Beschleuniger

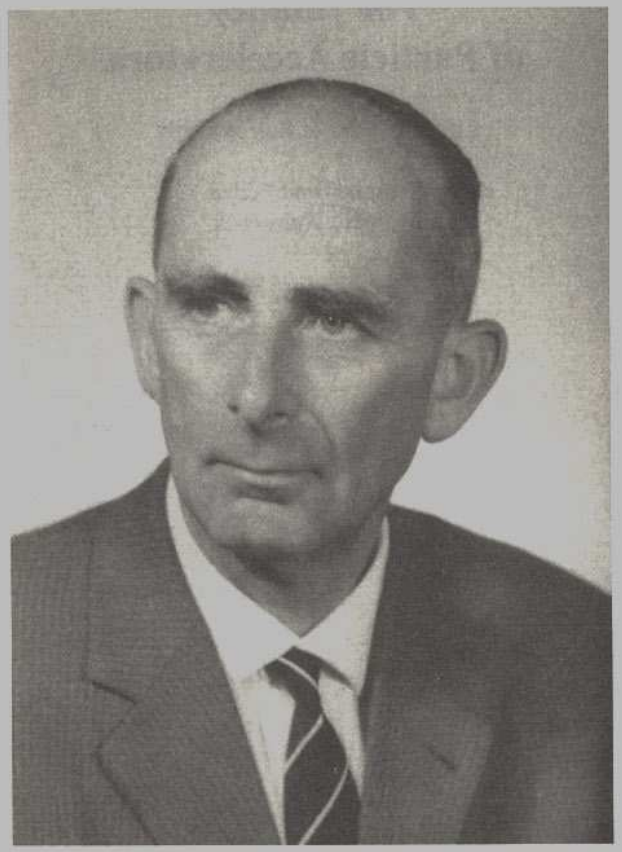
Prof. Dr. Albrecht Böhm
III. Physikalisches Institut A
RWTH Aachen

Seminar „Grundlegende Experimente der Teilchenphysik“

19. Nov. 2002

Beschleuniger

- Die Anfänge des Beschleunigerbaus
- Grundprinzipien der Teilchenbeschleunigung
- Beispiele moderner Beschleuniger
  - Kreisbeschleuniger (LEP, LHC)
  - Linearbeschleuniger (SLC, TESLA, CLIC)



Rolf Wideröe

Rolf Wideroe geb. 11.7.1902

In Aachen 1926 bis 1928
Doktorarbeit bei Prof. Rogowski

The Infancy of Particle Accelerators

Life and Work of Rolf Wideröe

Compiled and Edited
by Pedro Waloschek

vieweg

Der Arbeitsraum von Rolf Wideröe im Rogowksi Institut

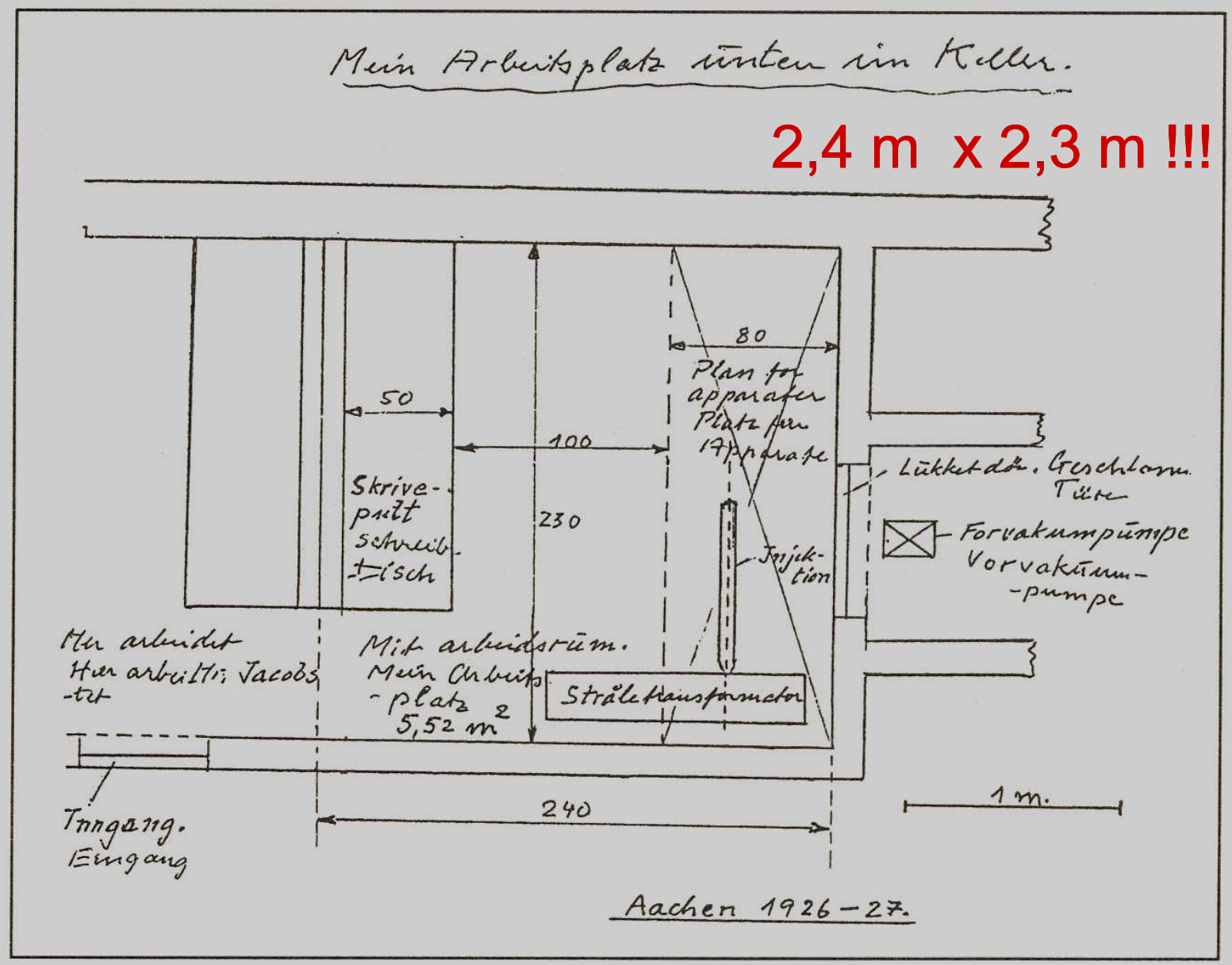
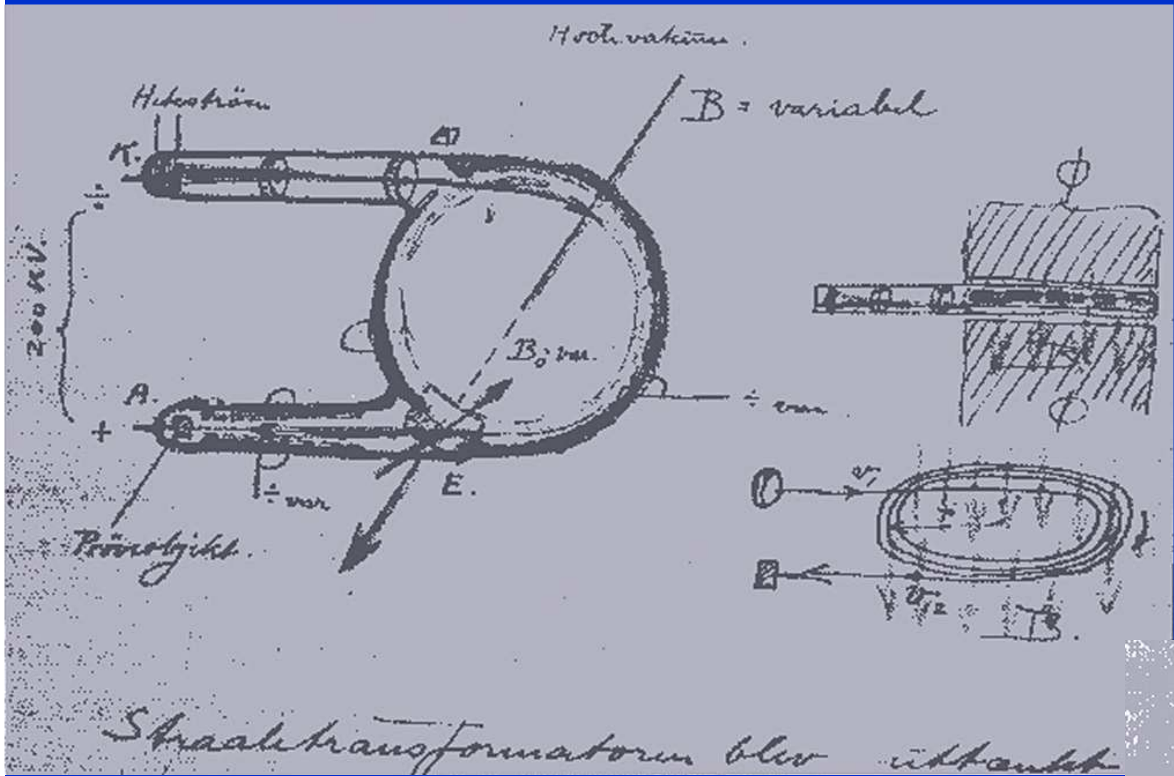
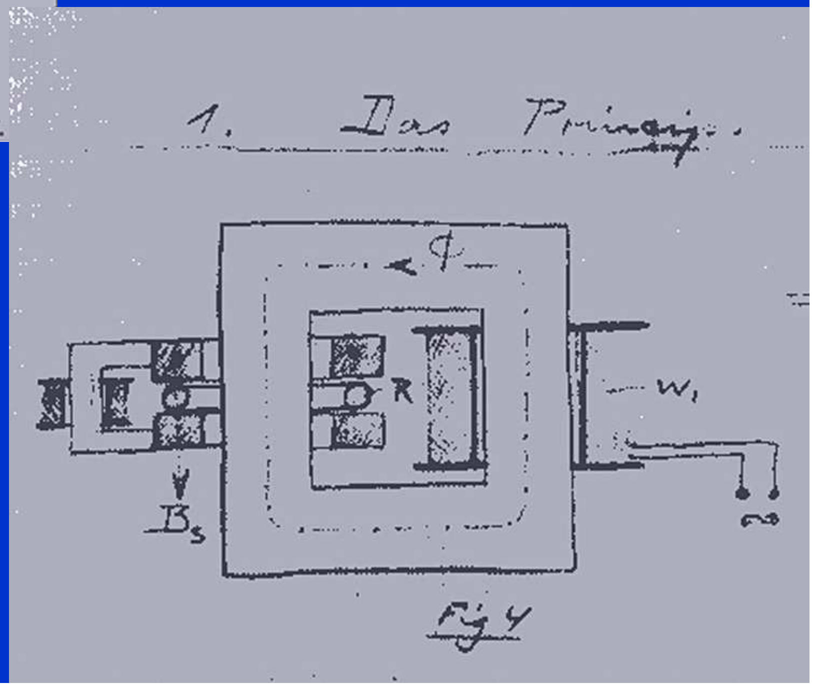


Fig. 3.1: Wideröe's working area in Aachen.

Wideröes Skizzen des Betatrons





Wideröes Entwurf eines Linearbeschleuniger 1928

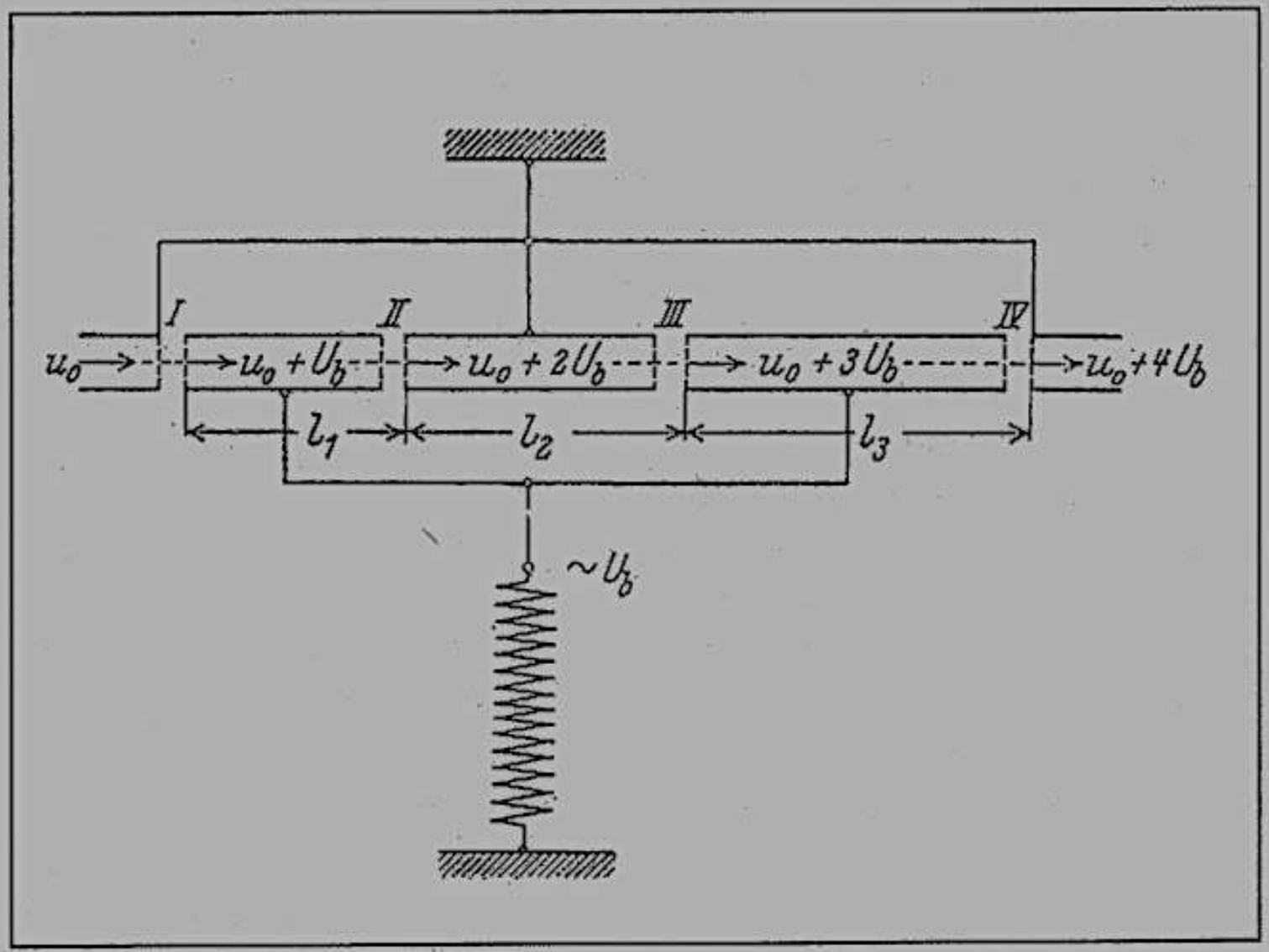


Fig. 3.5: The principle of the 'drift-tube' as illustrated in Wideröe's thesis [Wi28].

