Projekte für künftige Linearcollider

Technisches Seminar
9. Oktober 2012, DESY Zeuthen
Sabine Riemann

Bemerkung zum Titel

…künftige Linear<u>collider</u>

- Elektron-Positron Linear**collider**
  - **Elektron-Positron Kollisionen**
  - **Linearbeschleuniger, um e+ und e- auf die notwendige Energie zu bringen**
  - **Linearbeschleuniger + Kollisionen = Linearcollider**

Zum Inhalt:

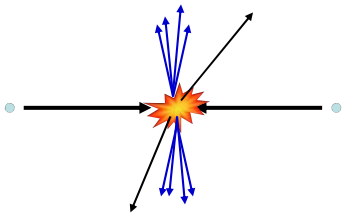
- Kurze Einleitung
- Wozu braucht man (einen) e+e- Linearcollider?
  - **ein wichtiges Argument: Higgs-Boson und Standardmodell der Elementarteilchen**
- Die Linearcollider Projekte
  - **Warum linear ?**
  - **Welche Energie ?**
  - **Welche Luminosität ?**
  - **Status**
    - ILC Projekt
    - CLIC Projekt
- Zusammenfassung

Bitte sofort fragen, wenn etwas unverständlich ist

Teilchen-Kollisionen

Teilchen wechselwirken bei hoher Energie ($E = mc^2$)

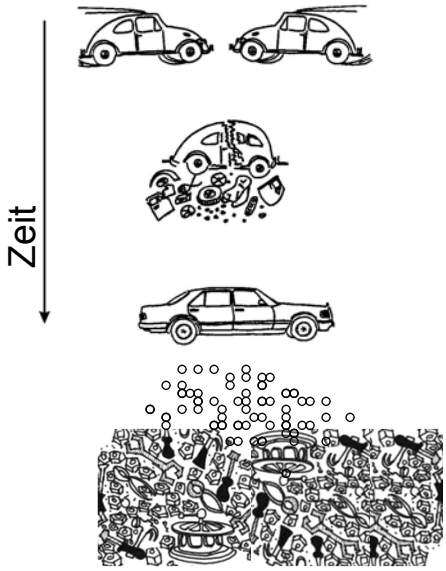
- neue Teilchen entstehen und zerfallen wieder
- Messen der Zerfallsprodukte mit Detektor:
  - **Teilchenidentifikation**
  - **Zählraten für die einzelnen Prozesse**
  - **Räumliche Verteilung im Detektor**



→Information über elementare Teilchen und ihre Wechselwirkungen

→ **Standardmodell der Elementarteilchen**

‘Hinkender’ Vergleich…



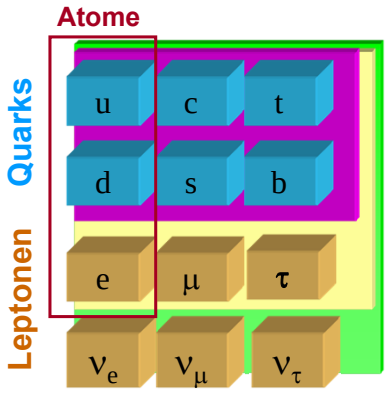
Cartoon: **Claus Grupen**

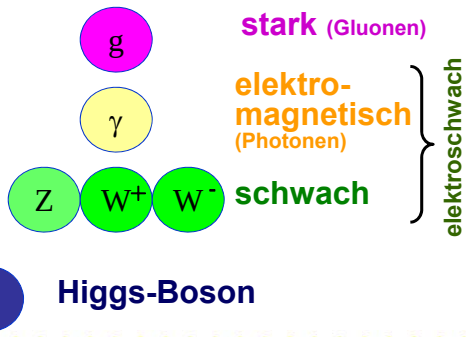
Standardmodell

Materieteilchen

Kraftteilchen

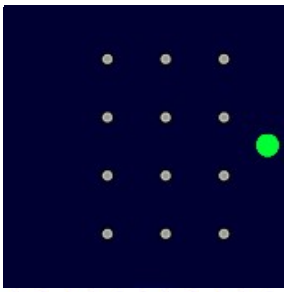
(vermitteln Wechselwirkung zwischen Materieteilchen)





Higgs-Mechanismus

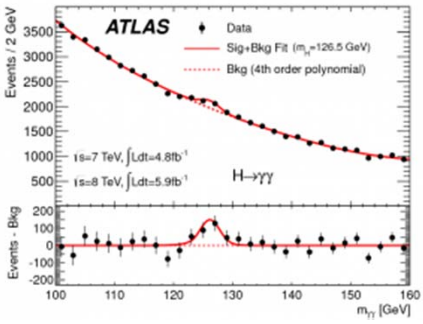
Peter Higgs:
Masse entsteht in der Wechselwirkung mit einem skalaren Feld (Higgs-Feld)

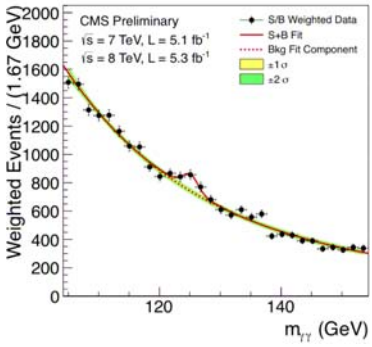


4. Juli 2012

Masse des 'Higgs'-artigen Zustandes:

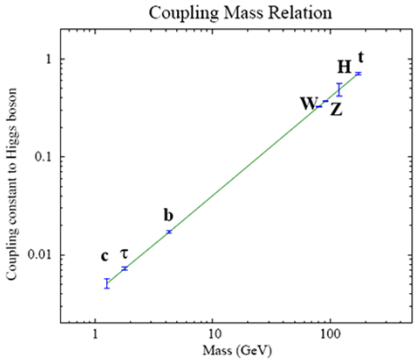
m ≈ 126 GeV





Und nun?

