

IEKP-KA/2003-05

**WISSENSCHAFTLICHER  
ZWISCHENBERICHT**

**BMBF Fördervorhaben**

**Fortführung des DELPHI-Experiments  
bei LEP**

**Januar 2002 - Dezember 2002**

**Institut für Experimentelle Kernphysik  
Universität Karlsruhe**

Z. Albrecht, T. Allmendinger, W.-D. Apel, G. Barker, W. de Boer<sup>a</sup>, J. Bossert, M. Feindt, C. Haag, F. Hauler, M. Hennecke, L. Jungermann, U. Kerzel, M. Moch, L. Ramler, J. Rehn, T. Scheidle, M. Stanitzki, C. Weiser

---

<sup>a</sup>Projektleiter

# 1 Übersichtsangaben

**Zuwendungsempfänger:** Universität Karlsruhe  
Postfach 6980  
76128 Karlsruhe

**Projektleitung:** Prof. Dr. W. de Boer  
Institut für Experimentelle Kernphysik  
Universität Karlsruhe

**Förderkennzeichen:** **05 HD1 VKA/3**

**Ausführende Stelle:** Institut für Experimentelle Kernphysik

**Thema:** Elementarteilchenphysik  
Fortführung des DELPHI-Experiments bei LEP

**Förderperiode:** 01.01.2002 bis 31.12.2002

## 2 Zusammenfassung

Bei LEP I wurde die elektroschwache Wechselwirkung im Bereich der  $Z^0$  - Resonanz untersucht. Ab 1996 wurde die Energie schrittweise erhöht. Ab Mai 1998 bis Ende 2001 wurden bei einer Energie bis 209 GeV Daten genommen. Bei dieser Energie sind die Hauptziele die Untersuchung der geladenen W-Bosonen der schwachen Wechselwirkung und die Suche nach neuen Teilchen, insbesondere nach supersymmetrischen Teilchen und nach dem vorhergesagten Higgs-Boson.

Die Massen der  $W^\pm$  and  $Z^0$  Bosonen konnten mit einer Präzision von  $5 \cdot 10^{-5}$  und  $2 \cdot 10^{-5}$  bestimmt werden. Das Verhältnis dieser Massen wird unter Berücksichtigung der Korrekturen höherer Ordnung (“Strahlungskorrekturen”) vom Higgs-Mechanismus vorhergesagt. Aus dem Verhältnis der gemessenen Massen konnten die Strahlungskorrekturen bestimmt werden, die auf eine Topmasse von  $M_t = 180_{-9}^{+12}$  GeV schliessen lassen. Die so bestimmte Topmasse stimmt sehr gut mit der direkt gemessenen Masse von  $174.3 \pm 5.1$  GeV überein, womit das Standard Modell inklusive der Higgsmechanismus zur Massenerzeugung die aussergewöhnlich hohe Präzisionstests der LEP Daten glänzend überstanden hat.

Aus den Strahlungskorrekturen wurde eine obere Grenze für die Higgsmasse von 196 GeV zu 95% C.L. bestimmt. Leider wurde das Higgs-Boson nicht entdeckt. Eine untere Grenze der Higgsmasse von  $m_H > 114.1$  GeV konnte zu 95% C.L. aus den direkten Suchen bestimmt werden.

Innerhalb der supersymmetrischen Erweiterungen des Standardmodells wird die Masse des Higgs-Bosons im Bereich von 90 bis 130 GeV vorausgesagt, so dass die untere Grenze der Higgsmasse den Parameterraum der supersymmetrischen Modellen signifikant einschränkt. Auch die vorhergesagten supersymmetrischen Partner der bekannten Teilchen wurden nicht gefunden bei den jetzigen Energien und die daraus folgenden unteren Massengrenzen bedeuten zusätzliche Einschränkungen für die Kosmologie, falls die dunkle Materie im Universum aus den leichtesten supersymmetrischen Teilchen besteht.

Für die Suche nach dem Higgs-Boson, das zu 90% in langlebigen B-Mesonen zerfällt, ist ein guter Vertexdetektor unentbehrlich. Daher wurde bei DELPHI ein Ausbau des Vertexdetektors vorgenommen, wobei der Zentralbereich verlängert und zum größten Teil mit 3-D-Koordinatenbestimmung ausgestattet wurde. Zusätzlich wurde für eine fast vollständige  $4\pi$ -Überdeckung des Raumwinkels ein “Very Forward Tracker” mit vier Lagen Siliziumdetektoren als Endkappen des Zentraldetektors gebaut. Durch unser modernes Halbleiterlabor im Forschungszentrum Karlsruhe konnten wir eine führende Rolle beim Ausbau des Vertexdetektors übernehmen, sowohl im Zentralbereich als auch beim Bau der neu entwickelten Pixeldetektoren im Vorwärtsbereich.

Die Software für die Vertexrekonstruktion wurde durch eine Vielzahl neuronaler Netze in dem in Karlsruhe entwickelte Softwarepaket BSUARUS sehr signifikant verbessert. Dieses Programmpaket ist der Standard für alle B-Physik Analysen geworden.

### 3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Der DELPHI Detektor wurde durch eine Kollaboration von 47 Instituten aus 24 Ländern gebaut und betrieben. Der Beitrag aus Deutschland stammt aus Beiträgen der Universitäten Karlsruhe und Wuppertal. Die Anzahl der Autoren aus diesen beiden Instituten auf den Veröffentlichungen der DELPHI Kollaboration entspricht ungefähr dem deutschen Beitrag von 6.5%.

Karlsruhe hat eine führende Rolle bei der Erweiterung des Silizium-Vertex-Detektors<sup>1</sup> übernommen: ein Viertel der neuen dritten Lage des Streifendetektors im Zentralbereich mit Diodenstreifen entlang der Strahlrichtung und senkrecht dazu wurde in unserem Institut gebaut, und die Pixeldetektoren, die als Endkappen des Vertexdetektors eingesetzt wurden, sind alle in Karlsruhe gebondet und getestet worden. Zusätzlich wurden alle Sensoren der Pixeldetektoren vor dem Bump-bonding auf unseren automatischen Probe-Stationen getestet. Am Upgrade des Vertexdetektors sind u.a. Gruppen aus CERN, Marseille, Mailand, Lyon, Oslo, Paris, Rutherford, Uppsala, Wien und Wuppertal beteiligt.

---

<sup>1</sup>THE DELPHI SILICON TRACKER AT LEP II, P. Chochula et al., CERN-PPE-97-155, Dec 1997, Submitted to Nucl. Instrum. Methods

## 4 Tätigkeitsbericht

### 4.1 Zeitlicher Ablauf des Vorhabens

Mitte 1989 wurde der DELPHI - Detektor fertiggestellt und konnte in der ersten Phase der Datennahme am LEP Speicherring erfolgreich eingesetzt werden. Seit Beginn erfolgten innerhalb der DELPHI Kollaboration 526 Veröffentlichungen und in Karlsruhe wurden 35 Diplomarbeiten und 19 Doktorarbeiten fertiggestellt. Die 95 Veröffentlichungen der letzten Förderperiode und die Diplom- und Doktorarbeiten sind im Anhang aufgelistet. Diese Resultate wurden in 71 Vorträgen von Physikern aus Karlsruhe in Seminaren und auf Fachkonferenzen dargestellt (siehe Anhang).

Ab 1996 wurde die Energie erhöht (Ausbaustufe LEP II), damit die geladenen Eichbosonen der schwachen Wechselwirkung  $-W^\pm$  untersucht werden konnten. Bei den höheren Energien (bis 209 GeV) war ein weiteres Hauptziel die Suche nach Higgs- und supersymmetrischen Teilchen.

Die Aktivitäten der Karlsruher Gruppe können wie folgt zusammengefaßt werden:

1. Beteiligung an Koordination, Betrieb und Software des elektromagnetischen Kalorimeters.
2. Beteiligung an Erweiterung und Betrieb des Vertex-Detektors.
3. Analyse der DELPHI Daten.
4. Software Entwicklung, insbesondere beim Tracking.
5. Koordination der b- und c-Quark Analysen ( Dr. C. Weiser aus Karlsruhe).
6. Koordination der Suche nach Higgs Teilchen ( Dr. M. Stanitzki aus Karlsruhe).

Im folgenden werden die einzelnen Aktivitäten näher beschrieben.

