

Suche nach Leptoquarks mit dem ZEUS-Detektor bei HERA



Universität Hamburg

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Antje Hüttmann
Peter Schleper
Jolanta Sztuk-Dambietz



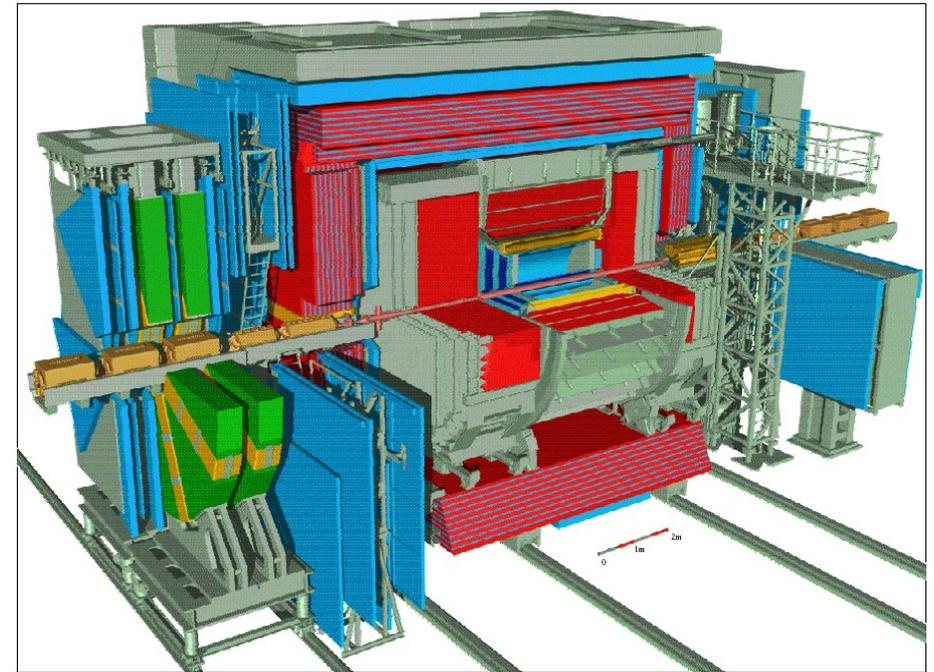
BMBWF - Förderschwerpunkt
Elementarteilchenphysik
Großgeräte der physikalischen
Grundlagenforschung

DPG-Tagung
München, 12. März 2009

Gliederung

- HERA und ZEUS
- Tiefinelastische Streuung (DIS)
- Einführung ins Leptoquark-Modell
- Suche nach Leptoquark-Resonanzen
- Massengrenzen
- Vergleich mit anderen Experimenten
- Zusammenfassung

Der ZEUS-Detektor bei HERA

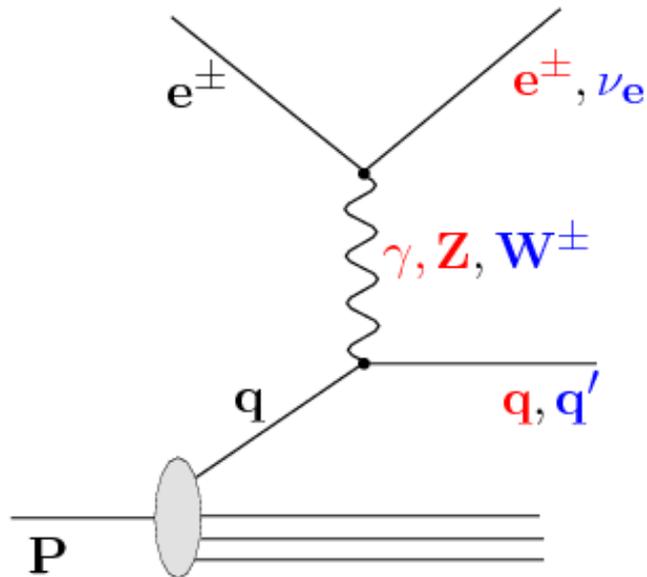


- HERA-II-Daten (2003-2007) analysiert, e^\pm links- oder rechtshändig polarisiert
- Kombination mit HERA-I-Daten (1994-2000), e^\pm unpolarisiert

Datensatz	L_{int} [pb^{-1}]	Pol. [%]	\sqrt{s} [GeV]
03-07 LH e^+	74	-37	318
03-07 RH e^+	97	+32	318
04-06 LH e^-	105	-27	318
04-06 RH e^-	79	+30	318
99-00 e^+	66	0	318
98-99 e^-	17	0	318
94-97 e^+	49	0	301

