

# Zukünftige Beschleunigeranlagen - für die Teilchenphysik und darüber hinaus.

Sabine Riemann  
Technisches Seminar, DESY, Zeuthen, 31. 3. 2015



Beschleuniger | Forschung mit Photonen | Teilchenphysik  
Deutsches Elektronen-Synchrotron  
Ein Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft



## Inhalt

- > Welche Anlagen werden gewünscht?
  - Collider für die Teilchenphysik
- > Hadron-Hadron Maschinen
  - LHC & Upgrade
- > e+e- Linearcollider
- > Künftige Ringcollider
  - Proton-Proton Collider
  - e+e- Collider
  - $\mu^+\mu^-$  Collider
- > Plasmabeschleunigung
- > Zusammenfassung

Mehr Details siehe auch Brian Foster's Talk im Colloquium, DESY  
Zeuthen, am 26.11. 2014



## Welche Anlagen werden gebraucht?

### > Teilchenphysik

- Test des Standardmodells, insbesondere des Higgs Mechanismus
- Gibt es weitere, bisher unbekannte Teilchen ?
- Wie erklärt man die Materie-Antimaterie Asymmetrie
- Was ist 'Dunkle Materie' ?
- Gibt es neben Gravitation, elektromagnetischer, starker und schwacher Kraft weitere Kräfte?

### > Angewandte Physik, Lebenswissenschaften etc:

- Anlagen, die hohe örtliche und zeitliche Auflösung verschiedenster Prozesse in Physik, Chemie, Biologie, Medizin erlauben

### > Wichtige Randbedingung: Kosten (sowohl für den Bau als auch für den Betrieb der Anlagen)

Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 3



## Collider für die Teilchenphysik



### > hohe Energie ⇔ hohes Auflösungsvermögen

### > Zählrate N: $N = L \sigma = \text{Luminosität} \times \text{Wirkungsquerschnitt}$

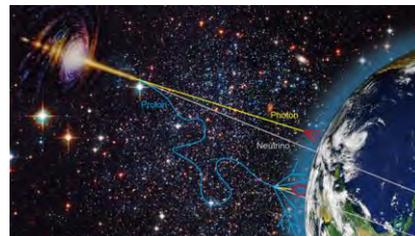
- Wirkungsquerschnitt  $\sigma$  ist durch den physikalischen Prozess bestimmt, aber:  $\sigma \sim 1/E^2$

→ bei hohen Energien braucht man **hohe Luminosität**

### > Exzellente Teilchenidentifikation (Detektor)

### > Kosmische Beschleuniger?

- Energien bis von 100TeV und mehr
- Aber: wir kontrollieren weder die Anfangsbedingungen der Reaktionen noch die Luminosität
- Werden noch erforscht.



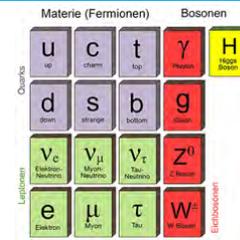
Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 4



## Einige Projekte der Teilchenphysik

### Energie-Grenze

- > **Hadron-Maschinen, höchste Energien**  
(Hadronen sind Teilchen, die aus Quarks bestehen, z.B. Protonen)
  - Tevatron, Proton-Antiproton Kollisionen (abgeschlossen)
  - LHC, Proton-Proton Kollisionen
  - HERA, Elektron (Positron)-Proton Kollisionen (abgeschlossen)
- > **Lepton-Maschinen (hohe Energien, hohe Präzision)**  
(Leptonen sind elementare Teilchen, z.B. Elektronen und Positronen, Myonen)
  - SLC, e+e- (abgeschlossen)
  - LEP, e+e- (abgeschlossen)
  - ILC, CLIC; e+e- Projekte
  - Myon-Collider,  $\mu+\mu$ - Kollisionen, Projekt für die Zukunft



### Höchste Präzision (relativ niedrige Energien)

- > **B-Fabriken**
  - SuperKEKB, e+e- Kollisionen bei  $\sim 10.6\text{GeV}$

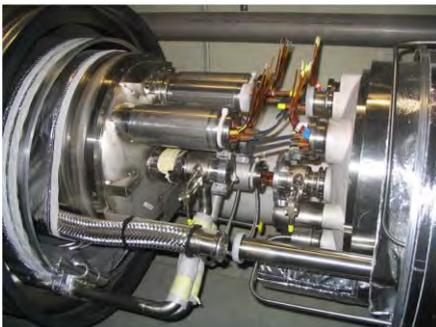
Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 5



## Der Large Hadron Collider LHC

Proton-Proton-Collider  
LHC – technische Meisterleistung,  
Mit 27 km größtes Instrument  
mit bester High-Tech Ausstattung

Details siehe  
[home.web.cern.ch/topics/large-hadron-collider](http://home.web.cern.ch/topics/large-hadron-collider) und  
[www.lhc-facts.ch/](http://www.lhc-facts.ch/)

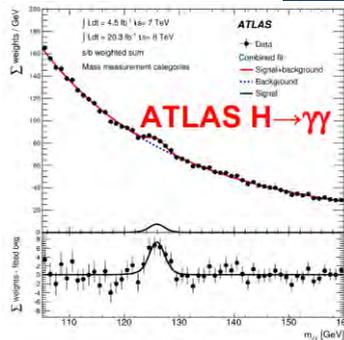
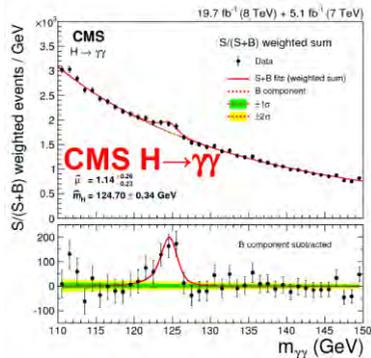


## Higgs Boson

### Masse des Higgs-Bosons

(ATLAS+CMS combination, Moriond 2015):

$$m_H = 125.09 \pm 0.24 \text{ GeV}$$



Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 7



## Und nun – Physik für LHC Run 2

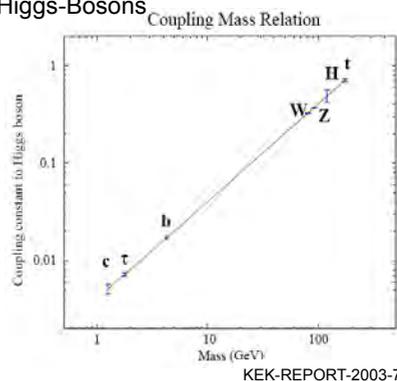
- Ist das am LHC beobachtete Teilchen wirklich 'Das Standardmodell-Higgs-Boson' ?

