

# Elektron Positron Linearbeschleuniger bei hohen Energien

Ties Behnke

DESY

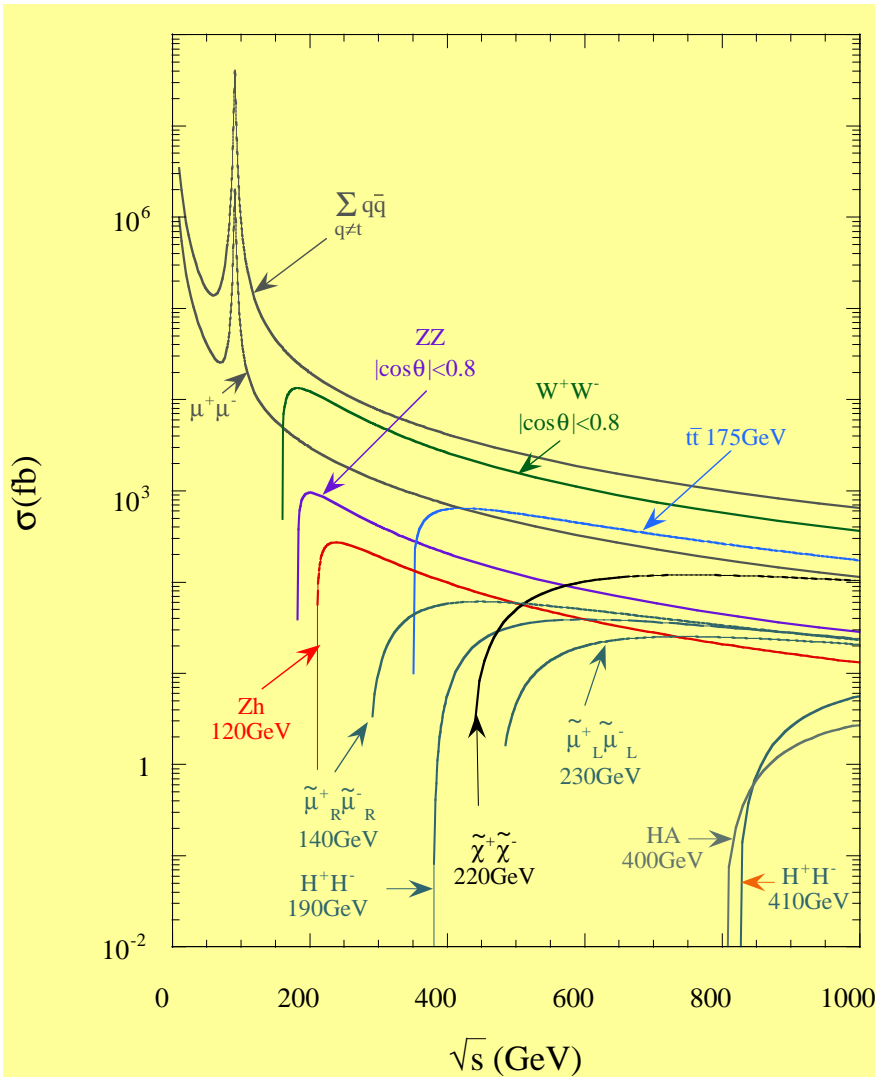
24-März-1999

DPG Tagung 2000, Dresden

- Physik an Linearbeschleunigern
- Die Maschinenprojekte
- Ein Detektor für einen LC
- Ausblick

# EIGENSCHAFTEN DES LC

- $e^+e^-$  Beschleuniger,  $\sqrt{s} = 500 - 1000$  GeV
- Luminosität  $\mathcal{L} \approx 3 - 50 \cdot 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
- integrierte Luminosität pro Jahr:  $50 - 500 \text{fb}^{-1}$



- $1 \cdot 10^5$  Higgs/ Jahr
- $3 \cdot 10^5$   $t\bar{t}$ / Jahr
- $1 \cdot 10^6$  WW/ Jahr

bei  $\sqrt{s} = 500$  GeV  
bei  $500 \text{fb}^{-1}/\text{Jahr}$

- enorme Datenmengen verfügbar
- Präzisionsphysik möglich

# LINEARBESCHLEUNIGER IN DER ZUKUNFT

## Projekte weltweit:

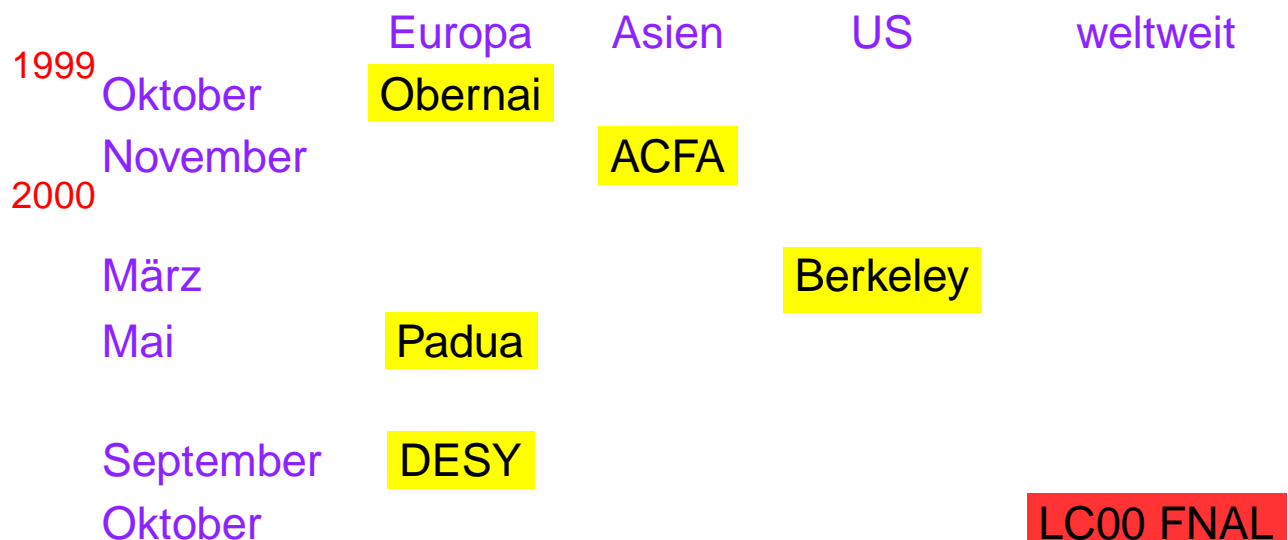
- USA: NLC
- Japan: JLC
- Europa: TESLA  
CLIC



Teilchenphysik:  
Worldwide Study Group

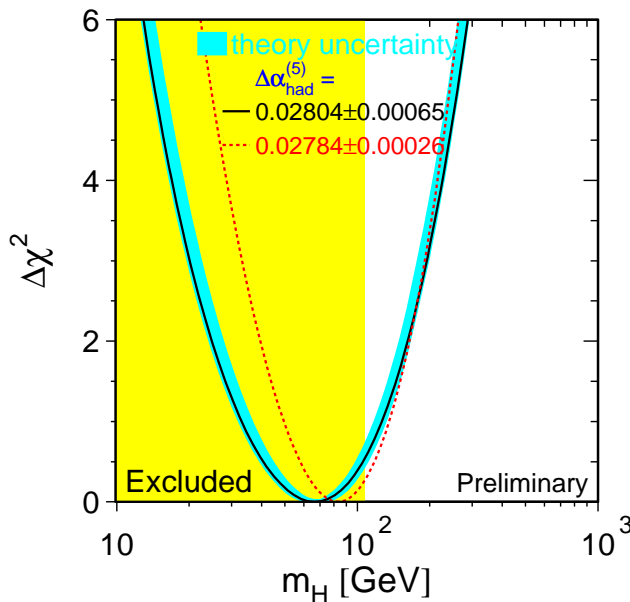
### Drei regionale Workshops:

- Amerikanisch
- Asiatisch ACFA workshop
- Europäisch ECFA/DESY workshop



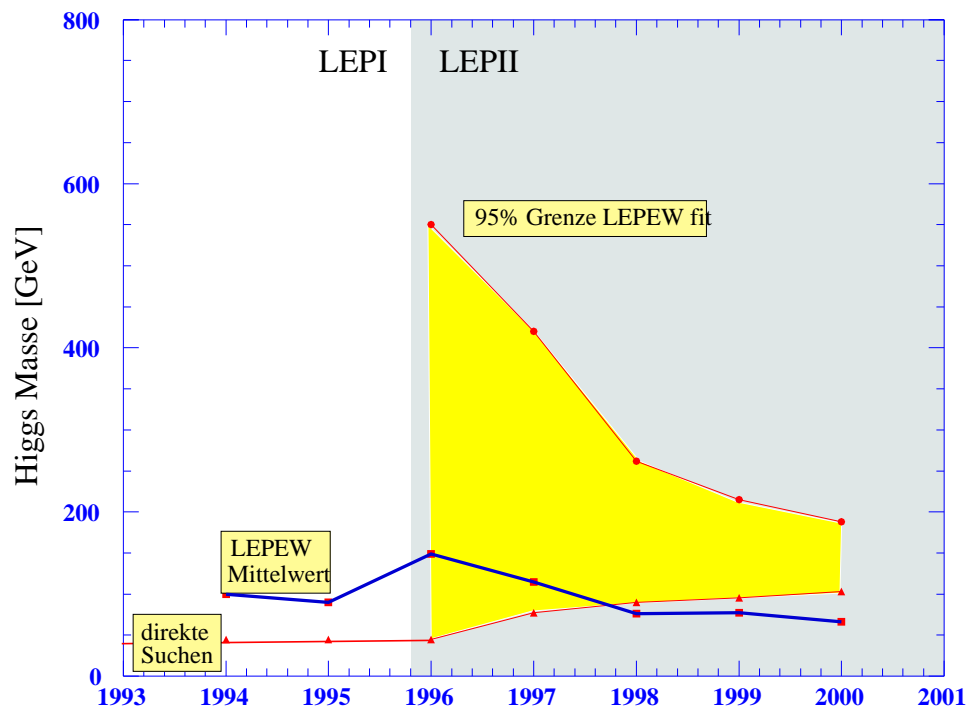
- SM experimentell beeindruckend erfolgreich
- **Aber:** zentrale offene Frage:  
**Brechung der EW Symmetrie**
- Mechanismus ist offen