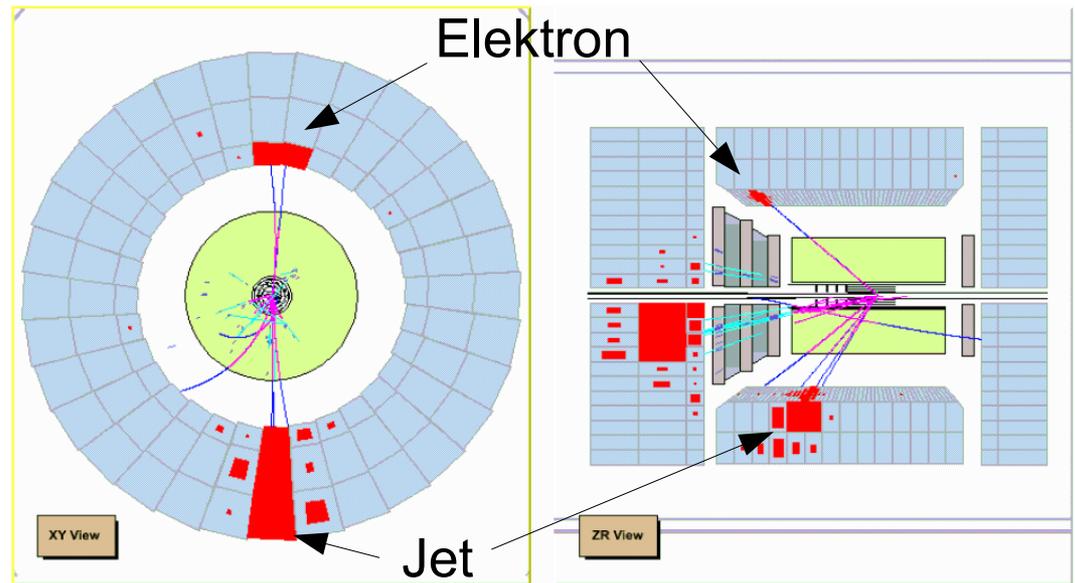
- **ZEUS-Detektor** ist Universaldetektor
- **Uran-Kalorimeter**, Auflösung:
 $\sigma_E/E = 0.35/(E[\text{GeV}]^{1/2})$ hadronisch
 $\sigma_E/E = 0.18/(E[\text{GeV}]^{1/2})$ elektromagn.
- Zentrale **Spurkammer**
- Weitere Komponenten

Tiefunelastische Streuung (DIS)



Es wurden Ereignisse des **neutralen Stromes** und des **geladenen Stromes** selektiert

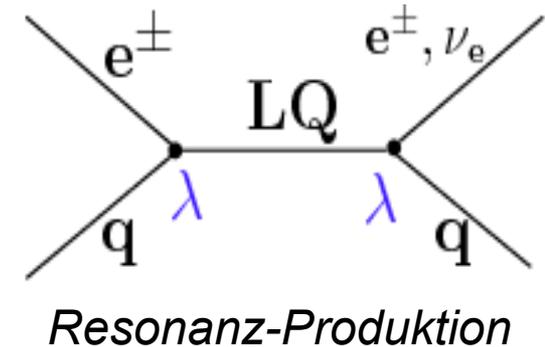
- Q^2 : Bosonvirtualität
- x : Bruchteil des Protonimpulses, der vom getroffenen Parton q getragen wird
- y : Energieübertrag/max. Energieübertrag im Protonruhesystem
- Zusammenhang: $Q^2 = x \cdot y \cdot s$



Tiefunelastisches Ereignis des neutralen Stromes mit $Q^2=10000 \text{ GeV}^2$

Einführung ins Leptoquark-Modell

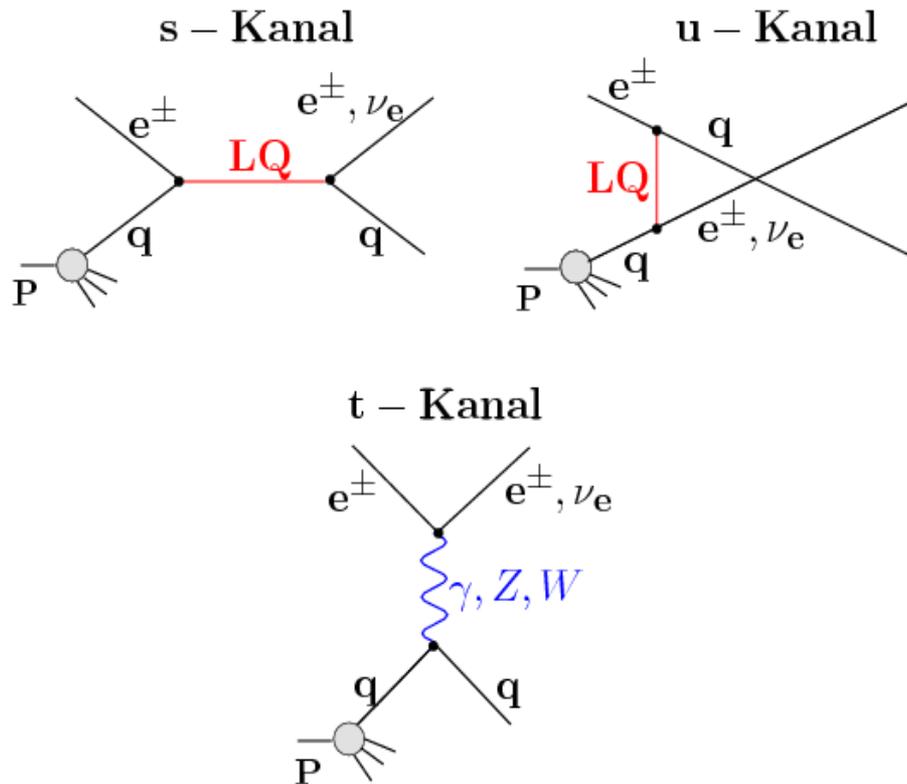
- Leptoquarks tragen sowohl Lepton- als auch Baryon-Zahl → HERA besonders geeignet für die Suche nach Leptoquarks
- Fermion-Zahl: $F=L+3B$, ($F=0,2$)
- Das Buchmüller-Rückl-Wyler-Modell:
 - Standardmodell-Symmetrie erhalten
 - Lepton- und Baryonenzahl erhalten
 - Nur Kopplung an links- oder an rechtshändige Fermionen
 - Keine flavor-verletzenden Kopplungen
 - → 7 skalare und 7 vektorielle Leptoquarks der 1. Generation
 - Alle 14 LQs koppeln an e_q , 2 skalare und 2 vektorielle LQs auch an ν_q



Der Leptoquark-Wirkungsquerschnitt

- **Totaler Wirkungsquerschnitt:**

$$\sigma(e^\pm p) = \sigma_{SM} + \sigma_{s/SM}^{Int} + \sigma_{u/SM}^{Int} + \sigma_s + \sigma_u$$