- 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**

- Test des Standardmodells

- Physik jenseits des Standardmodells



Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 8



## LHC Parameter @ Run 1

	2011	2012	Design-Wert
Strahlenergie [TeV]	3.5	4	7
Bunch Abstand [ns]	75/50	50	25
Max. Anzahl von Bunchen	1380	1380	2808
Max Zahl der Protonen per Bunch	$1.45 \times 10^{11}$	$1.7 \times 10^{11}$	$1.15 \times 10^{11}$
Peak-Luminosität [ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	$3.7 \times 10^{33}$	$7.7 \times 10^{33}$	$1 \times 10^{34}$

Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 9



## LHC Run 2

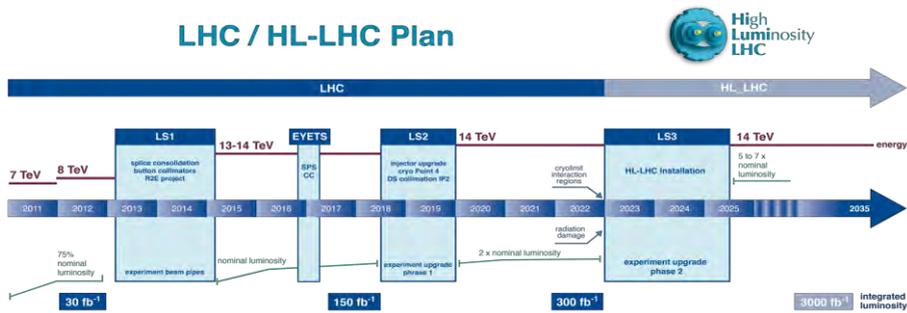
- > LHC Shutdown 2013 – 2015
  - Austausch einiger supraleitender Magnete
  - Bessere Sicherung von über 10.000 elektrischen Verbindungen und supraleitenden Magneten gegen mögliche Fehler
  - Kollimatoren (Schutz, auch bei Strahlverlust)
  - R2E Projekt (Radiation to Electronics)
    - Fehler-Risiko an der Elektronik aufgrund des hohen Strahlungsniveaus  $\Leftrightarrow$  Abschirmung
- > Restart März 2015 (Protonstrahl erwartet am 25. 3., aber Verzögerung)
- > Erste Kollisionen: Anfang Juni 2015
- > **Energie:  $2 \times 6.5\text{TeV} = 13\text{TeV}$ , d.h. die Energie wird ~verdoppelt im Vergleich zu Run 1**
- > **Luminosität soll Designwert erreichen ( $10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$ )**
  - die Protonenpakete enthalten 30% weniger Protonen, folgen dafür aber doppelt so häufig aufeinander (25ns Bunchabstand nach einer Periode mit 50ns Bunchabstand)
- > 2015: 100 Tage Proton-Proton-Kollisionen

Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 10



## HL-LHC (High Luminosity LHC)

- > Deutlich besseres Entdeckungspotenzial, wenn die Luminosität (also die Rate der Kollisionen) weiter um einen Faktor 10 erhöht wird, d.h. vom 'nominalen' Wert  $300\text{fb}^{-1}$  auf  $3000\text{fb}^{-1}$



LS = Long Shutdown  
Eyets = extended year end technical stop

Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 11



## HL-LHC (High Luminosity LHC)

- > Luminosität

$$L \sim \frac{n_{\text{bunch}} N_p^2 f_{\text{rep}}}{\sigma_x \sigma_y}$$



Anzahl der Teilchen-Kollisionen proportional zu

- Wiederholffrequenz  $f_{\text{rep}}$
- Zahl der Bunche,  $n_{\text{bunch}}$
- Zahl der Teilchen im Strahl,  $N_p$ ,
- Strahlquerschnitt  $\sigma$

→ Luminosität gibt Zahl der Teilchenkollisionen pro Querschnitt und Zeit an

- > Wie kann man die Luminosität erhöhen?

- Mehr Protonen  $N_p$  pro Bunch
- Kleinerer Strahlquerschnitt  $\sigma$
- Mehr Bunche  $n_{\text{bunch}}$  im Umlauf (→ kürzere Bunchabstände)
- Bessere Kollision durch 'Ausrichten' der Bunche (crab cavities)

Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 12



## High-Luminosity Upgrade (HL-LHC)

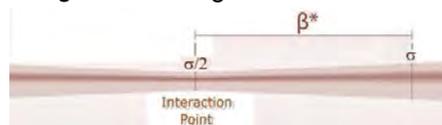
- > LHC Upgrade ist kompliziert und wird eine Dekade dauern
- > innovative Technologien werden entwickelt und eingesetzt
  - HiLumi Design Study (teilweise EU finanziert): Start November 2011
  - Final Report geplant im August 2015
- > Grosse Luminosität erreicht durch
  - Reduzierung der Strahlgrösse am Kollisionspunkt
    - spezielle Magnete und neues Schema, um den Strahl zu komprimieren
  - Kavitaeten zur Verbesserung der 'Strahlüberlappung'
- > Konsequenzen der hohen Wechselwirkungsrate für den Detektor, die Maschine, die Strahldynamik
  - Kollimatoren zum Schutz der supraleitenden Magneten vor den ~500MJ, die im Strahl 'gespeichert' sind
  - Detektoren müssen Ereignisse noch auflösen können
  - ...

Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 13



## Strahlfokussierung am Wechselwirkungspunkt

- > **Beta:** Amplitudenfunktion des Strahls, sie ist bestimmt durch die Konfiguration der Magnete (Quadrupole)
 
$$\beta = \pi \cdot \sigma^2 / \varepsilon \quad (\varepsilon = \text{Emittance})$$
- > **Beta\*** ( $\beta^*$ ) ist die Amplitudenfunktion am Wechselwirkungspunkt; sie sollte so klein wie *möglich* sein  $\rightarrow$  große Luminosität



$$L \sim \frac{n_{\text{bunch}} N_p^2}{4\pi\sigma^2} f_{\text{rep}} = \frac{n_{\text{bunch}} N_p^2}{4\varepsilon\beta^*} f_{\text{rep}}$$

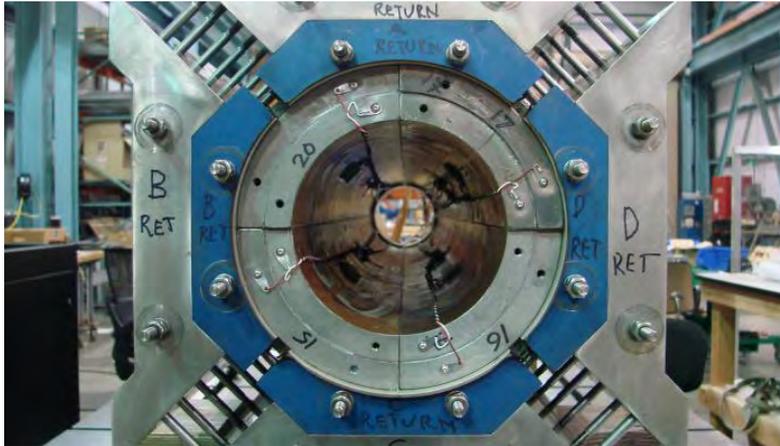
- > **Ziel:  $\beta^*$  von 55cm auf ~15cm reduzieren**
  - Neue Magneten: mit relativ großer Apertur, Nb<sub>3</sub>Sn; 13Tesla

Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 14



## LHC Technologie

Neue Nb<sub>3</sub>Sn Magneten (Quadrupole) mit großer Apertur, erfolgreich getestet in US (2013)

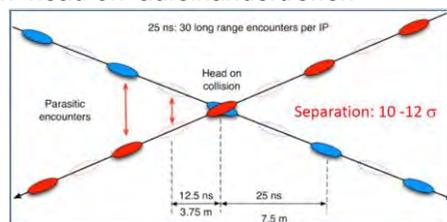


Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 15

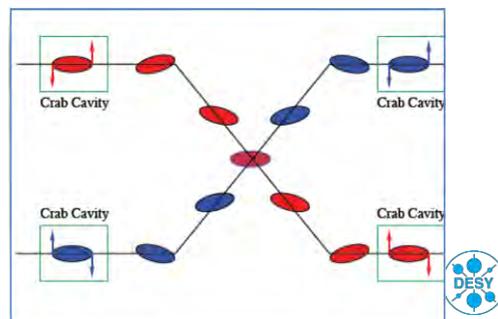


## Winkel der Strahlen im Wechselwirkungsbereich

- > Größte Luminosität, wenn Strahlen 'head on' aufeinandertreffen
- > Kreuzungswinkel  $> 0$  notwendig, um parasitäre Kollisionen zu vermeiden



- > 'Crab cavities' zur Kompensation des Kreuzungswinkels



## High-Luminosity-LHC (HL-LHC)

**Ziel: 3 - 4 fb<sup>-1</sup>/Tag (250 to 300 fb<sup>-1</sup>/Jahr) ⇔ Faktor 10 höhere Lumi**

> Verbesserungen an der Injektor-Kette

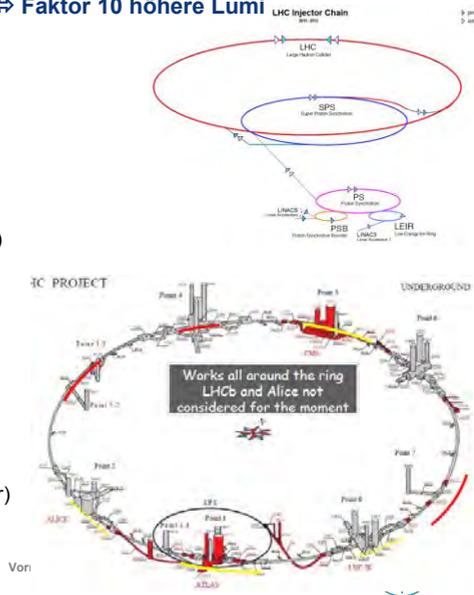
- Linac 4 - PS booster
- PS
- SPS

> Verbesserungen am LHC Ring

- Neue IR-Quadrupole Nb<sub>3</sub>Sn (inner triplets)
- Neue 11 T Nb<sub>3</sub>Sn (short) Dipole
- Crab-Kavitäten
- Upgrade der Kollimatoren
- Upgrade Kühlung
- Machine protection
- ...

+ Detektor upgrade

(s.a. Vortrag von Ingo Bloch im Techn. Seminar)



## LHC Zukunft

> Laufzeit voraussichtlich bis 2030(+)

> 2018: längere Umrüstungsphase von etwa 18 Monaten geplant für das High-Lumi Upgrade

- Einsetzen neuer Quadrupole zur besseren Fokussierung des Teilchenstrahls
- Prototypen sind bereits heute in Konstruktion
- spezielle Kavitäten, sogenannte Crab Cavities, zur Drehung der länglichen Teilchenpakete kurz vor dem Wechselwirkungspunkt, damit beste geometrische Durchdringung erreicht
- Upgrade der inneren Detektoren von ALICE, CMS und LHCb, um eine höhere Auflösung zu erhalten

> fernere Zukunft: weitere Verbesserungen, die u.a. von den bis dahin gemachten Entdeckungen abhängen.