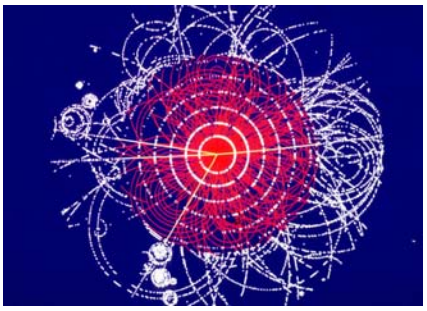
- Ist der am LHC beobachtete Zustand wirklich 'DAS Standardmodell-Higgs-Boson' ?
- Im Standardmodell ist die Kopplung des Higgs-Bosons an die Teilchen vorgegeben (→ Masse)
  - **Diese 'Higgs-Kopplungen' müssen gemessen werden ⇔ stimmt das Standardmodell oder nicht?**
  - **In Erweiterungen des Standardmodells haben die Higgs-Bosonen (etwas) andere Kopplungen und Parameter**
  - **Sehr hohe Messgenauigkeit erforderlich, um Natur des Higgs-Bosons zu bestimmen**

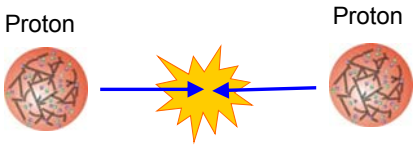


KEK-REPORT-2003-7

Erzeugung von Higgs-Bosonen am LHC

LHC (Large Hadron Collider)
Hadronen bestehen aus Quarks

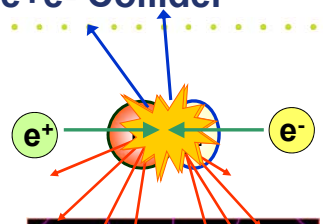


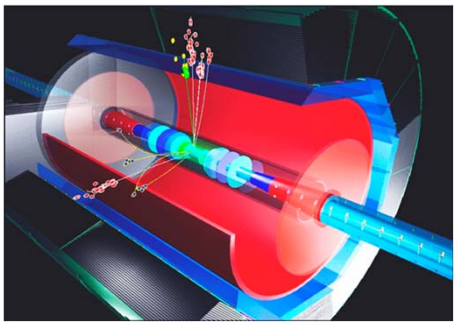


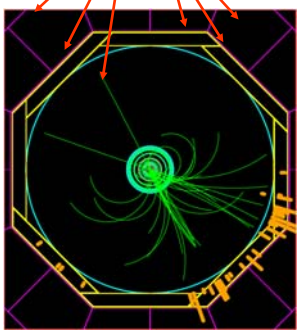
- Mit dem LHC allein wird ein vollständiges und umfassendes Bild vom Higgs-Mechanismus nicht gegeben
- Messung der Higgs-Kopplungen möglich, aber relativ ungenau

Higgs-Produktion am e+e- Collider

Elektron und Positron sind elementare Teilchen





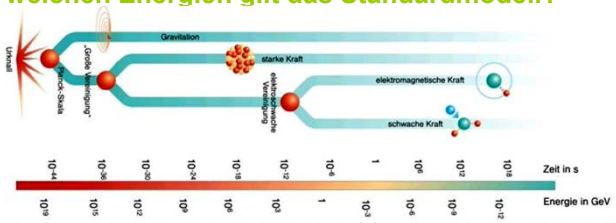


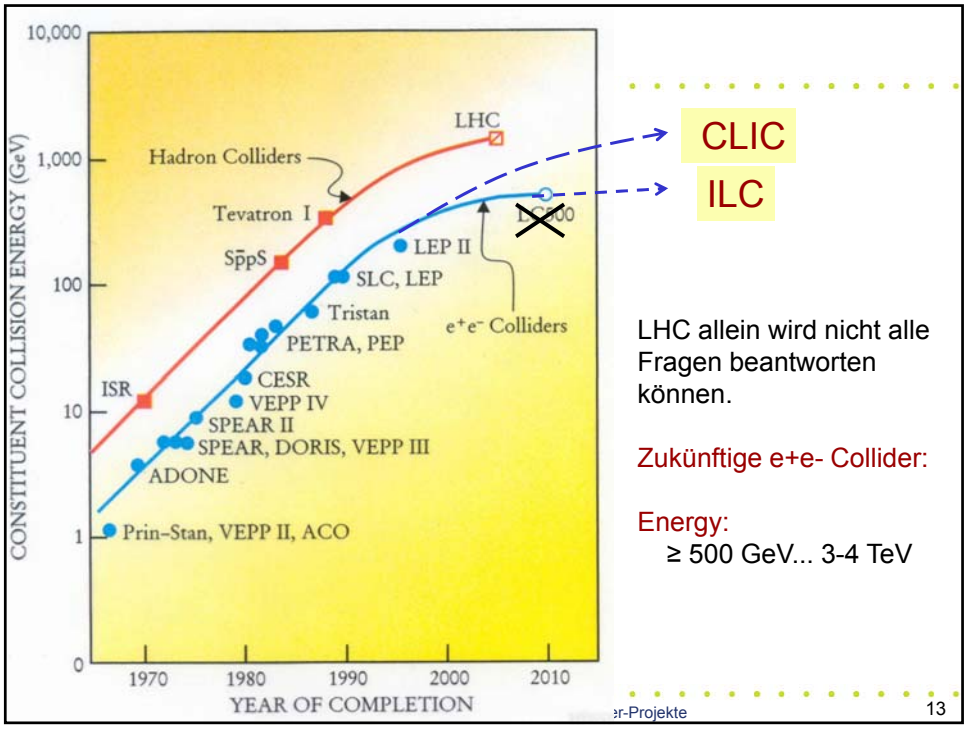
Die Higgs-Kopplungen können genau gemessen werden

…wichtige Fragen…

- Ist es das erwartete Standardmodell-Higgs-Boson?
  - **ist das Standardmodell richtig?**

- Gibt es Hinweise auf 'Physik jenseits des Standardmodells'?
  - **Supersymmetrie, dunkle Materie, ….**
  - **bis zu welchen Energien gilt das Standardmodell?**





LHC allein wird nicht alle Fragen beantworten können.

Zukünftige e+e- Collider:

Energy:
≥ 500 GeV... 3-4 TeV

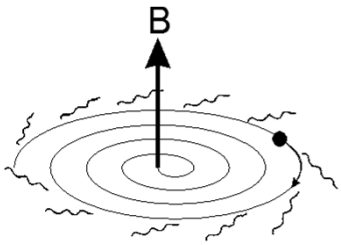
Die e+e- Linearcollider Projekte

- Warum lineare statt zirkularer Collider?
- Wichtige Parameter:
  - **Energie**
  - **Luminosität**

Warum Linearbeschleuniger ?

Synchrotronstrahlung
→ Energieverlust bei jedem Umlauf
(Radius R, Teilchenmasse m)

$$\frac{\Delta E}{\text{Umlauf}} \propto \frac{E^4}{Rm^4}$$



LEP (R_{eff} = 3.1km):
(e+e- Beschleuniger am CERN, 1989-2000)

E_{beam} = 50 GeV:
ΔE / t ~ 2 TeV/s

$\Delta E/E$ ~ 0.4%

E_{beam} = 100 GeV:
ΔE / t ~ 33 TeV/s !!!

$\Delta E/E$ ~ 4%

☹ **Energieverlust muss mit RF System kompensiert werden!**

Fazit

$e^{\pm}$ Ringbeschleuniger für hohe Energien sind nicht effektiv!

