

# HERA-B Experiment

**Beteiligte Institute:** NIKHEF Amsterdam, Univ. Texas Austin, Univ. Barcelona, IHEP Beijing, Tsinghua Univ. Beijing, Humboldt Univ. Berlin, Univ. und INFN Bologna, Univ. Cincinnati, LIP and Univ. Coimbra, Niels Bohr Inst. Copenhagen, Wayne State Univ. Detroit, Univ. Dortmund, JINR Dubna, DESY Hamburg, MPI Kernphys. und Univ. Heidelberg, Univ. of Houston, INR Kiev, LIP und Univ. Lissabon, Jozef Stefan Inst. und Univ. Ljubljana, UC Los Angeles, Univ. Mannheim, ITEP Moscow, MPI Phys. München, Univ. Oslo, Univ. Rostock, Univ. Siegen, Univ. Utrecht, DESY Zeuthen, Univ. Zürich.

**Sprecher:** M. Medinnis, DESY

**Mit dem HERA-B-Experiment soll insbesondere die Produktion schwerer Quarks in hochenergetischen Wechselwirkungen von Protonen mit Kernen untersucht werden. Das Experiment benutzt den HERA-Protonenstrahl, dessen Halo an den Atomkernen verschiedener dünner Drahttargets gestreut wird. Mit einer großen Akzeptanz, vorzüglicher Teilchenidentifikation und einem hochauflösenden Vertexdetektor bietet das HERA-B-Spektrometer die besten Voraussetzungen für detaillierte Studien komplexer Vielteilchen-Endzustände. Der Zwei-Lepton-Trigger von HERA-B kann mit einer ausgeklügelten, schnellen Elektronik Ereignisse, welche zwei Leptonen enthalten, aus einem hohen Untergrund selektieren. Zum Beispiel werden die Zerfälle von  $J/\psi$ -Mesonen in Leptonpaare unter einer milliardenfach höheren Zahl von anderen Ereignissen herausgefiltert. Durch die Benutzung von Targetdrähten aus verschiedenen Materialien (Kohlenstoff, Titan, Wolfram) kann mit HERA-B die Abhängigkeit der Teilchenproduktion von der Kernladungszahl untersucht werden.**

Im letzten Jahr hat die Kollaboration an der Analyse der in der Datennahmeperiode 2002/03 von HERA-B genommenen Daten gearbeitet. Diese Daten enthalten etwa 150 Millionen Ereignisse, die mit dem Zwei-Lepton-Trigger aufgenommen wurden und von denen etwa 300 000 Ereignisse ein  $J/\psi$ -Meson im Endzustand enthalten. Zusätzlich wurden etwa 200 Millionen Ereignisse mit einem sogenannten „Minimum Bias Trig-

ger“ aufgenommen, die allgemeine Studien inelastischer Proton-Kern-Reaktionen erlauben.

Auf der Basis dieser Daten bereitet die HERA-B-Kollaboration verschiedene Veröffentlichungen über die Produktion schwerer Quarks (Bottom-, Charm- und Strange-Quarks) vor. Im Berichtsjahr sind zwei Analysen veröffentlicht worden: Grenzen auf flavour-ändernde neutrale Ströme im Zerfall neutraler D-Mesonen und Grenzen für die Produktion von Pentaquarkzuständen mit Strangeness. Beide Veröffentlichungen sind mit großem Interesse aufgenommen worden, was bei der Pentaquark-Analyse auch durch die Veröffentlichung in Physics Review Letters unterstrichen wird. Im Folgenden wird auf die im Berichtsjahr am weitesten fortgeschrittenen Analysen eingegangen.

## Suche nach Pentaquarkzuständen

Der „Minimum Bias“ Datensatz wurde nach einer Signatur für die Produktion der exotischen Baryonen  $\theta^+$  (1530) und  $\Xi^-$  (1860) durchsucht. Diese neuen Baryonen wurden kürzlich in anderen Experimenten beobachtet und vorläufig als Bindungszustände von fünf Quarks, „Pentaquarks“, identifiziert, wie sie unter anderem von dem „Chiral Soliton Model“ vorhergesagt wurden. In HERA-B wurden diese Zustände nicht beobachtet. Die daraus abgeleiteten oberen Grenzen für deren Produktion sind äußerst einschränkend für theo-

retische Modelle, die Voraussagen für die Produktion solcher Zustände gemacht haben.