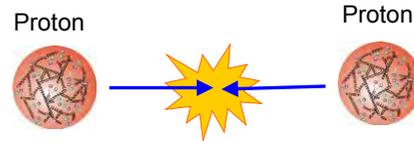
1. Umrüstung des LHC auf noch höhere Energien (High Energy LHC): Schwerpunktsenergie 33 TeV
  - Feldstärke sämtlicher Dipolmagnete müsste von gegenwärtig 8,3 Tesla auf 20 Tesla erhöht werden
  - neuartige Quadrupole einsetzen
  - Allerdings geringere Luminosität, da nur noch halb so viele Teilchenpakete beschleunigt werden könnten.
2. weitere Erhöhungen der Luminosität ohne Erhöhung der Energie
3. Umrüstung zu einem *Hadron-Electron-Collider* wäre möglich

Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 18



## Elektron-Positron oder Proton-Proton Kollisionen ?

- > Hadronen sind NICHT elementar, bestehen aus Quarks



- > Elektronen, Positronen sind elementare Teilchen

- Energie ist wohl definiert
- Energie kann präzise gewählt werden
- Ereignisse sind voll rekonstruierbar



- ➔ Beste Aussichten für Präzisionsmessung bei hohen Energien

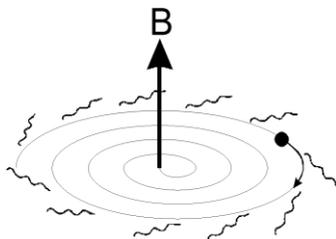
Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 19



## Warum Linearbeschleuniger ?

Synchrotronstrahlung

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



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

**LEP ( $R_{\text{eff}} = 3.1\text{km}$ ):**

(e+e- Beschleuniger am CERN, 1989-2000)

$E_{\text{beam}} = 50\text{ GeV}$ :

$\Delta E/E \sim 0.4\%$

$\Delta E/t \sim 2\text{ TeV/s}$

$E_{\text{beam}} = 100\text{ GeV}$ :

$\Delta E/E \sim 4\%$

$\Delta E/t \sim 33\text{ TeV/s !!!}$



Energieverlust muss mit RF System kompensiert werden!

Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 20



$e^\pm$  Ringbeschleuniger für sehr hohe Energien sind nicht effektiv

### $e^+e^-$ Speicherringe

- Beschleunigung und Kollision bei jedem Umlauf  
→ Mehrfachnutzung der Beschleunigerstrukturen  
→ Mehrfachnutzung des Teilchenstrahls
- **effizient**
- Synchrotronstrahlung
  - Hohe Magnetfeldstärken bei hohen Energien  $\leftrightarrow$  Radius des Rings

### $e^+e^-$ Linearcollider

- Einweg-Beschleunigung
- Einmal-Kollisionen
- keine Ablenkmagnete nötig, aber viele RF Strukturen  
→ Hoher Beschleunigungsgradient nötig, um die Länge der Maschine zu begrenzen
- Kaum Synchrotronstrahlung
- Keine Ablenkmagnete für Kreisbahn

**Projekte: ILC, CLIC**

Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 21



## Projekt International Linear Collider (ILC)

**Elektron-Positron Kollisionen**  
**Schwerpunktenergie von 250 GeV bis 1TeV**



## Supraleitende RF Linac Technologie



- Kavitäten aus Niob
- 9 Zellen
- Arbeitstemperatur 2K (flüssiges He)
- Gradient 35 MV/m
- $Q_0 \geq 10^{10}$

1.3 GHz Nb 9-cell Cavities	16,024
Cryomodules	1,855
SC quadrupole package	673
10 MW Multi-Beam Klystrons & modulators	436 / 471*

\* stadortabhaengig

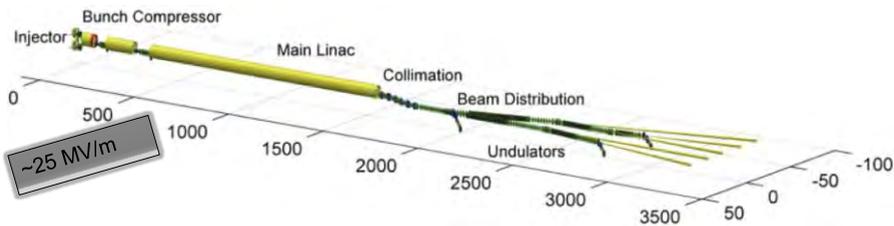
Ca. 20 Jahre weltweite Entwicklungsarbeit → Technologie ist ausgereift



Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 23



## European XFEL @ DESY



Bisher größter Einsatz dieser Technologie

- 100 Cryomodule
- 800 Kavitäten
- Energie des e-Strahls: 17.5 GeV

XFEL ist der ultimative Systemtest fuer den ILC.  
Inbetriebnahme mit Strahl beginnt 2016

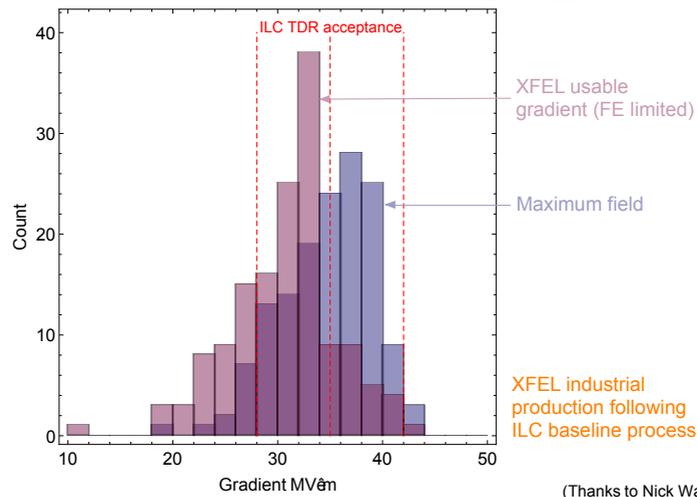
Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 24



