

## 14. Zukunft der Teilchenphysik

- offene Fragen
- genehmigte Projekte (viele! Eine kleine Auswahl:)
  - ▷ b-Fabriken
  - ▷ RHIC - Collider
  - ▷ KZK - Neutrinostrahl, mini-Boone, ...
  - ▷ LHC
  - ▷ MAGIC und andere astrophys. Experimente
- diskutierte Projekte
  - ▷ Linearer  $e^+e^-$  Beschleuniger
  - ▷  $\mu^+\mu^-$  - Collider
  - ▷  $\nu$  - Fabrik
  - ▷ VLHC
  - ▷ CLIC

# Offene Fragen

... zu vielen unterschiedlichen Aspekten! Eine Auswahl besonders fundamentaler Fragen ist z.B.:

- **Ursprung der Teilchenmassen** (Higgs-Mechanismus?)
- **Massenhierarchie** ( $\nu$  fast masselos, top extrem schwer)
- **CP-Verletzung** (Ursprung d. Materie-Antimaterie-Asym. des Universums?)
- **Zahl der Teilchengenerationen** (Warum 3?)
- **Vereinigung aller Wechselwirkungen**
- **Quantengravitation**
- **Extra-Dimensionen**
- **Vakuum-Energiedichte  $\Lambda$**  (kosmolog. Konstante)
- **Dunkle Materie**
- **Supersymmetrie zw. Fermionen & Bosonen**
- **und noch viele andere mehr!**

# Offene Fragen

Manche der zuvor genannten Fragen können mit den Teilchenexperimenten der nächsten Generation in den kommenden Jahren detaillierter erörtert und womöglich sogar beantwortet werden. Für viele der Fragen sind aber noch neue Experimente zu entwickeln, die die heute vorliegende techno-  
logische Grenze überschreiten müssen, um die zur Untersuchung der Fragen erforderlichen Energie zu erreichen. Insofern stellt die Teilchenphysik eine Antriebsquelle für neue Technologien dar, etwa vergleichbar der Entwicklung des World-Wide-Web am CERN, um in den sehr großen Arbeits- und Experimentiergemeinschaften (sog. Kollaborationen) Informationen und Nachrichten wie auch Daten und Ergebnisse schnell und mit geringem Aufwand verteilen zu können.

# genehmigte Projekte

eine kleine Auswahl:

- b-Fabriken in Stanford, U.S.A., und Tokyo, Japan

Frage: CP-Verletzung im Standard Modell

Ziel: Vermessung des b-Quarksektors der CKM-Quarkmischungsmatrix, Beobachtung und Messung der Stärke der CP-Verletzung

Konzept:  $e^+e^-$ -Collider mit ungleichen Strahlenergien (ca. 3 GeV auf 8 GeV), Schwerpunktsenergie  $\hat{=}$  Masse des  $\Upsilon(4S)$   $\rightarrow$  Resonanzproduktion mit hoher Rate; Asymmetrie der Energie notwendig, um  $B^0$  von  $\bar{B}^0$ -Teilchen trennen und  $B^0$ - $\bar{B}^0$ -Oszillationen beobachten zu können  
( $m(\Upsilon(4S)) \approx 2 \cdot m(B^0)$ )

Status: laufen seit Herbst 1999; erste signifikante Ergebnisse im Sommer 2001 präsentiert.



## genehmigte Projekte

- RHIC-Collider (Relativistic Heavy Ion Collider) am BNL-Labor, Brookhaven, U.S.A.

Frage: Phasenübergang zum Quark-Gluon-Plasma

Ziel: Eindeutige Feststellung der Existenz von Quark-Gluon-Plasma sowie Vermessung des Phasenübergangs

Konzept:  $^{197}\text{Au} \rightarrow ^{198}\text{Au}$  - Kollisionen bei  $\approx 100 \text{ GeV/Nukleon}$

Status: läuft im Probebetrieb seit Juni 2000  
erste Kollisionen beobachtet,

## genehmigte Projekte

- K2K-Neutrinostrahl, KEK (Tokyo) → Kamioka

Frage: Neutrino-Oszillationen, Neutrino-Masse

Ziel: Beobachtung und Vermessung der Wirkung von mögl. Neutrino-Oszillationen auf einen  $\mu$ -Neutrinostrahl

Konzept:  $\mu$ -Neutrinostrahl, aus  $\pi$ -Zerfällen am KEK Proton-Synchrotron erzeugt, wird nach  $\approx 250$  km Flugstrecke im Superkamiokande Wasser-Čerenkov-Detektor nachgewiesen und vermessen

Status: läuft seit Herbst 1999, gemessener  $\nu_\mu$ -Fluss verträglich mit großem Mischungswinkel  $\sin^2 2\theta \approx 1$  und  $\Delta m^2 \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2/c^4$ , die auch von atmosphärischen  $\nu_\mu$ -Messungen favorisiert werden

- mini-boone, Fermilab, U.S.A., Überprüfung des  $\nu_e$ -Appearance-Signals von LSND; Konzept wie bei LSND (s. Vorlesung 8), Status: Experiment in Vorbereitung

## genehmigte Projekte

- **LHC** (Large Hadron Collider) CERN, Schweiz, im LEP-Tunnel

Fragen: Higgs-Suche, SUSY, top-Quark, ...

Ziel: Entdeckung neuer Teilchen, die im Standard Modell bzw. dessen Erweiterungen erwartet werden, sowie Tests des Standard Modells bei höchsten Energien

Konzept: p-p-Kollisionen bei 14 TeV Schwerpunktsenergie, Supraleitende Ablenk dipole mit  $\approx 9$  Tesla Feldstärke

Status: Bau phase hat begonnen, Start 2005/6

Projekte:

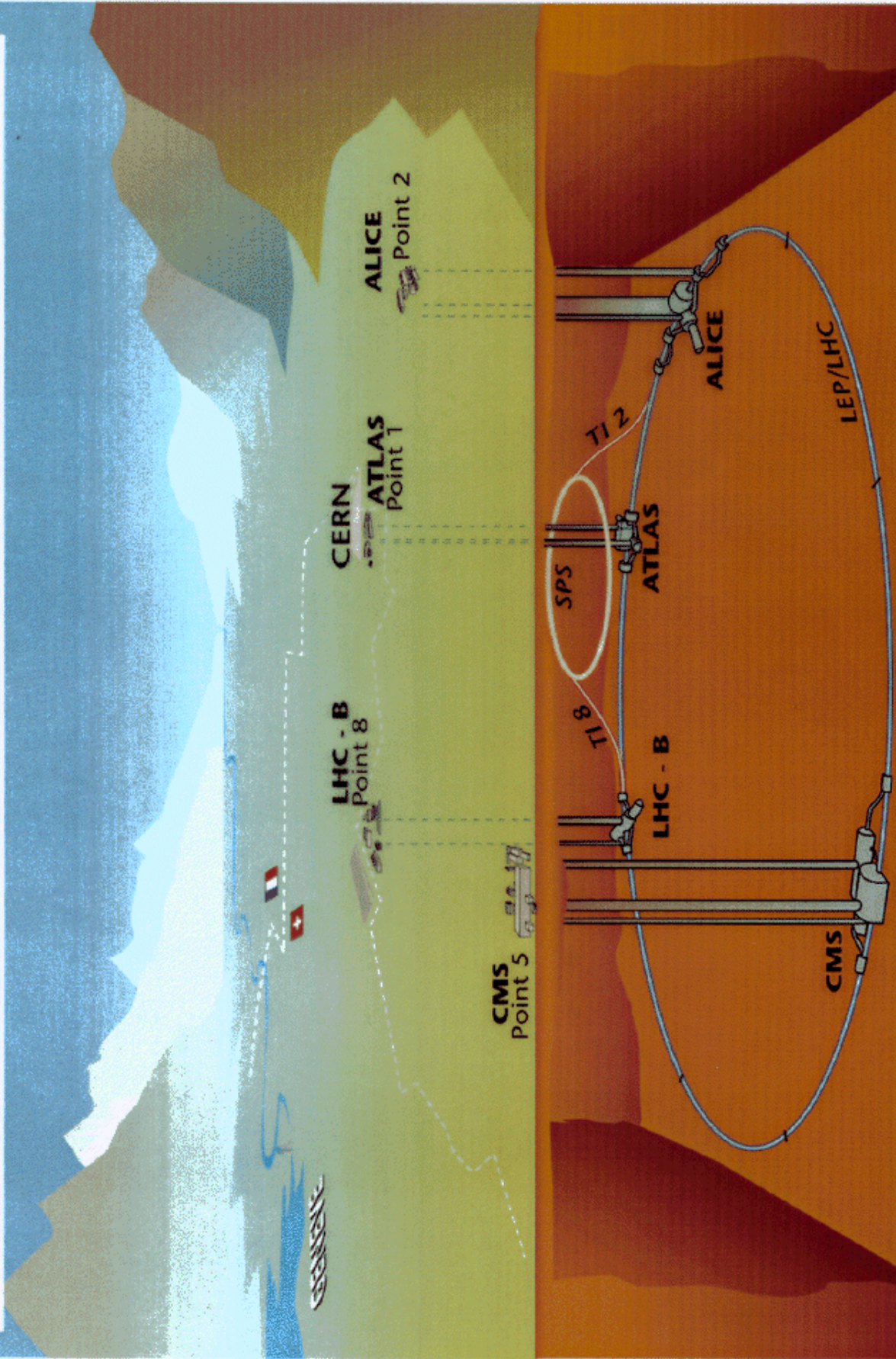
- ▷ ATLAS, CMS: "Universal detektoren"
- ▷ LHC-b : CP-Verletzung im b-Sektor
- ▷ ALICE : Quark-Gluon-Plasma in  $208 \text{ pb} \rightarrow \leftarrow 208 \text{ pb}$

# 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	$\sim 25 \text{ ns}$ $2 \times 2835$
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	$\approx 400 \text{ MHz}$
Füllzeit	$\sim 6 \text{ min}$
Beschleunigungszeit	$\sim 20 \text{ min}$
Füllenergie	450 GeV
Zahl der Dipolmagnete (Strom bei max. Feld $\approx 13 \text{ kA}$ )	1232