Der erste Hinweis auf die Existenz des  $\theta^+(1530)$ -Baryons kam 2003 von dem LEPS-Experiment in der japanischen Forschungseinrichtung Spring-8. Mehrere Experimente, so auch ZEUS und HERMES an HERA, haben danach die Produktion dieses Zustandes bestätigt. Der Zustand  $\Xi^-(1860)$  wurde bisher nur in dem CERN-Experiment NA49 beobachtet, bislang ohne Bestätigung von anderen Experimenten. HERA-B berichtete als erstes Experiment über die Nicht-Beobachtung dieser Zustände. Im Laufe des Berichtsjahres schlossen sich dann mehrere Experimente dieser Aussage an. Obwohl die Nicht-Beobachtungen die positiven Evidenzen nicht direkt widerlegen können, weisen sie doch darauf hin, dass die Produktionsmechanismen ähnlich exotisch wie die Teilchen selbst sein müssen. Durch die Bestimmung der oberen Grenzen für die Produktionsraten und, vielleicht noch wichtiger, durch obere Grenzen auf die Verhältnisse zu den Produktionsraten von wohlbekannten Zuständen, trägt HERA-B wesentlich zum Verständnis der Produktionsmechanismen bei und vielleicht auch zum Verständnis der Natur dieser Zustände selbst – wenn sie denn existieren.

## Der $J/\psi$ -Wirkungsquerschnitt

Der Wirkungsquerschnitt für  $J/\psi$ -Produktion in proton-induzierten Reaktionen wurde über einen weiten Bereich von Schwerpunktsenergien durch verschiedene Gruppen am Fermilab, CERN und kürzlich auch am RHIC gemessen. Allerdings ist die Situation nicht wirklich zufriedenstellend, da Messungen bei gleichen oder ähnlichen Energien zum Teil bis zu einem Faktor 2 differieren, weit außerhalb der angegebenen Fehler. Für HERA-B stellt diese Unsicherheit ein großes Problem dar, weil der  $J/\psi$ -Wirkungsquerschnitt als Referenz zur Normierung der mit dem Zwei-Lepton-Trigger genommenen Daten dient. Deshalb bemüht sich die HERA-B-Kollaboration, den  $J/\psi$ -Wirkungsquerschnitt selbst zu bestimmen, und zwar mit Hilfe des „Minimum Bias“ Datensatzes.

Abbildung 45 zeigt das aus diesen Daten gewonnene, sehr saubere Signal, das allerdings viel weniger  $J/\psi$ -Mesonen enthält als der getriggerte Datensatz (etwa 150

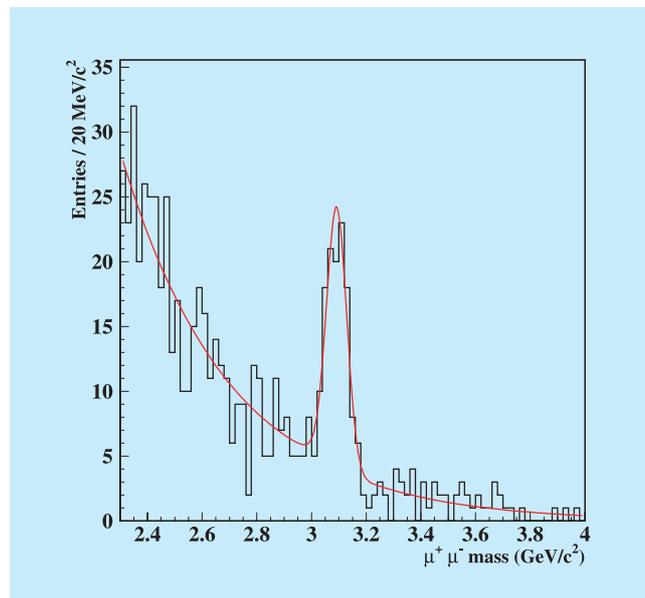


Abbildung 45: Das  $\mu^+\mu^-$ -Massenspektrum im „Minimum Bias“ Datensatz. Die prominente Überhöhung bei etwa  $3.1 \text{ GeV}/c^2$  stammt von Zerfällen des  $J/\psi$ .