➔ Die e+e- Zukunft ist linear

e+e- Speicherringe
- Beschleunigung und Kollision bei jedem Umlauf
  → Mehrfachnutzung der Beschleunigerstrukturen
  → Mehrfachnuntzung des Teilchenstrahls
- effizient

e+e- Linearcollider
- Einweg-Beschleunigung
- Einmal-Kollisionen
- keine Ablenkmagnete nötig, aber viele RF Strukturen
  → Hoher Beschleunigungs-gradient nötig, um die Länge der Maschine zu begrenzen

Die Key-Parameter eines Colliders

Energie

- **bestimmt durch Technology**
  - Beschleunigungsgradient
  - → Länge des Beschleunigers

Luminosität

- **Für genaue Messungen braucht man viele Ereignisse,**
  - häufige Kollisionen der e+ und e- Teilchenstrahlen
    → Wiederholfrequenz f_{rep}
  - viele Teilchen im Strahl, N_{e+}, N_{e-}
  - → Luminosität gibt Zahl der Teilchenkollisionen pro Querschnitt und Zeit

$$L \sim \frac{N_{e+} N_{e-}}{\sigma_x \sigma_y} f_{rep}$$

→ für präzise Messungen braucht man hohe Luminositäten

Welche Energie für e+e- Kollisionen ?

Aus physikalischer Sicht:

- **Higgs Boson Masse ~126 GeV**
  → Kollisionsenergie ~220GeV – 500 GeV (800 GeV)
  Higgs Factory,
  Messung der Higgs-Parameter, vor allem der Kopplungen
- **Produktion von Top-Quark-Paaren (m_{top} ~ 173 GeV):**
  → Kollisionsenergie ~350 GeV
- **…. Siehe ILC Physics ….**
- **Neue Entdeckungen am LHC ⇔ Kollisionsenergie = ??**
  - 'flexibler' Energiebereich

Aus technologischer Sicht:

- **'grosse Schritte sind riskant'**

Schlussfolgerung

- **stufenweise Erhöhung der Energie, beginnend mit Higgs-Boson-Produktion**
- **Upgrade auf hohe Energien (~1 TeV) muss möglich sein**
- **Multi-TeV Collider ist wünschenswert, um auch den Bereich von Entdeckungen am LHC abzudecken**

Design – Luminosität

$N = L\,\sigma$
Ereigniszahl = Luminosität x Wirkungsquerschnitt

- Wirkungsquerschnitt σ ist durch den physikalischen Prozess bestimmt
  - aber: $\sigma \sim 1/E^2$
  - → bei hohen Energien braucht man grosse Luminosität;
- Präzisionsmessung ⇔ brauchen Genauigkeit im Prozentbereich (oder besser)
  - → **mehr als 10^4 Ereignisse**
- Beispiel Higgs-Production:

Standardmodell: $\sigma \sim 20$fb
→ für 10^4 Higgs-Ereignisse (~1% Genauigkeit) brauchen wir **$L = 500\ fb^{-1}$**
→ verteilt über 4-5 Jahre (500 Tage) entspricht das ≈ **$1fb^{-1}$/Tag**
bzw. **$L \sim 10^{34}\ cm^{-2}s^{-1}$**

$1fb = 10^{-28}m^2$

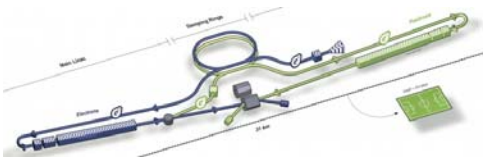
Die e+e- Projekte

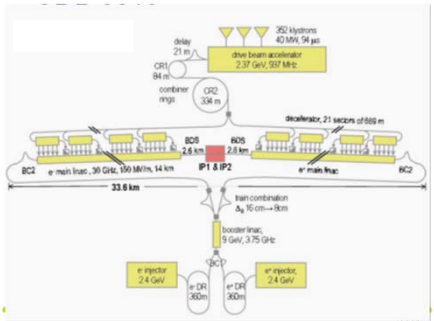
ILC (International Linear Collider)

- Supraleitender Beschleuniger
- 31.5 MV/m, 1.3 GHz
  E_{cm} = 500 GeV (1TeV)
- Technologie vorhanden
  (FLASH, XFEL)

CLIC (Compact Linear Collider)

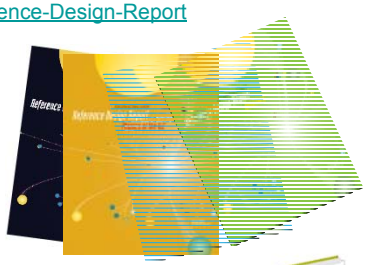
- Normalleitender Beschleuniger
- 2-Beam-Schema
- 100 MV/m, 12 GHz
  E_{cm} = 500 GeV – 3 TeV
- Noch in fundamentaler Entwicklungsphase





www.linearcollider.org

- ILC Reference Design Report (RDR), 2007:
  http://www.linearcollider.org/about/Publications/Reference-Design-Report
  - **Executive summary**
  - **Accelerator**
  - **Physics at the ILC**
  - **Detector**



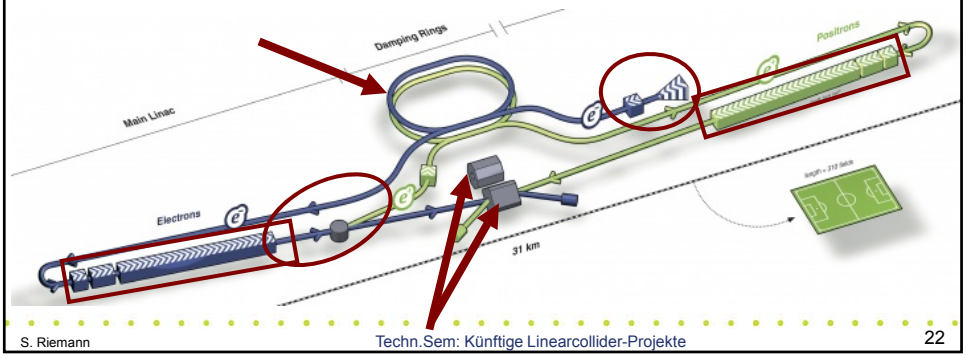
- ILC Interims Report (2011)
  http://ilcdoc.linearcollider.org/record/32863/files/ilc_interim_report_2011-lores.pdf

- Technical Design Report (TDR): Ende 2012/2013

ILC Layout

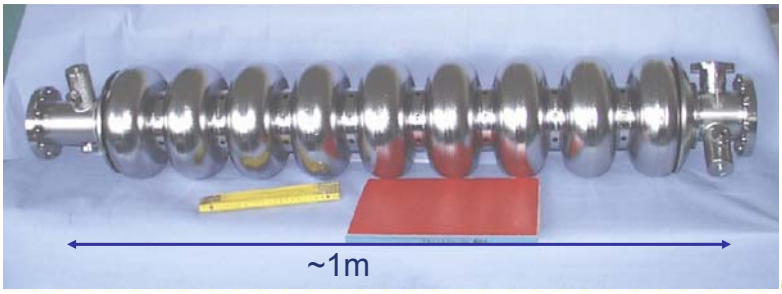
Energie wählbar von 200 – 500 GeV (upgrade bis 1TeV):