## • Wo stehen wir heute?



Leichtes Higgs klar bevorzugt im SM

$m_{\text{Higgs}} < 188 \text{ GeV}$   
@ 95% CL



# BRECHUNG DER EW SYMMETRIE

- Verschiedene Szenarien denkbar:
  - ein leichtes Higgs (SM Szenario)  
ein oder mehrere Higgs Bosonen, Supersymmetrie?  
“der schwache Weg”
  - starke Wechselwirkung der Eichbosonen  
kein Higgs: Neue starke Wechselwirkung erhält die Unitarität der Theorie  
typische Energien 1 TeV  
“der starke Weg”
  - Substruktur  
Massen werden dynamisch kreiert, Substruktur;  
parametrisierbar durch “Kontaktwechselwirkungen”  
“der Substruktur-Weg”
- Typische Energieskala der Symmetriebrechung:

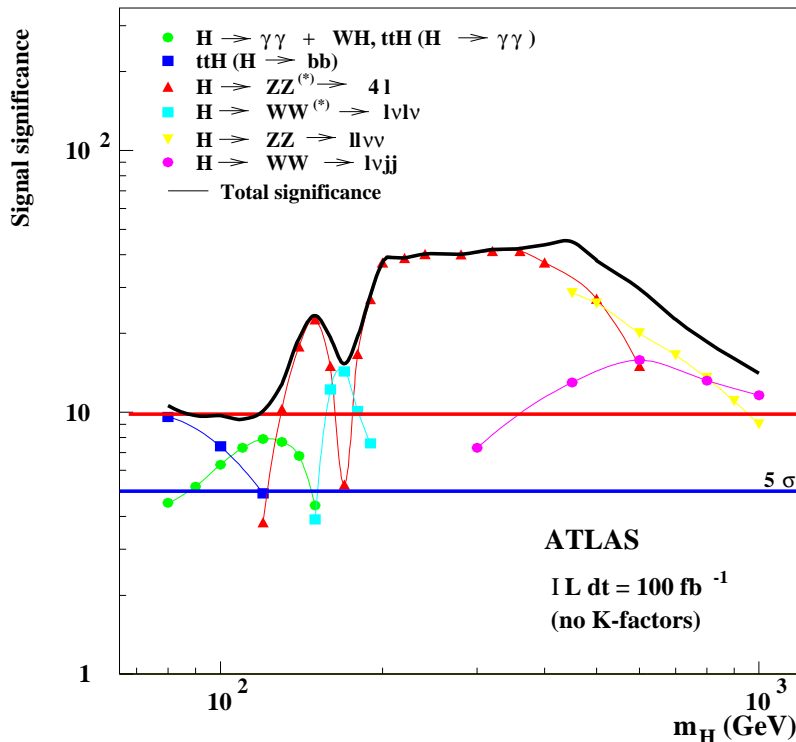
$$m_W = \frac{g}{2} v \rightarrow v = 246 \text{ GeV}$$

Eine Maschine, die eine Energie von  $\sqrt{s} \approx 1 \text{ TeV}$  erreicht, sollte diese Fragen beantworten können.

# MÖGLICHE ENTDECKUNG DES HIGGS

Falls die Natur den Higgs-Mechanismus verwirklicht hat:

Entdeckt wird das Higgs vermutlich am LHC.



Nach 3 Jahren  
"überzeugende  
Signale

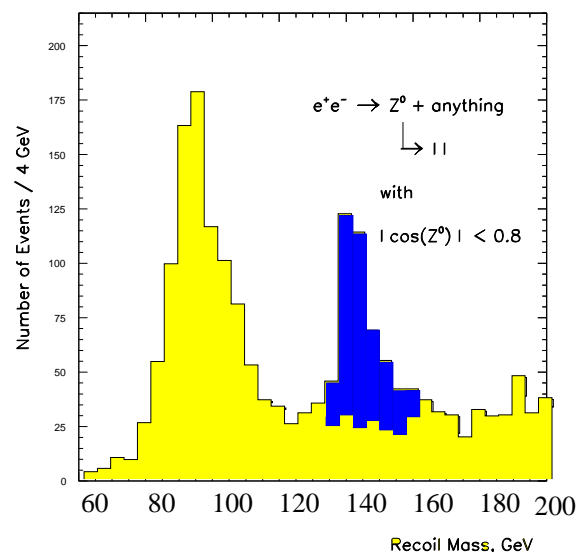
$5\sigma$  nach 1 Jahr Daten!

$5\sigma$  nach 3 Jahre Daten!

Ein Linearbeschleuniger sieht das Higgs sehr schnell und deutlich.

Nach einem Monat  
bei TESLA!

Masse auf  $\pm 1/10\%$   
mit  $500 \text{ fb}^{-1}$

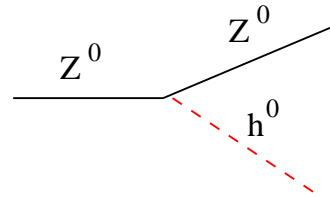


Bei hoher Luminosität  $\approx 10^5$  Higgs-Bosonen nach einem Jahr:  
Präzisionsmessungen!

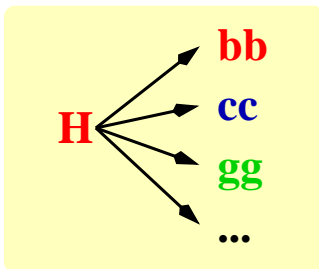
# JENSEITS DER ENTDECKUNG

## • Kompletter Test unseres Verständnisses der Masse

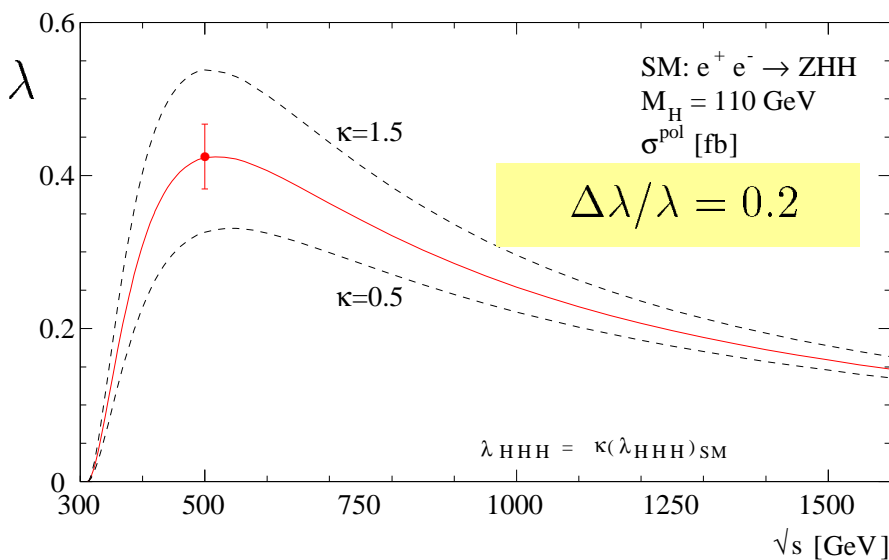
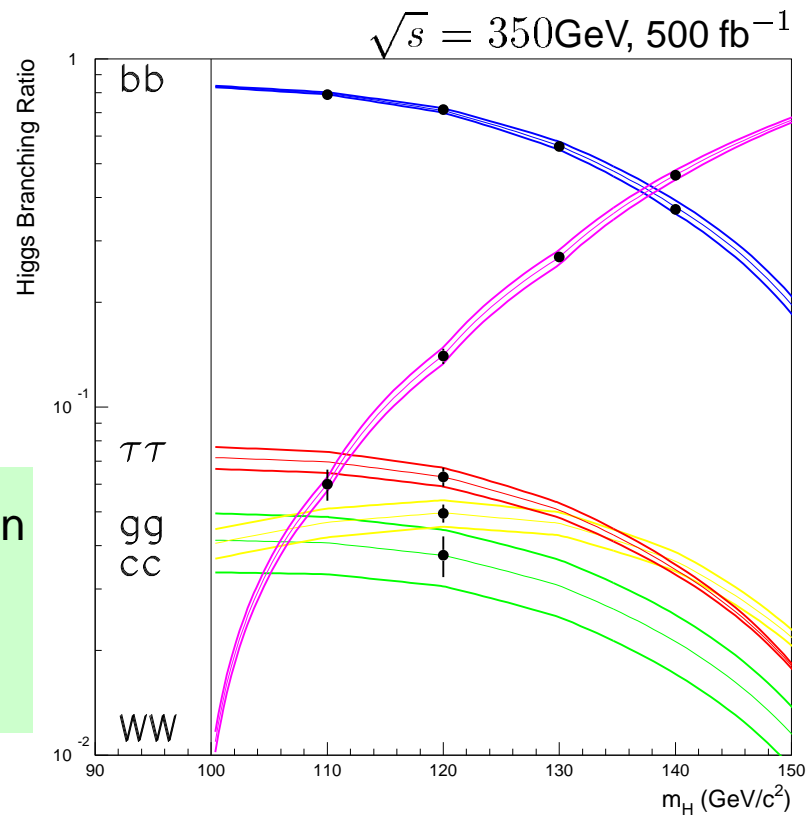
Kann das Higgs die Z-Masse erklären?  $\sum W_i^2 = v^2$ , wobei:  $v = 246 \text{ GeV}$



$$= \frac{M_Z^2}{v^2} W_i$$



Präzisionsmessungen der möglichen Higgs-Zerfälle auf einige Prozent!



