

# Präzisionsmessung der Polarisation bei HERA II

– oder: Der Weg zu  $\delta P/P \leq 1\%$

DPG Frühjahrstagung, 10.03.2003

Jenny Böhme



- Einführung
- Das Transversale Polarimeter
  - Aufbau & Messprinzip
  - Die HERA-II-Analyse
  - Erste Polarisationsdaten vom Oktober 2002
  - MC-Studien
- Zusammenfassung und Ausblick

# Warum eine Präzisionsmessung? (I)

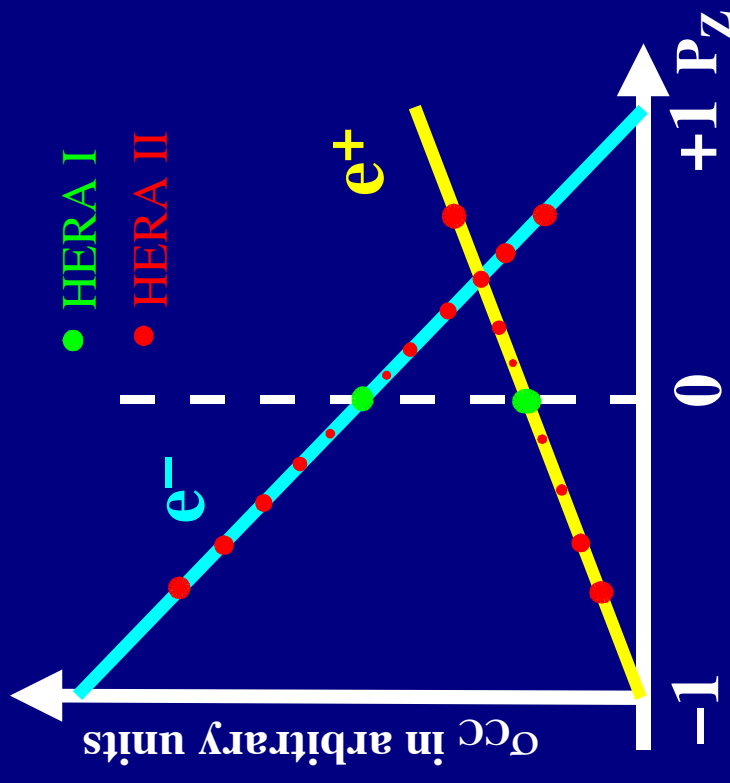
Charged-current–Wirkungsquerschnitt  
hängt linear von Polarisation ab:

- Elektronen:  $\sigma_{CC}(P) = (1-P) \sigma_{CC}(0)$
- Positronen:  $\sigma_{CC}(P) = (1+P) \sigma_{CC}(0)$

=> Kenntnis der Polarisation genauso  
wichtig wie die der Luminosität!  
Um...

- den Wirkungsquerschnitt zu messen,
- zu  $P = \pm 1$  zu extrapolieren
- und nach rechtshändigen W–Bosonen zu suchen

... brauchen wir  $\delta P/P < 1\%$ ,  
sonst ist Polarisation der dominante  
systematische Fehler bei hohem  $Q^2$ !



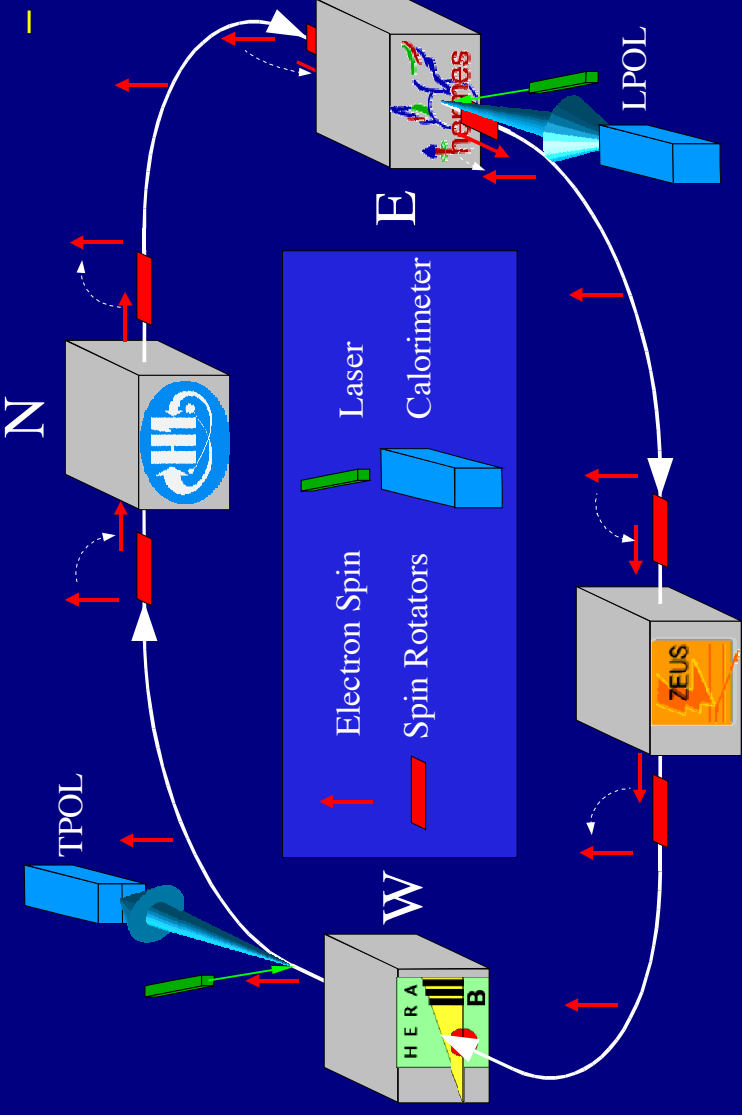
# HERA und ihre Polarimeter

- ## HERA II: zusätzliche Spinrotatoren bei H1 u. ZEUS

- TPOL: fast komplett neu

- LPOL: fast unverändert  
upgrade im nächsten

- # upgrade im nächsten shutdown



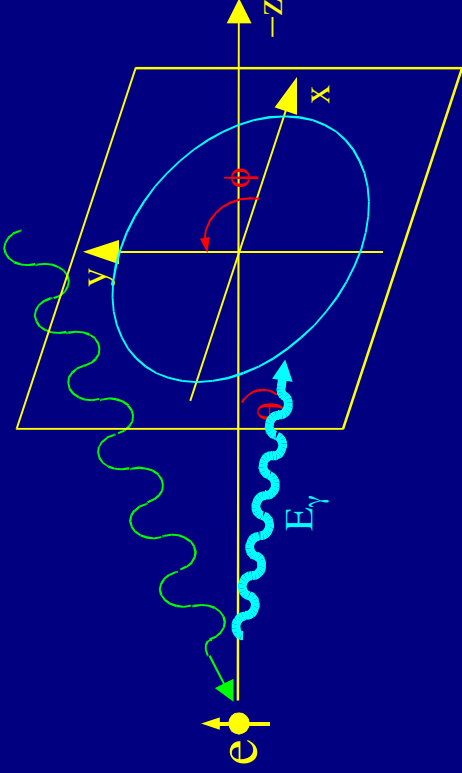
# Messprinzip: Compton–Streuung

- Kinematik durch 2 Variablen beschrieben:

- Polarwinkel  $\theta \Leftrightarrow E_\gamma$  (Photonenergie)
- Azimutalwinkel  $\phi \Rightarrow y$  (vert. Position)

$S_1, S_3$ : lin. & zirk. Laserpolarisation

- $P_Y, P_Z$ : transv. & long. Elektronpolarisation

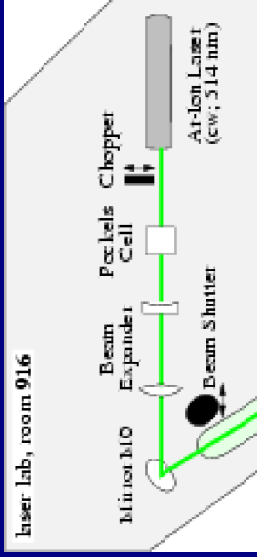


$$\frac{d^2\sigma}{dE d\phi} = \Sigma_0(E) + S_1 \Sigma_1(E) \cos 2\phi + S_3 (P_Y \Sigma_{2Y}(E) \sin \phi + P_Z \Sigma_{2Z}(E))$$

- LPOL: brauche nur Energiespektrum zu messen
- TPOL: brauche Energie- und Ortsmessung, also vollen zweifach-differentiellen Wirkungsquerschnitt

**WICHTIG:** benutze Asymmetrie zwischen  $S_3 = +1$  und  $S_3 = -1$

# TPOL: Aufbau (I)



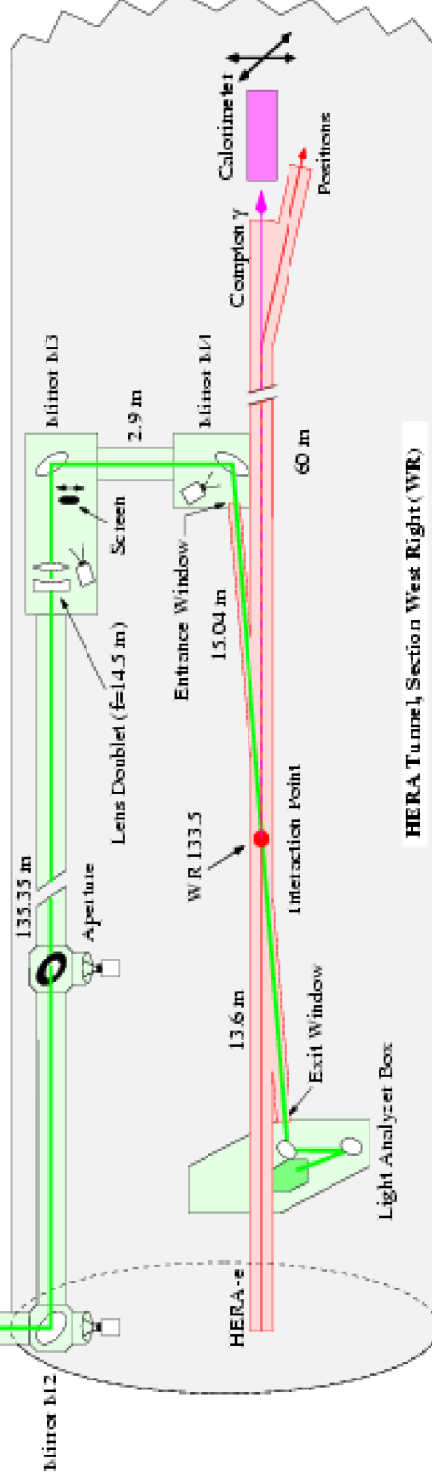
Laser:

continuous wave,  $E_\lambda = 2.4 \text{ V}$ ,  $\lambda = 514 \text{ nm}$   
 Kreuzungswinkel: 3.1 mrad

Kalorimeter:

Wolfram-Szintillator-Sampling-K.  
 einfach segmentiert (oben/unten)  
 vier Kanäle über Wellenlängenschieber  
 und Photomultiplier ausgelesen:  
 oben, unten, links, rechts

Herbert Heyne, Sept. 9, 1996  
 (heyne@desy.de)



