

Standardmodell Präzisionsmessungen

bei hohen Energien

im wesentlichen: LEP, (SLC, ILC)

- e^+e^- -Beschleuniger: LEP, SLC, ILC
- das OPAL Experiment am LEP
- Endzustände bei LEP
- Z^0 Resonanz und das Standardmodell der elektroschwachen Wechselwirkung
- Messung elektroschwacher Parameter
- einige Highlights ...
- Suche nach dem Higgs-Boson
- Sonstige Themen bei LEP

Standardmodell Präzisionsmessungen

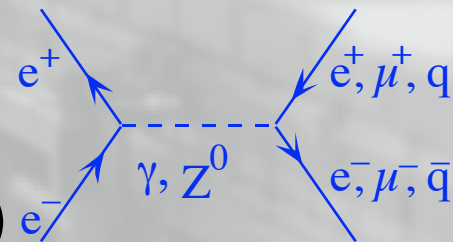


- punktförmige Teilchen (i.e. vollständige Vernichtung)
- genau bekannte Quantenzahlen und Energien des Anfangs- und des Endzustandes
- keine hadronische (starke) Wechselwirkung im Anfangszustand; kein „underlying“ remnant event

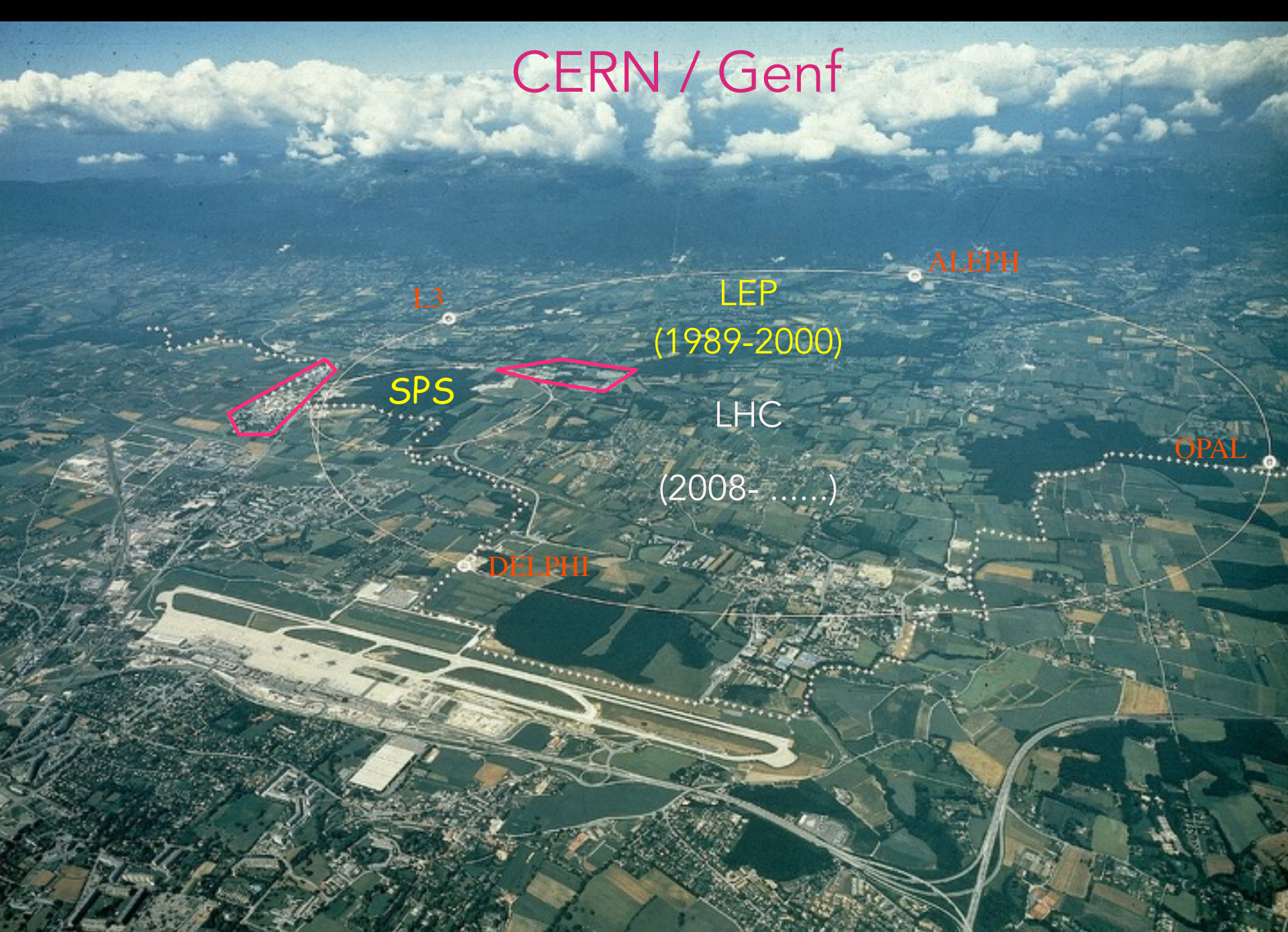
$\longleftrightarrow$ Präzision!

technische Voraussetzungen:

- präzise Kenntnis der e^+e^- Energie (Beschleuniger)
- präzise Kenntnis der Luminosität (spez. Detektoren)
- präzise Messung & Klassifikation der versch. Endzustände (Detektor)



CERN / Genf



LEP-Parameter

(Elektron - Positron Collider mit Schwerpunktsenergien E_{cm} bis zu 209 GeV)

	LEP-I	LEP-II
Strahlenergie bis	55 GeV	≈ 100 GeV
Magnet-Dipolfeld	0.065 T	0.111 T
Beschl.-Spannung pro Umlauf	260 MeV	2700 MeV
Klystron Leistung	16 MW	16 MW
Hohlraumresonatoren	Cu (normalleitend) 128 in P2 und P6	Cu-Nb (supraleitend) 272 in P2,4,6,8
Beschleunigungsspannung	1.5 MV/m	6 MV/m
Strahlströme	3 mA	5 mA
Zahl der e^+e^- Pakete	4 x 4	4 x 4 (x 2 bunchlets)
max Luminosität	$1.6 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$5 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Energieunschärfe	70 MeV	280 MeV
sys. Energiefehler	1.4 MeV	25-30 MeV
Strahllebensdauer:	$\approx 6 - 8$ h	≈ 5 h

Energiekalibration:

durch **resonante Depolarisation** der sich selbständig aufbauenden Strahlpolarisation; durchgeführt bei geeigneten Strahlenergien (z.Z. bis ca 55 GeV), sowie Extrapolation auf höhere Energien mit flux-loop-Messungen.

max. Strahlenergie: 104.5 GeV $\rightarrow \sqrt{s} = 209$ GeV (Herbst 2000)

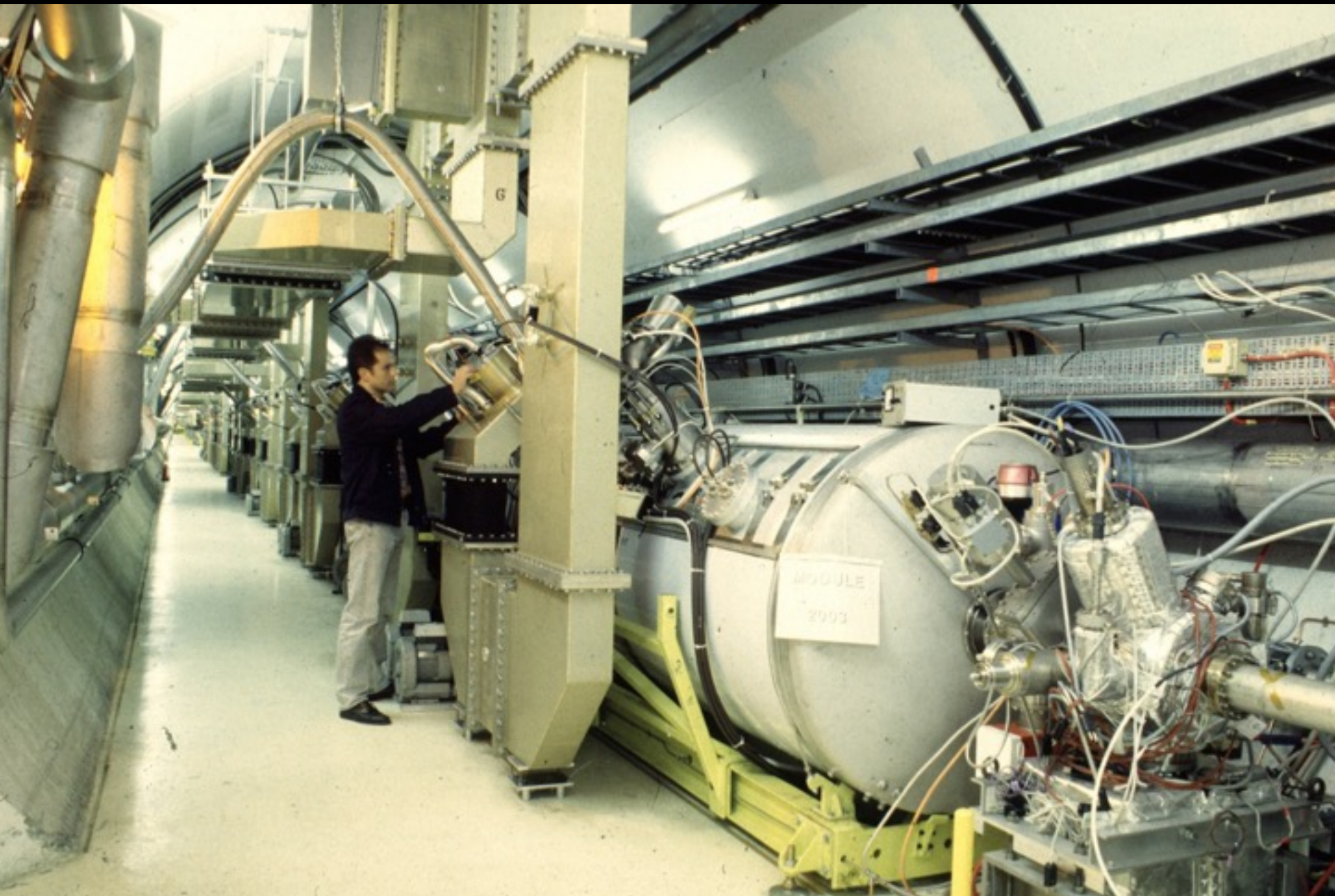
LEP-Tunnel



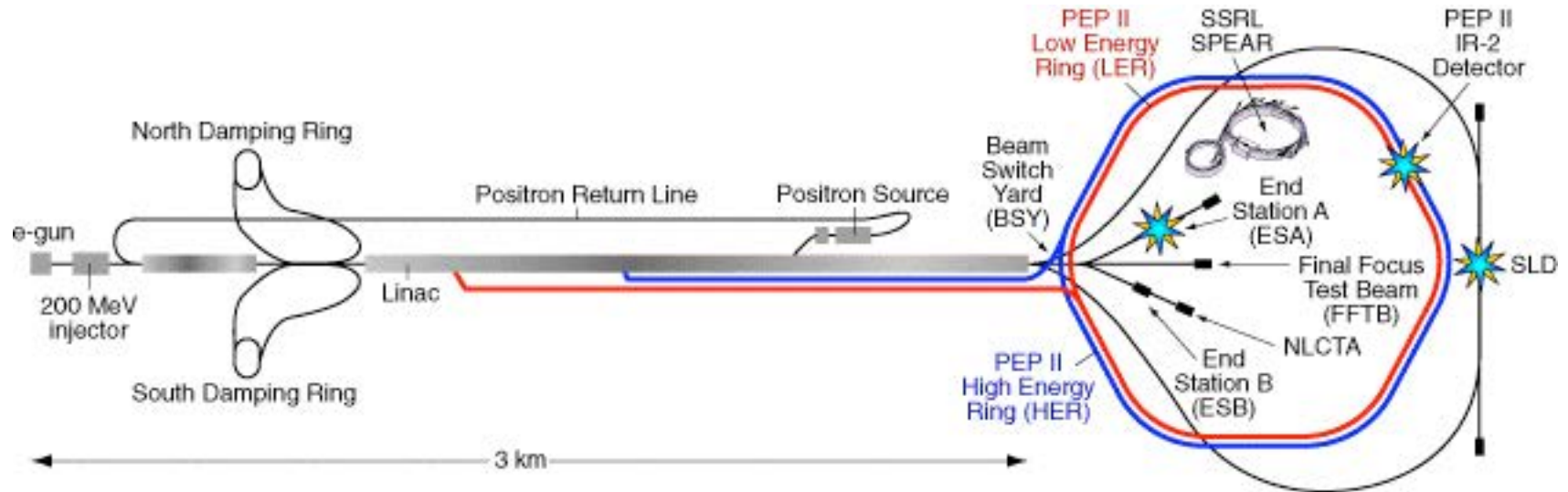
Quadrupol-Magnete
(Fokussierung)