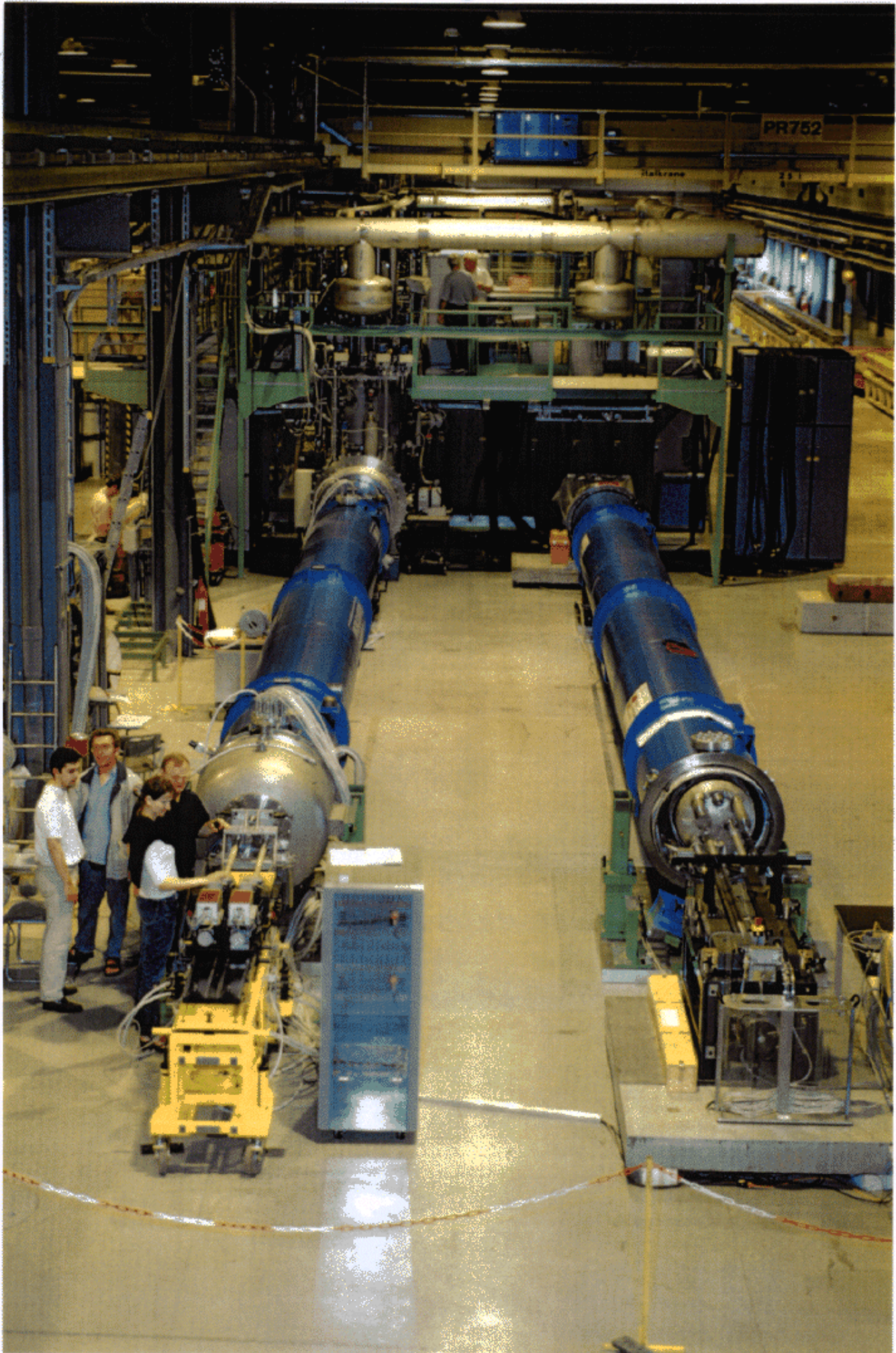


# Overall view of the LHC experiments.



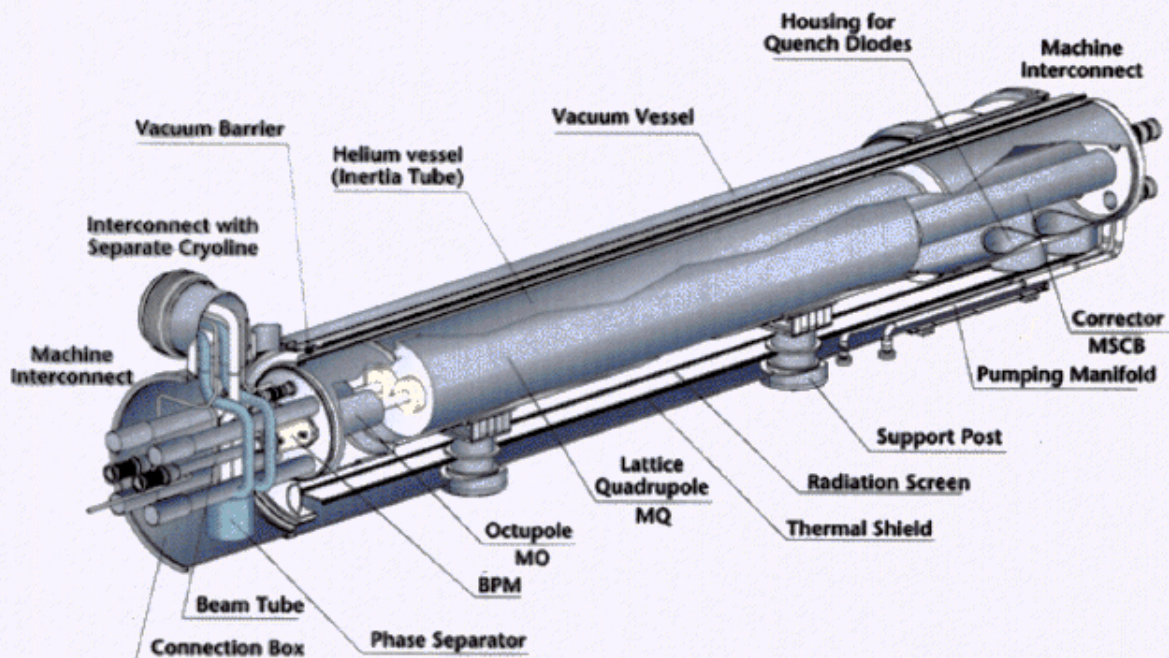


# LHC - Dipolmagnete





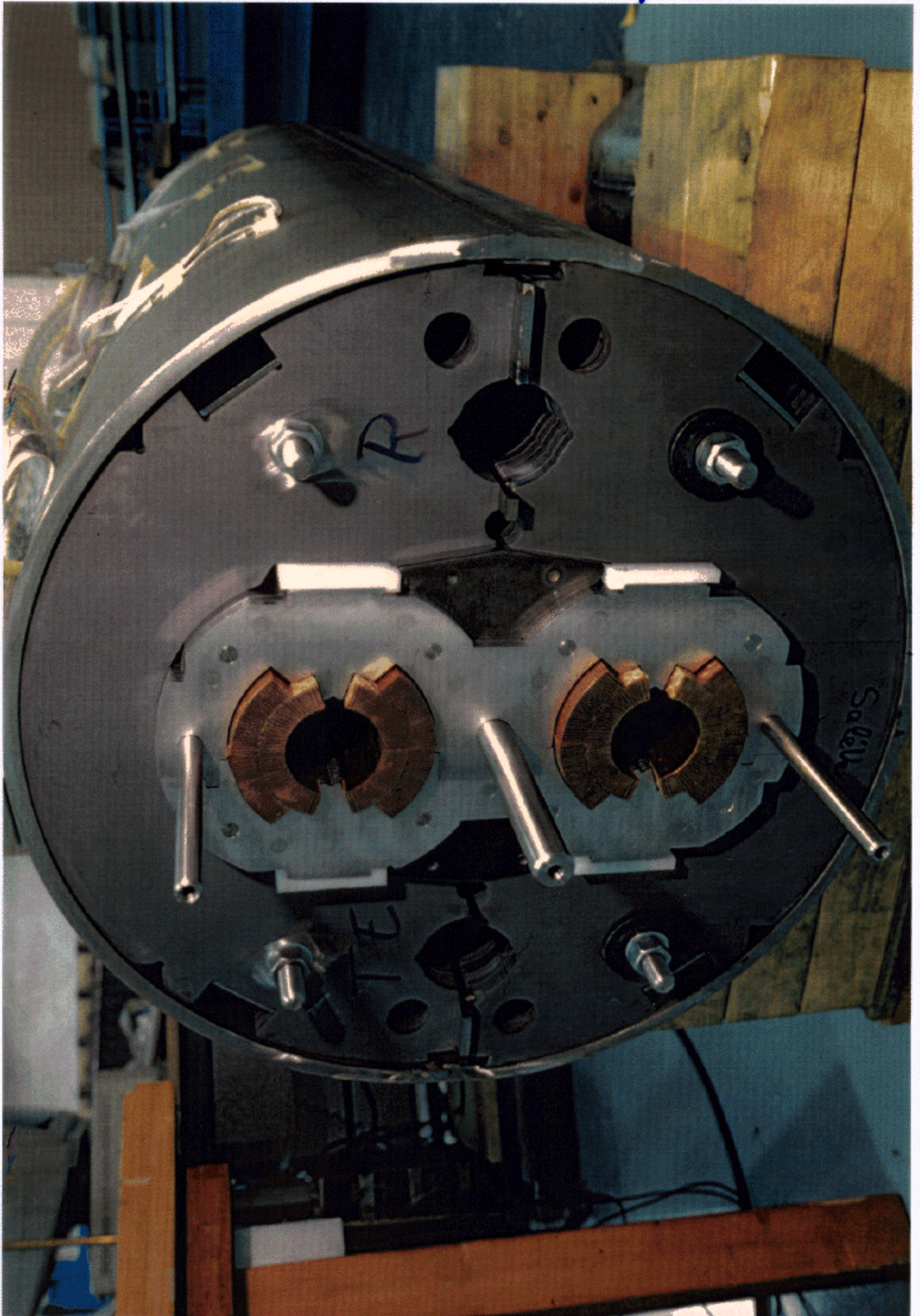
# Schemat. Aufbau eines LHC-Dipolmagneten



Short straight section assembly



Innenstruktur eines LHC-Dipolmagneten





# Ablenk-Dipolmagnet für LHC

Accelerator magnets

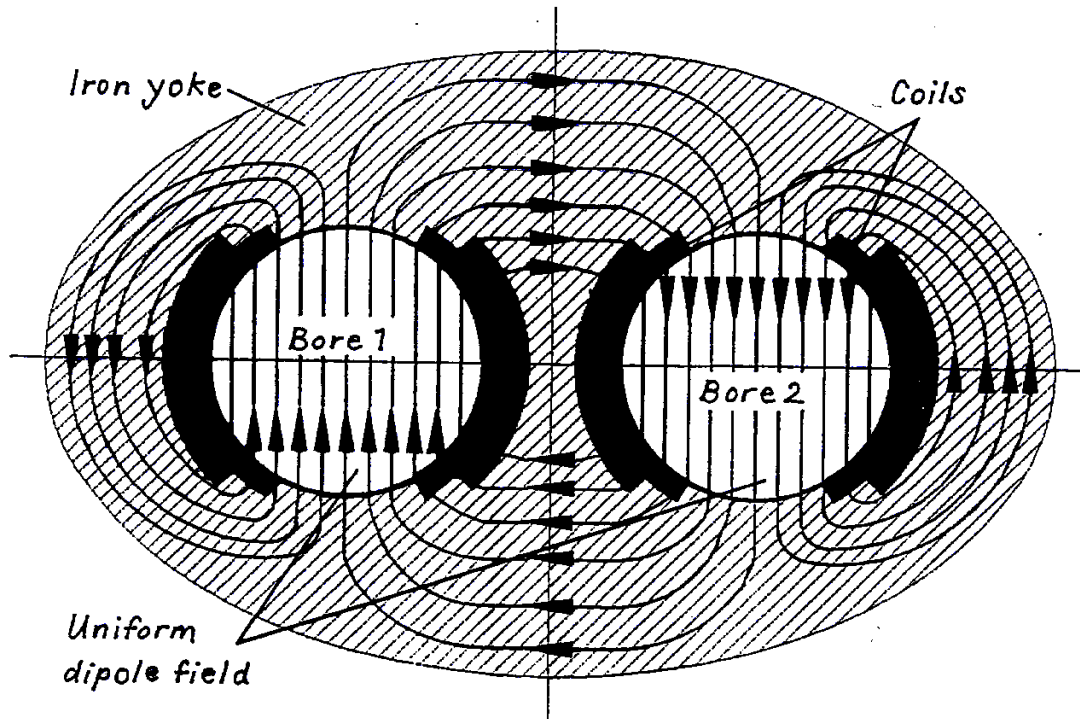


Figure 5B. Flux pattern in a twin-bore magnet.

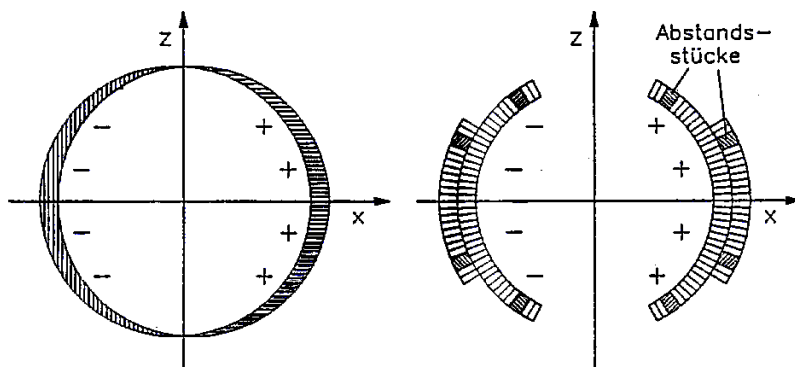


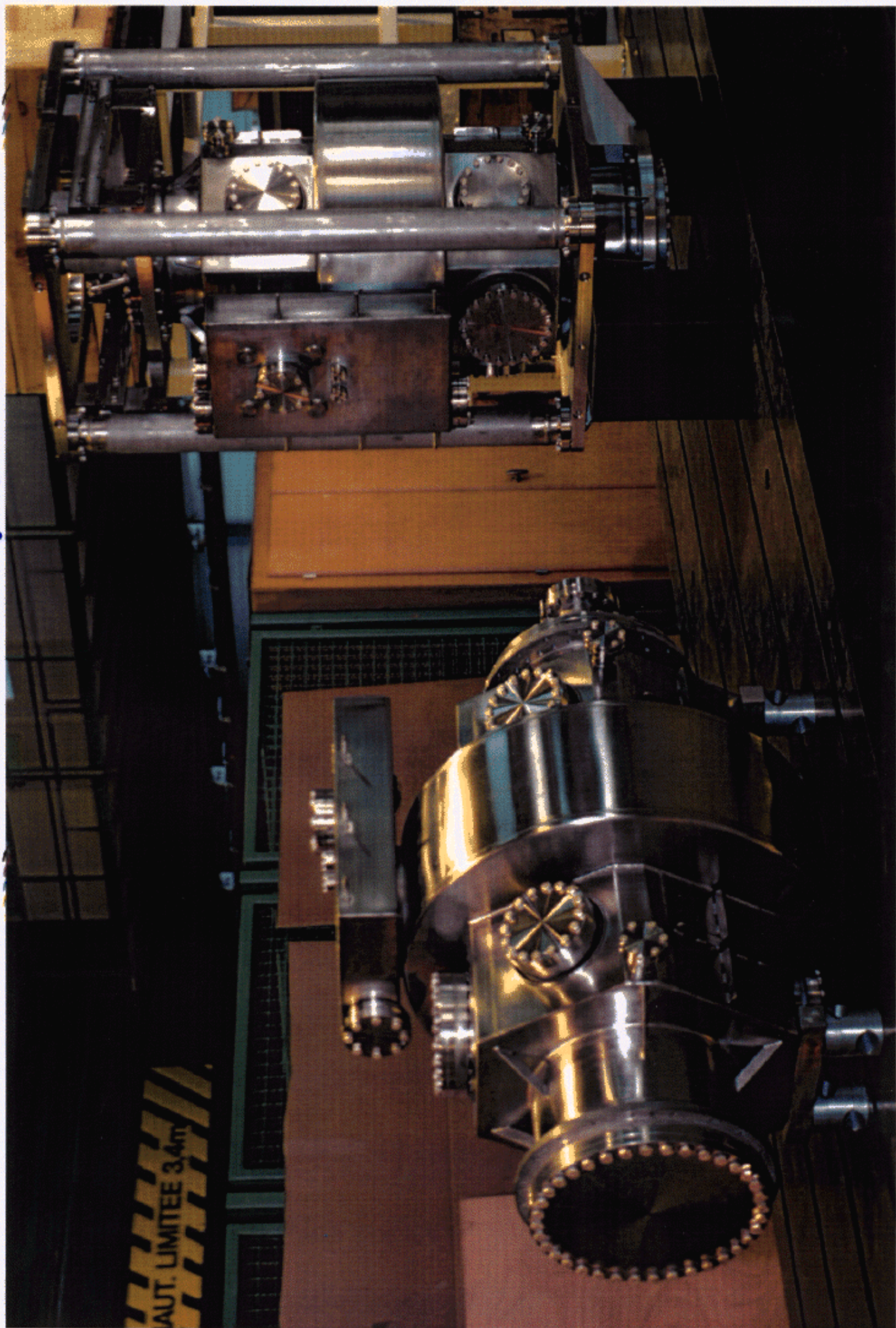
Fig. 3.18 Erzeugung eines reinen Dipolfeldes aus einzelnen Stromleitern, die eine zu  $\cos(m\Phi)$  proportionale Stromverteilung haben