# TPOL: Aufbau (II)

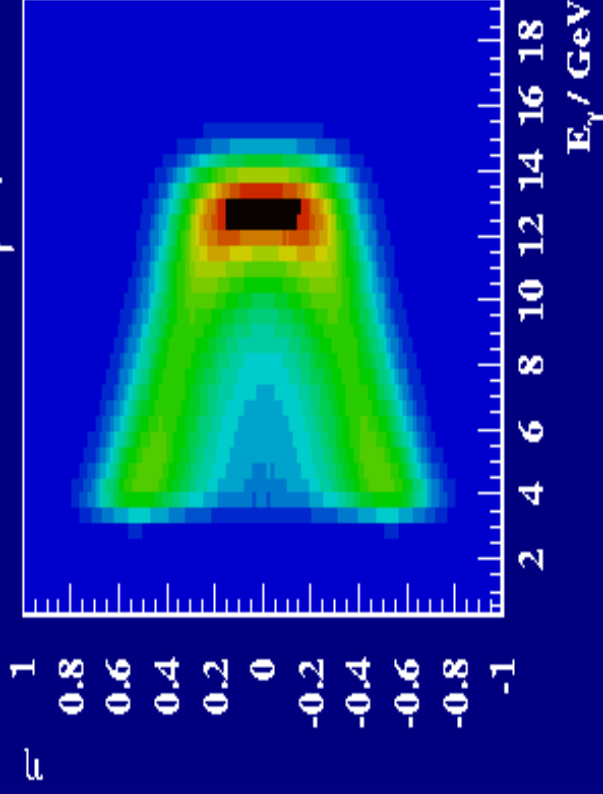
- Messgrößen:

$$E_\gamma = E_{\text{up}} + E_{\text{down}}$$

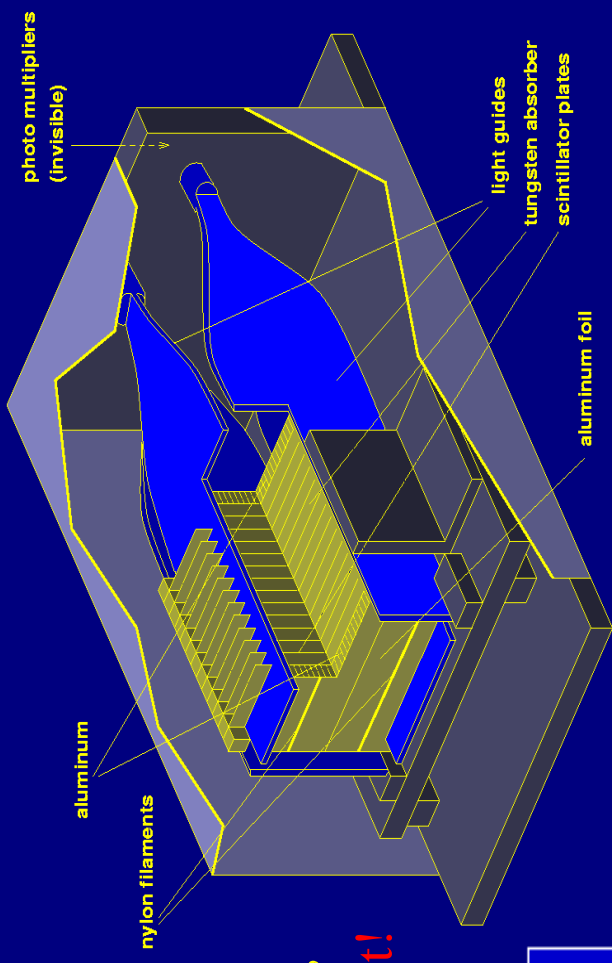
$$\eta = (E_{\text{up}} - E_{\text{down}}) / (E_{\text{up}} + E_{\text{down}}),$$

$$y = y(\eta) \Leftarrow \text{Hauptunsicherheit!}$$

$$d^2\sigma/dE_\gamma d\eta$$



Präzisionsmessung der Polarisation bei HERA II – 6



–  $\eta$ - $y$ -Transformation:

- hängt empfindlich ab von der transversalen Schauerentwicklung im Kalorimeter
- bisher: nur aus Testbeam-Messungen....

# Ablauf der Analyse

- Energiekalibration:  
1D–Energiespektrum liefert  
Comptonkante
- Fitte **Summe** der 2D–Spektren für  
Laser "LINKS" und "RECHTS"  

$$= 2\Sigma_0 + (S_{1R} + S_{1L}) \Sigma_1$$

$$\Rightarrow \text{bestimme Systemparameter –}$$

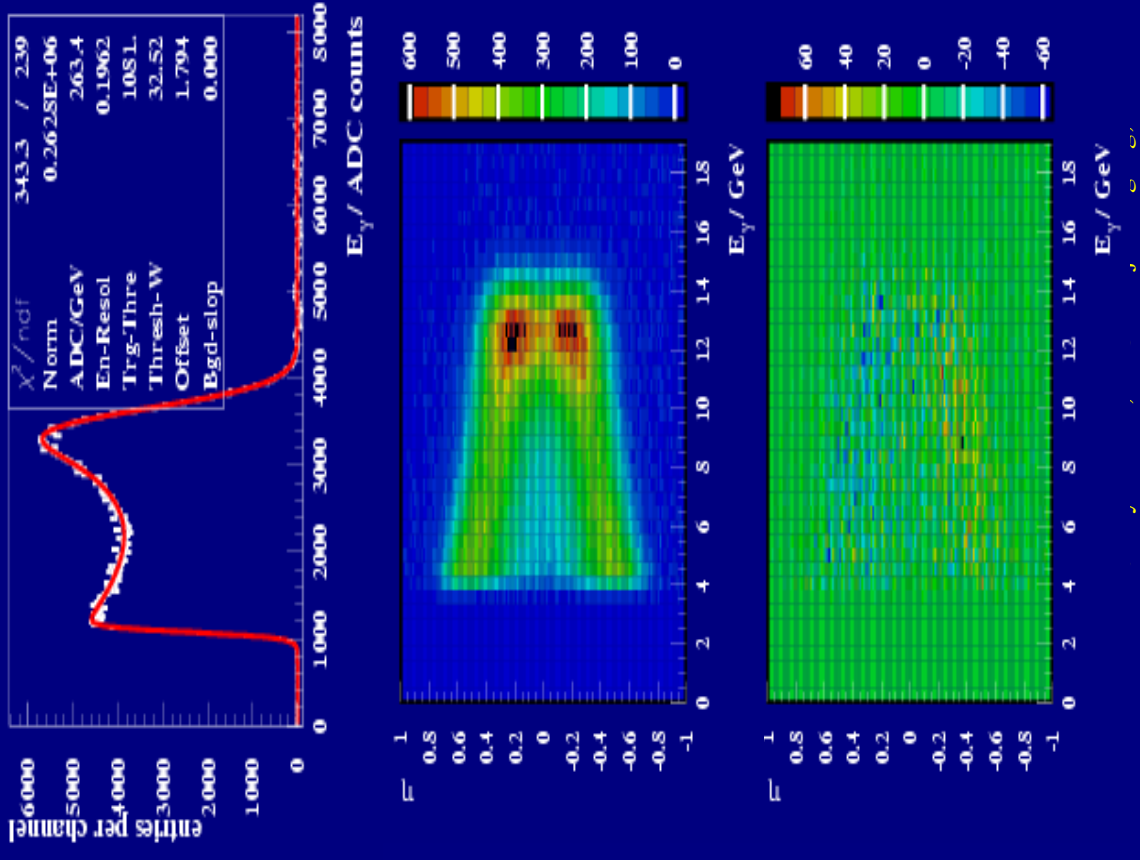
$$\text{unabhängig von}$$

$$\text{Strahlpolarisation!}$$
- Fitte **Differenz** der 2D–Spektren  
für Laser "LINKS" und  
"RECHTS"  

$$= (S_{1R} - S_{1L}) \Sigma_1 + 2 S_3 P_Y \Sigma_{2Y}$$

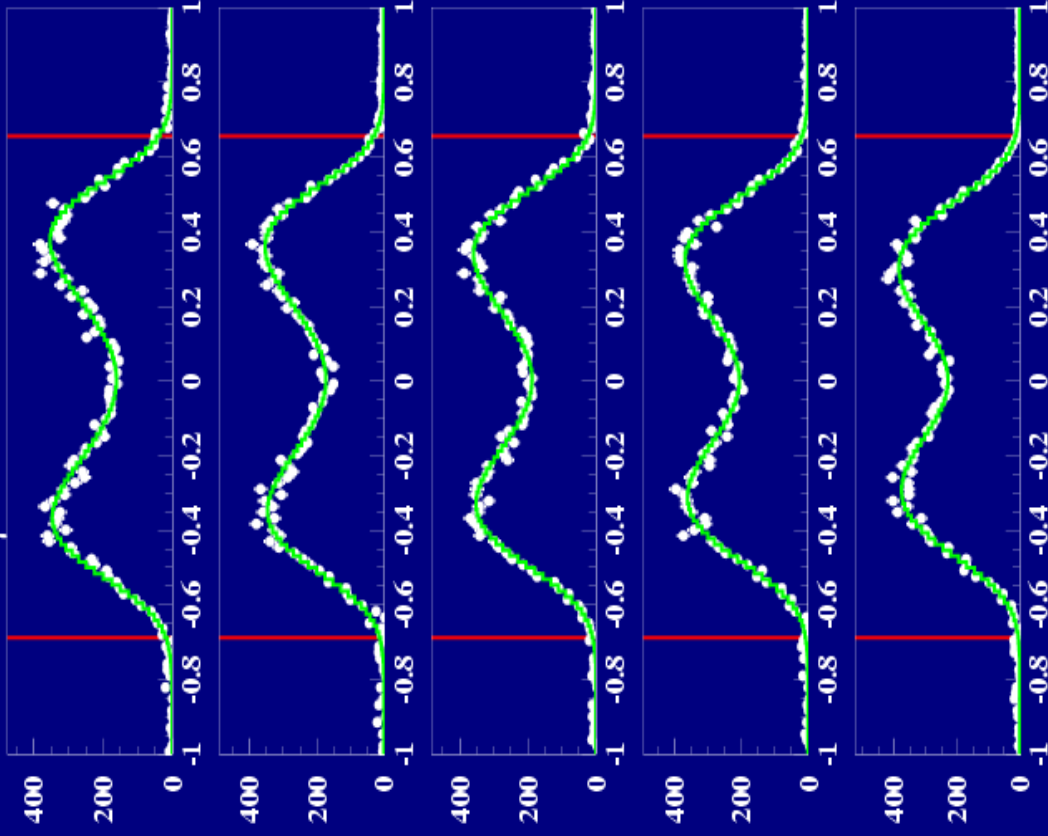
$$\Rightarrow \text{alle Systemparameter fixiert,}$$

