



Neue Ergebnisse vom PHENIX- Experiment zu p+p- und Au+Au- Kollisionen am RHIC

DPG Frühjahrstagung 2003, Tübingen

Klaus Reygers
Universität Münster
für die PHENIX Kollaboration

Gefördert mit Mitteln des bmb+f



bmb+f

Großgeräte
der physikalischen
Grundlagenforschung

Relativistic Heavy Ion Collider



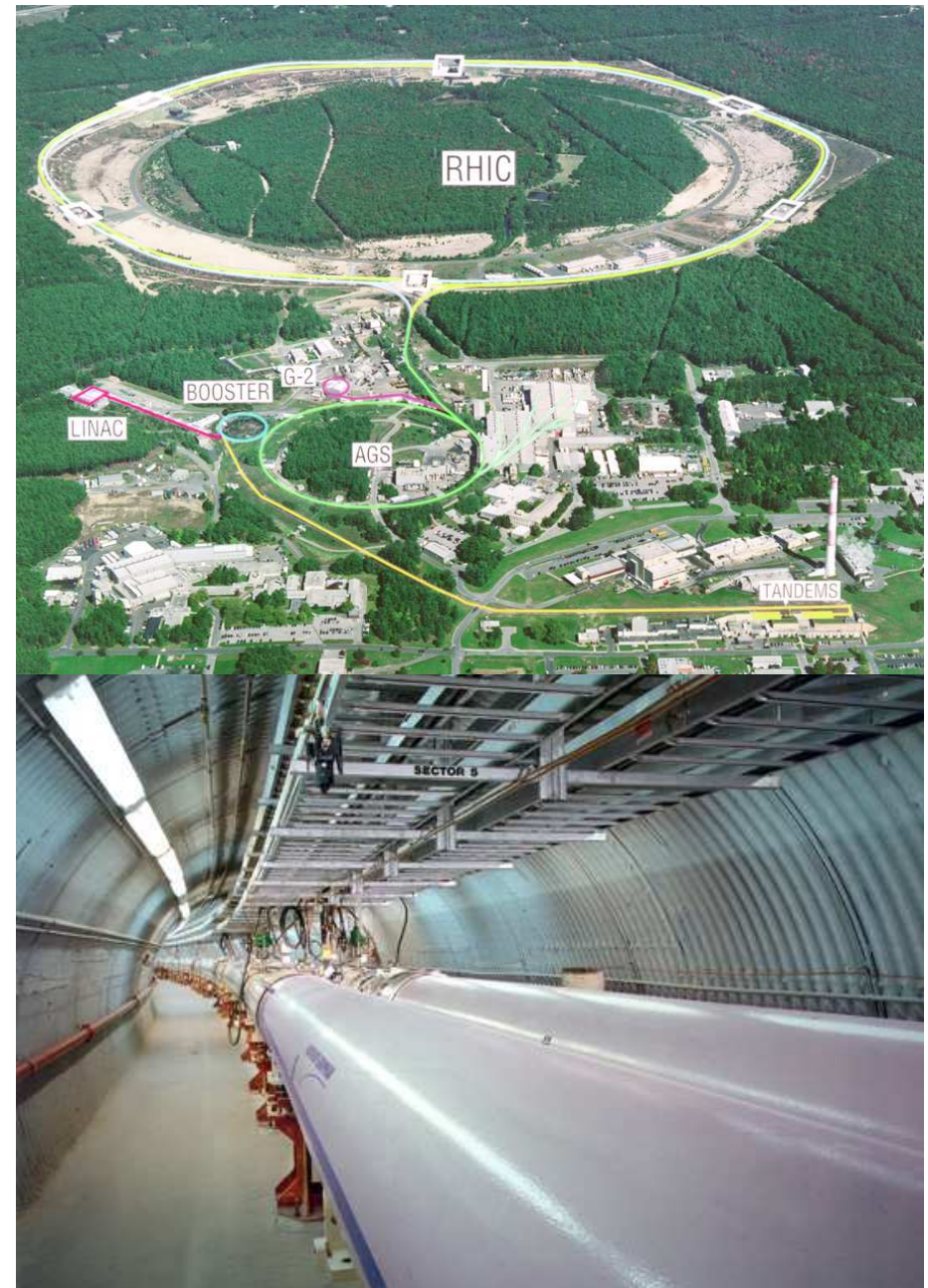
RHIC am Brookhaven National Laboratory,
Long Island

RHIC: Relativistic Heavy Ion Collider

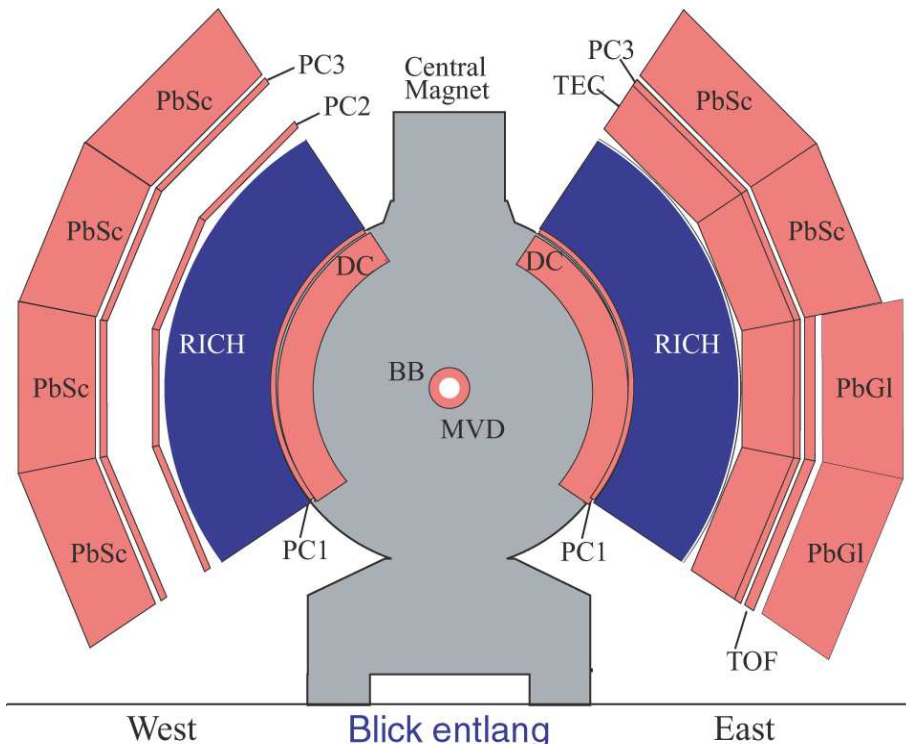
- Umfang: 3,83 km
- 2 unabhängige Ringe
- 6 Kreuzungspunkte, 4 Experimente:



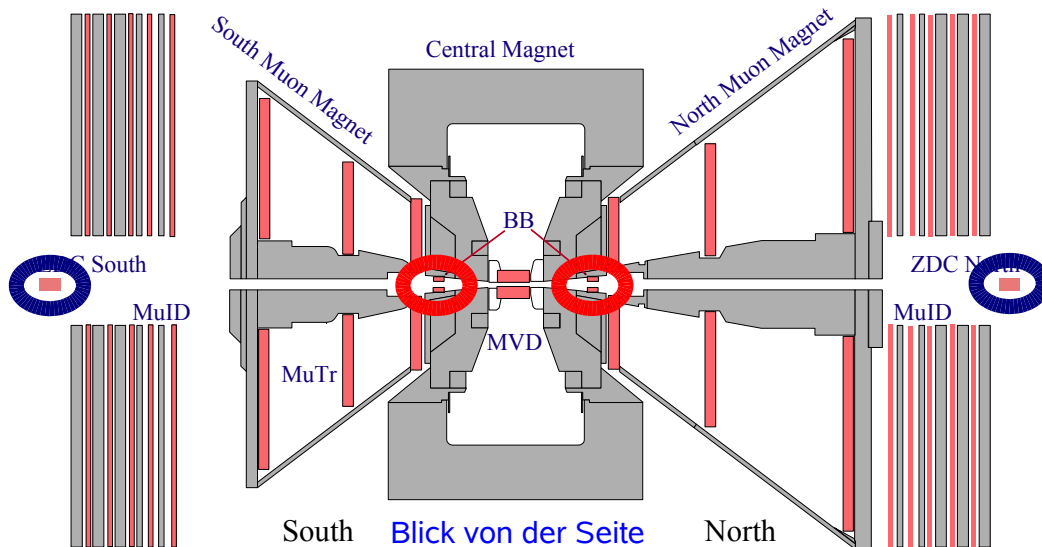
- Maximale Energie im Nukleon-Nukleon Schwerpunktsystem
 - ➔ 200 GeV für Gold-Gold
 - ➔ 500 GeV für p+p
- Strahlzeiten:
 - ➔ Run 1 (2000): Au+Au, $\sqrt{s_{NN}}=130$ GeV
 - ➔ Run 2 (2001-2002): Au+Au, p+p, $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
 - ➔ Run 3 (2003): d+Au, p+p, $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV



Aufbau des PHENIX-Experiments



Blick entlang der Strahlachse



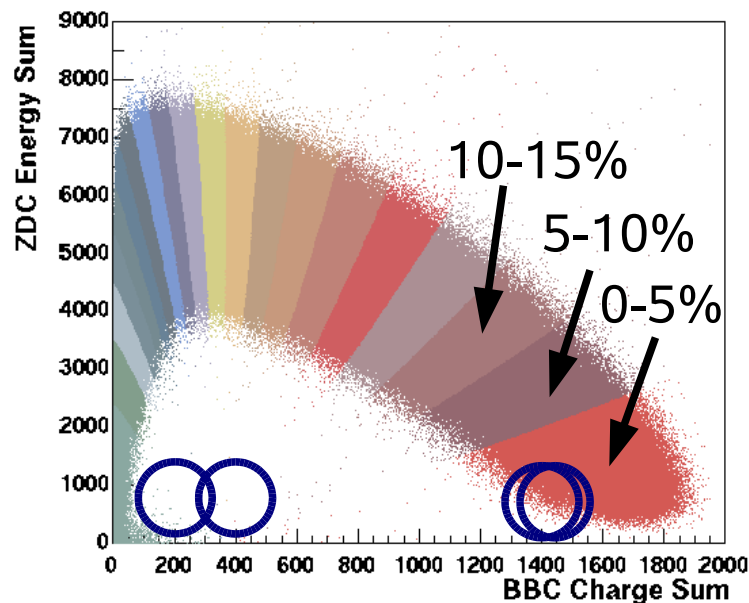
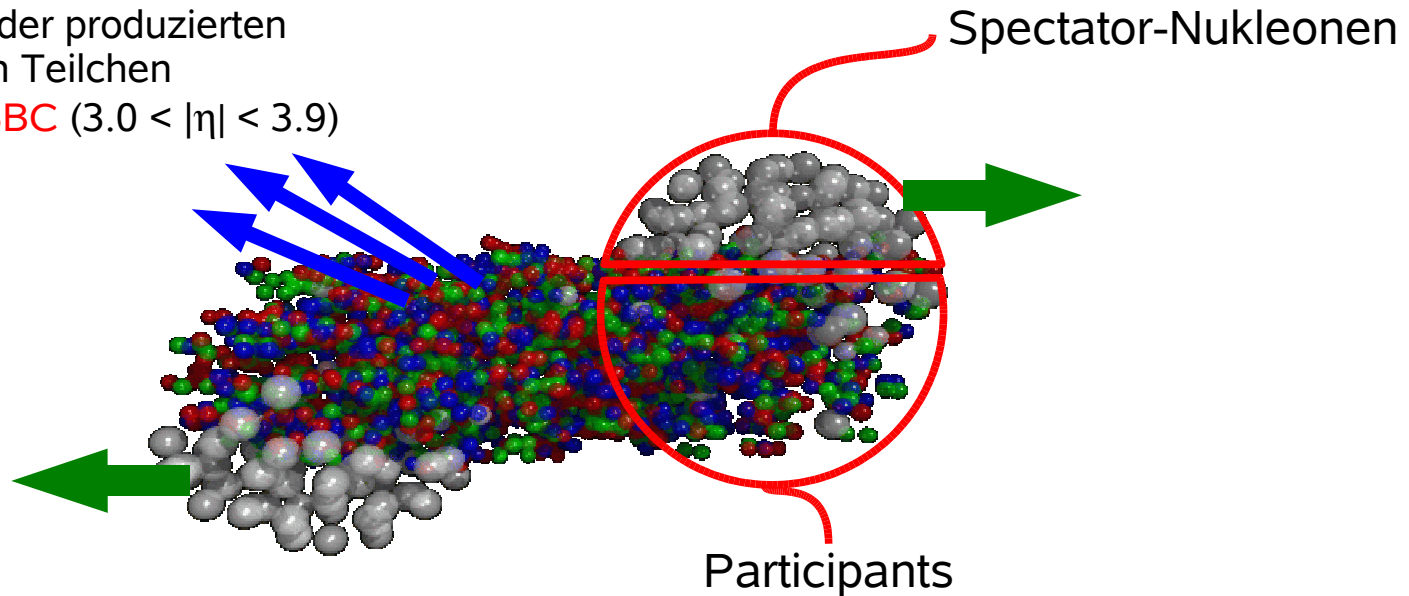
Blick von der Seite

- 2 zentrale Spektrometerarme (Rapiditätsbereich $|\eta| < 0.35$)
 - ➔ Spurerkennung:
 - Drift-Kammern (DC)
 - Pad-Kammern (PC)
 - ➔ Identifizierung geladener Hadronen:
 - Flugzeit-Detektoren (TOF) mit Startsignal von den Beam-Beam-Zählern (BBC)
 - ➔ Photonen und π^0 ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$):
 - Bleiszintillator Kalorimeter (PbSc)
 - Bleiglas Kalorimeter (PbGl)
 - ➔ Identifizierung von Elektronen:
 - Ring Imaging Cherenkov Detektor (RICH)
- 2 Myon-Spektrometer (Rapiditätsbereich $1.2 < |\eta| < 2.2$)
- Zentralitätsauswahl: BBC + ZDC

