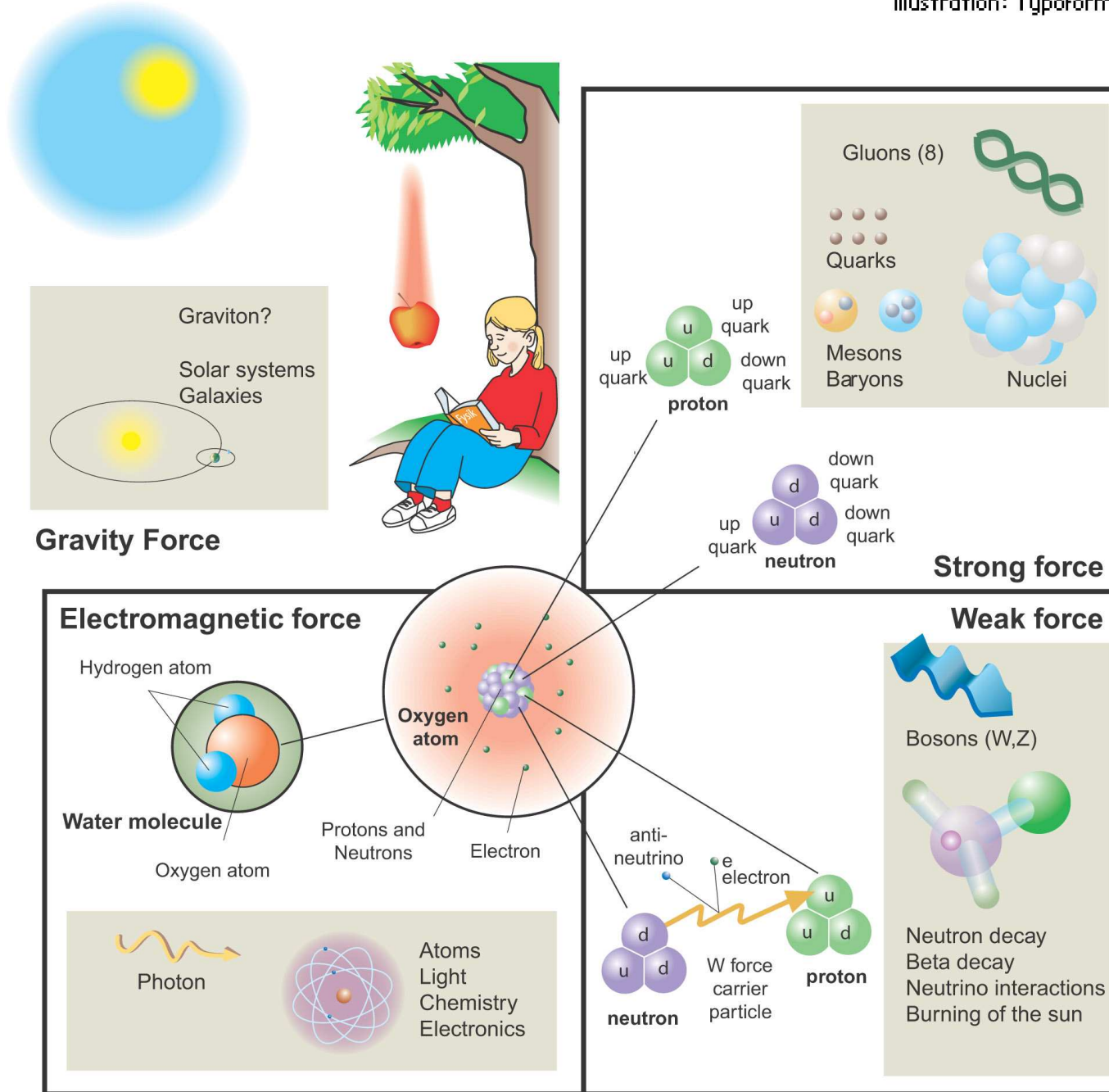
*Wenn Sie ein Auto kaufen, würden Sie ja auch nie das Standardmodell nehmen.“*