Variiere **nur Polarisation**  
Präzisionsmessung der Polarisation bei HERA

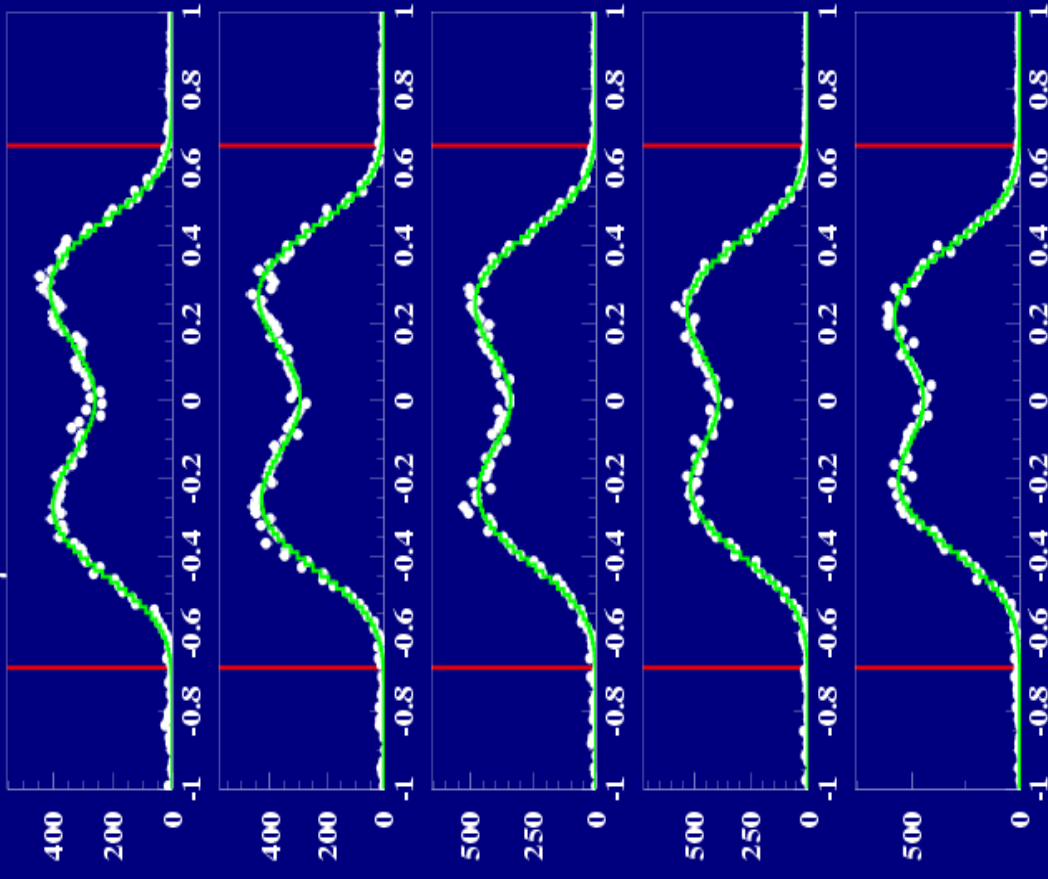


# Daten einer Minute (17.10.02): Kalibrationsfit

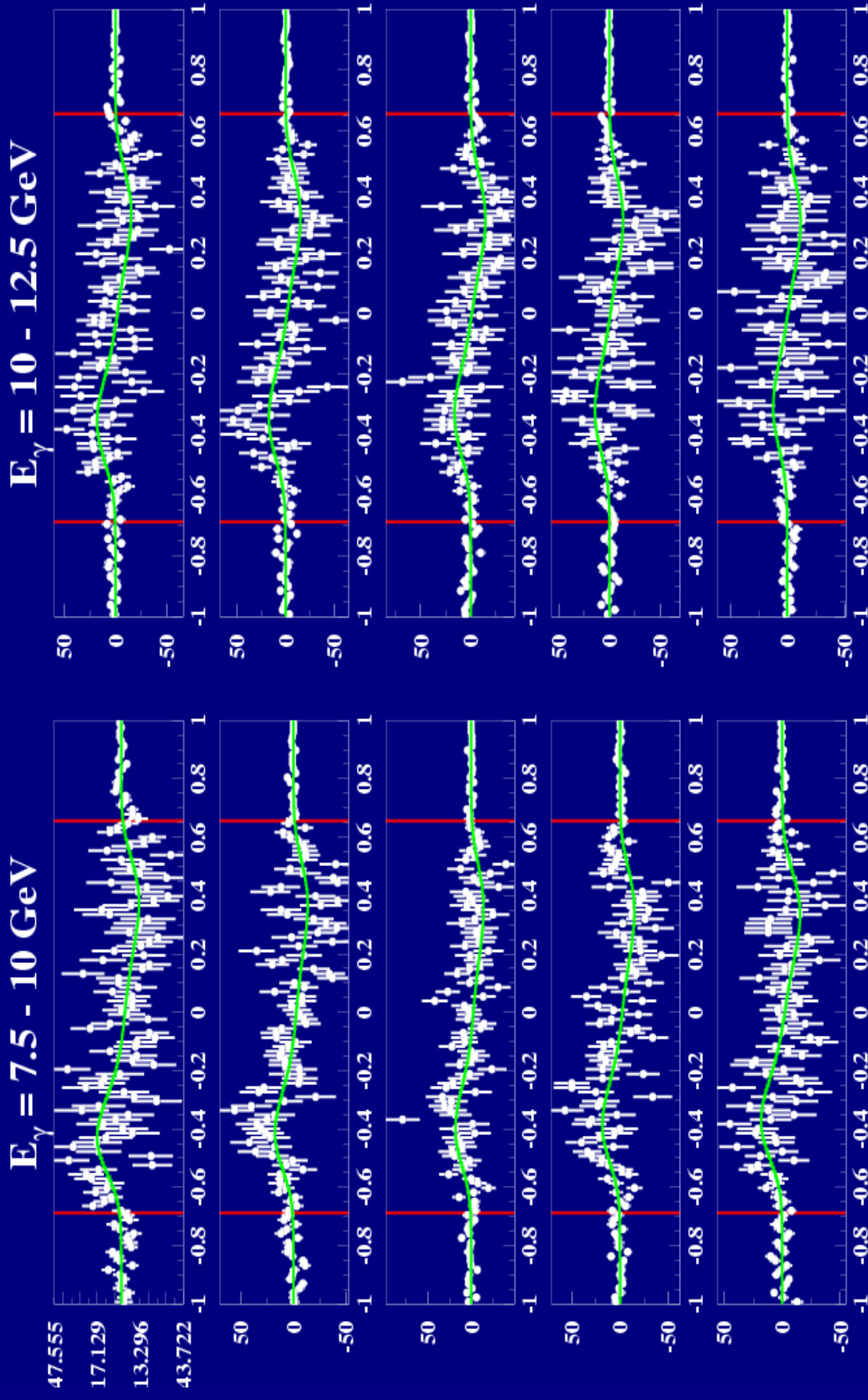
$E_\gamma = 7.5 - 10 \text{ GeV}$



$E_\gamma = 10 - 12.5 \text{ GeV}$



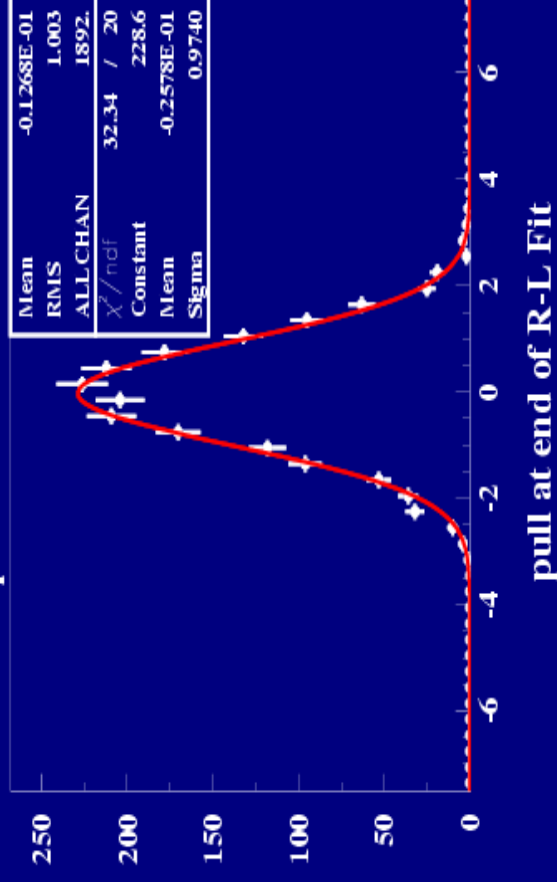
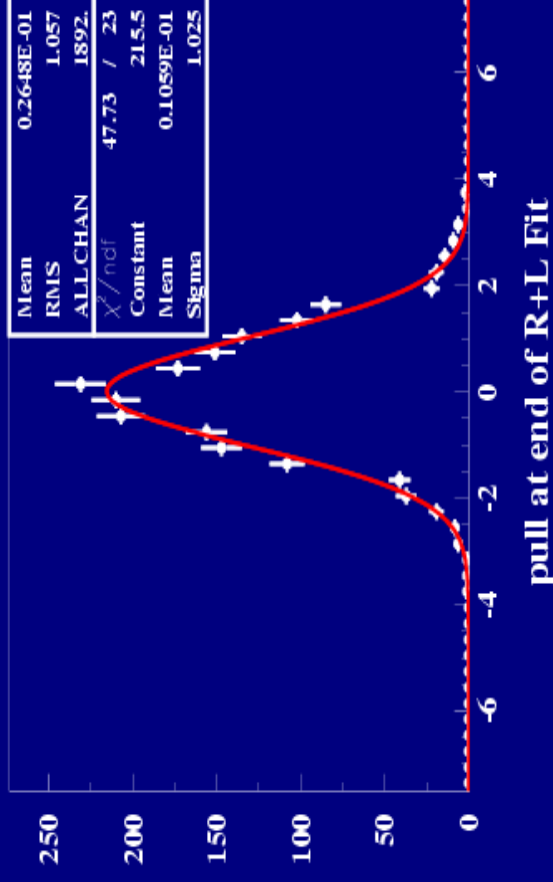
# Daten einer Minute (17.10.02): Polarisationsfit



# Ein 1-Minuten-Fit (Pullverteilungen)

- Erinnerung:
  - $\text{Pull} = (X_{\text{data}} - X_{\text{fit}}) / \sigma_{\text{data}}$
  - idealer Fit:  $\langle \text{pull} \rangle = 0$   
 $\sigma_{\text{pull}} = 1$
- hier:
  - $X$  = Bininhalt  
 d.h. jedes bin aus  
 2D-Histogramm macht einen  
 Eintrag in Pullverteilung  
 ( $\sim 2000$  bins!)
- Fazit:
  - Fit beschreibt Daten sehr gut!

Data 15610,  $\eta$ -y 7



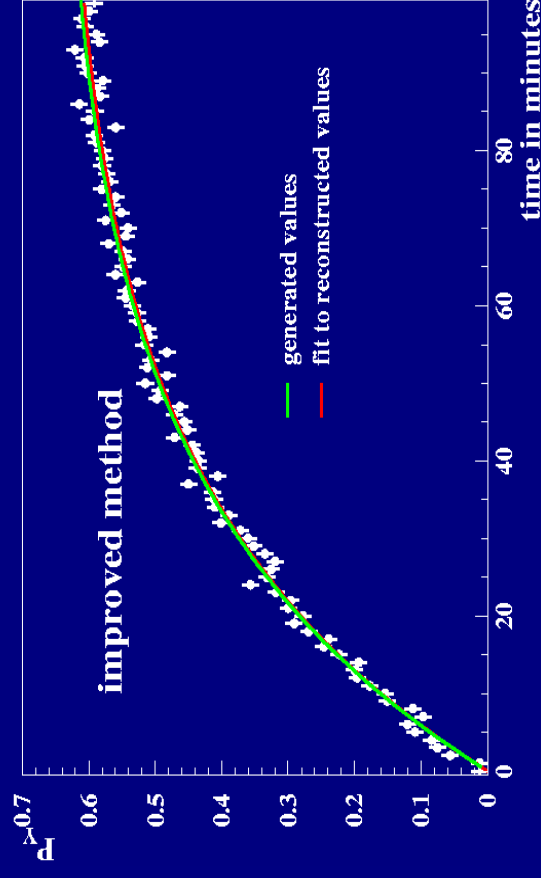
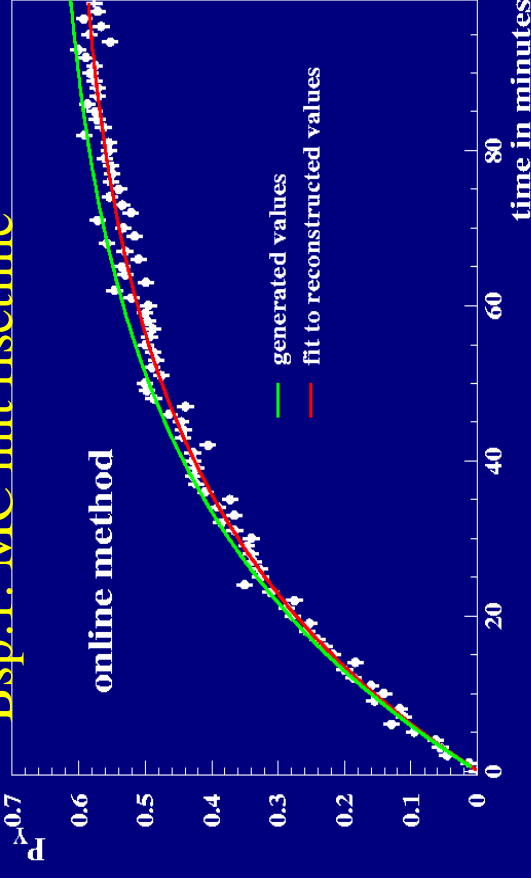
# 100-MC-Minuten (I)

- in Ermangelung von Daten: untersuche MC-runs mit stetigen Veränderungen in

- Polarisation
- Strahlposition
- "eff. Strahldurchmesser"
- lin. Laser-Polarisation
- rel. Kalibration von  $E_u$  u.  $E_d$
- $\eta$ - $\gamma$ -Transformation

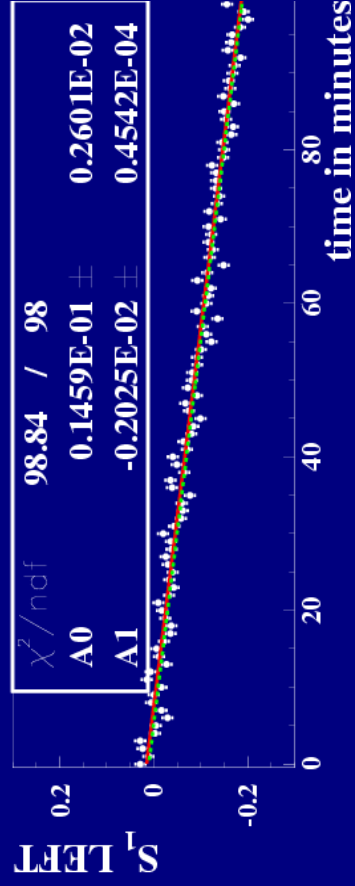
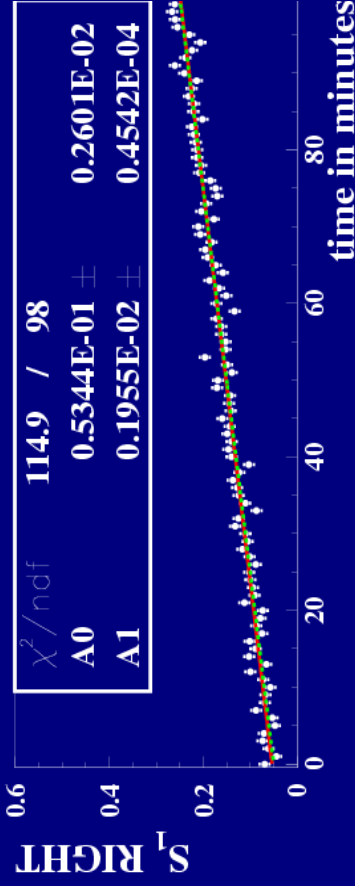
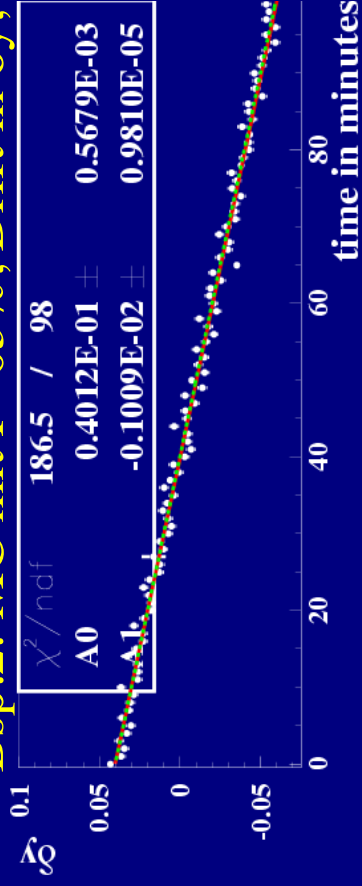
=> liefert "partielle Ableitungen"  
 $\partial P / \partial x_i$ , d.h. mit Kenntnis von  $\delta x_i$  erste Abschätzung syst. Effekte!