Tabelle 3.2 Die durch azimuthale Stromverteilung auf einem leitenden Zylinder erzeugten Multipole

Index	Feldverlauf	Multipol
$m = 1$	$B_z = -\frac{\mu_0 I_0}{2a} = \text{const.}$	Dipol
$m = 2$	$B_z = -\frac{\mu_0 I_0}{2a^2} x$	Quadrupol
$m = 3$	$B_z = -\frac{\mu_0 I_0}{2a^3} x^2$	Sextupol
u.s.w.		



LHC - Beschleunigungsresonator







**Detector characteristics**

**Width:** 44m  
**Diameter:** 22m  
**Weight:** 7000t

CERN AC - ATLAS V1997

Electromagnetic Calorimeters

Solenoid

Forward Calorimeters

End Cap Toroid

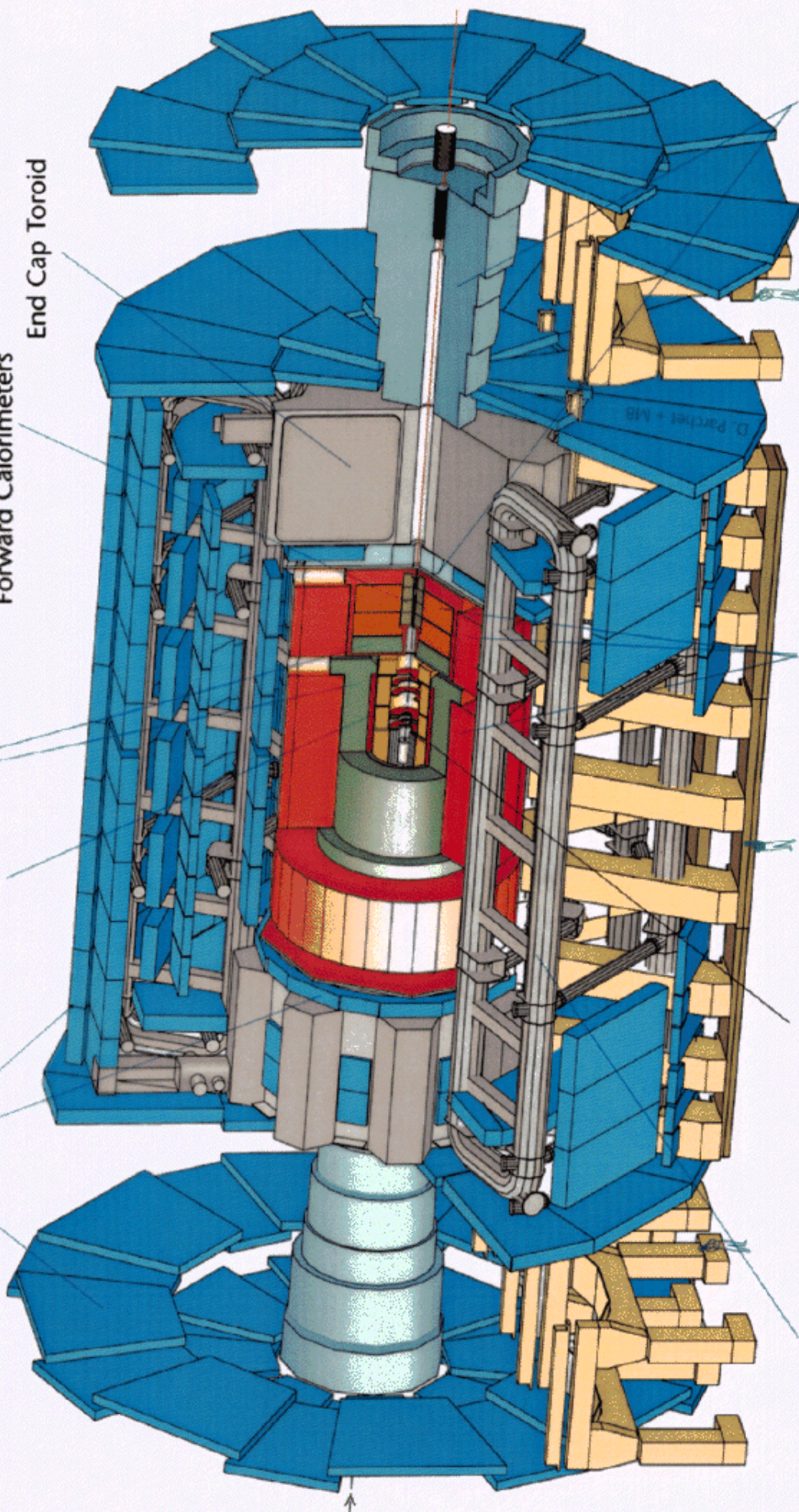
Muon Detectors

Barrel Toroid

Inner Detector

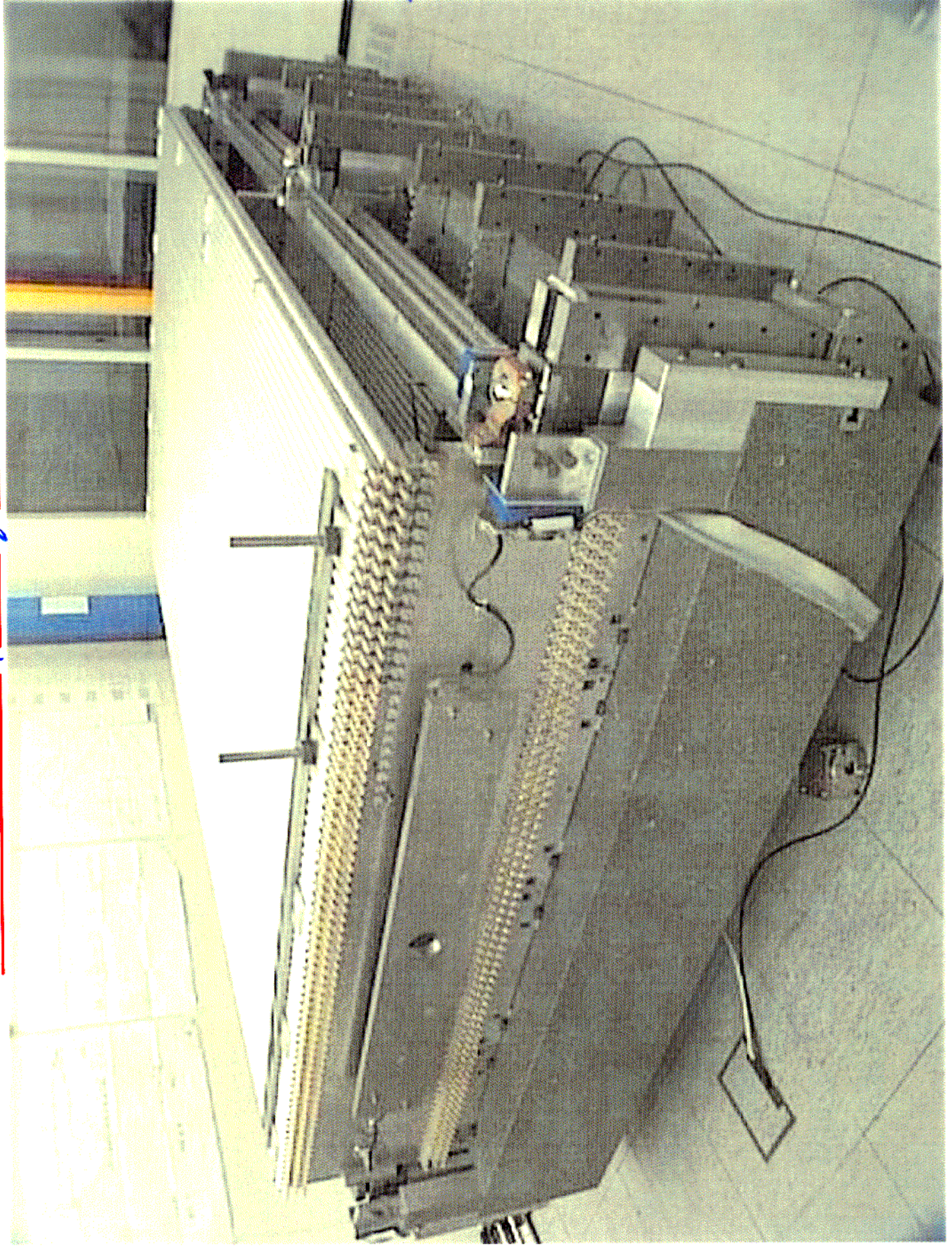
Hadronic Calorimeters

Shielding





1 Modell der äußeren Myonkammer



Driftrohre  
mit 0,3cm  
und einem  
Signalrohr,  
3 Röhre =  
legen auf  
beide Seite  
eines Ab =  
stands =  
halters