Zentralitätsauswahl in Au+Au

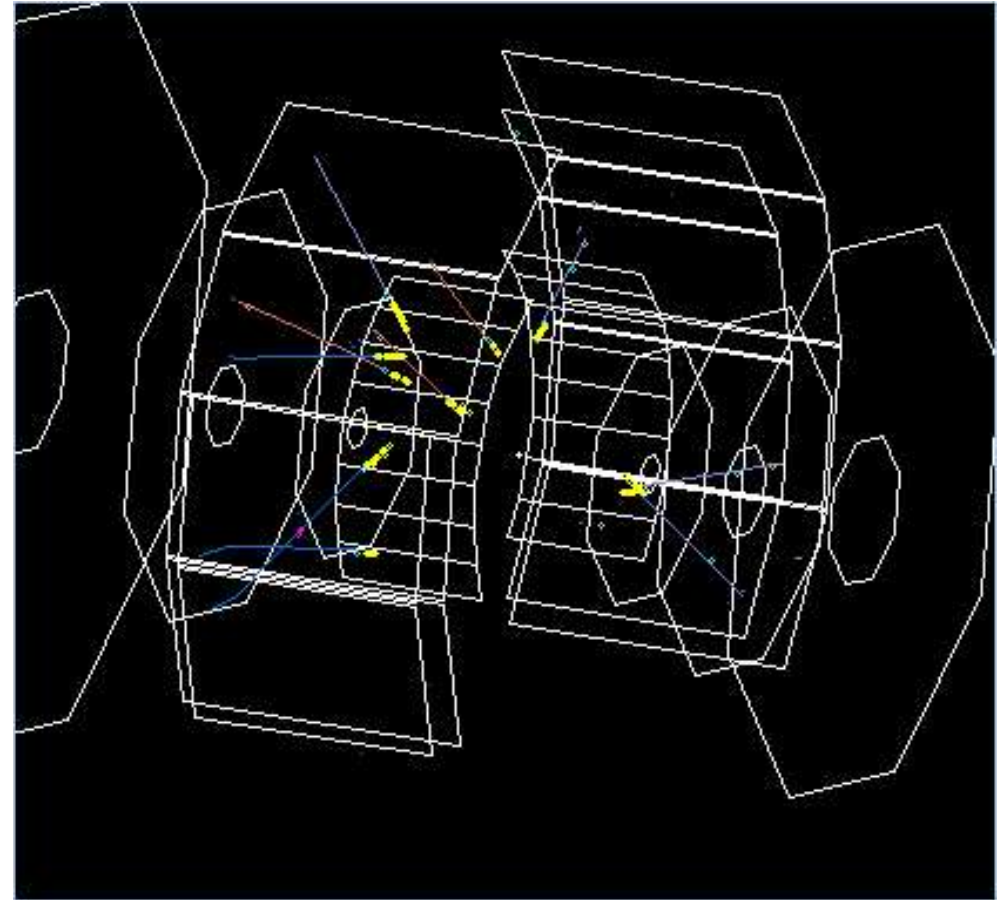
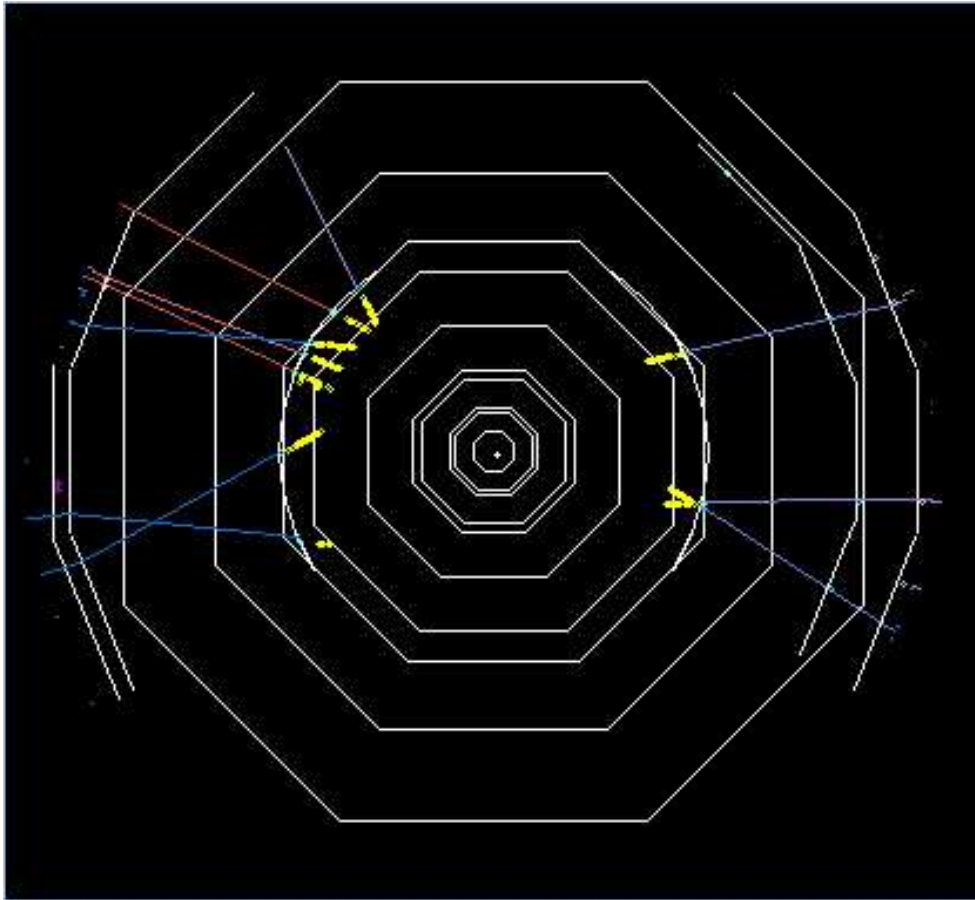
Messung der produzierten
geladenen Teilchen
mit dem **BBC** ($3.0 < |\eta| < 3.9$)

Messung der freien
Spectator-Neutronen
mit dem **ZDC**

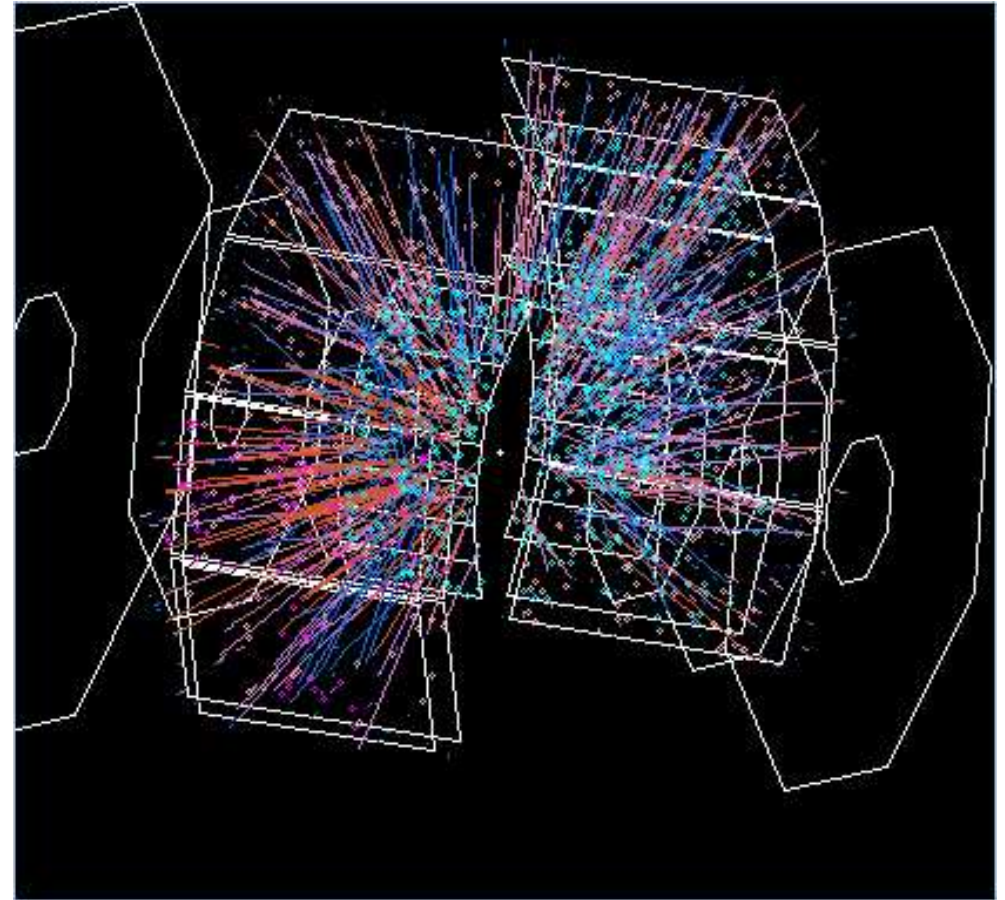
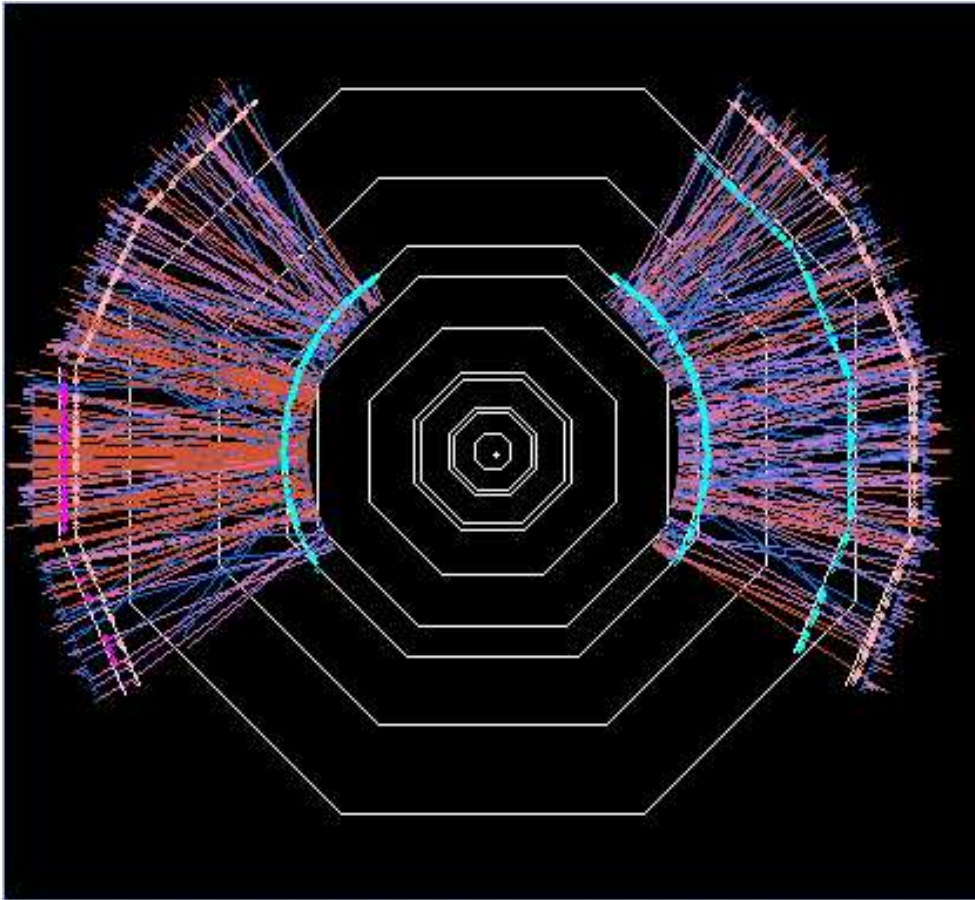


- Zentralität charakterisiert durch
 - ➔ N_{part} : Anzahl der Nukleonen mit mindestens einer inelastischen Nukleon-Nukleon-Kollision
 - ➔ N_{coll} : Anzahl der inelastischen Nukleon-Nukleon-Kollisionen
- N_{part} und N_{coll} aus Glauber-Rechnungen