Das Europäische Forschungszentrum für Elementarteilchenphysik CERN

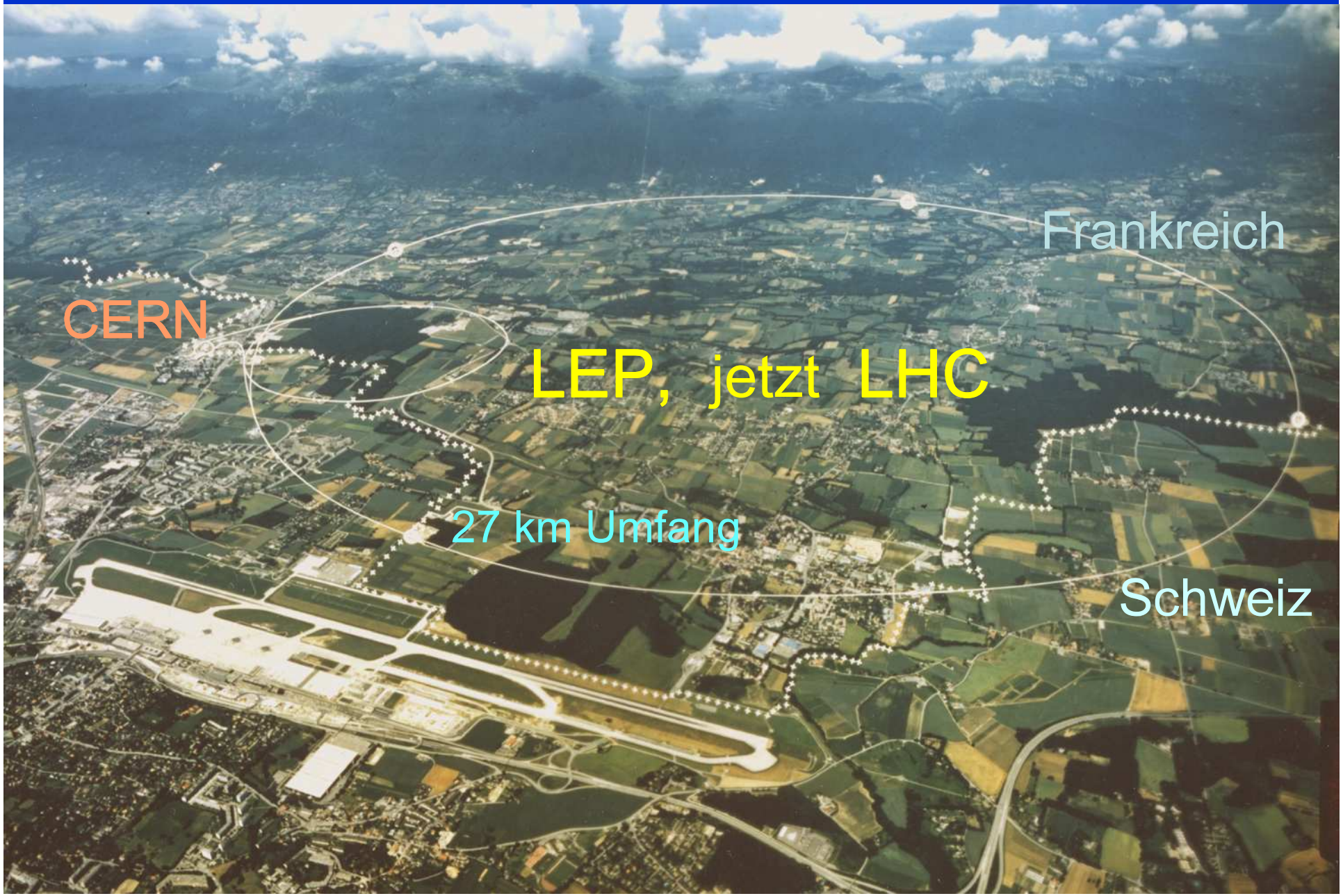
Large Elektron-Positron Speicherring LEP

Energie der Strahlen: bis 2 x 104 GeV

Large Hadron Collider LHC

Protonen gegen Protonen mit je 7000 GeV

Das Europäische Forschungszentrum für Elementarteilchenphysik



Grundprinzipien der Beschleunigung

Die Beschleunigung erfolgt durch

a. Gleichspannung

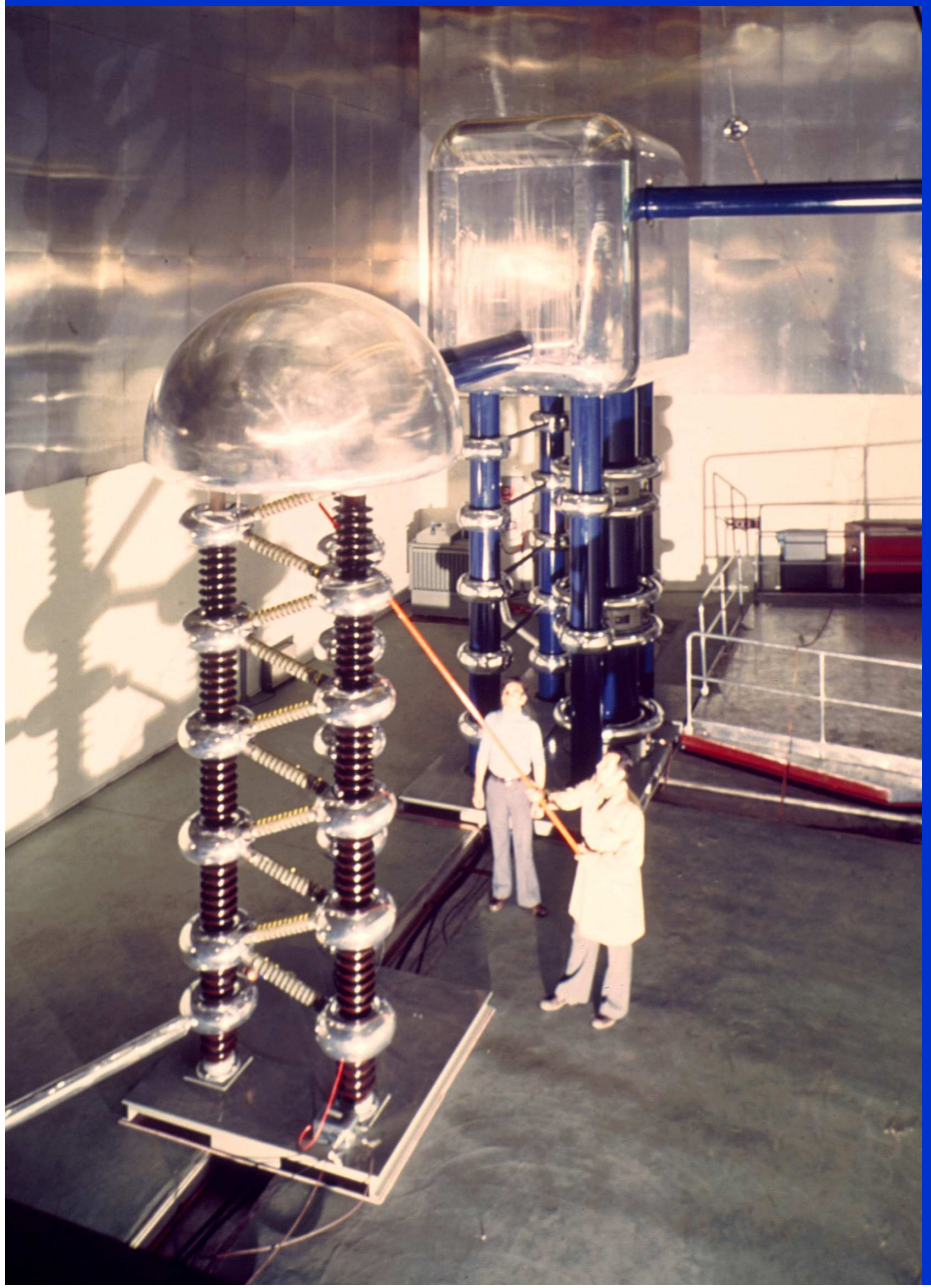
   Problem: Bei hohen Spannungen Durchbrüche

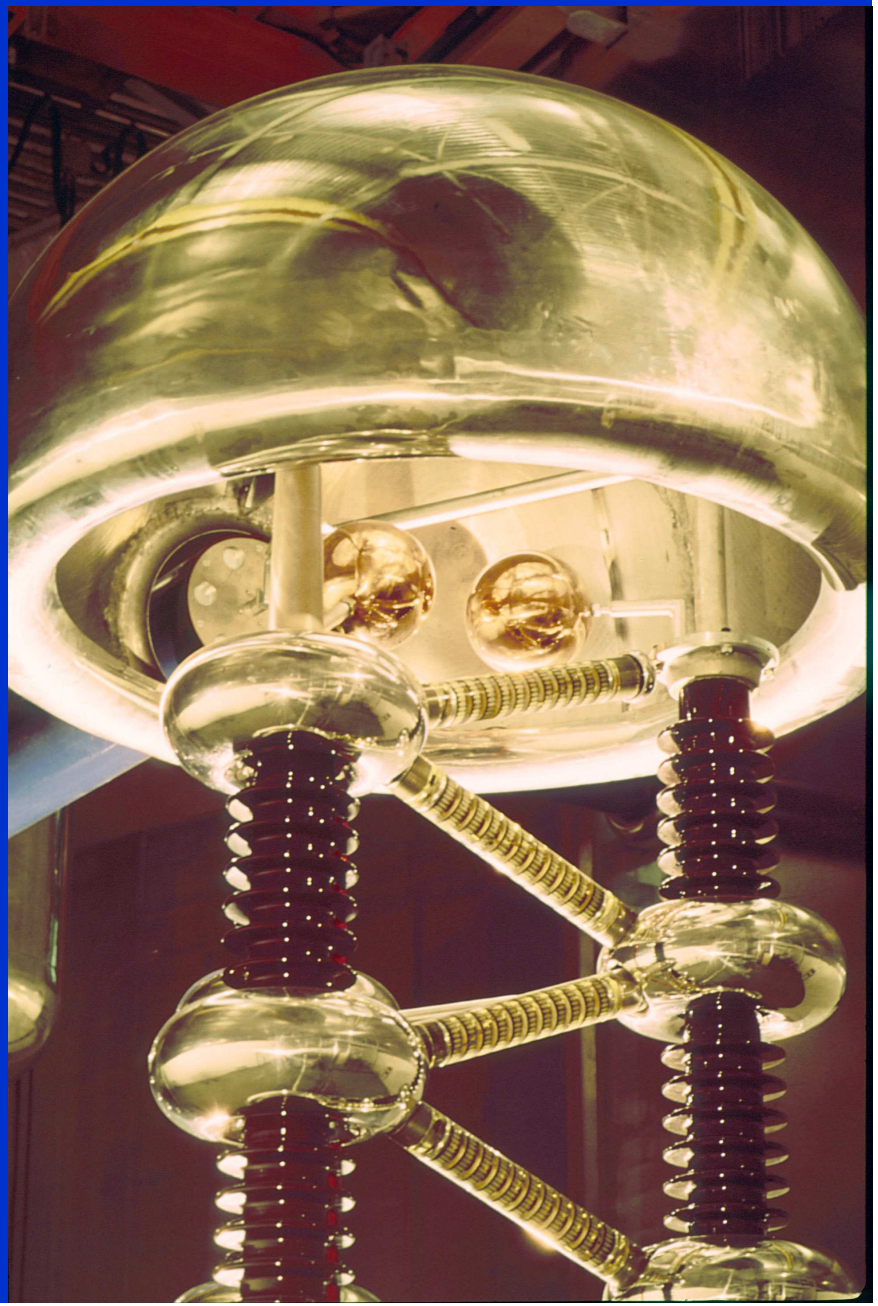
oder

b. Wechselspannung (Hochfrequenz)
   mittels Hohlraumresonatoren

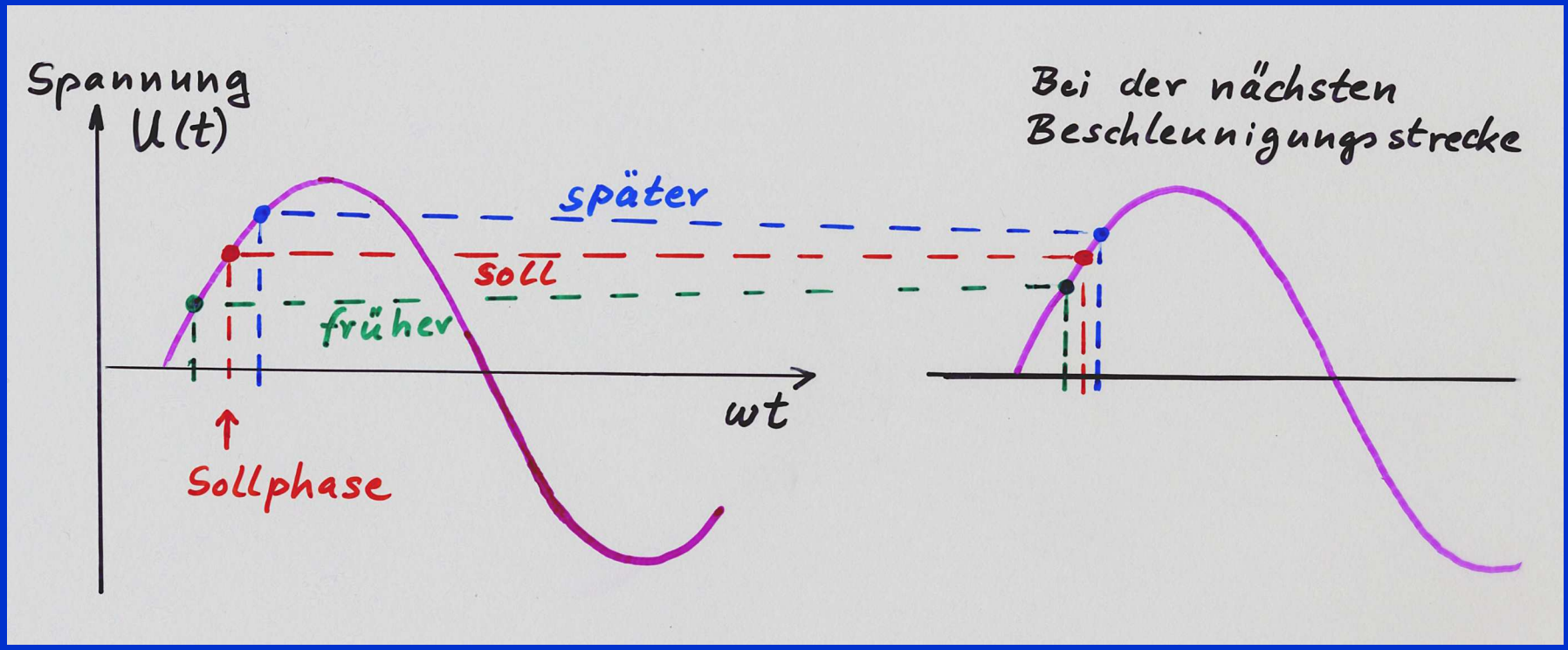
   Frequenzbereich typisch zwischen 100 Mhz und einigen GHz

Cockroft-Walton Kaskadengenerator





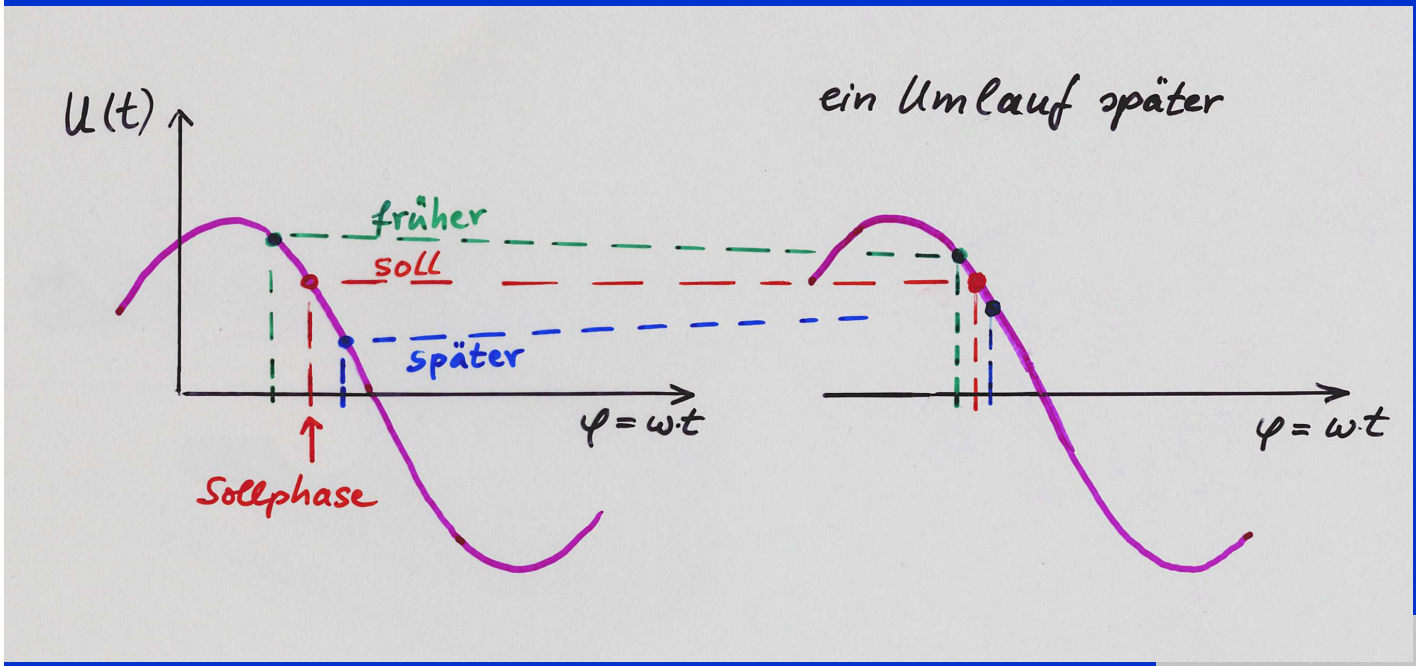
Beschleunigung durch Hochfrequenz



Die stabile Phasenlage bei nicht-relativistischen Kreisbeschleunigern liegt auf der ansteigenden Flanke der Welle!
Kommt das Teilchen früher als die Sollphase, dann sieht es eine geringere Beschl.spannung. Es nähert sich dann der Sollphase an, usw..