Higgs Selbstkopp-  
lung:  
Rekonstruktion des  
Higgs Potentials  
Hohe Lumi  
notwendig!

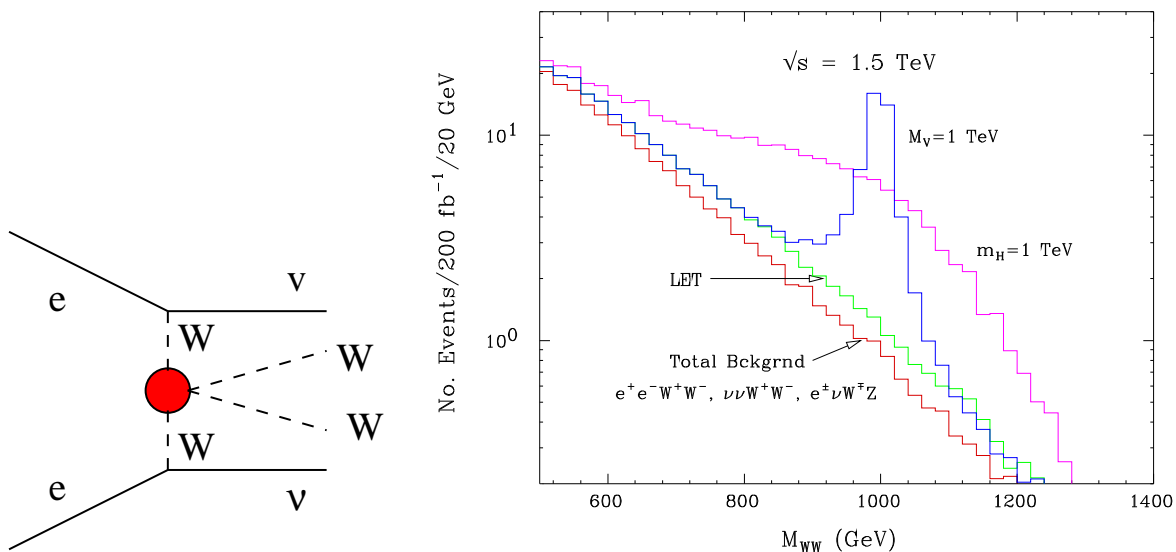
# ES GIBT DAS HIGGS NICHT.....

## DER STARKE WEG

- Was wäre, wenn es das Higgs nicht gibt....

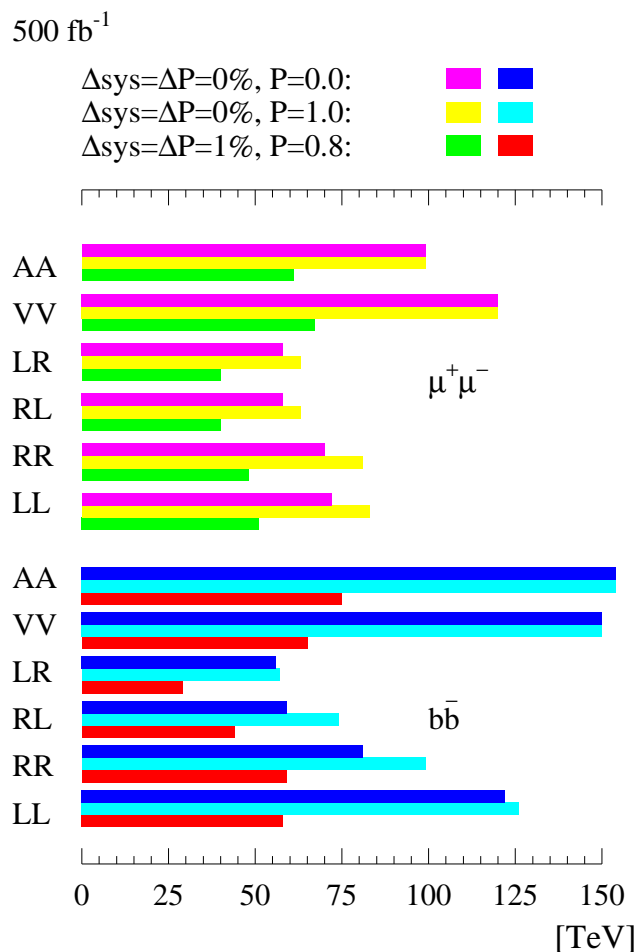
Alternative könnte Einführung einer neuen starken Wechselwirkung sein (WW Re-scattering...)

- Die Rolle des Higgs wird in solchen Modellen von neuen nicht-elementaren Objekten "übernommen, die einen endlichen Vakuumerwartungswert haben
- Ein solches Objekt wäre in WW Streuung sichtbar



- Typische Massenskalen für solche Theorien (wiederum eingeschränkt durch die existierenden Messungen) sind  $\mathcal{O}(1 - 1.5)$  TeV
- Studium der anomalen WW Kopplungen erlaubt ein detailliertes Studium dieser Effekte bereits bei kleineren Energien

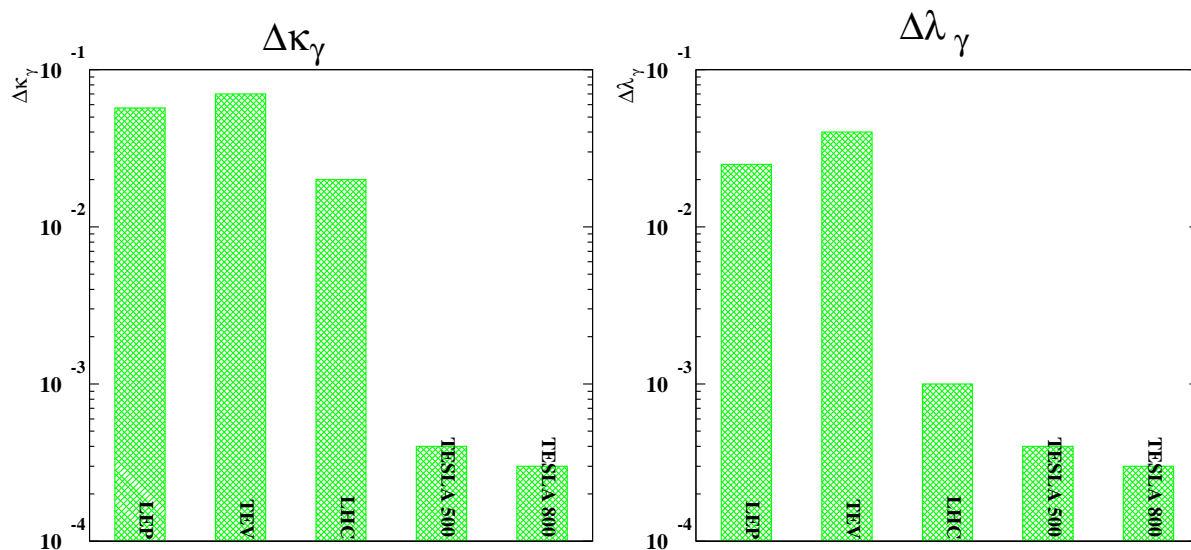
- Gibt es eine Struktur unterhalb der jetzt bekannten und im Standard Modell beschriebenen?
  - neue schwere  $Z^{0'}$  Bosonen?
  - Kontakt Wechselwirkungen? Leptoquarks?
  - Exotische Wechselwirkungen? Spin 2 Austauscheteilchen?
  - ....
- Am besten studiert in der Reaktion  $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$



- LC: erweitert den Bereich um einen Faktor 10

# ANORMALE KOPPLUNGEN

- Wichtiger Test des Standard Modells im Allgemeinen und der “no Higgs” Szenarien im Speziellen
- Drei-Eichbosonen-Kopplungen tragen Informationen über eine mögliche “neue” Physik
- Vergleich der Sensitivität von LHC mit der eines LC



- Vorteil eines LC über LHC für  $\Delta\kappa_\gamma$
- LHC und LC vergleichbar für  $\Delta\lambda_\gamma$

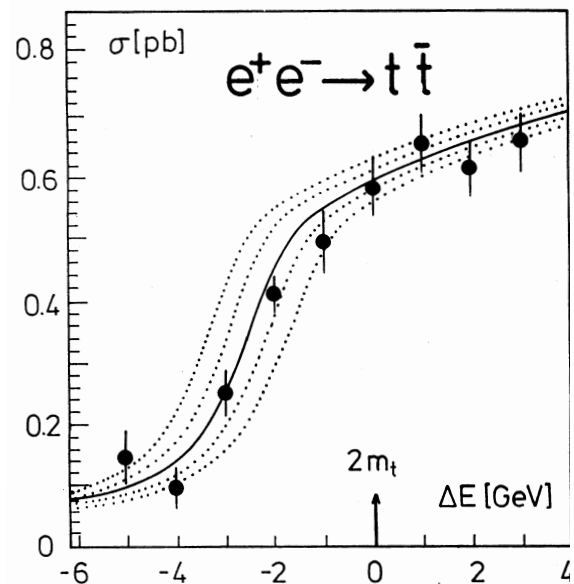
- LC hat größere indirekte Reichweite als LHC (via  $\Delta\kappa_\gamma$ )
- LHC hat größere Reichweite für direkten Nachweis, wenn ein solcher möglich