Bsp.1: MC mit risetime



# 100-MC-Minuten (II)

Bsp.2: MC mit P=65%, Drift in  $\delta y$ ,  $S_{1R}$ ,  $S_{1L}$ :



# Zusammenfassung & Ausblick

- $\delta P/P \leq 1\%$  nötig für Physikanalysen bei H1, ZEUS
- Upgrade des Transversalen Polarimeter:
  - nicht nur hardware, sondern auch Analyse verbessert
  - Verständnis des TPOL auf  $< 1\%$  scheint in Reichweite
- Ausblick:  
HERA hat 50% Polarisation mit 3 Spinrotatoren UND beiden Solenoiden (H1 & ZEUS) erreicht !
  - erste Daten mit  $P > 0$  ermöglichen  
Kalibration und Bestimmung des systematischen Fehlers der neuen Analyse

=> POL2000–Gruppe gratuliert HERA zum Erfolg  
der letzten Woche und arbeitet an der Analyse  
dieser Daten!

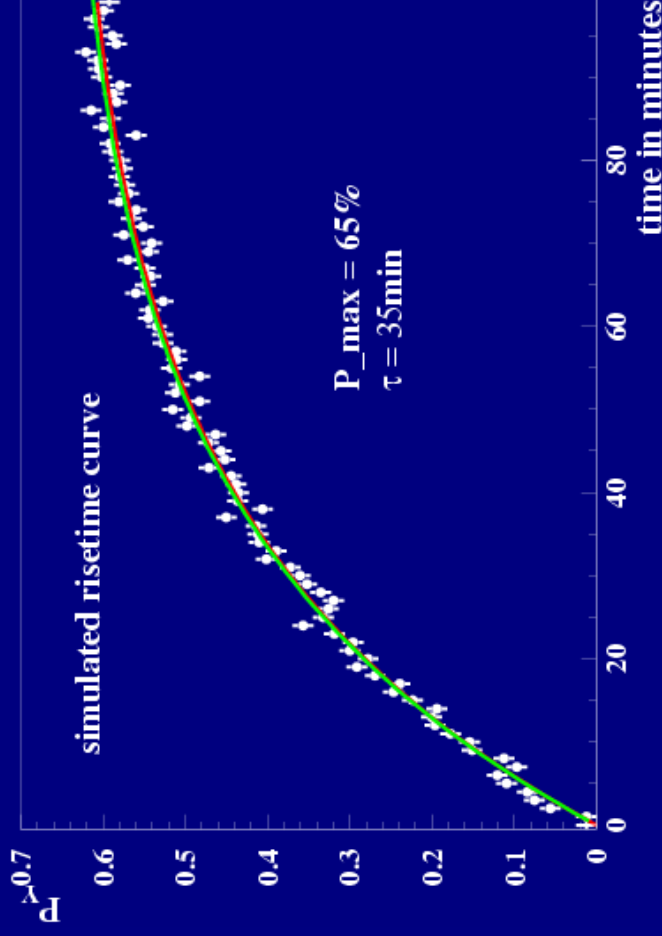
# Ein wenig Spingymnastik

- Erinnerung: Spin eines Teilchens im Magnetfeld präzediert um Magnetfeld-Richtung!
- z.B.:  $P_Y = 100\%$  , d.h. Polarisationsvektor zeigt in y-Richtung
  - B-Feld  $\parallel$  y-Achse  $\Rightarrow$  Richtung des Polarisationsvektors bleibt erhalten ✓
  - B-Feld  $\parallel$  x-Achse  $\Rightarrow$  Polarisationsvektor beginnt um x-Achse zu präzedieren  $\Rightarrow P_Y$  wird kleiner – zu gunsten von  $P_Z$  ✗
  - B-Feld  $\parallel$  z-Achse  $\Rightarrow$  Polarisationsvektor beginnt um z-Achse zu präzedieren  $\Rightarrow P_Y$  wird kleiner – zu gunsten von  $P_X$  ✗
- durch geeignete Anordnungen von Magneten kann man den Polarisationsvektor kontrolliert drehen  $\Rightarrow$  Spin-Rotatoren! ☺
- Aber: Magnetfelder lenken Elektronen auch ab  $\Rightarrow$  Synchrotronstrahlung!
- alle Magnet-Felder, die nicht genau parallel zum Polarisationsvektor sind, wirken depolarisierend ☹

Warum?

Präzisionsmessung der Polarisation bei HERA II – 14  
 $\rightarrow$  betrachte Entstehung der Polarisation!

# Wie entsteht Polarisation im Speicherring?



- Injektion: Spins der Elektronen stochastisch verteilt:  
 $N_{\uparrow} \simeq N_{\downarrow} \Rightarrow P_Y = 0$
- Sokolov–Ternov–Effekt: Synchrotronstrahlung bewirkt Spinflips mit  $R(N_{\uparrow \rightarrow \downarrow}) > R(N_{\downarrow \rightarrow \uparrow})$   
 $\Rightarrow P_Y(t) = P_{\max} (1 - e^{-t/\tau})$
- nur vertikale Dipolfelder ("flach"):  
 $P_{\max} = 92.4\%, \tau^{-1} \sim \oint 1/\rho^3 ds$   
**N.B.:  $\Rightarrow$  Messung von  $P_{\max}$ ,  $\tau$  liefert absolute Kalibration der Polarimeter!**

- ABER: reale Maschine hat auch Felder in x- und z-Richtung & Synchrotronstrahlung sorgt immer für Polarisation in Richtung des ablenkenden Feldes  $\Rightarrow$  Depolarisation, falls B nicht exakt parallel zu P

- auch Protonbunch erzeugt B-Feld  $\Rightarrow P(\text{pilot}) \neq P(\text{colliding})$

# Warum eine Präzisionsmessung? (II)

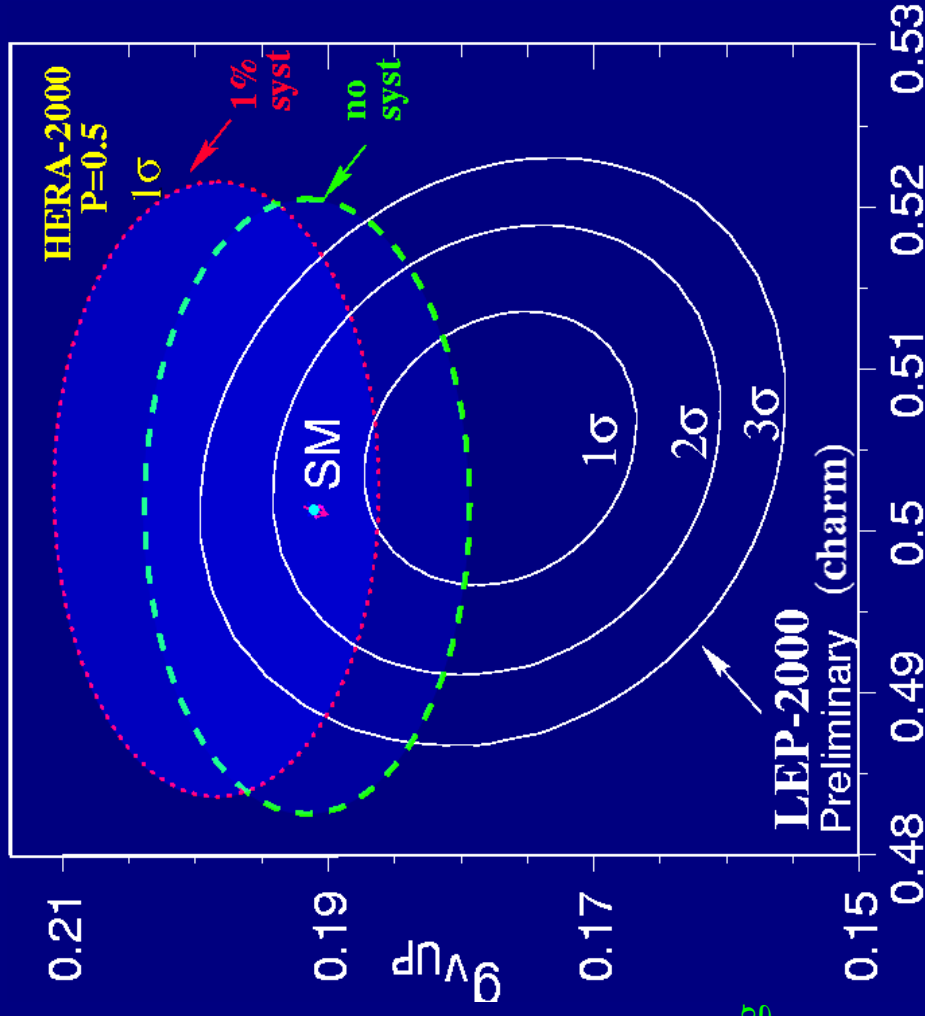
NC-Wirkungsquerschnitt  
polarisationsabhängig durch  
 $Z^0$ -Austausch und  $Z^0 - \gamma$ -  
Interferenz

=> Vektor- & Axialvektor-  
kopplungen des  $Z^0$  an  
u- und d- Quarks:

- $\sim 250 \text{ pb}^{-1}$  für jedes Vorzeichen  
von Leptonladung & Polarisation
- für  $a_u, a_d$  reicht  $P = 0$
- $P \geq 0.5$  erlaubt präzise Bestimmung  
von  $v_u, v_d$

...hochsensitiv auf systematische  
Abweichungen in der  
Polarisationsmessung!

Präzisionsmessung der Polarisation bei HERA II – 16



$g_{AUP}$

# Von welchem Fehler reden wir?

- Statistischer Fehler:  $\sim 1/\sqrt{N} \sim 1/\sqrt{\int I_e dt}$ 
  - akkumulierte Daten über Zeitintervall  $dt \Rightarrow$  immer pro Zeiteinheit, z.B. pro Minute
  - unterscheide, ob pro bunch oder gemittelt

$\Rightarrow$  zu vernachlässigen, wenn über großen Datensatz gemittelt wird

$\Rightarrow$  NICHT zu vernachlässigen bei Messung als Funktion der Polarisation!