- Für $M_{LQ} \leq \sqrt{s}$ dominiert der **s-Kanal**

Winkelabhängigkeit:

$$y = 0.5 (1 - \cos\theta^*)$$

(θ^* : Lepton-Sreuwinkel im Lepton-Quark-Schwerpunktsystem)

- **Skalare** Leptoquarks:

$$\left. \frac{d\sigma}{dy} \right|_{\text{skalar}} : \text{unabhängig von } y$$

- **Vektorielle** Leptoquarks:

$$\left. \frac{d\sigma}{dy} \right|_{\text{vekt.}} \sim (1 - y)^2$$

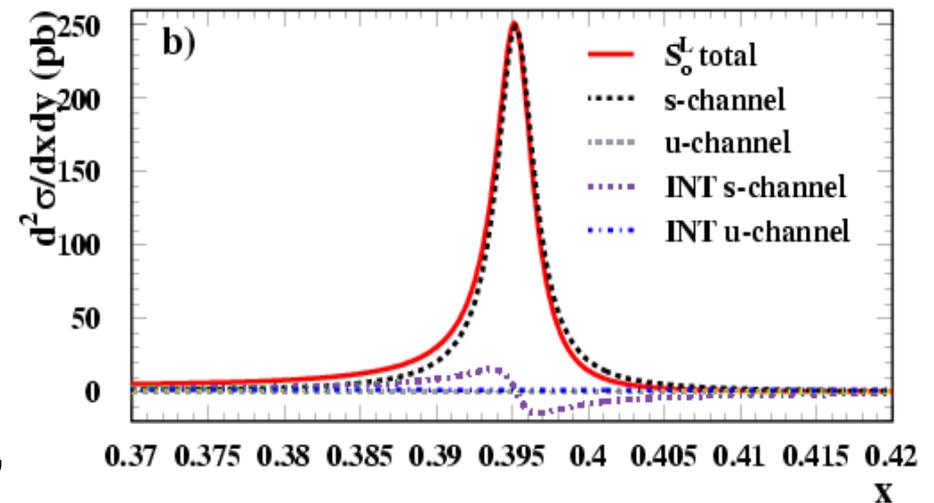
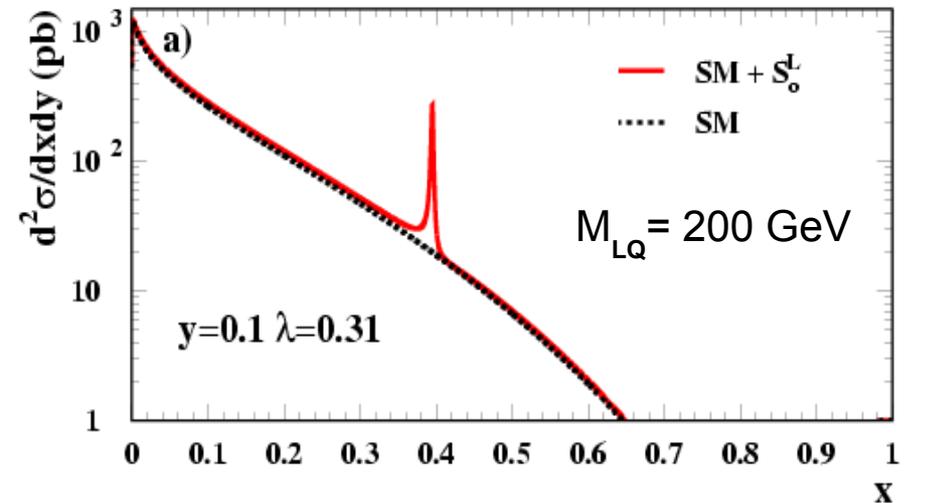
- **NC-DIS-Untergrund:**

$$\left. \frac{d\sigma}{dy} \right|_{SM} \sim \frac{1}{y^2}$$

Bei **hohem y** ($\cos\theta^*$ negativ):
SM-Untergrund klein
→ empfindliche LQ-Suche