ATLAS - Hadron-Endkappen-Kalorimeter



Absorber: Cu

Detektor: fl. Ar

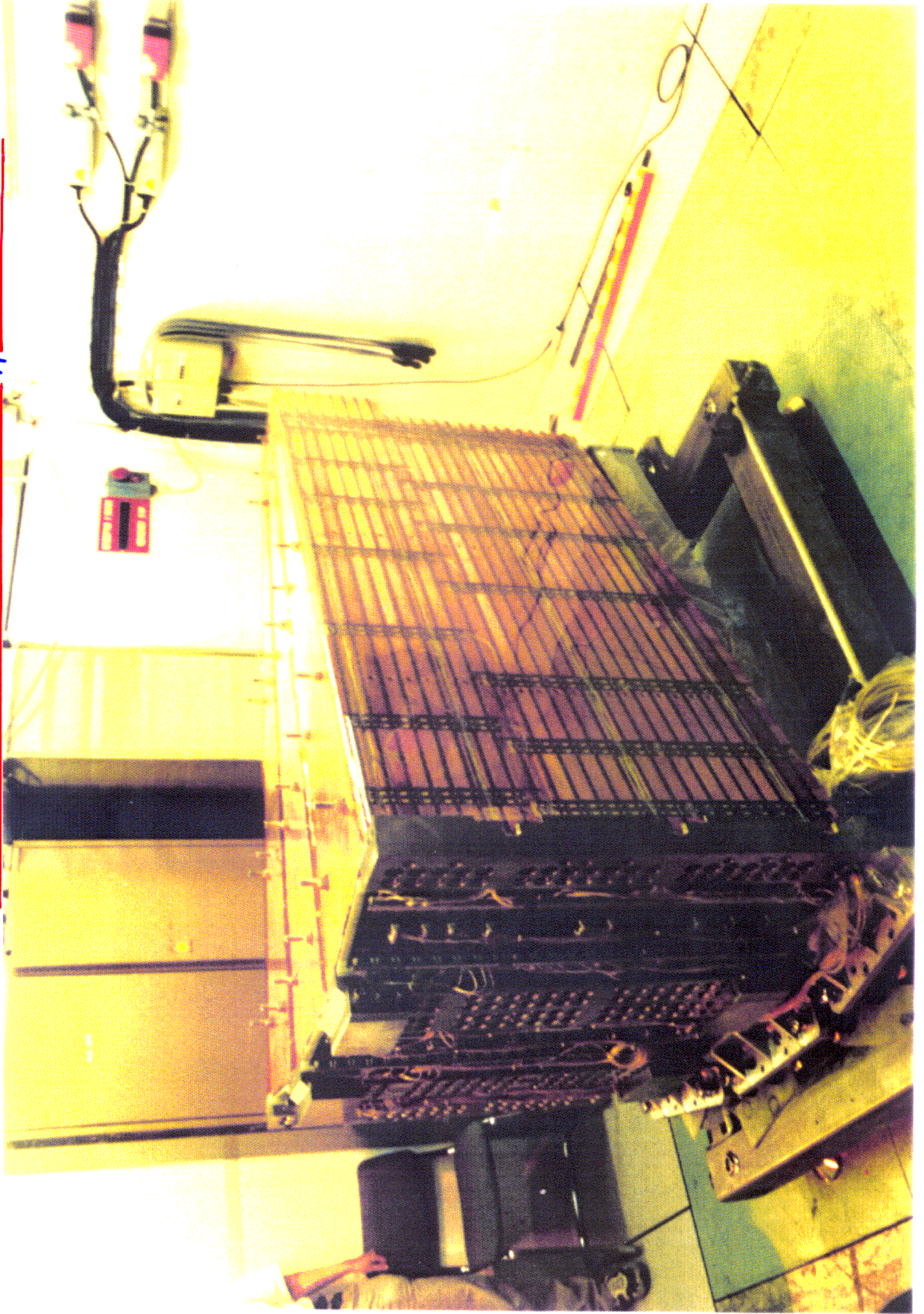
Sandwich-Kalorimeter

Rad aus

32 Segmente  
der Art wie  
im Bild  
geeigt

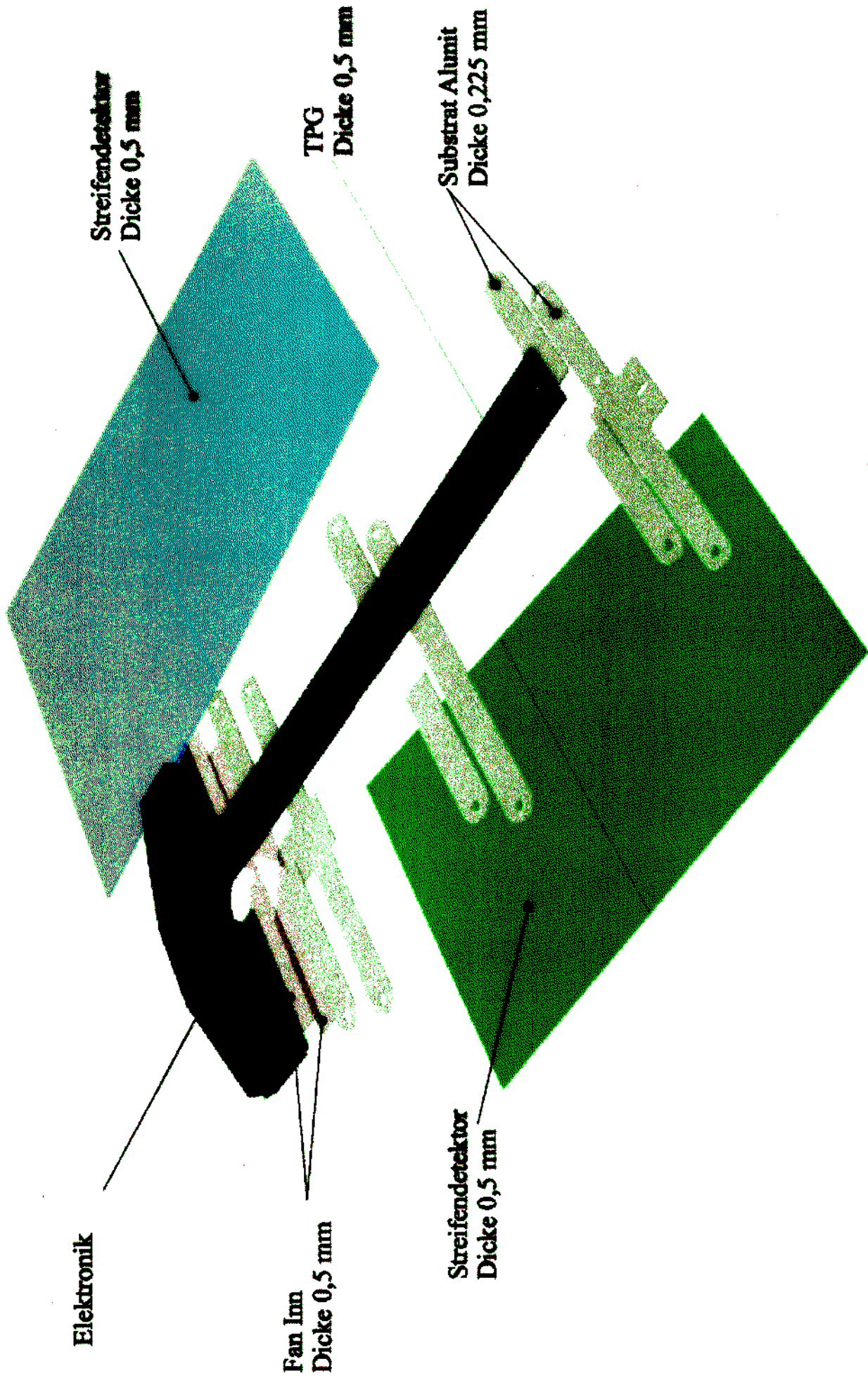


3 Module des ATLAS - Hadron-Endkappen - Kalorimeter



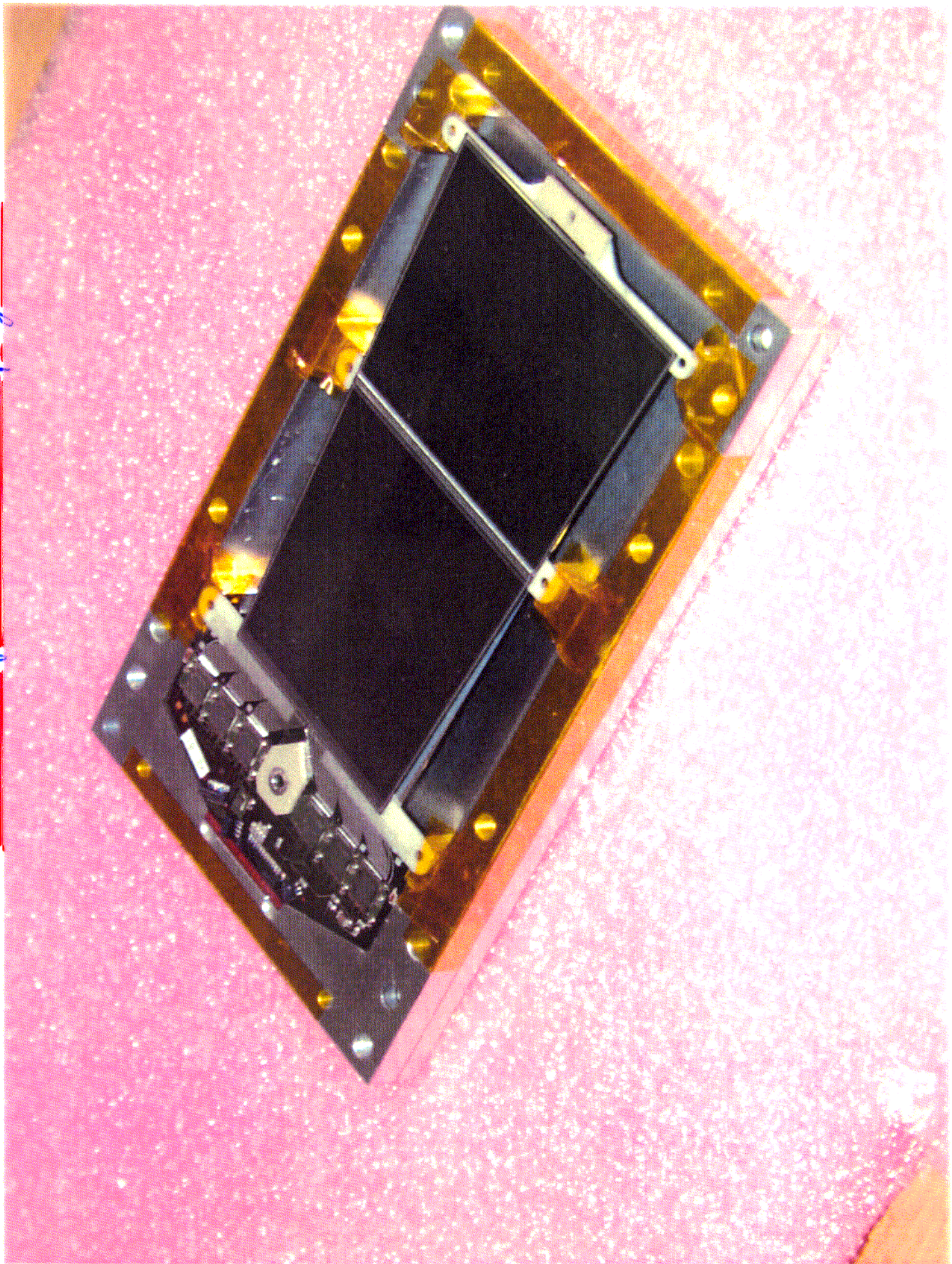


# Aufbau eines Siliziumstreifen-Moduls





Siliziumstreifen-Modul im Transportgehäuse





## genehmigte Projekte

- **MAGIC**, La Palma, kanar. Inseln

Frage: Höhenstrahlung im GeV-Bereich

Ziel: Entdeckung des Beschleunigungsmechanismus

Konzept: Spiegelteleskop zur optischen Beobachtung von Čerenkov-Licht in kosmischen Teilchenschauern,  $\varnothing 17\text{m}$