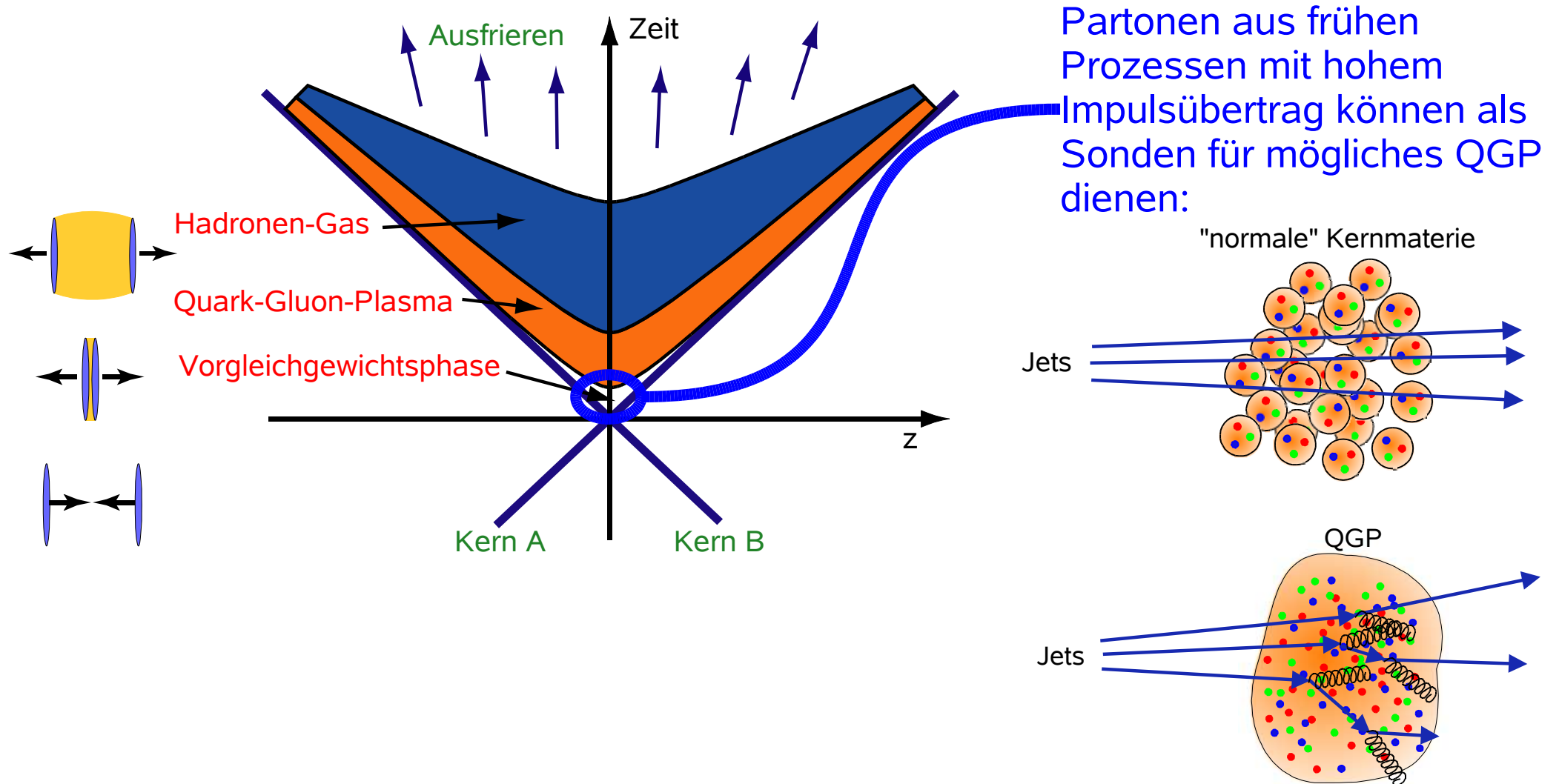
p+p-Kollision bei $\sqrt{s} = 200$ GeV



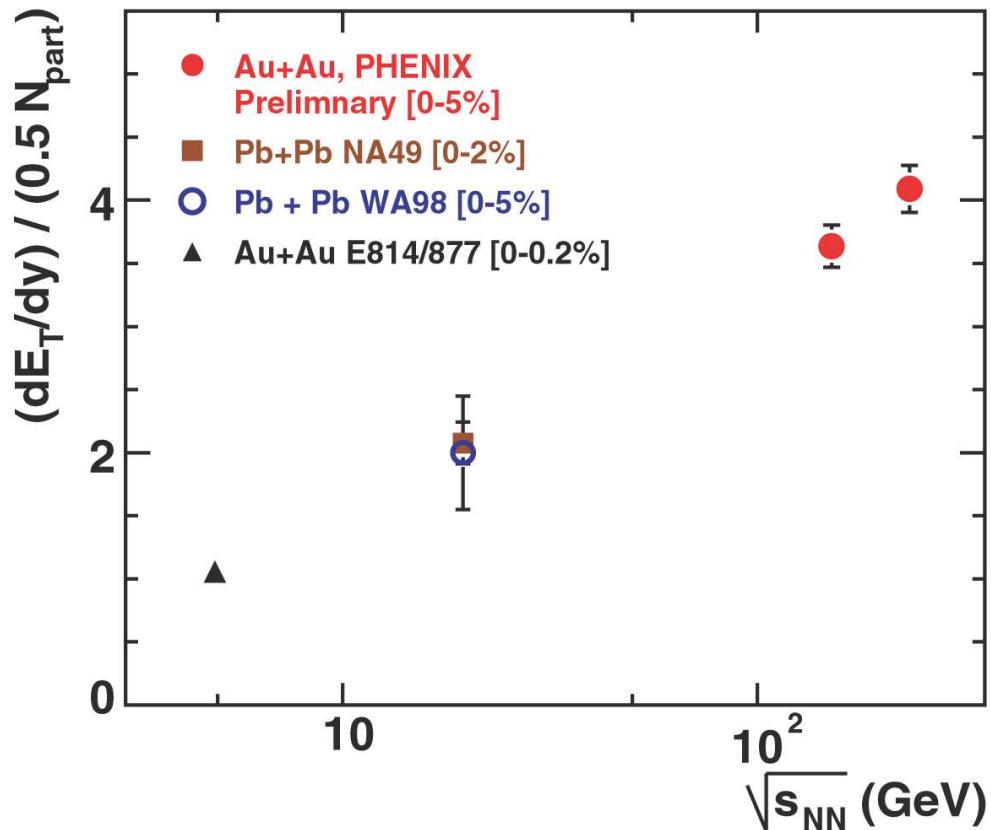
Au+Au-Kollision bei $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV



“QGP-Sonden” aus frühen Parton-Parton-Kollisionen



Energiedichte im Anfangszustand



- Au+Au, $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV, zentral (0-5%)

→ transversale Energie:

$$dE_T/dy \approx 700 \text{ GeV}$$

→ Energiedichte:

$$\varepsilon_{Bj} \approx 5 \text{ GeV/fm}^3$$

für Formationszeit $\tau_0 = 1 \text{ fm}/c$

- Phasenübergang nach Gitter-QCD:

→ $T_c \approx 0.175 \text{ GeV}$

→ $\varepsilon_c \approx 0.7 \text{ GeV/fm}^3$ (50% syst. Fehler)

Harte und weiche Prozesse

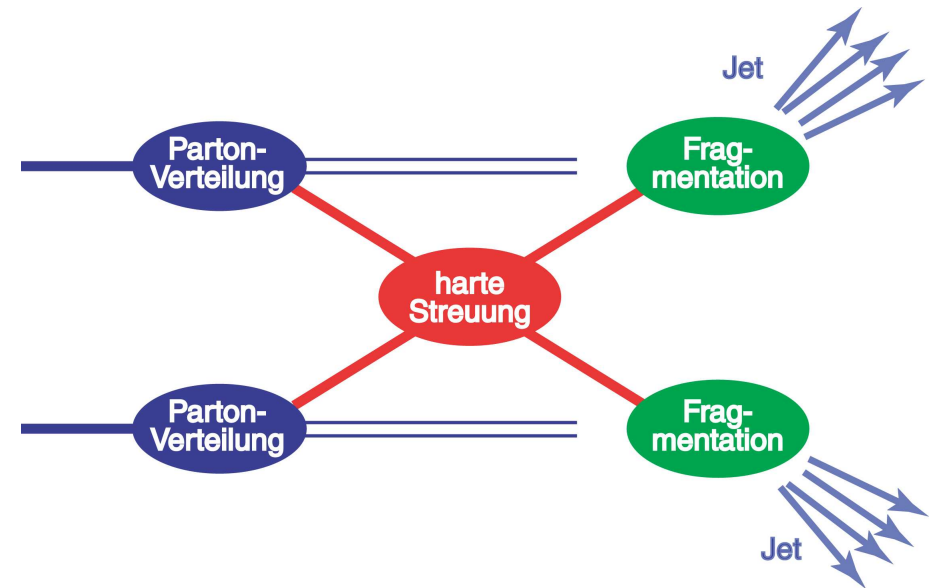
- Harte Prozesse

- ➔ Parton-Parton-Stöße mit hohem Impulsübertrag Q^2
- ➔ WQ klein gegenüber inelastischem Nukleon-Nukleon-WQ
- ➔ Dominant bei hohen p_T
- ➔ Beschreibbar durch QCD-Störungstheorie (pQCD)

- Weiche Prozesse

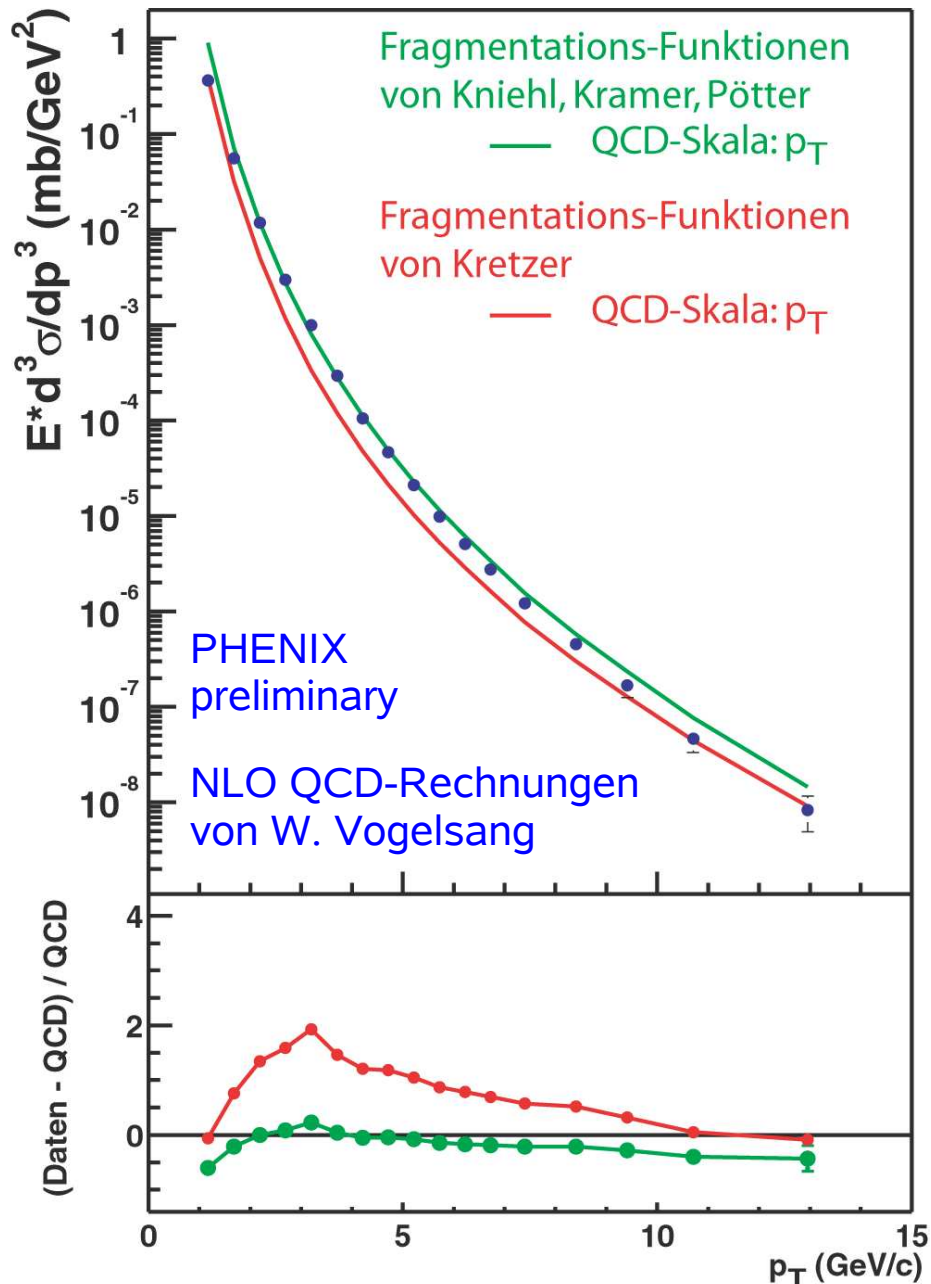
- ➔ Kleiner Impulsübertrag
- ➔ Dominant bei kleinen p_T

- Faktorisierungstheorem:



$$d\sigma = \sum_{a,b,c} f_a \otimes f_b \otimes d\hat{\sigma}_{ab}^c \otimes D_c^{\text{Hadron}}$$

π^0 -Produktion in p+p bei $\sqrt{s} = 200$ GeV



• Vergleich mit NLO pQCD

- ➔ gute Übereinstimmung
- ➔ Transversalimpulskomponenten der Partonen im Proton (*intrinsisches k_T*) zur Beschreibung nicht notwendig (anders als bei kleinen $\sqrt{s}$)
- ➔ Einschränkung für Fragmentationsfunktion $D(\text{gluon} \rightarrow \pi)$ (aus e^+e^- gibt es hierzu kaum Informationen)

Skalierung der Teilchenproduktion beim Übergang von p+p nach Au+Au

Nuklearer
Modifikationsfaktor:

$$R_{AA} = \frac{\frac{dN}{dp_T}(A+A)}{N_{coll} \cdot \frac{dN}{dp_T}(p+p)}$$

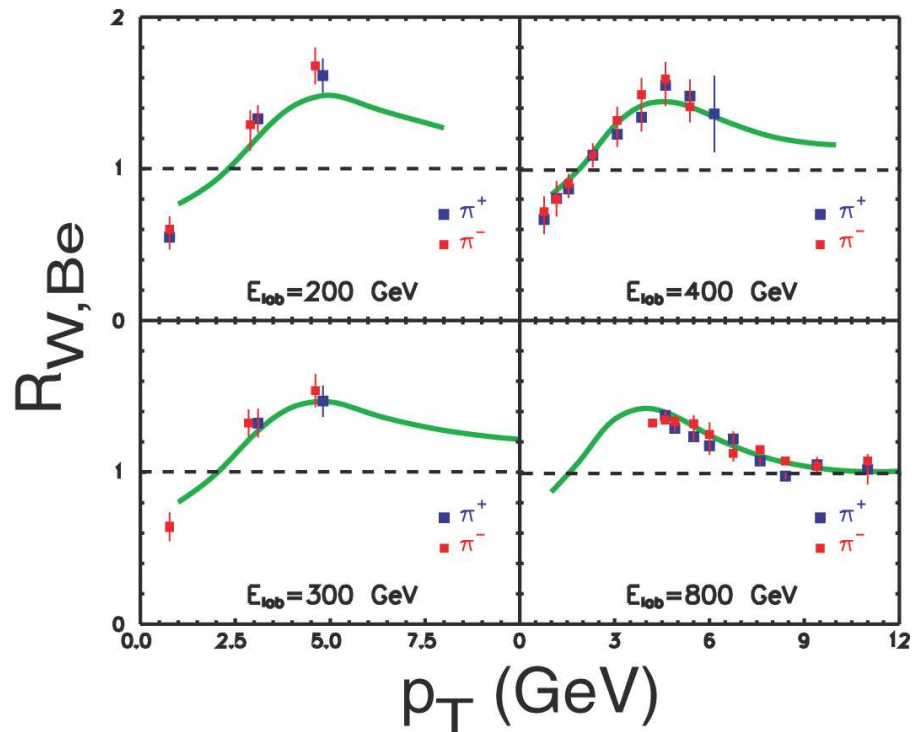
Mittlere Anzahl der inelastischen
Nukleon-Nukleon-Stöße in A+A

- harte Prozesse: Skalierung mit N_{coll}
(Grund: kleine Wirkungsquerschnitte, inkohärente Überlagerung)
- In Abwesenheit nuklearer Effekte: $R_{AA} = 1$ bei hohen p_T