- Tests mit hoher Präzision sind möglich

- Ein LC(500) ist eine "TOP Fabrik"
- erlaubt Präzisionsstudien des TOP Systems

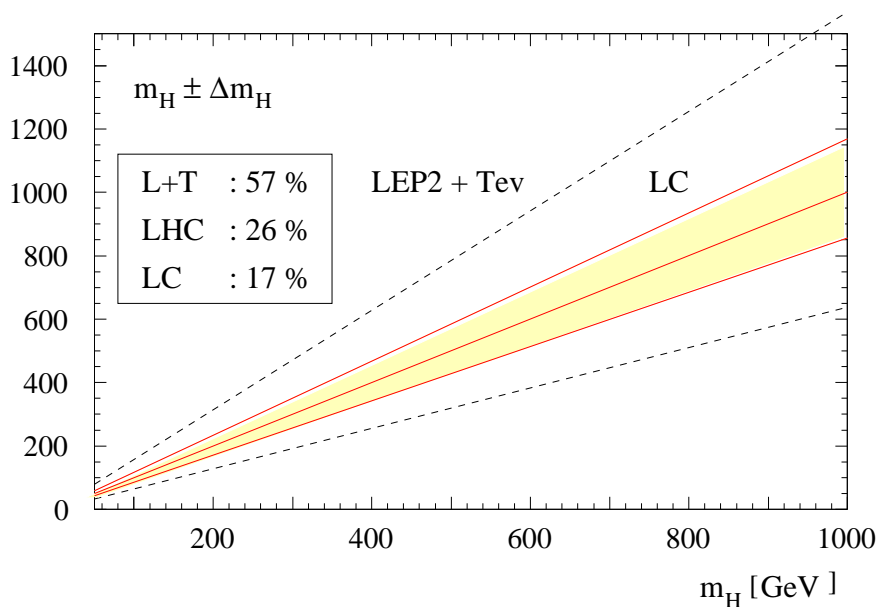
plot für  $50 \text{ fb}^{-1}$

basierend auf  $500 \text{ fb}^{-1}$   
integrierter Luminosität =  
1/10 Jahr Laufzeit:



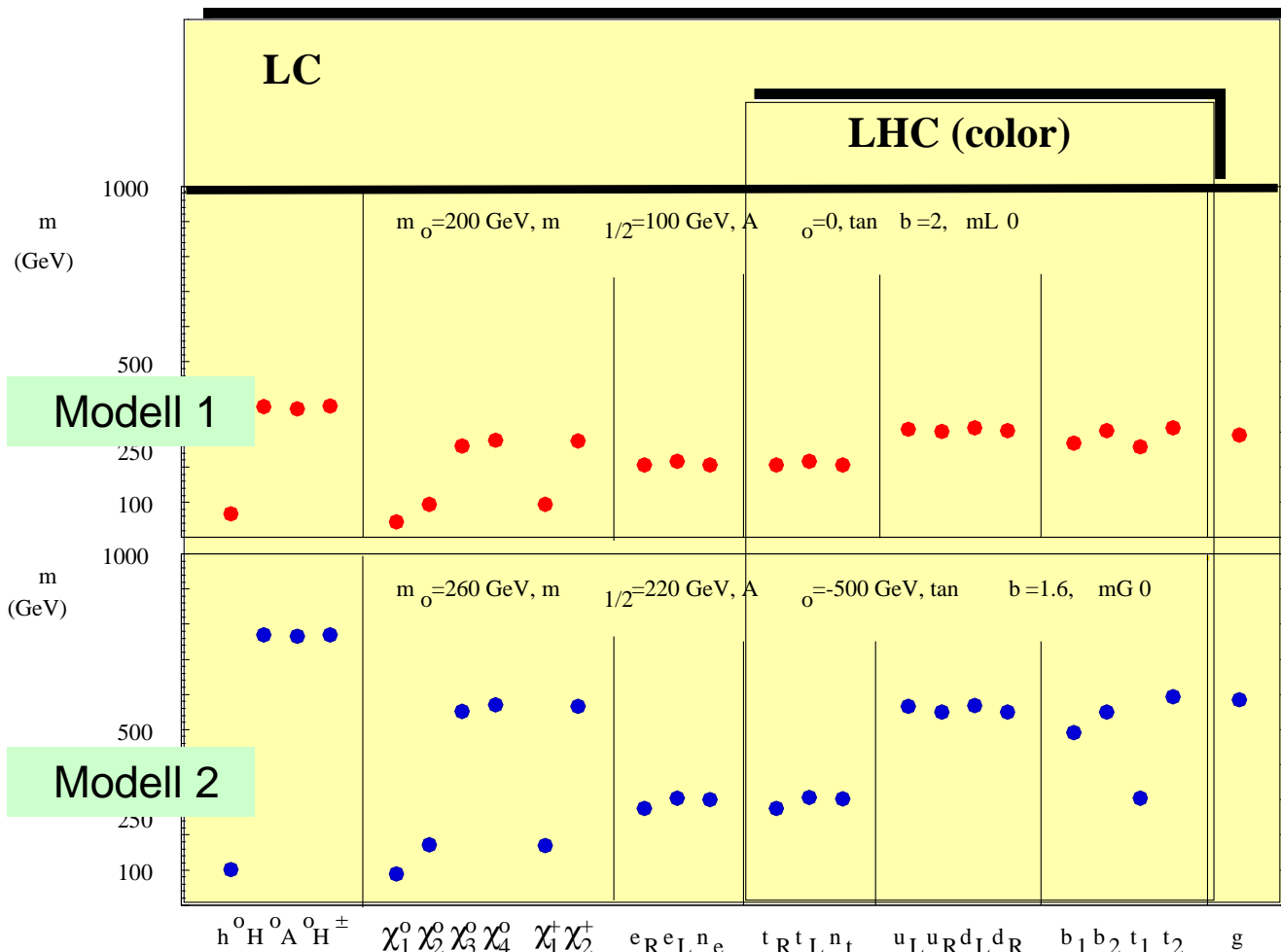
Excitation curve of the top quarks including initial-s

$$\Delta m_t = \pm 100(\text{stat}) \pm (100 - 200)(\text{theo}) \text{ MeV}$$



Top als schwerstes  
bekanntes Fermion  
eignet sich beson-  
ders gut für präzise  
Konsistenzchecks  
des SM

- Supersymmetrie: populäre Erweiterung des SM
- Verschiedene Modelle sagen verschiedene Teilchenspektren voraus:



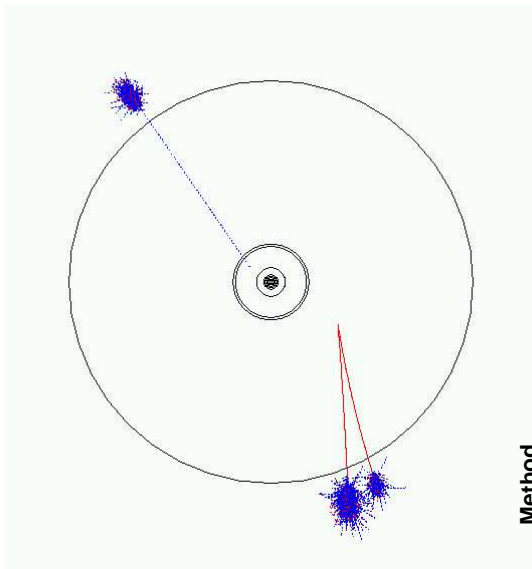
- Linearbeschleuniger mit hoher Luminosität kann einen großen Teil des Spektrums rekonstruieren.
- Nur so kann die Struktur der Supersymmetrie (wenn sie existiert) verstanden werden.

Präzisionsmessungen sind dafür wichtig

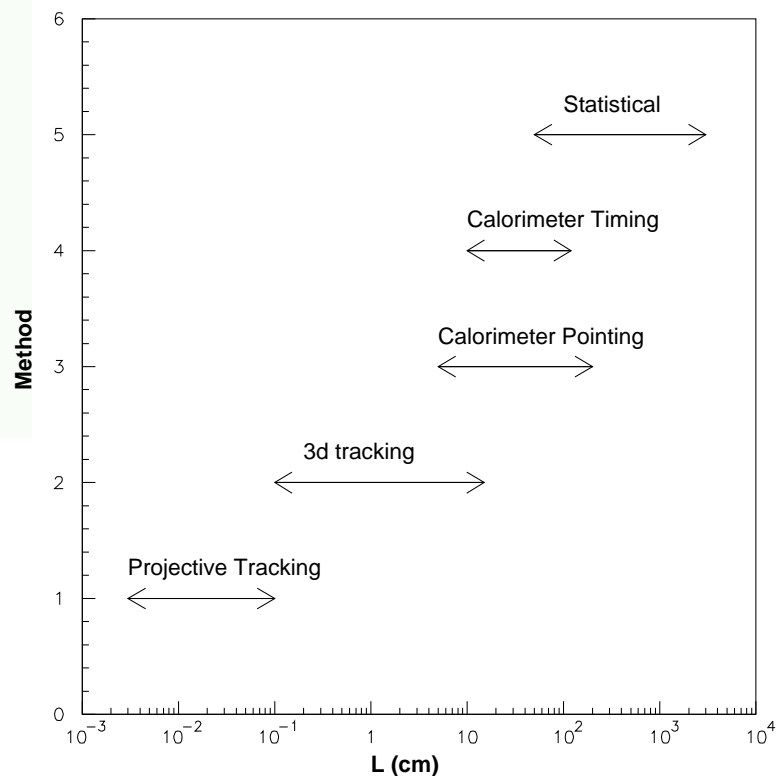
- Supersymmetrie muß gebrochen sein, wenn sie die Natur beschreiben soll
- Ein attraktives Modell ist