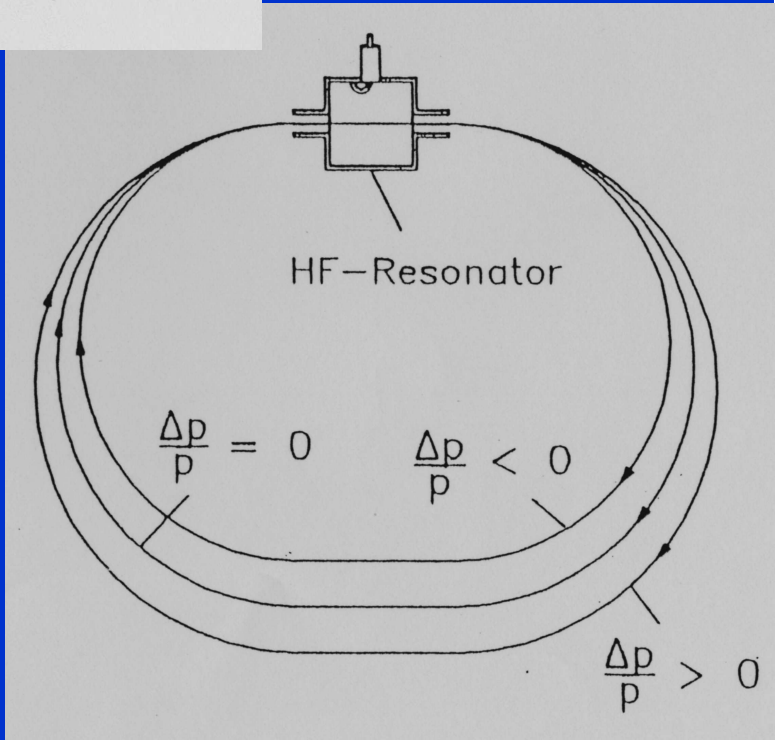
Phasenstabilität bei nicht-relatvistischen Ringbeschleunigern und Linearbeschleunigern

Phasenstabilität bei relativistischen Beschleunigern

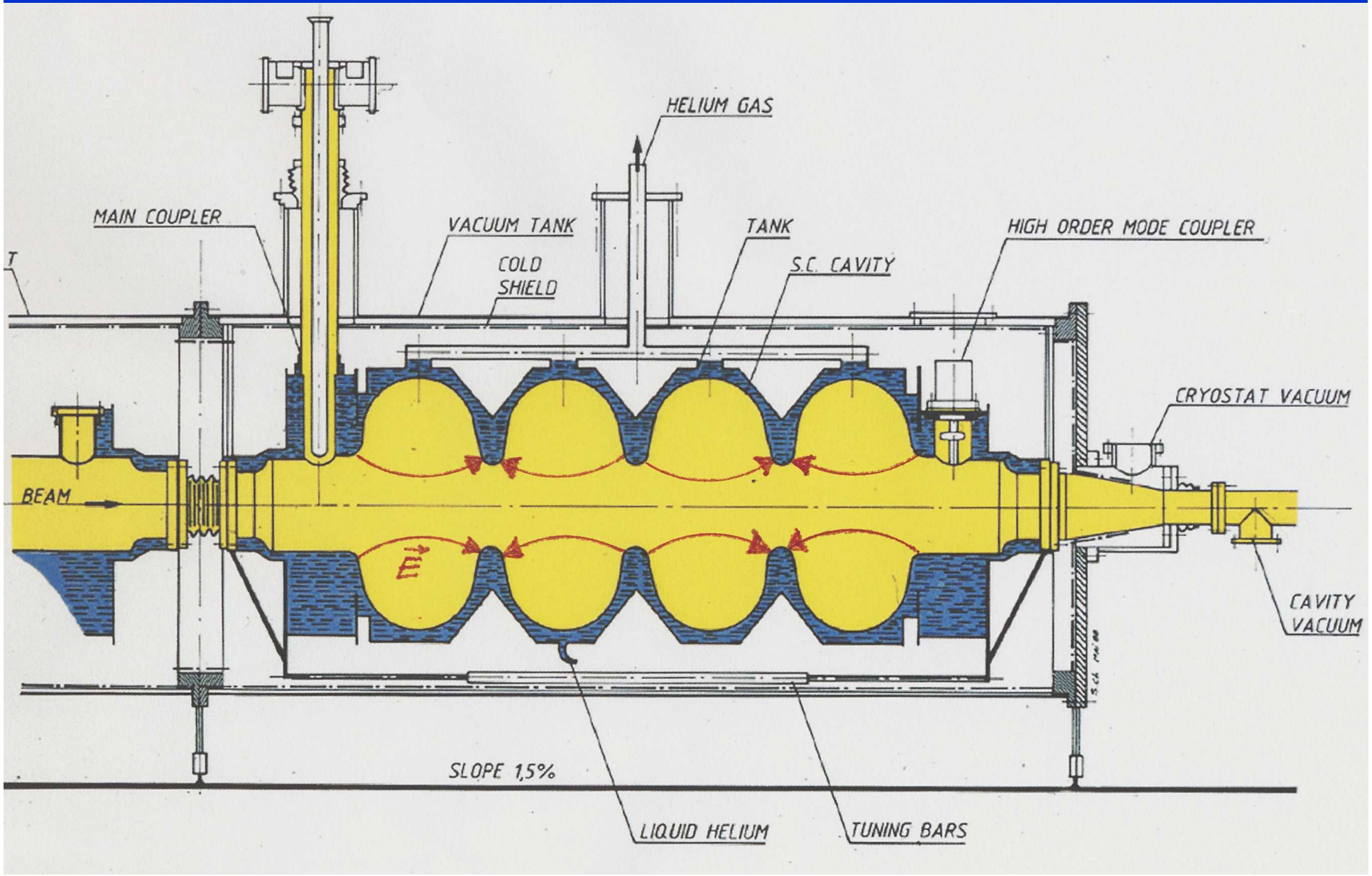


Phasenstabilität bei relativistischen Ringbeschleuniger

Die stabile Phasenlage bei relativistischen Ringbeschleunigern liegt auf der absteigenden Flanke der Welle!
Kommt das Teilchen früher als die Sollphase, dann nimmt der Impuls zu und damit auch der Bahnradius und Weg für einen Umlauf, denn die Geschwindigkeit kann nicht größer als c werden.



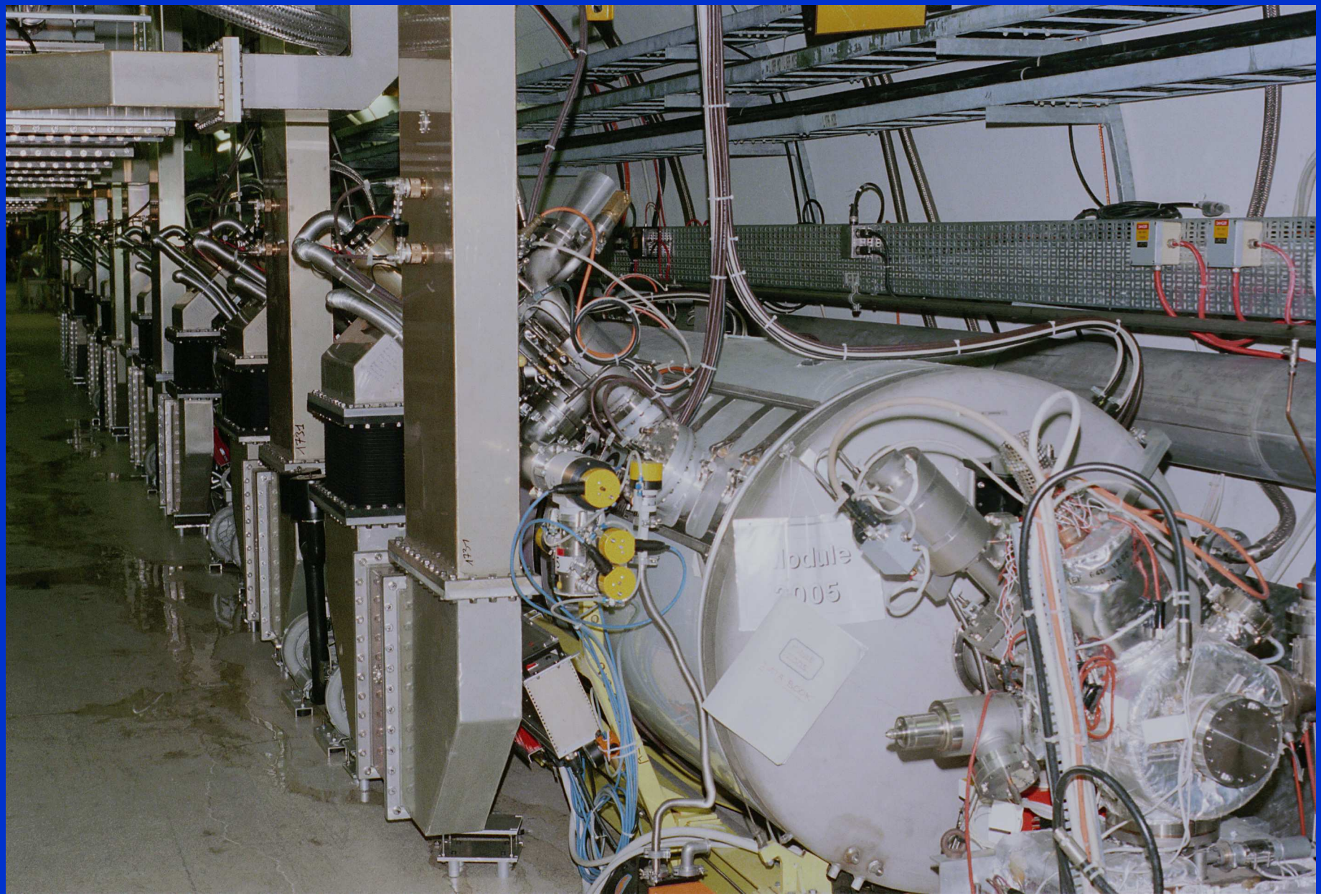
Beschleunigung durch Hochfrequenz mit Hohlraumresonatoren



Supraleitende Hohlraumresonatoren, auf die im Inneren das supraleitende Niob aufgedampft ist.

Kryostat, in dem die Hohlraumresonatoren eingebaut sind.

Kühlung mit flüssigem Helium (Temperatur 4,2 K)



Synchrotronstrahlung

Beschleunigte geladene Teilchen strahlen Synchrotronstrahlung ab.

Dies ist besonders wichtig für Elektronen oder Positronen in Ringbeschleunigern

Abgestrahlte Leistung $P_s \sim 1 / m^4$

Abgestrahlte Leistung: $P_S = \frac{e^2 c}{6\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{1}{(m_0 c^2)^4} \frac{E^4}{R^2}$

$$\frac{P_S(\text{Elektron})}{P_S(\text{Proton})} \approx 10^{13} \quad !$$

Energieverlust eines Elektrons pro Umlauf:

$$\Delta E = P_S \cdot \frac{2\pi R}{c} = \frac{88\,\text{keV m}}{\text{GeV}^4} \cdot \frac{E^4}{R}$$

Beispiel: LEP bei $E_{e^+} = E_{e^-} = 103$ GeV

und $R = 3100$ m $\Rightarrow \Delta E = 3{,}3$ GeV

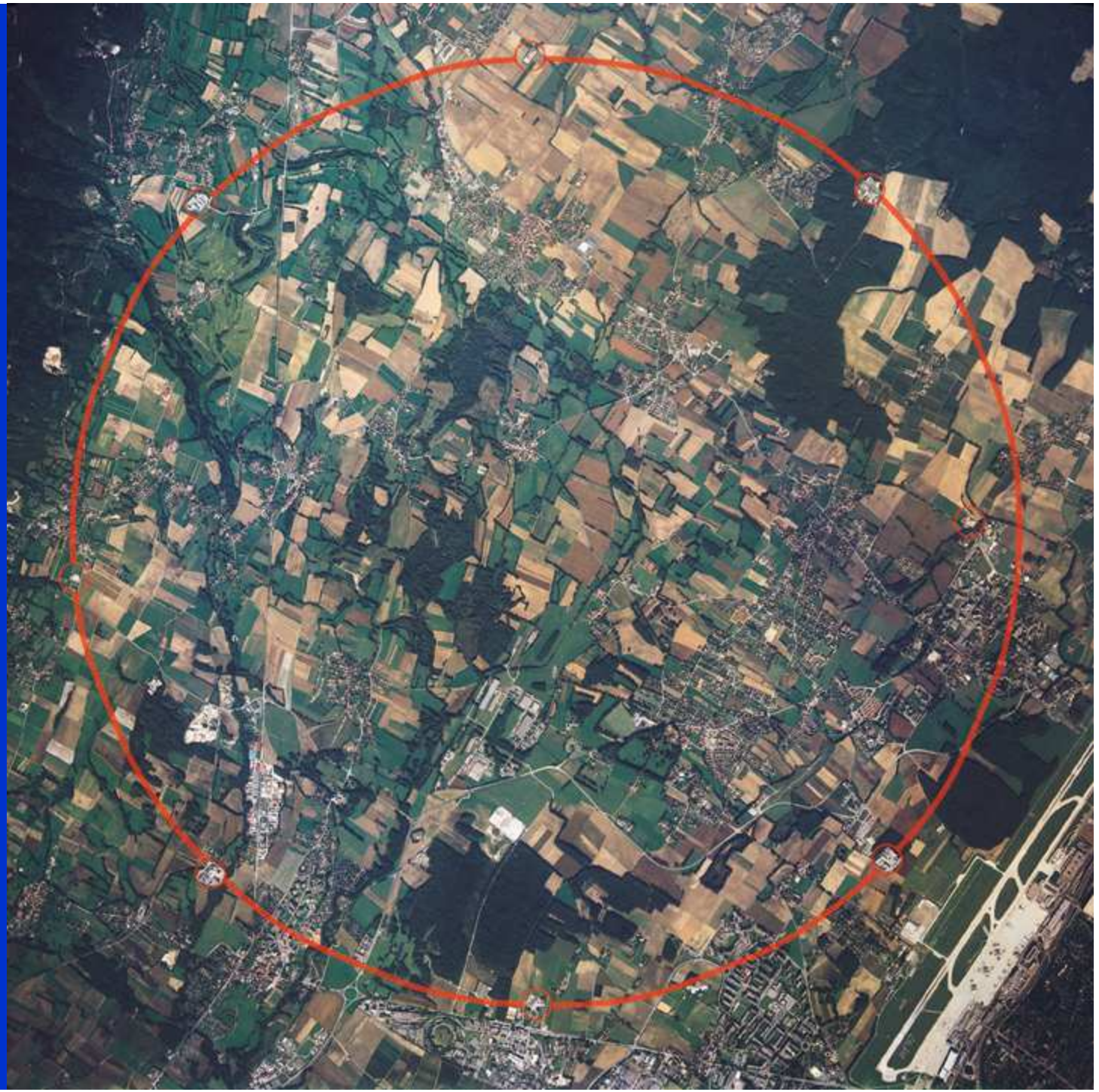
Bei $I_{e^+} = I_{e^-} = 4$ mA benötigt man eine Hochfrequenzleistung von 27 MW (!)