## Industrielle Fertigung - XFEL

European  
XFEL

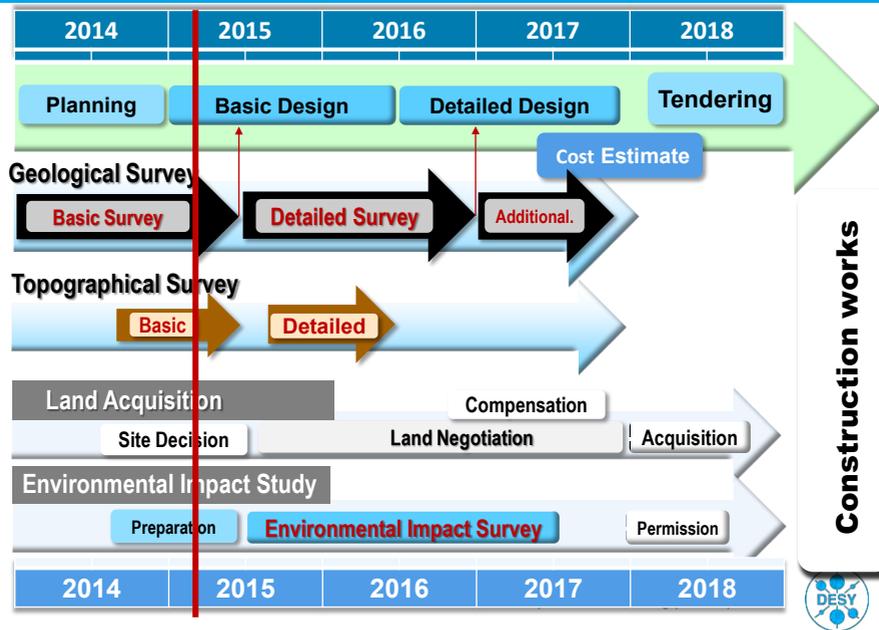
ENLIGHTENING SCIENCE



## ILC in Japan: Die Wechselwirkungszone von oben

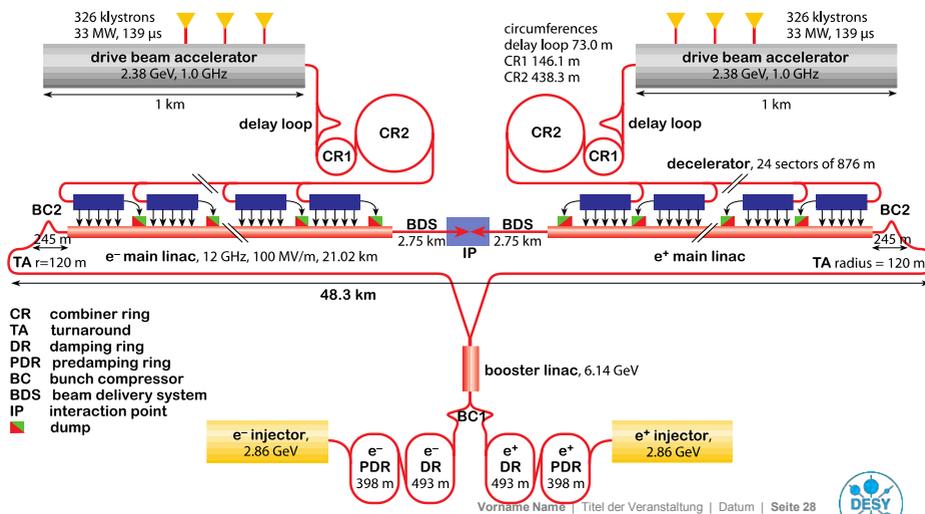


## Arbeitsplan (Standortabhängig)



## Compact Linear Collider (CLIC)

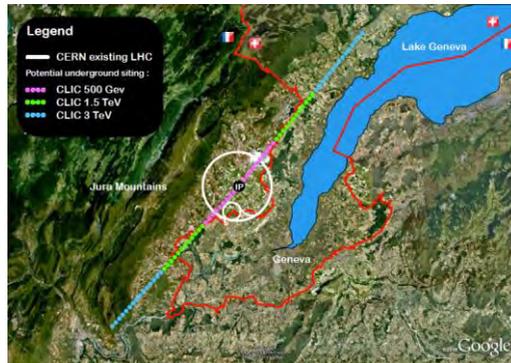
Elektron-Positron Kollisionen  
Schwerpunktenergie von 500 GeV bis 3TeV



## CLIC Status

### > Design-Konzept ist fertig

- Physikpotenzial
- Detektor
- Maschine ('staged approach', d.h. 500GeV...3TeV)
- Zeitplan
- Kosten
- Leistungsverbrauch
- Standort



Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 29



## Zukünftige Ringcollider (Future Circular Collider FCC)

### > Künftige Ringcollider mit größerem Umfang?

- Proton-Proton (pp)
- Elektron-Proton (ep)
- Elektron-Positron (ee)

### > Option pp

- Schwerpunktenergie  $\approx 40 - 100 \text{ TeV}$
- Basierend auf bekannter Technik, d.h. Magneten mit Feldstärke wie beim LHC, bräuchte man einen Ring mit ca. 80km Umfang für  $\sim 40 \text{ TeV}$
- Stärkere Magnete erlauben höhere Energien

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

### > Option e+e-

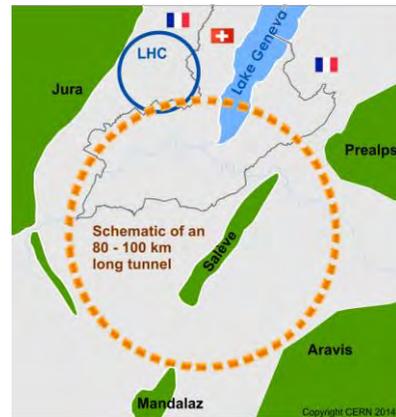
- Für Synchrotronverluste prozentual nicht wesentlich größer als bei LEP2  $\Leftrightarrow$  Schwerpunktenergie nur bis 250GeV ( evtl. 350GeV, Top-Quark-Paarproduktion )
- Physik:
  - Higgs-Physik bei niedrigen Energien
  - neue Physik wie am ILC oder CLIC mit hohen Energien ist ausgeschlossen
  - Aber: Z-Boson Fabrik – LEP mit wesentlich höherer Präzision (TLEP)
  - Präzisionstest des Standardmodells

Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 30



## FCC Überblick

- > FCC Hadron-Hadron Collider (pp) mit 100TeV Schwerpunktenergie
  - Dipol:  $\sim 16\text{ T} \Leftrightarrow 100\text{ TeV pp}$  bei 100 km Umfang
  - Dipol:  $\sim 20\text{ T} \Leftrightarrow 100\text{ TeV pp}$  bei 80 km Umfang
- > FCC Elektron-Positron Collider als potentieller 'Zwischenschritt'
- > FCC Elektron-Hadron (ep) Option
- > Erstes Layout entwickelt (verschiedene Ringradien werden betrachtet)
  - Kosten werden maßgeblich von Ablenkmagneten in den Kreisbogensektionen bestimmt
- > Internationale Kollaboration existiert
- > Standsortstudien für Genfer Region sind in Arbeit
- > Conceptual Design Report für EU Update in 2018



Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 31



## FCC Synchrotronstrahlung und Machine Protection

- > Bei 100 TeV ist Synchrotronstrahlung auch für Protonen relevant:
  - ↳ Insgesamt 5 MW (zum Vgl.: LHC 7kW) → muss 'entsorgt' (gekühlt) werden
- > 8GJ kinetische Energie pro Strahl
  - Entspricht Airbus A380 mit 720km/h
  - 24mal größer als beim LHC mit 14TeV
  - Kann 12t Cu schmelzen (oder 300m langes Loch bohren)
  - Machine protection
- > Auch kleine Verluste sind wichtig.
  - Z.B. Beam-Gas Streuung, nicht-lineare Dynamik
  - können zum Quenchen der Ablenkmagneten (supraleitend) führen
  - Background fuer die Experimente
    - Gesamte Leistung durch Background Ereignisse: 100kW pro Experiment (~Automotor)
    - Bereits problematisch am LHC und HL-LHC (Erwärmung, Lebensdauer)
  - Aktivierung der Maschine
  - Kollimationssystem

Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 32



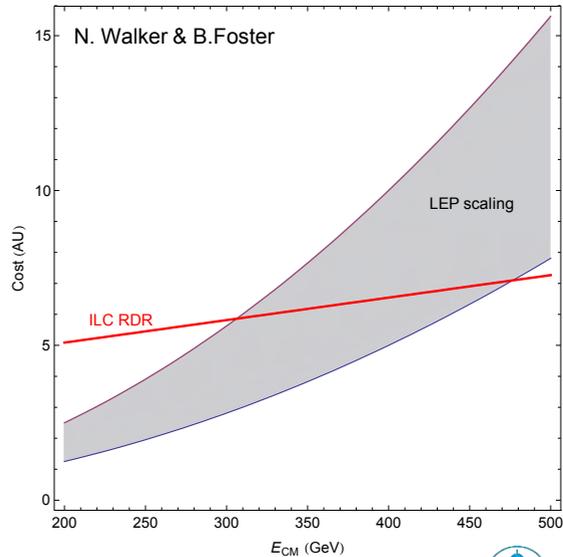
## Kosten: e+e- Ringcollider vs. e+e- Linearcollider

Grobe Abschätzung

$$\text{Cost} = aE^4/R + bR$$

mit a,b "fixed" auf der Basis von LEP.  
(optimistisch und pessimistisch)

Aber – Luminosität in Ringcollidern sinkt erheblich mit steigender Energie  $E_{\text{cm}}$



Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 33



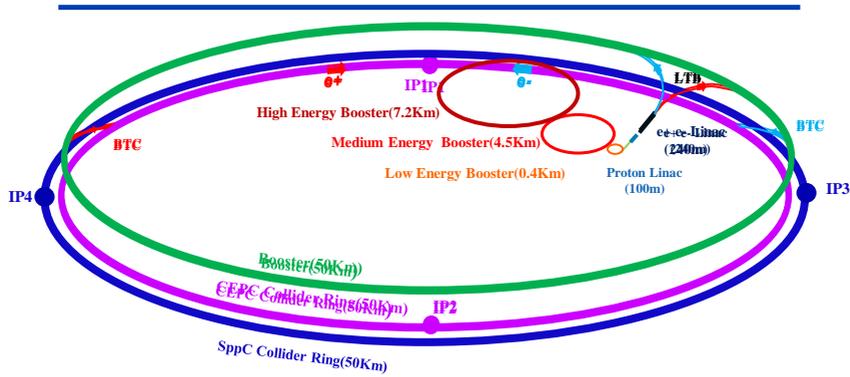
## Plan in China: CEPC & SppC

- > CEPC = Circular Electron Positron Collider
  - Schwerpunktenergie 240GeV
- > SppC = Super Proton-Proton Collider
  - Schwerpunktenergie 50-100TeV
- > Mehr Details siehe <http://cepc.ihep.ac.cn/>

Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 34



## Plan in China: CEPC & SppC Layout



LTB : Linac to Booster  
 BTC : Booster to Collider Ring

(J. Gao)

Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 35



## CEPC Site

- Preliminary selected Qinhuangdao (秦皇岛) (one of the candidate sites)
- Strong support by the local government



- Base rock: granite
- Base rock depth: 0.5 - 2 m
- Earth quake: < 7, 0.1g
- Earth vibration(RMS, nm): < 1.9 (1 - 100 Hz)

(J. Gao)

Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 36



## Myon-Collider

- > Elektronen und Myonen sind elementare Teilchen, Masse der Myonen ist ca. 200mal größer als die der Elektronen
- > Kaum Synchrotronstrahlung

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

→  $200^4 = 1.6 \times 10^9$  mal geringer fuer Myonen

- > Zirkularer Myon-Collider??  
Kleiner Radius des Rings erlaubt kompakten Collider
- > **Ziel: 1.5TeV – 5TeV (Fokus 3TeV); 400fb<sup>-1</sup>/Jahr**
- > Schwierigkeit:
  - Myonen-Lebensdauer 2.2 μs
    - Ein 3GeV Myon fliegt 18.7km in seinem Leben
    - Ein 1.5TeV Myon fliegt 9300km (~2000 Umlaeufe in einem Myoncollider)

→ Beschleunigung und Strahlfokussierung muss sehr schnell erfolgen  
→ Myonen müssen ständig erzeugt werden