### 4.2 Wissenschaftliche Beiträge der Karlsruher Gruppe

#### 4.2.1 B-Physik bei LEP

(Z. Albrecht, T. Allmendinger, G. Barker, M. Feindt, C. Haag, U. Kerzel, M. Moch, L. Ramler, T. Scheidle)

Im Mittelpunkt der Arbeiten steht das Softwarepaket "BSAURUS", das von Feindt und Barker entworfen wurde und stetig weiterentwickelt wird. Um die Eigenschaften der beiden B-Hadronen in einem  $Z^0 \rightarrow b\bar{b}$  - Ereignis zu rekonstruieren, werden u.a. neuronale Netze verwendet. Die fortschrittliche Teilchenidentifikation und präzise Tracking-Informationen des DELPHI-Detektors sind wichtige Eingabevariablen, die es BSAURUS ermöglichen, den Typ des schwach zerfallenden B-Hadrons zu bestimmen ( $B^0, B^+, B_s, B$ -Baryon). Desweiteren wird der Vierer-Vektor (Energie und Impuls), der Zerfallsvertex, die Lebensdauer sowie ein Unterscheidungskriterium zur Art des b-Quarks im Hadron sowohl zur Zeit der Produktion, als auch zur Zerfallszeit, ermittelt.

Die Suche nach sehr kurzen Spuren im Vertexdetektor ("VD-only" Spuren) wurde erfolgreich eingeführt. Dies ist u.a. wichtig für die Ladungsbestimmung an sekundären Vertices. Ziel des Karlsruher B-Physik Programmes ist die inklusive Messung (d.h. nicht von spezifischen Zerfallskanälen abhängig) von Produktion, Zerfall und ausgewählter Eigenschaften von B-Hadronen mit dem Ziel, die erreichbare statistische Genauigkeit zu optimieren.

Zur Zeit stehen drei Analysen kurz vor dem Abschluß, deren vorläufige Resultate auf den Sommerkonferenzen 2002 präsentiert wurden. Die erste Analyse ist eine Messung der Lebensdauern der  $B^+$  und  $B^0$ -Mesonen. Sie basiert auf der B-Teilchen Identifikation und Lebensdauer durch BSAURUS. Diese Analyse ist die zur Zeit genaueste Messung der Lebensdauern der oben genannten Teilchen und fließt direkt in den Weltmittelwert der Arbeitsgruppe am LEP (CERN) ein. Die Resultate der Fits an die Lebensdauer sind in Abb. 1 gezeigt. Die zweite Analyse beschäftigt sich mit der Teilchen-Antiteilchen-Oszillation der  $B_s$ -Mesonen; dabei wird die Oszillationsfrequenz unter Zuhilfenahme der B-Teilchen Identifikation und einem Unterscheidungskriterium für die Art des Quarks, die mittels des Softwarepakets BSAURUS bestimmt werden (siehe Abb. 2), präzise gemessen. Abb. ?? zeigt die gemessene Oszillationsamplitude als Funktion der Massendifferenz der neutralen  $B_s$  Mesonen. Die dritte Analyse versucht zum ersten Mal überhaupt, die Massendifferenz  $B^* - B$  für alle vier B-Hadron Arten separat zu messen. Diese Analyse ist insbesondere auch für die theoretische Physik von Bedeutung.

Zwei weitere Analysen zeigen vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich der angeregten Zustände des B-Hadrons ( $B^{**}$ ). Die inklusive  $B^{**}$ -Rate wird aus den Daten ermittelt, indem Ladungskorrelationen zwischen dem  $B^{**}$  und dem zugehörigen Zerfall-Pion ausgenutzt werden. In einer unabhängigen Analyse, wird das Kaon, das beim Zerfall des  $B_s^{**}$ -Teilchens emittiert wird, dazu benutzt, um mittels eines neuronalen Netzwerks das Signal vom dominierenden Untergrund zu trennen.

Darüber hinaus wird eine Analyse durchgeführt, die die inklusiven Verzweigungsverhältnisse der B-Mesonen untersucht, die ebenfalls durch bisherige Messungen nur unzureichend bekannt sind. Das Softwarepaket BSAURUS ermöglicht es, die Genauigkeit zu erhöhen und zugleich wichtige Vergleiche mit theoretischen Modellen des  $B$ -Zerfalls durchzuführen.

Die von BSAURUS ermittelte Energie des B-Hadrons wird zusammen mit der wahren Energieverteilung, die durch Monte Carlo - Studien ermittelt wird, als Eingabevariablen in eine hoch entwickelte Entfaltungsprozedur eingegeben, die in der Lage ist, die wahre Energie des B-Hadrons in den Daten zu bestimmen, so dass verschiedene Modelle zur B-Fragmentation getestet werden können. Dies ist eine wichtige Analyse, die Auswirkungen auf alle Analysen, die sich mit B-Hadronen beschäftigen und auf Monte Carlo Methoden basieren, haben wird. Die ersten Resultate erweisen sich als sehr konkurrenzfähig mit den wenigen Resultaten anderer Experimente, die bisher existieren. Die Methode sollte sowohl für LEP1 als auch für die hochenergetischen LEP2 Daten anwendbar sein.

Der Erfolg von BSAURUS machte es möglich, dass dieses Softwarepaket innerhalb der DELPHI-Kollaboration für viele Analysen verwendet wird, die nicht direkt mit Karlsruher Mitarbeitern in Verbindung stehen. Einige Beispiele sind:

1. Eine inklusive Messung der  $b\bar{b}$ -Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie ( mittels eines von BSAURUS ermittelten Unterscheidungskriteriums für die Art des b-Quarks bei dessen Entstehung. Diese Analyse steht kurz vor der Publikation und wird das bisherige DELPHI-Resultat um 25 % verbessern.

2. Eine Messung des Verzweigungsverhältnisses  $b \rightarrow \bar{c}X$  mittels des von BSAURUS errechneten Unterscheidungskriteriums für die Art des b-Quarks bei dessen Zerfall.

Zur Zeit besucht eine Stipendiatin des Marie-Curie-Programms die Karlsruher Arbeitsgruppe. Sie wird Arbeitsmethoden inklusiver Messungen, die in Karlsruhe angewendet werden, für bestehende Analysen, die sich mit der Messung des Koppungsparameters  $|V_{cb}|$  zwischen den b- und c- Quarks beschäftigt, benutzen.

#### 4.2.2 Suche nach dem Higgs-Boson ( W. de Boer, J. Rehn, M. Stanitzki )

Da das Minimale Supersymmetrische Standardmodell (MSSM) eine Higgsmasse unterhalb 130 GeV vorhersagt, ist die Suche nach dem Higgs-Boson bei LEP eine der Hauptaktivitäten. Bei LEP II wird das Higgs-Boson als Bremsstrahlung des  $Z^0$ 's produziert, wonach es im Standardmodell (SM) zu 85% in b-Quark-Paare und zu 15% in  $\tau$ -Paare,  $c\bar{c}$ -Paare und Gluonen zerfällt.

Im MSSM gibt es im Gegensatz zum Standardmodell 5 Higgs-Bosonen ( $h, H, A, H^+, H^-$ ), wobei  $h$  dem Higgs-Boson des Standardmodells entspricht. Im MSSM kann dann zusätzlich durch die Paarproduktion  $e^+e^- \rightarrow hA$  entstehen,  $A$  ist hier das pseudoskalare Higgs-Boson. Die Eigenschaft des Higgs-Sektors des MSSM hängen stark von den gewählten MSSM-Parametern wie dem Verhältnis der Vakuumerwartungswerte  $\tan\beta$ , der Mischung im  $\tilde{t}$ -Sektor und der Masse von  $A$  ab. Im großen Teilen des MSSM-Parameterraumes zerfallen  $h$  und  $A$  bevorzugt in b-Quark-Paare.

Das Higgs-Boson hat für einen bestimmten Teil des MSSM-Parameterraums und in anderen Modellen die Möglichkeit, in unsichtbare Teilchen wie die leichtesten supersymmetrischen Teilchen (LSP) oder Majoron-Teilchen zu zerfallen.

Um eine möglichst generelle Massengrenzen anzugeben, wurde weiterhin der Zerfall von Higgsbosonen in beliebige Quark-Paare oder Gluonen betrachtet. Dies ermöglicht auch Parameterräume im MSSM auszuschliessen, in denen der Zerfall in b-Quarks unterdrückt ist oder Modelle auszuschliessen, in denen der Zerfall in b-Quarks ausgeschlossen ist.

Daher haben wir mehrere mögliche Kanäle untersucht

- $e^+e^- \rightarrow hZ \rightarrow b\bar{b}q\bar{q}$ ,
- $e^+e^- \rightarrow hZ \rightarrow b\bar{b}\nu\bar{\nu}$ ,
- $e^+e^- \rightarrow hA \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$
- $e^+e^- \rightarrow hZ \rightarrow \text{LSPLSP}q\bar{q}$ .
- $e^+e^- \rightarrow hZ \rightarrow q\bar{q}\nu\bar{\nu}$

Im Standardmodell wurde aus den DELPHI-Daten eine Massengrenze von 114.3 GeV (113.5 GeV erwartet) mit 95 % C.L. gesetzt. Die Kombination aller 4 LEP Experimente ergab eine leicht niedrigere Massengrenze von 114.1 GeV (115.4 GeV erwartet), was durch den Überschuss von einigen signalartigen Kandidaten bei einem Experiment bedingt ist. Abb. ?? zeigt das Massenspektrum der selektierten Ereignisse.