Der LEP Speicherring

Umfang 27 km

Magnetfeld der Diplole nur B = 0,14 T

Ringgröße nur durch die Synchrotron - strahlung notwendig



Transport der Strahlen durch den Beschleuniger

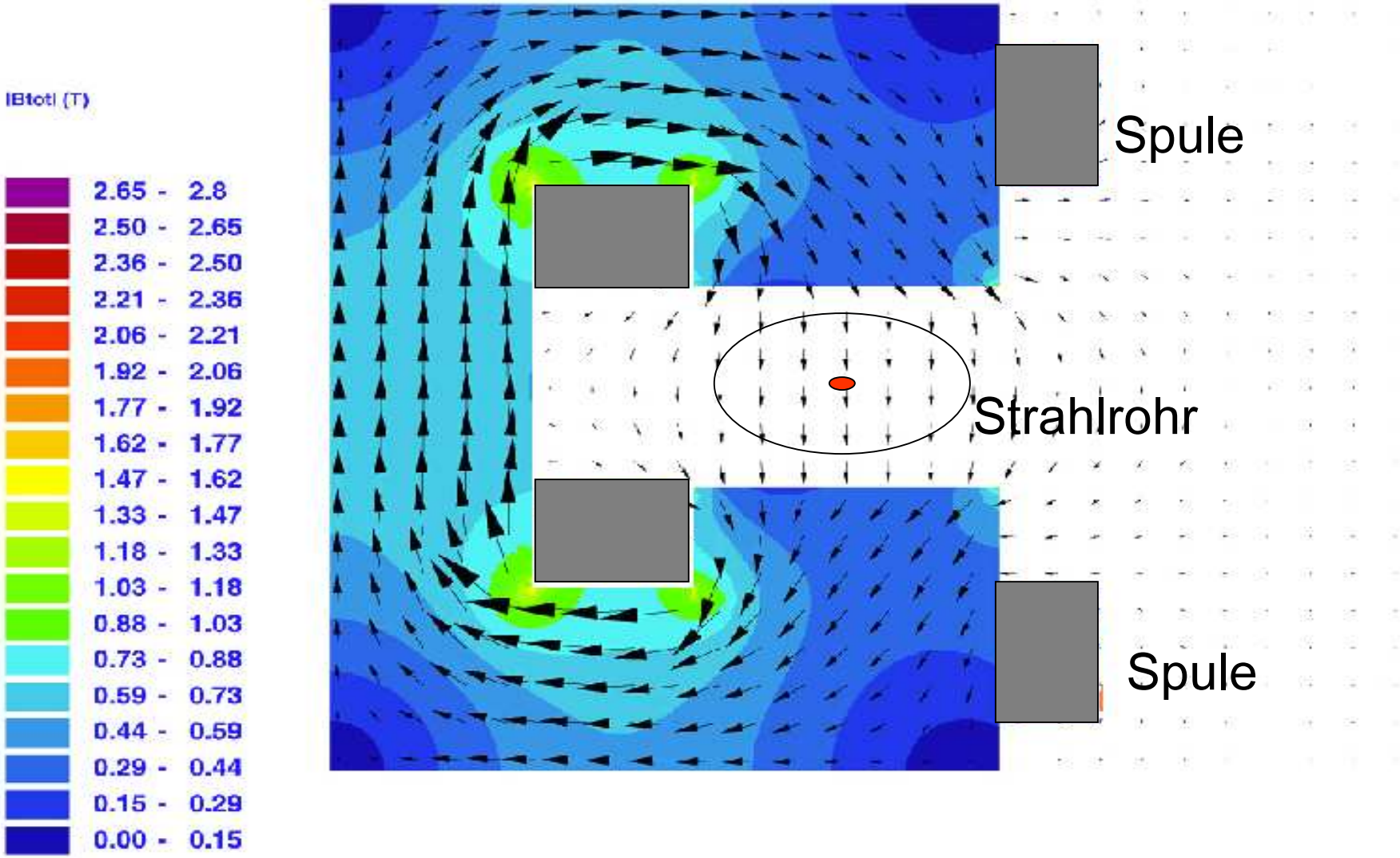
Man benutzt

Dipolmagneten zur Erzeugung einer Kreisbahn

und

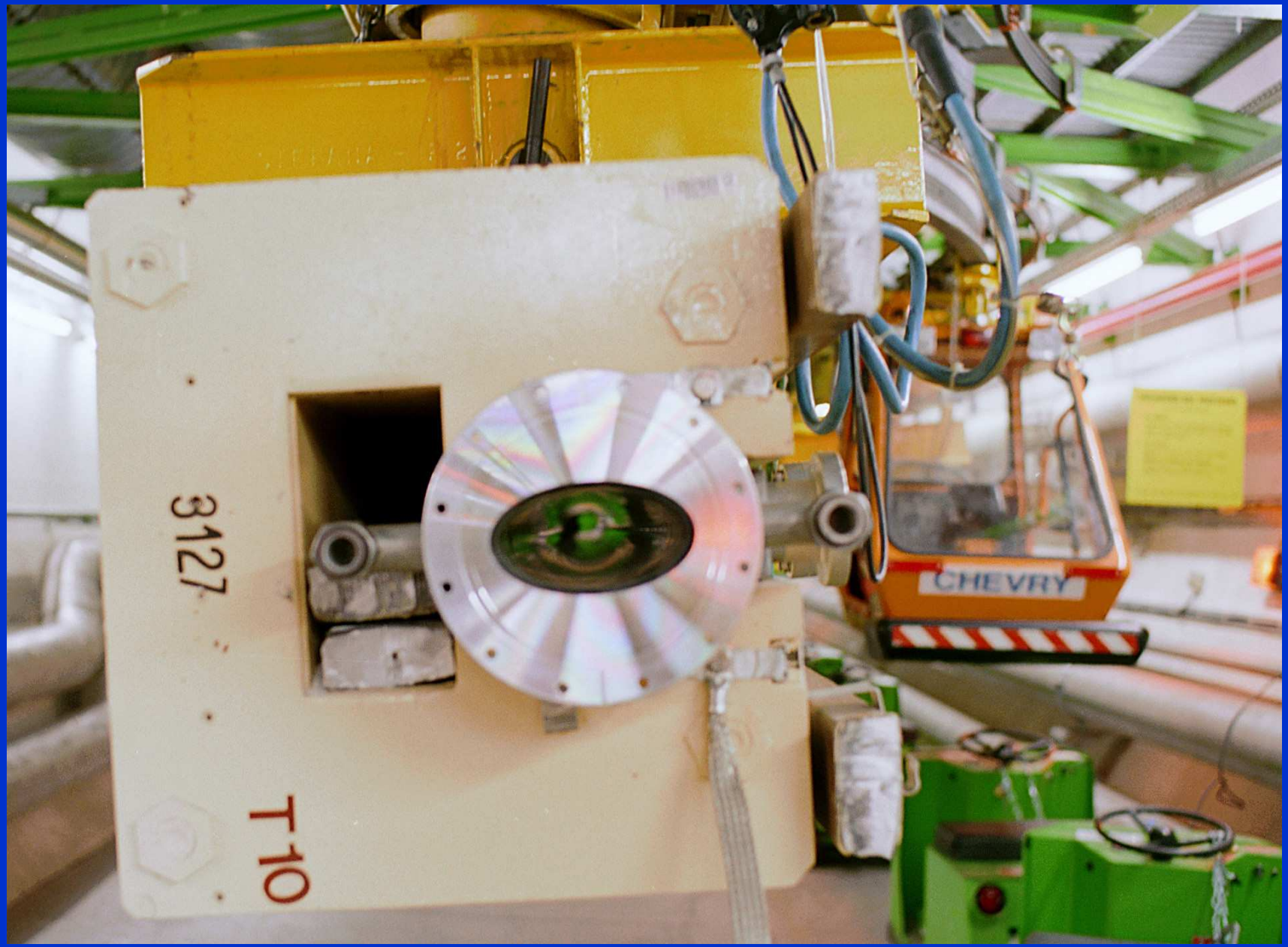
Quadrupolmagneten für die Fokussierung

Dipolmagnet für Kreisbeschleuniger



$N \cdot I = 4480\ A$ $B_1 = 0.13\ T$ Fill.fac. 0.27

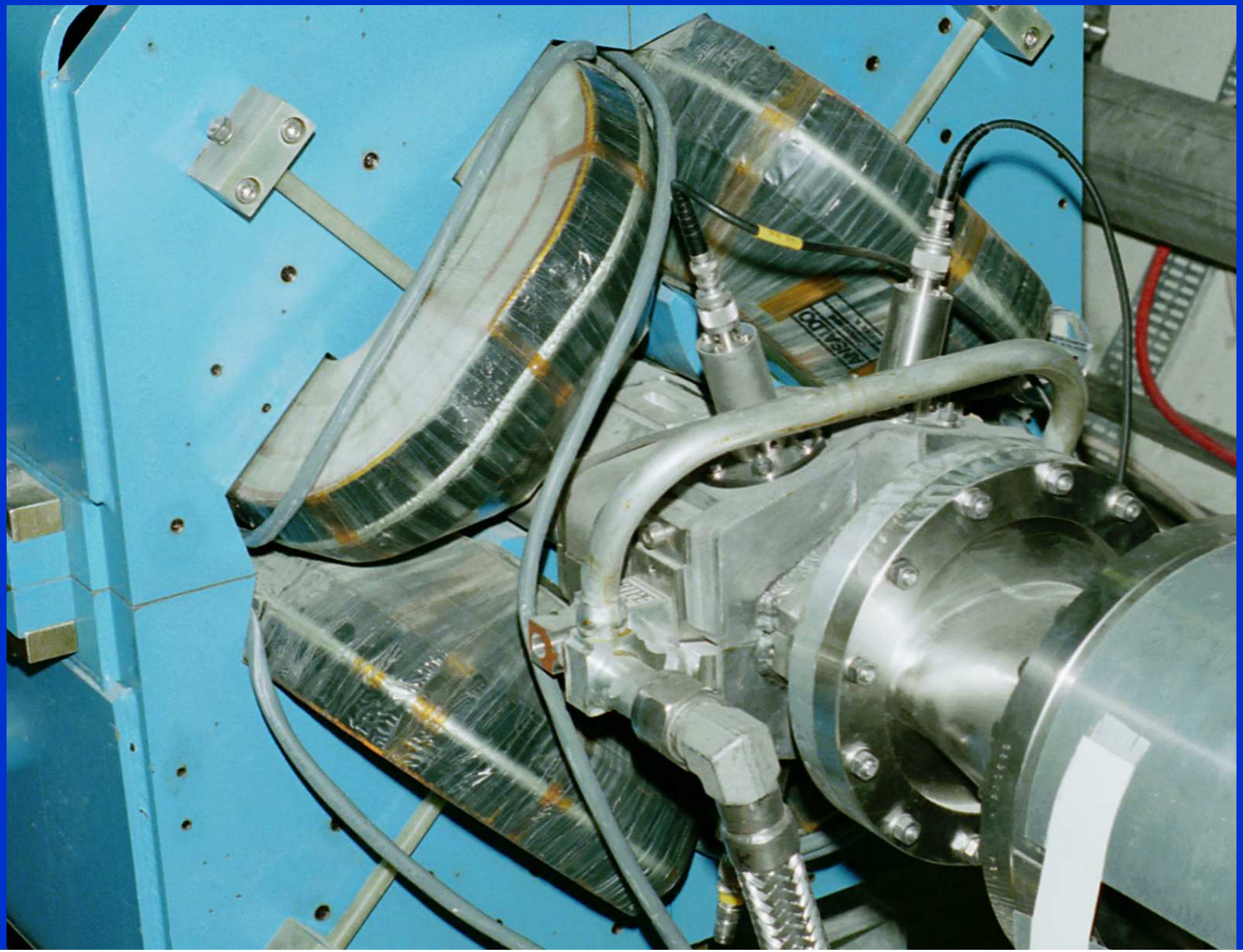
Dipol des LEP Speicherrings nach dem Abbau



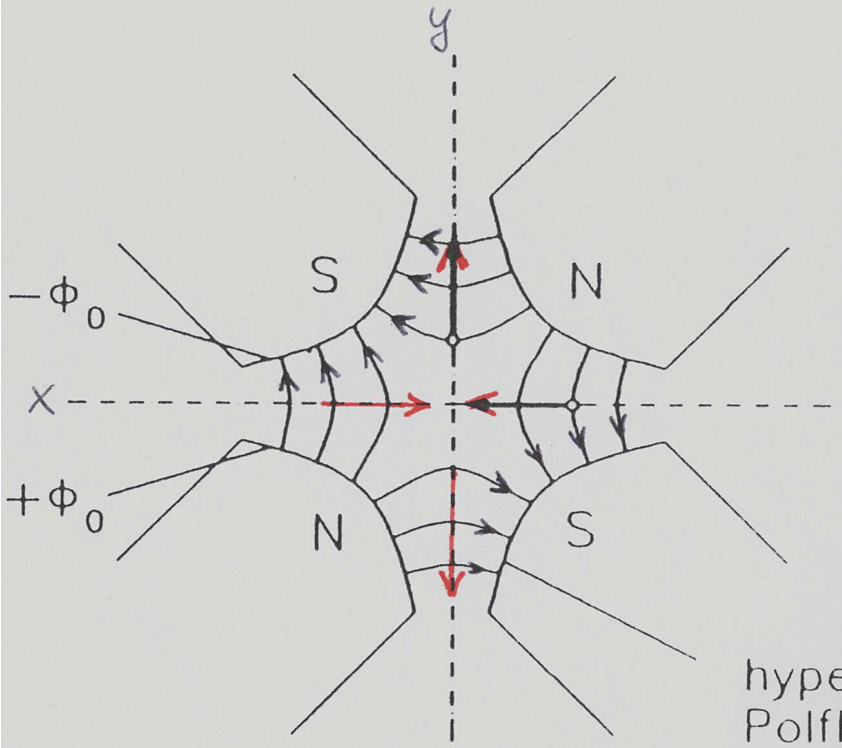
Dipol und Quadrupol des LEP Speicherrings

und Aachener Studenten bei der Besichtigung

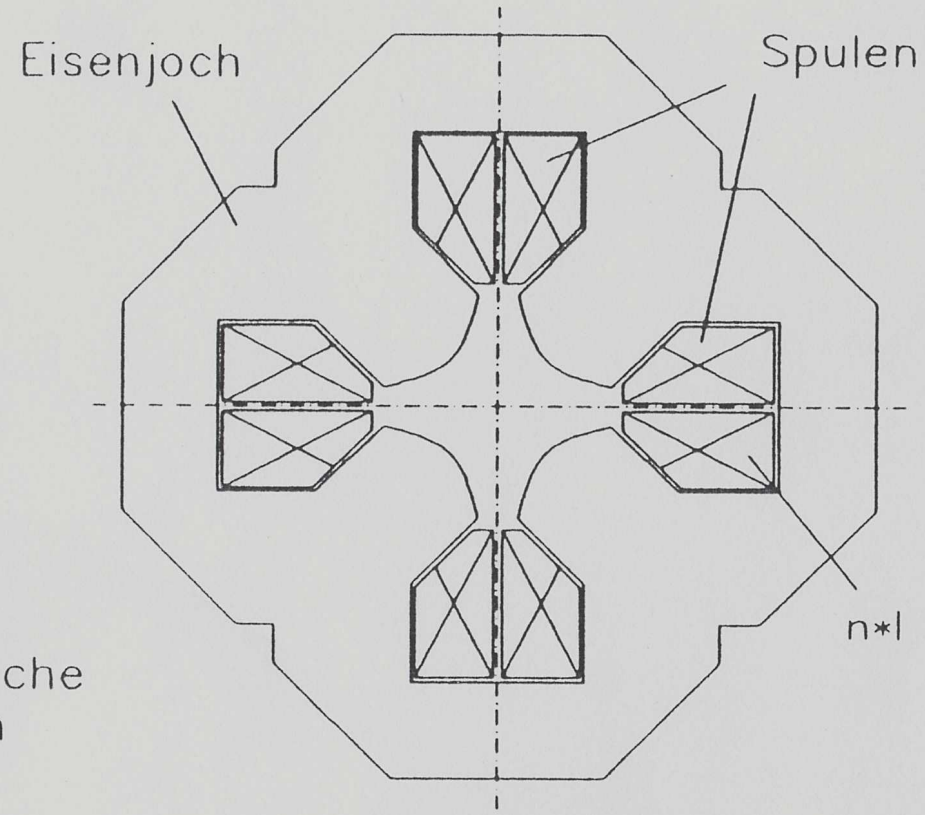
Quadrupol mit Strahlröhre und Strahllagemonitoren



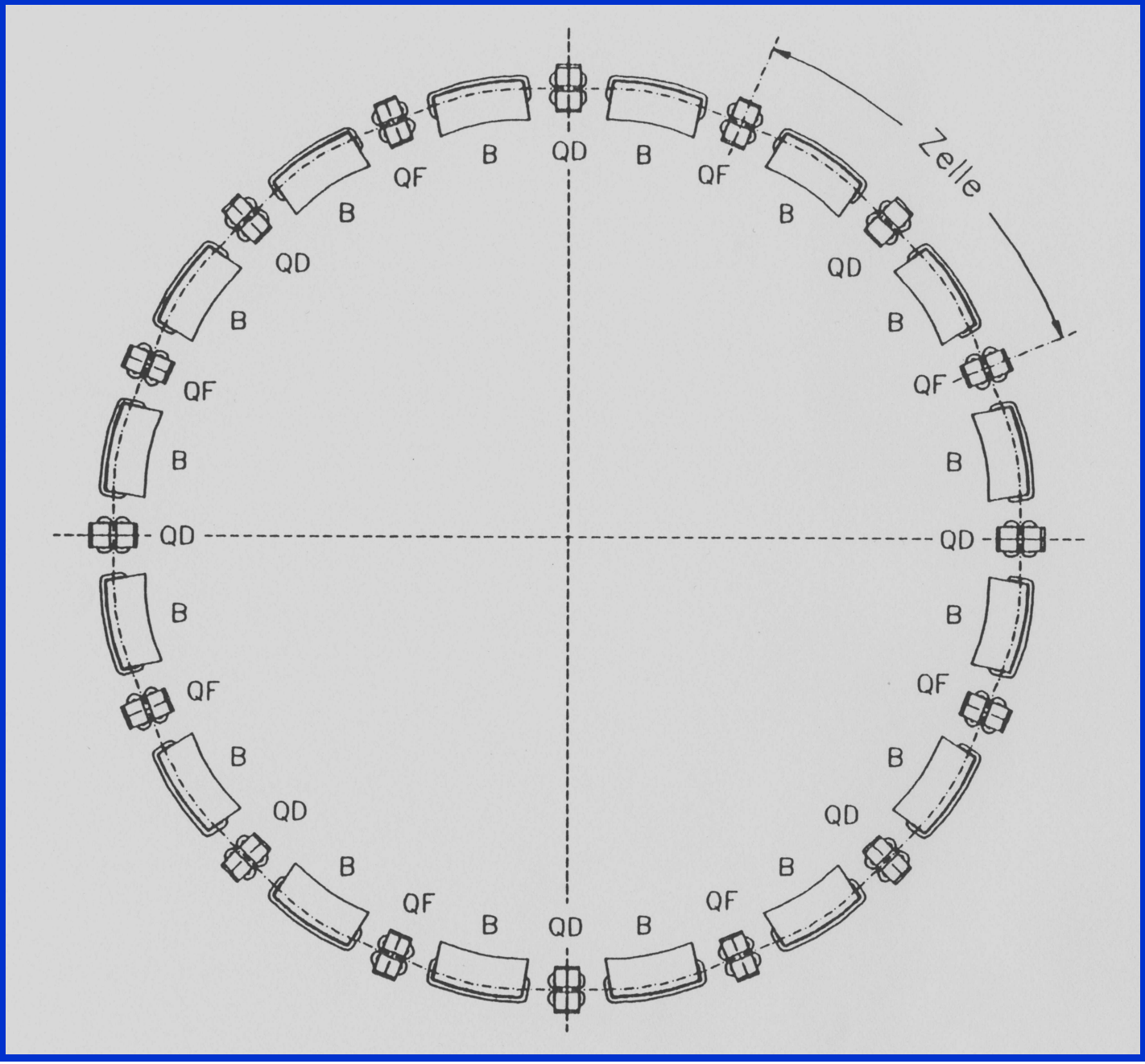
Fokussierung der Teilchenstrahlen durch Quadrupole