## Gauge Mediated Supersymmetry Breaking

- leichtestes SUSY Teilchen:  $\tilde{G}$  Gravitino
- vorausgesagt: lange Lebensdauer
- typische Zerfälle:  $\tilde{N} \rightarrow \gamma \tilde{G}$



Sensitivität:  
von  $10\mu m$  bis  
zu einigen m



LC mit hoher Luminosität kann auch  
exotische Signaturen gut sehen

## Linear Collider

Higgs	Masse:	1/10%
	Breite	5 – 10%
	BR's	einige %
	HHH	20%

**SUSY** viele Zustände zugänglich  
testen von und entscheiden zwischen Modellen  
GUT/Planck Extrapolation

Z,W	Giga-Z	$10^{-5}$
Z'	Massenbereich	10 TeV indirekt

**WW** Massenskala bis 3 TeV indirekt

**$t\bar{t}$**  Masse  $\pm 200$  MeV

## Zwei Technologien:

Normalleitend: NLC, JLC

Supraleitend: TESLA

### KALT

technologisches Neuland (Kavitäten)

lange Wellenlänge (20 cm)

schnelle Rückkopplung ok

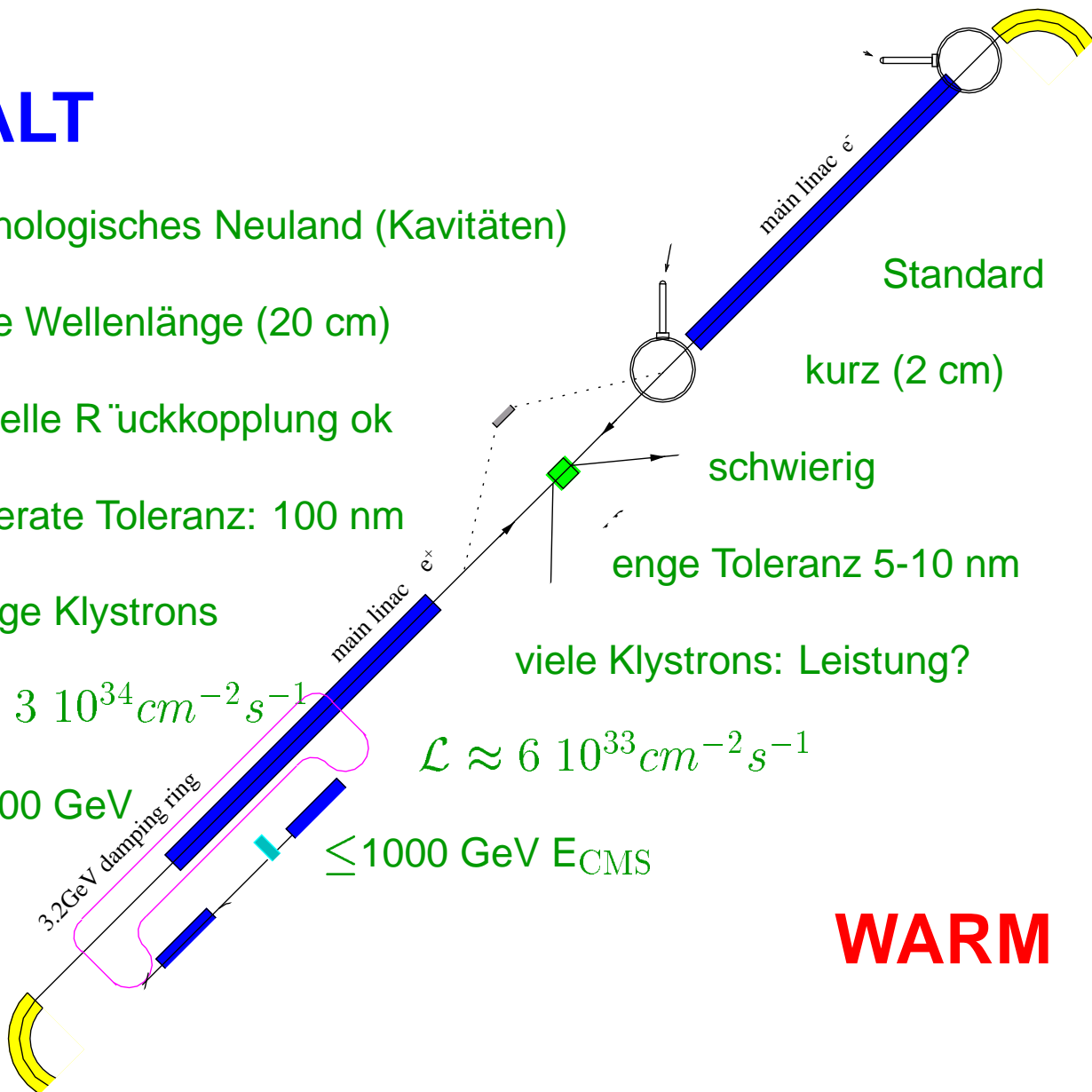
moderate Toleranz: 100 nm

wenige Klystrons

$$\mathcal{L} \approx 3 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

< 1000 GeV

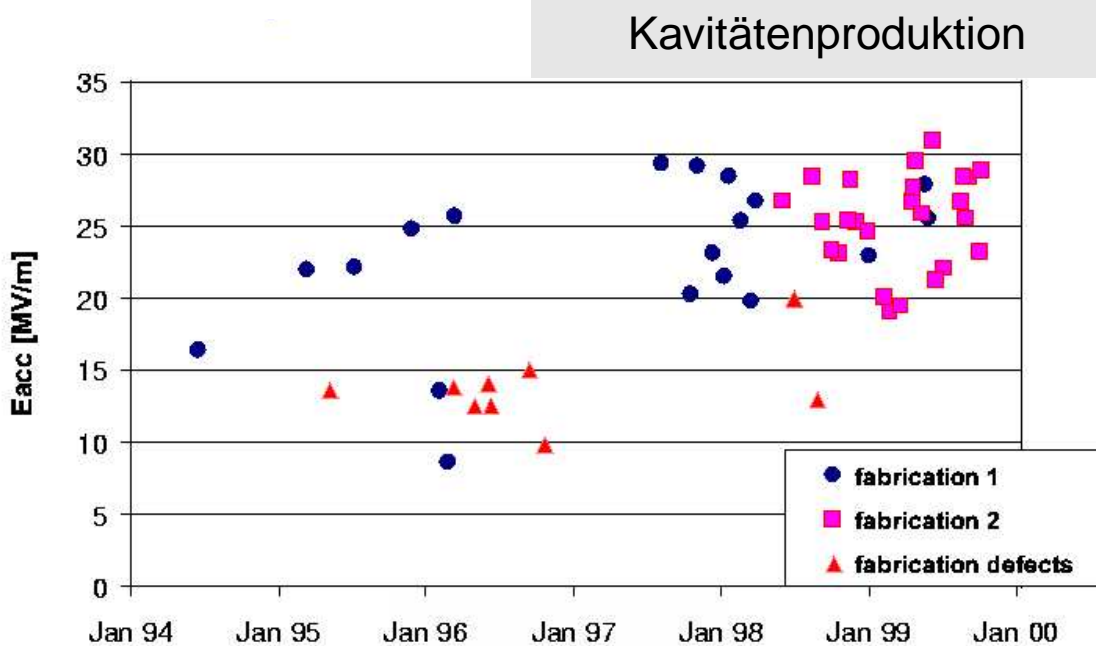
$\leq 1000 \text{ GeV } E_{\text{CMS}}$



### WARM

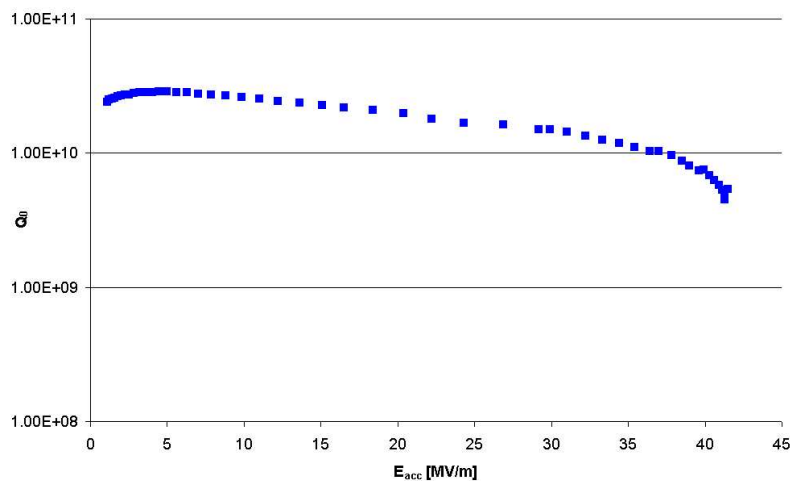
# KAVITÄTEN ENTWICKLUNG

- Intensive F+E Arbeiten im Rahmen der internationalen TESLA Kollaboration seit Anfang der 90'er Jahre
- Ziel: Entwicklung von supraleitenden Kavitäten mit Gradienten  $> 20\text{MV/m}$
- Stand:
  - $> 20\text{ MV/m}$  routinemässig erreicht



für Einzeller  $> 40\text{MV/m}$  erreicht!