Durch die Kombination der Ergebnisse der hZ und hA-Suchen kann man verschiedenen Bereiche des MSSM-Parameterraumes ausschließen. Die Massengrenze für  $m_h$  beträgt 89.7 GeV (88.8 GeV erwartet) und 90.7 GeV (89.7 GeV erwartet) für  $m_A$ . Weiterhin konnten durch die Ergebnisse dieser Suchen erstmals Bereiche von  $\tan\beta$  unabhängig vom Szenario ausgeschlossen werden. Zwei Beispiele für Parameterrausschlüsse sind in Abb. ?? gezeigt. Die Ergebnisse für die Suchen nach unsichtbaren Higgs-Zerfällen sind in Abb. 4 gezeigt. In Kombination mit den Ergebnissen vom Standardmodell kann man ein Higgs-Boson mit einer Masse von 112.6 GeV mit beliebigen Verzweigungsverhältnisse in sichtbare und unsichtbare Endzustände ausschließen. Für ein Higgs-Boson, daß zu 100 % in unsichtbare Endzustände zerfällt, beträgt die Massengrenze 113.0 GeV (110.7 erwartet). Die Kombination mit den anderen LEP-Experimenten ergibt eine Ausschlußgrenze von 114.3 GeV (113.6 GeV erwartet) für ein Higgs-Boson, das zu 100 % in unsichtbare Endzustände zerfällt. Für die generelle Suche nach Higgs-Bosonen, die in beliebige  $q\bar{q}$  oder  $gg$ -Paare zerfallen, wurde eine Massengrenzen von 109.9 GeV (109.1 GeV erwartet) gesetzt. Durch die Kombination dieser Ergebnisse mit denen der anderen LEP-Experimente war es erstmal möglich, eines der untersuchten MSSM-Szenarien (large- $\mu$ ) komplett auszuschließen. Dieses Szenario ist so gewählt, daß es einige Punkte enthält, in denen das Higgs nicht in b-Quarks zerfällt und die daher mit den MSSM hZ und hA-Suchen nicht ausgeschlossen werden konnten, wie in Abb. 5 zu sehen ist.

### 4.2.3 Messung des Wirkungsquerschnittes der $Z^0$ Paarproduktion (W. de Boer, J. Rehn)

Um den NC02 Wirkungsquerschnitt bei  $e^+e^- \rightarrow ZZ$  zu bestimmen, stehen verschiedene Zerfallskanäle zur Verfügung, in denen das Z sowohl hadronisch als auch leptonisch zerfallen kann. Bei einem dieser Kanäle handelt es sich um  $ZZ \rightarrow q\bar{q}\nu\bar{\nu}$ . Hier zerfällt das eine Z Boson hadronisch und das zweite unsichtbar in zwei Neutrinos. Somit ergibt sich als typische Signatur eine mit dem  $Z^0$  kompatible sichtbare und unsichtbare invariante Masse. Dieser Kanal stellt demzufolge auch einen bedeutenden Hintergrund für die ebenfalls in Karlsruhe durchgeführten Higgs-Suchen mit unsichtbaren Zerfällen dar und die Erkenntnisse die bei der Messung dieses Kanales gewonnen werden, können ebenfalls dort einfließen.

Zur Abtrennung von Hintergrund Ereignissen und zur Anreicherung des Signals kommt eine iterierte Diskriminanz Analyse zum Einsatz. Der Wirkungsquerschnitt wird schließlich mit Hilfe eines Maximum Likelihood Fits als Abweichung zum Standard-Modell Wert bestimmt. Hierfür wurden die bei LEP II in den Jahren zwischen 1997 und 2000 gesammelten Daten herangezogen, deren Schwerpunktsenergie zwischen 183 GeV und 208 GeV beträgt. Der resultierende Wirkungsquerschnitt beträgt  $0.91 \pm 0.08 \pm 0.02 * \sigma_{SM}$  bezogen auf den vom Standard Modell vorhergesagten Wert (siehe Abb. 6) und ist somit innerhalb der statistischen Unsicherheit als mit dem Standard Modell vereinbar anzusehen.



#### 4.2.4 Globale Fits im “Constrained Minimal Supersymmetric Standard Model” (CMSSM) (W. de Boer, C. Sander)

Im Gegensatz zum SM laufen die Kopplungskonstanten im MSSM bei einer Energie von  $\approx 10^{16}$  GeV zusammen<sup>2</sup>. Bei dieser Energie stellt sich heraus, daß auch die Yukawa-kopplungen der  $b$ -Quarks und  $\tau$ -Leptonen sich vereinigen lassen und die unterschiedlichen Massen für Quarks and Leptonen werden – wie die unterschiedlichen Kräfte zwischen starken und elektroschwachen Wechselwirkungen – durch Strahlungskorrekturen hervorgerufen. Auch die elektroschwache Symmetriebrechung - und damit der Higgsmachanismus - lässt sich durch Strahlungskorrekturen erklären. In niedrigster Ordnung hat das leichteste Higgs-Boson im CMSSM eine Masse unterhalb der  $Z^0$ -Masse, nach Strahlungskorrekturen eine Masse unterhalb 125 GeV. Bisher wurde das Higgs-Boson nicht gefunden und wie oben erwähnt, konnte mit dem DELPHI Experiment eine untere Massengrenze von 114.3 GeV mit 95% C.L. angegeben werden. Diese Massengrenze schränkt den Parameterraum des Minimalen Supersymmetrischen Modells erheblich ein. Z.B. das Verhältnis der Vakuumserwartungswerte der neutralen Komponenten der Higgsdoublets muss oberhalb 4.3 sein, wie aus Abb. ?? ersichtlich ist und ergibt eine untere Grenze für die Gauginomassenparameter  $m_{1/2}$  (siehe Abb. ??). Dies bedeutet dass die leichteste charginos(neutralinos) im CMSSM eine Masse oberhalb 240 (120) GeV haben müssen. Insgesamt ist das  $\chi^2$  pro Freiheitsgrad aller elektroschwachen Präzisionsmessungen im SM und der supersymmetrischen Erweiterungen nicht sehr unterschiedlich, wie aus Abb. 7 ersichtlich ist. Der etwas kleinere  $\chi^2$  im MSSM kommt durch  $M_W$ ,  $b \rightarrow s\gamma$  und  $a_\mu$  zustande.

Der elektroschwache Mischungswinkel  $\sin^2 \theta_W$  hat im SM den gleichen Wert wie in supersymmetrischen Erweiterungen. Mit den jetzigen Wert von  $\sin^2 \theta_W$  und/oder der Wert der Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung  $\alpha_s$  ist die Vereinheitlichung nicht perfekt, wie aus Abb. 8 ersichtlich ist. Leider liegen die Werte von  $\sin^2 \theta_W$  aus der Links-Rechts-Asymmetrie, wie bestimmt am SLC, und aus der Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie, wie bestimmt am LEP,  $3\sigma$  auseinander. Auch die Messungen von  $\alpha_s$  aus dem hadronischen Wirkungsquerschnitt der  $Z^0$  Resonanz und  $R_l = \sigma_{had}/\sigma_l$  sind unterschiedlich, nämlich  $0.116 \pm 0.004$  und  $0.123 \pm 0.004$ . Der erste Wert ist abhängig von der Luminosität, weil der letztere Wert aus dem Verhältnis von hadronischen und leptonischen  $Z_0$ -Zerfälle bestimmt wird. Aus Abb. 8 geht hervor, dass die Vereinheitlichung die grösseren Werte der Kopplungskonstanten bevorzugt.