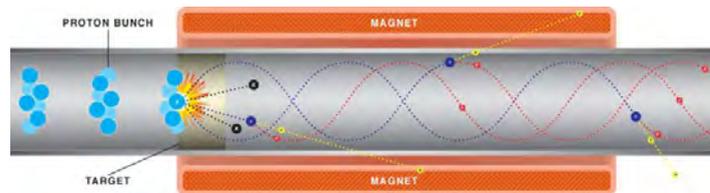
	Materie (Fermionen)			Bosonen	
Quarks	u up	c charm	t top	γ Photon	H Higgs Boson
	d down	s strange	b bottom	g Gluon	
	V <sub>e</sub> Elektron-Neutrino	V <sub>μ</sub> Myon-Neutrino	V <sub>τ</sub> Tau-Neutrino	Z <sup>0</sup> Z-Boson	
Leptonen	e Elektron	μ Myon	τ Tau	W <sup>±</sup> W-Boson	
					Einheitsbosonen

Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 37



## Myonproduktion

- > Generation der Myonen
  - hochintensiver Protonenstrahl trifft auf Target
  - in diesen Kollisionen werden Pionen (kurzlebig) erzeugt
  - innerhalb von 50m Zerfallstrecke zerfallen die Pionen in Myonen und Myon-Neutrinos
  - Die Energie der Myonen beträgt ca. 200 MeV



- > Sammeln der Myonen
  - Magnete leiten die Myonen in die RF Kavitäten
  - Elektrisches Feld in Kavitäten erhöht Energie der langsamen Myonen und verringert die der schnellen Myonen.
  - Allerdings ist der Strahldurchmesser (muss klein sein für gute Luminosität) noch sehr gross, der Strahl ist noch divergent

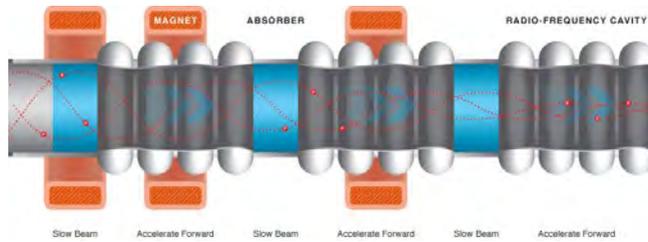
Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 38



## Myonen-'Kühlung'

In Entwicklung:

- > Reduktion der transversalen Größe des Myonstrahls ('Cooling')
  - Funktioniert analog dem Dämpfen mit Synchrotronstrahlung in e+e- Ringen
    - Energieverlust im Absorber reduziert Impulse  $p_x, p_y, p_z$  der Myonen
      - 'ionization cooling'
    - Energie durch RF Kavitäten erhöht nur  $p_z$
    - Wiederholung dieses Prozesses reduziert  $p_{x,y}/p_z$



- > Exp. Test: MICE = International Muon Ionization Cooling Experiment (<http://mice.iit.edu/>)

Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 39



## Muon Collider Conceptual Layout

### Project X

Accelerate hydrogen ions to 8 GeV using SRF technology.

### Compressor Ring

Reduce size of beam.

### Target

Collisions lead to muons with energy of about 200 MeV.

### Muon Capture and Cooling

Capture, bunch and cool muons to create a tight beam.

### Initial Acceleration

In a dozen turns, accelerate muons to 20 GeV.

### Recirculating Linear Accelerator

In a number of turns, accelerate muons up to 2 TeV using SRF technology.

### Collider Ring

Bring positive and negative muons into collision at two locations 100 meters underground.



### > Myonen werden nicht direkt, sondern durch Zerfall generiert

→ man braucht eine MW Protonen-'Quelle' und ein Target

Target Technologie wurde demonstriert (MERIT: Strahl aus flüssigem Quecksilber in 15T Solenoid wird von Protonstrahl getroffen)

### > Myonen zerfallen

→ es entstehen Elektronen / Positronen

→ alles muss sehr schnell erfolgen

→ hoher Background

### > Muon Cooling Technik

▪ Machbarkeit des Ionizing cooling muss demonstriert werden (MICE)

▪ erfordert extrem anspruchsvolle Komponenten (NCRF auf Magnetstrecke, Solenoiden mit hohem Feld)

### > 'Zukunftsmusik', aber nicht unrealistisch

Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 41



## Plasmabeschleuniger

### > Eigentlich Plasma-Wanderwellen-Beschleuniger

### > Bereits präsentiert in früheren Technischen Seminaren (M. Gross)

### > Ermöglichen um einen Faktor $\sim 10^4$ höhere Gradienten, $\sim 1\text{TeV/m}$

▪ Bisher: max 100MV/m (CLIC)

▪ Viel kürzere Beschleuniger möglich

### > Prinzip:

▪ Laserpuls oder Teilchenpuls erzeugt 'geladene' Welle im Plasma, die als Feld für die zu beschleunigenden Teilchen wirkt

### > Problem: Strahlqualität

▪ Breite Energieverteilung

▪ Strahldivergenz

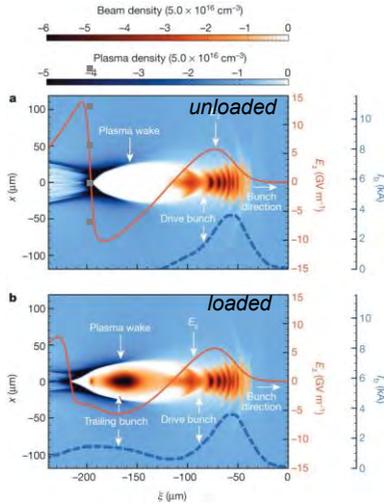


Vor





Plasmawelle (Simulation)



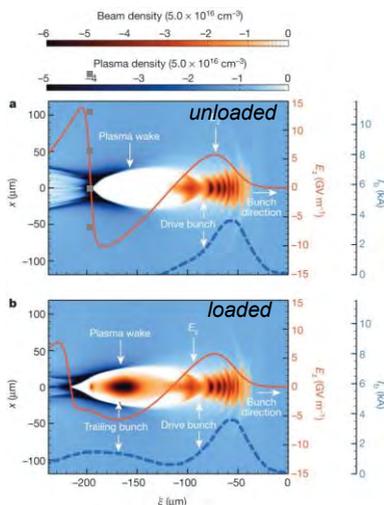
$x$  = transversale Ausdehnung,  
 $\xi = z - ct$  Ausdehnung entlang der  
 Bewegungsrichtung,  
 $E_z$  elektrisches Feld auf z-Achse  
 $I_b$  = Strom des Elektronenstrahls (blue dotted line).