Dipol-Magnete
(Kreisbahn)

LEP - Supraleitende Beschleunigerstrecke



SLAC Linear Collider (SLC)

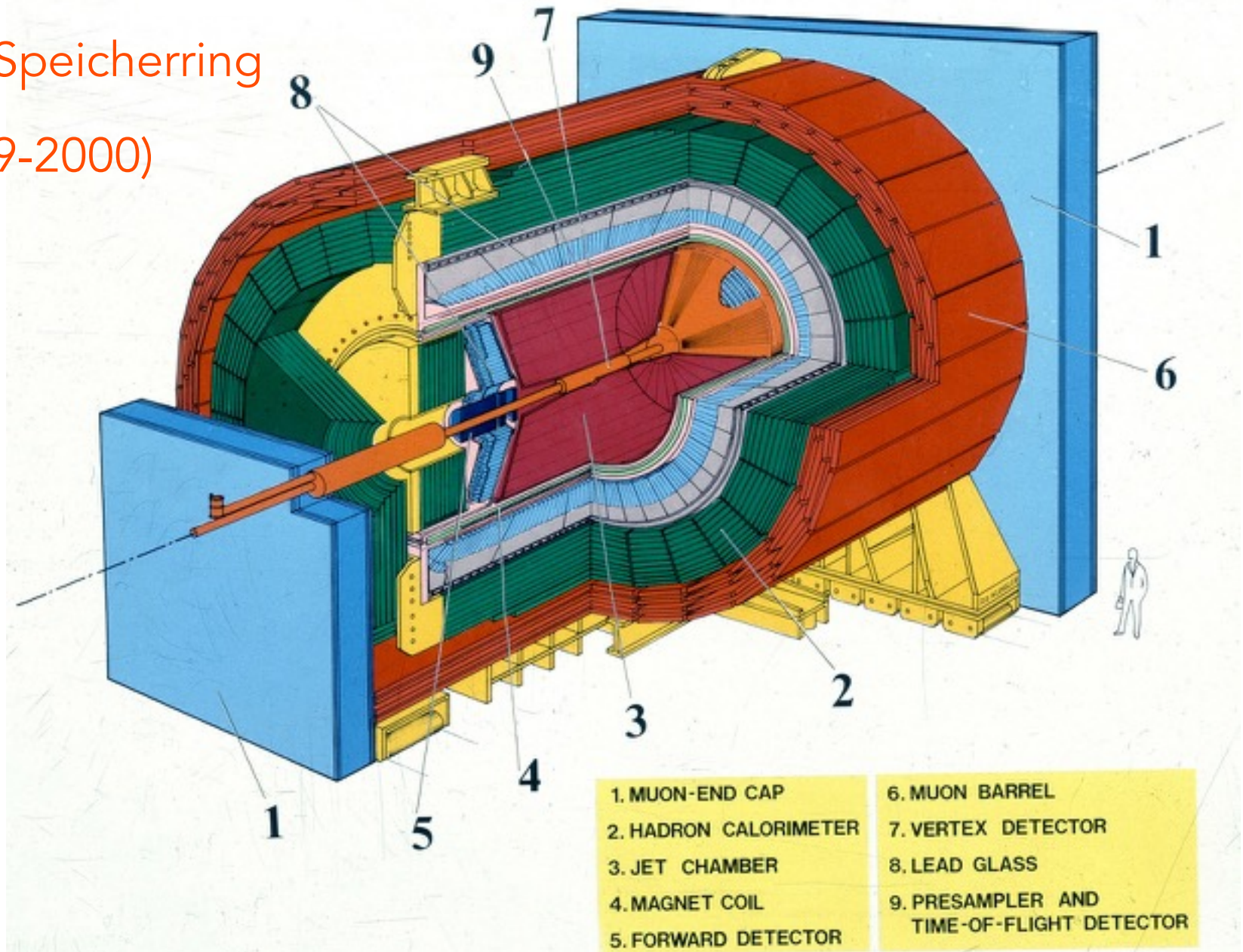


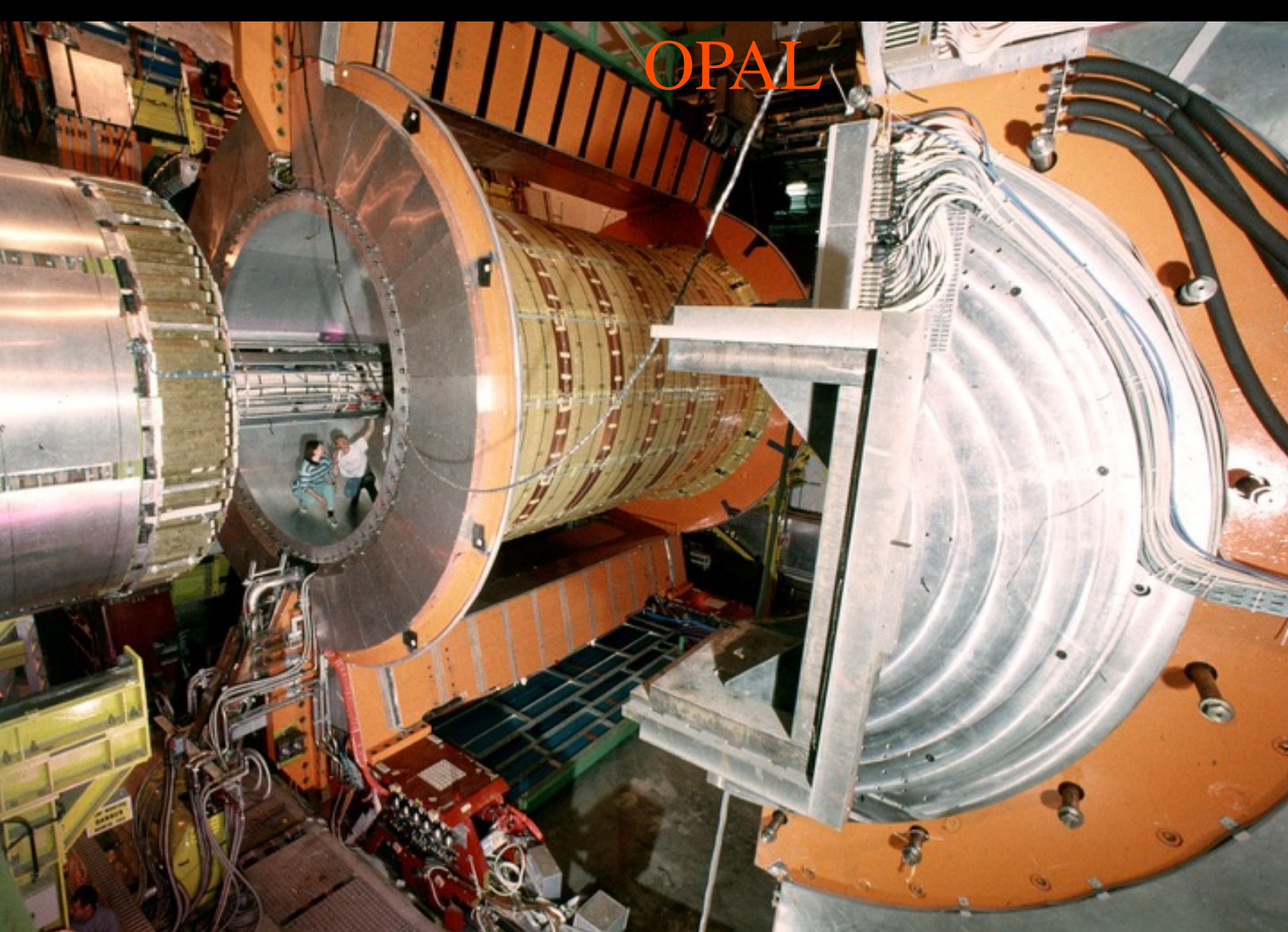
- e^- bis 50 GeV; fixed-Target Programme (bis 1980er)
- e^- und e^+ für PEP-I Speicherring ($E_{\text{cm}} = 29$ GeV; frühe 1980er)
- e^- und e^+ für SLC collider ($E_{\text{cm}} = M_Z \sim 91$ GeV; 1989 - 1999)
- e^- und e^+ für PEP-II Speicherring ($E_{\text{cm}} \sim 10$ GeV; 1999 - 2008)

SLC:

- wesentlich geringere Luminosität und Datenstatistik als LEP (e^- , e^+ werden nicht recycled und sind nach einer Kollision „verbraucht“)
- + Polarisation des e^- Strahls bis zu 80% (polarisierte e^- -Quelle; Erhalt der Polarisation da (kaum) Synchrotronstrahlung)