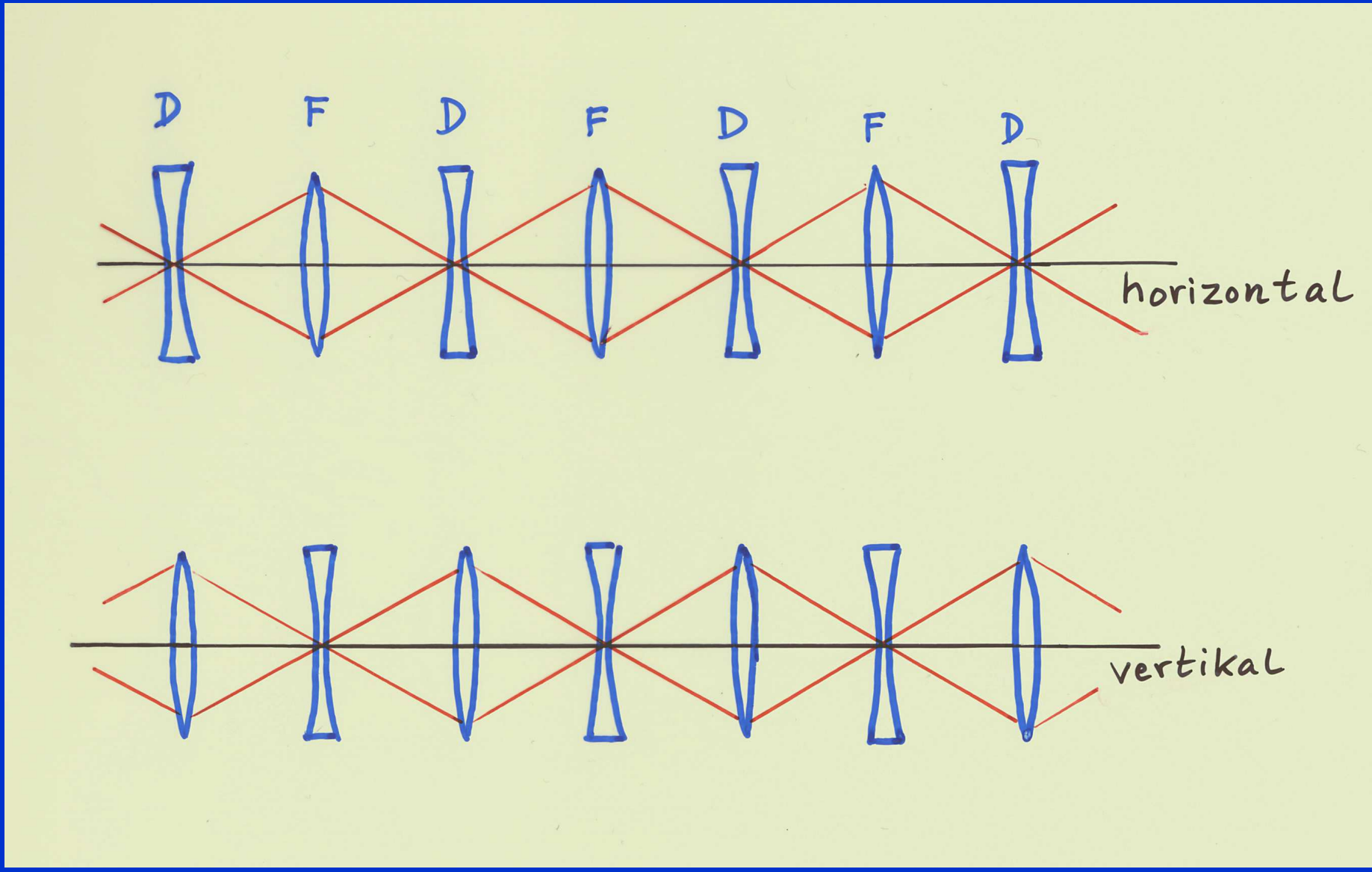
hyperbolische Polflächen



Aufbau eines Ringbeschleunigers



Starke Fokussierung der Strahlen



Bewegungsgleichung der Teilchen in den Quadrupolfeldern des Beschleunigers

Am einfachsten in vertikaler (y) Richtung, da dort das Ablenkfeld der Dipole $B_y = 0$ ist

$$\frac{d^2 y(s)}{ds^2} + K(s) \cdot y(s) = 0$$

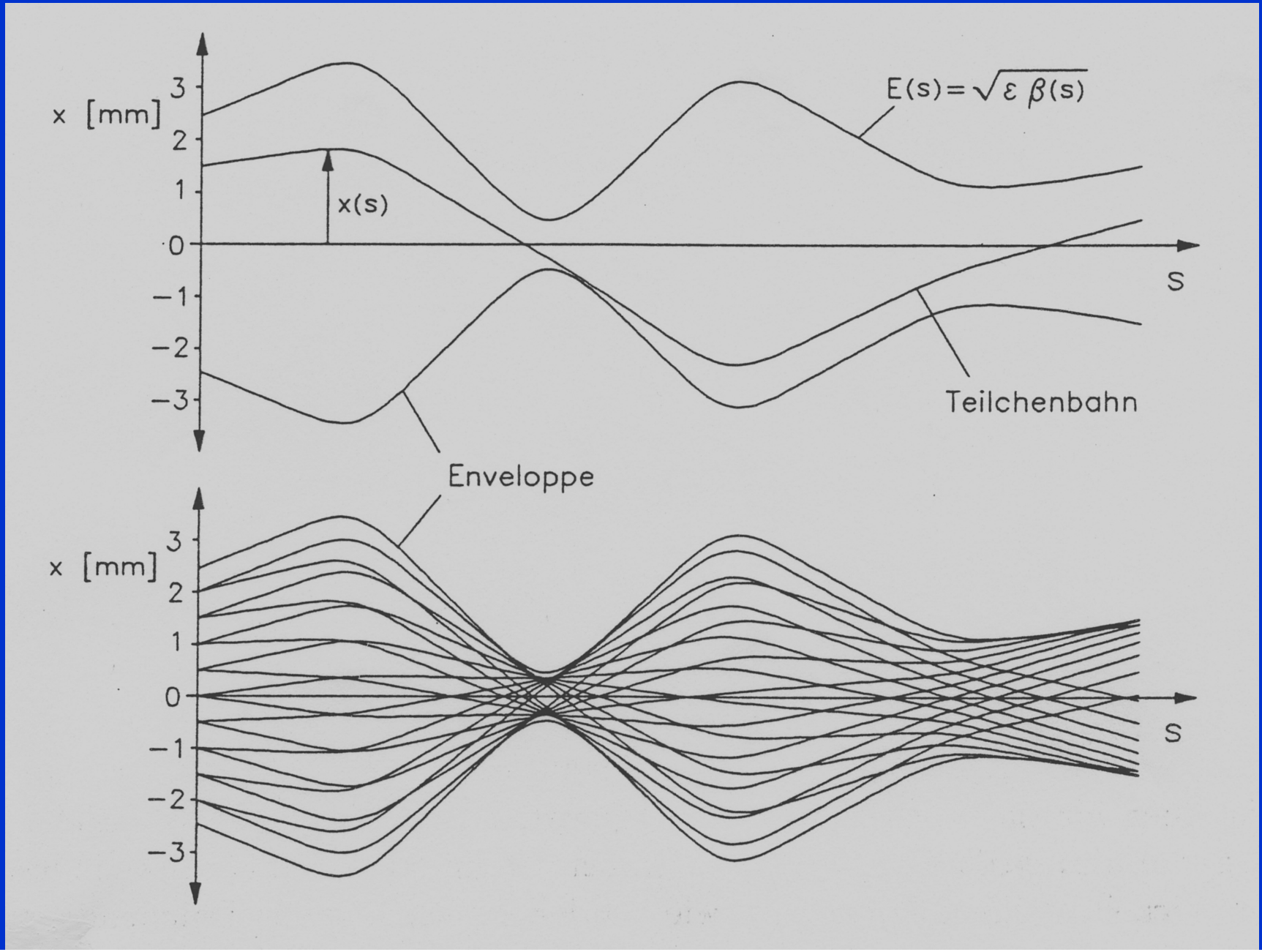
Struktur des Lösungen

$$y(s) = \sqrt{\varepsilon \cdot \beta(s)} \cdot \cos(\varphi(s) + \varphi_0)$$

ε = Emittanz (Konstante innerhalb des Beschleunigers)

$\beta(s)$ = Betafunktion = maximale Amplitude der Betatron-Oszillationen

Betatron-Oszillationen und die Einhüllende der Strahlen



Sextupolmagnet zur chromatischen Korrektur

Supraleitende Magneten

Um Ringbeschleuniger nicht zu groß werden zu lassen, benötigt man für hohe Energien sehr hohe Magnetfelder.

$$R = \frac{p}{q \cdot B}$$

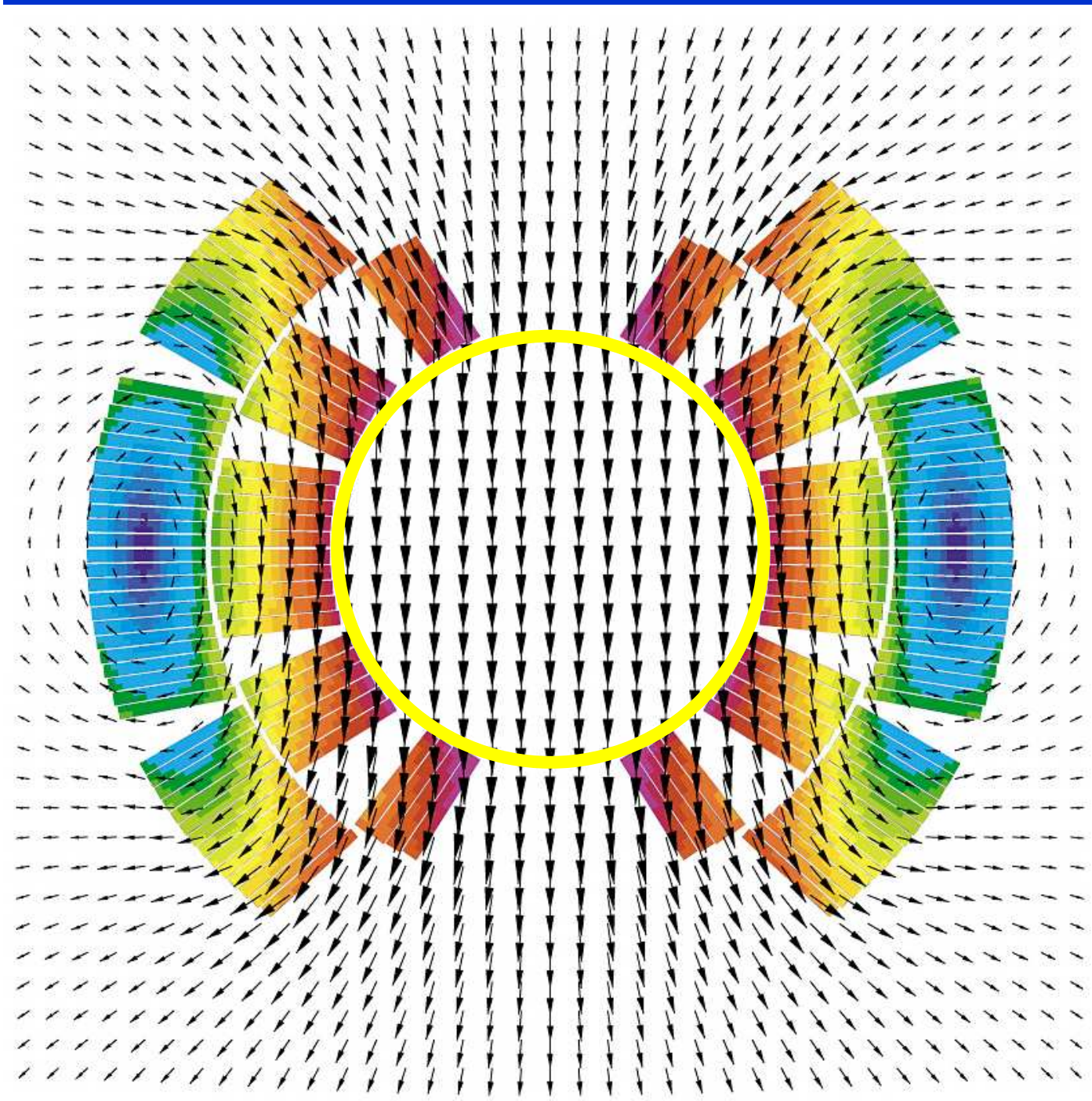
Beispiel: Large Hadron Collider LHC beim CERN

Impuls der Protonen 7000 GeV/c

Radius der Kreisbahn 3,2 km

Benötigtes Magnetfeld der Ablenkdipole B = 7,5 T

Solche Felder sind nur mit supraleitenden Magneten erzeugbar



Supraleitendes Kabel für 12 kA

15 mm x 2 mm

gekühlt bei 1.9 K

mit flüssigem Helium

Kraft auf das Kabel:

$F = B * I * L$

mit

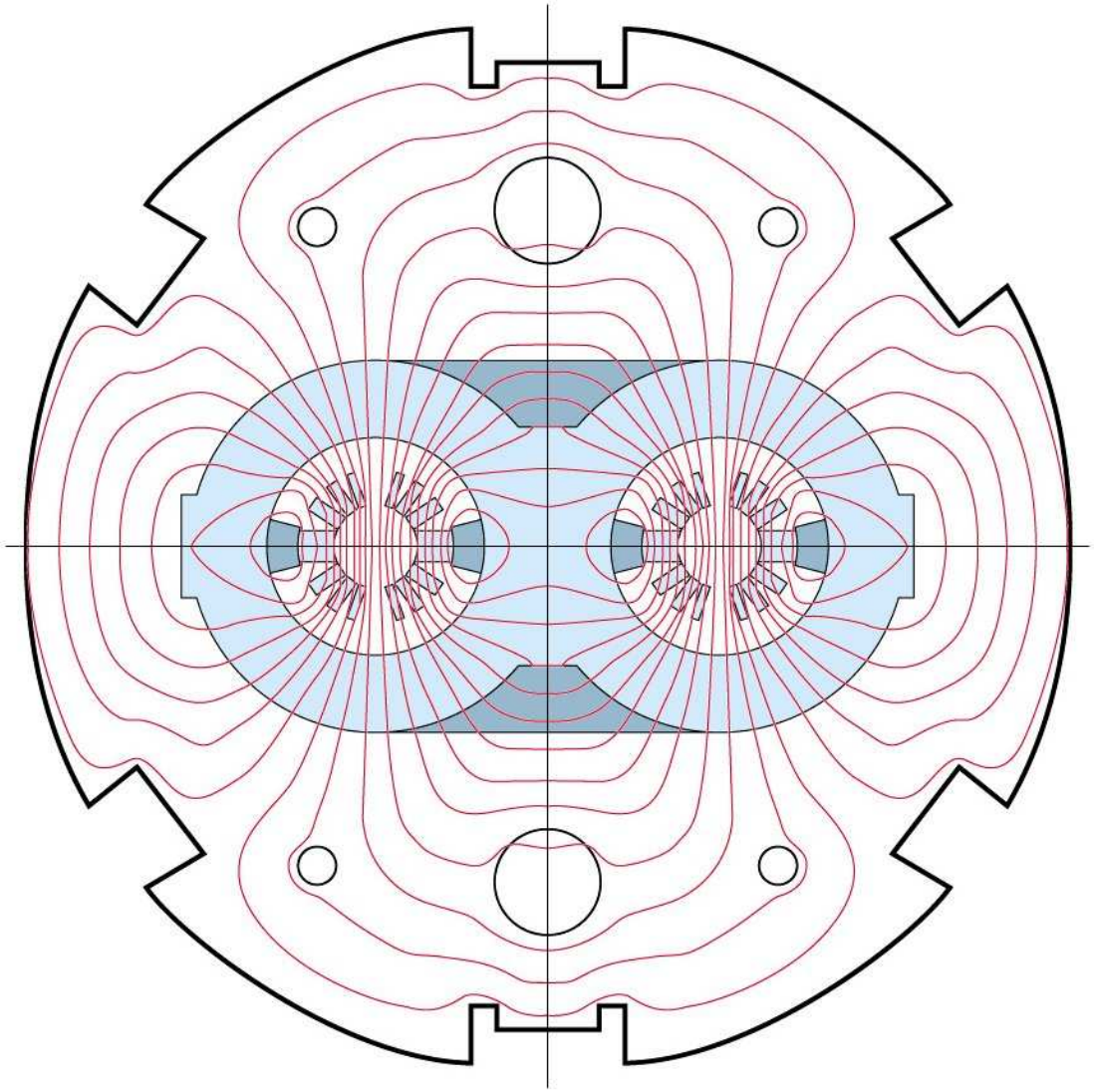
$B = 8.33$ T

$I = 12000$ Ampere

$L = 15$ m

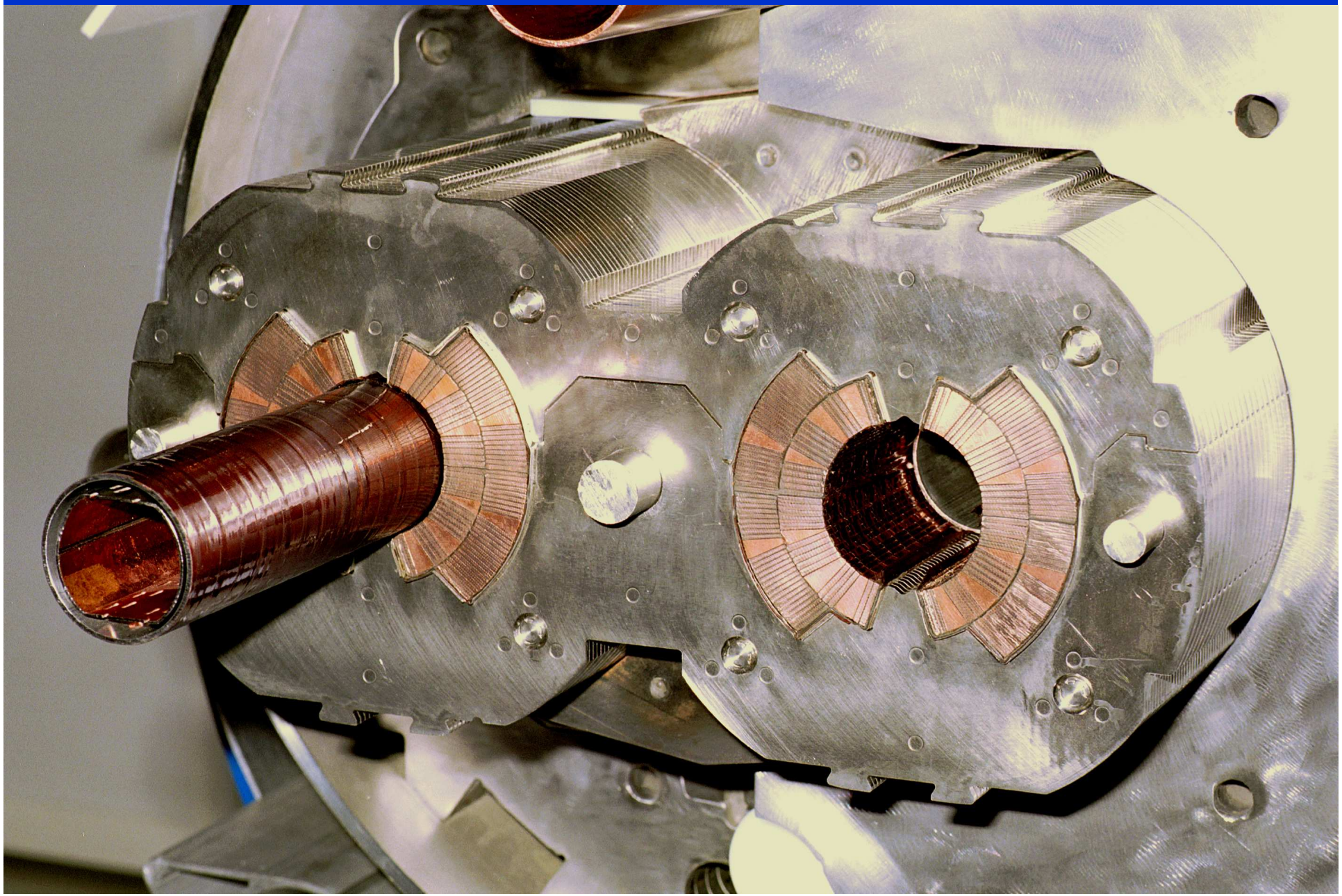
$F = 165$ Tonnen

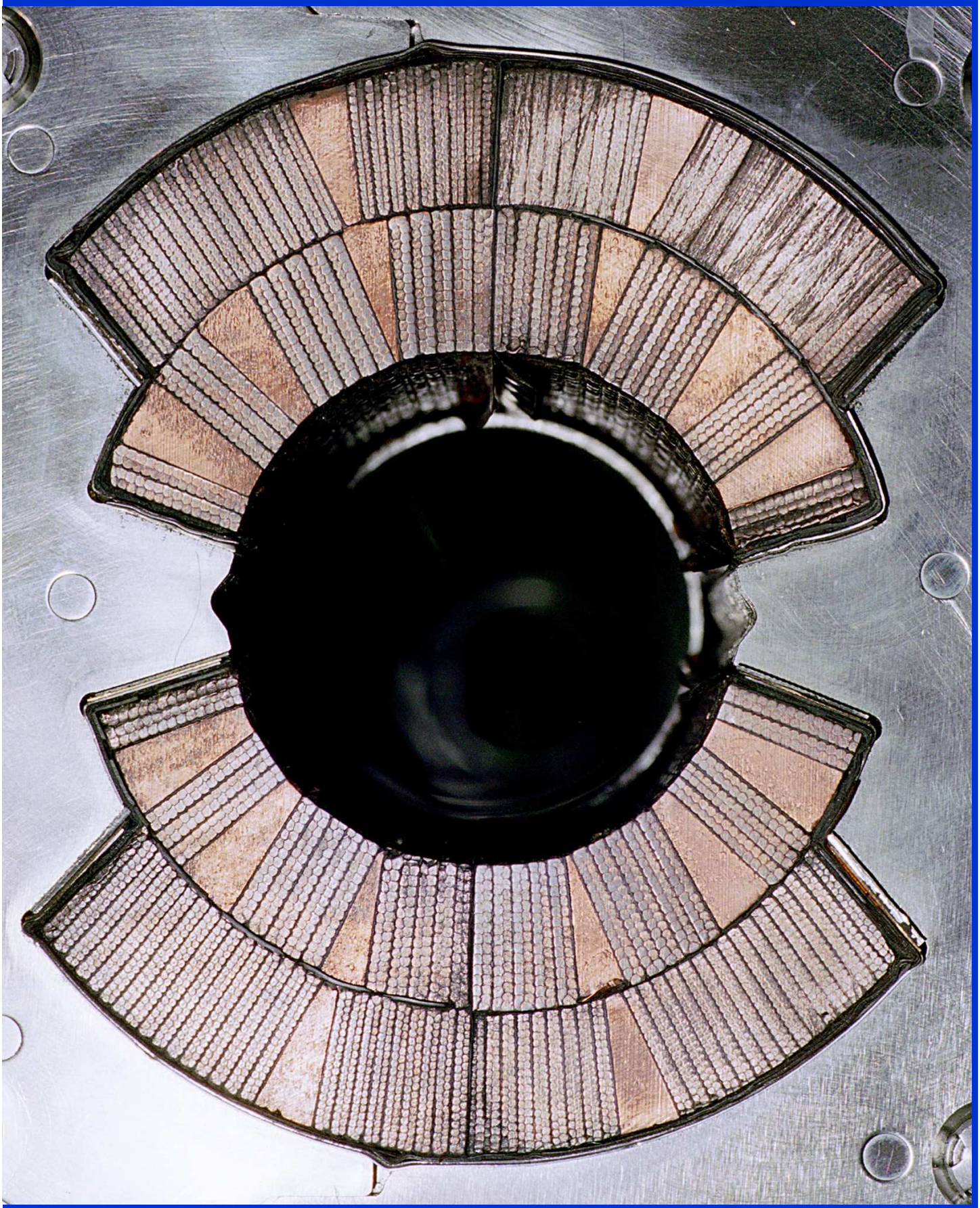
LHC DipolImagnet „Zwei Dipole in einem Magneten“

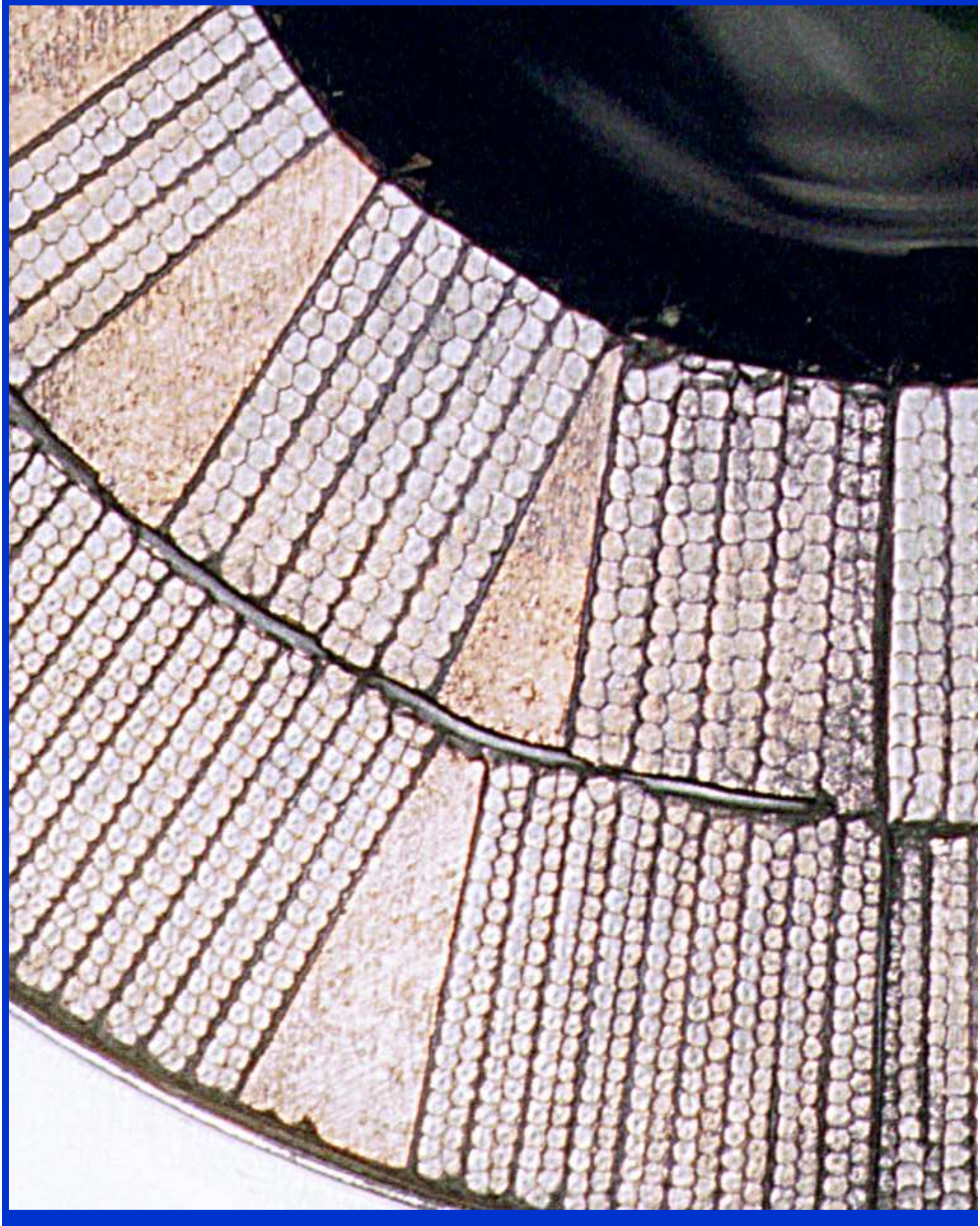


Computed magnetic flux map at B_0=10 Tesla

Schnitte durch den LHC Dipolmagneten



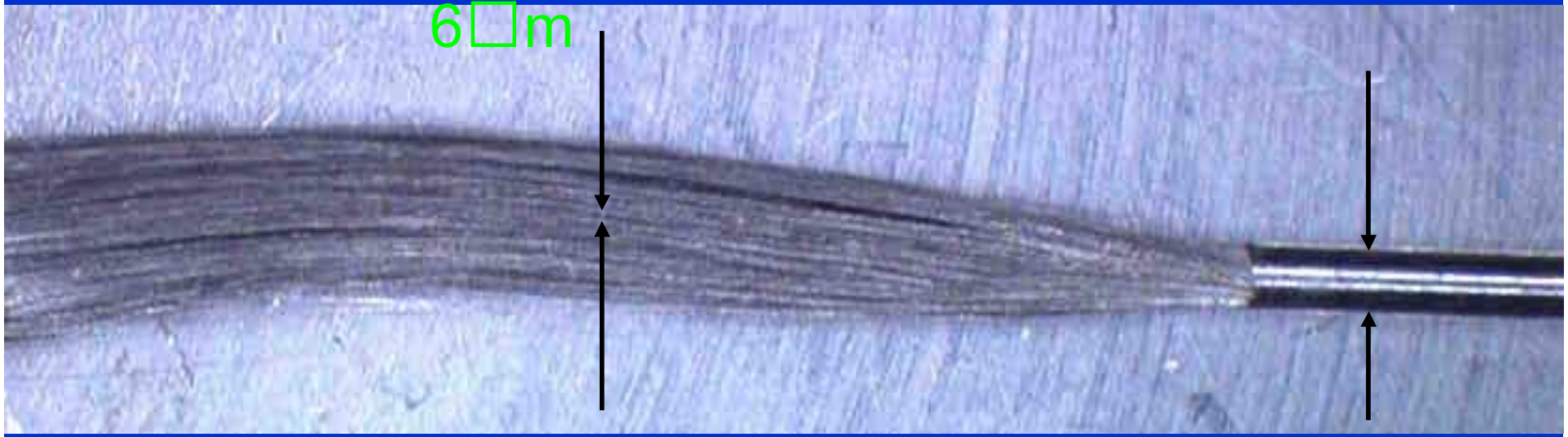




Ein supraleitender Draht

Durchmesser der Filamente 6□m

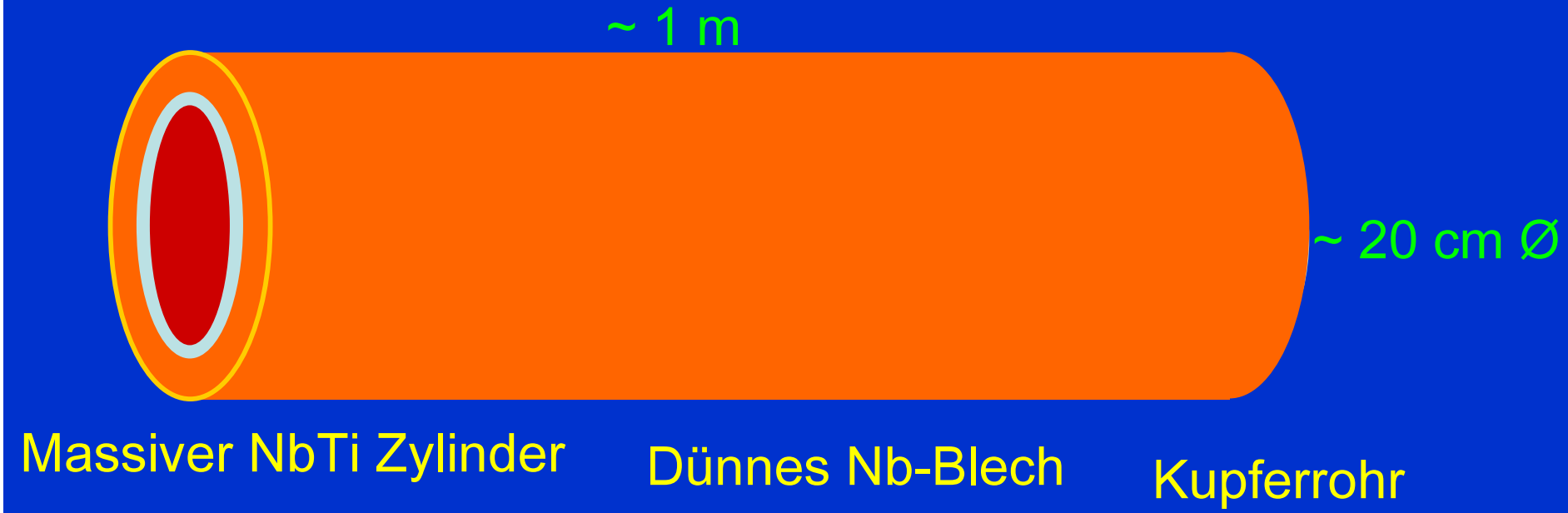
Draht-durchmesser 1 mm



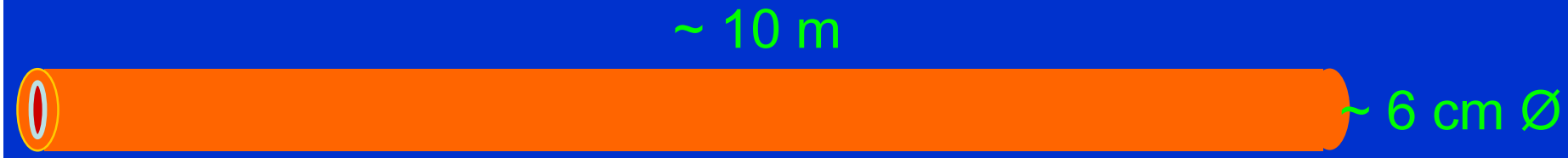
Typischer Wert für maximalen Strom bei B = 8T und 1,9 K:
I = 800 A

Copyright A.Verweij

Produktion eines supraleitenden Drahtes



Extrudierung (Draht ziehen)