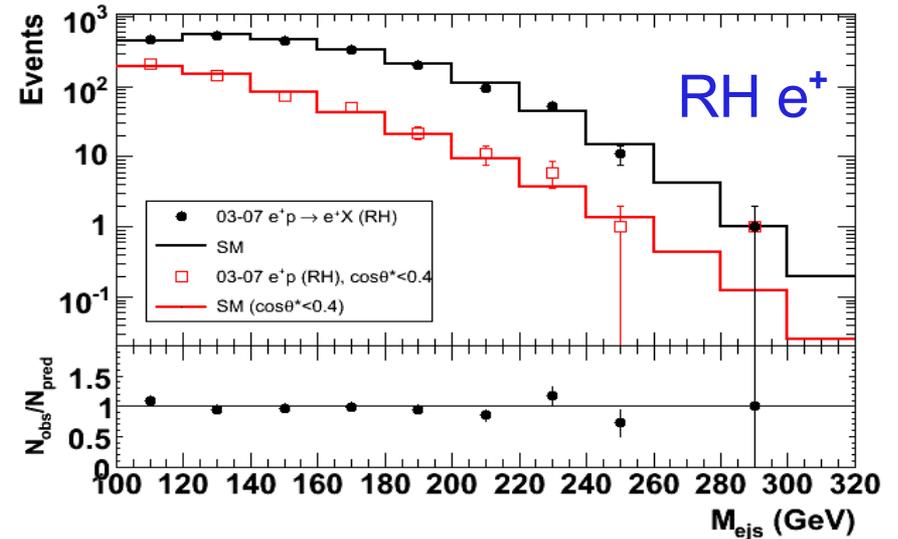
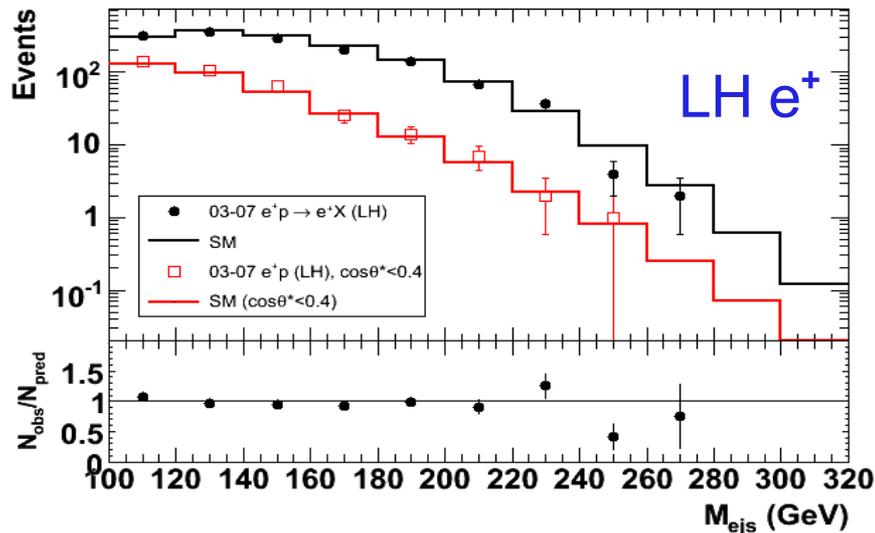
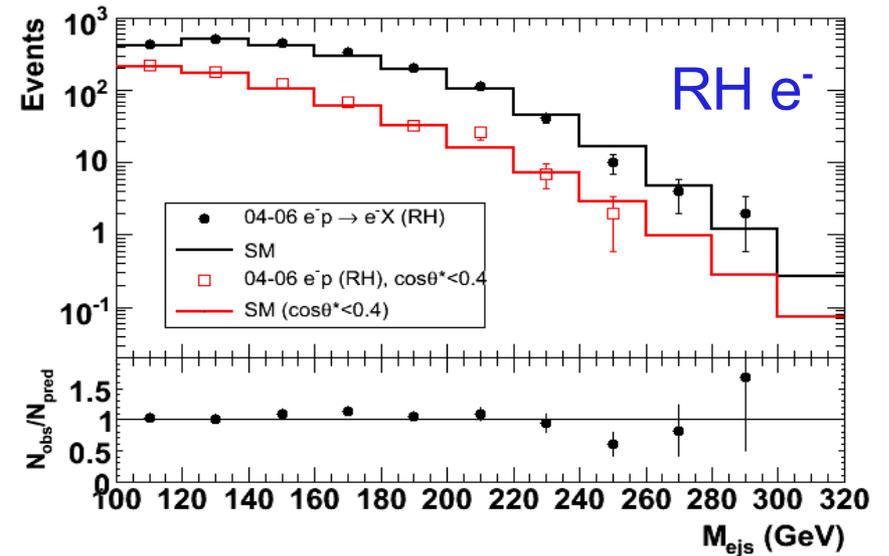
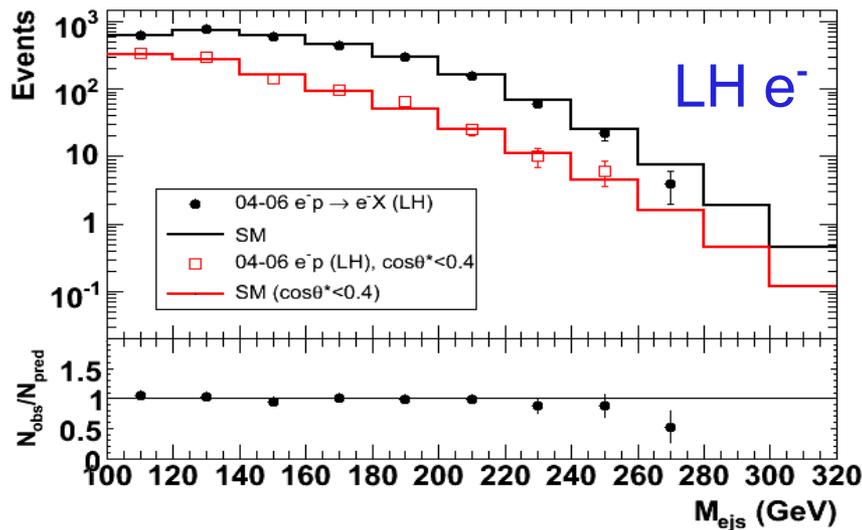
Invariante Masse

- Die **invariante Masse** wird aus dem Lepton und allen Jets im Endzustand berechnet
- Ein Leptoquark zusätzlich zum Standardmodell würde zu einem „**Peak**“ in der Verteilung der **invarianten Masse** führen
- **Ereignisselektion:**
 - $Q^2 > 2500 \text{ GeV}^2$ (NC),
 $Q^2 > 700 \text{ GeV}^2$ (CC) → hohes Q^2
 - **NC:** $x > 0.1$ → hohe Masse $M=(x \cdot s)^{1/2}$
 - Endzustandstopologie:
 - Elektron (NC), fehlender Transversalimpuls (CC)
 - Jets (führender Jet mit $p_T > 15 \text{ GeV}$ (NC),
 $p_T > 10 \text{ GeV}$ (CC))



Verteilungen für die invariante Masse (NC)