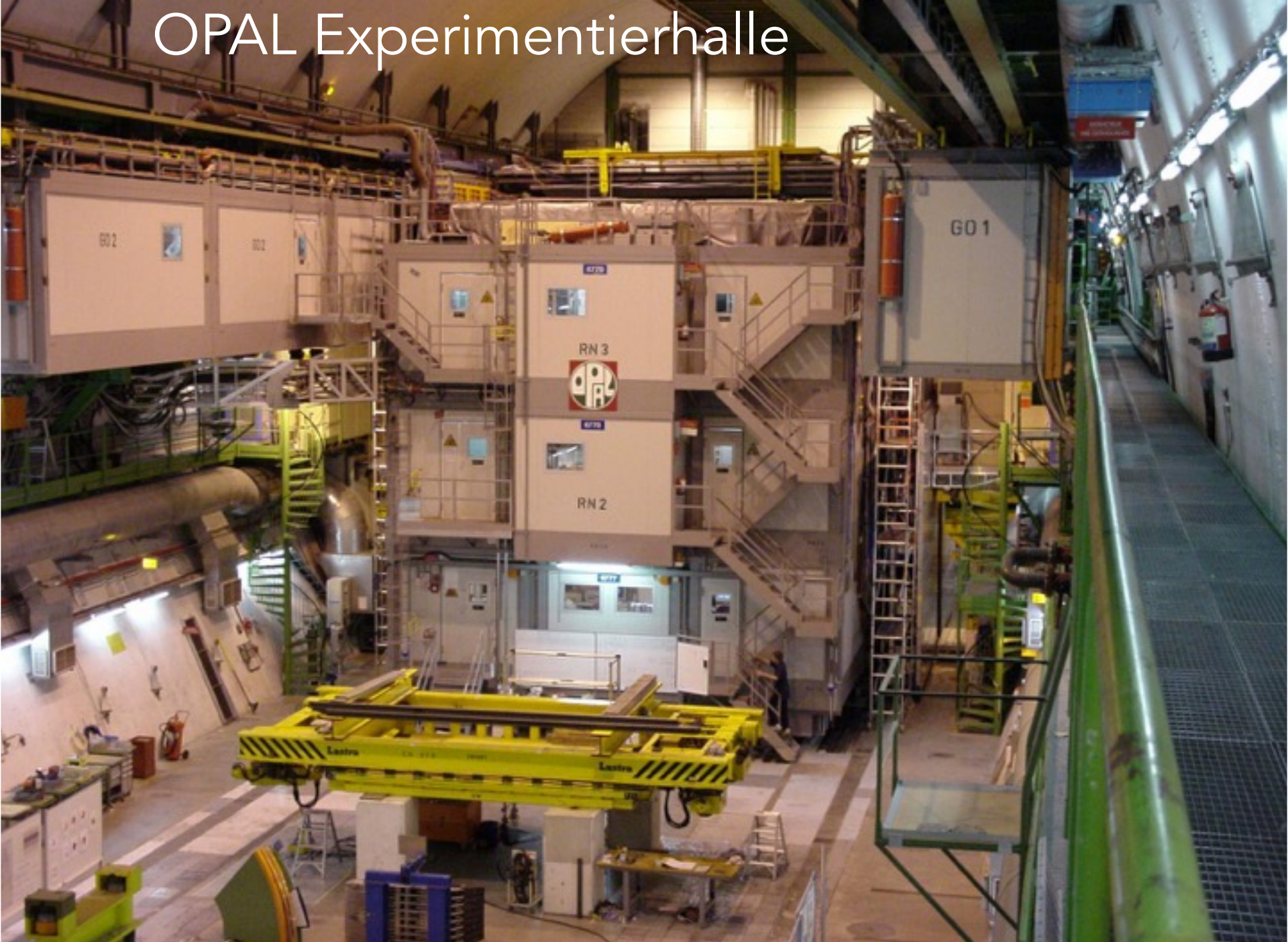
Der OPAL Detektor am LEP Speicherring (1989-2000)



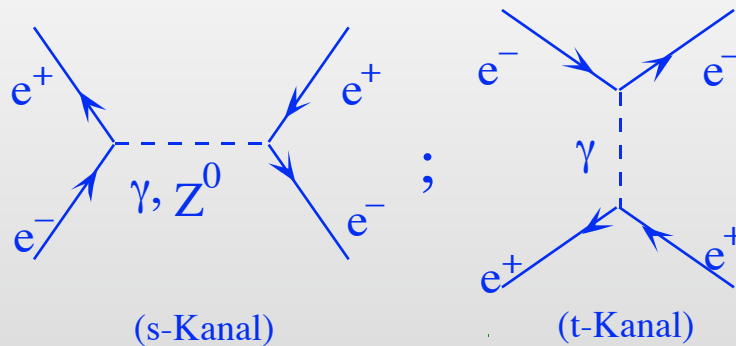


OPAL

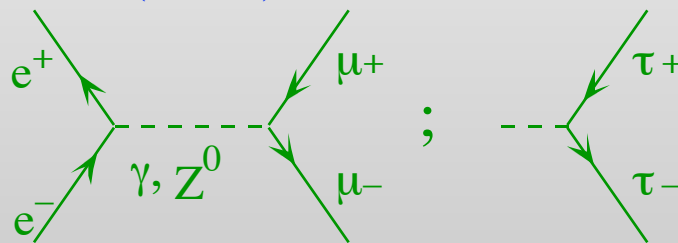
OPAL Experimentierhalle



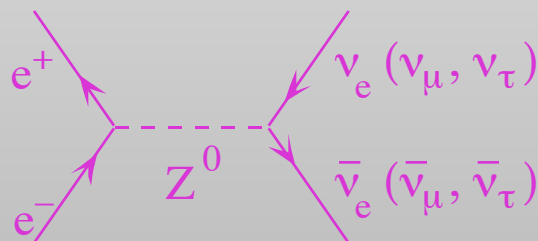
Endzustände hochenergetischer Reaktionen bei LEP



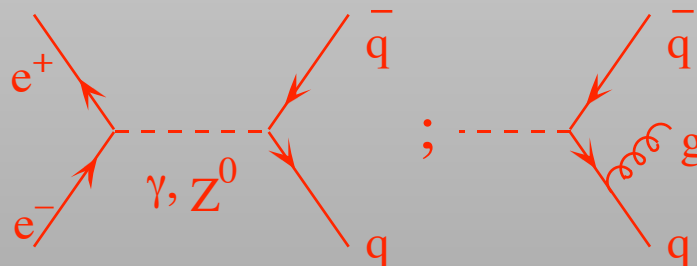
Bhabha-Streuung



μ^- , τ^- -Paar-Produktion

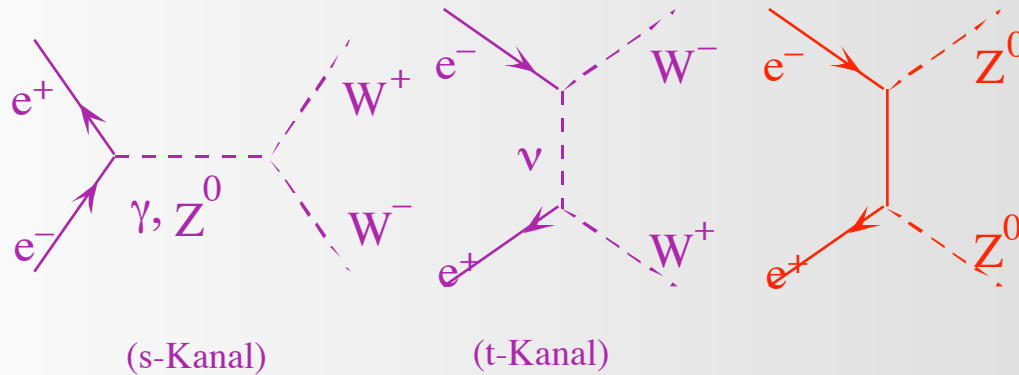


Neutrino-Paar-Produktion
("unsichtbar")

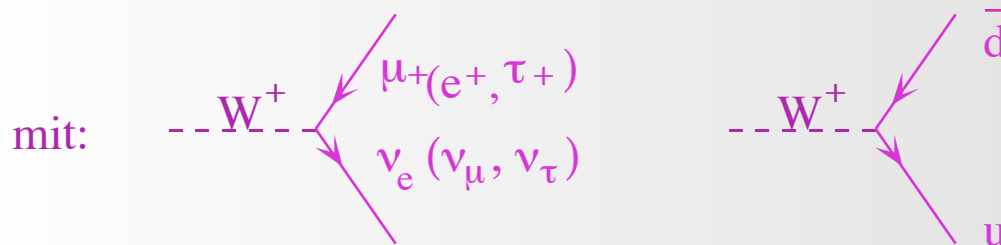


Quark-Antiquark-Paare
plus Gluonen:
hadronische Endzustände
(dominanter Kanal!)

Endzustände hochenergetischer Reaktionen bei LEP

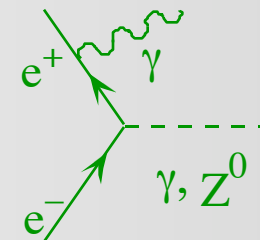
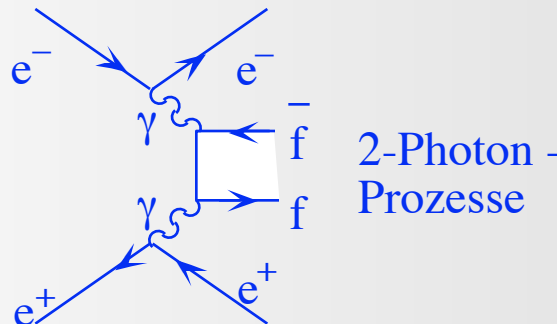


W/Z - Paar
Produktion
(LEP - II)



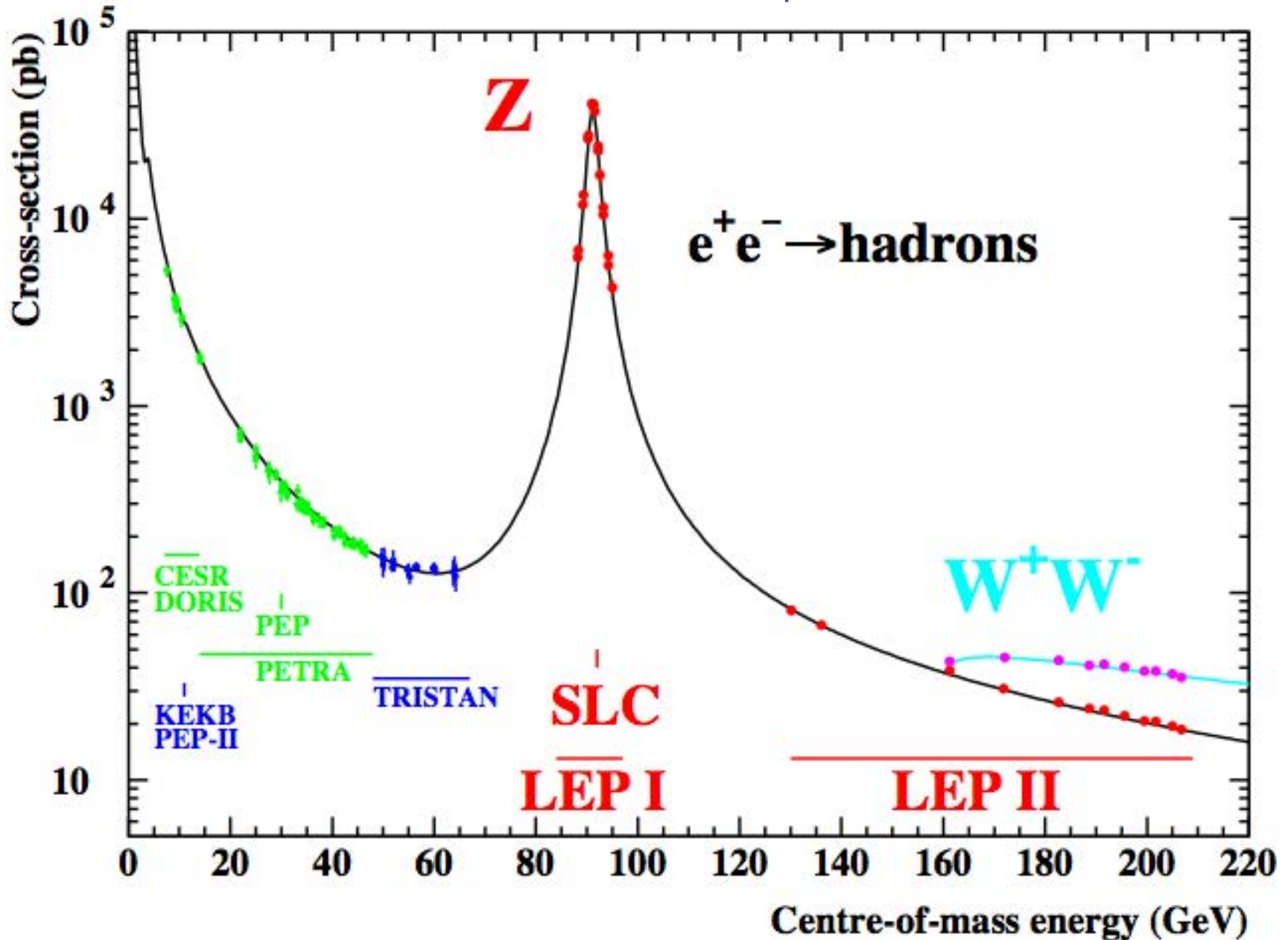
(W-Zerfälle;
Z-Zerfälle wie Vorseite)