Johann H. Kühn, Karlsruhe

- Die 4 Kräfte der Natur
- Die Elementarteilchen des Standardmodells
- Feynman-Diagramme & Schleifen

# Die 4 Kräfte (Wechselwirkungen) der Natur

Illustration: Typoform



## Die Elementarteilchen des Standardmodells

Unsere „Alltags-Materie“:

Proton  $p = (uud)$ , Neutron  $n = (udd)$ ,

Elektron  $e^-$ , Elektron-Neutrino  $\nu_e$

⇒ nur die erste Spalte der **Fermionen**

Aber: **3 Familien** → schwerere Kopien

Zusätzlich: **Antiteilchen**  $\bar{u}, \bar{d}, \bar{\nu}_e, e^+, \dots$

Und Bosonen:

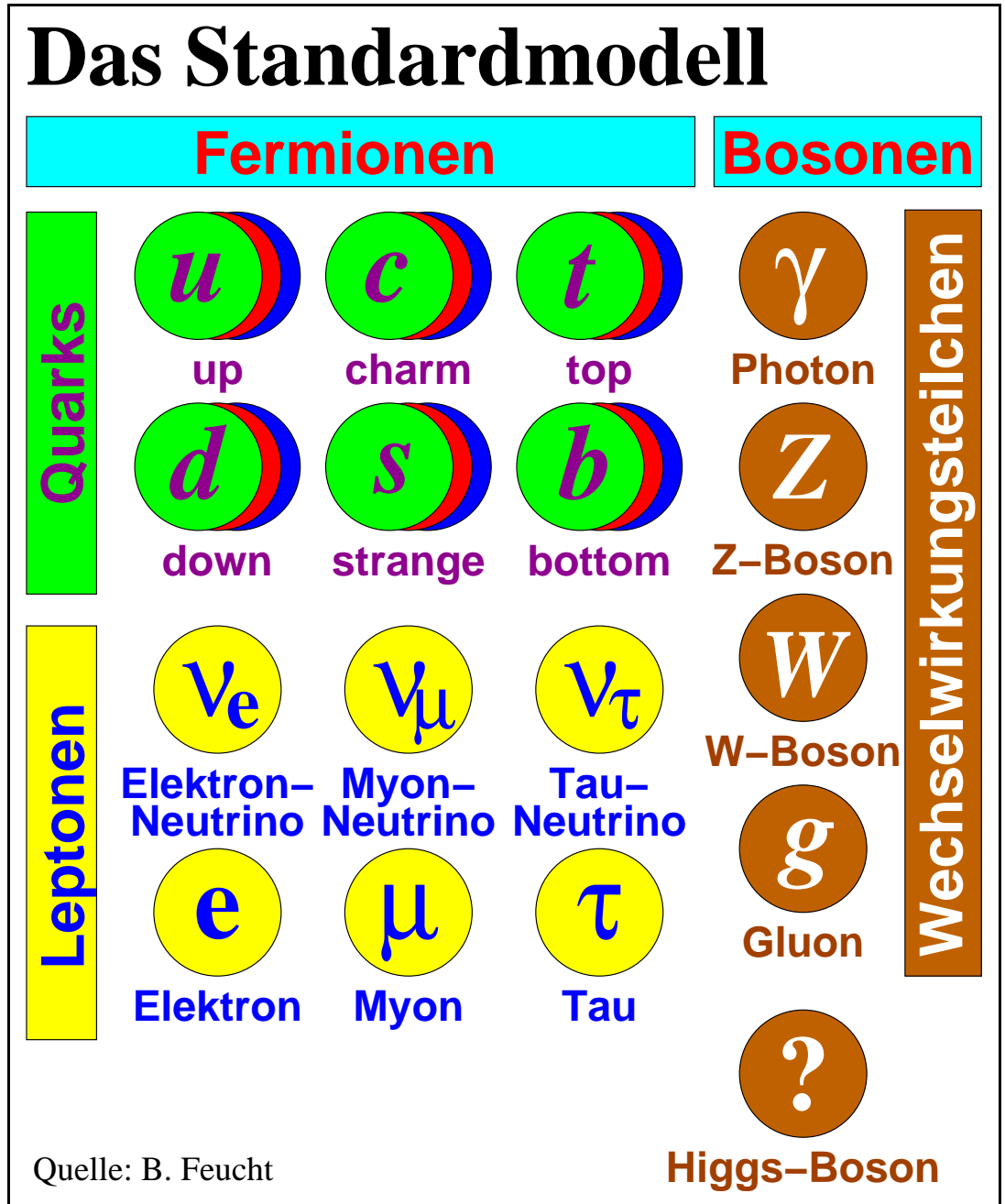
**Bosonen**  $\gamma, Z, W, g$  → Wechselwirkungen