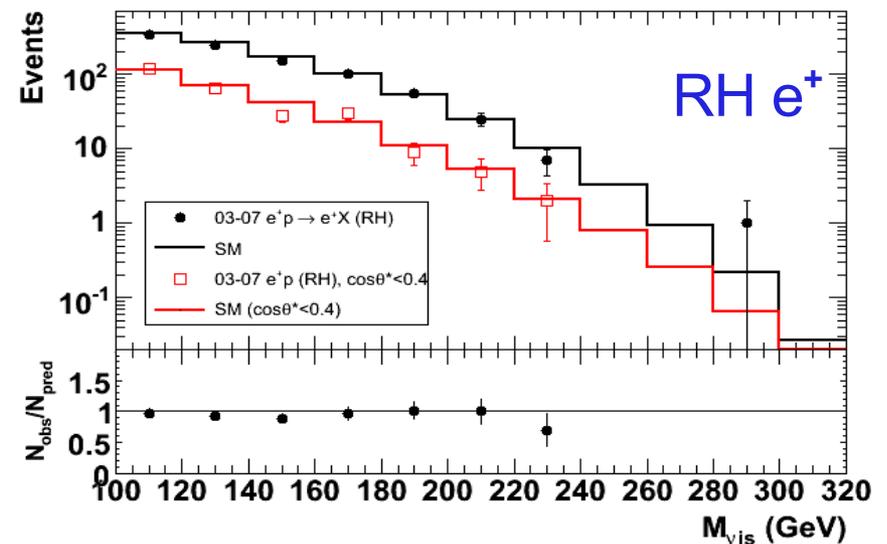
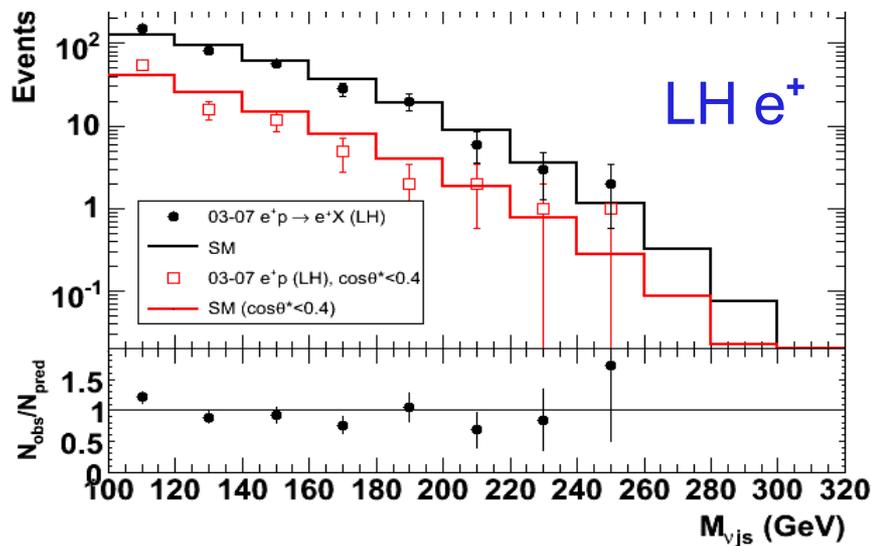
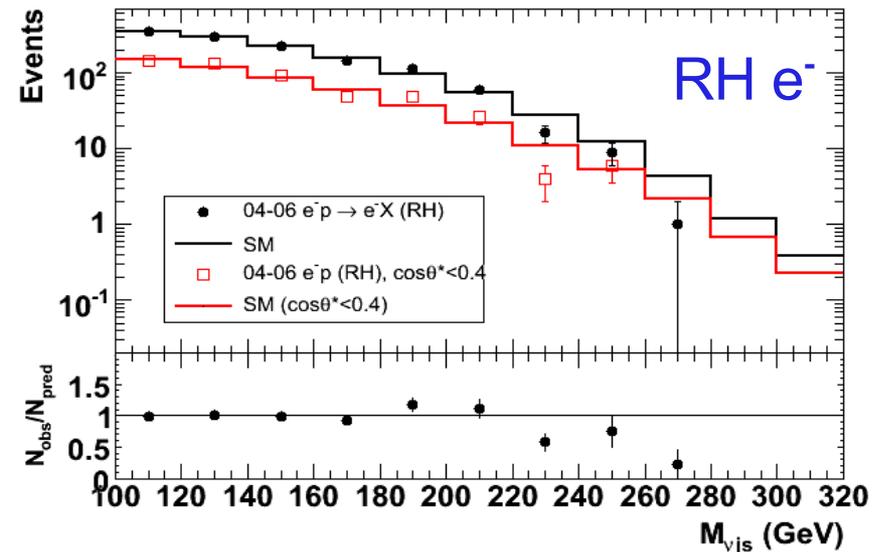
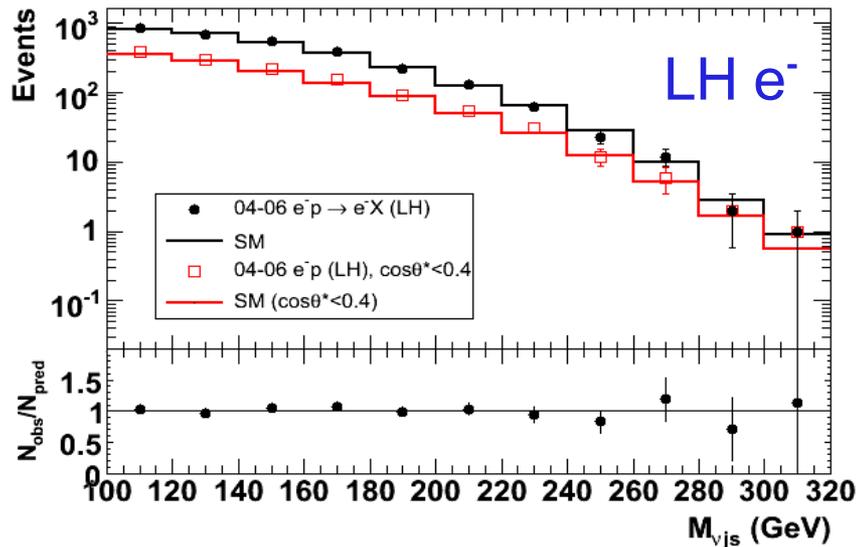
In rot: mit Schnitt auf $\cos\theta^* < 0.4$