- systematische Unsicherheit:
  - Verständnis von Signal- und Untergrundprozessen
  - Detektorverständnis und -simulation
  - Analysetechnik

TPOL HERA I:  $\simeq 8\%$

- Differenz zu LPOL, Maschinen-MC

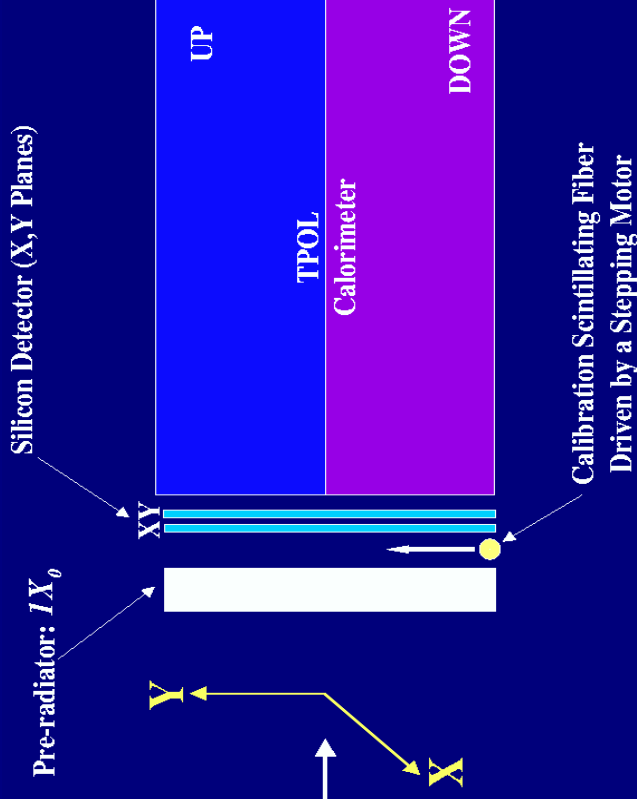
TPOL HERA I:  $\simeq 3.5\%$

# TPOL upgrade: Messung der $\eta$ - $\gamma$ -Transformation

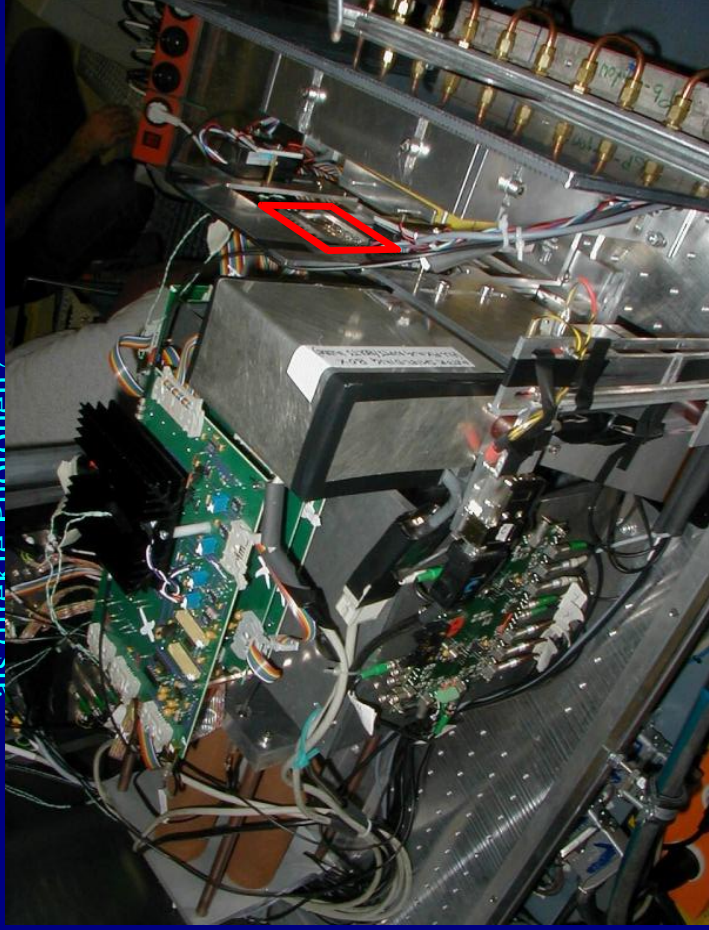
- erste Möglichkeit: messe  $y$  mit Silizium-Streifen-Detektor vor Kalorimeter
  - langsam  $\rightarrow$  nur Monitoring
  - misst Transformation für Photonen, die im preshower konvertiert sind
- $\Rightarrow$  andere Schauerentwicklung

als direkte Photonen?

Compton Beam



- zweite Möglichkeit: bestimme  $\eta$ - $\gamma$ -Trafo direkt aus den Kalorimeter-Daten!
  - erfordert deutlich komplexere Analyse der Kalorimeter-Info



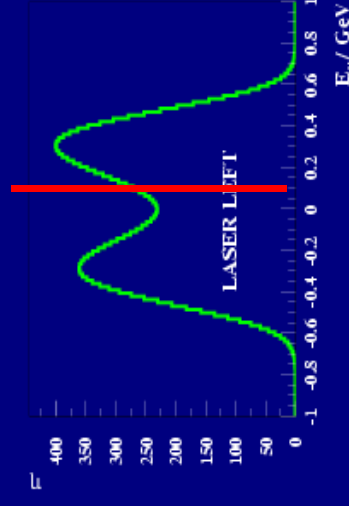
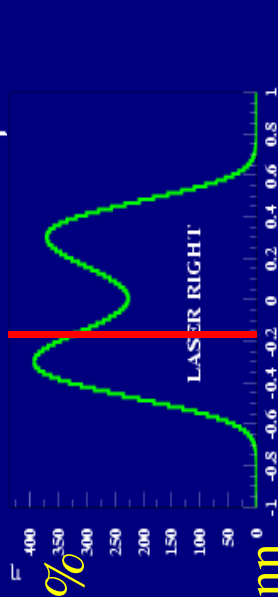
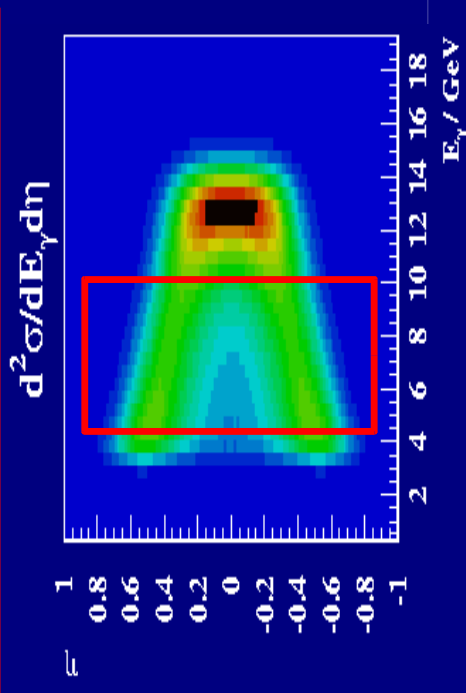
# TPOL: Die HERA I Analyse

- berechne  $\eta$ -Mittelwert gewichtet mit  $d^2\sigma/dE_\gamma d\eta$  über sensitivsten Bereich
- bilde Differenz bzgl. der Laserhelizität:

$$\frac{(\eta_R - \eta_L)}{2} =: |S_3| P_Y \Pi$$

$\Pi$ : "Analysierstärke", Differenz für  $P=100\%$

- schnell & einfach
- ABER: feste Analysierstärke nur gültig, wenn
  - alle Parameter...
  - ...gleich den angenommenen Werten
  - ...und zeitlich konstant sind.
  - speziell:  $\eta$ - $y$ -Trafo muss a priori bekannt sein!
- Auf Subprozentniveau nicht erfüllt!



# "Traumziel"

- bestimme Polarisation und Systemparameter in konsistenter Weise direkt aus den Daten

- ohne willkürliche Annahmen / Extrapolationen vom Testbeam

$\Leftrightarrow$  verstehe komplettes gemessenes 2D–Spektrum,  
d.h. beschreibe es durch

Compton–Wirkungsquerschnitt  $\otimes$  Detektoreffekte

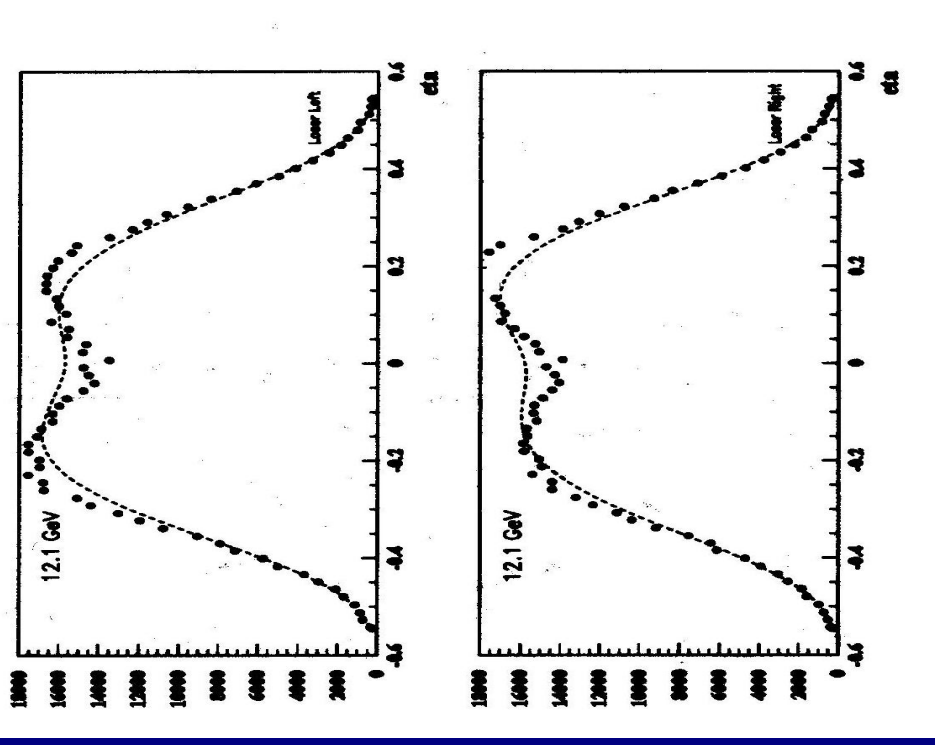
- Vorteile:
  - mehr Statistik, da ganzes Spektrum genutzt
  - Parameteränderungen werden berücksichtigt
  - Nachweis/Kontrolle, dass System verstanden ist
- potentielle Nachteile:
  - rechenzeitaufwendig

# Mögliche Realisierungen?

- Monte-Carlo:
  - GEANT: gut für Energie- u. Ortsauflösung, aber:
    - 1 Minute  $\hat{=}$  100000 Compton-Photonen!
    - Beschreibung der transversalen Schauerentwicklung nicht gut genug ,  
um  $\eta$ - $\gamma$ -Transformation zu extrahieren ☹️
  - MC mit parametrisierter Detektorantwort:
    - "Würfele"  $E_{\gamma}$ ,  $\phi_{\gamma}$  entsprechend Wirkungsquerschnitt
    - wende  $\phi \rightarrow \gamma$ ,  $\gamma \rightarrow \eta$  Transformationen an (letzte muss bekannt sein!)
    - Schmiere  $E$ ,  $\eta$ , usw
    - PROBLEM: brauche 10–15 Parameter aus Daten , die feinabgestimmt werden müssen.
- Fit:
  - passe (semi-)analytische 2D-Funktion an Daten an
  - 2D-Funktion = Wirkungsquerschnitt  $\otimes$  parametrisierte Beam- und Detektoreffekte
  - liefert sowohl Kalibration als auch Polarisation! ☺️

# Tun wir's doch einfach!?

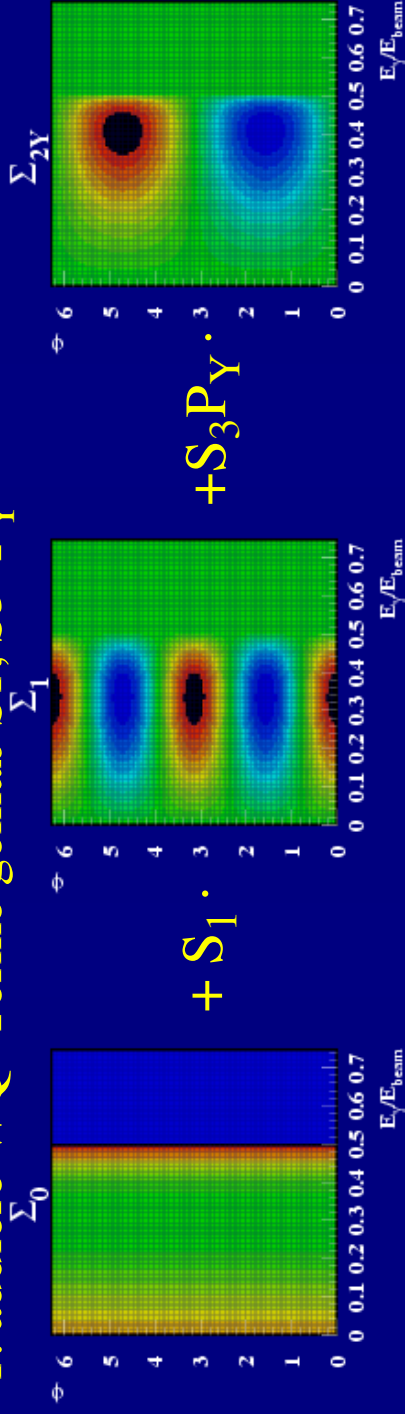
Frühere Versuche mit analytischen Fits konnten oft Daten nicht wirklich beschreiben :-( ---- Warum?