---

<sup>2</sup>U. Amaldi, W. de Boer, H. Fürstenau, Phys. Lett. **260B** (1991) 337

### 4.3 Wissenschaftliche Ergebnisse des Vorhabens.

Die gesamte Liste der Veröffentlichungen der DELPHI-Kollaboration ist im Anhang zu finden. Die wichtigsten LEP Ergebnisse sind:

- Die  $Z^0$ -Masse wurde sehr genau bestimmt:  $M_Z = 91.1874 \pm 0.0021$  GeV.
- Die  $M_W$ -Masse wurde sehr genau bestimmt:  $M_W = 80.451 \pm 0.0039$  GeV.
- Es gibt nur DREI leichte Neutrinos ( $N_\nu = 2.9841 \pm 0.0083$ )<sup>3</sup>, was gleichbedeutend ist mit: es gibt nur drei Familien von Elementarteilchen, die bekannten Quarks und Leptonen. Im Prinzip könnte es noch mehr schwere Neutrinos geben, aber dann müßte deren Masse oberhalb von 45 GeV liegen. Die bekannten Neutrinos haben jedoch eine verschwindend kleine Masse; ihre oberen Grenzen liegen im MeV Bereich.
- Im Standardmodell bekommt das  $Z^0$ -Boson seine Masse durch den Higgs-Mechanismus. Bisher wurde das erwartete Higgs-Boson jedoch nicht gefunden. Die untere Grenze für die Masse des Higgs-Boson liegt mit 95 % C.L. jetzt oberhalb von 114 GeV<sup>4</sup> Dies ist jedoch kein Versagen des Standardmodells, da die Higgsmasse innerhalb dieses Modells nicht vorausgesagt wird. In der supersymmetrischen Erweiterung des Standardmodells erwartet man das leichteste Higgs-boson bei einer Masse im Bereich von 90 bis 130 GeV.
- Es wurde nach allen möglichen supersymmetrischen Teilchen des Minimalen Supersymmetrischen Standardmodells gesucht, jedoch keine gefunden. Daher konnten nur untere Schranken für die Massen der gesuchten Teilchen angegeben werden. Z.B. die charginos (neutralinos) müssen eine Masse oberhalb 105 (45) GeV haben, falls sie existieren<sup>5</sup>.
- Das schwerste Quark der dritten Familie, das Topquark, liefert in höherer Ordnung virtuelle Beiträge zu den Wirkungsquerschnitten bei LEP. Aus den LEP-Daten wurde die Topmasse ermittelt zu<sup>6</sup>:

$$M_t = 177.4 \pm 3.0 \text{ GeV} \quad (1)$$

Dieser Wert für die Topmasse stimmt gut mit dem beim Tevatron direkt gemessenen Wert von  $174.3 \pm 5.1$  GeV überein<sup>7</sup>.

- Die Kopplungskonstanten aller Wechselwirkungen des Standardmodells wurden sehr genau vermessen bei den LEP Energien. Sie zeigen deutlich eine Energieabhängigkeit,

---

<sup>3</sup>LEP Electroweak WG, The LEP Collaborations,  
<http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/>, CERN-EP/2001-153

<sup>4</sup>LEP Higgs WG, The LEP Collaborations,  
<http://lephiggs.web.cern.ch/LEPHIGGS>, CERN-EP/2001-055

<sup>5</sup>LEP SUSY Working Group, <http://lepsusy.web.cern.ch/lepsusy>

<sup>6</sup>C. Sander, Doktorarbeit Karlsruhe, in Vorbereitung; Dieser Wert weicht von der Wert der LEP Electroweak WG ab, weil in dieser Analyse auch die Untergrenze des Higgs Bosons von 114.3 GeV berücksichtigt wurde.

<sup>7</sup>Particle Data Group, Phys. Rev. **D66** (2002) 1

aber im SM gibt es keine Vereinheitlichung bei sehr hohen Energien. In den supersymmetrischen Erweiterungen des SMs ist eine Vereinheitlichung möglich, womit die Grundlage für eine große vereinheitlichte Theorie gegeben ist.

## DELPHI Veröffentlichungen im Jahre 2002

- CERN-EP-2002-090. Search for resonant  $\tilde{\nu}$  production at  $\sqrt{s}= 183$  to  $208$  GeV  
(Accepted by E. Phys. J. C )
- CERN-EP-2002-089. Inclusive b Decays to Wrong Sign Charmed Mesons  
(Accepted by Phys. Lett. B)
- CERN-EP-2002-088. b-tagging in DELPHI at LEP  
(Submitted to Eur.Phys.J C)
- CERN-EP-2002-086. The DELPHI Trigger System at LEP2 Energies  
(Accepted by Nucl. Instr. and Meth. A)
- CERN-EP-2002-083. Search for supersymmetric particles in light gravitino scenarios and sleptons NLSP  
(Accepted by Eur. Phys. J. C)
- CERN-EP-2002-082. A study of the energy evolution of event shape distributions and their means with the DELPHI detector at LEP  
(Submitted to Eur.Phys.J.C)
- CERN-EP-2002-078. Search for  $B_s^0 - \bar{B}_s^0$  oscillations and a measurement of  $B_d^0 - \bar{B}_d^0$  oscillations using events with an inclusively reconstructed vertex  
(Accepted by Eur. Phys. J. C)
- CERN-EP-2002-077. Search for Doubly Charged Higgs Bosons at LEP2  
Phys. Lett. **B552** (2003) 127
- CERN-EP-2002-076. Search for an LSP gluino at LEP with the DELPHI detector  
(Accepted by Eur. Phys. J. C)
- CERN-EP-2002-069. Four-fermion simulation at LEP2 in DELPHI  
(Accepted by Comp. Phys. Commun.)
- CERN-EP-2002-023. Rapidity-Alignment and Compensation of Particle Pairs in Hadronic  $Z^0$  Decays  
Phys. Lett. **B533** (2002) 243-252

## Vorträge (2002)

1. M. Feindt  
A Review of B Physics Experiments  
RADCOR'02, Kloster Banz, Germany, Sept. 2002  
Nucl.Phys.B(Proc.Suppl.) 116 (2003) 257
2. G. Barker  
b-Hadron Physics at LEP  
Review at Moriond QCD, Les Arcs, France, March, 2002
3. U. Kerzel  
Studie zur Fragmentation von b-Quarks  
DPG Frühjahrstagung Teilchenphysik, Leipzig, 18.3.-22.3.2002
4. L. Ramler  
Studie zur Fragmentation von b-Quarks  
DPG Frühjahrstagung Teilchenphysik, Leipzig, 18.3.-22.3.2002
5. Th. Scheidle  
Bestimmung der B- und C-Quark-Effizienz im DELPHI Experiment anhand einer  
"Double-Tag" Methode  
DPG Frühjahrstagung Teilchenphysik, Leipzig, 18.3.-22.3.2002
6. C. Haag  
Inklusive Messung der Lebensdauern von  $B^+$  and  $B^-$  Mesonen mit dem DELPHI  
Detektor bei LEP  
DPG Frühjahrstagung Teilchenphysik, Leipzig, 18.3.-22.3.2002
7. Z. Albrecht  
Nachweis von  $b_s^{**}$  Mesonen  
DPG Frühjahrstagung Teilchenphysik, Leipzig, 18.3.-22.3.2002
8. M. Stanitzki  
Suche nach unsichtbaren Higgs-Zerfällen mit dem DELPHI-Detektor bei LEP  
DPG Frühjahrstagung Teilchenphysik, Leipzig, 18.3.-22.3.2002
9. C. Sander  
Globale Parameteranpassungen im MSSM  
DPG Frühjahrstagung Teilchenphysik, Leipzig, 18.3.-22.3.2002
10. J. Rehn  
Messung des Wirkungsquerschnittes:  $ZZ \rightarrow qq\nu\nu$  mit dem DELPHI Detektor bei  
LEP  
DPG Frühjahrstagung Teilchenphysik, Leipzig, 18.3.-22.3.2002
11. J. Rehn  
Search for invisible and flavourblind Higgs with the DELPHI detector at LEP  
DPF 2002, Williamsburg, May, 2002