Weitere
wichtige
Prozesse:



Bremsstrahlung
Im Anfangszustand
(unterdrückt auf der Z^0
Resonanz)

hadronischer Wirkungsquerschnitt

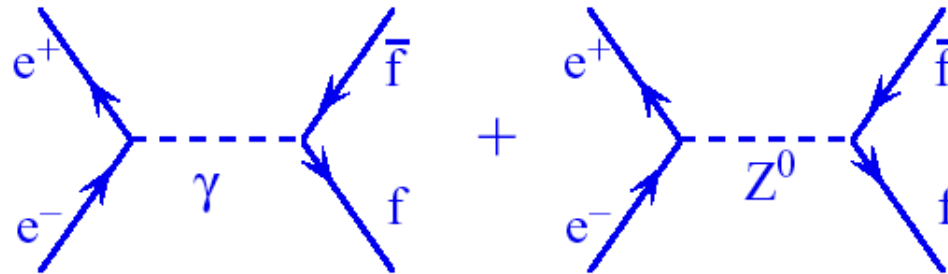


Z^0 -Resonance and the SM of Electroweak Interactions

minimal SM in lowest order („Born Approximation“) describes processes like $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ using only 3 free parameters:

α	[fine structure constant]
G_F	[Fermi constant; from μ lifetime]
$\sin^2\theta_W$	[weak mixing angle; from ν -N-scattering]

or: α , G_F and M_Z (since $\sin^2\theta_W \cos^2\theta_W = \frac{\pi\alpha}{G_F\sqrt{2}} \frac{1}{M_Z^2}$)



$$\begin{aligned}
 (f, \bar{f}) \equiv & (e^+, e^-), \quad (\mu^+, \mu^-), \quad (\tau^+, \tau^-); \\
 & (\nu_e, \bar{\nu}_e), \quad (\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu), \quad (\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau); \\
 & (u, \bar{u}), \quad (c, \bar{c}), \quad (t, \bar{t}); \\
 & (d, \bar{d}), \quad (s, \bar{s}), \quad (b, \bar{b}).
 \end{aligned}$$

cross sections around Z^0 resonance ($f \neq e$):

$$\sigma_f(s) = \sigma_f^0 \cdot \frac{s \Gamma_Z}{(s - M_Z^2)^2 + M_Z^2 \Gamma_Z^2} + \text{"}\gamma\text{"} + \text{"}\gamma Z\text{"}$$

$$\sigma_f^0 = \frac{12 \pi}{M_Z^2} \cdot \frac{\Gamma_e \Gamma_f}{\Gamma_Z^2} \quad (\text{pole cross sections; } \sum \Gamma_f = \Gamma_Z)$$

Measurement of s-dependent cross sections around the Z^0 resonance and adjustment of $\sigma_f(s)$, σ_f^0 provides **model independent** results for:

$$M_Z, \Gamma_Z, \Gamma_f, \sigma_f^0.$$

SM: Γ_f are no free parameters, they are parametrised as functions of the *vector* and *axial vector constants*:

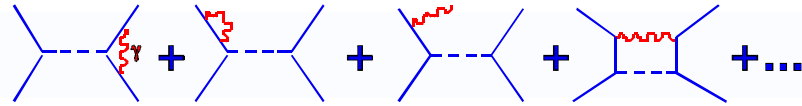
$$\Gamma_f = \frac{G_f M_Z^3}{6\pi \sqrt{2}} \cdot [g_{a,f}^2 + g_{v,f}^2] \cdot N_{c,f} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{colour factor; } \equiv 3 \text{ for quarks,} \\ \quad \quad \quad \equiv 1 \text{ for leptons.} \end{array} \right.$$

$$g_{a,f} = I_{3,f} \quad (3^{\text{rd}} \text{ component of weak isospin; } = \pm 1/2)$$

$$g_{v,f} = I_{3,f} - 2 Q \sin^2 \theta_w$$

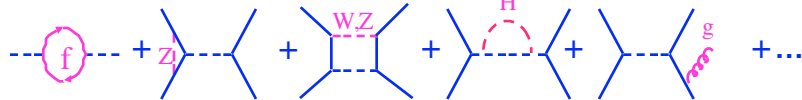
Strahlungskorrekturen im Standardmodell:

photonische Korrekturen:



Korrekturen $\sim 100\%$, selektionsabhängig;
faktorisierbar: $(1 + \delta_{\text{rad}})$

nichtphotonische Korrekturen:



Korrekturen $\sim 10\%$, selektionsunabhängig;
werden in laufende Kopplungskonstanten absorbiert:

- $\sin^2\theta_{\text{eff}}(s)$
- $\alpha(s) = \frac{\alpha}{1 - \Delta\alpha}$; $\Delta\alpha = 0.064$ bei $\sqrt{s} = M_Z$
- $N_{c,f} \left(1 + \frac{\alpha_s}{\pi} + 1.4 \left(\frac{\alpha_s}{\pi} \right)^2 + \dots \right)$ (für Quarks)
- $\frac{M_W^2}{M_Z^2} = \rho \cdot \cos^2 \theta_w$ mit $\rho = \frac{1}{1 - \Delta\rho}$; $\Delta\rho = 0.0026 \frac{M_t^2}{M_Z^2} - 0.0015 \ln \left(\frac{M_H}{M_w} \right)$

Einsetzen der laufenden Kopplungen in die “Born”-Approximation :

partielle Z-Zerfallsbreiten $\Gamma_f = \frac{G_f M_Z^3}{6\pi\sqrt{2}} [g_{a,f}^2 + g_{v,f}^2] N_{c,f}$ (und damit auch die

Wirkungsquerschnitte) werden abhängig von:

- M_t
- M_H
- α_s

$\Rightarrow$ indirekte Bestimmung (Fit) von M_t , M_H , und α_s aus Kombination aller verfügbaren elektroschwachen Messgrößen

(differentielle Wirkungsquerschnitte, partielle Zerfallsbreiten, Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrien, τ -Polarisation, links-rechts Asymmetry (SLC))

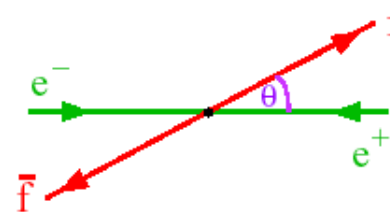
$$g_{a,f} = I_{3,f} \quad (3. \text{ Komponente schw. Isospin; } = \pm 1/2)$$

$$g_{v,f} = I_{3,f} - 2Q \sin^2 \theta_w$$

Further Observables to be measured:

- **differential** cross sections:

$$\frac{d\sigma_f}{d\cos\theta} \propto A \cdot (1 + \cos^2\theta) + B \cdot \cos\theta$$



A and B include terms for γ - and Z^0 -exchange as well as for γ - Z^0 -interference, which depend on

$(g_{a,e}^2 + g_{v,e}^2)$, $(g_{a,f}^2 + g_{v,f}^2)$, $(g_{a,e} \cdot g_{a,f})$, $(g_{v,e} \cdot g_{v,f})$, and on

the relativistic Breit-Wigner resonance, $\frac{s}{s - M_Z^2 + is\Gamma_Z / M_Z}$.

- forward-backward **asymmetries**:

$$A_{\text{FB}} = \frac{N_{\text{F}} - N_{\text{B}}}{N_{\text{F}} + N_{\text{B}}}$$

N_{F} : number of events with $\theta < \pi/2$

N_{B} : number of events with $\pi/2 < \theta < \pi$

on the Z^0 pole: $A_{\text{FB}}^{0,\text{f}} = \frac{3}{4} A_{\text{e}} A_{\text{f}}$

with $A_{\text{f}} = \frac{2g_{\text{v},\text{f}}g_{\text{a},\text{f}}}{g_{\text{v},\text{f}}^2 + g_{\text{a},\text{f}}^2} \quad \left[\approx \frac{g_{\text{v},\text{f}}}{g_{\text{a},\text{f}}} \text{ for leptons} \right]$

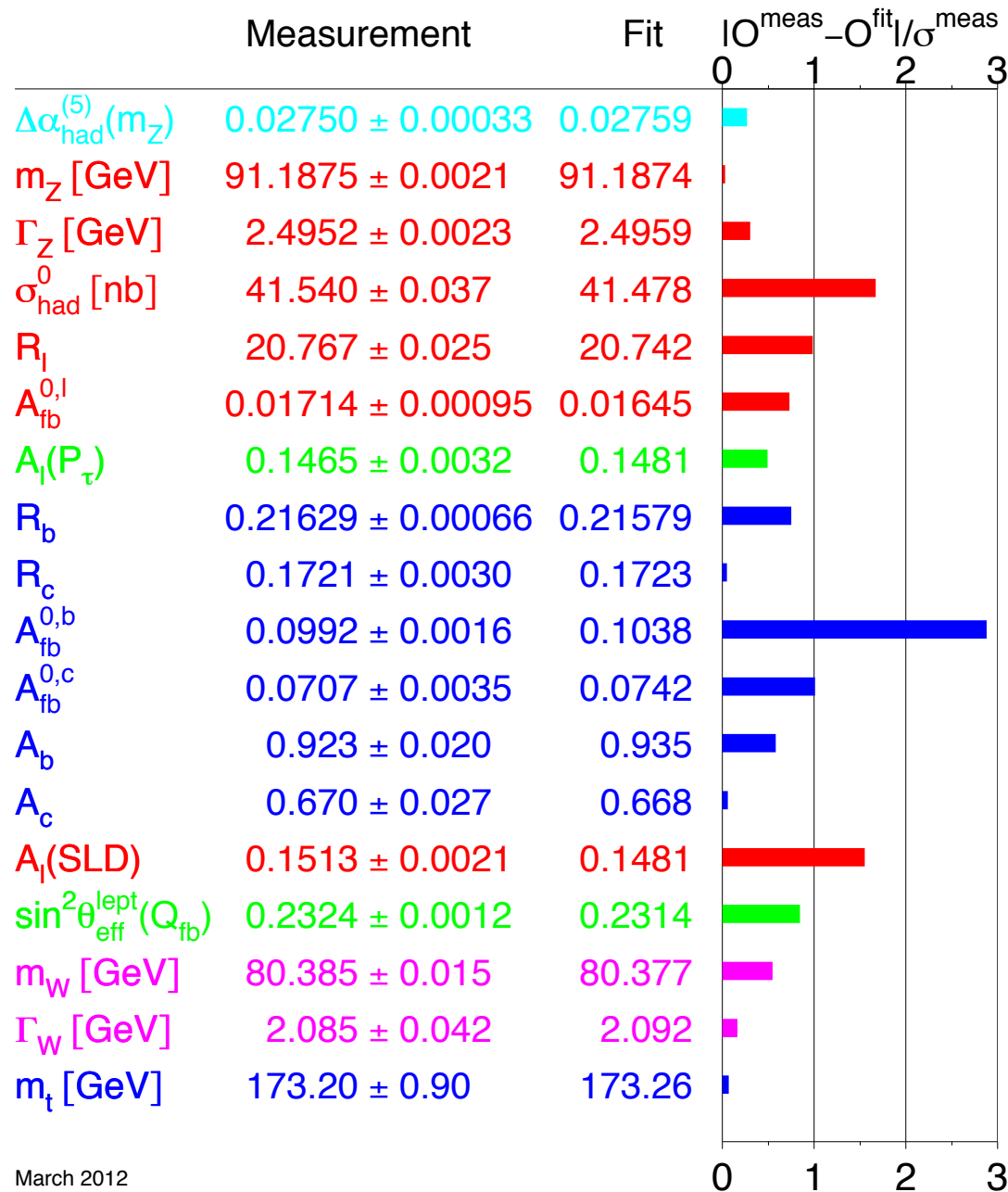
- final state **polarisations** of leptons:

$$P_{\text{f}} = \frac{1}{\sigma_{\text{tot}}} \cdot (\sigma_{\text{f}}(h = +1) - \sigma_{\text{f}}(h = -1))$$

$$P_{\text{f}}(s = M_{\text{Z}}) = -A_{\text{f}}$$

$$A_{\text{FB}}^{P_{\text{f}}}(s = M_{\text{Z}}) = -\frac{3}{4} A_{\text{e}}$$

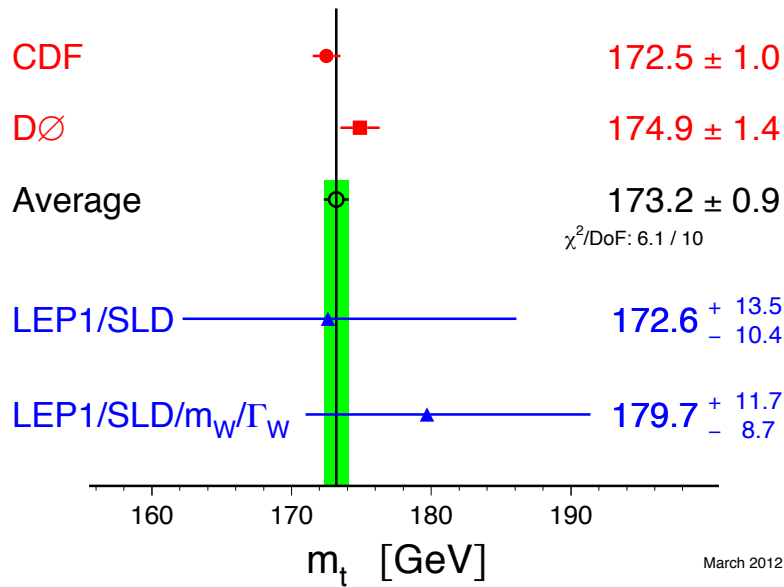
Messung und Bestimmung elektro-schwacher Parameter



enthält Daten
von Tevatron: M_t ,
 M_W

Messung und Bestimmung elektro-schwacher Parameter

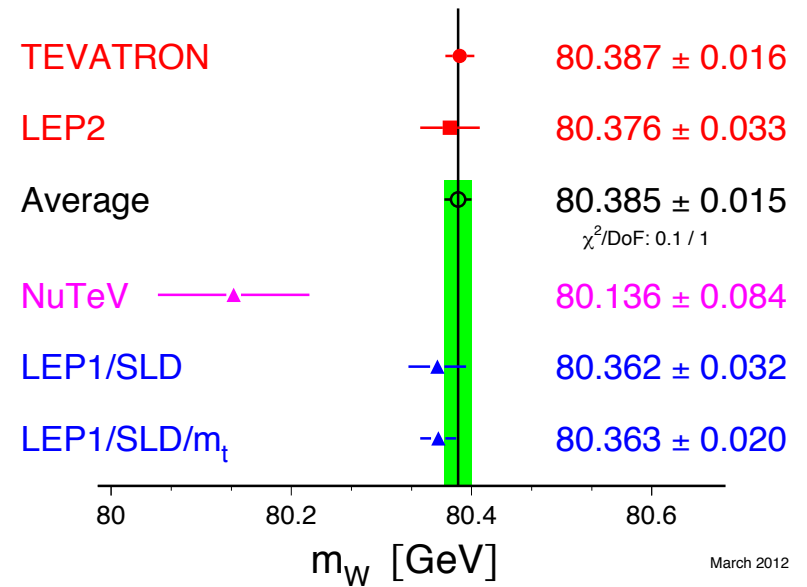
Top-Quark Mass [GeV]



*Messung
(direkt)*

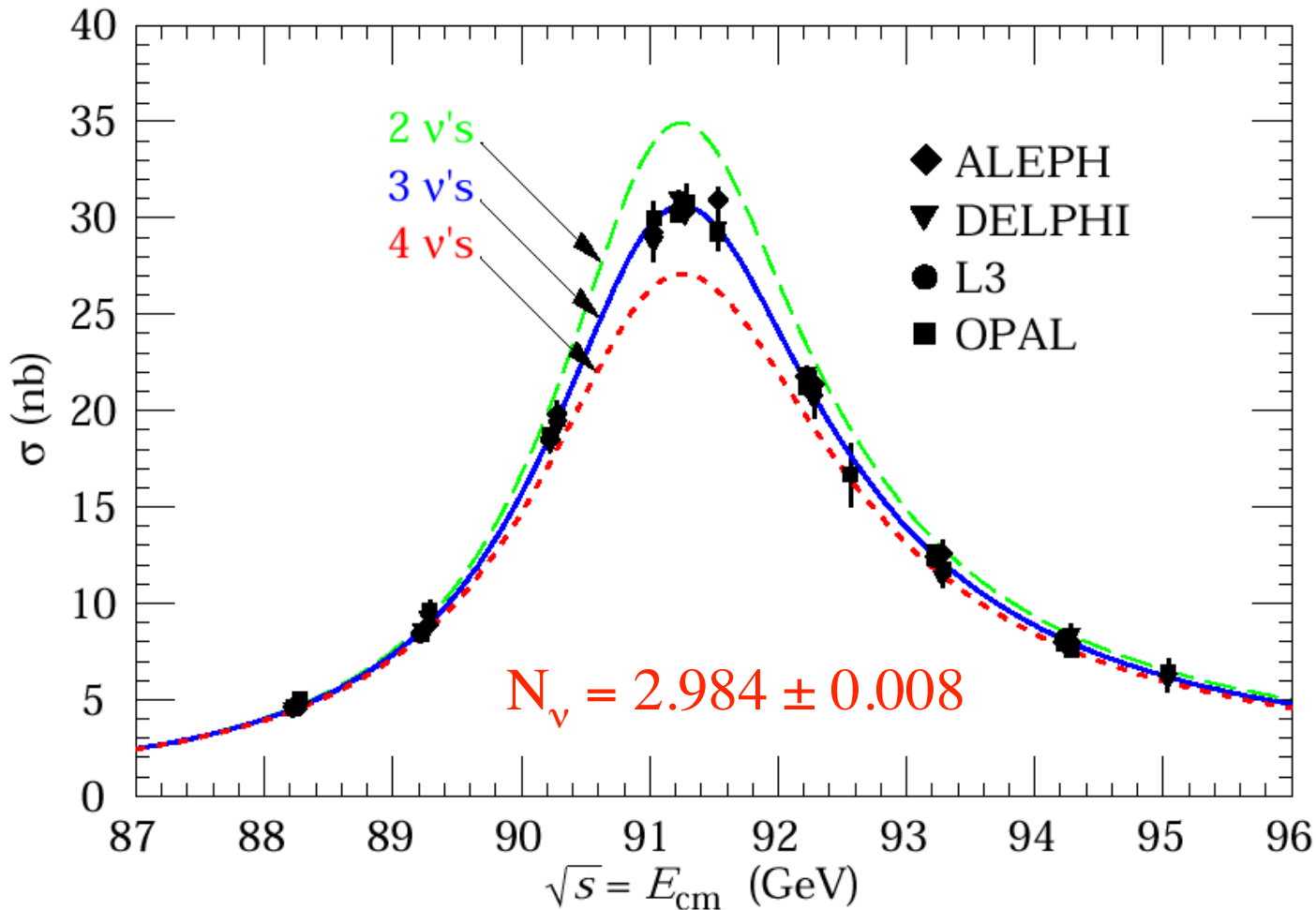
*Präz.-Fit
(indirekt)*

W-Boson Mass [GeV]



Highlights von LEP:

Resonanzlinie des Z^0 -Bosons bei LEP:
es gibt genau 3 Neutrino- (Teilchen-) Familien !



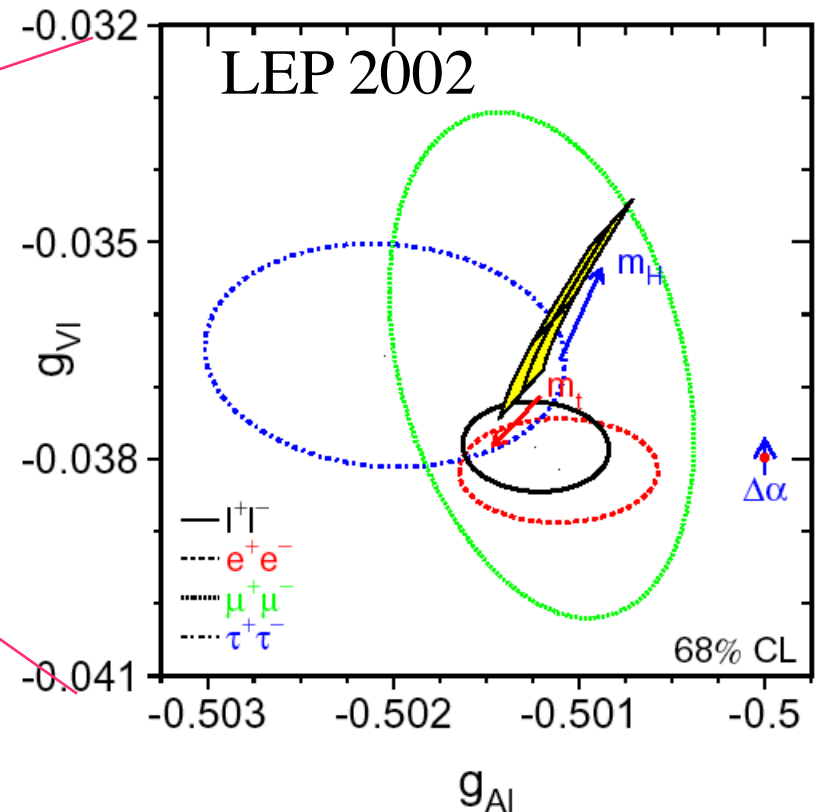
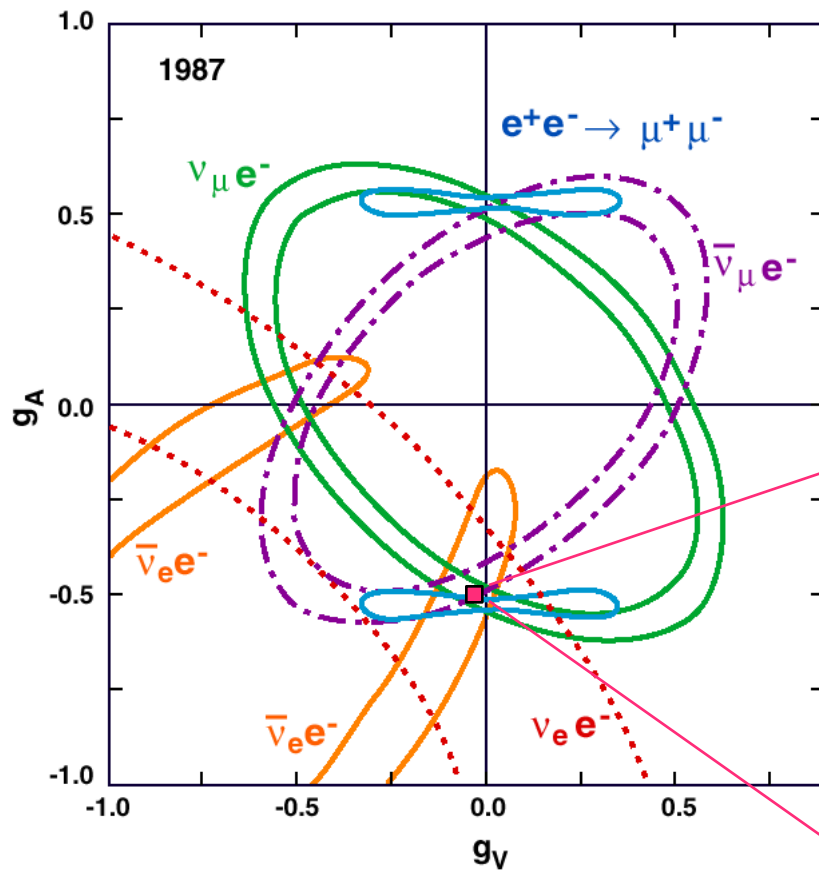
• $M_Z = (91.1875 \pm 0.0021) \text{ GeV}$