- Polarisierte Elektronenquelle P > 80%
- (Polarisierte) Positronenquelle (P > 30%)
- 2 Dämpfungsringe
- Main linacs: 16 000 supraleitende Kavitäten, 2000 Kryomodule, 31km
- 2 “push-pull” Detektoren
- mehr als 100 Labs beteiligt



ILC Arbeitspferde: Main Linacs

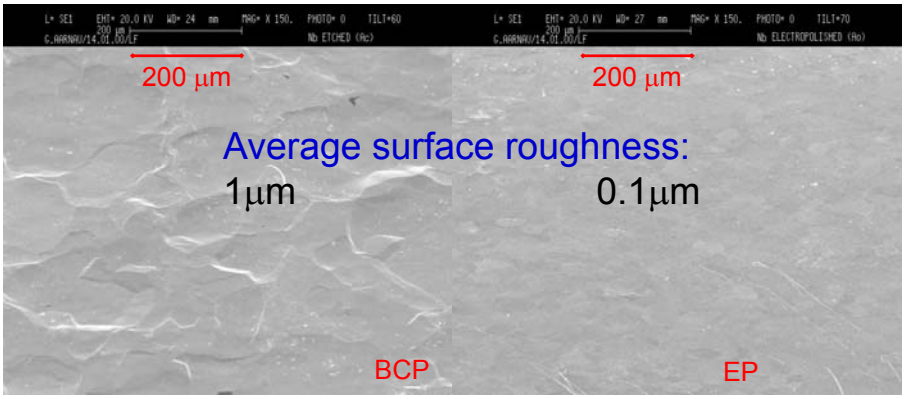
- supraleitende 9-cell Niobkavitäten (FLASH, XFEL)
  - **Betriebstemperatur: 2K**
- Beschleunigungsgradient:
  - **31.5MV/m (500GeV)**
  - **fundamentale Grenze bei 55 MV/m:**
    - Kavitäten werden normalleitend bei Gradienten oberhalb ~55MV/m



Gradient

Real: Limitierung aufgrund der Qualität der Oberflächen

Gradienten > 35 MV/m wurden erreicht nach “electro-polishing” der Oberfläche



etching - “buffered chemical polish“ electro-polishing

Die Güte Q

- Primäre HF Leistung → Teilchenstrahl
- **Kennzahl für Kavitäten: Güte Q**

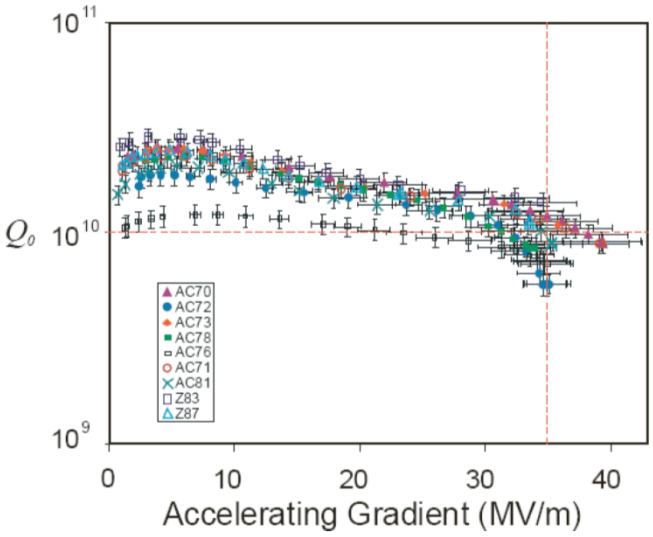
  Q ist ein Mass für die in der Kavität gespeicherte Energie dividiert durch den Energieverlust bei jeder Oszillation des elektrischen Beschleunigungsfeldes

$$Q = \frac{\text{gespeicherte Energie}}{\text{Energieverlust pro Zyklus}}$$

ILC Ziel: $Q = 10^{10}$

Eine Glocke (2000 Hz) mit $Q = 10^{10}$ würde nach einem Anstoss einige Monate klingen

Vor einigen Jahren….

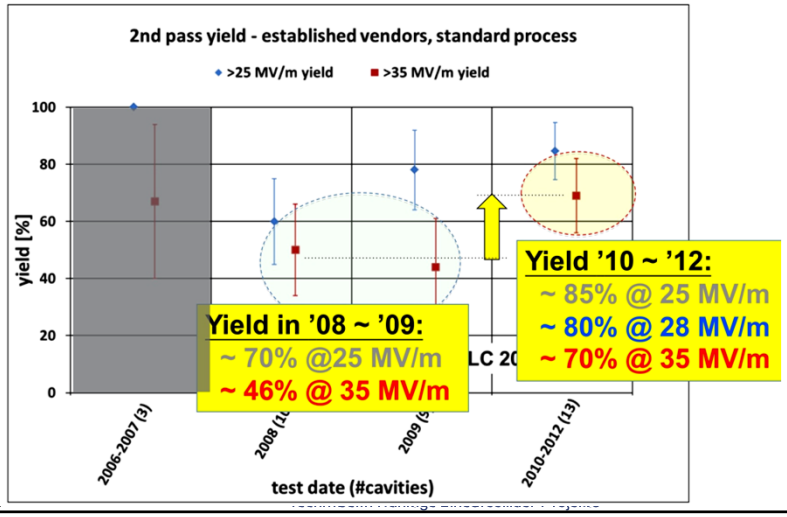


Produktion der Kavitäten

Industrialisierung: ILC braucht ~16 000 Kavitäten!