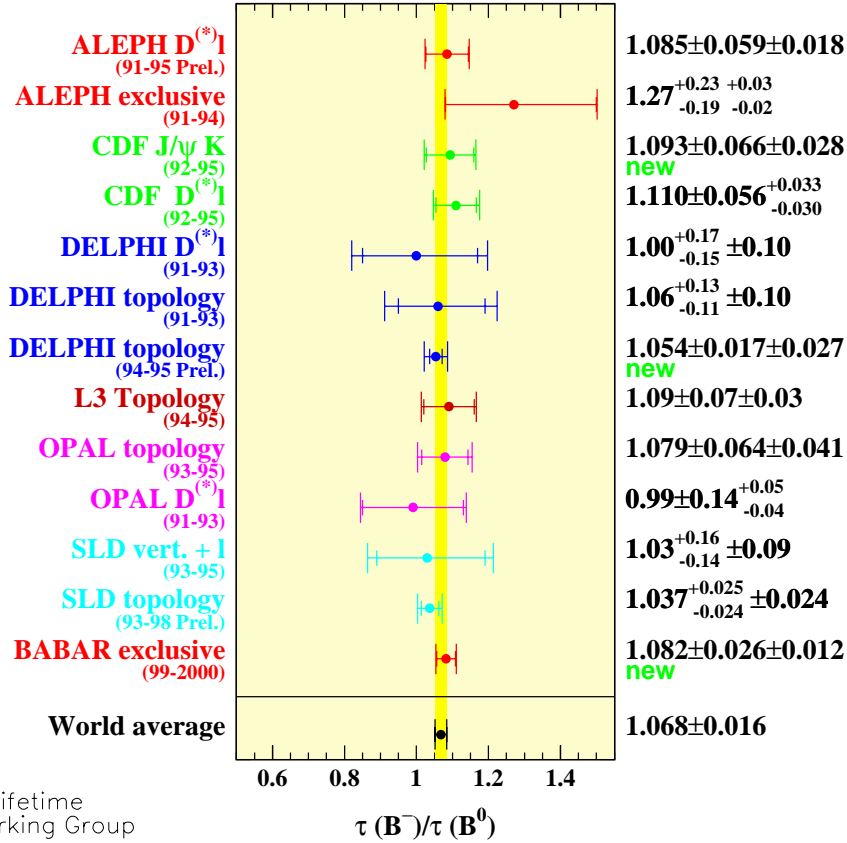
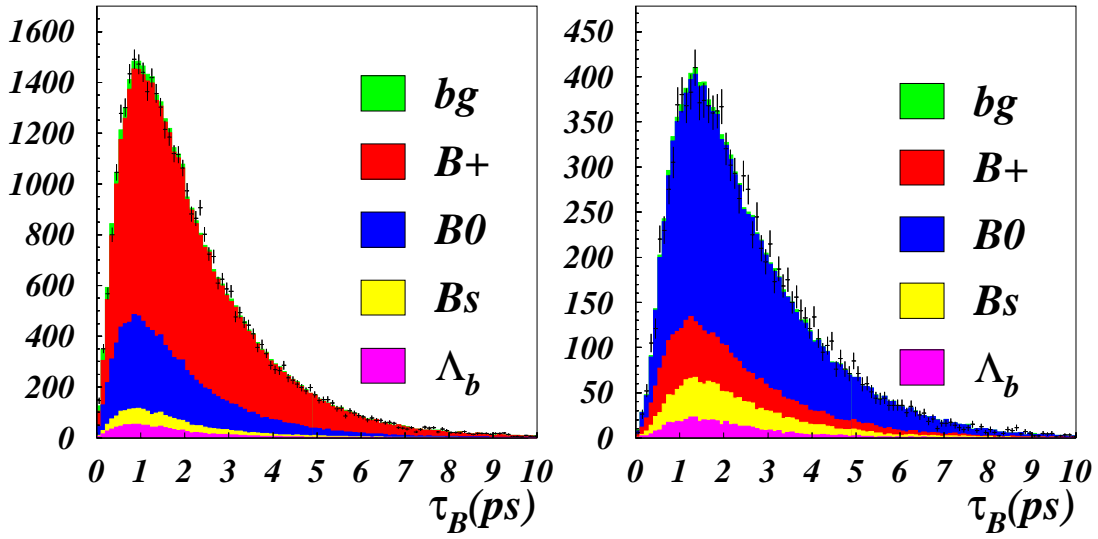
12. M. Stanitzki  
Suche nach Flavour-unabhängigen hadronischen Higgs-Zerfällen mit dem DELPHI-Detektor bei LEP  
DPG Frühjahrstagung Teilchenphysik, Leipzig, 18.3.-22.3.2002
13. M. Moch  
Untersuchung der Isospinaufspaltung im  $B^*$ -B-System mit dem DELPHI-Detektor  
DPG Frühjahrstagung Teilchenphysik, Leipzig, 18.3.-22.3.2002
14. M. Stanitzki  
Exotic Higgs bosons at LEP  
Talk at SUSY02 Hamburg, June 17, 2002
15. W. de Boer  
Unification Scale Physics  
Colloquium at NIKHEF, Amsterdam, December 13th, 2002
16. W. de Boer  
Supersymmetry in Particle Physics and Cosmology  
Seminar at Univ. of Geneva, Geneva, November 2002
17. W. de Boer  
Supersymmetry in Particle Physics and Cosmology  
Seminar at Fermilab, November 2002
18. W. de Boer  
Positron Fraction in the CMSSM  
Talk at IDM2002, York, September 2002
19. W. de Boer  
Positron Fraction from Dark Matter Annihilation in the CMSSM  
Talk at ICHEP2002, Amsterdam, July 2002
20. W. de Boer  
Dark Matter in Supersymmetry  
Talk at SUSY02, Hamburg, June 17, 2002
21. W. de Boer  
Dark Matter Annihilation  
Seminar in Stockholm, May 31, 2002

## Diplomarbeiten (2002)

1. C. Sander  
Globale Parameteranpassung im MSSM  
Universität Karlsruhe
2. U. Kerzel  
Erste inklusive Messung der b-Quark-Fragmentation  $f(Z)$  in  $Z^0$ -Zerfällen mit dem DELPHI-Detektor bei LEP I  
Universität Karlsruhe
3. T. Scheidle  
Bestimmung der B- und C-Quark Effizienz im DELPHI Detektor anhand einer "Double-Tag" Methode  
Universität Karlsruhe
4. M. Horn  
Untersuchung der Dunklen Materie im MSSM  
Universität Karlsruhe

## Doktorarbeiten (2002)

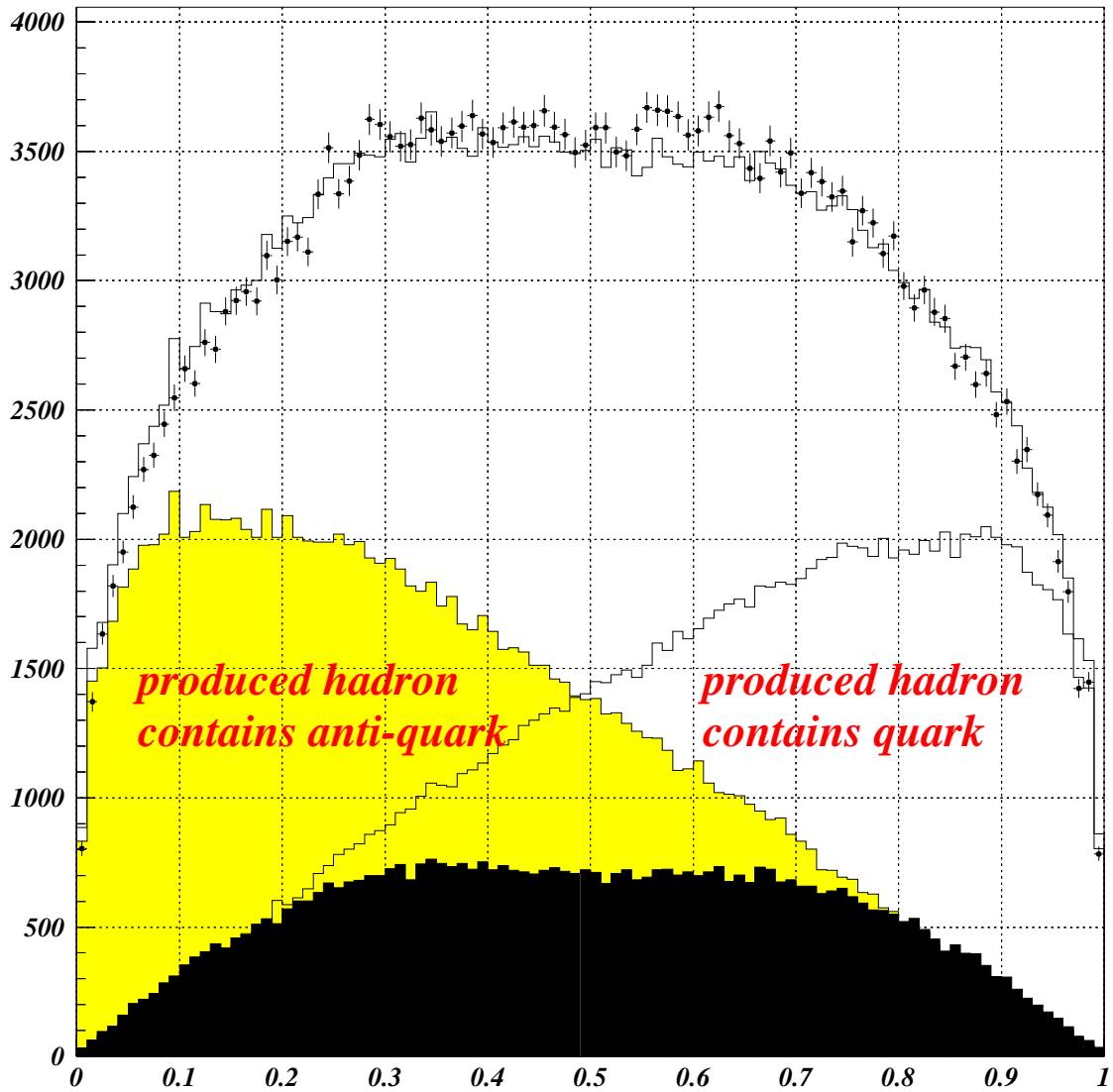
1. T. Allmendinger  
Neutral B-Meson Oscillations in Inclusive Samples with the DELPHI-Detector at LEP  
IEKP-KA/02-06 Universität Karlsruhe



B Lifetime Working Group

Abbildung 1: Resultat des Fits der Lebensdauer (oben). Dargestellt sind mit  $B^+$ -Hadronen (links) und mit  $B^0$ -Hadronen (rechts) angereicherte Proben im Vergleich zu Daten. Die Zusammensetzung des B-Hadrons (wie sie in der Monte Carlo Studie ermittelt wurde) ist darüber gelegt; mit "bg" ist der Untergrund aus nicht  $b\bar{b}$   $Z^0$ -Zerfällen bezeichnet. Unten sind die Messungen gezeigt, die zum gegenwärtigen Weltmittelwert des Verhältnisses der Lebensdauern von neutralen und geladenen B-Mesonen beitragen, der Wert der Karlsruher Analyse steht unter DELPHI topology.