im Vergleich zu den 300 000  $J/\psi$  mit Trigger). Der Vorteil des „Minimum Bias“ Datensatzes besteht darin, dass die Nachweiswahrscheinlichkeit weitaus einfacher und zuverlässiger bestimmt werden kann. Das vorläufige Ergebnis für den Wirkungsquerschnitt ist zusammen mit anderen Messungen in Abbildung 46 gezeigt. Die Proton-Kern Ergebnisse (pN) wurden auf die gleiche A-Abhängigkeit ( $\alpha = 0.96$ ) umgerechnet. Die Analyse steht kurz vor dem Abschluss und soll in Kürze veröffentlicht werden. Diese neue Wirkungsquerschnittsmessung, kombiniert mit anderen Ergebnissen und theoretischen Annahmen für die Anpassung bei verschiedenen Energien, wird in Zukunft als Referenz für die Normierung anderer HERA-B-Messungen dienen: Ein Beispiel dafür ist die Bestimmung des Wirkungsquerschnittes der Beauty-Produktion, die im Folgenden beschrieben wird.

## Die Erzeugung von Beauty-Quarks

Die Erzeugung von Bottom- und Antibottom-Quarks ( $b$ - und  $\bar{b}$ -Quarks mit der Quantenzahl Beauty) in

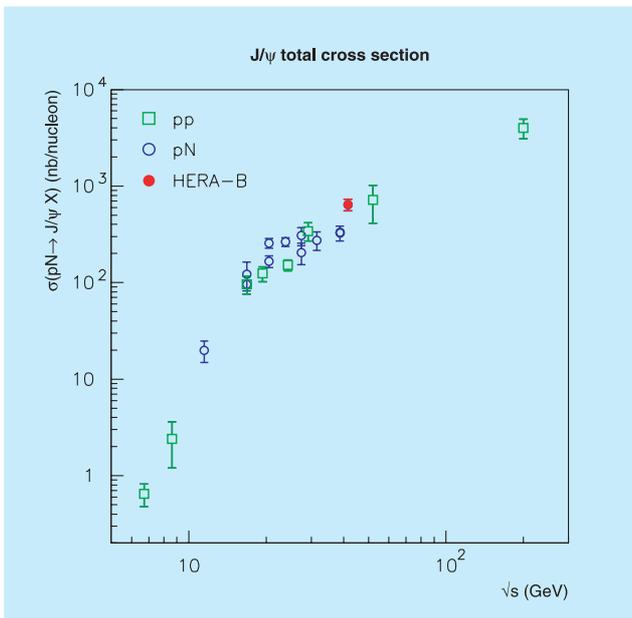


Abbildung 46: Zusammenstellung von Messungen des totalen Wirkungsquerschnitts für  $J/\psi$ -Produktion als Funktion der Schwerpunktsenergie.

proton-induzierten Reaktionen ist ebenfalls ein Gebiet, in dem die vorhandenen Messergebnisse widersprüchlich sind. In Reaktionen, die durch die starke Kernkraft vermittelt werden, wird immer ein Quark mit seinem Antiquark gemeinsam erzeugt. Nach der Erzeugung können sich sowohl das  $b$ - als auch  $\bar{b}$ -Quark mit leichteren Quarks und Antiquarks zu Bottom-Hadronen vereinen, die offen die Beauty-Quantenzahl des  $b$ - oder  $\bar{b}$ -Quarks tragen („open beauty“). Das Quark-Antiquark-Paar kann aber auch direkt einen Zustand der  $\Upsilon$ -Familie bilden, wobei sich die Beauty-Quantenzahlen nach außen aufheben („hidden beauty“). Außer der HERA-B-Messung gibt es nur zwei weitere Messungen des „open beauty“ Wirkungsquerschnitts in dem gleichen Energiebereich, die aber nicht miteinander konsistent sind.

Um mit HERA-B den „open beauty“ Wirkungsquerschnitt zu messen, wird nach Zerfällen von Bottom-Hadronen in  $J/\psi$  gesucht. Die  $J/\psi$ -Zerfälle in Leptonen lassen sich sehr effizient mit dem Zwei-Lepton-Trigger selektieren. Die Abtrennung der  $J/\psi$ 's, die aus Zerfällen von Bottom-Hadronen stammen, von den weitaus überwiegenden direkt produzierten  $J/\psi$ 's gelingt durch Nut-