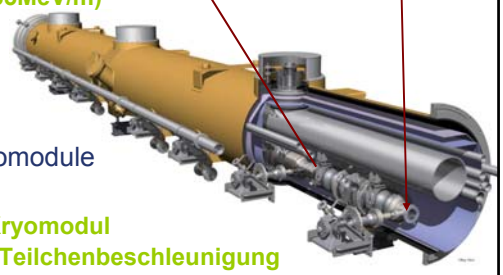
Ziel: 90% der Kavitäten mit Gradient ~35MV/m

[figure: ILC newsline, June 28, 2012]



Supraleitende RF (SCRF)

- **SCRF = Kostentreiber**
- 'High gradient' R&D Erfolge:
  - **Über 70% der 9-cell cavities haben einen Gradienten >35MeV/m**
  - **in einzelnen Kavitäten wurden 50 MV/m erreicht**
- Fokus: Massenproduction
  - **Bessere Ausbeute (90% mit 35MeV/m)**
  - **Reduktion der Kosten**

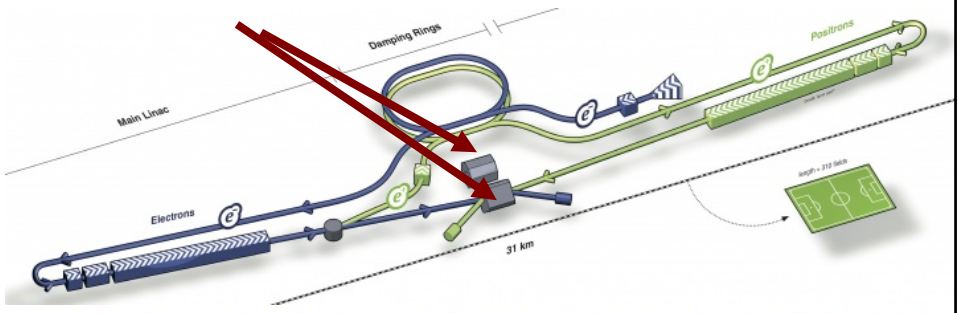


- Integration der Kavitäten in Kryomodule
- Test der Systeme
  - **Cavity String Test in einem Kryomodul**
  - **Kryomodul String Test - mit Teilchenbeschleunigung → FLASH**

ILC Layout

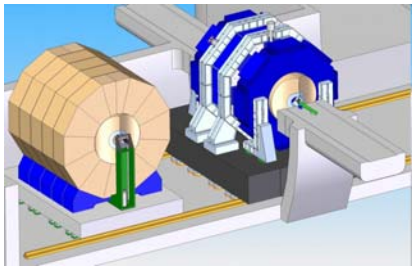
Energie wählbar von 200 – 500 GeV (upgrade bis 1TeV):

- Polarisierte Elektronenquelle P > 80%
- (Polarisierte) Positronenquelle (P > 30%)
- 2 Dämpfungsringe
- Main linacs: 16 000 supraleitende Kavitäten, 2000 Kryomodule, 31km
- 2 “push-pull” Detectoren
- mehr als 100 Labs beteiligt



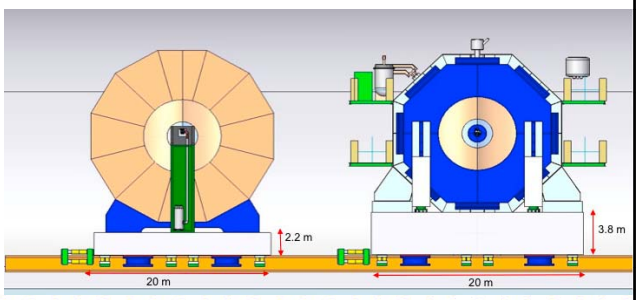
Detektoren und Wechselwirkungszone (IR)

- Erwünscht: 2 Experimente
- Bei Linearcollidern vergrössert sich die Luminosität (Zahl der Ereignisse) nicht mit der Zahl der Wechselwirkungszonen.
- ILC Proposal: Nur eine IR, aber 2 Detektoren: ILD and SiD

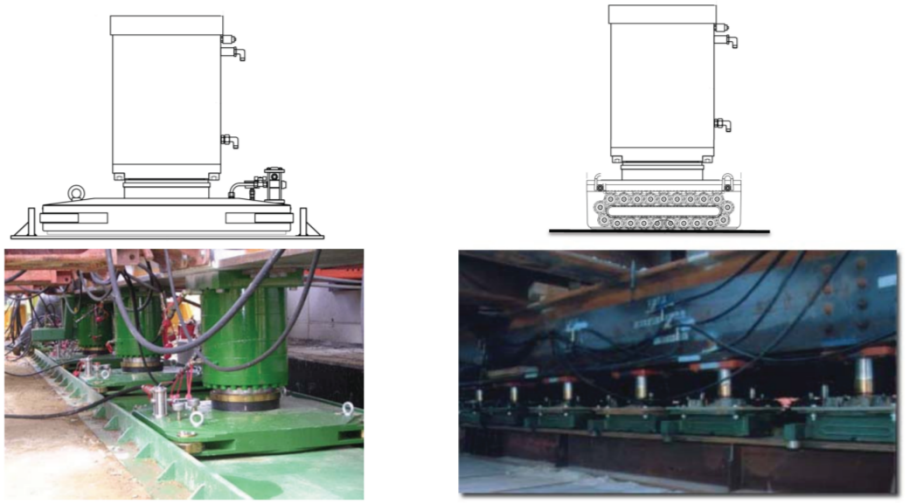


Lösung:

Push-Pull System, beide Detectoren befinden sich auf einer Plattform

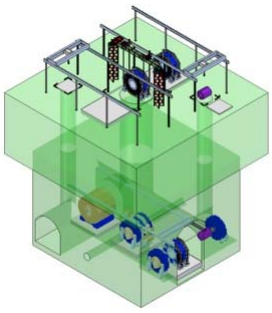


Platform Motion System



- Airpads (left) or rollers (right)

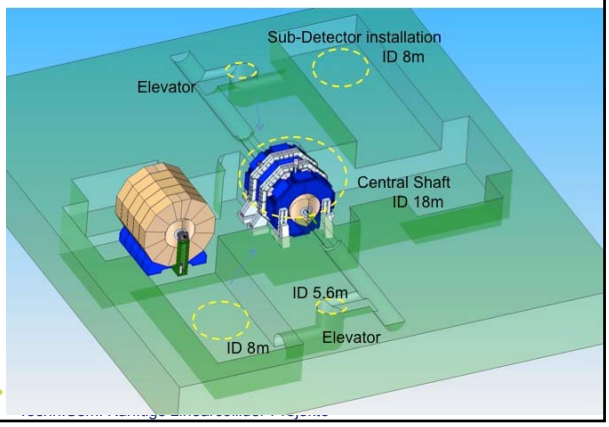
Push-pull Detektoren



Wenn der ILC nicht in einer Gebirgsregion gebaut wird: Ein Kran auf der Oberfläche transportiert die vormontierten Detektor-Komponenten in die darunter liegende Detektorhalle.

Z Form: ein Detektor befindet sich in Parkposition, der andere nimmt Daten.

Graphics: Marco Oriunno

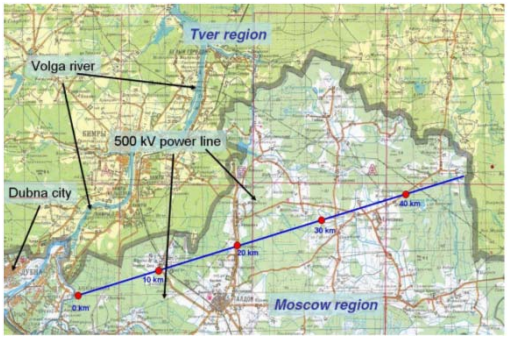


ILC – aber wo?