*Production Flavor Network Output*

Abbildung 2: Die Ausgabe des Softwarepakets BSAURUS. Sie illustriert die Fähigkeit zwischen einem b-Quark und einem Anti-b-Quark zum Zeitpunkt der Entstehung eines B-Hadrons zu unterscheiden. Der schwarze Bereich zeigt die Verteilung des Untergrundes durch u,d,s und c-Quarks.

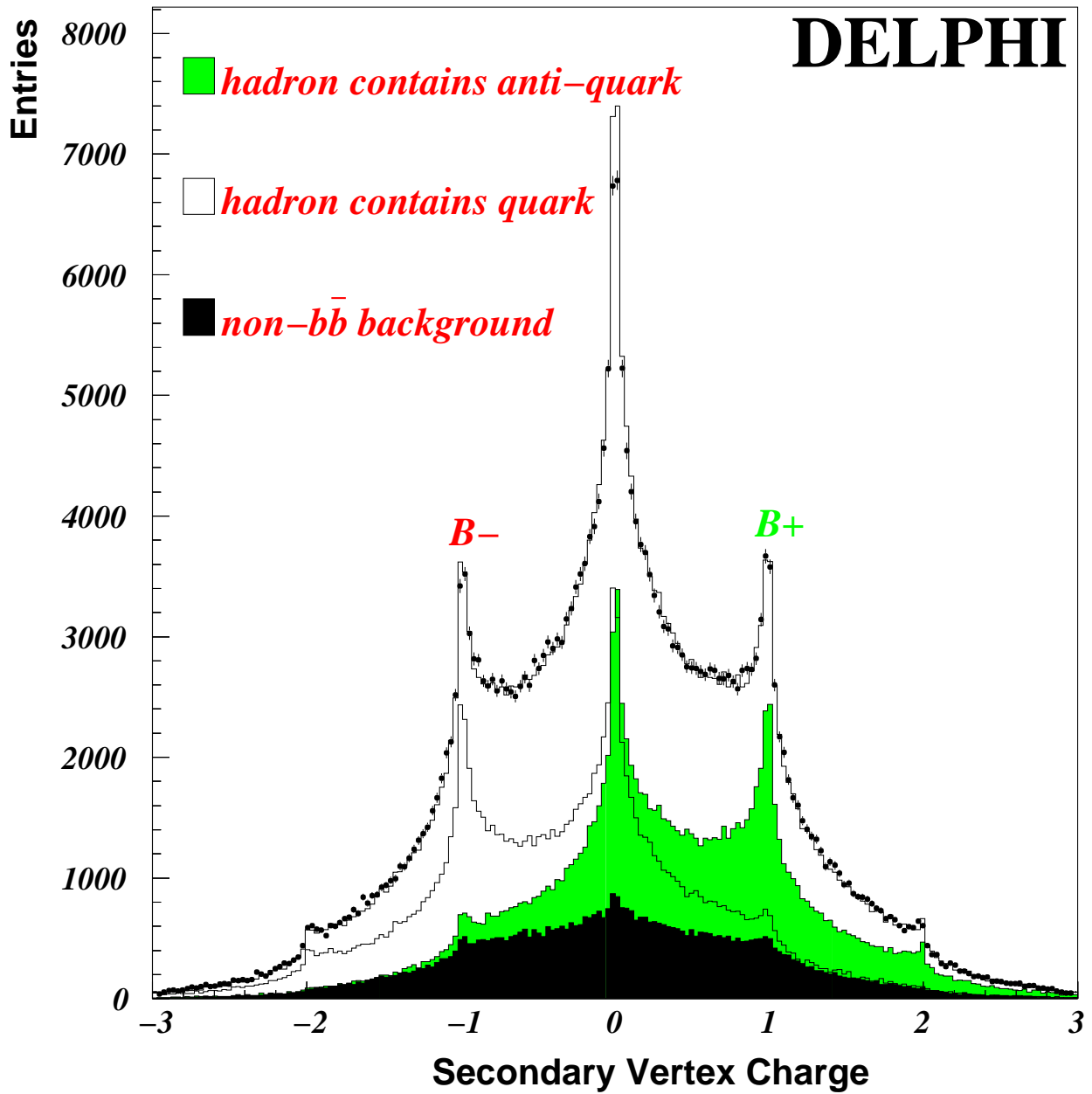


Abbildung 3: Die Verteilung der Vertexladung für die Daten (Punkte mit Fehlerbalken), das Ergebnis der Anpassung und die Beiträge neutraler und geladener b-Hadronen.

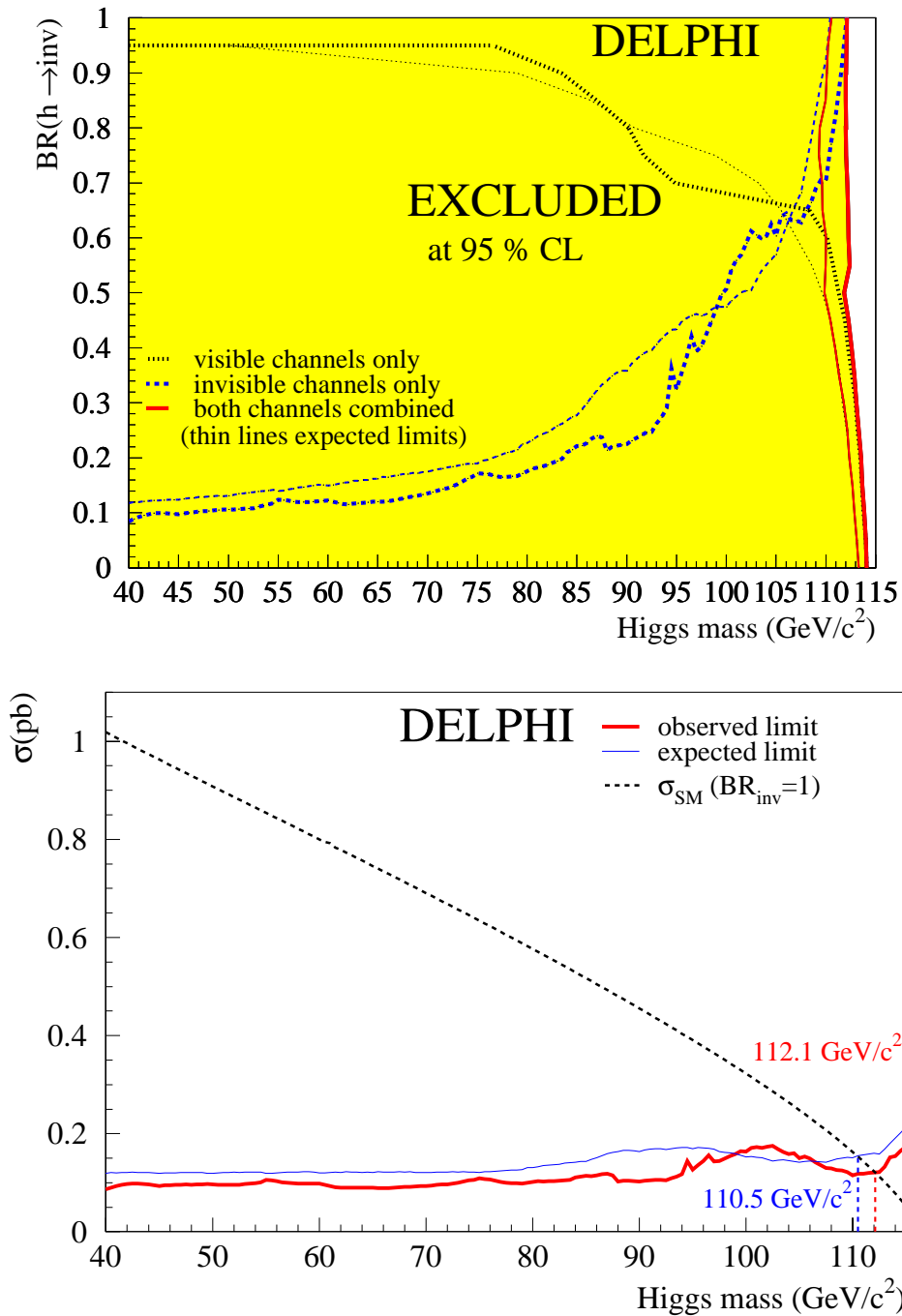


Abbildung 4: DELPHI-Ausschlusskurve für ein Higgs-Boson mit beliebigem Verzweungsverhältnis in sichtbare und unsichtbare Endzustände (oben). Für  $BR(h \rightarrow inv)=0$ , erhält man wieder den Standardmodellwert von  $114.3 GeV$ . Unten der 95% C.L. obere Grenze für den Wirkungsquerschnitt des Higgsbosons multipliziert mit dem Verzweungsverhältnis des Higgsbosons in unsichtbaren Endzustände. Die Daten aller LEP-Experimente wurden kombiniert. Die gepunktete Linie entspricht der Wirkungsquerschnitt des Standardmodells, so dass man für  $BR(h \rightarrow inv)=1$  eine Grenze von  $114.3 GeV$  erhält.