M Litos et al. *Nature* 515, 92-95 (2014) doi:10.1038/nature13882

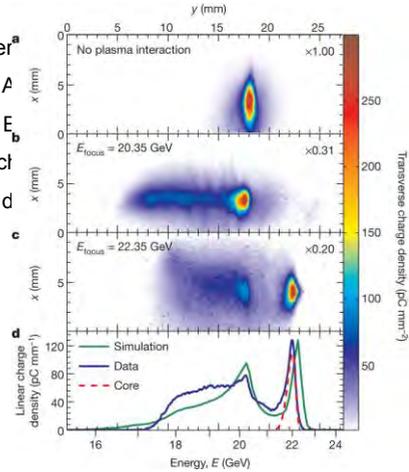
Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 43



Plasmawelle (Simulation)



$x$  = transversal  
 $\xi = z - ct$   
 $E_z$  elektrisch  
 $I_b$  = Strom d



M Litos et al. *Nature* 515, 92-95 (2014) doi:10.1038/nature13882

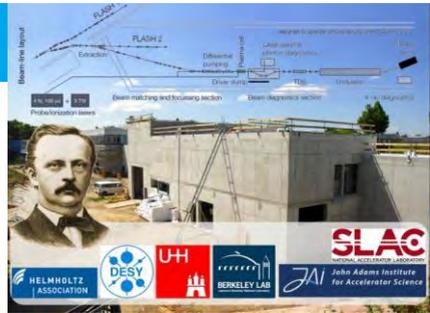
Vorname Name | Titel der Veranstaltung | Datum | Seite 44



# FLASHForward @ DESY

**> Ziel:**

- Plasmawellenbeschleunigung, generiert durch einen Teilchenstrahl,
  - zur Produktion eines Elektronenstrahls für den FEL-Betrieb
  - Für künftige Hochenergie-Teilchenphysik-Anwendungen

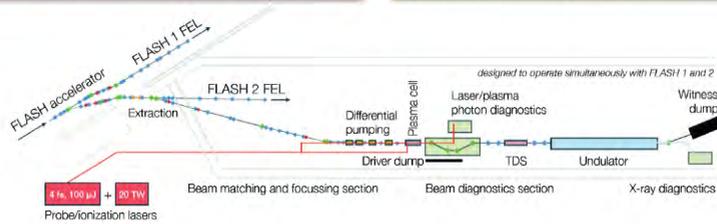


**Phase I (2015+)**

- > FLASH2 beamline design and installation
- > PWFA experiments with controlled injection techniques

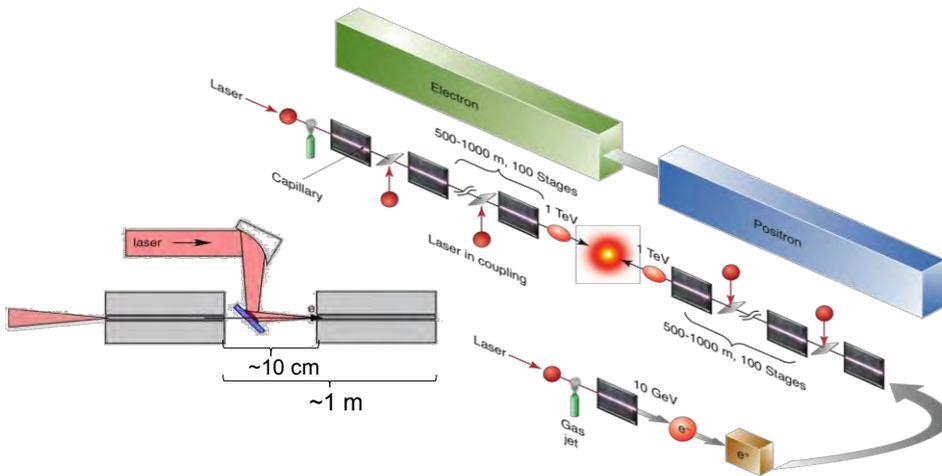
**Phase II (2018+)**

- > PWFA-induced beams for applications
- > Installation on undulator and corresponding diagnostics



## Werden kühne Träume wahr?

### A laser-plasma-driven linear collider?



## Zusammenfassung

- > Beschleunigerentwicklung ist spannendes Arbeitsgebiet mit vielen neuen Ideen am Rande des Machbaren
- > Seitens der Teilchenphysik besteht großes Interesse an Collidern mit hoher Energie und hoher Luminosität
- > In den letzten Jahren wieder Interesse an großen Ringcollidern mit Energien bis zu 100TeV (pp), mit Möglichkeit der Nutzung für e+e-
  - ILC (linear) – technisch ausgereift, leider nicht billig, in der Diskussion als nächstes Projekt der Teilchenphysik weltweit
  - CLIC (linear) – noch Entwicklungsarbeit nötig; für E<1TeV sind Kosten vergleichbar mit ILC
  - e+e- Ringcollider als Higgs-Fabrik wäre billiger als ein Linearcollider, aber ebenfalls nichttrivial und außerdem mit geringerem Physikpotenzial
  - $\mu+\mu$ - Collider  $\Leftrightarrow$  tolle Idee, erfordert noch viel Arbeit
  - LHeC (ep) Collider wäre gut möglich durch Kombination von Ring- und Linearbeschleuniger; aber Physikpotenzial?
- > Plasmabeschleunigung: sehr interessant und vielversprechend, aber noch weiter Weg bis zum Einsatz in der Teilchenphysik
- > Unmittelbare Zukunft:
  - LHC Upgrade (Luminosität, Energie?)
  - ILC: Japans Interessere, Gastgeber für den ILC zu sein, wird diskutiert. Die physikalischen Ziele sind klar und wichtig – unabhängig von den LHC Resultaten.