Betrachtet (technische Aspekte, Kosten):

- Deep sites:
  - **Americas: Fermilab**
  - **Asia: Japan**
  - **Europe: CERN**

Example: Dubna

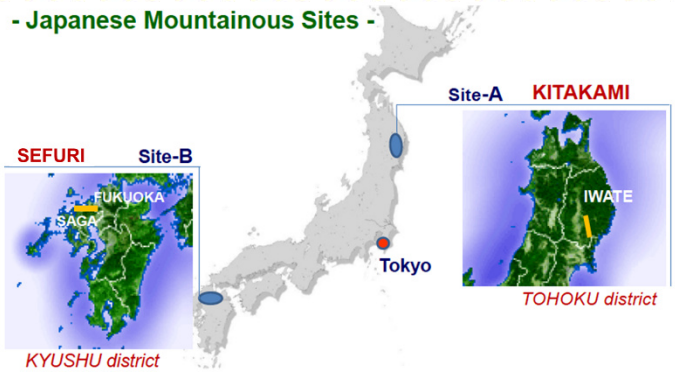


- Shallow sites:
  - **DESY**
  - **Dubna**

Die Standortfrage erfordert auch eine politische Entscheidung

ILC in Japan ??

- Japanese Mountainous Sites -



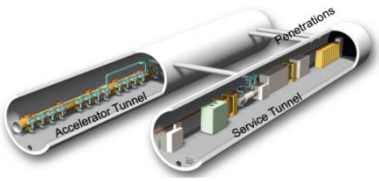
Beide Standort-'Kandidaten'

- **befinden sich in Bergregionen, geologisch geeignet zum Tunnelbau (stabiler Granitfels ohne aktiv tätige Vulkane)**
- **Gute Verkehrsanbindung sowie nahe Energieversorgung.**
- **Die lokalen Regierungen and Gemeinden sind kooperativ und unterstützen die Entwicklung dieser Standorte für ein mögliches ILC Projekt.**

ILC Tunnel Layout

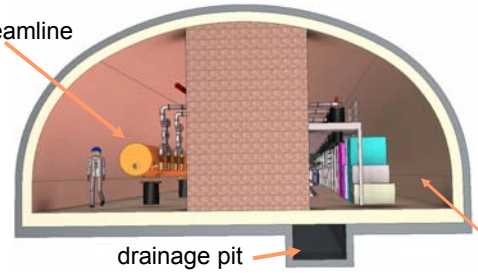
Reference Design (2007)

2 Tunnel (accelerator + service)



Design 2009

1 Tunnel ⇔ Kosten-reduktion



Design Japan, 2011

Kamaboko Tunnel (fishcake)

RF, Servicetunnel, …

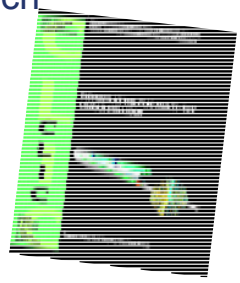
- ILC:
  - **Technical Design Report 2012 (einschliesslich Kostenschätzung)**
  - **ILC als Higgs-Fabrik wird ernsthaft diskutiert,**
    - 'Staged' ILC: Start mit einer Low-Energy Option zur Higgs-Produktion, dann Upgrade zu höheren Energien
    - Japan ist sehr interessiert, ILC Host zu werden
  - **Optimierung des Upgrades auf 1TeV ist 'under study'**
- Der ILC könnte gebaut werden (sofern das Finanzielle/Politische/… geklärt ist)

COMPACT LINEAR COLLIDER (CLIC)

- Kollisionsenergie E_{cm} = 500 GeV - 3 TeV
  - **Beschleunigungsgradient: >100 MV/m**
  - **"Compact" Collider: Gesamtlänge ~50 km bei 3TeV**
- L ~ einige 10^{34} $cm^{-2}s^{-1}$
- Generell: E_{cm} und L werden letztendlich von den LHC-Resultaten abhängen
- Gesamter Energieverbrauch sollte <500MW sein
  - **LEP in 1998: ~240 MW**

The Compact Linear Collider (CLIC)

Entwicklung einer Technologie fuer e-/e+ Linear-colliders im **Multi-TeV** Energiebereich
- http://clic-study.org/

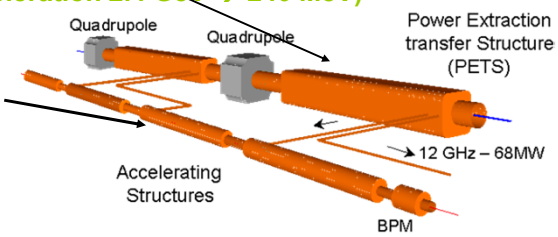


Physikalische Motivation:
- **"Physics at the CLIC Multi-TeV Linear Collider" by CLIC Physics Working Group: CERN 2004-5**

CLIC Conceptual Design Report 2012
- **In Arbeit, teilweise bereits fertig**
- **Enthält Accelerator (Vol 1) and Physik + Detektor (Vol 2)**

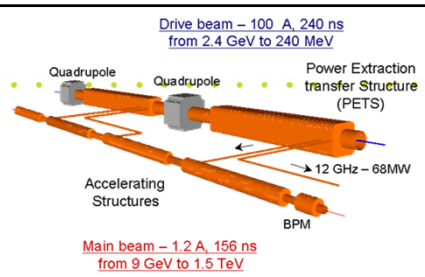
CLIC: Two beam scheme

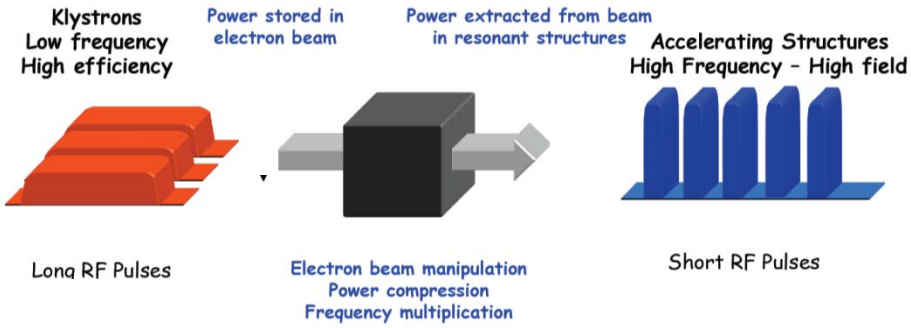
- Ein e- Drive Beam stellt HF Power zur Verfügung
  - **12 GHz Bunchstruktur**
  - **niedrige Energie (Deceleration 2.4 GeV → 240 MeV)**
  - **hoher Strom (100A)**
- Main Beam für Physik
  - **hohe Energie (9 GeV → 1.5 TeV)**
  - **Strom 1.2 A**