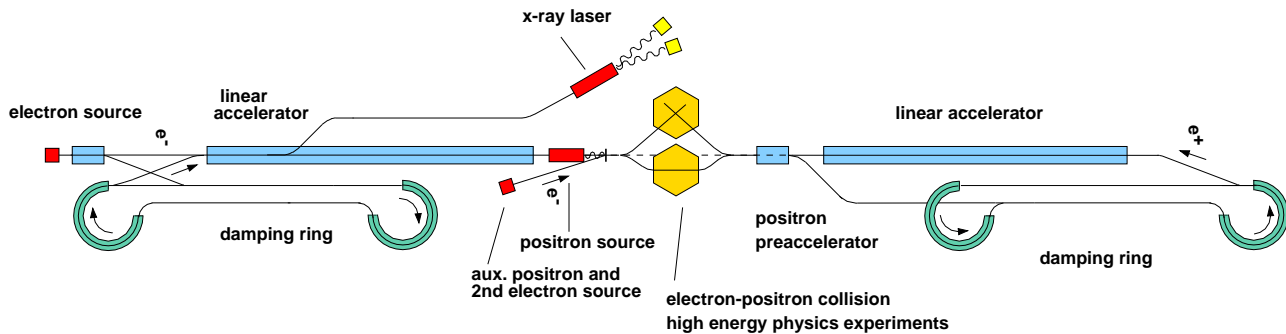
## Einzeller Kavitäten



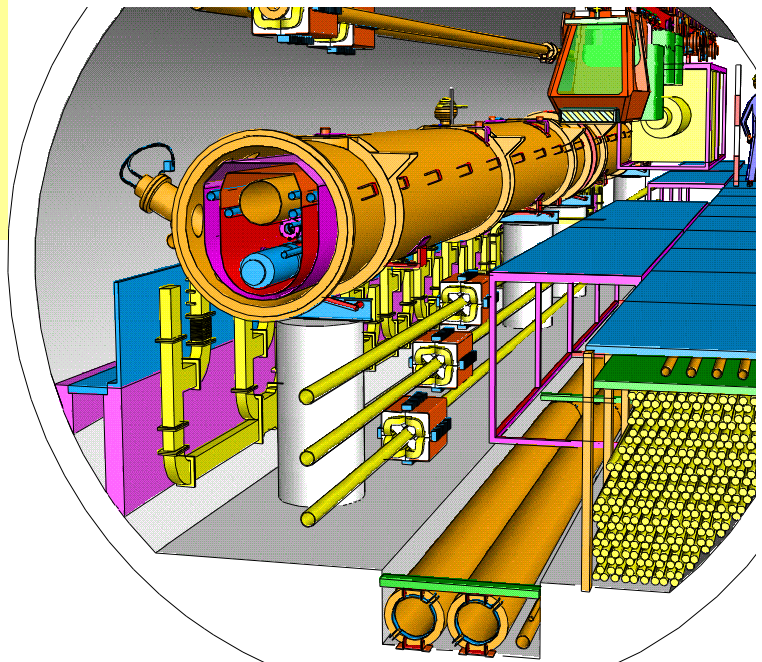
F+E sehr erfolgreich,  
Industriestudien  
angelaufen

# DER BESCHLEUNIGER TESLA

- **TESLA:** 500-800 GeV Elektron-Positron-Linearbeschleuniger
- Schematischer Aufbau:



- Supraleitender Beschleuniger
- Sehr hohe Luminosität:  
 $500 \text{ fb}^{-1}/\text{Jahr}$



- Symbiose aus einem Labor für Teilchenphysik und einem Labor für "Life Sciences" (Freier Elektronen Laser)

# DER FREIE ELEKTRONEN LASER

- TESLA: Hochenergiephysik + Freier-Elektronen-Laser



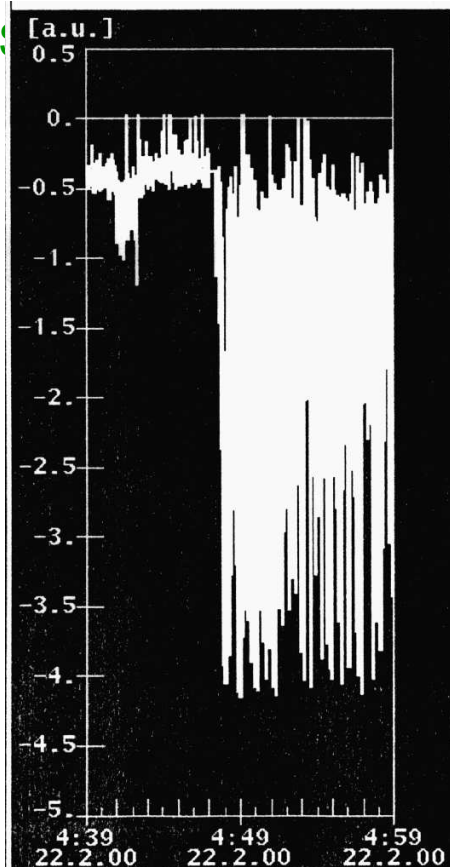
TESLA: laser im  
Roentgenbereich:  
 $\lambda \approx 1\text{nm}$

FEL ist integraler  
Bestandteil des Projektes  
mit Anwendungen in  
Festkörperphysik, Biologie  
...

- 22. Februar 2000, 4:40 morgens, DE  
Lasen des FEL am TTF

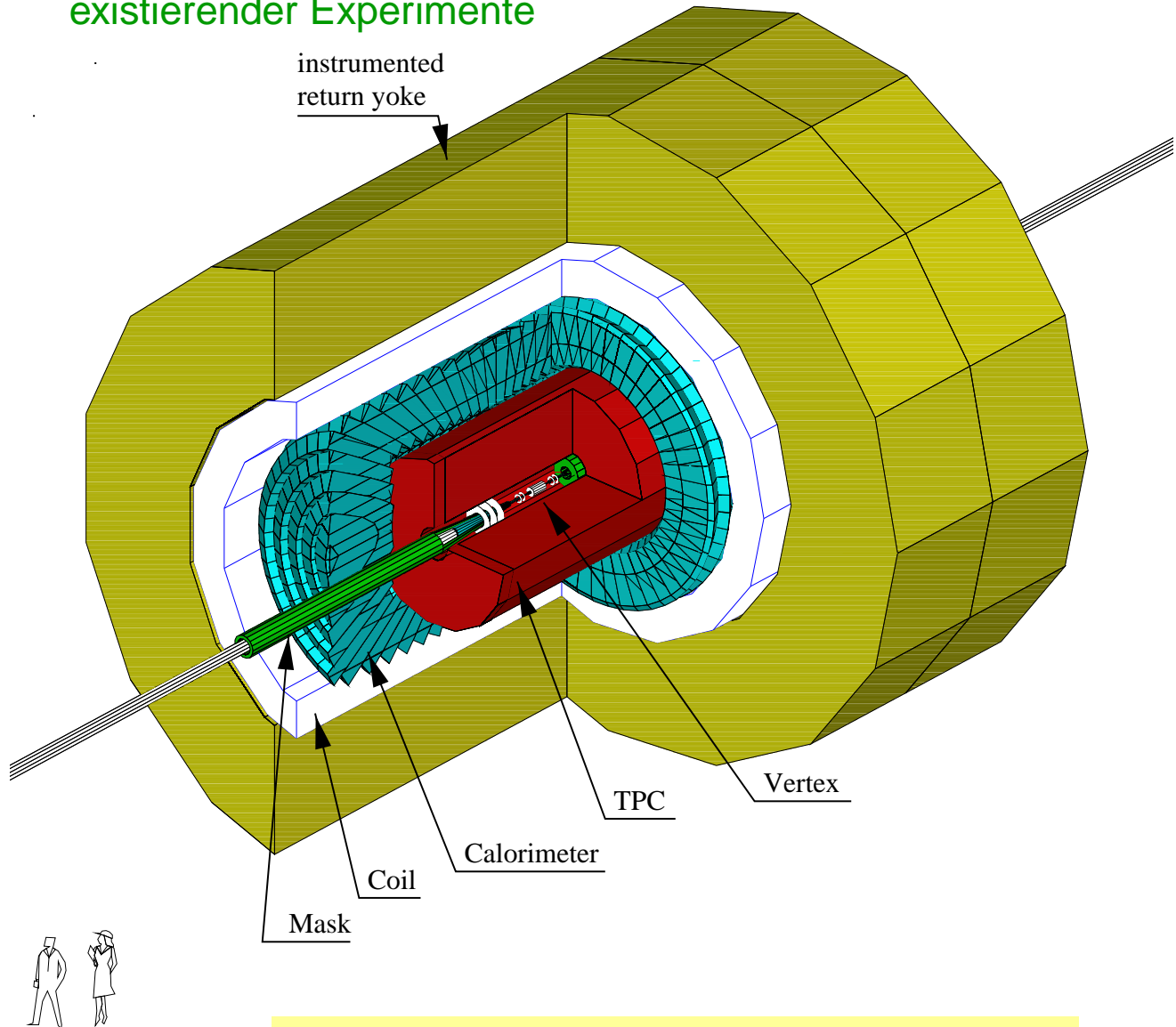
TTF: VUV laser,  
 $\lambda = 110\text{nm}$   
bisher: 450 nm

- Entscheidender Schritt auf dem  
Wege zu einem TESLA FEL
- Ab 2003: VUV FEL Labor am DESY  
mit Meßplätzen



# EXPERIMENTIEREN BEI 500 GeV

- Internationale Gruppe - **ECFA/DESY Workshop** beschäftigt sich mit der Physik und einem Detektorkonzept
  - Detektor muß geeignet sein für
    - Präzisionsphysik
    - große Datenmengen
  - verhältnismäßig einfache Extrapolation existierender Experimente