Cronin-Effekt in p+A

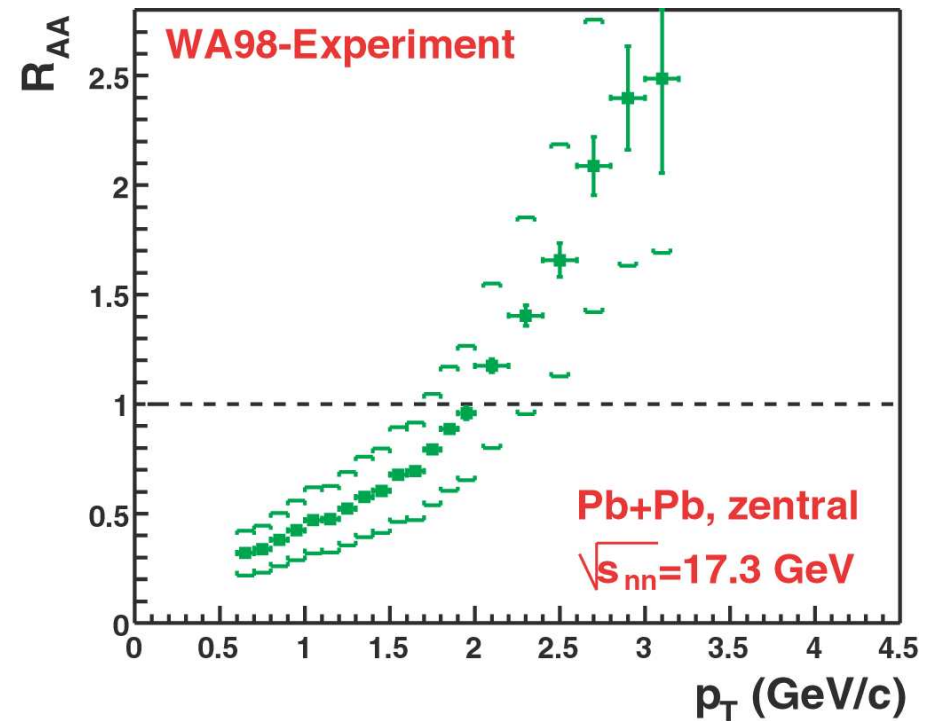
- Cronin-Effekt:

- $R_{pA} > 1$ bei hohen p_T
- (naive) Erklärung:
Mehrfache weiche Streuung
vor hartem Streuprozess

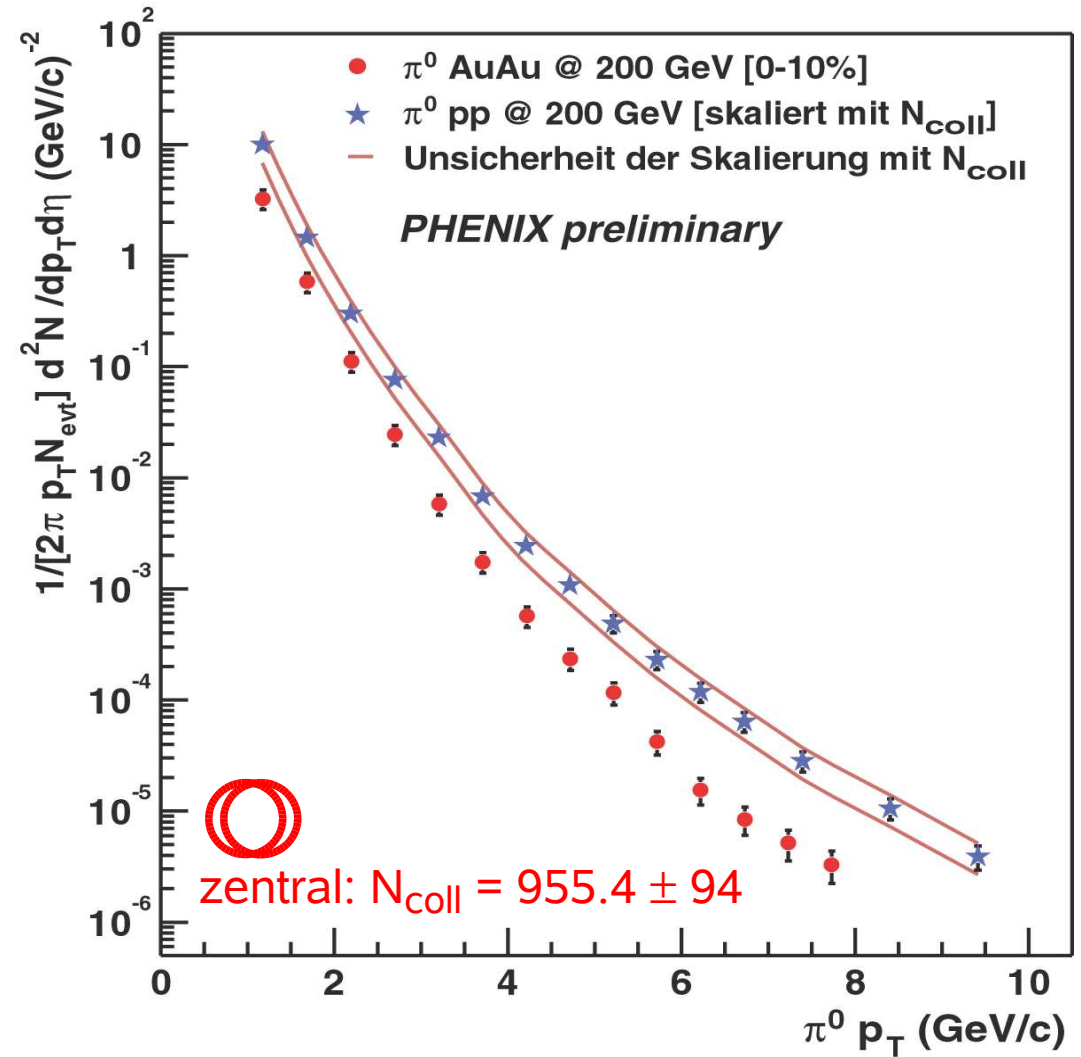
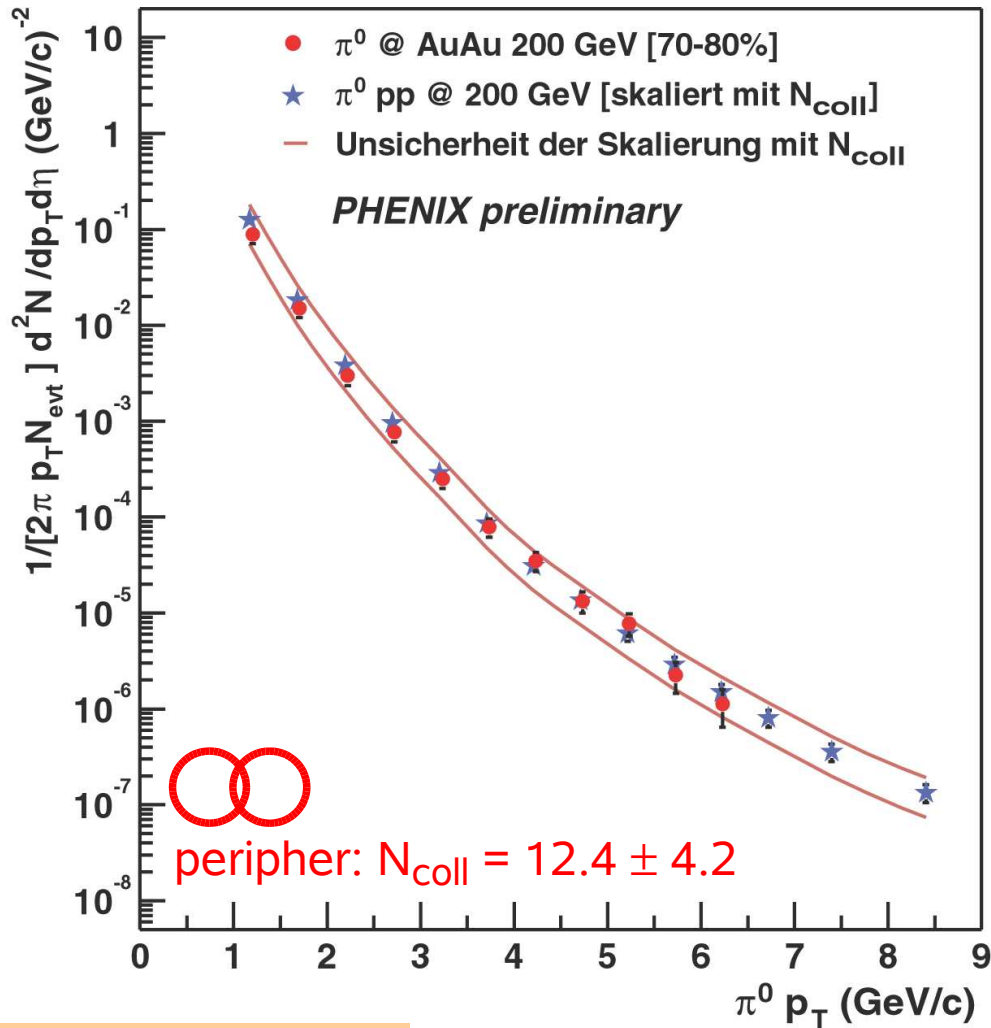


- Ähnliche Beobachtung in Pb+Pb bei $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$ GeV

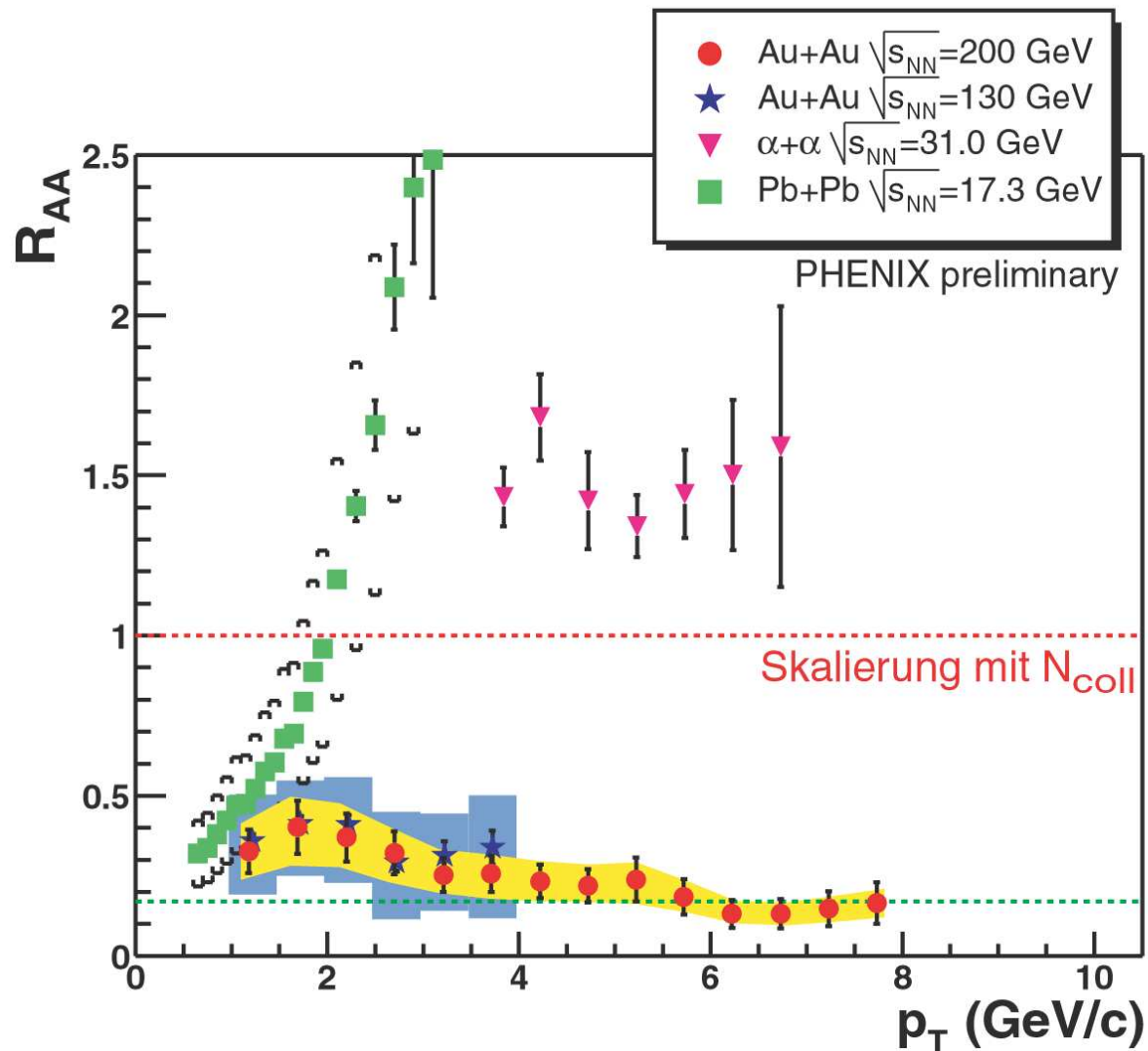
- R_{AA} ebenfalls > 1
- Interpretation jedoch schwieriger als in p+A



π^0 -Produktion in Au+Au bei $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV



R_{AA} für neutrale Pionen in zentralen Kollisionen

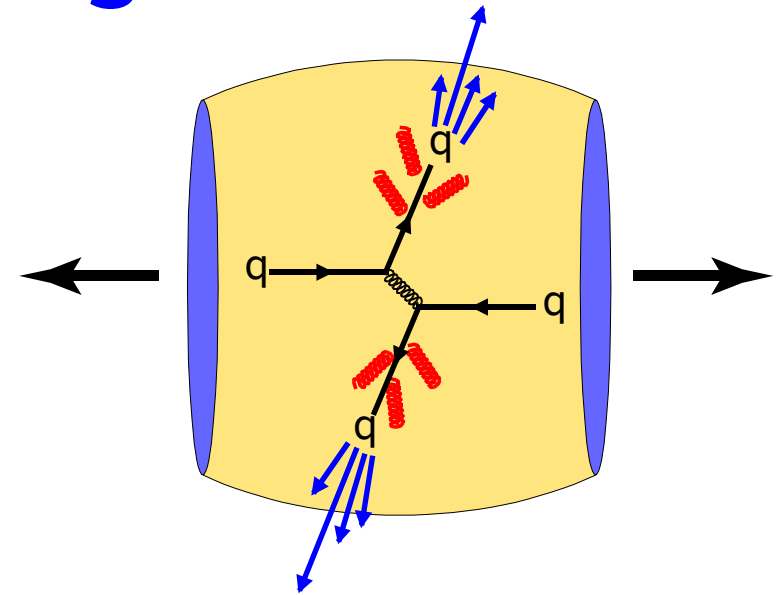
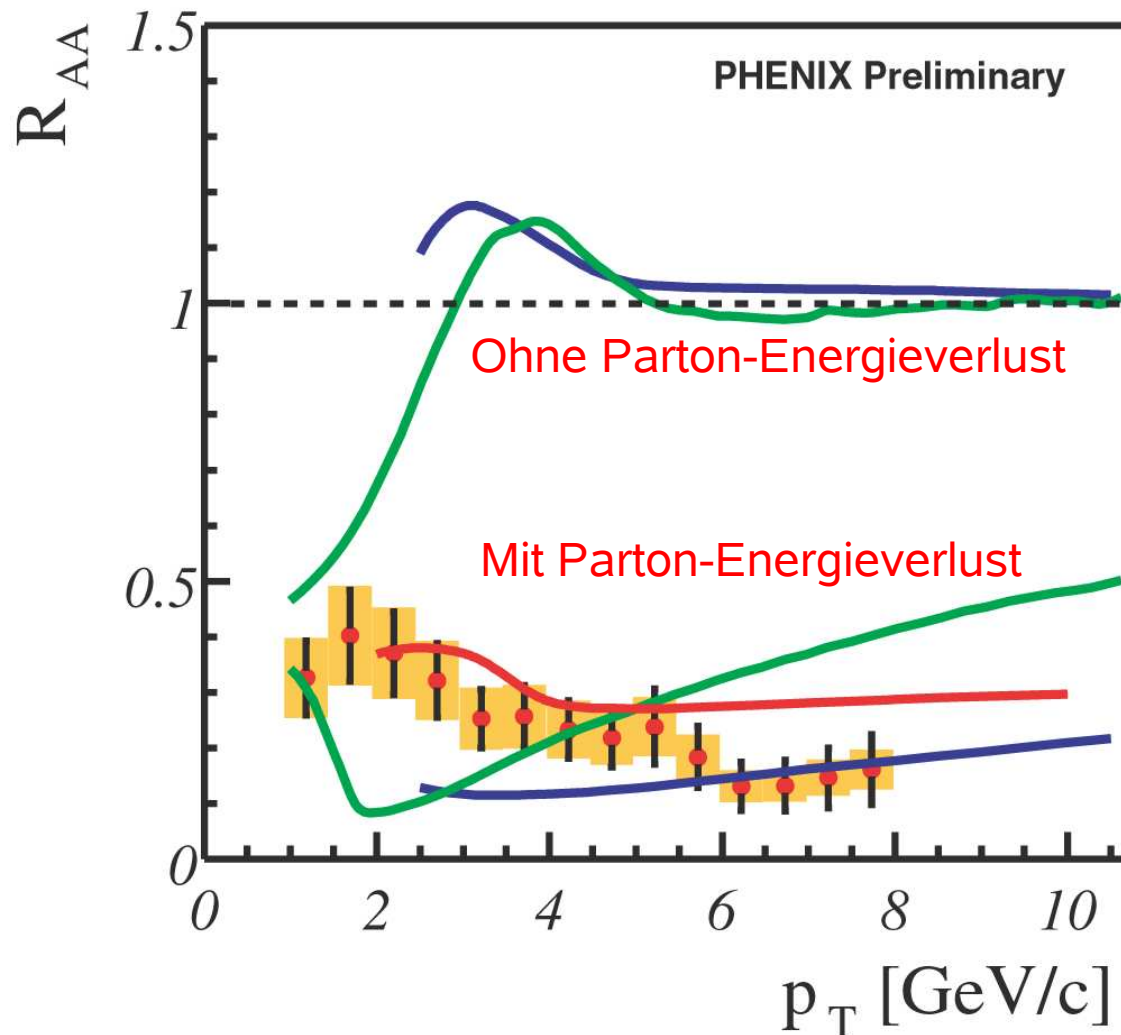


- Erwartung aus Cronin-Effekt: $R_{AA} > 1$
- Beobachtet:
Faktor 4-5 Unterdrückung in zentralen Au+Au-Kollisionen bei $\sqrt{s_{NN}} = 130$ und 200 GeV

$$R_{AA} = \frac{\frac{dN}{dp_T}(A+A)}{N_{coll} \cdot \frac{dN}{dp_T}(p+p)}$$

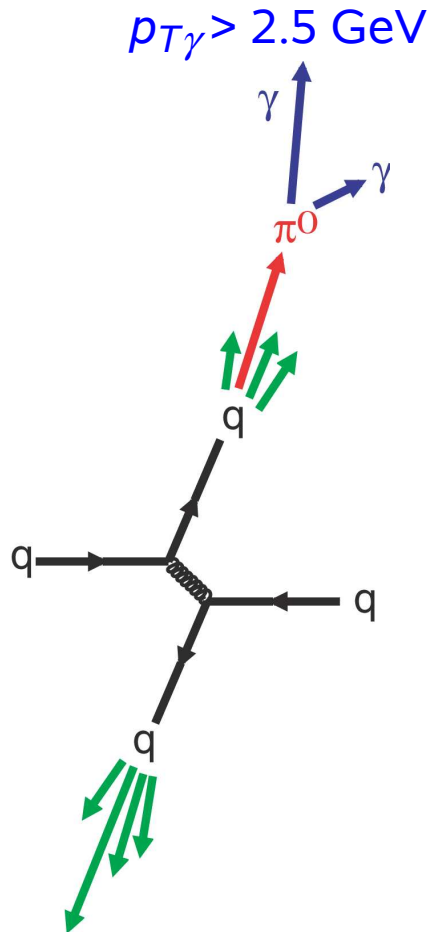
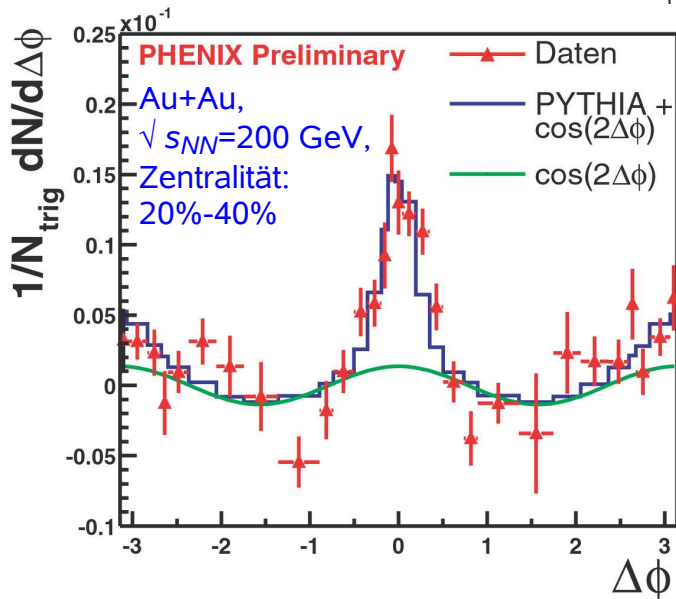
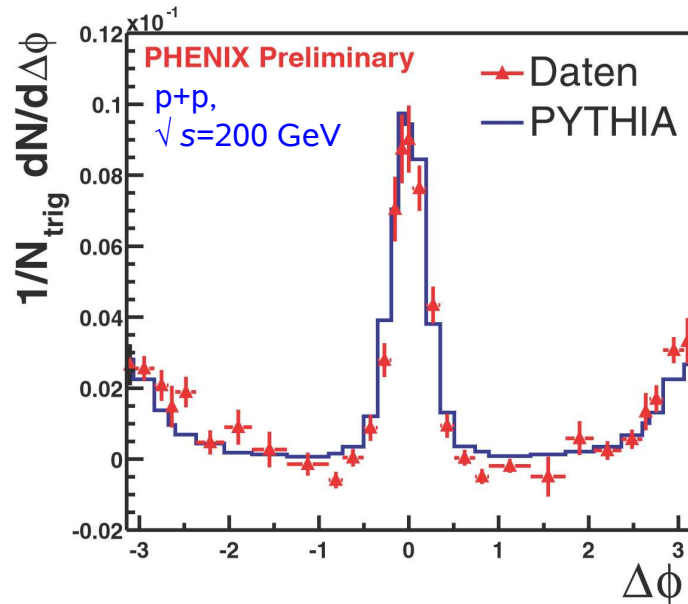
Jet-Quenching?

Vergleich mit Modellrechnungen mit und ohne Energieverlust der Partonen:



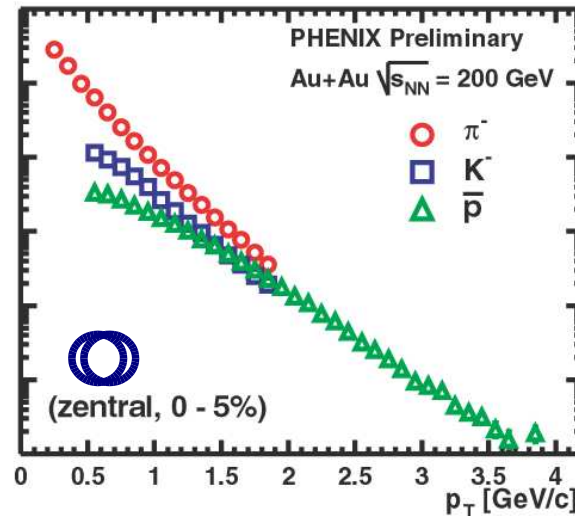
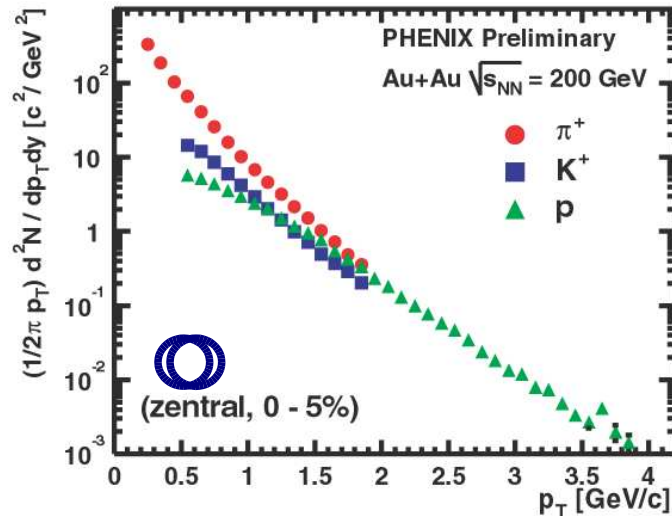
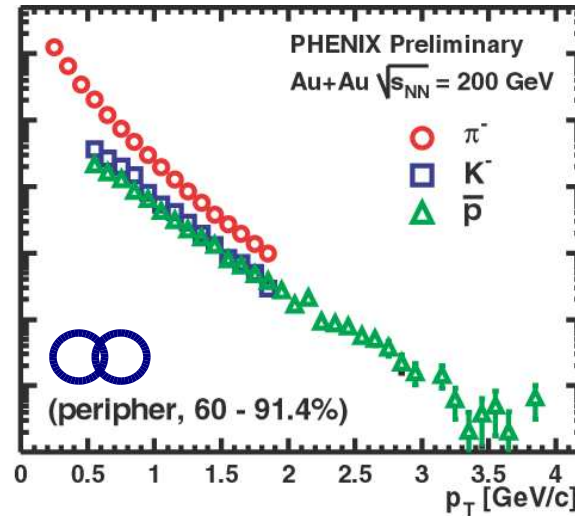
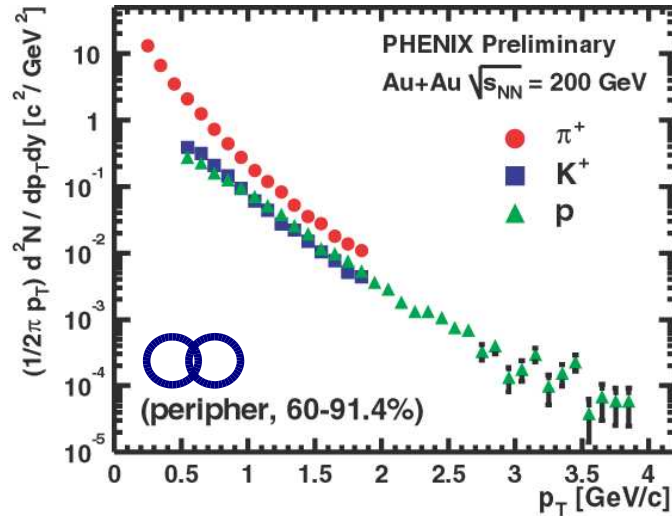
- Pion-Unterdrückung reproduzierbar durch Parton-Energieverlust
- p_T -Abhängigkeit der Unterdrückung nicht gut beschrieben
- andere Erklärungen denkbar

Jet-ähnliche Winkelkorrelationen in p+p und Au+Au ?