zung der endlichen Lebensdauer der Bottom-Hadronen: im HERA-B Detektor fliegt ein Bottom-Hadron typischerweise etwa 1 cm bevor es in andere Teilchen zerfällt. Dieser von dem Targetdraht separierte Zerfallsvertex kann mit dem Vertexdetektor sehr genau vermessen werden. Die Wirkungsquerschnittsmessung besteht nun darin, die Anzahl der „detached“  $J/\psi$ 's mit der Anzahl der „direkten“  $J/\psi$ 's zu vergleichen. Da aus anderen Experimenten bekannt ist, mit welcher Wahrscheinlichkeit Bottom-Hadronen in  $J/\psi$ 's zerfallen, lässt sich das Verhältnis des Bottom- zum  $J/\psi$ -Wirkungsquerschnitt bestimmen. Eine solche Relativmessung bietet den Vorteil, dass die Unsicherheiten in der Bestimmung der Effizienz des Zwei-Lepton-Triggers erheblich reduziert werden.

Entsprechend wurde der  $\Upsilon$ -Wirkungsquerschnitt relativ zum  $J/\psi$ -Wirkungsquerschnitt bestimmt. Die Analyse beider relativen Wirkungsquerschnitte ist abgeschlossen. Die endgültigen Zahlen werden veröffentlicht, sobald der endgültige Wert des absoluten  $J/\psi$ -Wirkungsquerschnittes vorliegt.

## A-Abhängigkeit der $J/\psi$ -Produktion

Naiv würde man erwarten, dass der Wirkungsquerschnitt für selten erzeugte Teilchen, wie das  $J/\psi$ , einfach von der Anzahl der Nucleonen abhängt, die das einfallende Proton „sieht“, wenn es den Kern durchquert. Dann würde der Wirkungsquerschnitt linear von der Massenzahl des Targetkerns abhängen:

$$\sigma_{pA} = \sigma_{pN} \cdot A.$$

Dabei ist  $\sigma_{pA}$  der Wirkungsquerschnitt für  $J/\psi$ -Produktion in einer Kollision eines Protons mit einem Kern der Massenzahl  $A$  und  $\sigma_{pN}$  ist der gleiche Wirkungsquerschnitt für die Kollision eines Protons mit einem einzelnen Nukleon (Proton oder Neutron). Experimentell ergibt sich allerdings, dass die obige Gleichung modifiziert werden muss, um die Beobachtungen zu beschreiben:

$$\sigma_{pA} = \sigma_{pN} \cdot A^\alpha,$$

wobei der neu eingeführte Parameter  $\alpha$  zu etwas weniger als 1 gemessen wird (im Mittel etwa 0.96) und vom

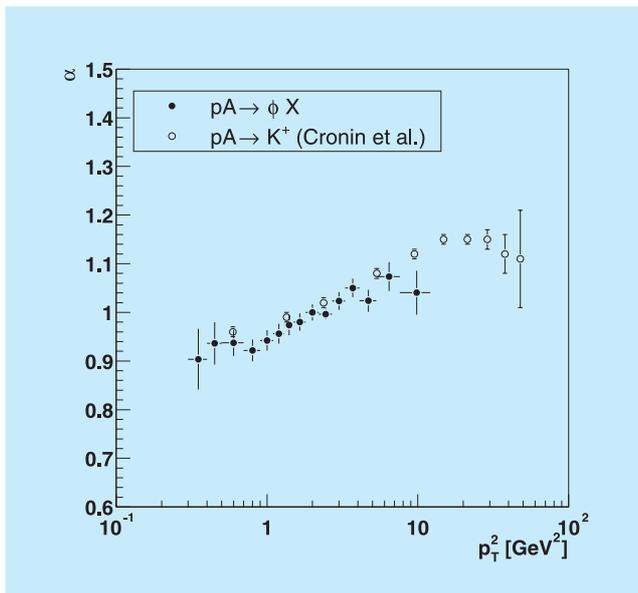


Abbildung 47: Die Abhängigkeit der „nuklearen Unterdrückung“  $\alpha$  (siehe Text) vom dem Impuls des  $J/\psi$  transversal zur Strahlrichtung.