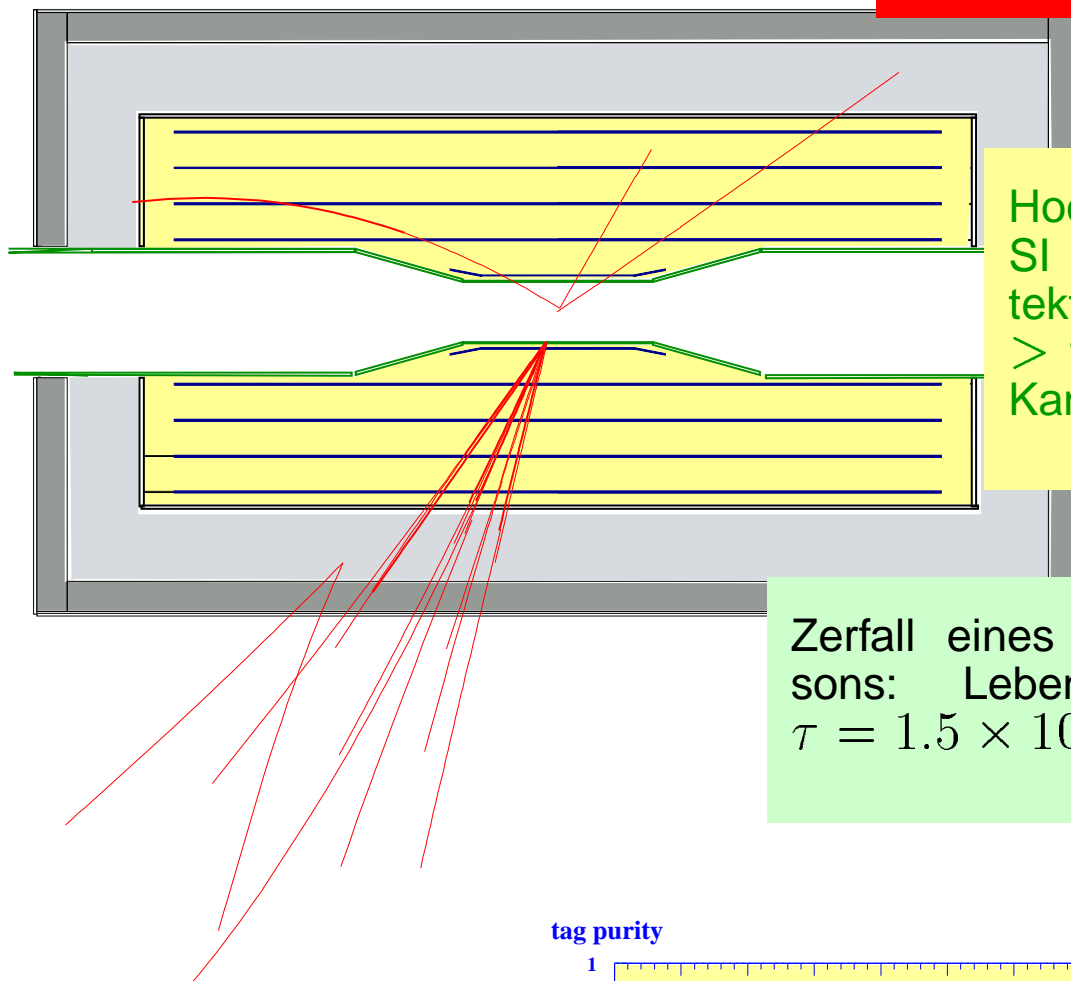


Schematische Zeichnung des Detektors.  
Größenordnung: 4 stöckiges Haus  
(vergleichbar HERA Detektor  $\times 1.5$ )

# VERTEX DETEKTOR

Der innerste Detektor: unmittelbar am Strahlrohr

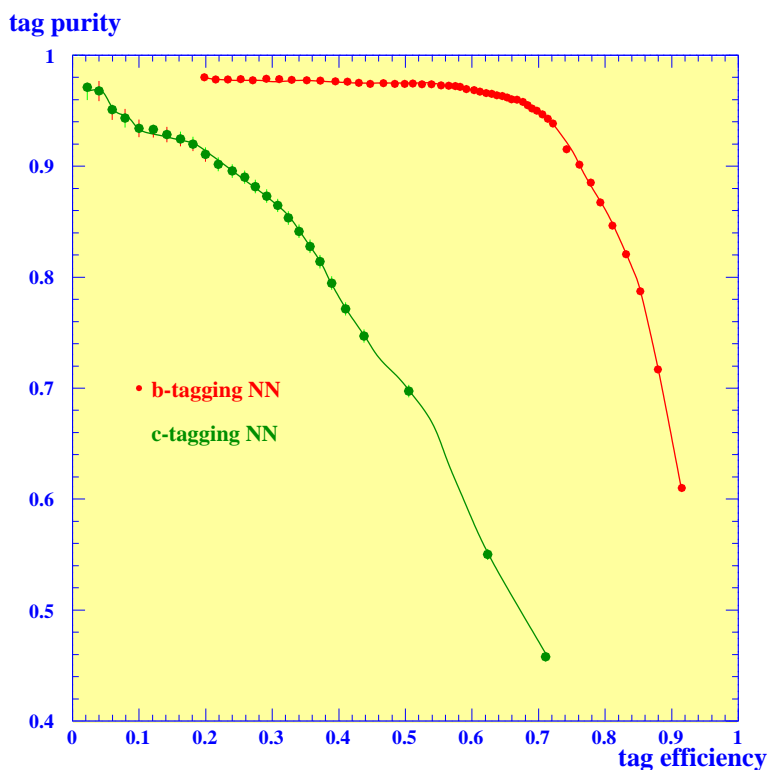
Radius = 15cm



Hochauflösender  
SI Pixel De-  
tektor mit  
> 100 Millionen  
Kanälen.

Zerfall eines B Me-  
sons: Lebensdauer  
 $\tau = 1.5 \times 10^{-12} \text{ s}$

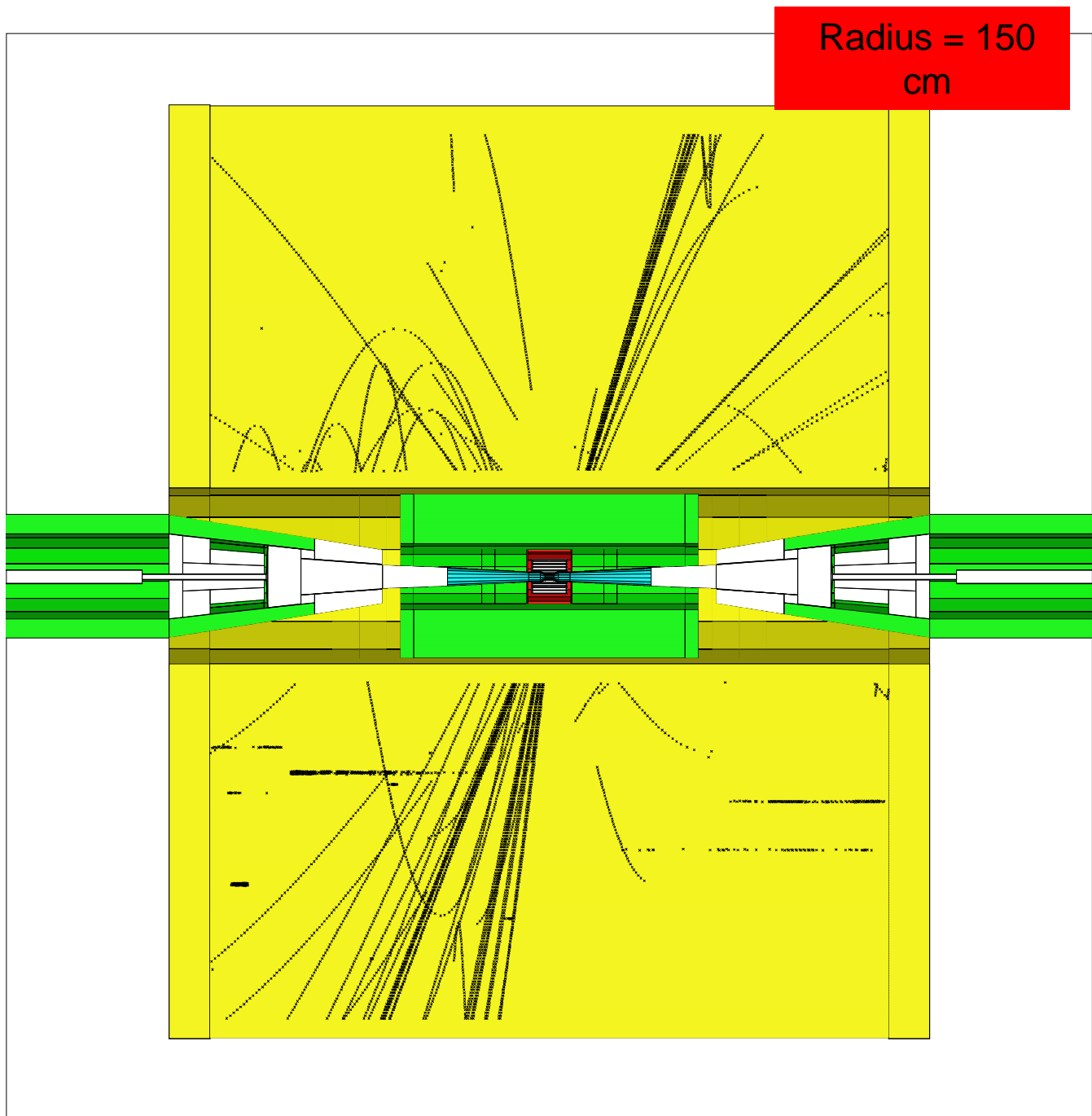
Effizienz und  
Reinheit für Bottom  
und Charm Nachweis