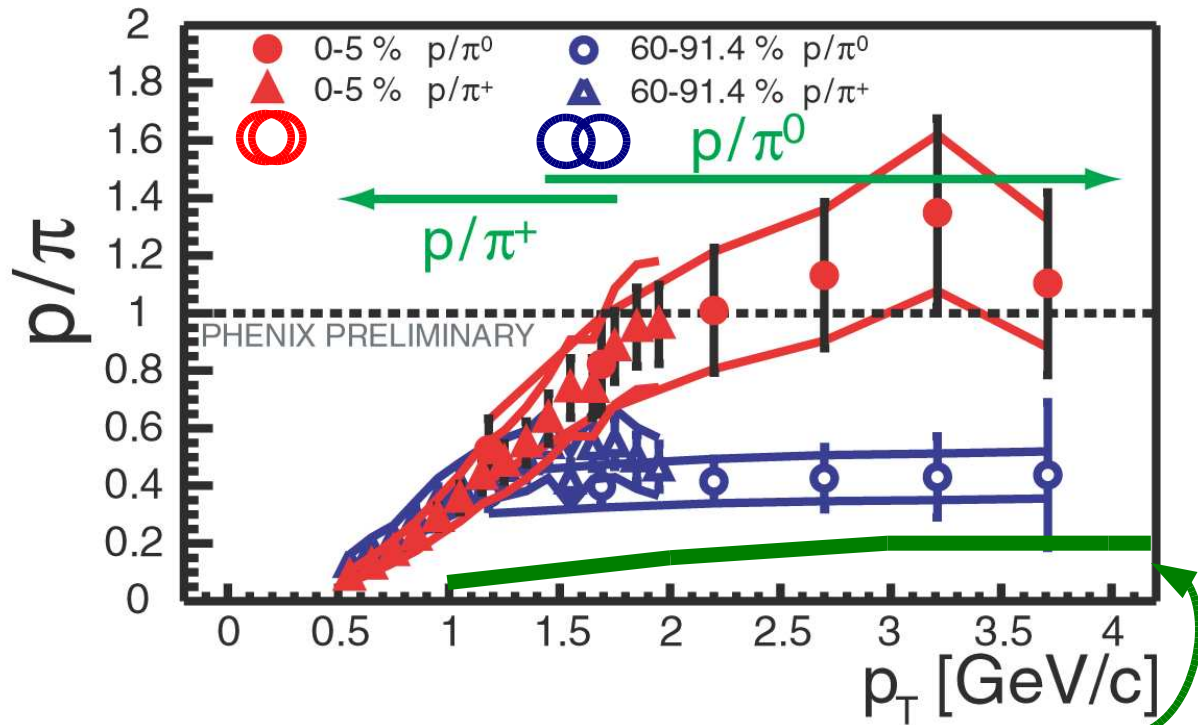
- Winkelverteilung geladener Hadronen mit $2 \text{ GeV} < p_T < 4 \text{ GeV}$ relativ zu Triggerphoton mit $p_{T\gamma} > 2.5 \text{ GeV}$
- Winkelverteilung in p+p konsistent mit Teilchenproduktion durch Jets
- Winkelverteilung um $\Delta\phi = 0$ bleibt in Au+Au erhalten
- Keine Zentralitätsabhängigkeit der Winkelverteilung um $\Delta\phi = 0$ erkennbar

Spektren identifizierter geladener Teilchen



- Au+Au, peripher:
 - ➔ Produktion von Pionen dominiert
- Au+Au, zentral:
 - ➔ Vergleichbare Produktion von Pionen und Protonen bei $p_T = 1.5 - 2$ GeV

p/π – Verhältnis

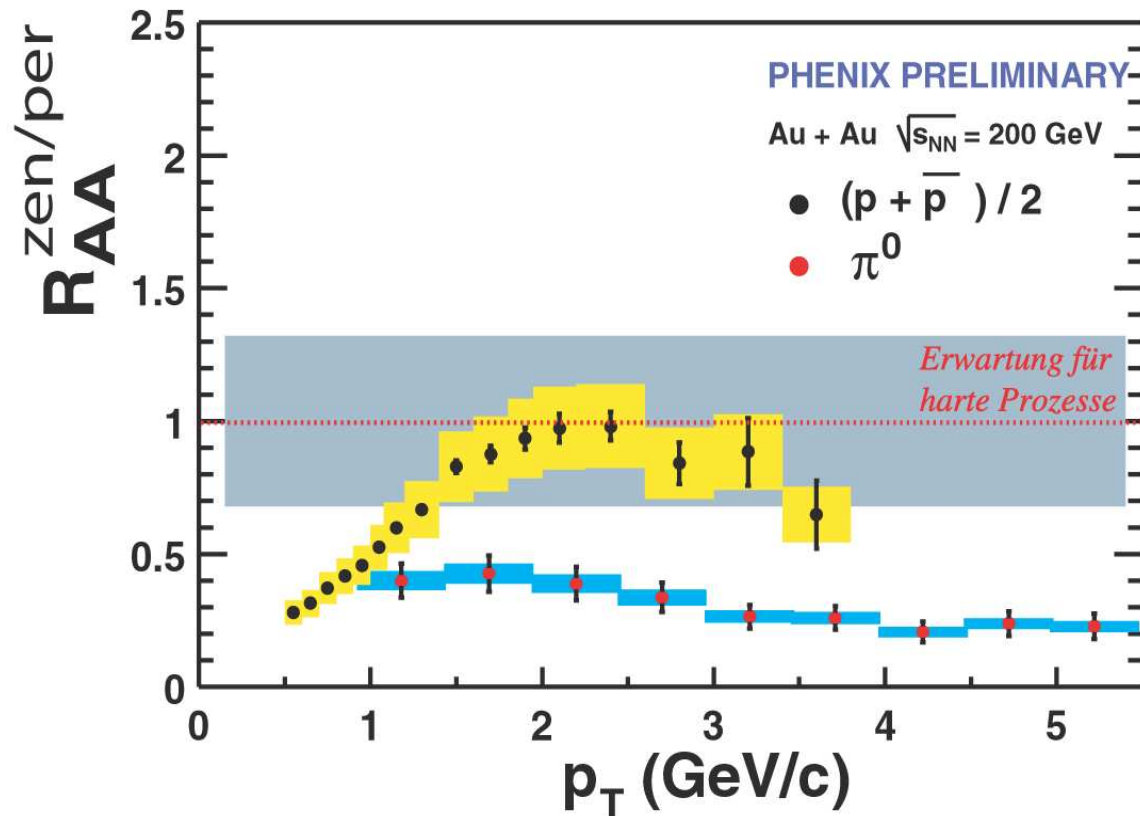


- Erwartung bei Teilchenproduktion durch Jet-Fragmentation:
 p/π kleiner als ≈ 0.25 bei hohen p_T

- Beobachtung:
 - deutliche Zentralitätsabhängigkeit
 - Au+Au, zentral:
 $p/\pi \approx 1$

Delphi, e^+e^- , Gluon-Jet-Fragmentation
Eur. Phys. J. C 17, 2000

Zentral/Peripher für Protonen

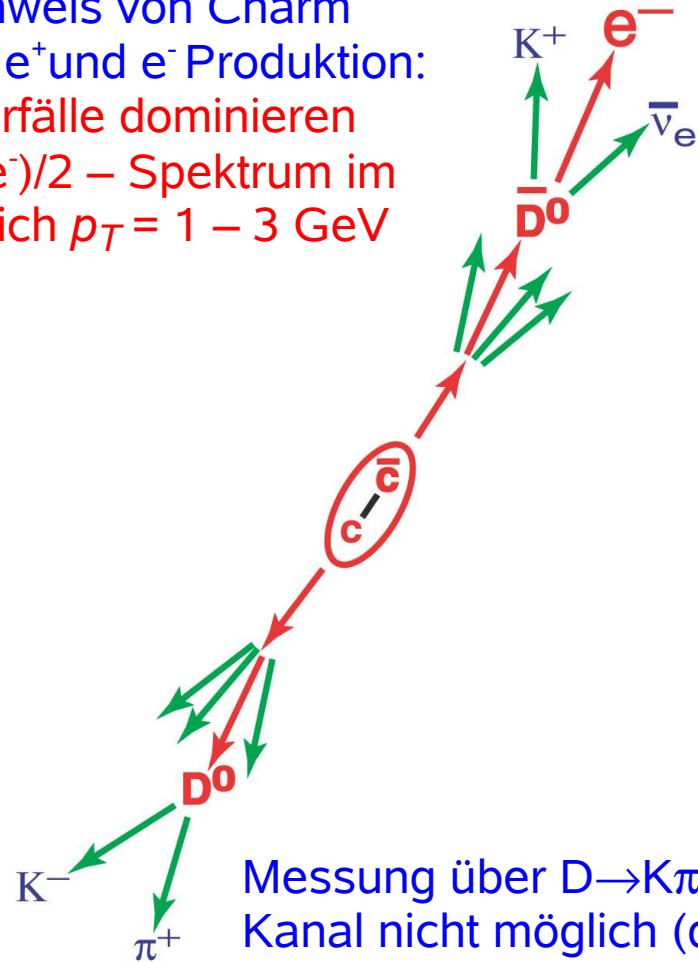


- Proton-Anti-Proton-Multiplizität zwischen $2 \text{ GeV} < p_T < 3 \text{ GeV}$ skaliert mit N_{coll}
- mögliche Erklärungen
 - kollektive Expansion (*hydrodynamischer Fluss*)
 - Teilchenproduktion nicht durch Jet-Fragmentation, sondern durch Rekombination von Partonen aus dem QGP

$$R_{AA}^{zen/per} = \frac{\frac{dN}{dp_T}(A + A, \text{zentral}) / N_{coll}^{zentral}}{\frac{dN}{dp_T}(A + A, \text{peripher}) / N_{coll}^{peripher}}$$

Charm-Produktion

Nachweis von Charm
über e^+ und e^- Produktion:
D-Zerfälle dominieren
($e^+ + e^-$)/2 – Spektrum im
Bereich $p_T = 1 - 3$ GeV

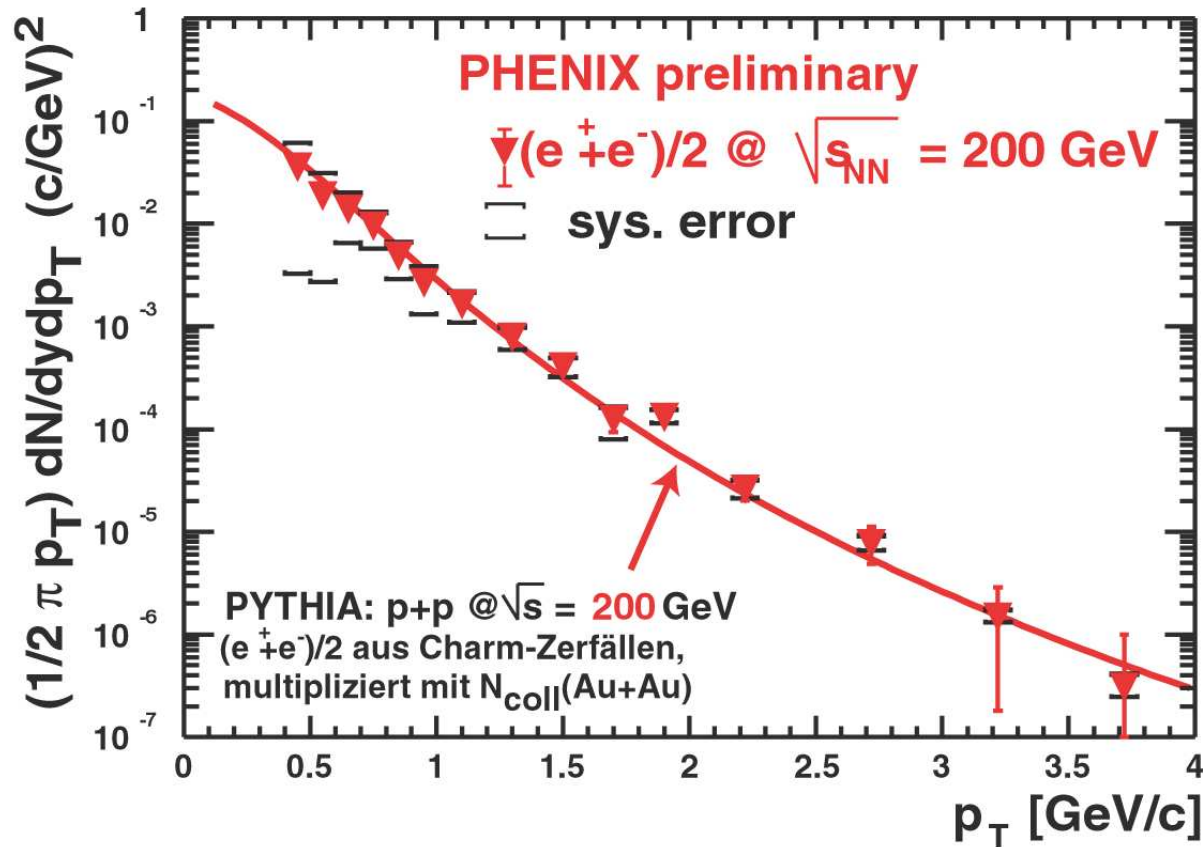


Messung über $D \rightarrow K\pi$
Kanal nicht möglich (da
Vertex-Position nicht
genau genug bekannt ist)

- Charm-Produktion sensitiv auf anfängliche Gluondichte
($\text{gluon} + \text{gluon} \rightarrow c + \bar{c}$)
- **Messung über e^+ und e^- :**
Untergrund (γ -Konversion, Dalitz-Zerfälle $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$, ...) wird vom inklusiven $e^+ + e^-$ -Spektrum subtrahiert

$(e^+e^-)/2$ – Spektrum

$(e^+e^-)/2$ – Spektrum
(Au+Au, gesamter Zentralitätsbereich):

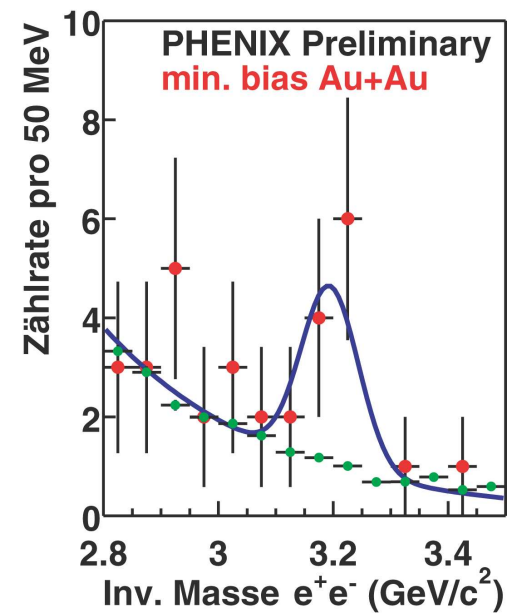
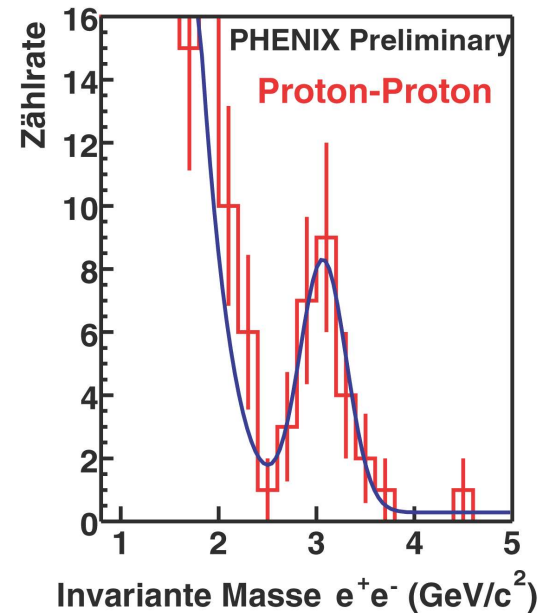