(...nach Korrektur auf die Mondphasen und den TGV Fahrplan!)

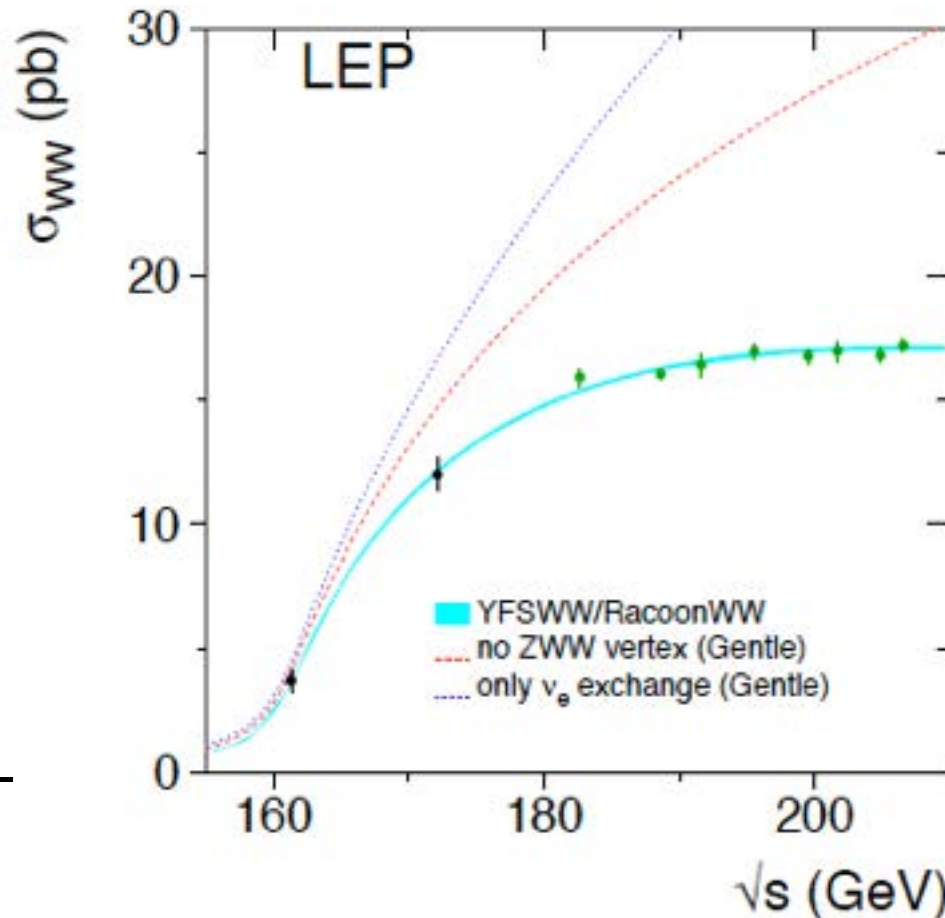
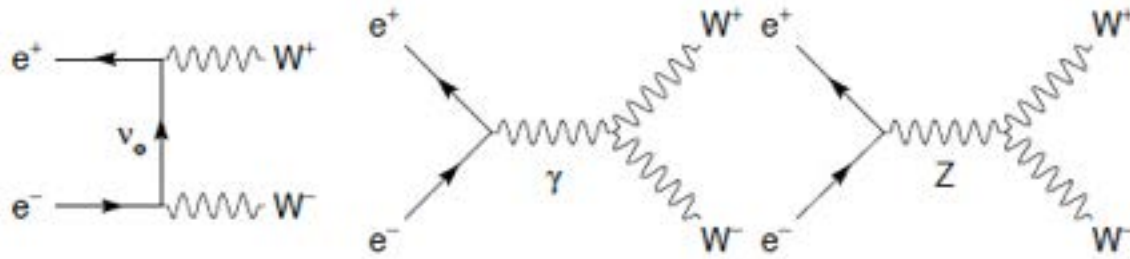
Highlights von LEP:

Präzision der Resultate von LEP: Axial- und Vektorkopplungs-

konstanten der elektroschwachen Kraft



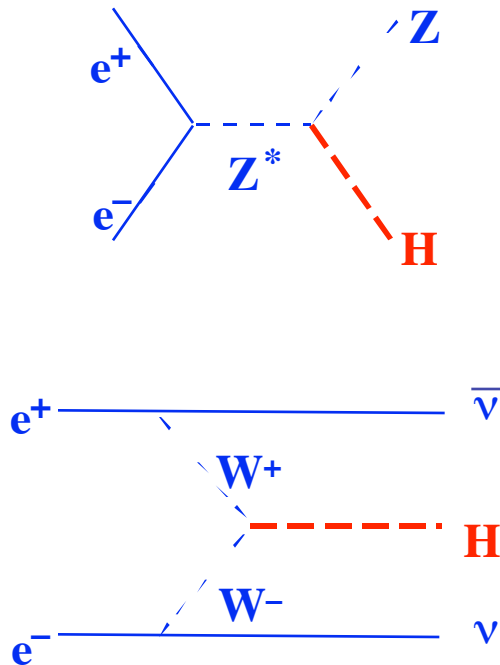
$$e^+e^- \rightarrow WW$$



(Evidenz für
Boson-Boson-
Kopplung!)

Higgs-Suche in e^+e^- Vernichtungsreaktionen: direkt

Produktion:



Zerfallskanal ($e^+e^- \rightarrow HZ$):

Untergrund:

$H \rightarrow b\bar{b}$	$Z \rightarrow q\bar{q}$	4-Jet-Kanal	51%	$WW \rightarrow qq\bar{q}\bar{q}, ZZ \rightarrow b\bar{b}q\bar{q}$ QCD 4jets
$H \rightarrow b\bar{b}$	$Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$	Neutrino-Kanal	15%	$WW \rightarrow qq\bar{l}\nu, ZZ \rightarrow b\bar{b}\nu\bar{\nu}$
$H \rightarrow b\bar{b}$	$Z \rightarrow \tau^+\tau^-$	Tau-Kanal	2.4%	$WW \rightarrow qq\tau\nu, ZZ \rightarrow qq\tau\tau$ QCD (low-mult. jets)
$H \rightarrow \tau^+\tau^-$	$Z \rightarrow q\bar{q}$		5.1%	
$H \rightarrow b\bar{b}$	$Z \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-$	Lepton-Kanal	4.9%	$ZZ \rightarrow b\bar{b}l\bar{l}$

Suche umfasst ca. 80% aller Endzustände bei ca. 40-50% Selektionseffizienz

Higgs-Suche in e^+e^- Vernichtungsreaktionen: direkt

Experimentelle Analyse:

- jedes Experiment ermittelt prinzipiell 3 Größen, für jede hypothetische Higgs-Masse, und für jeden Zerfallskanal:
 - N_{obs} (Anzahl der Kandidatenereignisse)
 - N_{sig} (Anzahl erwarteter Signalereignisse - aus Modellrechnungen)
 - N_{BG} (Anzahl erwarteter Untergrundereignisse - aus Modellrechn.)
- statistische Berechnung mit Hilfe von "likelihood"-Größen:
Test-Statistiken; Wahrscheinlichkeitsfunktionen; Konfidenzintervalle.
[Junk, Bock]
- Kombination der Ergebnisse aus verschiedenen Zerfallskanälen und von den 4 LEP-Experimenten

Higgs-Suche in e^+e^- Vernichtungsreaktionen: direkt

Stand Juli 2000: Kein Hinweis auf das Higgs; $M_H > 113.3 \text{ GeV}/c^2$ (95% CL)

[Stand Juli 2001: $M_H > 114.1 \text{ GeV}/c^2$]