Impuls des erzeugten  $J/\psi$  abhängt. Es gibt verschiedenen Spekulationen über den Grund für diese „ $J/\psi$ -Unterdrückung“: mögliche Modifikationen der Partonimpulse der Nukleonen, wenn sie in einem Kern eingebettet sind, Modifikationen der Impulse der Partonen im Anfangszustand des Protons als Folge von Kollisionen in dem Kern vor der Erzeugung des  $J/\psi$  („re-scattering“), Aufbrechen des  $J/\psi$  in Kollisionen mit den anderen Nukleonen oder mit anderen in der Reaktion erzeugten Teilchen nach der  $J/\psi$ -Produktion und Quanteninterferenz-Effekte im Erzeugungsprozess. In Abbildung 47 ist ein vorläufiges Resultat von HERA-B für die Messung von  $\alpha$  als Funktion des  $J/\psi$ -Impulses transversal zu der Strahlrichtung ( $p_T$ ) im Vergleich zu einer Messung des Fermilab-Experimentes E866 gezeigt.

Die beiden Messungen stimmen gut überein. Die beobachtete Abhängigkeit vom Transversalimpuls lässt sich am ehesten mit dem oben erwähnten „re-scattering“-Mechanismus erklären. Wenn die Analysen abgeschlossen sind, wird HERA-B die Messungen von E866 in den theoretisch interessanten Bereich kleiner  $J/\psi$ -Longitudinalimpulse (parallel zur Strahlrichtung) erweitern.

## Produktion von $\psi'$ -Mesonen

Die theoretischen Modelle für die Produktion von Charmonium-Zuständen in hadronischen Reaktionen unterscheiden sich in den Vorhersagen der relativen Produktionsraten der verschiedenen Charmonium-Zustände wie  $\eta_c$ ,  $J/\psi$ ,  $\psi'$ ,  $\chi_c$ . Die Messung dieser verschiedenen Produktionsraten ist also wichtig, um die Modelle zu überprüfen und eventuell weiterzuentwickeln. Außerdem sind diese Messungen notwendig zum Verständnis der  $J/\psi$ -Raten, weil die beobachteten  $J/\psi$ 's zum Teil aus Zerfällen von anderen Charmonium-Zuständen stammen.

Nachdem HERA-B im letzten Jahresbericht bereits über die  $\chi_c$ -Analyse berichtet hat, soll hier die Analyse der  $\psi'$ -Produktion dargestellt werden. Die  $\psi'$ -Produktion in proton-induzierten Reaktionen ist in einen weiten Energiebereich von Experimenten am Fermilab und CERN gemessen worden. Allerdings erlauben die experimentellen Daten auch in diesem Fall noch keine Beantwortung der angesprochenen Fragen. Gründe dafür sind geringe Statistik oder zu geringe Massenauflösung, um die Zustände trennen zu können. Das von HERA-B gemessene Massenspektrum von Myonpaaren in Abbildung 48 mit den prominenten Überhöhungen bei den  $J/\psi$ - und  $\psi'$ -Massen enthält etwa 150 000  $J/\psi$  und 3000  $\psi'$ . Daraus hat HERA-B das Produktionsverhältnis von  $\psi'$  zu  $J/\psi$  (jeweils für den Zerfall

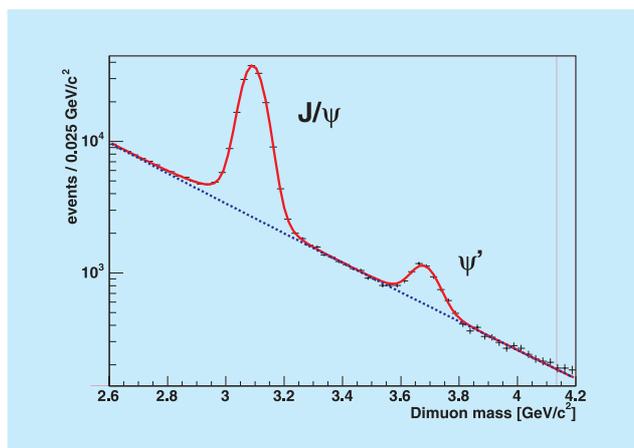


Abbildung 48: Massenspektrum von  $\mu^+\mu^-$ -Paaren gemessen in Proton-Kern-Reaktionen mit den Signalen für  $J/\psi$ - und  $\psi'$ -Erzeugung.