Copyright A.Verweij

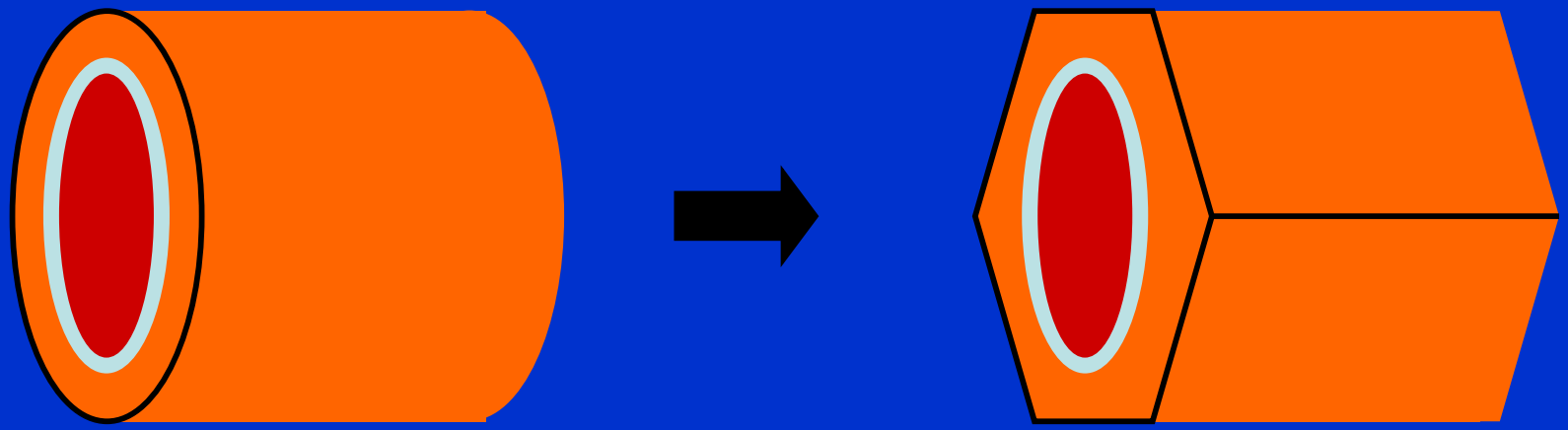
Produktion des supraleitenden Kabel

- Mehrfachextrusion, zwischendurch Wärmebehandlung (einige hundert Grad)

von Ø 5-10 cm bis Ø 1-5 mm

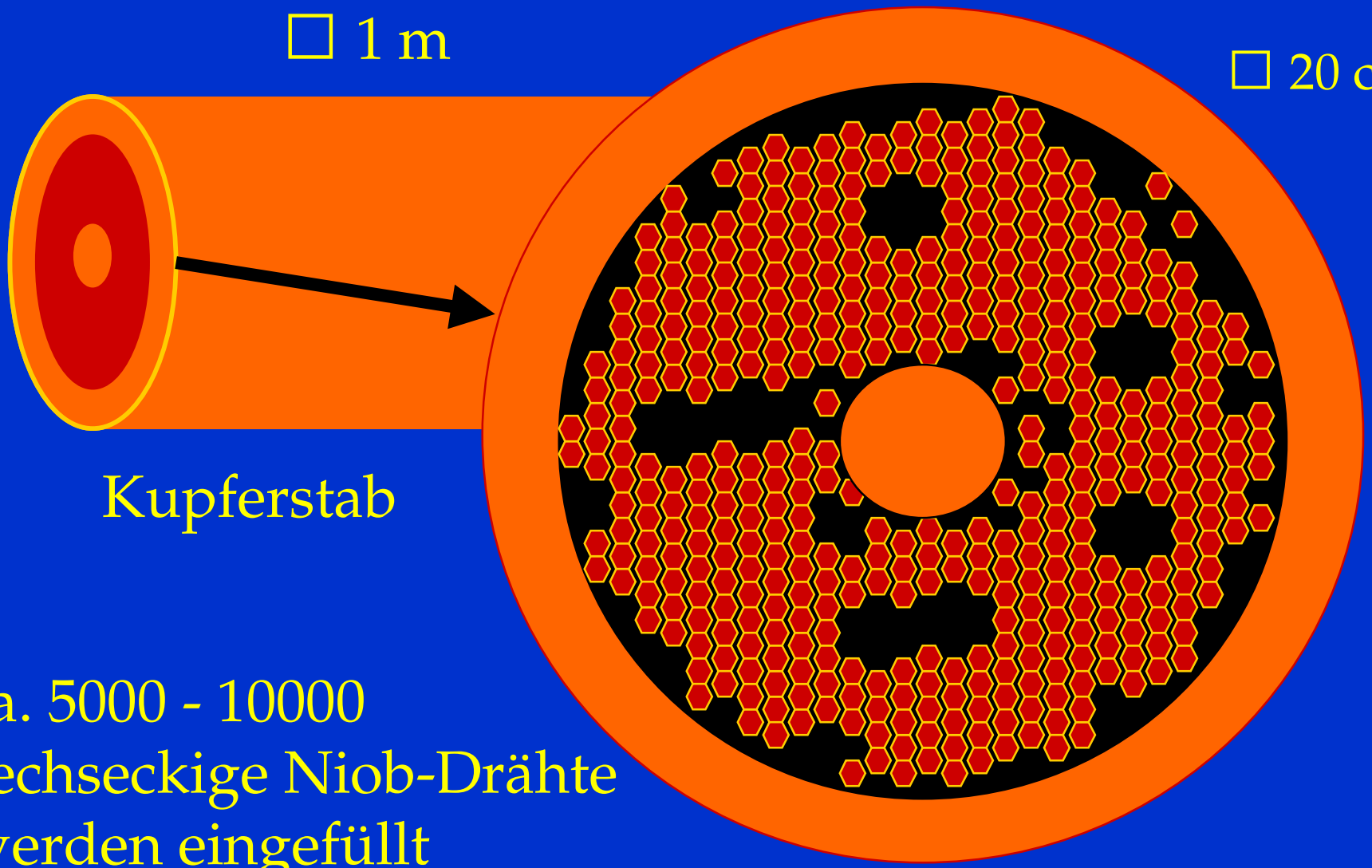
□

- Umformen in hexagonale Form und Schneiden von ~ 1 m langen Stücken



Copyright A.Verweij

Produktion eines Draht aus vielen Filamenten



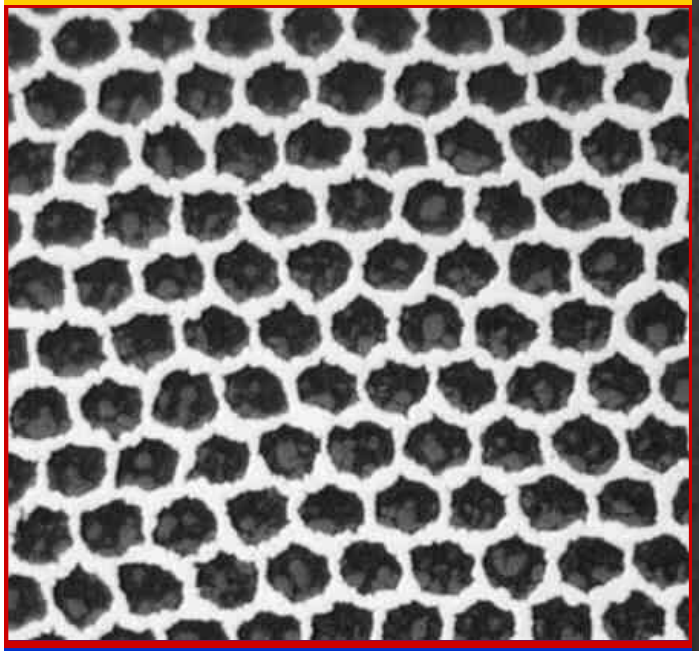
ca. 5000 - 10000
sechseckige Niob-Drähte
werden eingefüllt

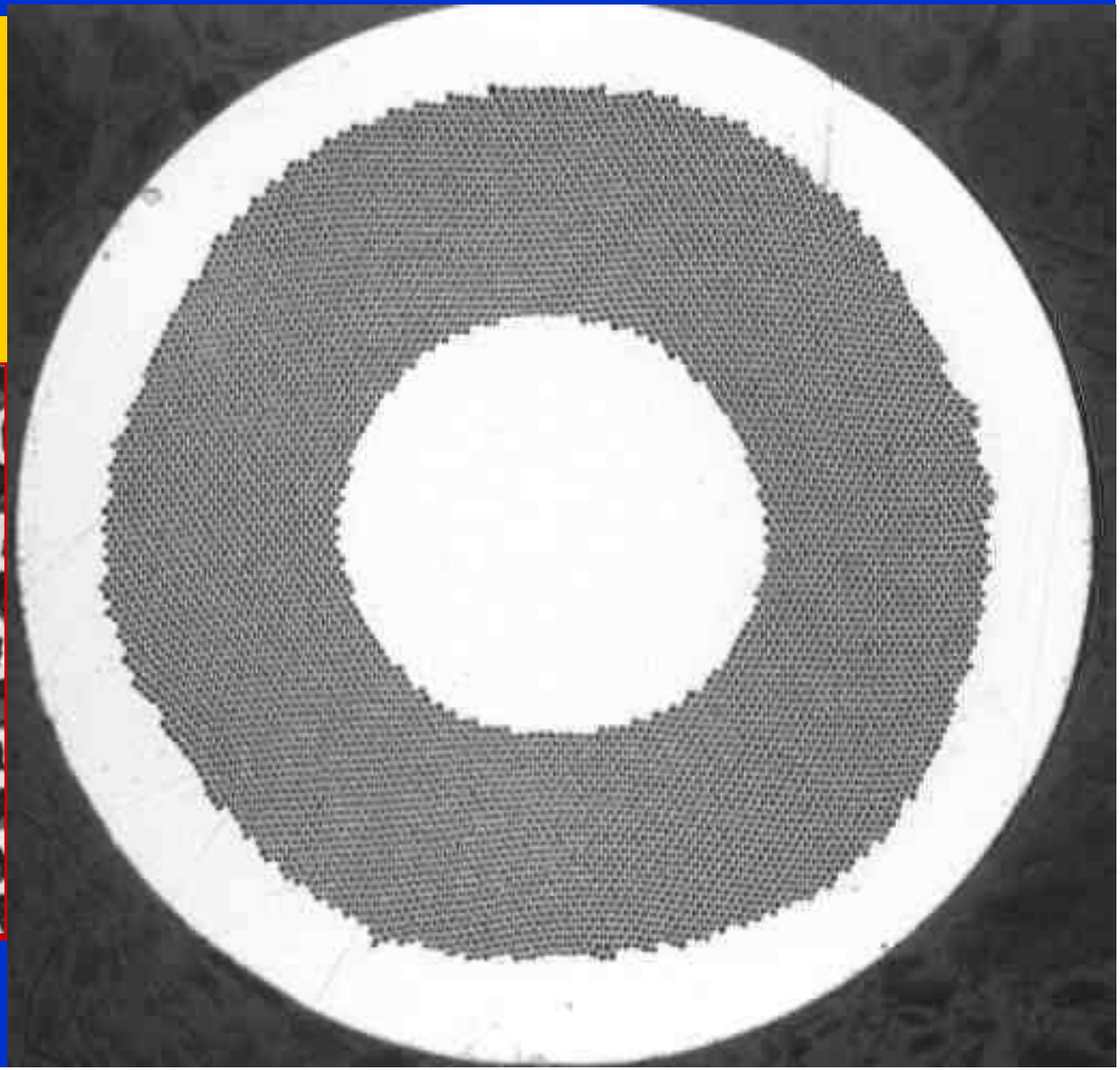
Copyright A.Verweij

Weitere Produktionsschritte

Abpumpen & Versiegeln □ Ziehen und Querschnittsreduzierung

NbTi Stab von □~20 cm reduziert zu □~6 □m (Querschnitt reduziert um etwa 10^{10})