Status: im Aufbau, "first light" noch 2001

- **CRESST**, Gran Sasso Tunnel, Italien

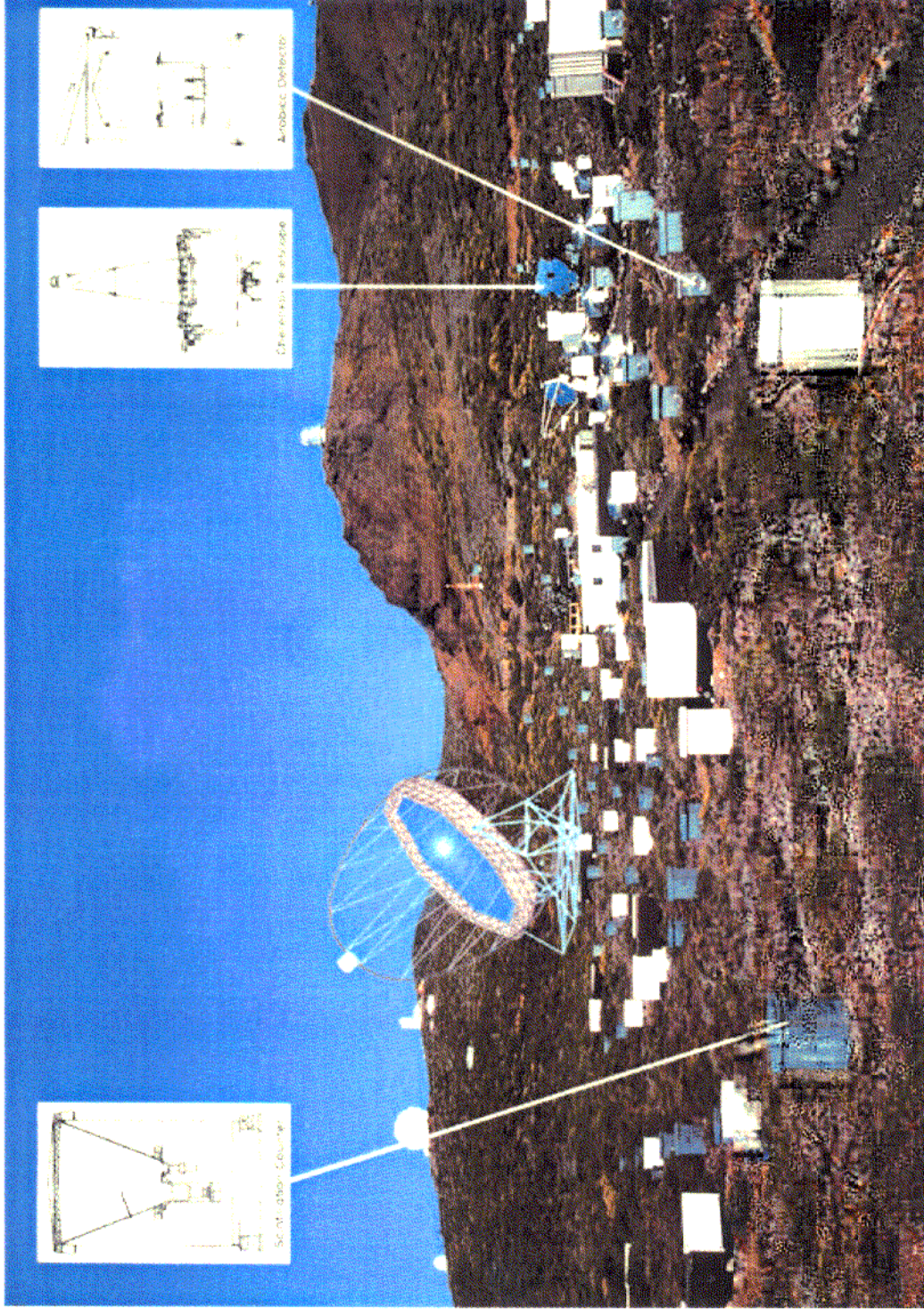
Frage: Dunkle Materie

Ziel: Entdeckung von WIMP-Teilchen

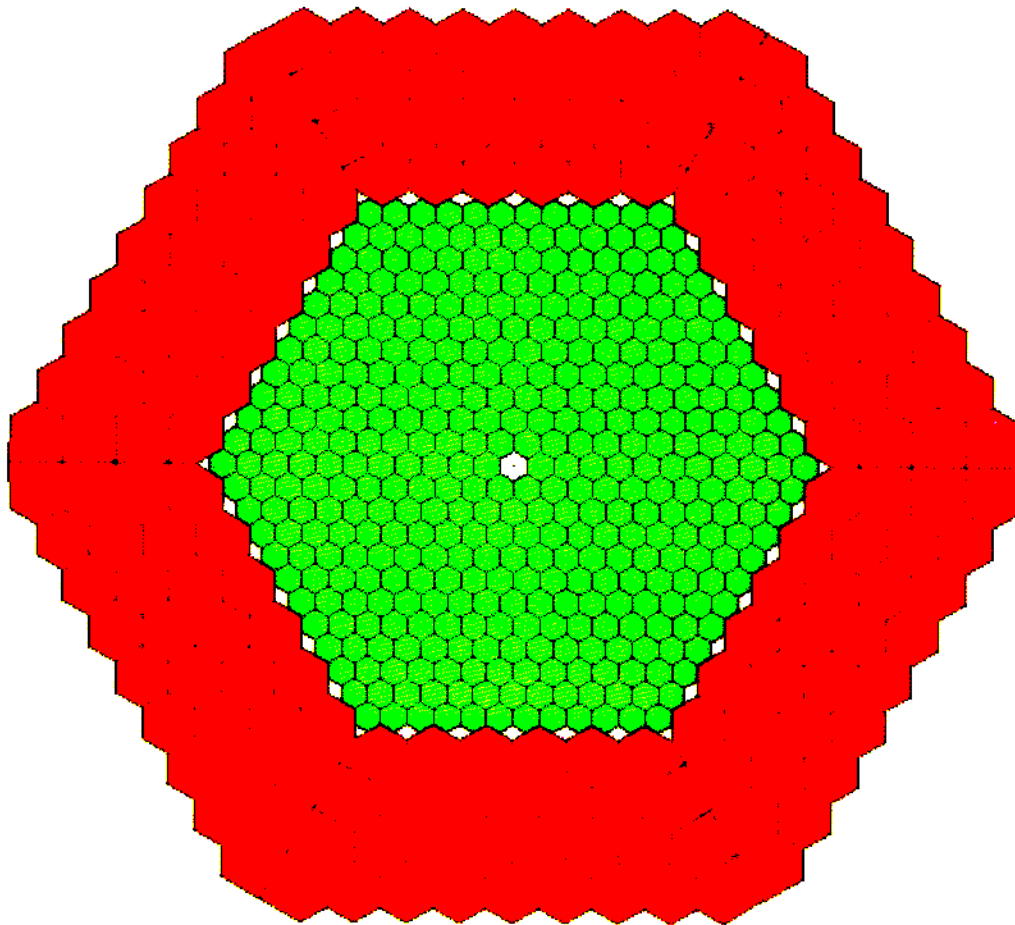
Konzept: Kryo-Detektor mit Saphir-( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), später  $\text{CaWO}_4$ -Kristall, auf Sprungtemperatur von Wolfram (12mK). WIMP-Stoß löst Phononen aus, die von Wolframbilm dissipiert werden  $\rightarrow$  Temperaturerhöhung  $\rightarrow$  Widerstandsänderung; zusätzl. Scintillationslicht als Veto