- e^+e^- -Spektrum in Au+Au konsistent mit p+p-Modellrechnung $\times N_{coll}$
- Kein Hinweis auf Unterdrückung oder Energieverlust

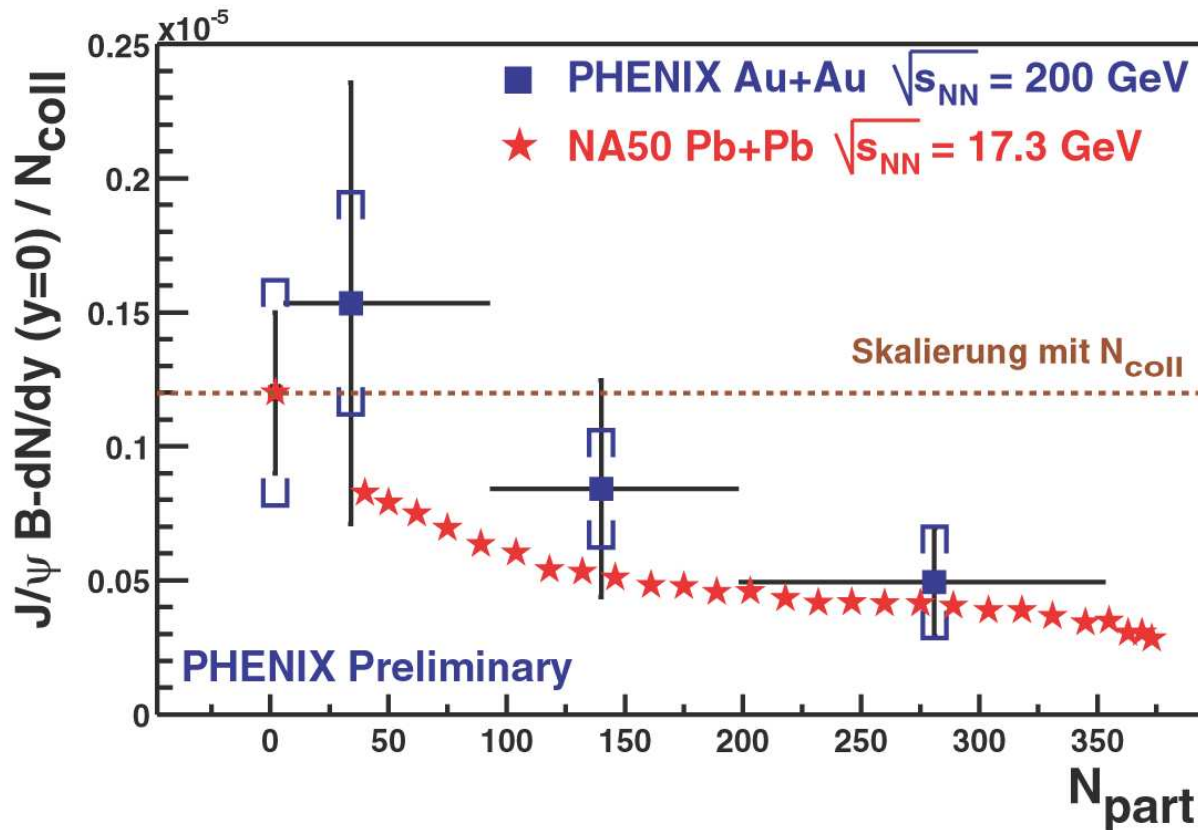
J/ Ψ -Messung

- Unterdrückung des J/ Ψ -Signals in Pb+Pb bei $\sqrt{s_{NN}}=17.3$ GeV Hinweis auf QGP
- Verschiedene Vorhersagen für RHIC-Energie:
 - ➔ Unterdrückung wie am CERN SPS ($\sqrt{s_{NN}}=17.3$ GeV)
 - ➔ Verstärkte J/ Ψ -Produktion durch statistische $c\bar{c}$ -Rekombination beim Ausfrieren

- J/ Ψ -Signal:



Zentralitätsabhängigkeit der J/Ψ -Produktion



- Skalierung mit N_{coll} nicht ausgeschlossen, Unterdrückung jedoch wahrscheinlicher
- Konsistent mit J/Ψ -Unterdrückung wie in Pb+Pb bei $\sqrt{s_{NN}}=17.3 \text{ GeV}$
- Bessere Statistik in kommenden Strahlzeiten mit höherer Luminosität

Zusammenfassung

- π^0 -Produktion
 - ➔ Gemessen in p+p und Au+Au
 - ➔ Faktor 4-5 Unterdrückung in zentralen Au+Au-Kollisionen bei hohen p_T relativ zum N_{coll} -skalierten p+p Spektrum
 - ➔ Mögliche Erklärung:
Jet-Quenching



University of São Paulo, São Paulo, Brazil

Academia Sinica, Taipei 11529, China

China Institute of Atomic Energy (CIAE), Beijing, P. R. China

Laboratoire de Physique Corpusculaire (LPC), Université de Clermont-Ferrand, 63170

Aubliere, Clermont-Ferrand, France

Dapnia, CEA Saclay, Bat. 703, F-91191, Gif-sur-Yvette, France

IPN-Orsay, Université Paris Sud, CNRS-IN2P3, BP1, F-91406, Orsay, France

LPNHE-Palaiseau, Ecole Polytechnique, CNRS-IN2P3, Route de Saclay, F-91128,

Palaiseau, France

SUBATECH, Ecole des Mines at Nantes, F-44307 Nantes, France

University of Muenster, Muenster, Germany

Banaras Hindu University, Banaras, India

Bhabha Atomic Research Centre (BARC), Bombay, India

Weizmann Institute, Rehovot, Israel

Center for Nuclear Study (CNS-Tokyo), University of Tokyo, Tanashi, Tokyo 188, Japan

Hiroshima University, Higashi-Hiroshima 739, Japan

KEK, Institute for High Energy Physics, Tsukuba, Japan

Kyoto University, Kyoto, Japan

Nagasaki Institute of Applied Science, Nagasaki-shi, Nagasaki, Japan

RIKEN, Institute for Physical and Chemical Research, Hirosawa, Wako, Japan

University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

Tokyo Institute of Technology, Ohokayama, Meguro, Tokyo, Japan

University of Tsukuba, Tsukuba, Japan

Waseda University, Tokyo, Japan

Cyclotron Application Laboratory, KAERI, Seoul, South Korea

Kangnung National University, Kangnung 210-702, South Korea

Korea University, Seoul, 136-701, Korea

Myong Ji University, Yongin City 449-728, Korea

System Electronics Laboratory, Seoul National University, Seoul, South Korea

Yonsei University, Seoul 120-749, KOREA

Institute of High Energy Physics (IHEP-Protvino or Serpukhov), Protovino, Russia

Joint Institute for Nuclear Research (JINR-Dubna), Dubna, Russia

Kurchatov Institute, Moscow, Russia

PNPI: St. Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Leningrad, Russia

Lund University, Lund, Sweden

Abilene Christian University, Abilene, Texas, USA

Brookhaven National Laboratory (BNL), Upton, NY 11973

University of California - Riverside (UCR), Riverside, CA 92521, USA

Columbia University, Nevis Laboratories, Irvington, NY 10533, USA

Florida State University (FSU), Tallahassee, FL 32306, USA

Georgia State University (GSU), Atlanta, GA, 30303, USA

Iowa State University (ISU) and Ames Laboratory, Ames, IA 50011, USA

LANL: Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545, USA

LLNL: Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA 94550, USA

University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico, USA

New Mexico State University, Las Cruces, New Mexico, USA

Department of Chemistry, State University of New York at Stony Brook (USB),

Stony Brook, NY 11794, USA

Department of Physics and Astronomy, State University of New York at Stony

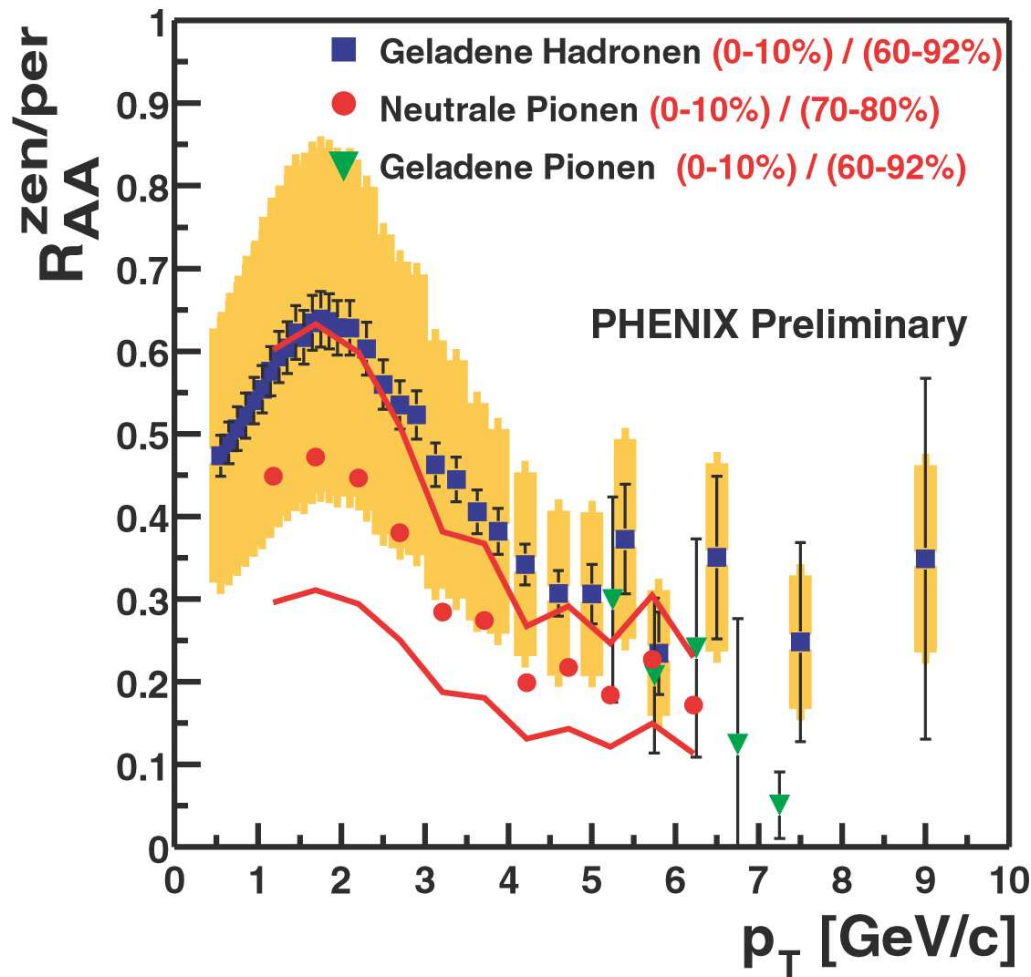
Brook (USB), Stony Brook, NY 11794-, USA

Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN 37831, USA

University of Tennessee (UT), Knoxville, TN 37996, USA

Vanderbilt University, Nashville, TN 37235, USA

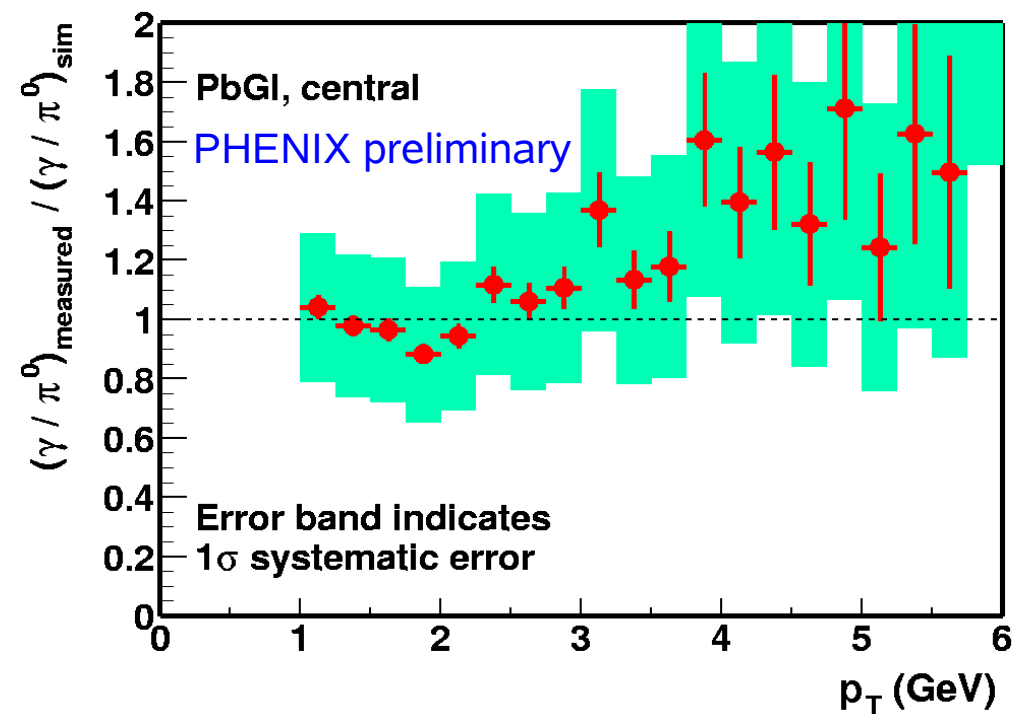
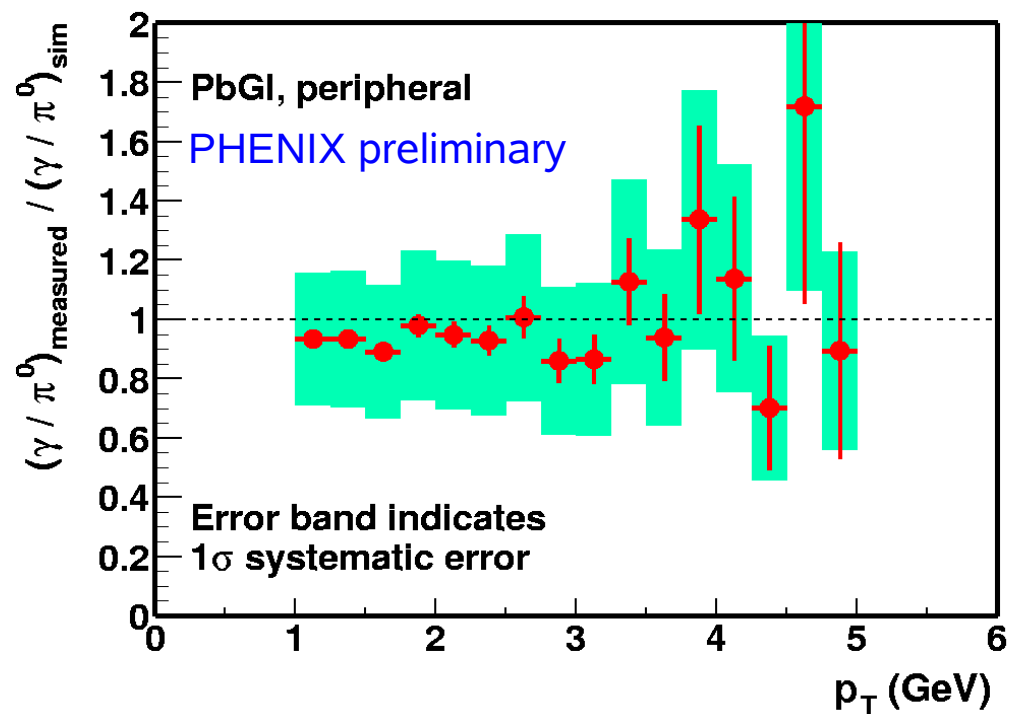
Vergleich mit geladenen Hadronen