5. Sept. 2000: ALEPH sieht Überschuss im 4-Jet Kanal, verträglich mit $M_H \sim 115 \text{ GeV}/c^2$.

LEP-Kombination: 2.2σ Überschuss über Untergrund

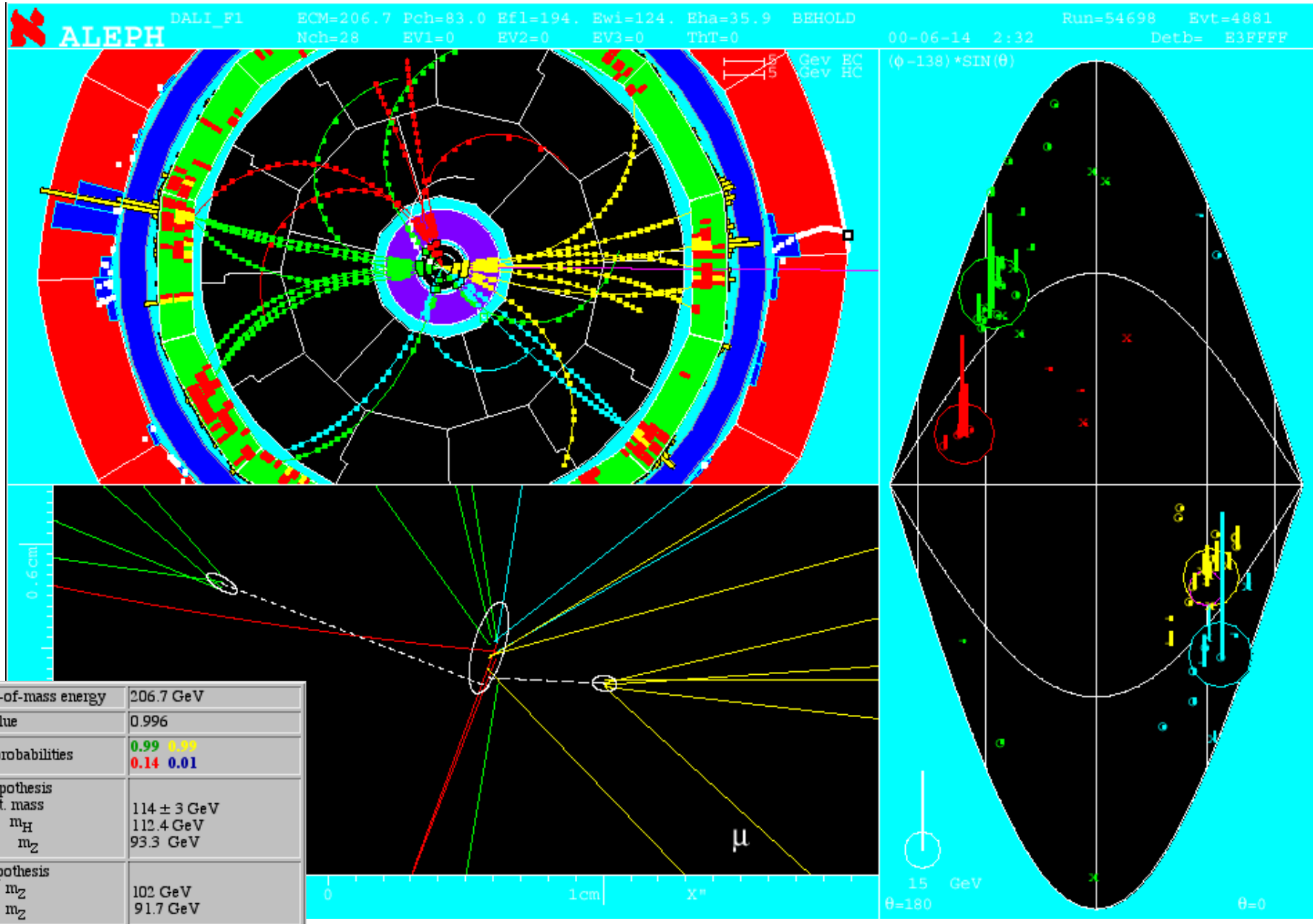
14. Sept. 2000: LEP-shutdown um 1 Monat verschoben bis 2. November 2000

3. Nov. 2000: weitere Kandidatenereignisse erhöhen Signifikanz auf 2.9σ .
LEP-Experimente beantragen LEP run in 2001

[Stand Juli 2001: nach Re-Analysen (Kalibrierung) nur noch 2.1σ !]

8. Nov. 2000: LEP wird unwiderruflich geschlossen und abgebaut.

Higgs-Suche in e^+e^- Vernichtungsreaktionen: direkt



Higgs-Suche in e^+e^- Vernichtungsreaktionen: indirekt

(aus Strahlungskorrekturen / global fits)

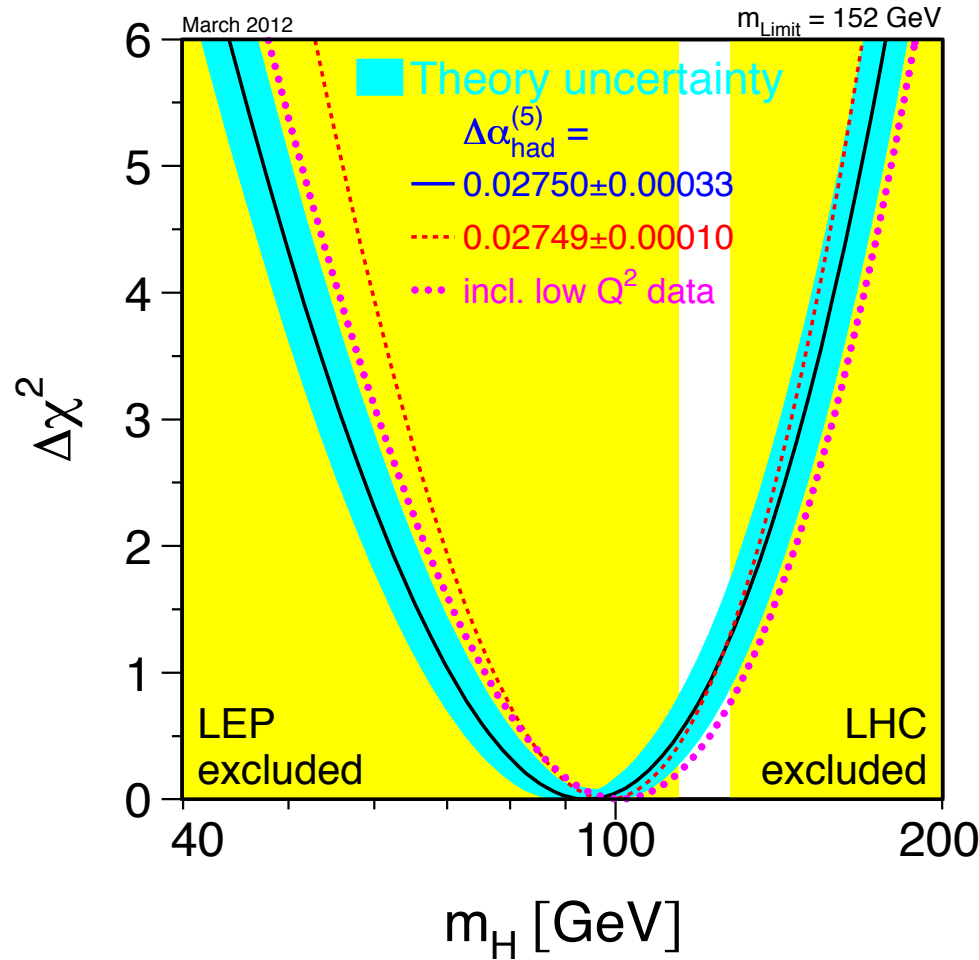
	- 1 -	- 2 -	- 3 -	- 4 -	- 5 -	- 6 -
	LEP including LEP-II m_W , Γ_W	all Z-pole data	all Z-pole data plus m_t	all Z-pole data plus m_W , Γ_W	all data except NuTeV	all data
m_t [GeV]	184^{+13}_{-11}	171^{+11}_{-9}	$173.6^{+4.7}_{-4.6}$	180^{+11}_{-9}	$175.4^{+4.3}_{-4.2}$	$174.3^{+4.5}_{-4.3}$
m_H [GeV]	228^{+367}_{-136}	81^{+107}_{-40}	99^{+64}_{-40}	117^{+161}_{-63}	78^{+48}_{-31}	81^{+52}_{-33}
$\log(m_H/\text{GeV})$	$2.36^{+0.42}_{-0.39}$	$1.91^{+0.37}_{-0.30}$	$1.99^{+0.22}_{-0.23}$	$2.07^{+0.38}_{-0.33}$	$1.89^{+0.21}_{-0.22}$	$1.91^{+0.22}_{-0.23}$
$\alpha_S(m_Z^2)$	0.1199 ± 0.0030	0.1186 ± 0.0027	0.1187 ± 0.0027	0.1185 ± 0.0027	0.1181 ± 0.0027	0.1183 ± 0.0027
$\chi^2/\text{d.o.f.} (P)$	13.3/9 (15%)	14.8/10 (14%)	14.9/11 (19%)	17.9/12 (12%)	20.5/14 (11%)	29.7/15 (1.3%)
$\sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lept}}$	0.23160 ± 0.00018	0.23145 ± 0.00016	0.23145 ± 0.00016	0.23135 ± 0.00015	0.23131 ± 0.00015	0.23136 ± 0.00015
$\sin^2 \theta_W$	0.22284 ± 0.00053	0.22313 ± 0.00063	0.22299 ± 0.00045	0.22240 ± 0.00045	0.22255 ± 0.00036	0.22272 ± 0.00036
m_W [GeV]	80.388 ± 0.027	80.373 ± 0.032	80.380 ± 0.023	80.410 ± 0.023	80.403 ± 0.019	80.394 ± 0.019

*

Table 16.2: Results of the fits to: (1) LEP data alone, (2) all Z-pole data (LEP-1 and SLD), (3) all Z-pole data plus direct m_t determinations, (4) all Z-pole data plus direct m_W and direct Γ_W determinations, (5) all data (including APV) except NuTeV, and (6) all data. As the sensitivity to m_H is logarithmic, both m_H as well as $\log(m_H/\text{GeV})$ are quoted. The bottom part of the table lists derived results for $\sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lept}}$, $\sin^2 \theta_W$ and m_W . See text for a discussion of theoretical errors not included in the errors above.

* $M_H < 185 \text{ GeV}$ (95% c.l.)

Higgs-Suche in e^+e^- Vernichtungsreaktionen: indirekt

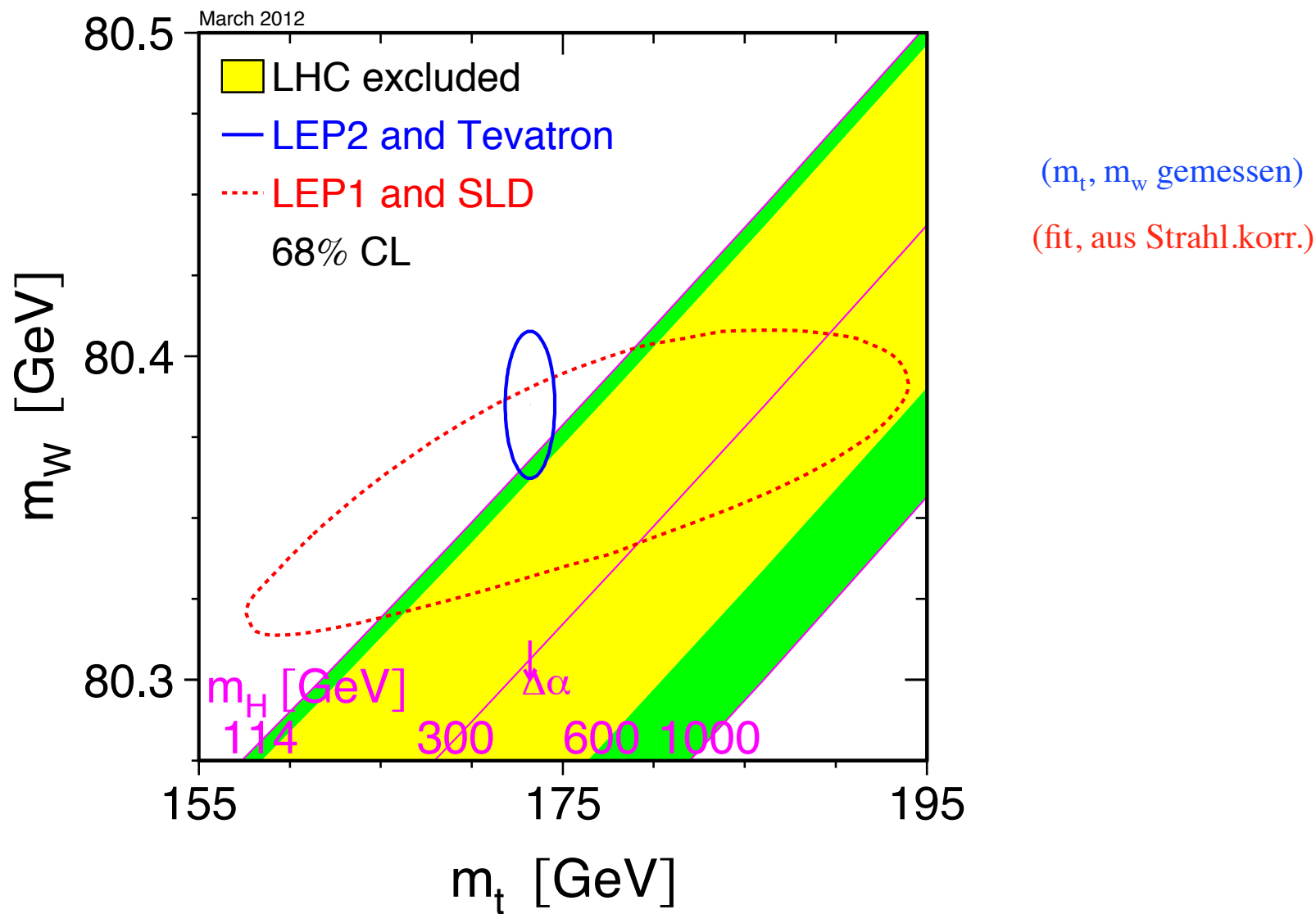


aus direkter Higgs-Suche: $114.1(\text{LEP}) < M_H < 131 \text{ GeV}/c^2 (\text{LHC})$

indirekt aus Strahlungskorrekturen: $M_H < 186 (157) \text{ GeV}/c^2 (95\% \text{ CL})$