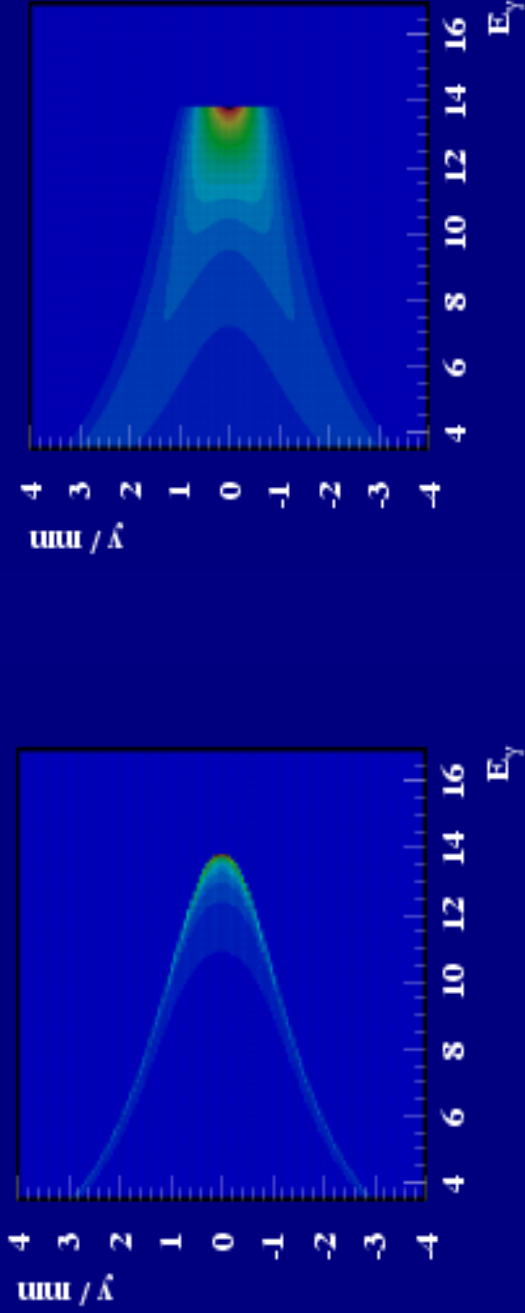
- numerische Schwierigkeiten:
  - z.B. Übergang  $\phi \rightarrow \gamma$ : Polstellen  
=> müssen korrekt behandelt werden!
  - variable Integrationsgrenzen
  - ....
- physikalische Herausforderung:
  - finde alle relevanten Parameter des Systems
  - aber nicht zu viele => Fit instabil
  - finde die richtigen Parametrisierungen
  - mache die richtigen Näherungen
  - ....

# Der neue Fit – Schritt für Schritt (I)

1. addiere WQ–Terme gemäß  $S_1$ ,  $S_3 \cdot P_Y$



2.  $\phi \rightarrow y$ , addiere Strahlposition  $\delta y$ , schmiere mit Strahlgröße  $\sigma_y$



- $S_1$
- $S_3 \cdot P_Y$

- $\delta y$
- $\sigma_y$

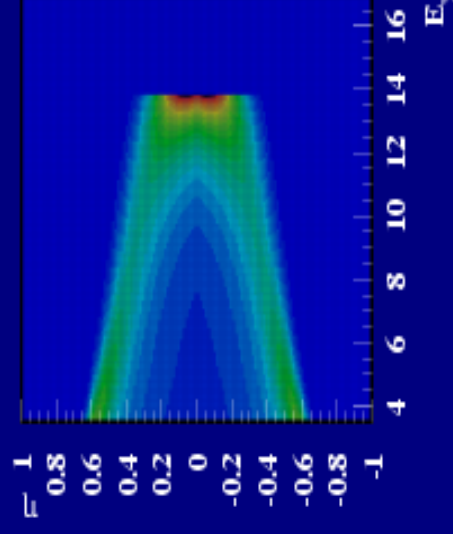
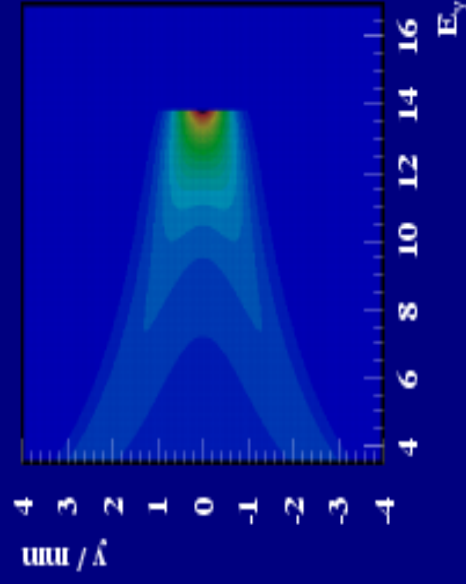
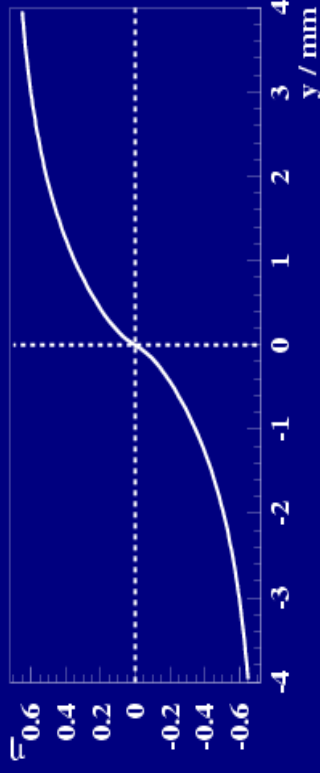
# Der neue Fit – Schritt für Schritt (II)

## 3. $\eta$ - $y$ -Transformation:

ursprünglich :  $\eta = \text{sign}(y) (1 - C_1 e^{-|y|/\lambda_1} - (1 - C_1) e^{-|y|/\lambda_2})$

deutliche Verbesserung in  $\chi^2/\text{dof}$  mit zusätzlichem Term:

$$\eta = \text{sign}(y) (1 - C_1 e^{-|y|/\lambda_1} - (1 - C_1 - C_2) e^{-|y|/\lambda_2} - C_2 e^{-|y|/\lambda_3})$$



- $S_1$
- $S_3 * P_Y$
- $\delta y$
- $\sigma_y$
- $C_1$
- $\lambda_1$
- $\lambda_2$
- $C_2$
- $\lambda_3$

# Intermezzo: E- und $\eta$ -Auflösung (I)

- Bisher: als unabhängig angenommen, grobe Parametrisierung
- neuer Ansatz: konsistente Beschreibung durch Auflösung der Einzelenergiemessungen, deren Kovarianz und Fehlerfortpflanzung
- Energieauflösung:  $E = E_u + E_d$ 
  - **sampling-Fluktuationen**: gleich (aber uncorr) f. beide Hälften, unabh. von  $y \rightarrow \sigma$ 
    - Befund aus GEANT:  $\sigma^2(E) = a^2 E + b^2 E^2$  (a, b unabhängig von  $y$  ✓)
    - aber  $\sigma^2(E_u)$ : gleiche Form, aber  $a_u, b_u$  **abhängig** von  $y$
  - **Fluktuationen zwischen Hälften**: 100% antikorreliert, nur für  $y \approx 0$   $\rightarrow s$

$$C = \begin{pmatrix} a^2 E_u + b^2 E_u^2 + s^2 & -s^2 + b^2 E_u E_d \\ -s^2 + b^2 E_u E_d & a^2 E_d + b^2 E_d^2 + s^2 \end{pmatrix}$$

=> Ansatz für Kovarianzmatrix

von  $E_u$  und  $E_d$ :

- $\eta$ -Auflösung:  $\eta = (E_u - E_d) / (E_u + E_d)$

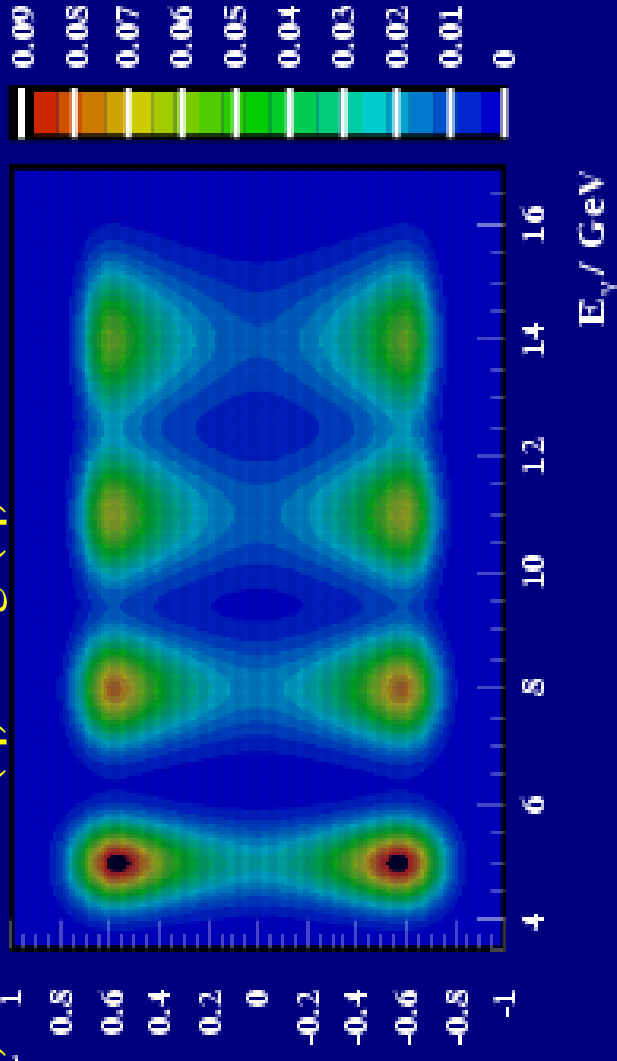
$$\Rightarrow \sigma_\eta^2 = (1 - \eta^2) a^2 / E + 4s^2 / E^2$$

# Intermezzo: E- und $\eta$ -Auflösung (II)

Wie sieht  $s^2(E, \eta)$  aus ?

- $\sigma_\eta|_{E=\text{const}}$  **nicht nur** proportional zu  $(1-\eta^2) \Rightarrow$  neu!)
- $\sigma_\eta|_{\eta=\text{const}} \sim 1/\sqrt{E} + \text{const}$
- GEANT:  $(s/E)^2 = f^2(\eta)/E + g^2(\eta); \quad f^2, g^2:$ 
  - physikalisch:  $\sim d\eta/d\eta|_{\eta=0} \cdot \text{"Spaltdicke"} \Rightarrow$  funktioniert größenordnungsmäßig!
  - Praxis: fitte Gauß + const

$$\Rightarrow \sigma_\eta^2 = (1-\eta^2)a^2/E + 4 f^2(\eta)/E + g^2(\eta)$$



# Der neue Fit – Schritt für Schritt (III)

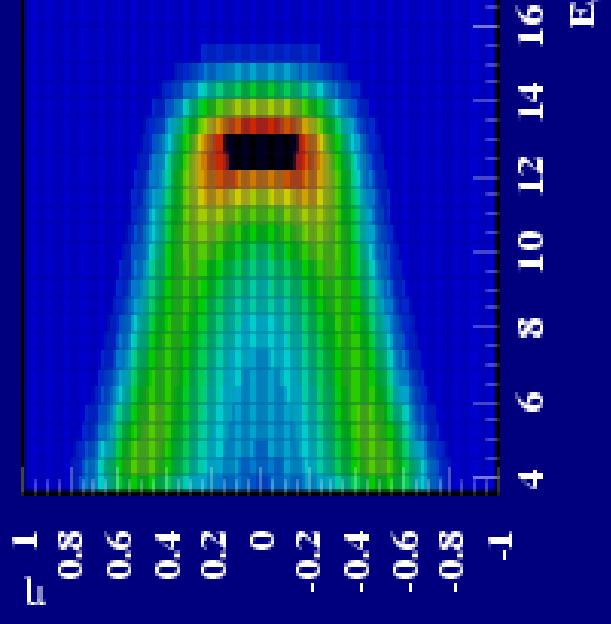
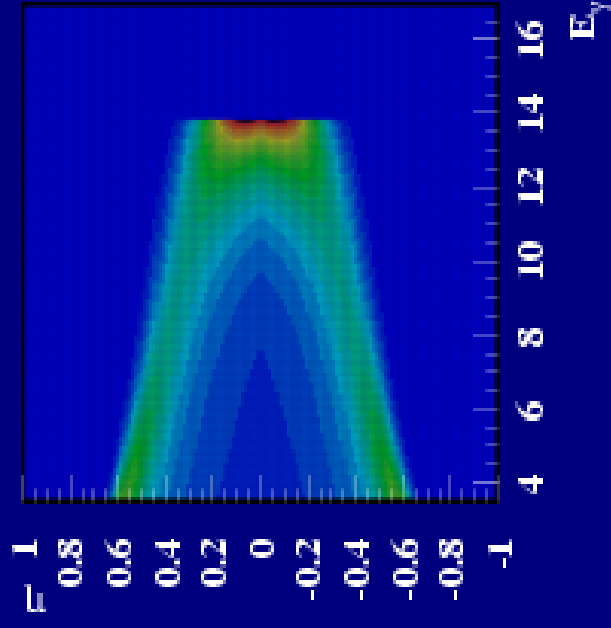
## 3. Kalorimeterauflösung:

2dim. Verschmierung, da  $\sigma_\eta$  von E und  $\eta$  abhängt

## 4. unterschiedliche Lichtsammlungseffizienz bzw. relative

Misskalibration in up/down Kanälen:

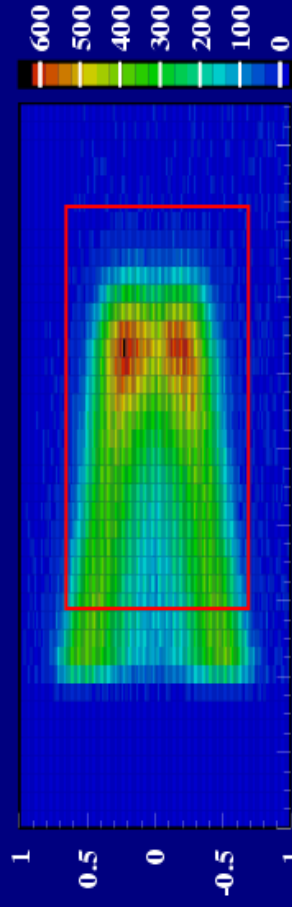
z.B.  $E_d = 0.99E_{d,true} \Rightarrow \delta_\eta = 0.01$



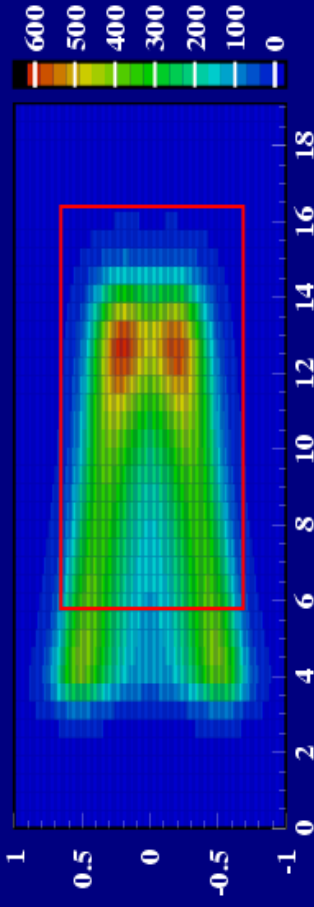
- $S_1$
- $S_3 * P_Y$
- $\delta y$
- $\sigma_y$
- $C_1$
- $\lambda_1$
- $\lambda_2$
- $C_2$
- $\lambda_3$
- $\sigma_E$
- $\delta_\eta$

# Ein 1-Minuten-Fit (Kalibration I)

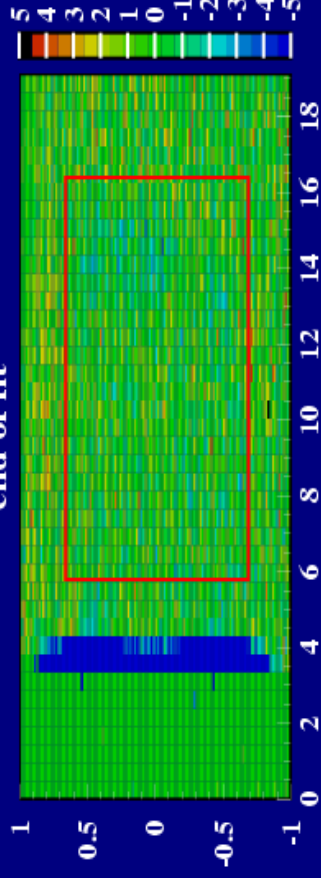
Cal. Fit to Data 15610



Data 15610

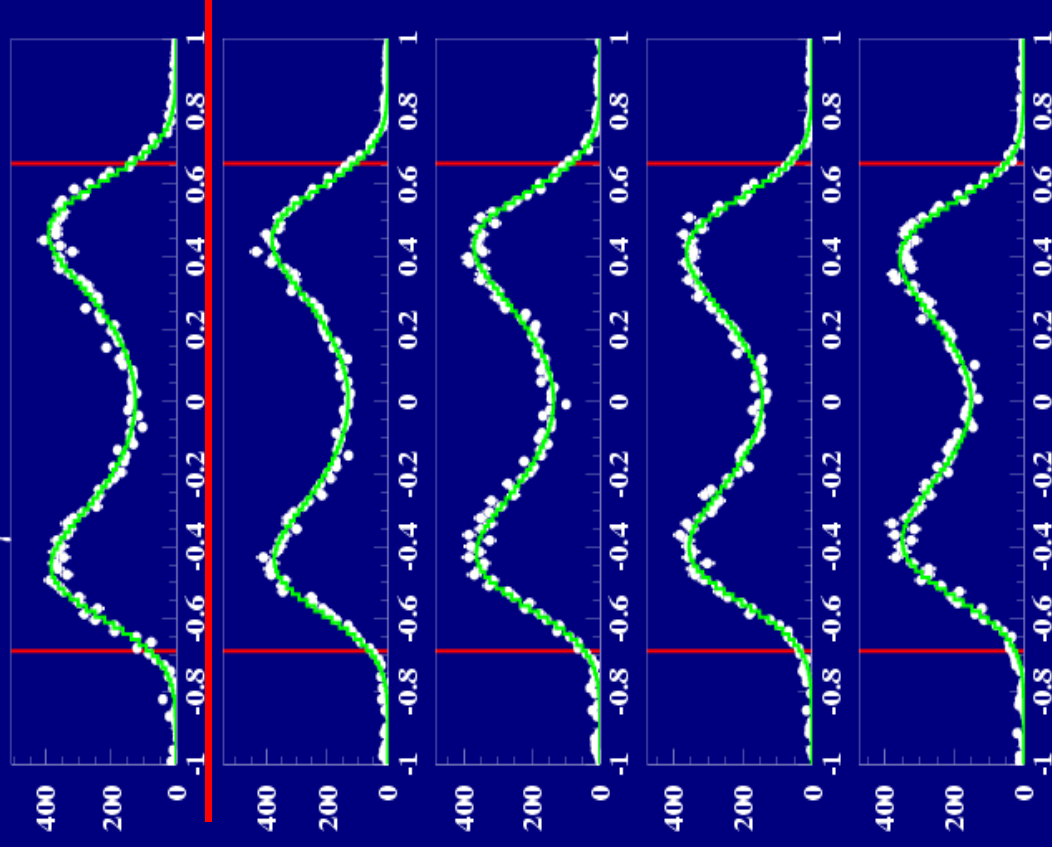


end of fit



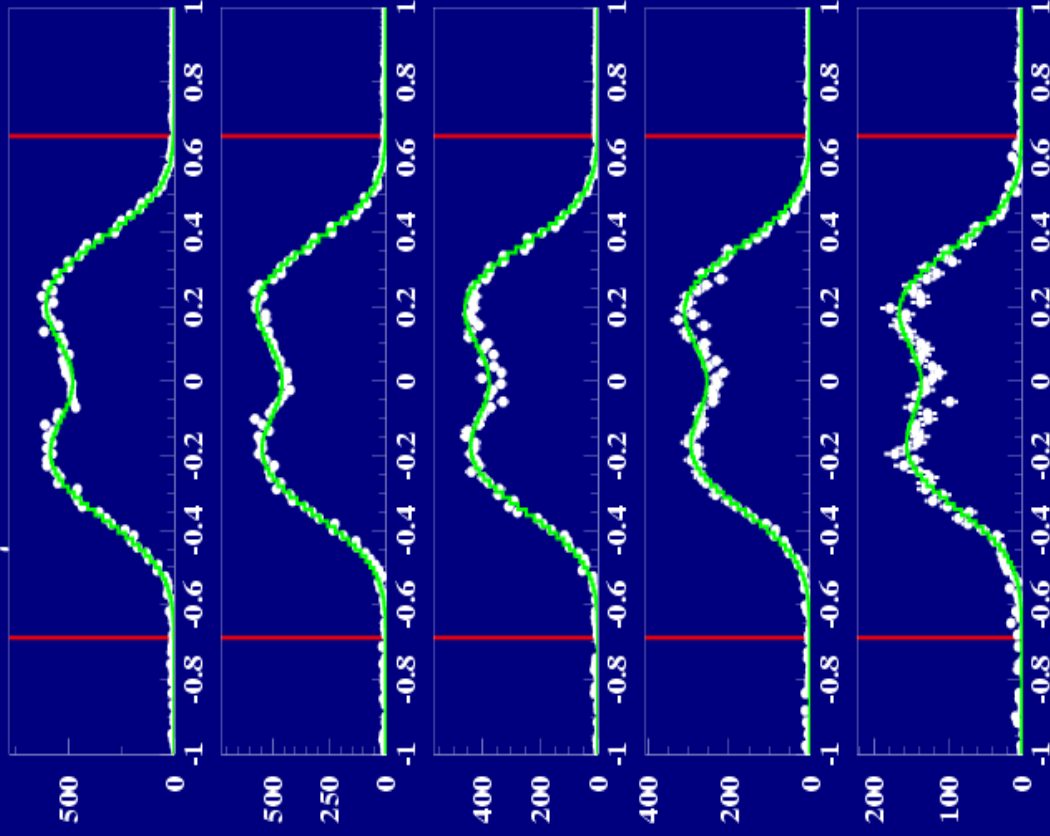
Pull of  $(d^2\sigma/d\eta dE (R+L)) - (d^2\sigma/dE d\eta \text{ normalized})$