Gute Übereinstimmung von Daten und MC → keine Hinweise auf Leptoquarks

Verteilungen für die invariante Masse (CC)

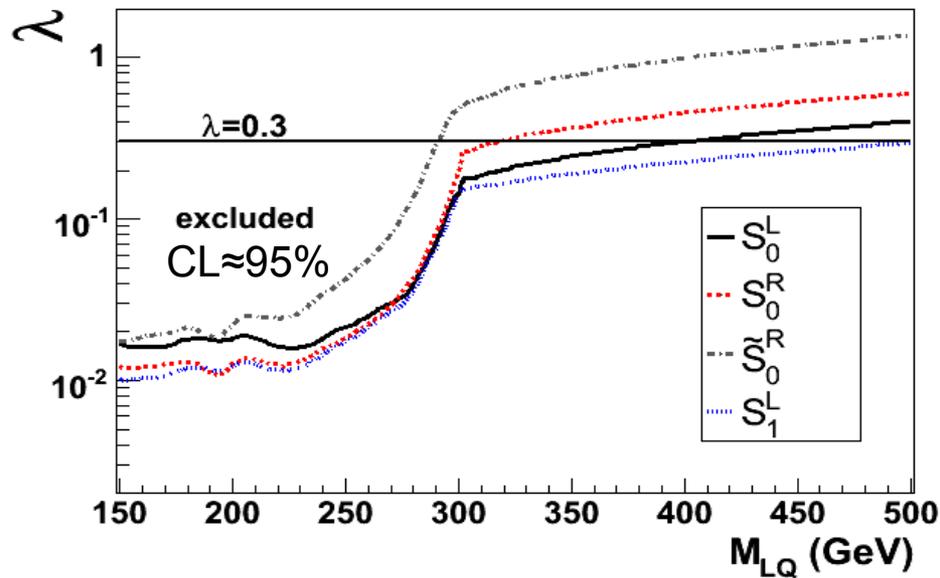
In *rot*: mit Schnitt auf $\cos\theta^* < 0.4$



→ keine Hinweise auf Leptoquarks

Grenzen für Leptoquarks mit F=2

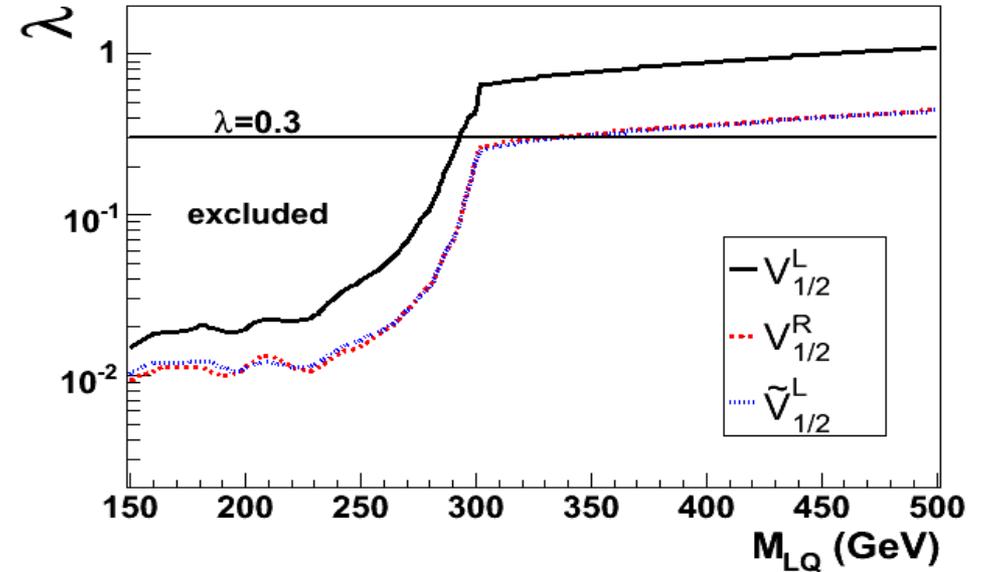
- Elektromagnetische Kopplung: $\lambda = \sqrt{4\pi\alpha} \approx 0.3$



Skalare LQs

Mit $\lambda=0.3$:

$$M_{LQ} > 290 - 504 \text{ GeV}$$



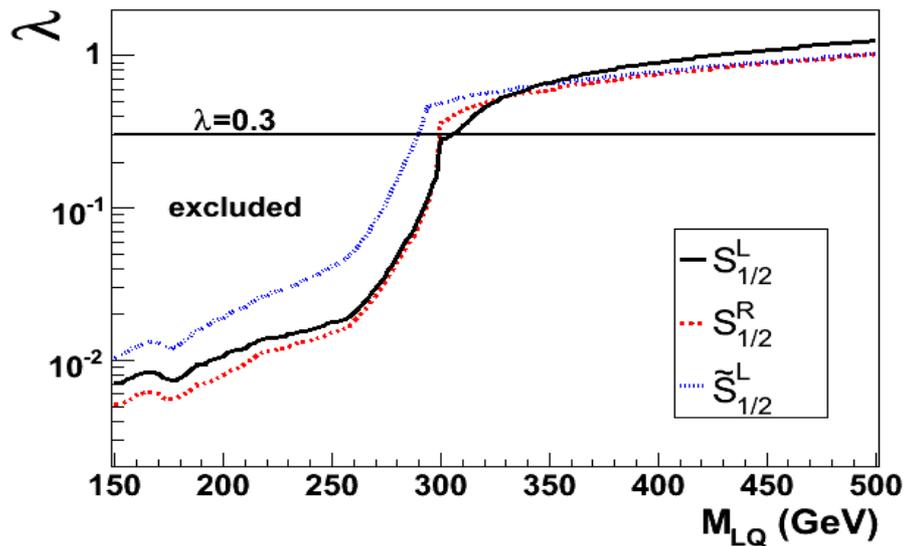
Vektorielle LQs

Mit $\lambda=0.3$:

$$M_{LQ} > 292 - 334 \text{ GeV}$$

- Grenzen auch oberhalb von $\sqrt{s} = 318 \text{ GeV}$ durch virtuellen s-Kanal und u-Kanal
- Systematische Unsicherheiten (Energiekalibration, Luminosität, PDFs,...) werden berücksichtigt