Juli 2012: Higgs am LHC gefunden; 2015: $M_H = 125.09 \pm 0.24 \text{ GeV}$

Vergleich direkte Messung mit Fit aus Strahlungskorrekturen:



- gute Übereinstimmung
- „leichtes Higgs“ bevorzugt

Weitere Themen bei LEP:

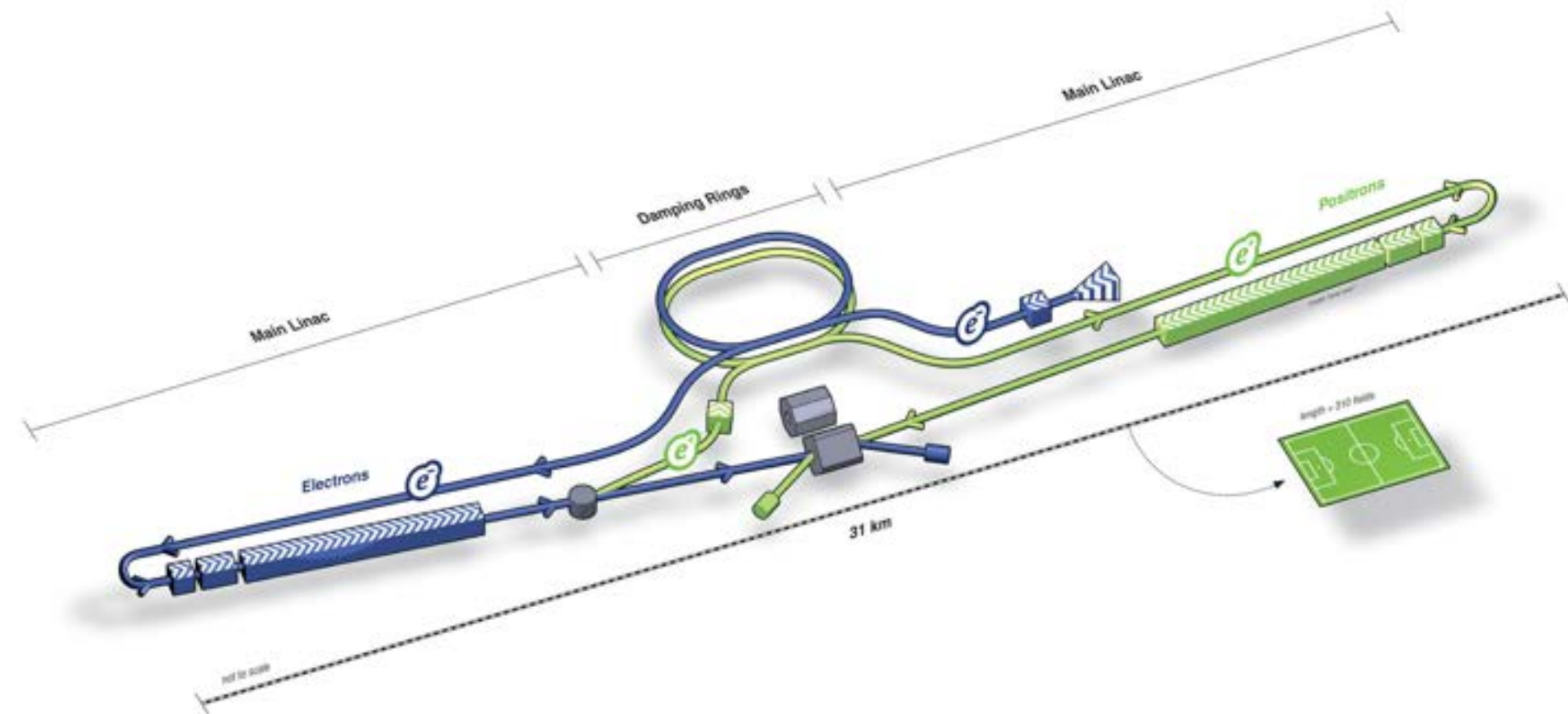
- Tests der Starken Wechselwirkung (QCD)
- Physik schwerer Quarks
- Suche nach neuen Teilchen (SUSY et al...)
- 2-Photon Physik
- ... (~ 1400 Publikationen 1989 - 2002)

Zukunft: ILC

International Linear Collider (ILC)

500 GeV c.m. e^+e^-

$L \sim 2 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (400 x LEP)



International Linear Collider (ILC)

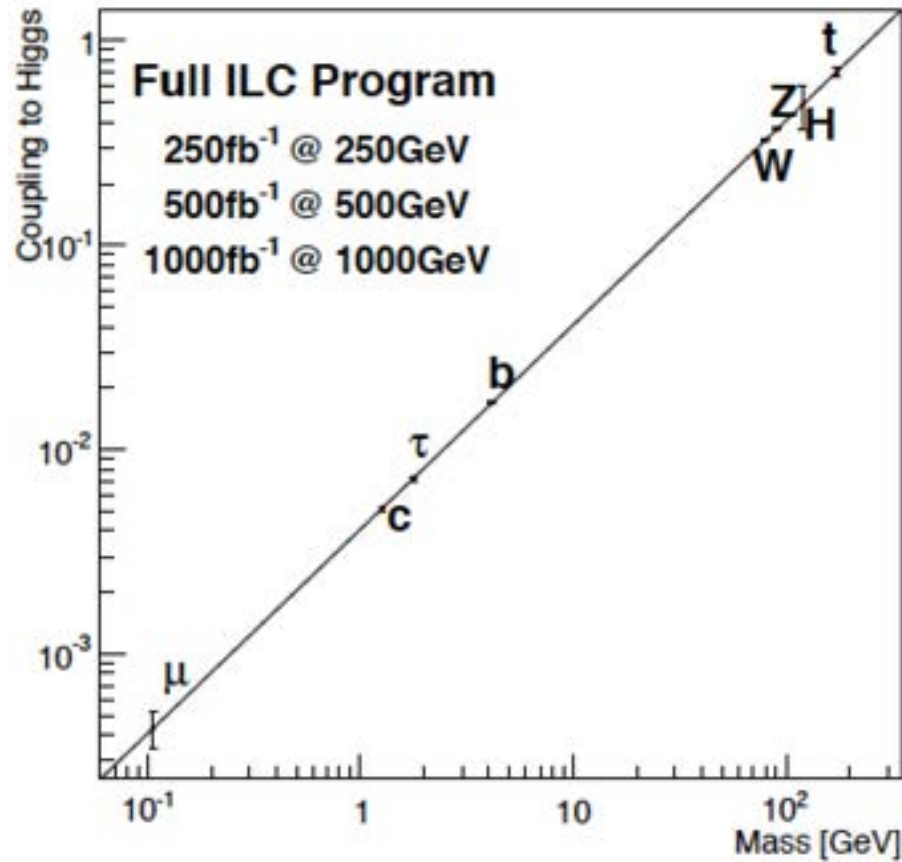
physics menu

Energy	Reaction	Physics Goal	Polarization
91 GeV	$e^+e^- \rightarrow Z$	ultra-precision electroweak	A
160 GeV	$e^+e^- \rightarrow WW$	ultra-precision W mass	H
250 GeV	$e^+e^- \rightarrow Zh$	precision Higgs couplings	H
350–400 GeV	$e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$	top quark mass and couplings	A
	$e^+e^- \rightarrow WW$	precision W couplings	H
	$e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h$	precision Higgs couplings	L
500 GeV	$e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$	precision search for Z'	A
	$e^+e^- \rightarrow t\bar{t}h$	Higgs coupling to top	H
	$e^+e^- \rightarrow Zh\bar{h}$	Higgs self-coupling	H
	$e^+e^- \rightarrow \tilde{\chi}\tilde{\chi}$	search for supersymmetry	B
	$e^+e^- \rightarrow AH, H^+H^-$	search for extended Higgs states	B
700–1000 GeV	$e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}hh$	Higgs self-coupling	L
	$e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}VV$	composite Higgs sector	L
	$e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}t\bar{t}$	composite Higgs and top	L
	$e^+e^- \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}^*$	search for supersymmetry	B

ILC: precision of Higgs coupling

Mode	LHC	ILC(250)	ILC500	ILC(1000)
WW	4.1 %	1.9 %	0.24 %	0.17 %
ZZ	4.5 %	0.44 %	0.30 %	0.27 %
$b\bar{b}$	13.6 %	2.7 %	0.94 %	0.69 %
gg	8.9 %	4.0 %	2.0 %	1.4 %
$\gamma\gamma$	7.8 %	4.9 %	4.3 %	3.3 %
$\tau^+\tau^-$	11.4 %	3.3 %	1.9 %	1.4 %
$c\bar{c}$	–	4.7 %	2.5 %	2.1 %
$t\bar{t}$	15.6 %	14.2 %	9.3 %	3.7 %
$\mu^+\mu^-$	–	–	–	16 %
self	–	–	104%	26 %
BR(invis.)	< 9%	< 0.44 %	< 0.30 %	< 0.26 %
$\Gamma_T(h)$	20.3%	4.8 %	1.6 %	1.2 %

ILC: precision of Higgs coupling



Literatur:

G. Altarelli, M. Grünewald, *Precision Electroweak Tests of the Standard Model*, Phys. Rept. 403-404 (2004), 189-201, hep-ph/0404165

K. Desch, N. Wermes, *Das Higgs-Boson: wie nahe dran ist LEP?*, Physikalische Blätter 56, Vol. 4 (2000) 35-39.

S. Bethke, *Standard Model Physics at LEP*, hep-ex/0001023.

.... **kompletter Überblick über LEP Physik** in: Phys. Rept. 403-404 (2004)

LEP Electroweak Working Group: <http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG>

www.linearcollider.org

nächste Vorlesung: „QCD und Jet-Physik in e^+e^- Kollisionen“, 18.5.15