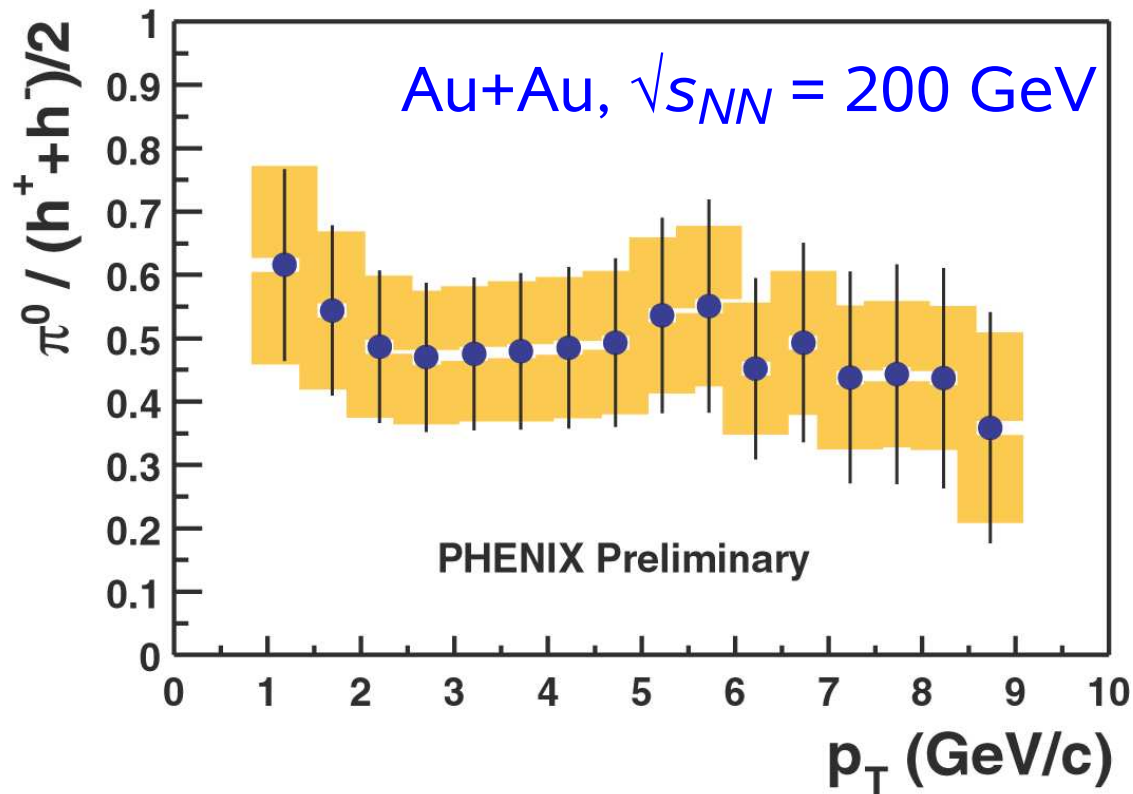
$$R_{AA}^{zen/per} = \frac{\frac{dN}{dp_T}(A+A, \text{zentral}) / N_{coll}^{zentral}}{\frac{dN}{dp_T}(A+A, \text{peripher}) / N_{coll}^{peripher}}$$

- Unterdrückung bei geladenen Hadronen ähnlich wie bei π^0

$$(\gamma/\pi^0)_{\text{measured}} / (\gamma/\pi^0)_{\text{simulated}}$$

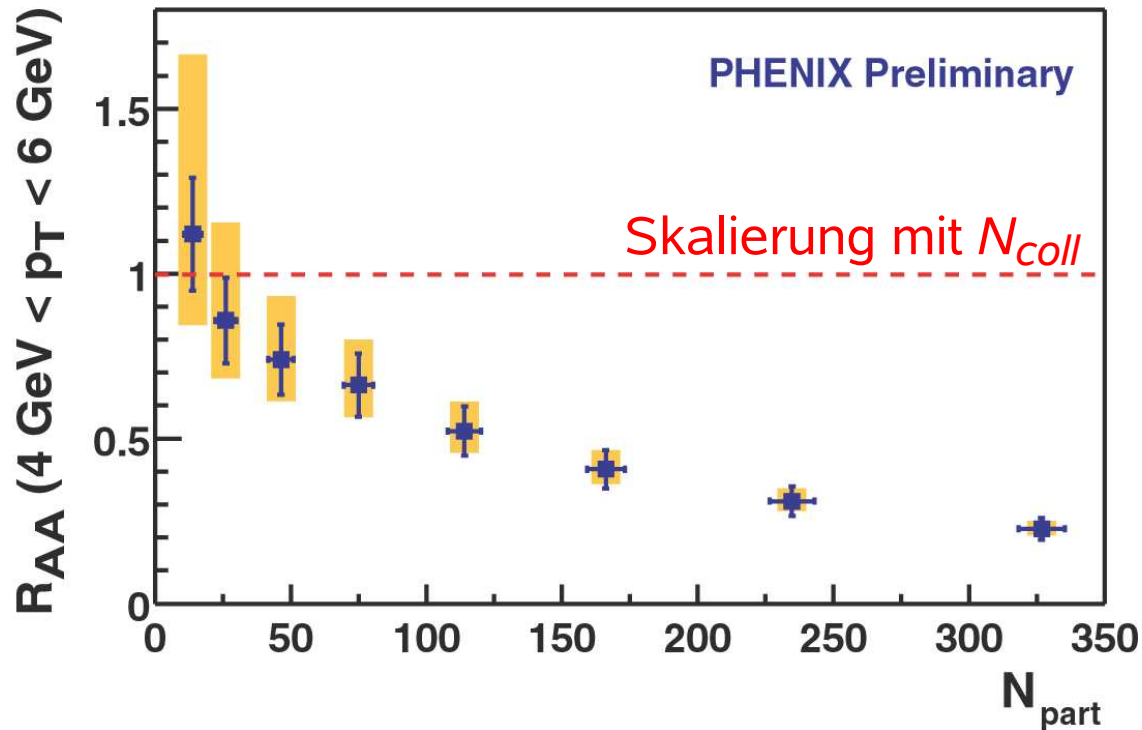


$\pi^0 / (h^+ + h^-)/2$ bei hohen p_T



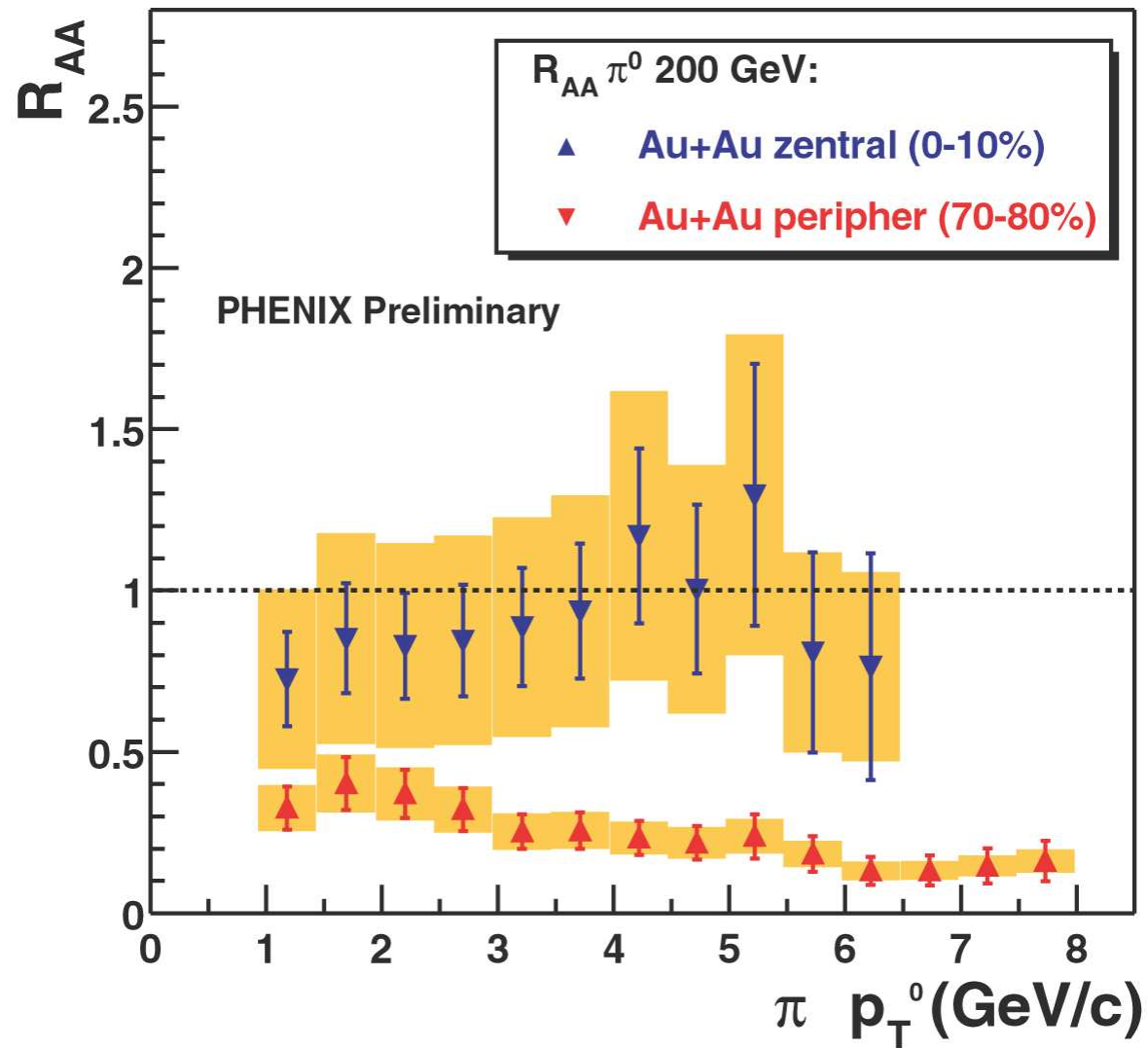
- Falls $h^+ + h^- \approx \pi^+ + \pi^-$ wäre das Verhältnis 1
- Folgerung:
Protonen und/oder Kaonen stellen die Hälfte der produzierten geladenen Teilchen bei hohen p_T dar

Zentralitätsabhängigkeit der Unterdrückung für π^0



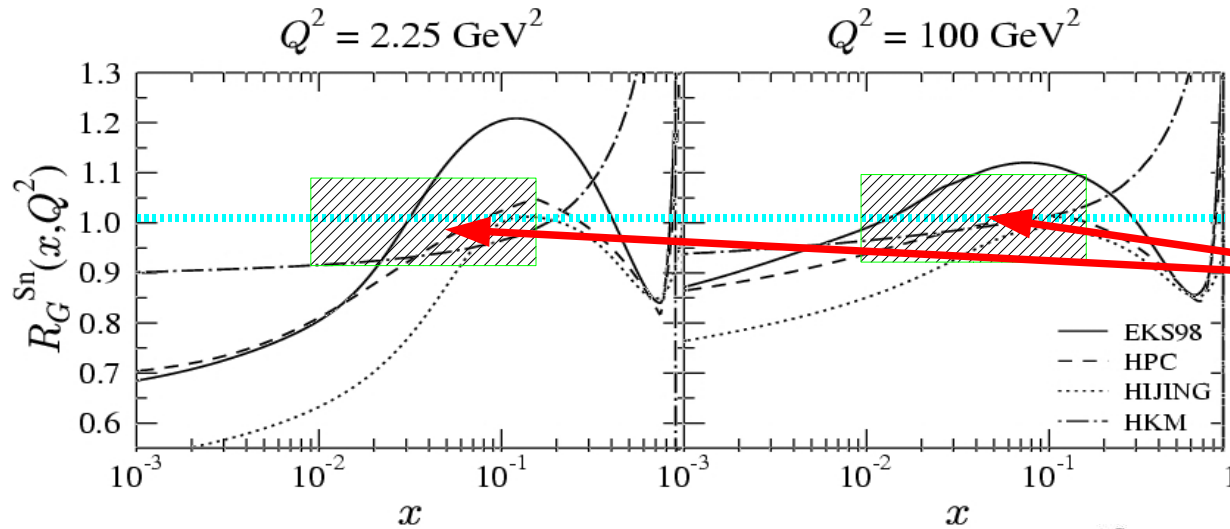
- Au+Au-Kollisionen bis $N_{part} = 50$ mit N_{coll} -Skalierung verträglich
- kontinuierlicher Abfall, kein Schwellenverhalten erkennbar

R_{AA} für periphere Kollisionen



Shadowing

$$x \approx \frac{2 p_T}{\sqrt{s}} \approx 0.02 - 0.1 \quad \text{für } p_T = 2 - 10 \text{ GeV} \quad (\sqrt{s} = 200 \text{ GeV})$$



EKS98 PDF:

$R_{\text{gluon}} \sim 1.0$ @ RHIC

EKS hep-ph/0201256

R_{AA} vs p_T due to shadowing: ~ 1

“Shadowing is a small effect at mid-rapidity”