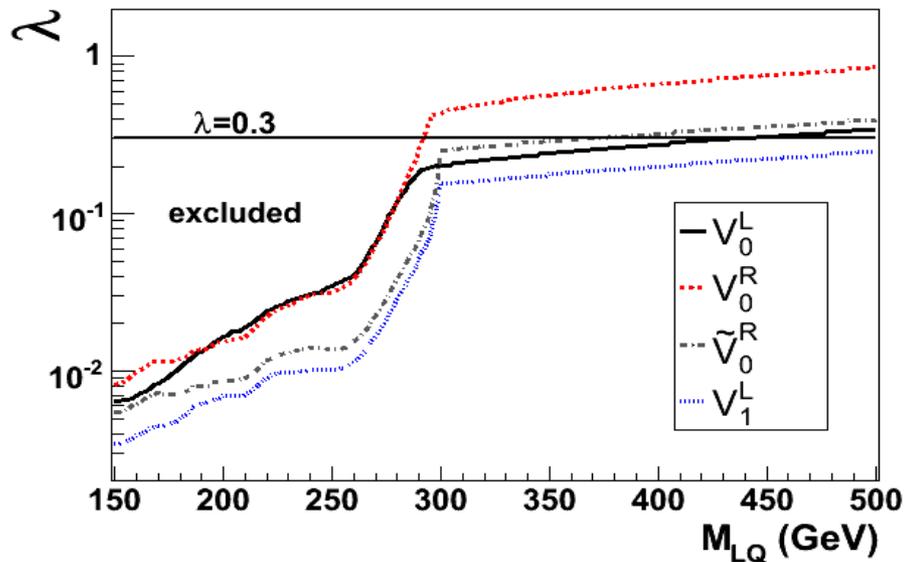
Grenzen für Leptoquarks mit $F=0$



Skalare LQs

Mit $\lambda=0.3$:

$$M_{LQ} > 288 - 304 \text{ GeV}$$



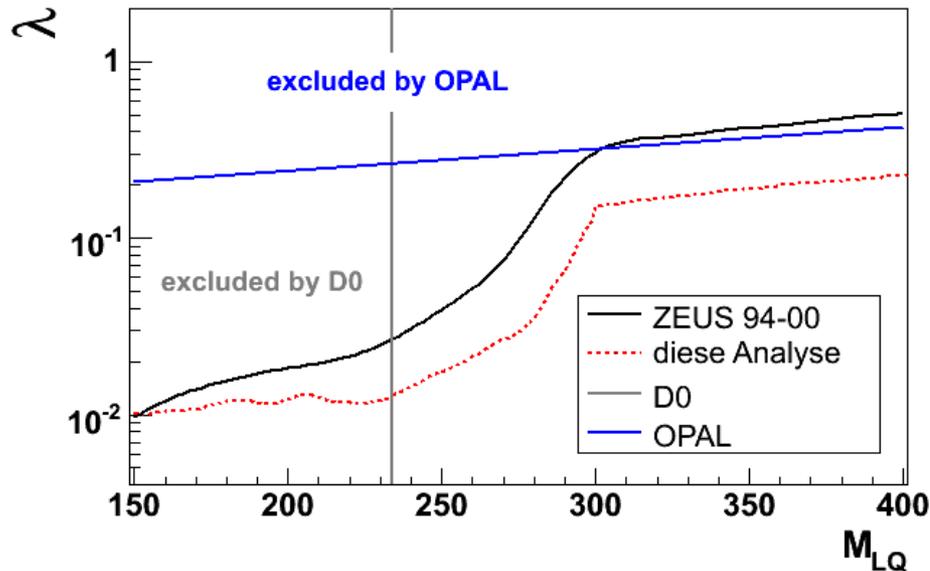
Vektorielle LQs

Mit $\lambda=0.3$:

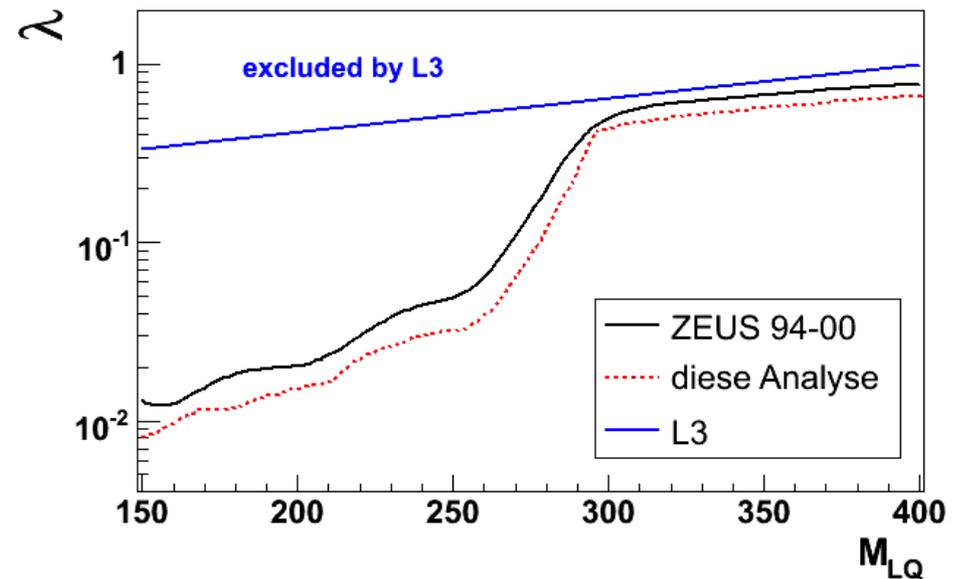
$$M_{LQ} > 290 - 608 \text{ GeV}$$

Vergleich mit anderen Experimenten

$S_1^L (F=2)$



$V_0^R (F=0)$



- **ZEUS-Massengrenzen** für Leptoquarks bei $\lambda=0.3$:
 - ZEUS 94-00: $M_{LQ} > 273 - 386$ GeV
 - diese Analyse (alle HERA-Daten): $M_{LQ} > 288 - 608$ GeV
- **OPAL/L3**: indirekter t/u-Kanal-Effekt in $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$, Massengrenzen für **alle Leptoquarks in Abhängigkeit von λ**
- **D0**: Leptoquark-Paarproduktion \rightarrow Massengrenzen für **skalare Leptoquarks unabhängig von λ**

Zusammenfassung

- ZEUS-HERA-Daten mit einer Gesamtluminosität von $L=487 \text{ pb}^{-1}$ wurden analysiert
- **Keine Hinweise auf Leptoquarks** gefunden
- Grenzen für die Yukawa-Kopplung λ als Funktion der LQ-Masse wurden bestimmt
- Für eine Kopplung von $\lambda=0.3$ ($\hat{=}$ elektromagnetische Kopplung) ergeben sich als **Massengrenzen: $M_{LQ} > 288 - 608 \text{ GeV}$**
- Die bestimmten Ausschlussgrenzen sind vergleichbar mit den Grenzen anderer Experimente und in einigen Regionen besser

Backup Slides

Leptoquarks in Aachen-Notation

Model	Fermion number F	Charge Q	$BR(LQ \rightarrow e^\pm q)$ β	Coupling	Squark type
S_0^L	2	-1/3	1/2	$e_L u$ νd	\tilde{d}_R
S_0^R	2	-1/3	1	$e_R u$	
\tilde{S}_0	2	-4/3	1	$e_R d$	
$S_{1/2}^L$	0	-5/3 -2/3	1 0	$e_L \bar{u}$ $\nu \bar{u}$	
$S_{1/2}^R$	0	-5/3 -2/3	1 1	$e_R \bar{u}$ $e_R \bar{d}$	
$\tilde{S}_{1/2}$	0	-2/3 +1/3	1 0	$e_L \bar{d}$ $\nu \bar{d}$	$\overline{\tilde{u}_L}$ $\overline{\tilde{d}_L}$
S_1	2	-4/3 -1/3 +2/3	1 1/2 0	$e_L d$ $e_L u$ νd νu	
V_0^L	0	-2/3	1/2	$e_L \bar{d}$ $\nu \bar{u}$	
V_0^R	0	-2/3	1	$e_R \bar{d}$	
\tilde{V}_0	0	-5/3	1	$e_R \bar{u}$	
$V_{1/2}^L$	2	-4/3 -1/3	1 0	$e_L d$ νd	
$V_{1/2}^R$	2	-4/3 -1/3	1 1	$e_R d$ $e_R u$	
$\tilde{V}_{1/2}$	2	-1/3 +2/3	1 0	$e_L u$ νu	
V_1	0	-5/3 -2/3 +1/3	1 1/2 0	$e_L \bar{u}$ $e_L \bar{d}$ $\nu \bar{u}$ $\nu \bar{d}$	

Limit Setting

- Standard Model MC is reweighted using theoretical cross sections to include the expectation from leptoquark signal
- For each data set, the $M_{LQ} - \cos\theta^*$ plane is divided into 170 bins ($\cos\theta^*$: lepton scattering angle in the lepton-quark c.m.s.)
- **2 dimensional likelihood** is the product of the Poisson probabilities of all 170*(#data sets) bins (Poisson probability = probability to observe N_i events while μ_i are expected)

$$P(M_{LQ}, \lambda_{LQ}) = \prod_{\text{Bins}} \frac{e^{-\mu_i(\lambda)} \mu_i(\lambda)^{N_{\text{obs}}^i}}{N_{\text{obs}}^i!}$$

- **Bayesian approach:**

$$0.95 = \frac{\int_0^{\lambda_{\text{lim}}} P(\lambda) d\lambda^2}{\int_0^{\infty} P(\lambda) d\lambda^2} \rightarrow \text{CL close to 95\%}$$

Systematic Uncertainties

- **Systematic variation** of expected number of events:

$$\mu'_i = (s_i + b_i)' = (s_i + b_i) \prod_j (1 + c_{ij})^{\delta_j}$$

c_{ij} : systematic uncertainty in bin i from source j

δ_j : Gaussian random variable

- **Gaussian** distribution for systematic uncertainties assumed
- Systematic error on SM expectation assumed to be the same as error for LQ signal
- **Likelihood function is averaged** over systematic uncertainties:

$$P(\lambda) = \int d\delta_1 G(\delta_1) \dots \int d\delta_N G(\delta_N) \cdot P(\lambda; \delta_1 \dots \delta_N)$$

$G(\delta)$ - assumed Gaussian error distribution

Referenzen für Leptoquark-Limits

- **ZEUS 94-00:** *Phys. Rev. D* 68, 052004 (2003)
- **L3:** *Phys. Lett. B* 489 (2000) 81-92
- **OPAL:** *Eur. Phys. J. C* 6, 1-18 (1999)
- **D0:** *Phys. Rev. D* 71, 071104(R) (2005)