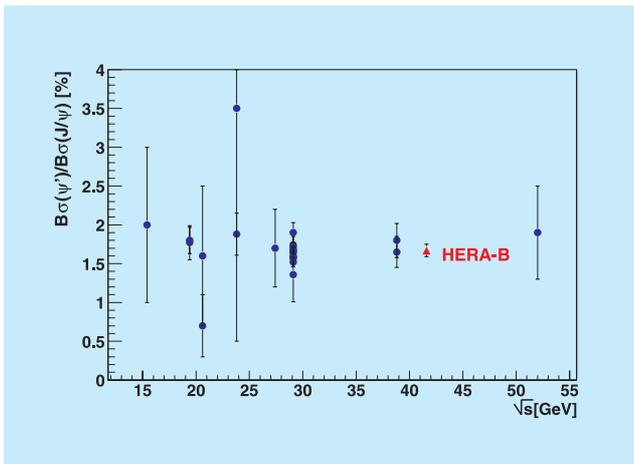


Abbildung 49: Messungen des Produktionsverhältnisses von  $\psi'$  zu  $J/\psi$  als Funktion der Energie. Die HERA-B-Messung hat den kleinsten statistischen Fehler. Die Messungen sind verträglich mit einer Energieunabhängigkeit.

in Myonpaare) bestimmt. In Abbildung 49 wird diese Messung mit denen anderer Experimente bei anderen Energien verglichen. Offensichtlich trägt HERA-B mit dem kleinen Fehler, der durch Hinzunahme des  $e^+e^-$ -Zerfallskanals noch verringert werden kann, wesentlich zur Verbesserung der experimentellen Situation bei.

## A-Abhängigkeit der $\phi(1020)$ -Produktion

HERA-B hat erstmals die A-Abhängigkeit der  $\phi(1020)$ -Produktion in Proton-Kern Reaktionen bestimmt. Wie das  $J/\psi$  ist das  $\phi$ -Meson ein gebundener Zustand eines Quarks mit seinem eigenen Antiquark; in diesem Fall ist es ein Quark-Paar mit Strangeness und Anti-Strangeness. Auch hier wird die A-Abhängigkeit mit einem Potenzgesetz  $\sim A^\alpha$  parametrisiert. Die Abhän-

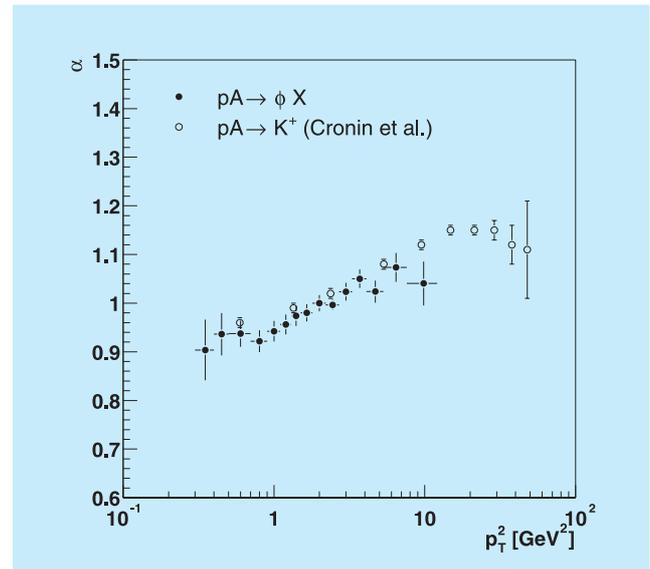


Abbildung 50: Die Abhängigkeit der „nuklearen Unterdrückung“  $\alpha$  (siehe Text) vom dem Impuls des  $\phi(1020)$  transversal zur Strahlrichtung. Zum Vergleich wird eine Messung von  $\alpha$  für die Produktion von  $K^+$ -Mesonen gezeigt.

gigkeit des Exponenten  $\alpha$  vom Transversalimpuls des  $\phi$ -Mesons ist in Abbildung 50 gezeigt. Die Abbildung enthält auch einen Vergleich mit einer entsprechenden Fermilab-Messung für  $K^+$ -Mesonen. Beide Messungen stimmen untereinander und auch mit den  $J/\psi$ -Daten überein, was dem „re-scattering“ Mechanismus, der im vorigen Abschnitt als primäre Erklärung für den Anstieg mit dem Transversalimpuls herangezogen wurde, zusätzliche Glaubwürdigkeit verleiht.

Die Veröffentlichung dieses Ergebnisses, zusammen mit der ebenfalls bestimmten A-Abhängigkeit des  $K^*(892)$ -Zustandes und den differentiellen Wirkungsquerschnitten der Produktion der Vektormesonen  $\phi(1020)$  und  $K^*(892)$ , ist in Vorbereitung.