**Higgs-Boson** → Massenerzeugung

Offene Fragen

⇒ Suche nach erweiterten Modellen

⇒ Präzise Kenntnis der Vorhersagen im Standardmodell erforderlich



## Feynman-Diagramme

Aus der mathematischen Formulierung des Standardmodells erhält man **Feynman-Regeln**, die mit **Feynman-Diagrammen** dargestellt werden können.

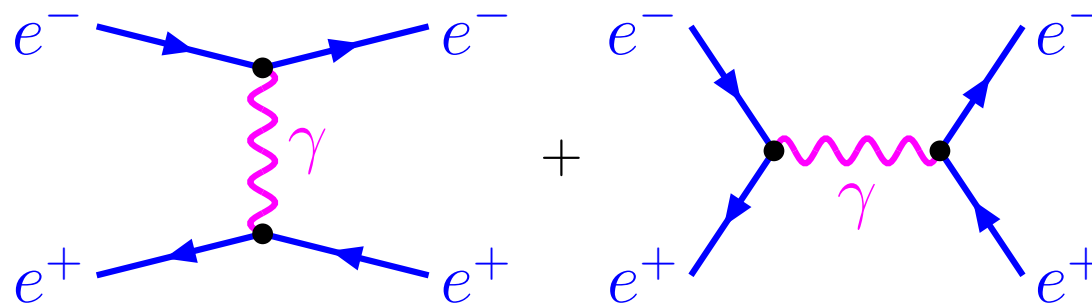
### Beispiele:

**Elektron-Propagator:**  beschreibt ein Elektron

**Photon-Propagator:**  beschreibt ein Photon (Lichtteilchen)

**Vertex:**  Wechselwirkung zwischen Elektron & Photon

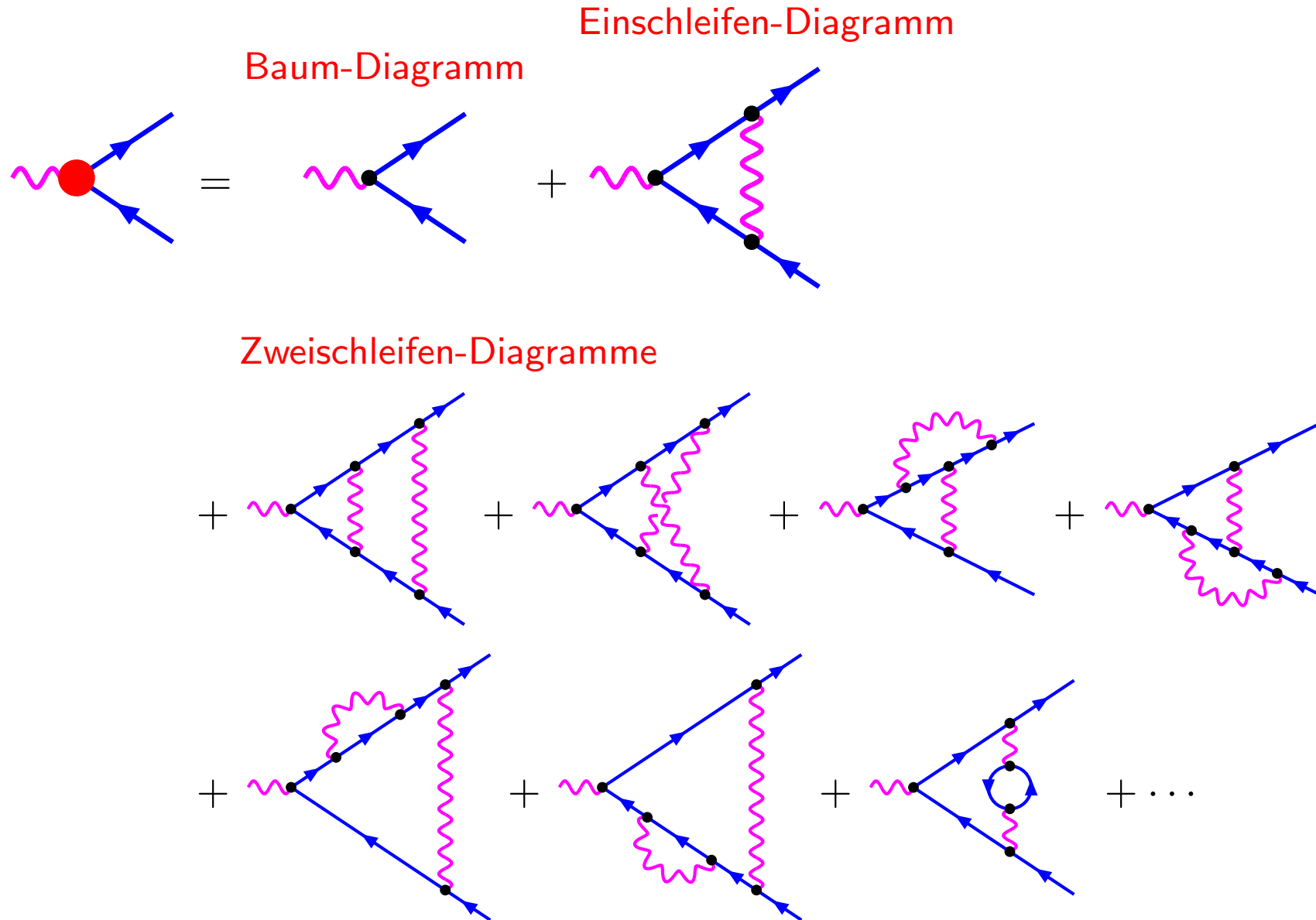
**Teilchenreaktion**  $e^- + e^+ \rightarrow e^- + e^+$ :



Jedem Feynman-Diagramm kann mit Hilfe der Feynman-Regeln ein mathematischer Ausdruck für dessen **Wahrscheinlichkeit** zugeordnet werden.

## Schleifen-Integrale

Exakte Berechnung einer Reaktion unmöglich  $\Rightarrow$  Entwicklung in eine **Störungsreihe**:



## III Physik-Nobelpreis 2004: die starke Kraft

5. Oktober 2004

*„Für die Entdeckung der asymptotischen Freiheit  
in der Theorie der starken Wechselwirkung“*