Status: nach 1. Phase im Umbau für  $\text{CaWO}_4$

# Position des MAGIC-Teleskops



MAGICT Phase I Camera

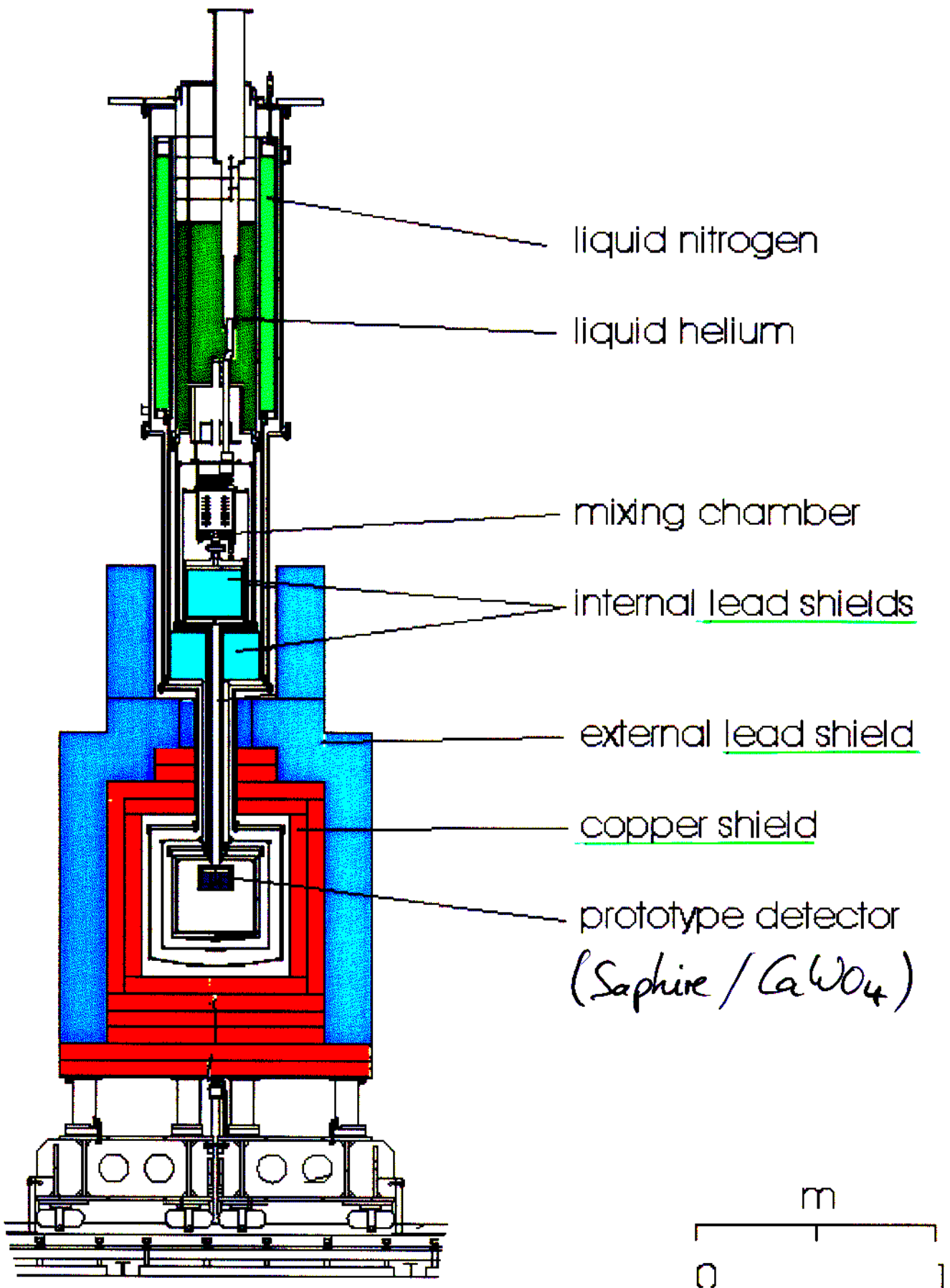




# Photomultiplier der MAGIC-Kamera

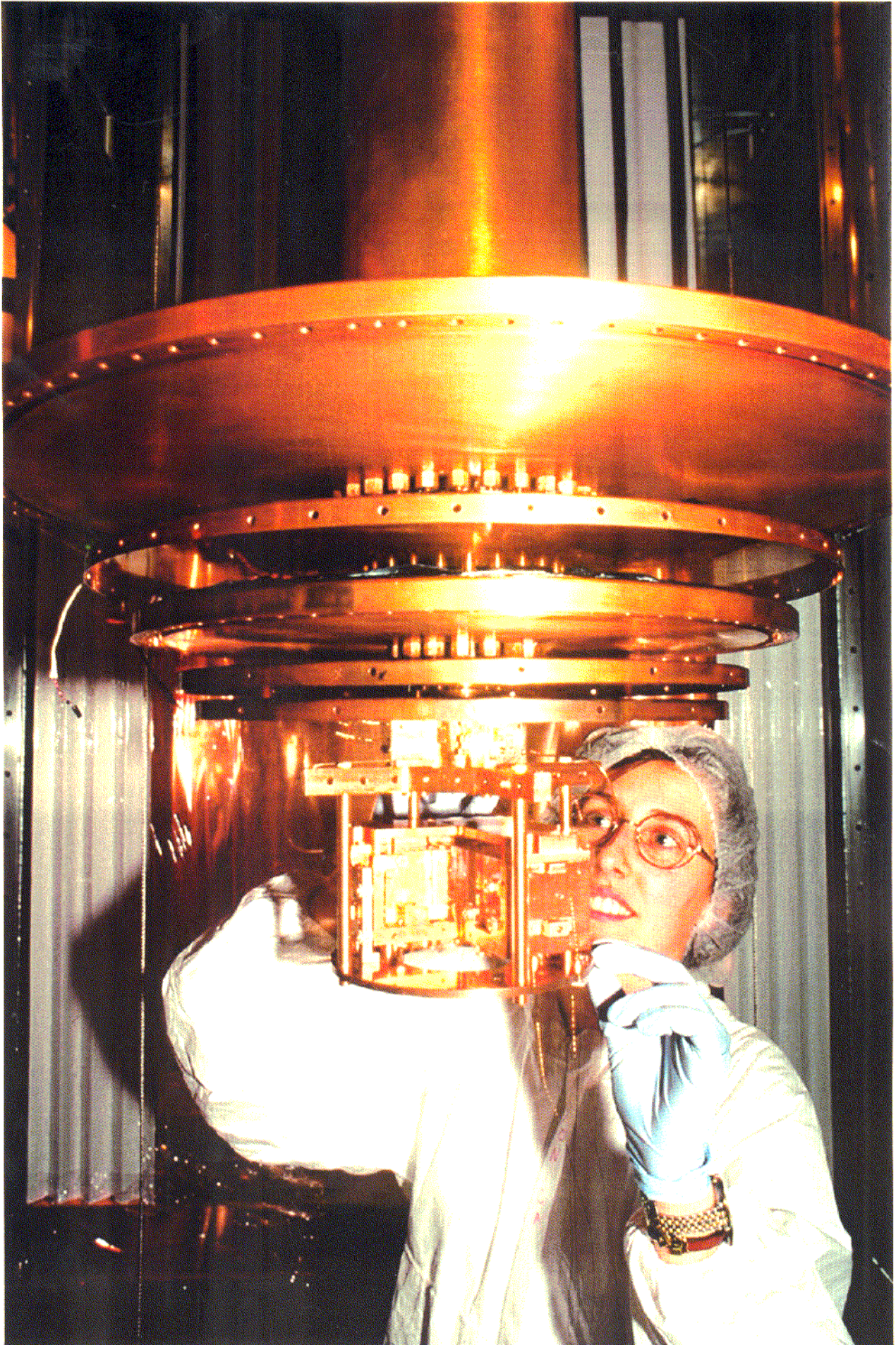


# CRESST - Detektoraufbau





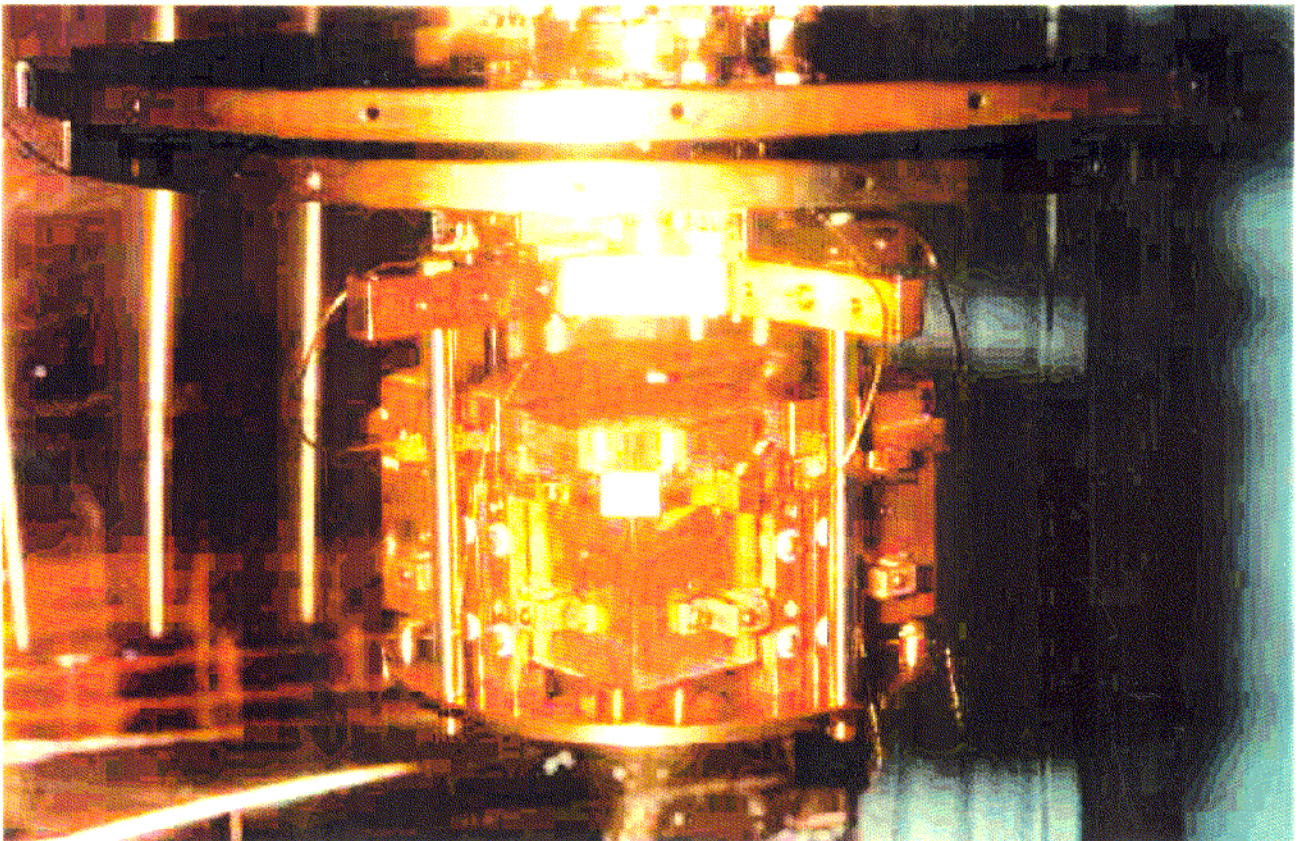
CRESST: Detektormodul



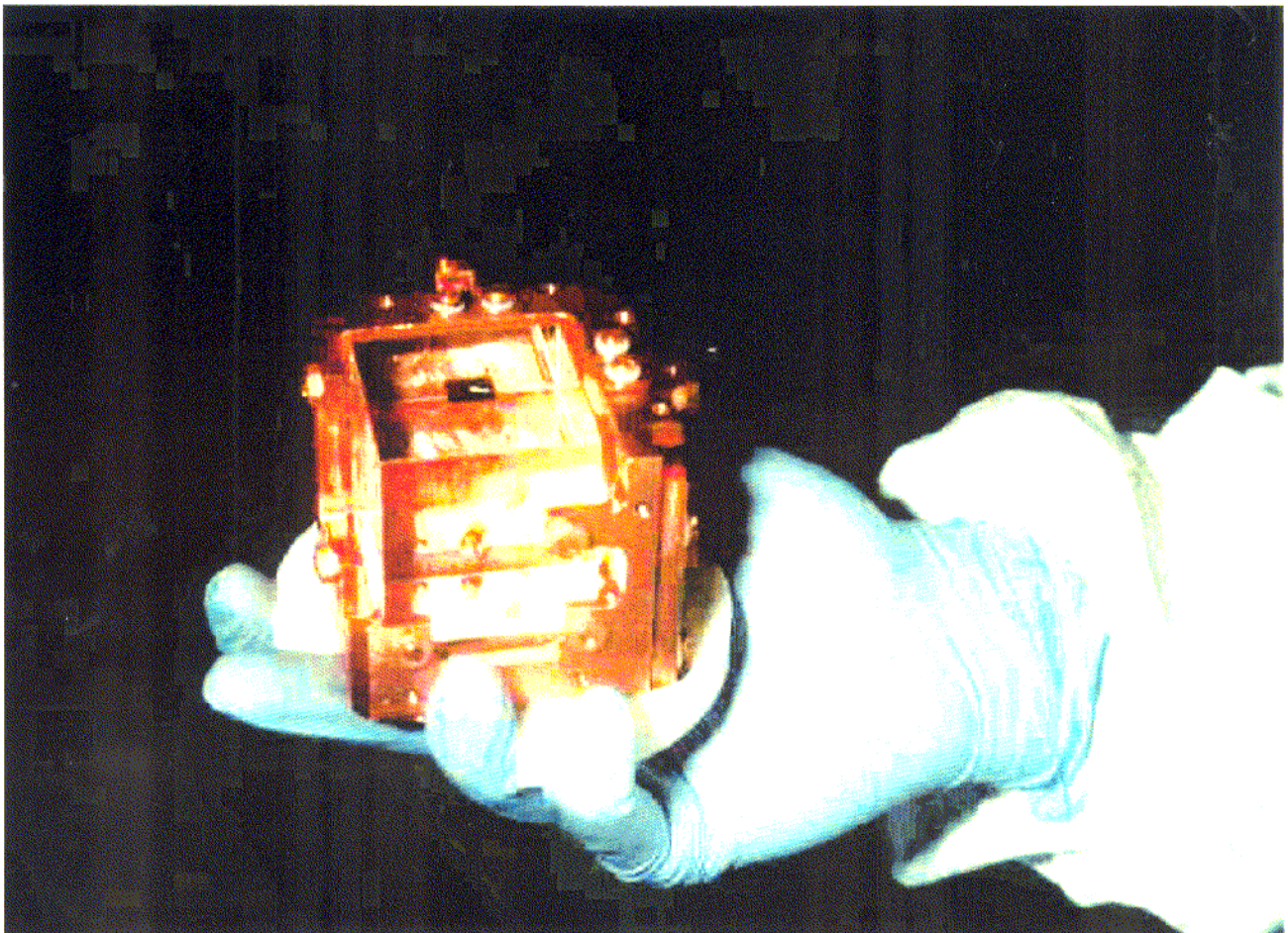


**CRESST: Prototype Detectors (1 kg Sapphire)**

**All Detectors mounted (1048 g total)**



**Single 262 g Detector**





# Diskutierte Projekte

## ● NLC (Next Linear Collider)

Design:  $e^+e^-$ -Collider, ca. 30 km lang  
Schwerpunktsenergie 500 - 1000 GeV

Ziel: Präzisionsuntersuchung des Higgs-Bosons  
und Supersym. Teilchen

Konzepte: z.B. TESLA-Projekt beim DESY (Hamburg)

techn. Daten: □ Länge 33 km

□ supraleitende Beschleunigungs-  
resonatoren

□ Hochfrequenz 1.3 GHz

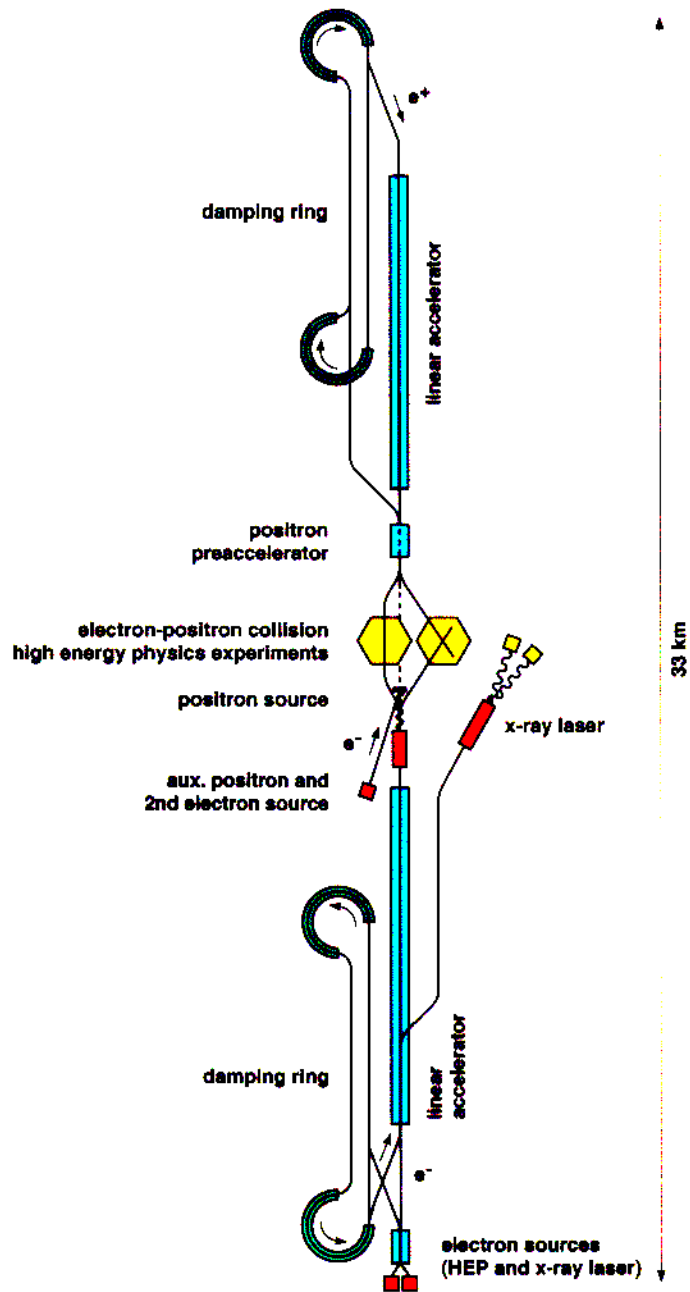
□ FEL-Laser höchste Brillianz  
für biologische und chemische  
Untersuchungen, z.B. zum Ab-  
lauf chem. Reaktionen

Status: technischer Design-Bericht liegt vor (TESLA)

Machbarkeit gezeigt  
Detektorkonzept präsentiert



# TESLA-Grundstruktur

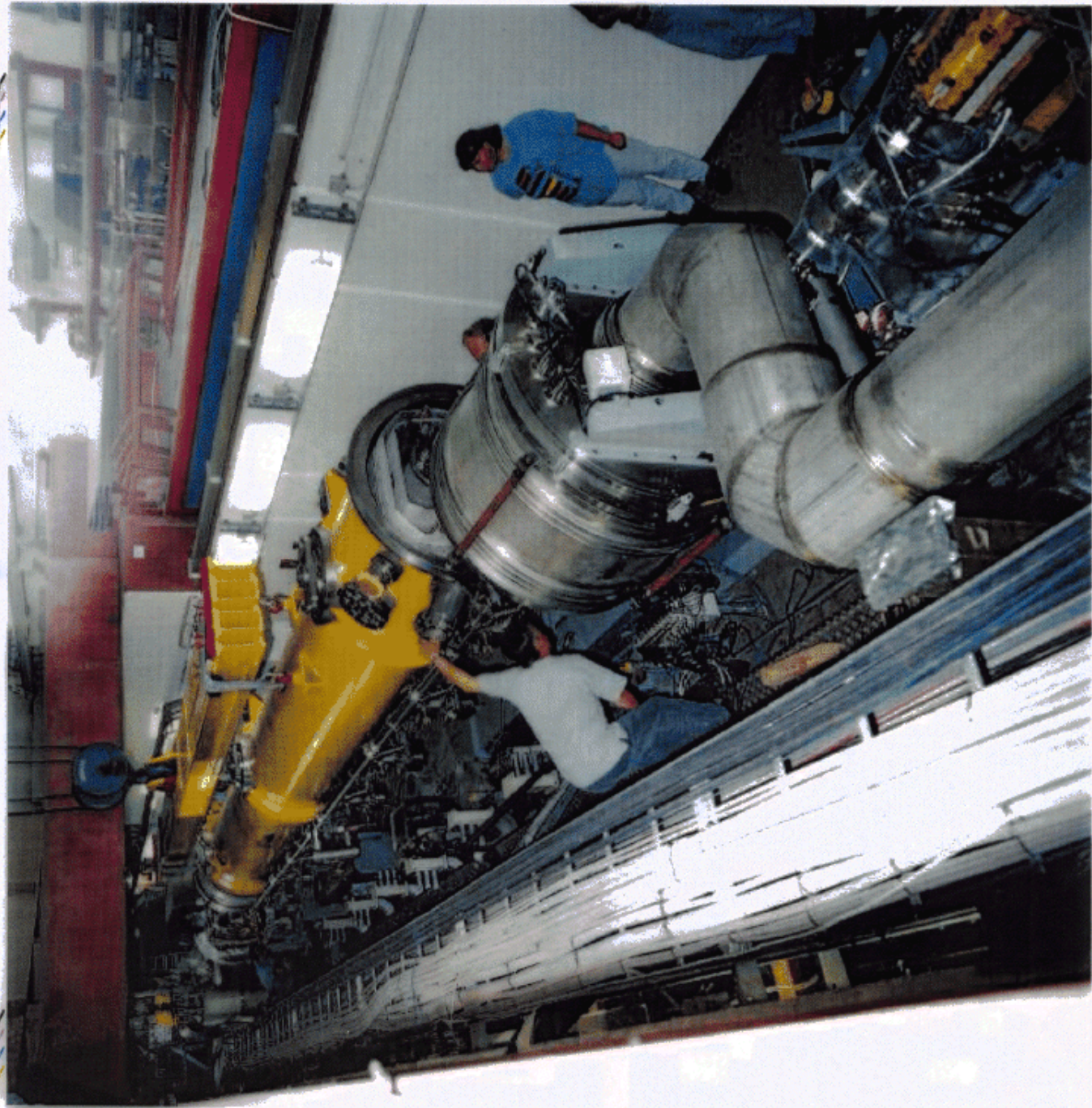


H.Wake 3/2000

Figure 1.2.1: Sketch of the overall layout of TESLA.