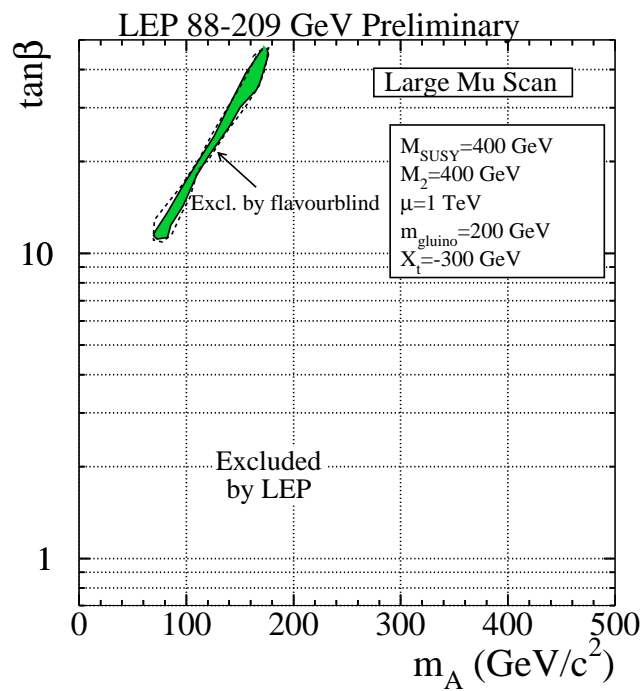
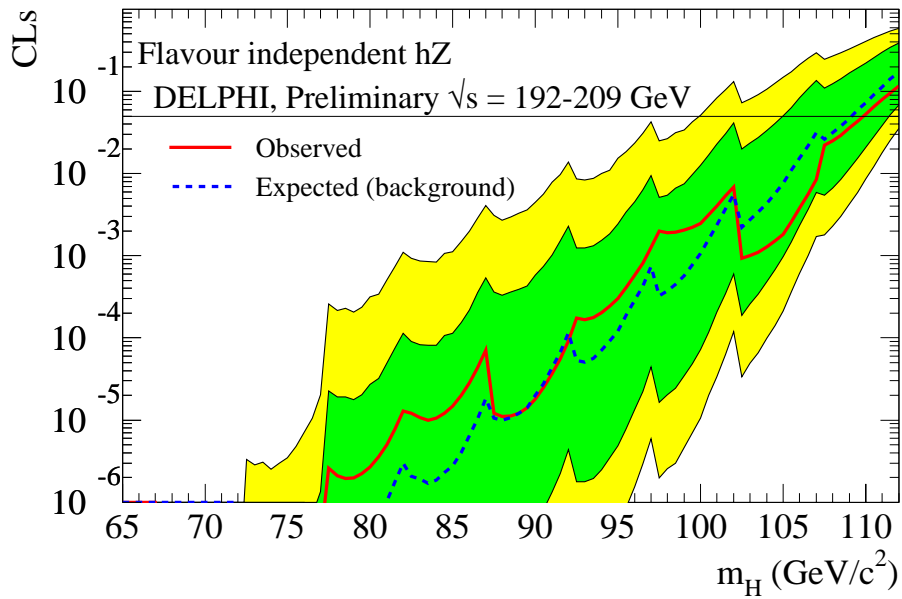
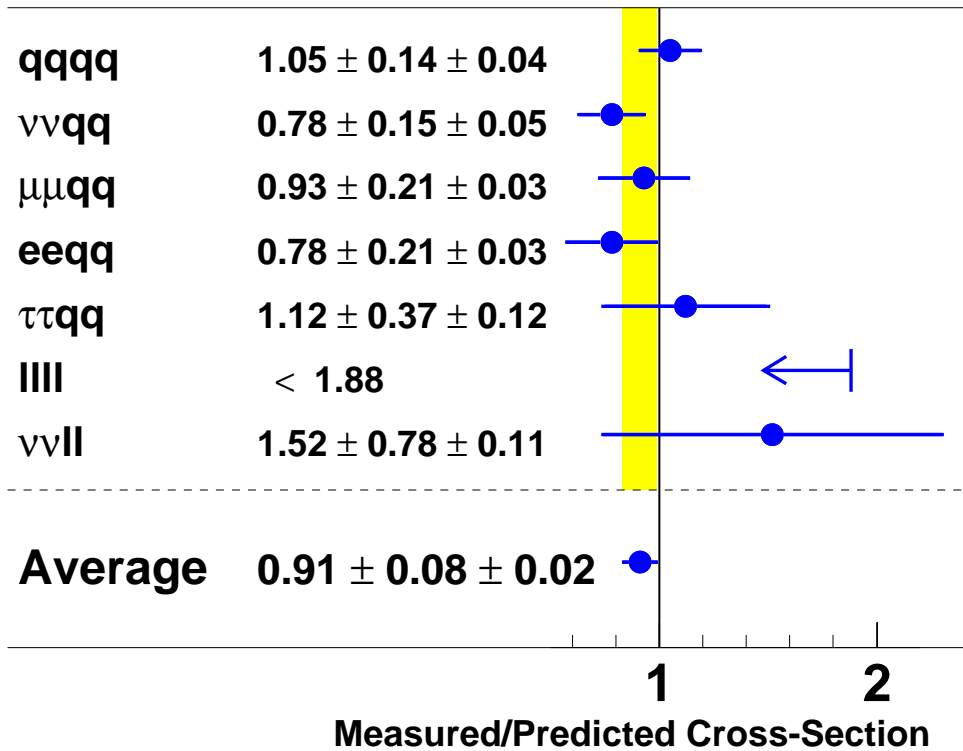


Abbildung 5: DELPHI-Ausschlusskurve für ein Higgs-Boson mit beliebigen Zerfall in  $q\bar{q}$  oder  $gg$ -Paare. Unten das large- $\mu$ -Szenario, der dunkle Bereich ist mit den LEP-Ergebnissen für Zerfälle in  $q\bar{q}$  oder  $gg$ -Paare ausgeschlossen.

## DELPHI



## DELPHI

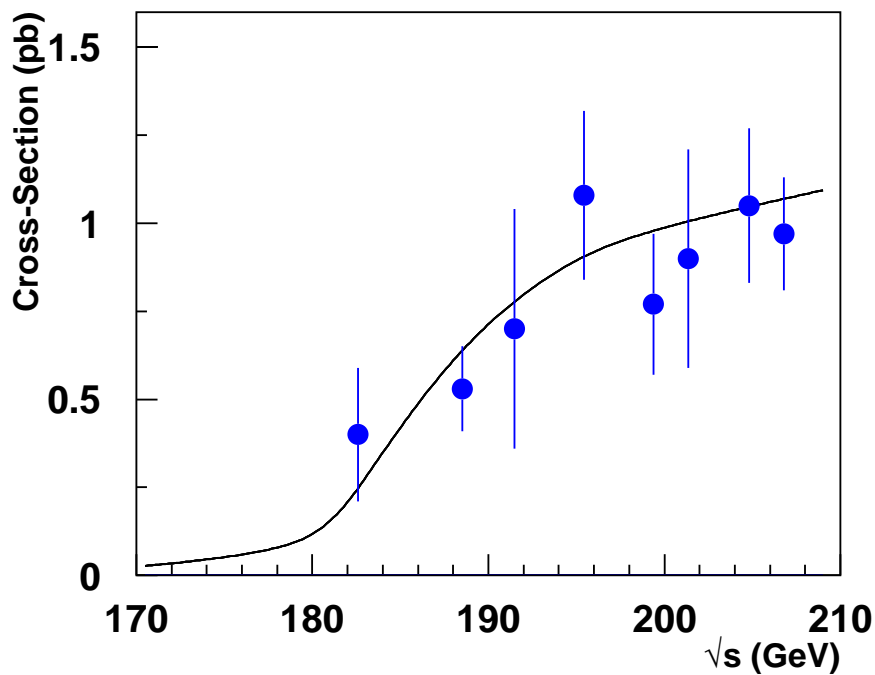


Abbildung 6: Der gemessene ZZ-Produktionswirkungsquerschnitt für jeden Kanal (oben) sowie die Kombination aller Kanäle nach Schwerpunktsenergie.