**David J. Gross**



**H. David Politzer**



**Frank Wilczek**

<http://nobelprize.org/physics/laureates/2004/>

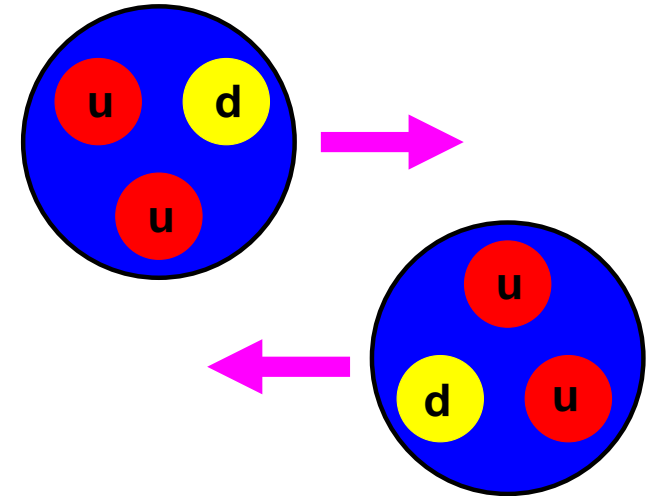
Nobelpreis 2004 für Arbeiten im Jahr 1973:

- Grundlage für das Verständnis der starken Kraft
- durch viele Experimente der letzten Jahrzehnte bestätigt

Viele Kräfte werden stärker bei kleinen Abständen und schwächer bei großen Abständen (Beispiel: Anziehung/Abstoßung zweier Magnete)

### Besonderheit der starken Kraft:

- hält die Quarks zusammen (z.B. **u u d** im Proton)
- wird durch **Gluonen** übertragen
- wird **stärker bei großen Abständen**  
⇒ es existieren keine einzelnen Quarks, nur in „neutralen“ Bindungszuständen (z.B. Proton, Neutron)
- wird **schwächer bei kleinen Abständen**  
⇒ Quarks verhalten sich fast wie freie Teilchen
- Analogie: *Gummiband*



↔ Dieses Verhalten ihres theoretischen Modells wurde von Gross, Wilczek & Politzer durch Rechnungen gezeigt. ⇒ Das Modell beschreibt die starke Kraft.

### Bedeutende Rolle der starken Kraft:

Nur ein kleiner Bruchteil der Proton/Neutron-Masse ( $\lesssim 20\%$ ) kommt von den 3 Quarks, der Rest aus der starken Kraft. ⇒ **Hauptbestandteil aller irdischen Materie sind Gluonen!**



## IV Elektroschwache Physik bei hohen Energien

- Elektromagnetische & schwache Wechselwirkung
- Sudakov-Logarithmen:  
Beispiel für ein Ergebnis im Hochenergie-Limes
- Arbeitsweise eines theoretischen Teilchenphysikers
- Ausblick

## Elektromagnetische Wechselwirkung

- Licht, Radiowellen, chemische Eigenschaften der Atome
- übertragen durch **masselose Photonen**

## Schwache Wechselwirkung

- Sonne, radioaktive  $\beta$ -Zerfälle (Neutron  $\rightarrow$  Proton + Elektron + Antineutrino)
- übertragen durch **massive W- & Z-Bosonen** (80–90 mal schwerer als Proton)

$\Rightarrow$  kombiniert im Modell der **elektroschwachen Wechselwirkung**

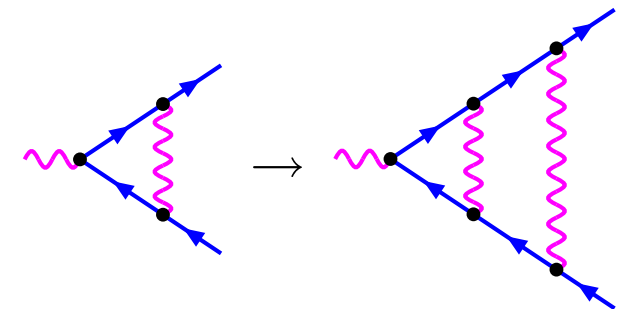
**Bisherige Beschleunigerexperimente** (z.B. LEP, Genf):