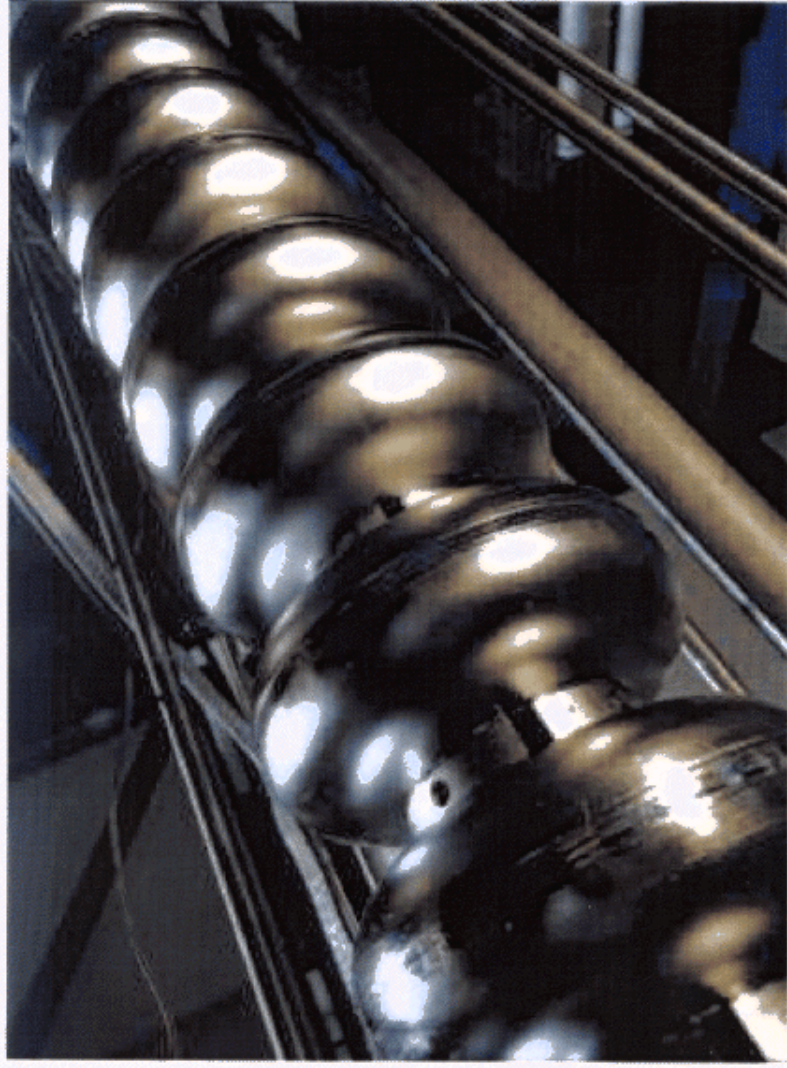


TESLA - Test facility (DESY, HH)





TESLA, supraleitender 1.3 GHz Beschleunigungsresonator





mögl. Trasse des TELSA -LC

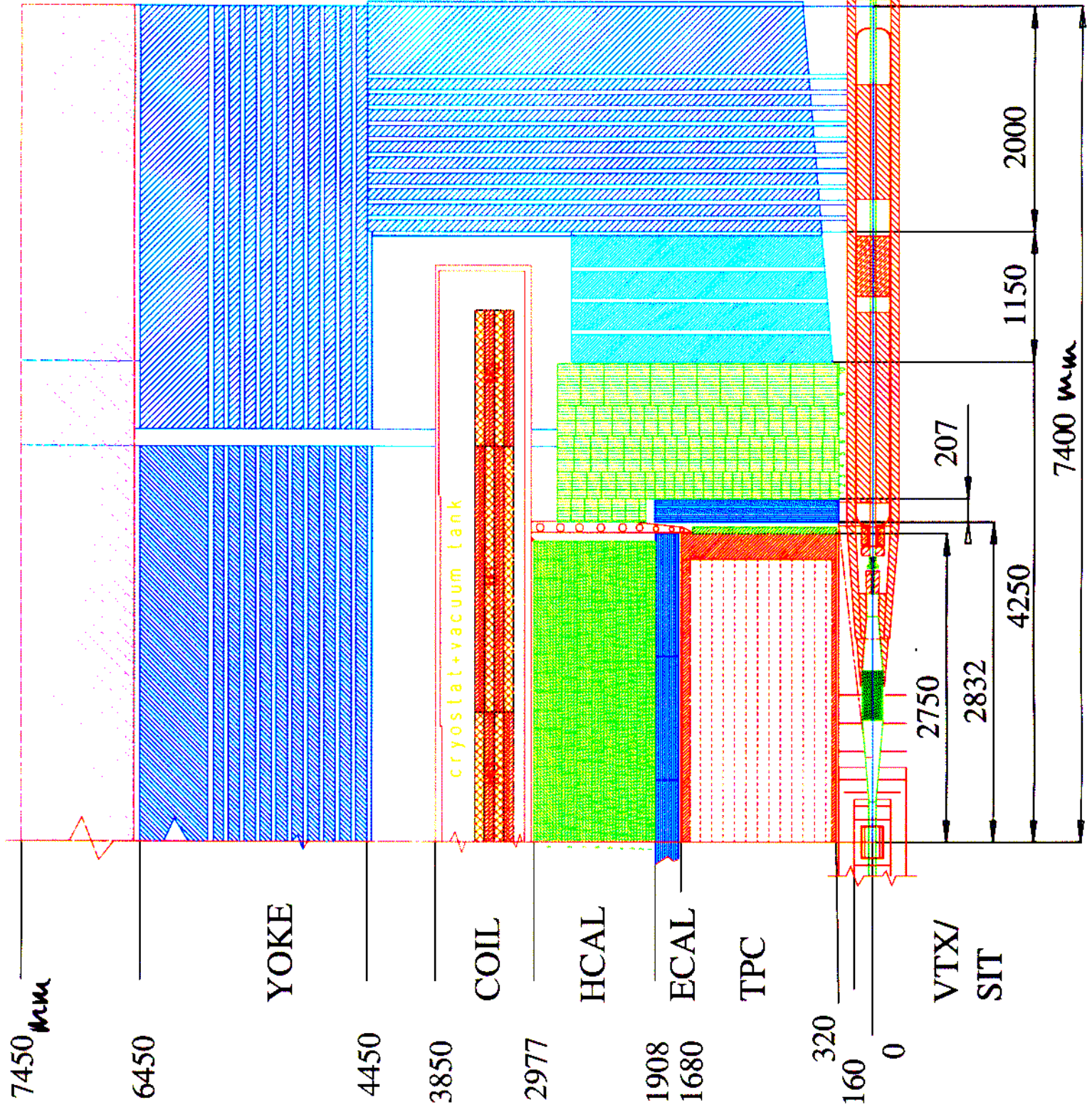




TESLA-Detektor

Konzeptstudie

Größe x LEP-Detektor





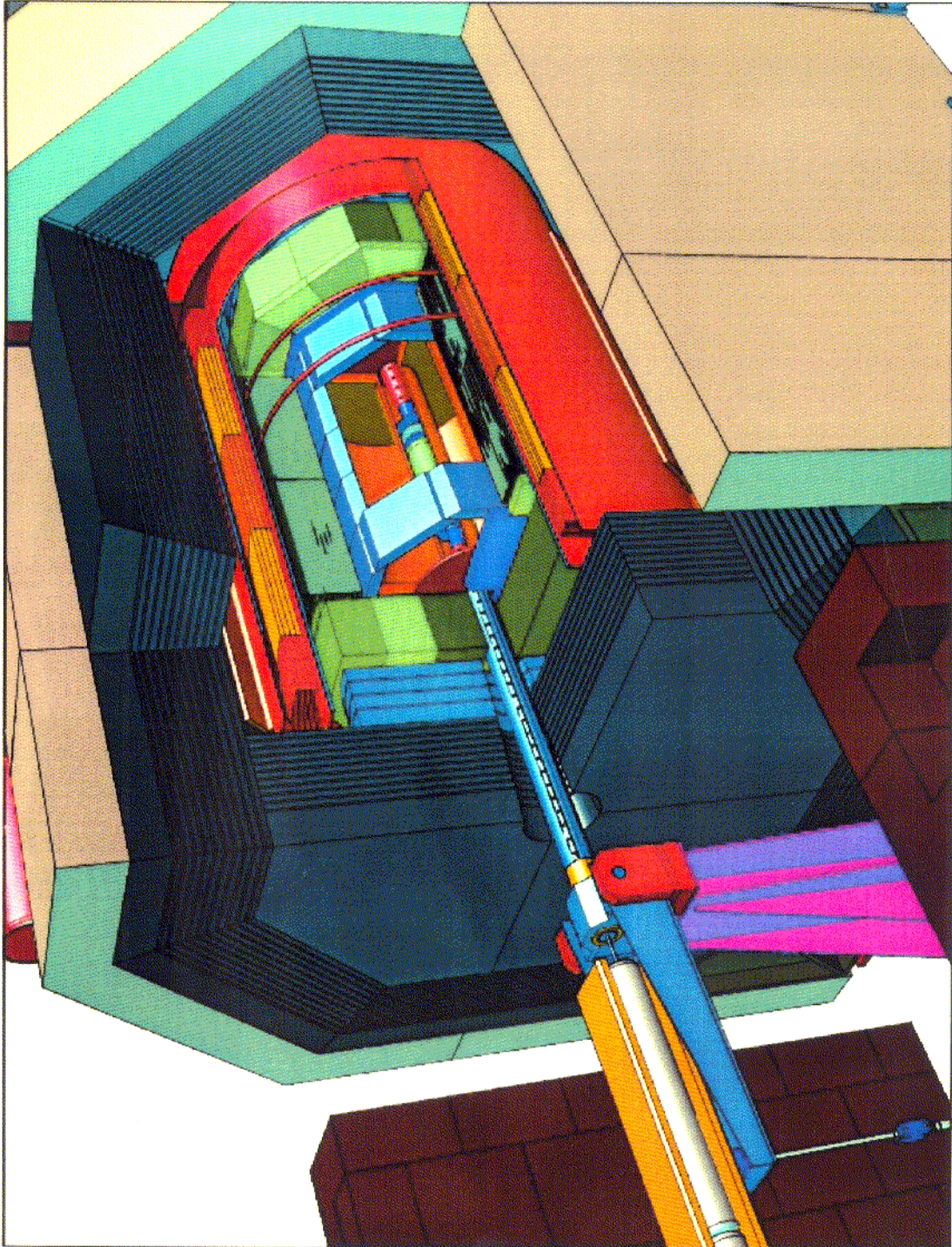


Figure 8.1.3: *View of the detector in the beam position.*

# Diskutierte Projekte

## ● $\mu^+ \mu^-$ - Collider

Design: kreisförmiger Collider, 2 bis 4 TeV Schwerpunktsenergie

Ziel: Higgs-Boson Präzisionsstudien  
(Higgs-Kopplung proportional Masse)

Herausforderung: Erzeugung, Kühlung, rasche Beschleunigung vieler Myonen

## ● $\nu$ -Fabrik

Design: im Prinzip ein  $\mu^-$ -Speicherring mit langen geraden Zerfallsstrecken, hohe  $\mu^-$ -Energie führt zu fein gebündeltem, hochintensivem  $\nu$ -Strahl