▨ SM:  $\chi^2/\text{d.o.f} = 33.1/17$   
■ MSSM:  $\chi^2/\text{d.o.f} = 22.4/13$

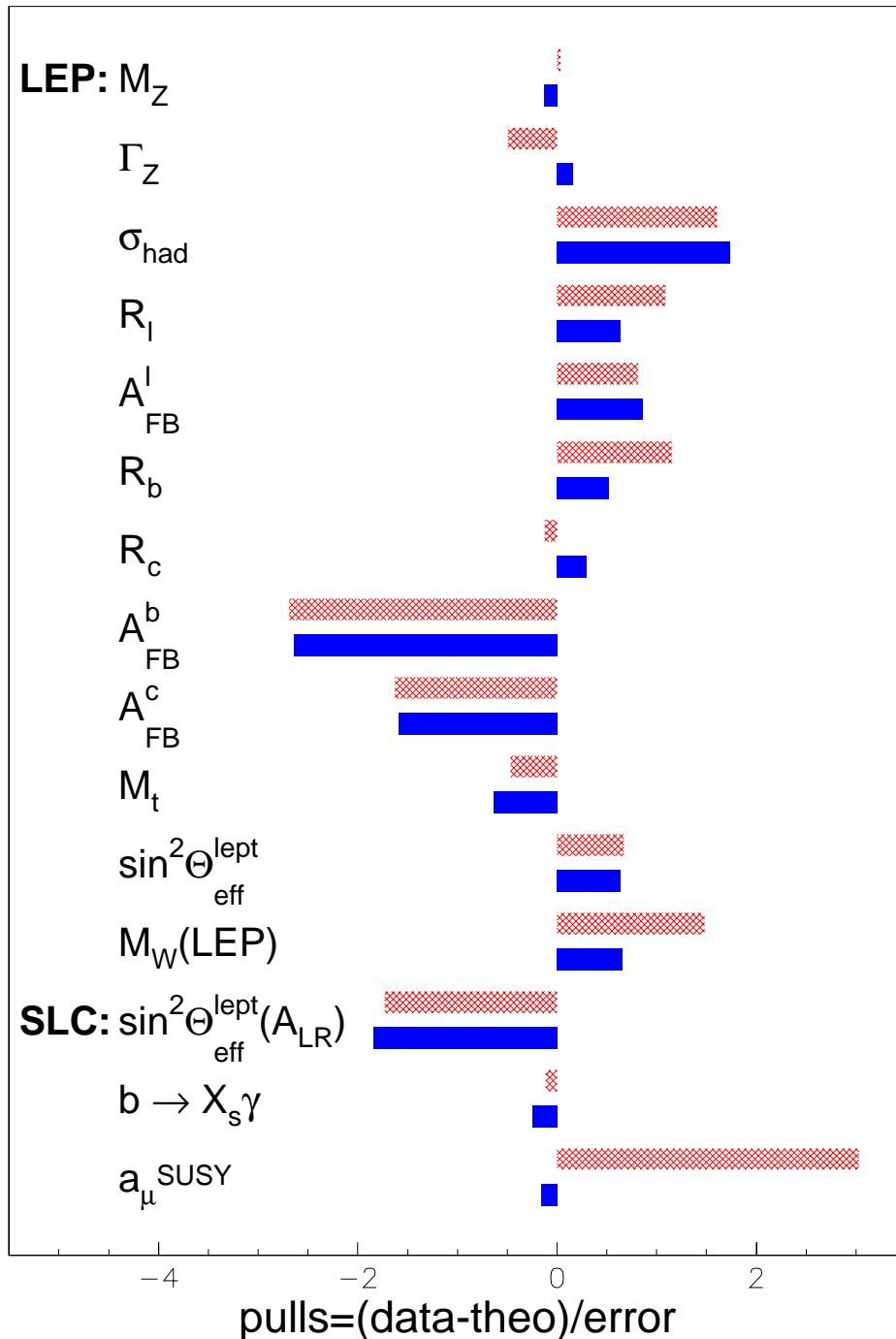


Abbildung 7: Die Abweichungen der elektroschwachen Variablen im Standard Model und im Minimalen Supersymmetrischen Model (MSSM) von den gefitteten Werten. Für die MSSM Fits wurde das in Karlsruhe entwickelte Programm MSSM-Fitter benutzt (W. de Boer et al., Z. Phys. **C75** (1997) 627).

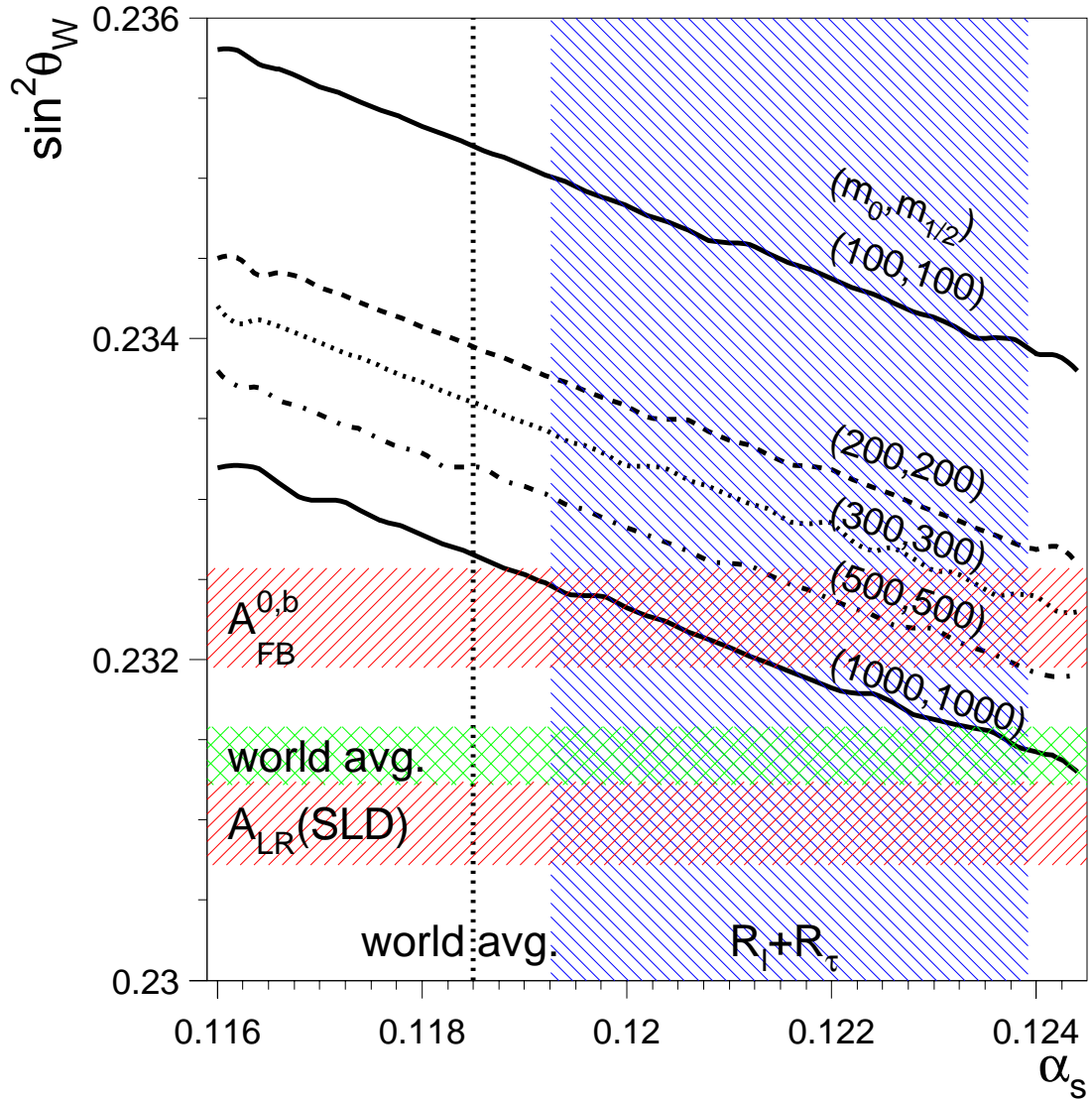


Abbildung 8: Die Kopplungskonstanten, die Vereinheitlichung im MSSM für verschiedene SUSY Massenparameter geben (Linien) verglichen mit den experimentellen Werten (schraffierte Flächen). Für SUSY Massenparameter unterhalb 1 TeV sind die größeren Werte der Kopplungskonstanten bevorzugt; z.B. für SUSY Massenparameter von 1 TeV findet man  $\alpha_s = 0.124$  für den world average von  $\sin^2 \theta_W$  oder für den world average von  $\alpha_s = 0.119$  findet man  $\sin^2 \theta_W = 0.2325$ .