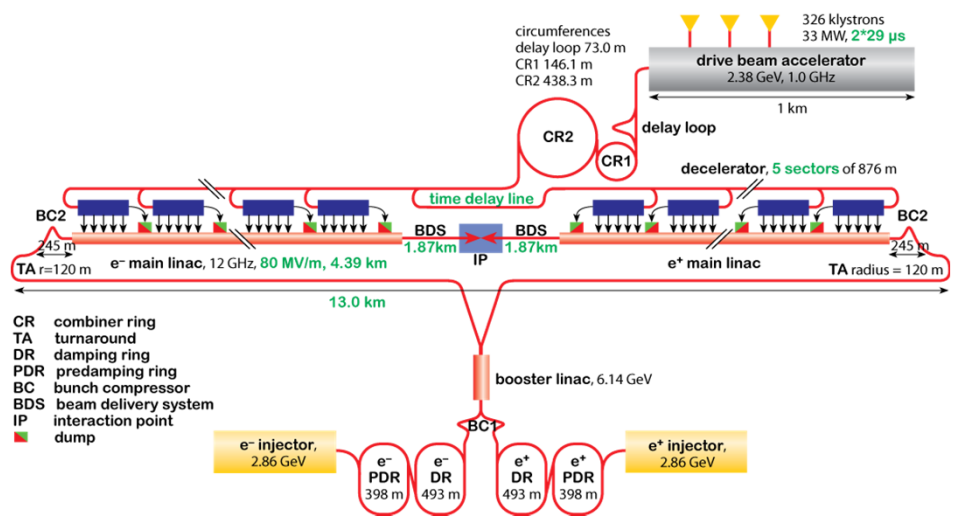
- PETS
  - **extrahieren Power vom Drive Beam**
  - **Transfer zu Beschleunigungsstrukturen des Main Beams**
- es gibt keine HF Power-Versorgung wie beim ILC (“CLIC itself is a 50km long klystron”)

CLIC scheme

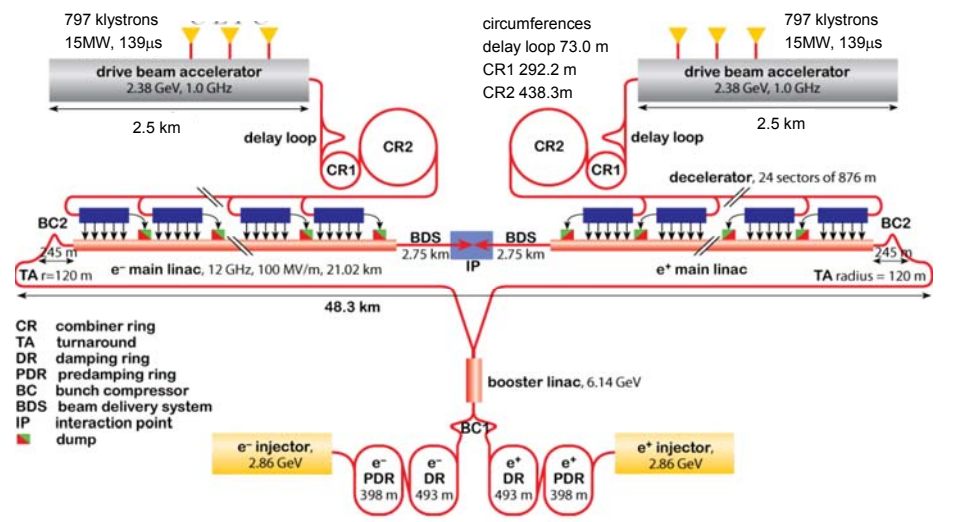




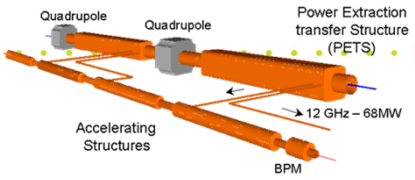
CLIC Layout 500 GeV (not to scale)

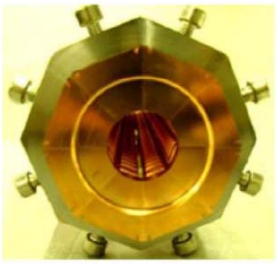


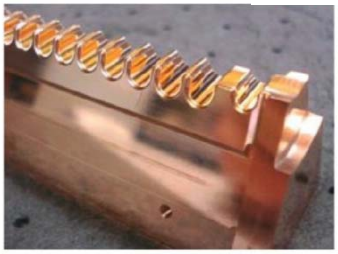
CLIC Layout 3TeV (not to scale)

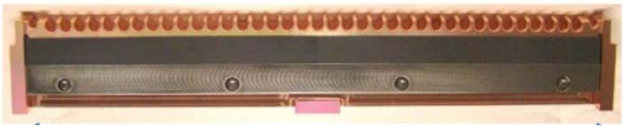


PETS





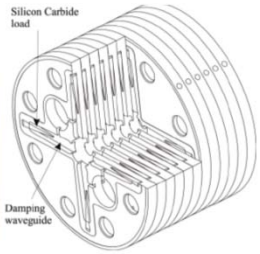


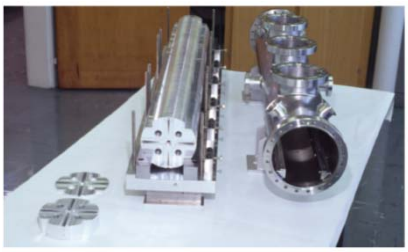


25cm

CLIC Beschleunigungsstrukturen

- Strukturen bestehen aus Scheiben



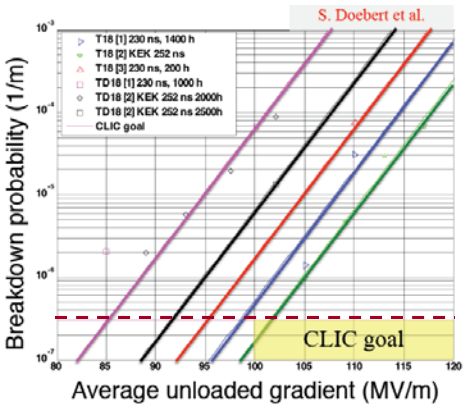


ILC/CLIC parameters

	ILC 500 GeV	CLIC 500 GeV	CLIC 3 TeV
Lumi [$10^{34}cm^{-2}s^{-1}$]	2	2.3	5.9
Repetition rate [Hz]	5	50	
Bunch separation [ns]	370	0.5	
Beam pulse duration	950µs	177ns	156ns
Beam size [nm] horizontal / vertical	~474 / 6	200 / 2.3	40 / 1.0
Power consumption [MW]	230	240	560