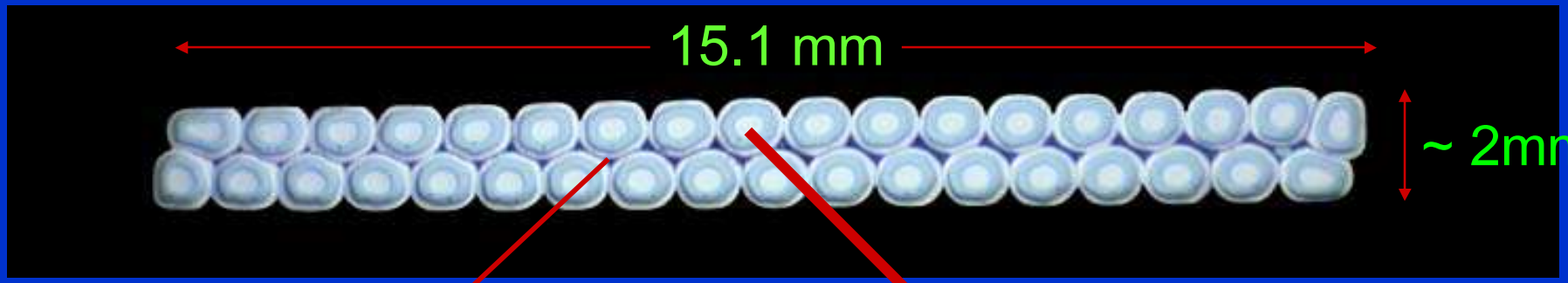




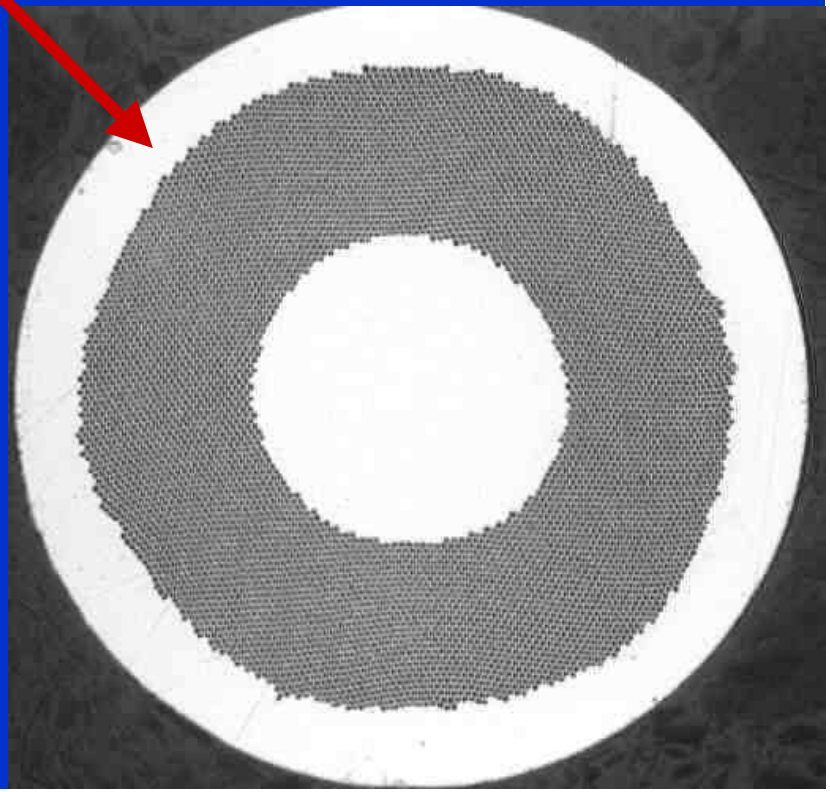
Copyright A.Verweij

Bau des sogenannten Rutherford-Kabels

Es wird aus vielen einzelnen supraleitenden Drähten hergestellt

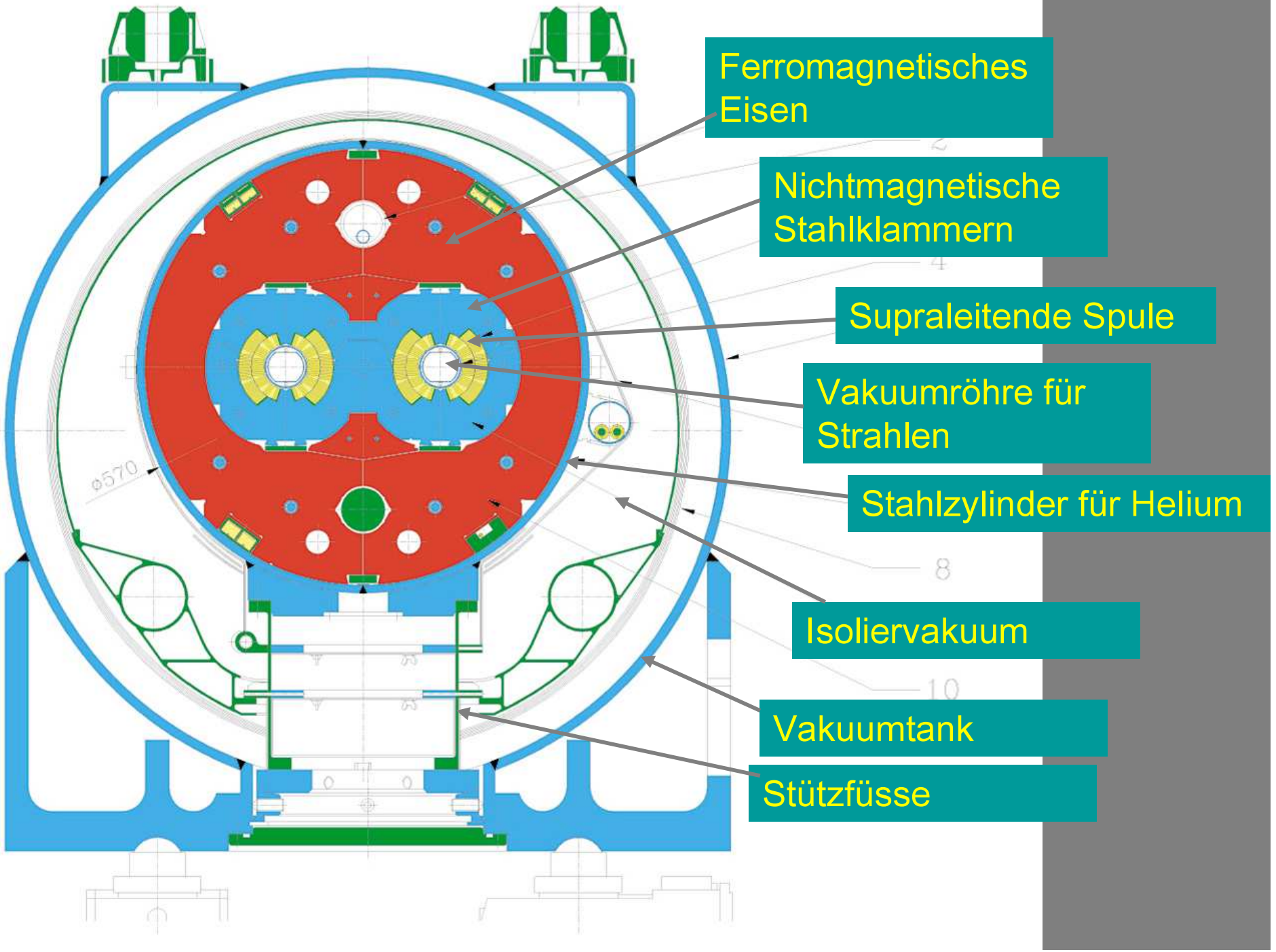


Verdichtung des Kabels
Zwischenräume: ~ 10%

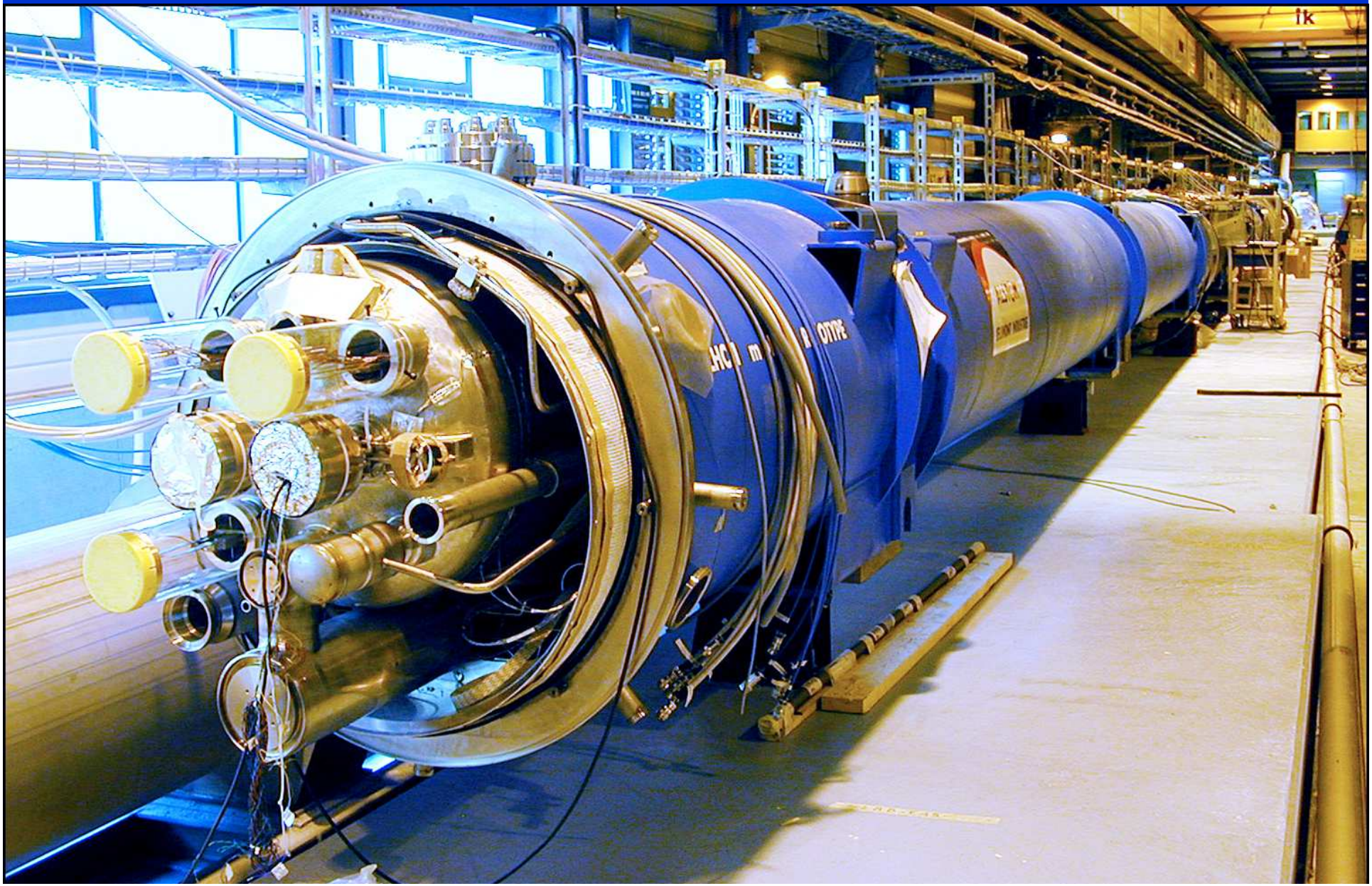


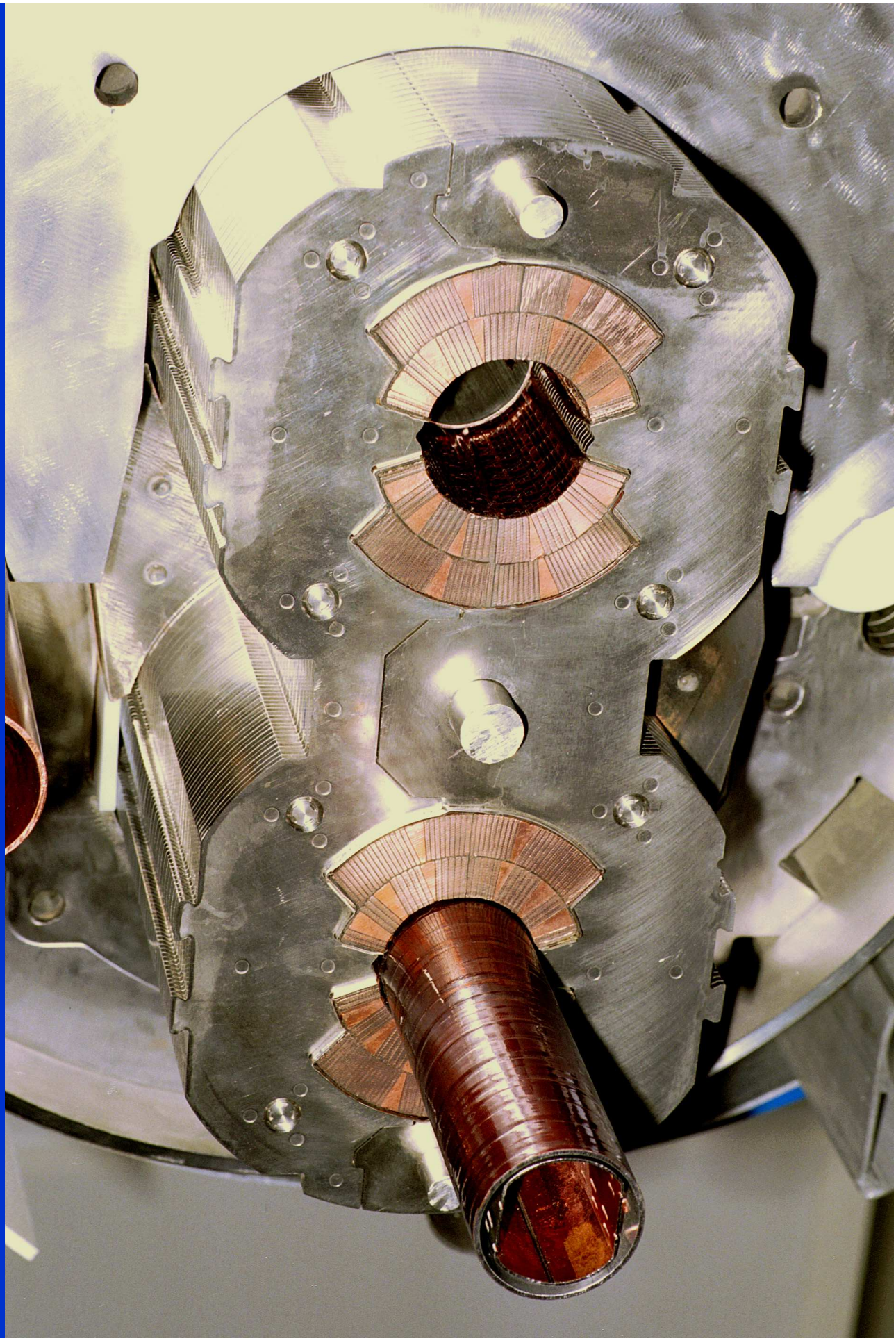
Typischer Wert für maximalen Strom
bei 8 T: 1.9 K - 20 kA

Copyright A.Verweij

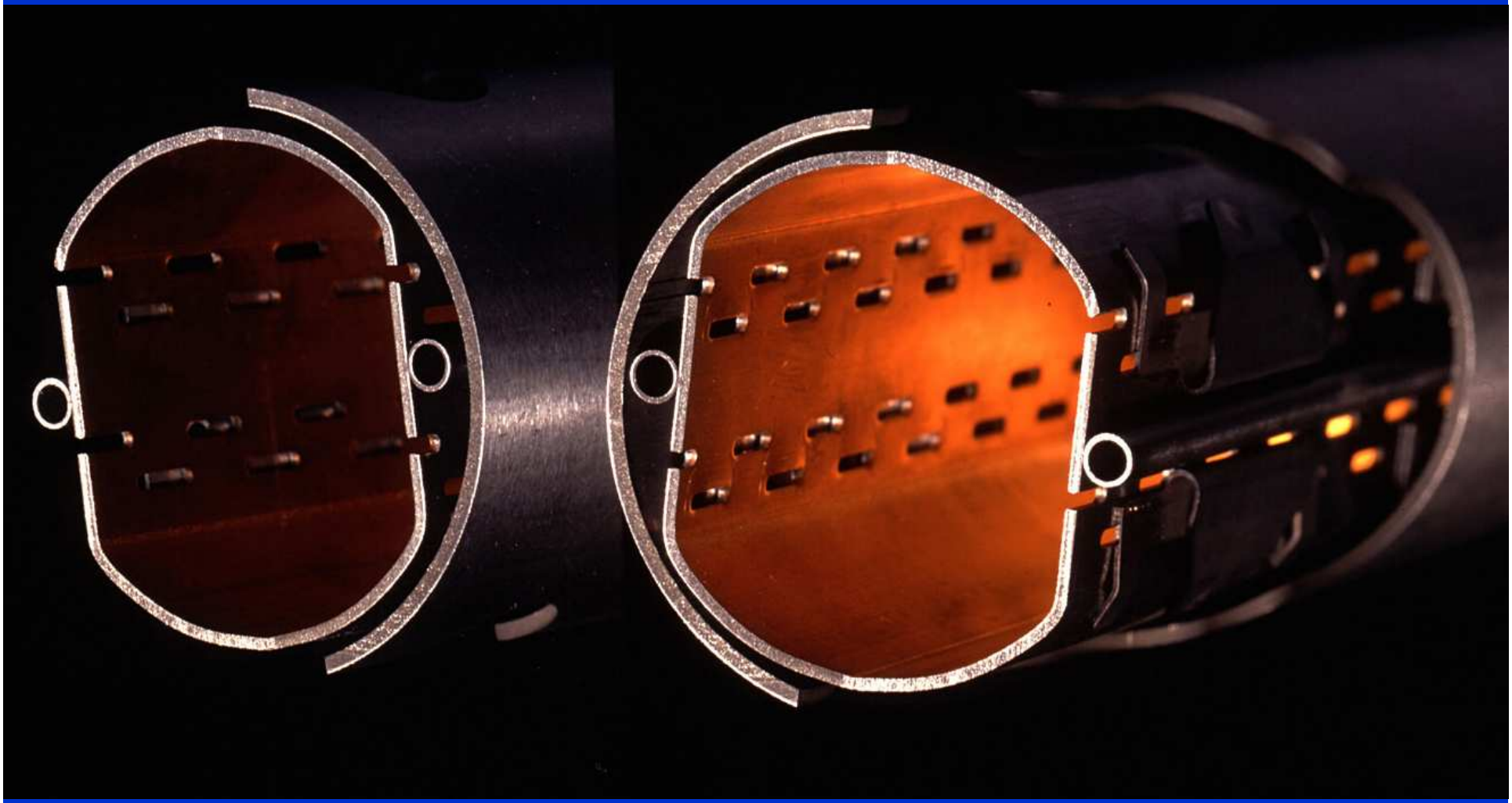

Ferromagnetisches Eisen
Nichtmagnetische Stahlklammern
Supraleitende Spule
Vakuumröhre für Strahlen
Stahlzylinder für Helium
Isoliervakuum
Vakuumtank
Stützfüsse

Test eines Stücks des LHC Beschleunigers „String2 Test“





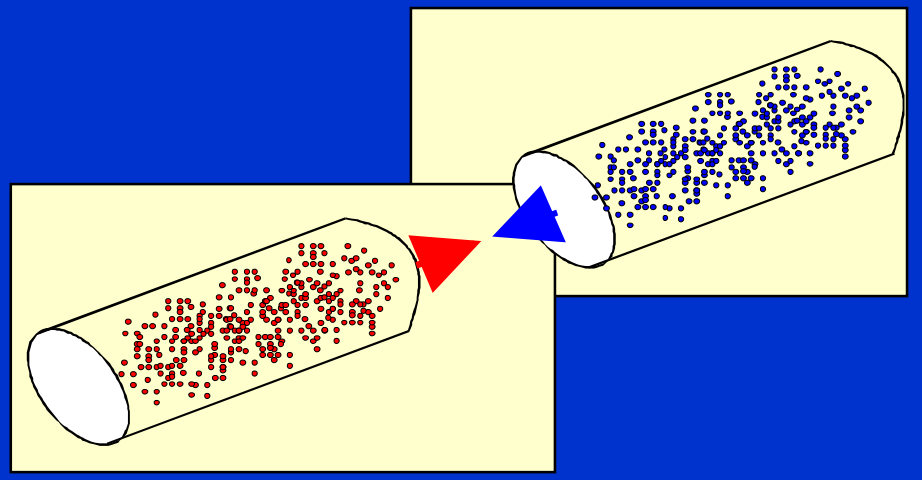
Die Strahlrohre des LHC Kolliders sind zugleich die Vakuumpumpen (Ionengetterpumpen bei 4K bzw 1,9K)



Luminosität L

Rate dN/dt (s^{-1}) = $L * \sigma$ (cm^2)

L ($cm^{-2}\, s^{-1}$)



$$L = N^2 f n_b / 4\pi \sigma_x \sigma_y$$

mit N ..... Teilchen im Paket

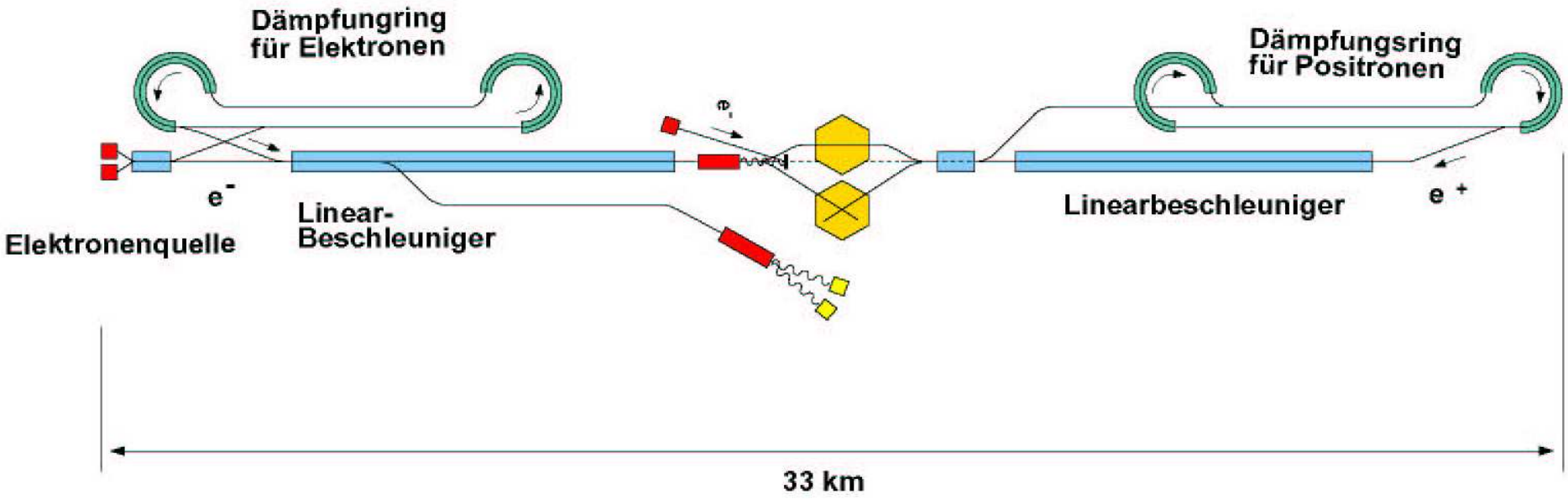
f ..... Umlauffrequenz

n_b..... Anzahl der Paket

$\sigma_x \sigma_y$ ... Strahldimensionen am Wechselwirkungspunkt

Der TESLA Linearbeschleuniger und Elektron-Positron Kollider am Deutschen Elektronensynchrotron DESY in Hamburg

250 GeV + 250 GeV



Der Entwurf und Bau von Beschleunigern ist eine technisch und physikalisch sehr anspruchsvolle Arbeit.

In den letzten Hundert Jahren wurde enorme Fortschritte erzielt, die sich in den Erkenntnissen der Elementarteilchenphysik niederschlagen.

In diesem Gebiet werden Diplomanden und Doktoranden gesucht, die keine Scheu vor mathematisch, physikalisch und technisch sehr anspruchsvollen Arbeiten haben.

Aachen hat eine lange Tradition, angefangen von Wideroe bis zu den etwa 15 Studenten, die in den letzten 10 Jahren im CERN und im DESY in unserer Aufsicht und mit unserer Mitarbeit ausgebildet wurden.