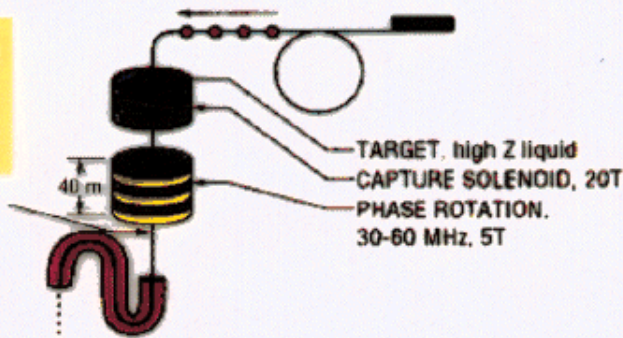
Ziel: Präzisionsstudien zu  $\nu$ -Oszillationen

Herausforderung: wie für  $\mu^+ \mu^-$ -Collider



# 2 x 2 TeV Muon Collider Schematic

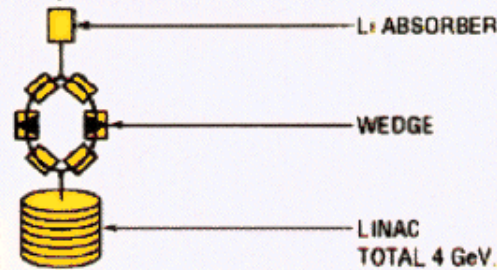
$10^{22}$  protons  
per year at  
8 GeV/c



PROTON SOURCE

$\mu$  PRODUCTION

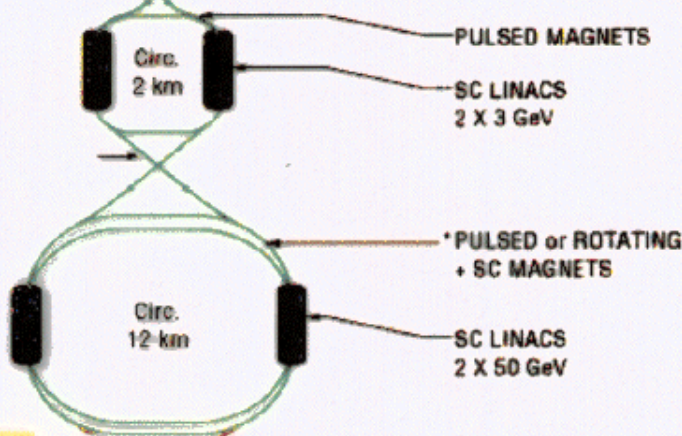
\* POLARIZATION & P SELECTION  
Snake + Collimator



IONIZATION COOLING  
20 Stages

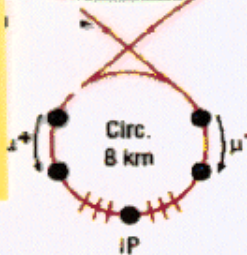
$2 \times 10^{21}$   
muons/yr at  
 $\sim 100$  MeV/c

LINACS + RECIRCULATION



FAST  
ACCELERATION

$\sim 2 \times 10^{12}$   
muons/bunch  
4 bunches  
x 15 Hz



$$L = 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

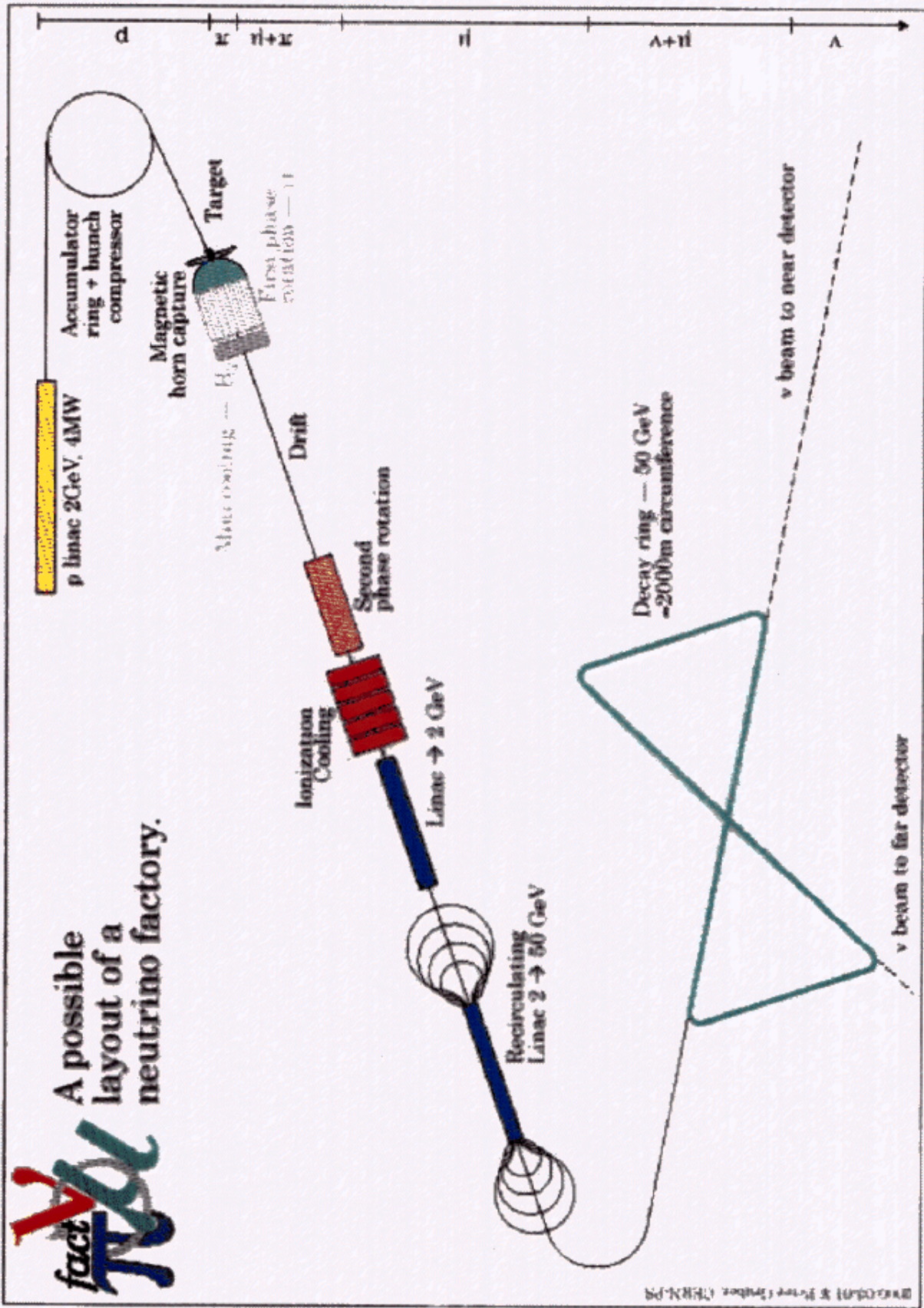
$$\beta^* = 3 \text{ mm}$$

COLLIDER  
RING





# A possible layout of a neutrino factory.



BRACD011 & P-107 (Imhof, TRN-PS)

A possible layout of a neutrino factory.

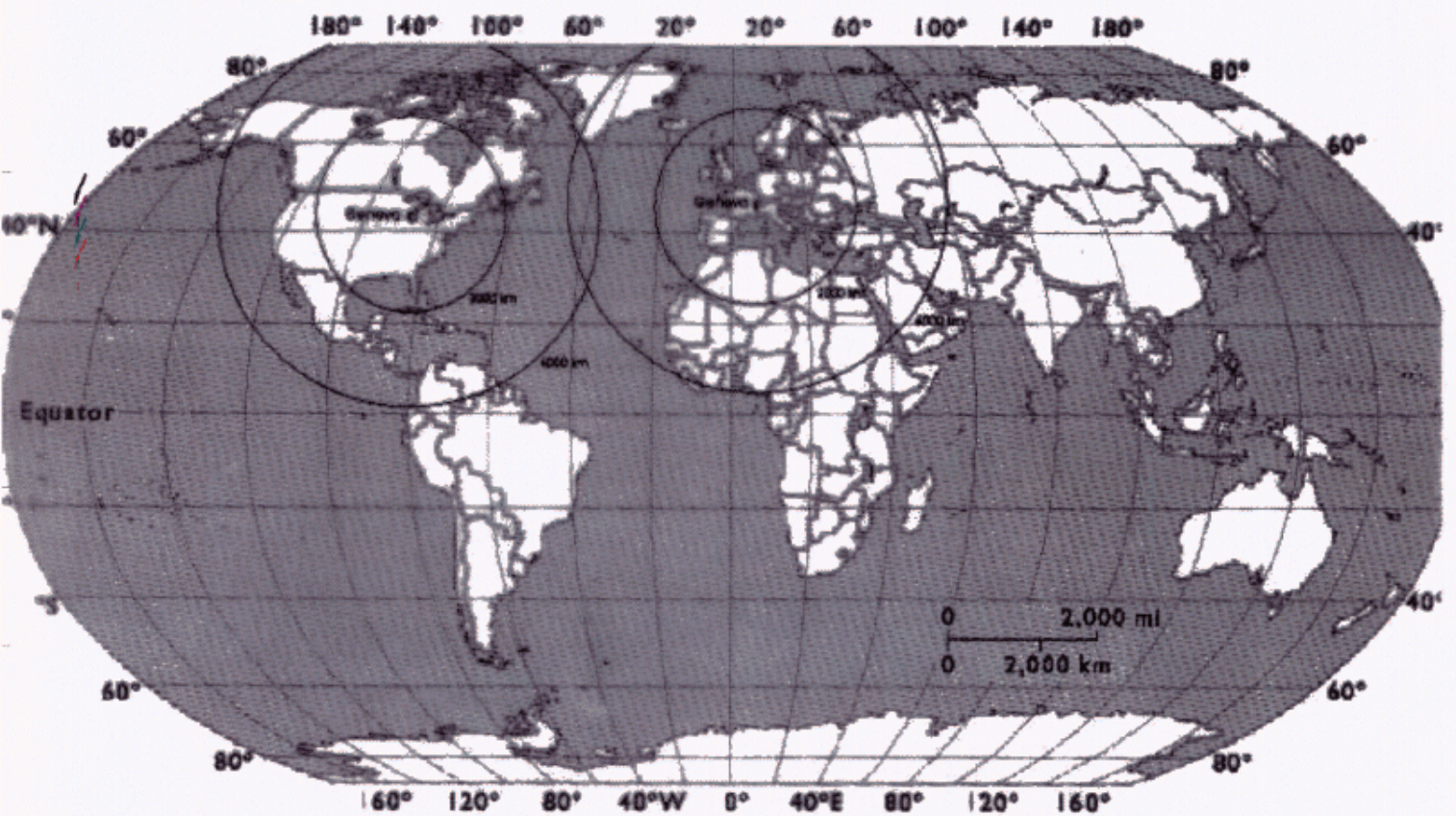


FERMI → GRAN SASSO 7332

FERMI → CANARIES ~ 6000

FERMI → WEST COAST ~ 3000

[OPTIMAL]



CERN → GRAN SASSO 732 ☹️

CERN → FERMI LAB ~ 6000

CERN → CANARIES ~ 3000

[OPTIMAL]



# Diskutierte Projekte

- **CLIC** (Compact Linear Collider)

Design:  $e^+e^-$ -Collider,  $> 2$  TeV Schwerpunktsenergie  
NLC - Nachfolgeprojekt;  $\sim 30$  km lang

Ziel: Vermessung von SUSY-Teilchen

Herausforderung: neues Beschleunigungskonzept mit extrem hoher Frequenz (30 GHz) und sehr hohen Beschleunigungsgradienten ( $\approx 150$  MV/m)

- **VLHC** (Very Large Hadron Collider)

Design: p-p-Beschleuniger mit 100 TeV Schwerpunktsenergie, Umfang zw.

100 km bei 12.6 Tesla Magnetfeldstärke

650 km bei 1.8 Tesla " "

Ziel: noch nicht konkret

Herausforderung: Magnete mit  $> 12$  Tesla (Prototyp des Lawrence-Berkeley-Labs LBNL: 12.2 Tesla)  
gespeicherte Strahlenergie 1 (100 km)

bis  $\approx 10$  GJ (650 km)

(NB.  $3.6 \text{ kJ} \approx 1 \text{ kWh} \Rightarrow 10 \text{ GJ} \approx 2.8 \text{ MWh}$ )



# Fazit

- viele offene Fragen; Teilchenphysik längst nicht am Ende der Erkenntnisse angelangt
- viele und vielfältige genehmigte Projekte von b-Fabriken,  $\nu$ -Strahlexperimenten bis zu großen Collidern und astrophys. Experimenten (erdgebunden und auch satelliten-gestützt)
- Laufzeit der genehmigten Projekte ist lang, z.B. LHC: Beginn 2005/6  
Laufzeit ca. 15 Jahre
- große Bandbreite zukünftiger Beschleuniger-Projekte; TESLA - Linear  $e^+e^-$  - Collider dabei am weitesten gediehen (Konstruktion könnte bei Besage der Finanzierung sofort beginnen, Bauzeit ca. 5-7 Jahre)
- viele technolog. Herausforderungen in diskutierten Projekten