Teilchenkollisionen bei Energien  $\lesssim$  W-/Z-Masse

**Zukünftige Beschleunigerexperimente** (LHC, Genf & ILC):

Teilchenkollisionen bei **Energien  $\gg$  W-/Z-Masse**

- neue Effekte werden wichtig
- theoretische Vorhersagen müssen experimentelle Genauigkeit erreichen
- Rechnungen im Limes hoher Energien möglich



**Sudakov-Logarithmen:** Beispiel für ein Ergebnis im Hochenergie-Limes

Beitrag zur Reaktion  $e^- + e^+ \rightarrow \text{Photon}$  in einem vereinfachten Modell:

$$F_2 = \left(\frac{\alpha}{4\pi}\right)^2 \left\{ \frac{1}{2} \log^4 \left(\frac{Q^2}{M^2}\right) - \left(3 + \frac{4}{9} n_f\right) \log^3 \left(\frac{Q^2}{M^2}\right) + \left(\frac{2}{3} \pi^2 + 8 + \frac{38}{9} n_f\right) \log^2 \left(\frac{Q^2}{M^2}\right) - \left(-24\zeta_3 + 4\pi^2 + 9 + \frac{34}{3} n_f\right) \log \left(\frac{Q^2}{M^2}\right) + 256 \text{Li}_4 \left(\frac{1}{2}\right) + \frac{32}{3} \log^4 2 - \frac{32}{3} \pi^2 \log^2 2 - \frac{52}{15} \pi^4 + 80\zeta_3 + \frac{52}{3} \pi^2 + \frac{25}{2} + \left(\frac{16}{27} \pi^2 + \frac{115}{9}\right) n_f \right\}$$

( $Q \sim$  Energie,  $M =$  W-/Z-Masse, im Limes  $Q \gg M$ )

**Fermionischer Beitrag** (alles proportional zur Zahl  $n_f$  der Fermionen): Diplomarbeit

B. Feucht, J.H. Kühn, S. Moch, *Physics Letters B* 561 (2003) 111

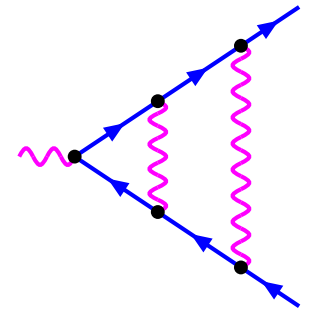
**Restliche Beiträge:** Teil der Doktorarbeit

B. Feucht, J.H. Kühn, A.A. Penin, V.A. Smirnov, *Physical Review Letters* 93 (2004) 101802

## Arbeitsweise eines theoretischen Teilchenphysikers

### Vorhersagen für experimentelle Ergebnisse anhand von theoretischen Modellen:

- aufwändige Berechnung von Feynman-Diagrammen  
→ z.B. **Zweischleifen-Integrale**
- phantasievolle Kombination bekannter **mathematischer Hilfsmittel**,  
Entwicklung neuer Methoden, Definition neuer Funktionen, ...  
*„an der Schwelle des mathematisch Möglichen und darüber hinaus“*
- **Automatisierung** umfangreicher Rechnungen mit dem Computer  
→ Programmierung in C++, Mathematica, FORM, ...
- gute Kenntnis der **quantenfeldtheoretischen Grundlagen**, um Symmetrien zu erkennen und auszunutzen, die Struktur des Ergebnisses vorherzusagen, ...
- **internationale Zusammenarbeit** (E-Mail, Konferenzen, ...)



## Ausblick

- **gegenwärtiger Stand der Doktorarbeit:**  
Rechnungen im vereinfachten Modell abgeschlossen
- **aktuell:**  
Erweiterung auf Modell der **schwachen Wechselwirkung**
- **zum Abschluss:**  
Kombination der Ergebnisse zu einer präzisen Vorhersage der Reaktion  
 $e^- + e^+ \rightarrow \text{Fermion} + \text{Antifermion}$  (z.B.  $\mu^- + \mu^+$ )  
in der **elektroschwachen Wechselwirkung**