Nominelle Parameter für CLIC Strukturen wurden erreicht

Beispiel einer erfolgreichen Zusammenarbeit:
Design@CERN, Bau/Tests @KEK, SLAC



CLIC:

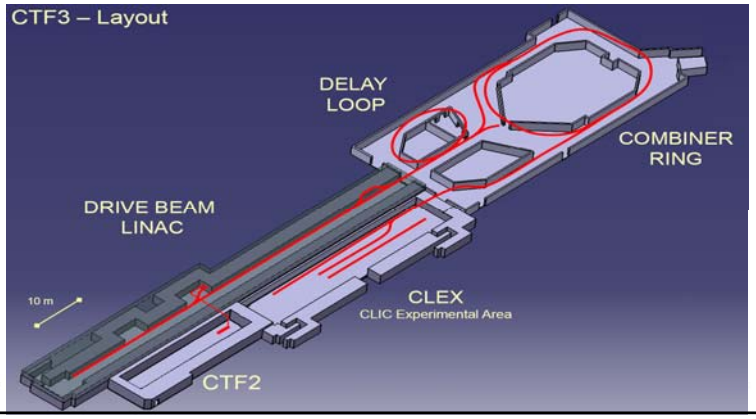
Breakdown Rate als Fkt. des Gradienten

Ziel: 100MV/m,
Breakdown Rate < 10^{-7}

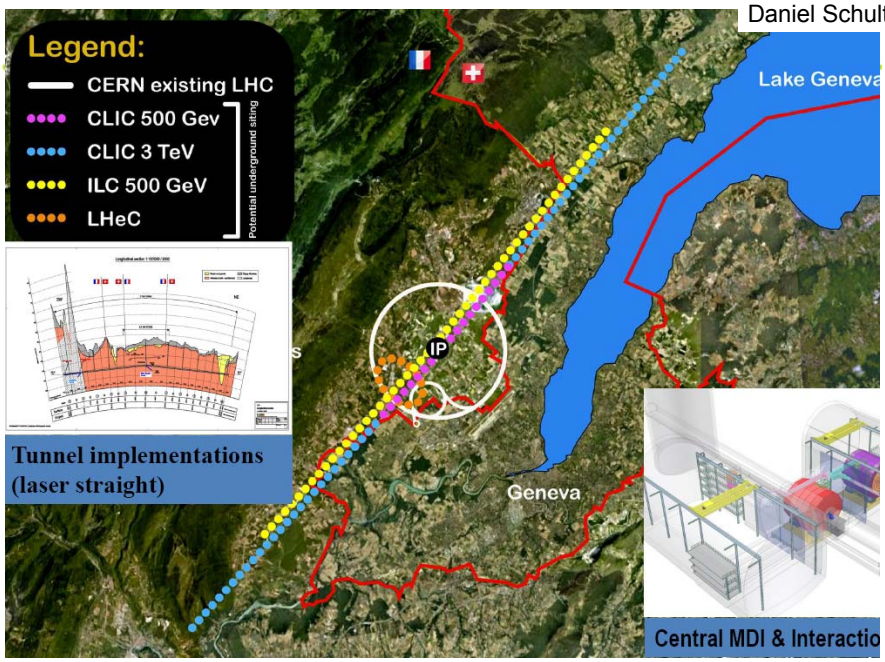
CLIC Test Facility (CTF3)

Zur Entwicklung der wesentlichen CLIC Technologien: CTF3

- **Erzeugung des Drive Beam (Beschleunigung, Bunch-Frequenz-Vervielfachung)**
- **CLIC Beschleunigungs-Strukturen**
- **CLIC Power Extraction and Transfer Structures (PETS)**

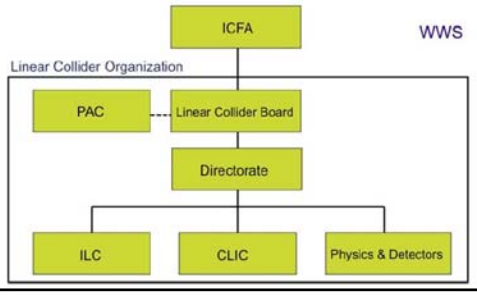
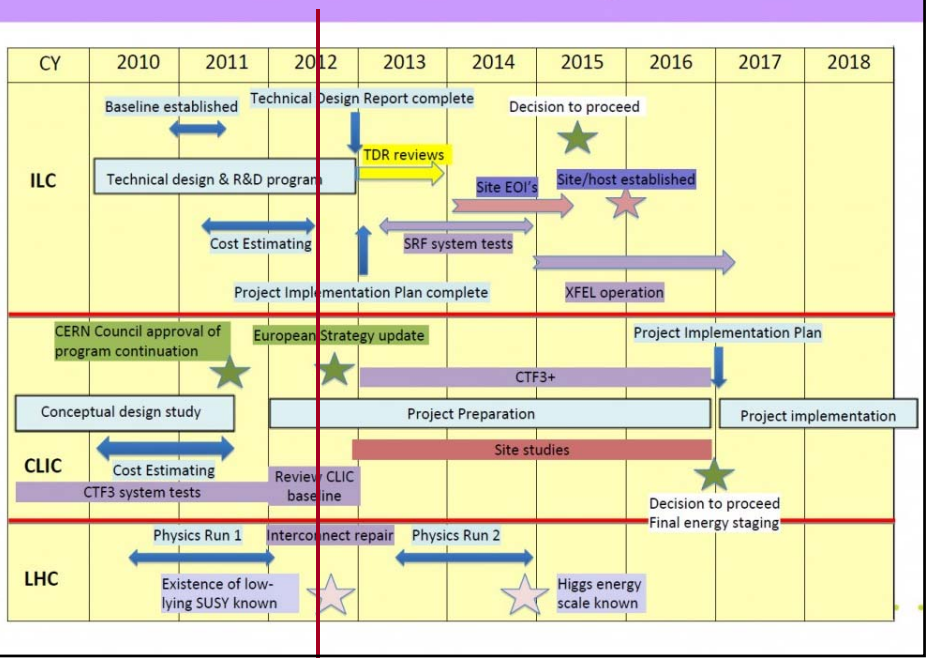


Daniel Schulte



Zusammenfassung

- Die SC Technologie für den ILC ist entwickelt und getestet; der ILC könnte gebaut werden.
  - **Higgs-Factory @ Japan ?**
- ILC Technical Design Report 2012
- CLIC Conceptual Design Report 2012 (500GeV-3TeV)
- Es gibt eine Zusammenarbeit der ILC und CLIC Kollaborationen
  - **Beschleunigerkomponenten (Teilchenquellen, Dämpfungsringe, Wechselwirkungszone – push/pull)**
  - **Detektoren**
  - **Physikpotential**
- weltweite Linear Collider Organization (WWS)



CLIC & ILC roadmaps