- Dominierender Detektor: TPC

Großer, gasgefüllter Detektor

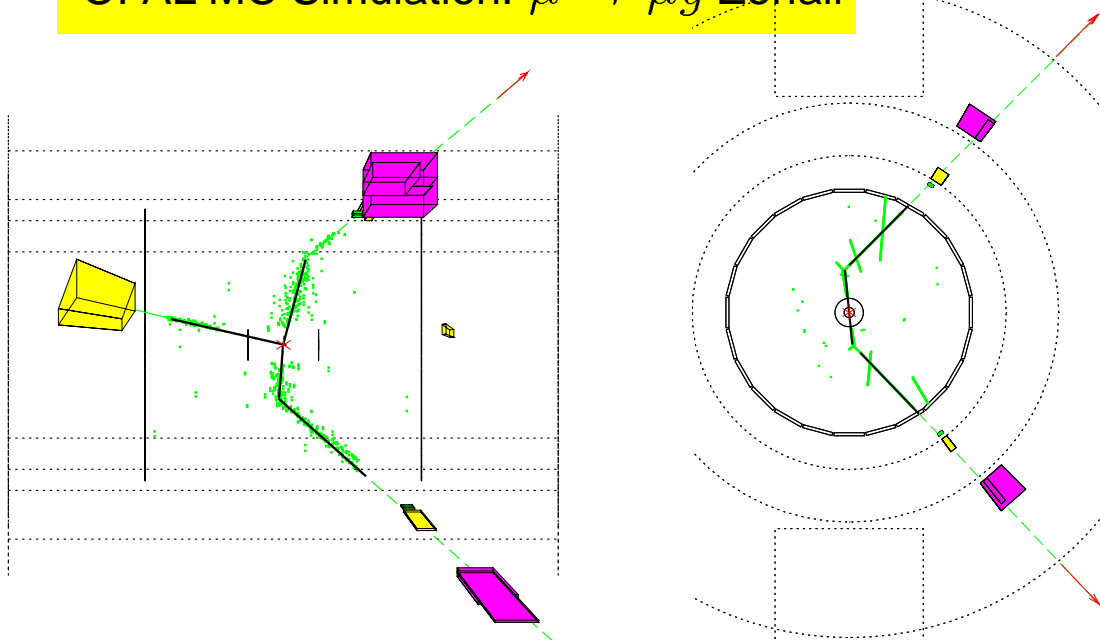
Rekonstruktion geladener Spuren in 3 Dimensionen in etwa  $5 \times 10^7$  Pixeln



# STÄRKEN EINER TPC

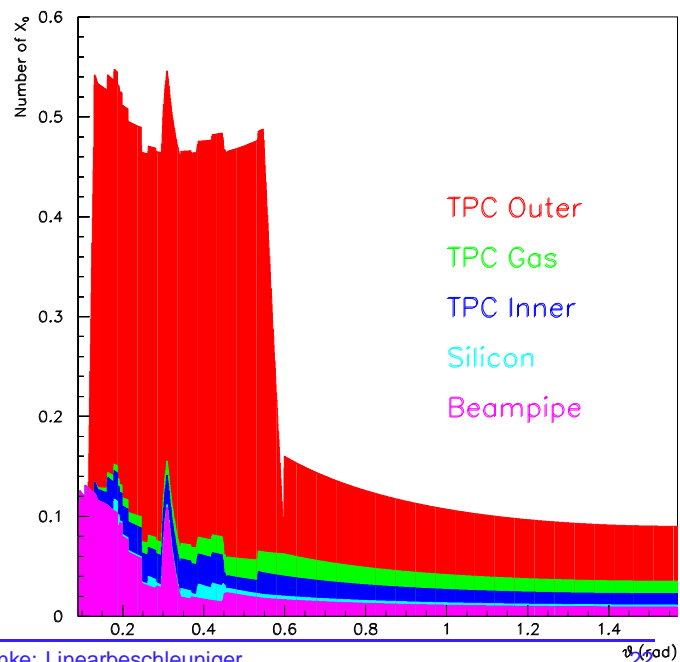
- Spurerkennung bis zu großen Radien

OPAL MC Simulation:  $\tilde{\mu} \rightarrow \mu \tilde{g}$  Zerfall



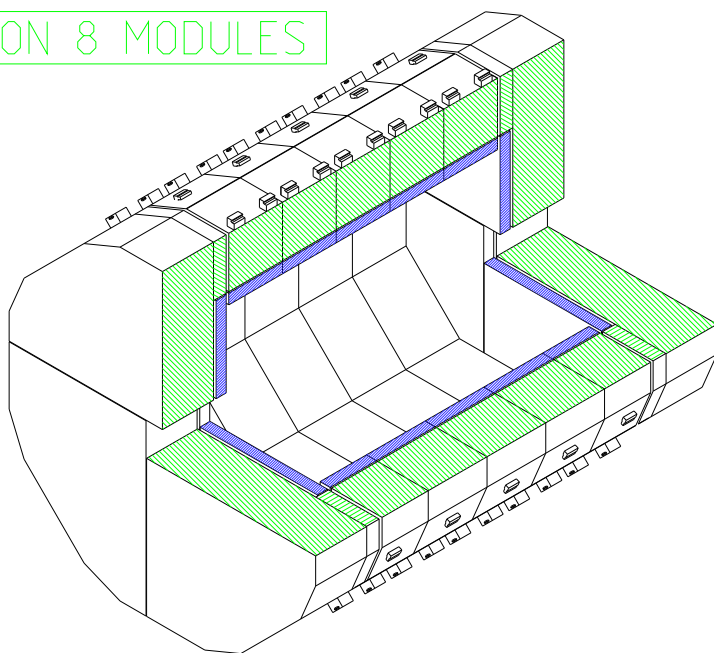
- Große Redundanz durch eine große Anzahl von Spurpunkten
  - Vorteil für die Mustererkennungsalgorithmen?
- Wahre 3D Rekonstruktion
- “Dünnere” Detektor

- $dE/dx$  gibt es “umsonst”

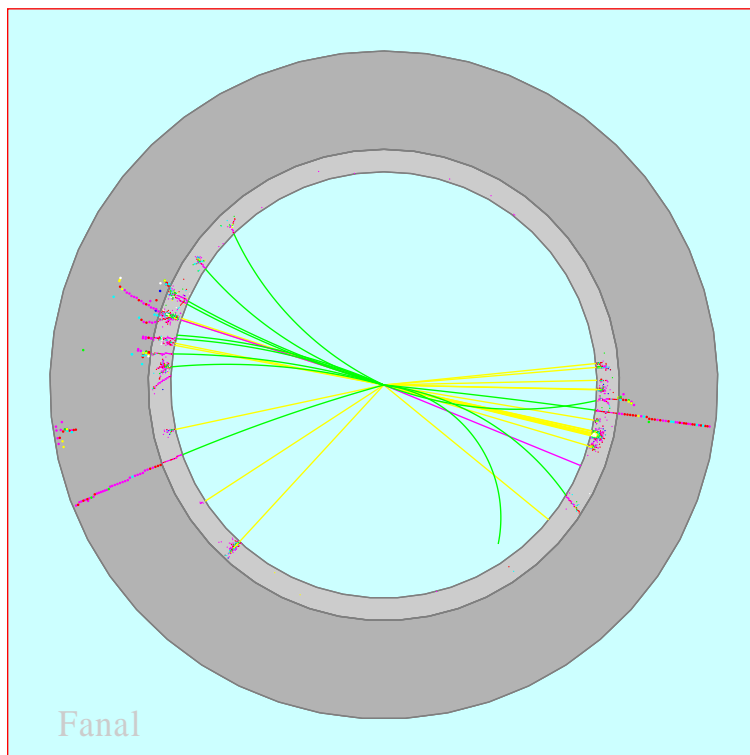
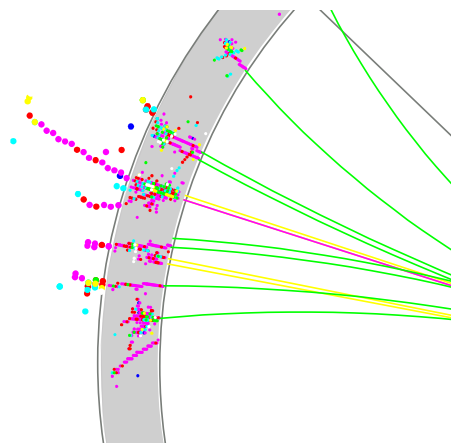


- Messung der Energie geladener und neutraler Teilchen
  - hochauflösendes Si-W ECAL  $10\%/\sqrt{E} \oplus 1\%$
  - exzellente Segmentierung
  - hermetisch (umschließt den "ganzen" Detektor)
  - größter Teil innerhalb der Spule (4T Feld)

VERSION 8 MODULES



Vorgesehene  
Auflösung erlaubt  
"Tracking" im  
Kalorimeter





aktuell	TTF R&D
Frühjahr 1998	“II. DESY / ECFA study on physics and detector at future linear colliders”
Frühjahr 1999	“scoping date” am DESY: Beginn der Umweltverträglichkeitsstudie für TESLA
April 1999	Regierung stimmt einer Begutachtung durch den Wissenschaftsrat im Jahre 2001 zu
Frühjahr 1999	Installation und Test eines zweiten Modules in TTF
Anfang 2000	“proof-of-principle” eines FEL
Frühjahr 2000	Workshop in Padua zur Vorbereitung des technischen Design Reports
Frühjahr 2001	TDR (Maschine und Experiment) fertig und wird dem Wissenschaftsrat “übergeben
2002/2003	Entscheidung der deutschen Regierung
2003	Projekt wird im internationalem Rahmen etabliert
2003...	Baubeginn
2008-10	Erste Strahlen

- Linearbeschleunigerprojekte haben in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht
- Ein LC hat ein reiches und interessantes Physikprogramm
- Das LC Physikprogramm ist über weite Strecken komplementär zum LHC