$E_\gamma = 5 - 7.5 \text{ GeV}$

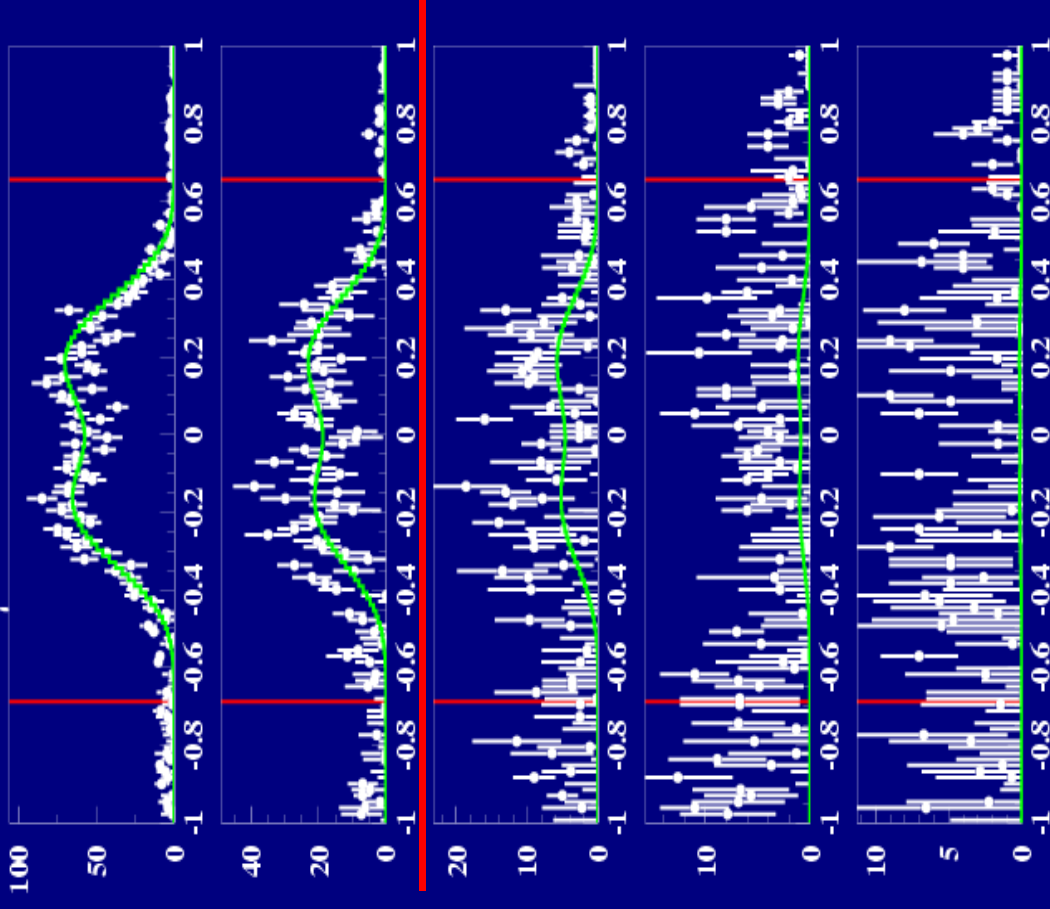


# Ein 1-Minuten-Fit (Kalibration III)

$E_\gamma = 12.5 - 15 \text{ GeV}$

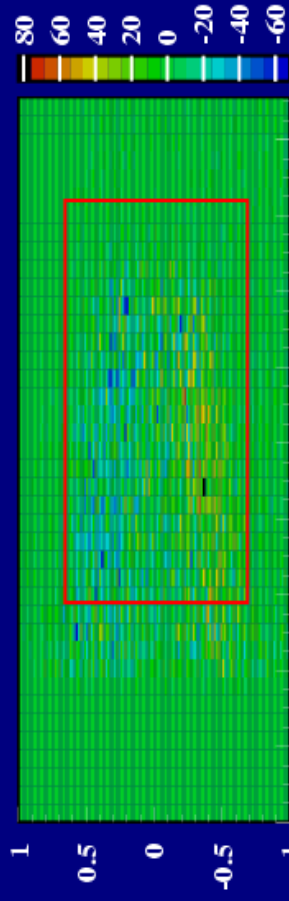


$E_\gamma = 15 - 17.5 \text{ GeV}$

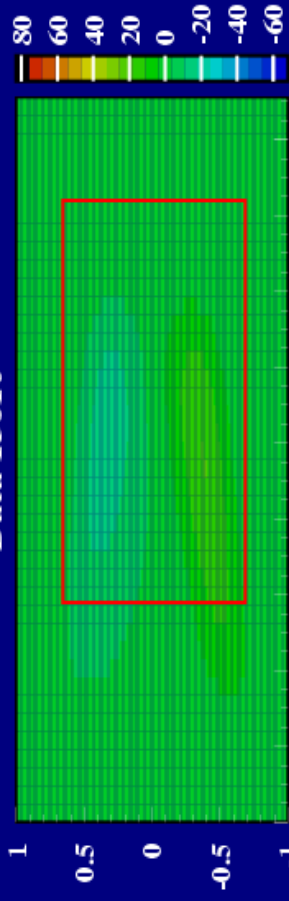


# Ein 1–Minuten–Fit (Polarisation I)

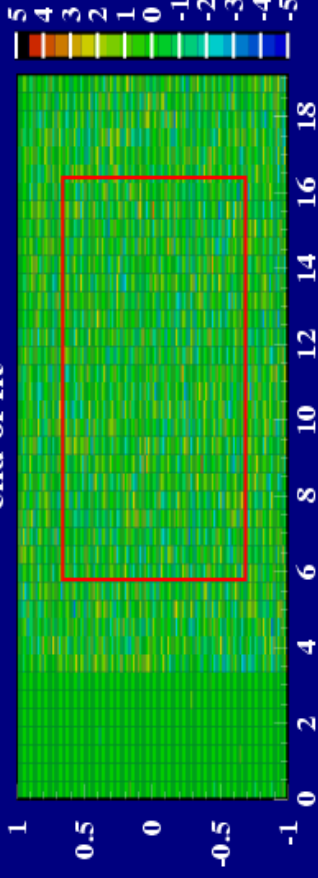
Pol. Fit to Data 15610



Data 15610

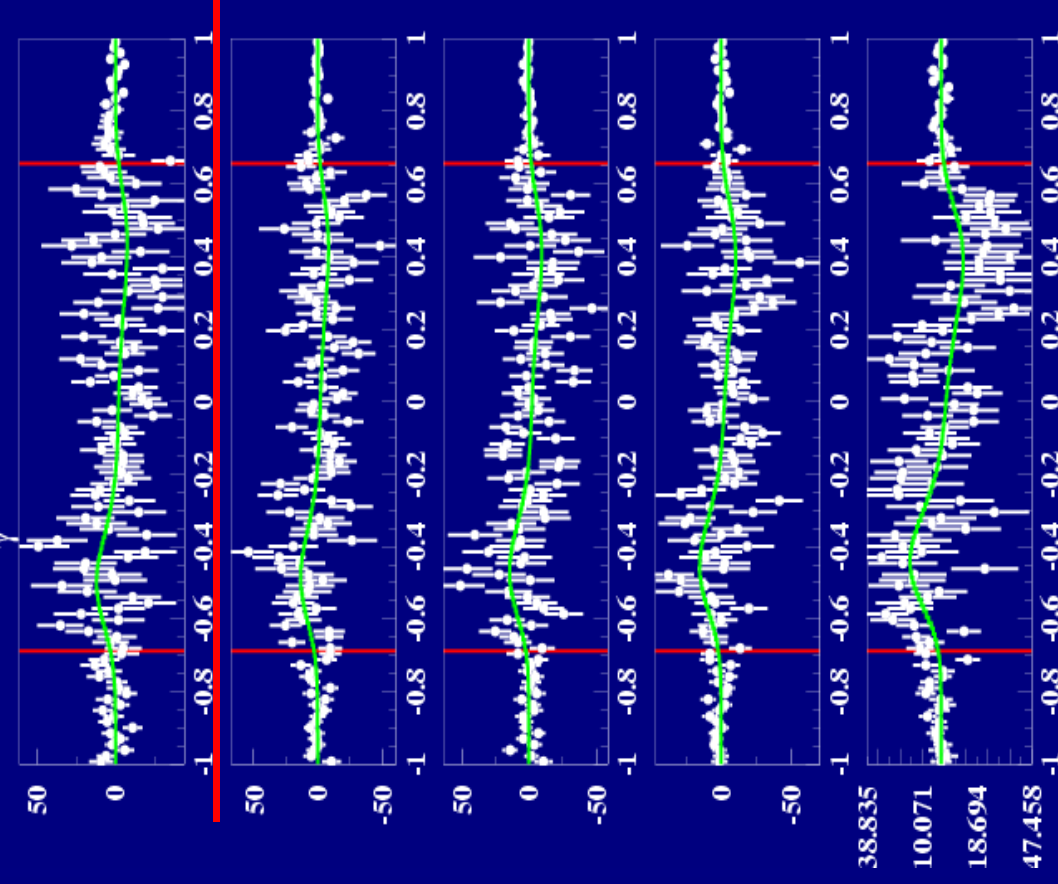


end of fit



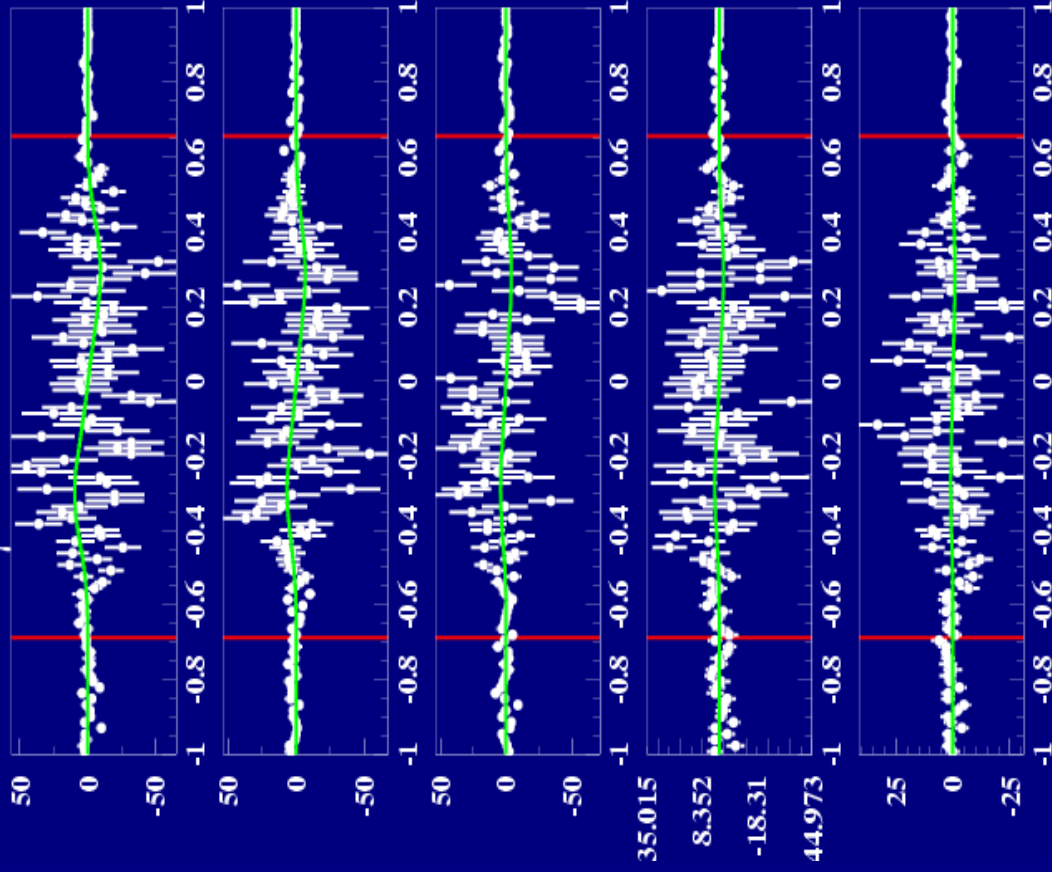
Pull of  $(d^2\sigma/d\eta dE) (R-L) - (d^2\sigma/dE d\eta)$  normalized

$E_\gamma = 5 - 7.5 \text{ GeV}$

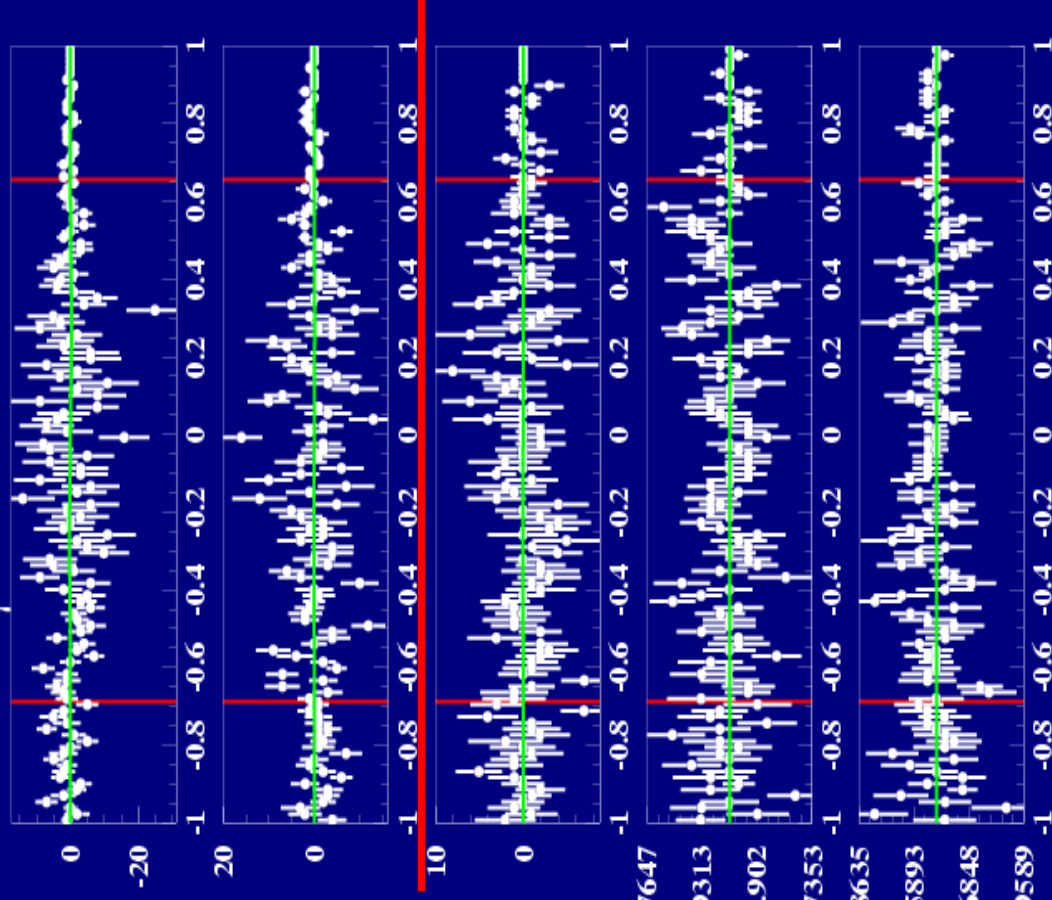


# Ein 1-Minuten-Fit (Polarisation III)

$E_\gamma = 12.5 - 15 \text{ GeV}$



$E_\gamma = 15 - 17.5 \text{ GeV}$



# Ein Blick über den (TPOL-)Tellerrand...

gibt es Möglichkeiten, die absolute Skala des TPOL zu überprüfen?

- Vergleich mit LPOL:
  - HERA I:
    - LPOL reklamiert 2% Genauigkeit
    - absolute TPOL Eichung aus risetime-Messung (Maschinen-MC!)
    - P(LPOL) ca 3% größer als P(TPOL) <= nie verstanden ....
  - erster Blick in HERAII-Daten:
    - LPOL  $\neq$  TPOL-online  $\neq$  TPOL-offline
    - LPOL-Daten noch etwas shaky (sehr wenig Statistik, unbekannter Kalibrationsstatus)
    - TPOL-online: "geratener" Skalierungsfaktor auf Analysierstärke wg. neuer hardware
      - => brauche mehr  $P > 0$  Daten mit mehr Positronstrom!
- Risetime-Messungen:
  - wertvoller Konsistenztest für Polarimeter und Maschine
  - routinemäßige Polarisation unter stabilen Bedingungen:
    - eine Messung: min. 3–4h reine Anstiegszeit
    - viele Messungen für Statistik:  $N=100 \Rightarrow \delta P/P = 10\%$ , d.h. bei  $P=50\%$ :  $\delta P=5\%$