

## Zusammenfassung der Dissertation

INTERFACES BETWEEN RELATIVISTIC HYDRODYNAMICS AND TRANSPORT FOR THE  
DYNAMICAL DESCRIPTION OF HEAVY ION COLLISIONS

vorgelegt beim Fachbereich Physik  
der Johann Wolfgang Goethe-Universität in Frankfurt  
von Dmytro Oliinychenko

Gemäß des kosmologischen Standardmodell befand sich das Universum wenige Mikrosekunden nach dem Urknall im Zustand des Quark-Gluon-Plasmas (QGP). Diesen extremen Zustand der Materie kann man experimentell in hoch-energetischen Schwerionenkollisionen untersuchen, was manchmal “Urknall im Labor” genannt wird. Eine Reihe von Experimenten an Ionenbeschleunigeranlagen sind der Erforschung der QGP-Physik und der Materie bei extremen Dichten und Temperaturen gewidmet. Diese Beschleuniger sind der RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) in Brookhaven bei New York, der LHC (Large Hadron Collider) in Genf, sowie auch die zukünftige Beschleunigeranlagen FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) an der GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung) in Darmstadt, NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) in Dubna (Russland) und JPARC-HI in Japan.

Eine der wichtigsten Fragen der Schwerionenforschung heutzutage ist, ob es einen Phasenübergang zwischen hadronischer Materie und QGP gibt und falls ja, bei welcher Temperatur und Dichte dieser erfolgt. Durch Variation der Kollisionsenergie kann man verschiedene Punkte des Phasendiagramms erreichen. Man erwartet, dass der kritische Punkt bei mittleren Energien,  $E_{\text{lab}} \simeq 20\text{--}200$  A GeV, beobachtet werden kann. Die erwähnten zukünftigen Experimente, und auch das Beam Energy Scan Program am RHIC arbeiten in diesem Energiebereich, um den kritischen Punkt zu untersuchen. Das macht die detaillierte Simulation von Schwerionenkollisionen bei mittleren Energien aktuell und interessant.

Heutzutage gibt es zwei Arten von dynamischen mikroskopischen Modellen zur Beschreibung von Schwerionenkollisionen: Relativistische Hydrodynamik und Transportsimulationen. Modelle, die Hydrodynamik und Transporttheorie in ihrem jeweiligen Anwendungsbereich verbinden, werden als Hybrid-Modelle bezeichnet. In dieser Doktorarbeit werden die Begrenzungen dieser Modelle erforscht sowie ein neues Modell entwickelt.

Eine wichtige Annahme von Hybrid-Modellen ist eine schnelle lokale Thermalisierung im gesamten Volumen der Reaktion. Bei hoher Energie ist die schnelle Annäherung zum thermischen Gleichgewicht gut erforscht und begründet. Bei mittleren Energien ist die Annäherung zum Gleichgewicht hingegen weniger gut erforscht. Allerdings ist die Nähe zum lokalen thermischen Gleichgewicht eine notwendige Bedingung für die Anwendbarkeit von Hydrodynamik. Ist das Gleichgewicht bei mittleren Energien überhaupt erreicht? Wenn ja, wie schnell? Auf diese Fragen wird hier mit Hilfe eines Transport-Modells UrQMD (Ultra-relativistic Quantum Molecular Dynamics) sowie des sogenannten “coarse-graining”-Verfahrens eingegangen. Hierfür wird der Energie-Impuls-Tensor  $T^{\mu\nu}$  für jeden Punkt des kartesischen Gitters bestimmt, das sich über das ganze System erstreckt. Mittels  $T^{\mu\nu}$  wird die Abweichung vom Gleichgewicht be-

stimmt. Der wichtigste Beitrag zum Ungleichgewicht ist die Anisotropie von  $T^{\mu\nu}$ . Das Gleichgewicht wird nie im gesamten System erreicht, jedoch ist ab einer bestimmten Zeit  $t_{iso}(E_{lab}, b, \sigma)$  ein ausreichendes Volumen genug isotropisiert, um Hydrodynamik anwenden zu können. Dabei ist  $E_{lab}$  die kinetische Energie des Projektils pro Nukleon,  $b$  der Stoßparameter, der die Zentralität der Kollision charakterisiert, und  $\sigma$  ist ein Ausschmierung-Parameter des coarse-graining-Verfahrens. Die gefundene Abhängigkeit (für eine Vielzahl der Transport-Simulationen, ermittelt im coarse-graining-Verfahren) lässt sich näherungsweise mit der folgenden Formel beschreiben:  $t_{iso} = 2R(E_{lab}/2m_N)^{-1/2} + \alpha\sigma$ .

Hybrid-Modelle verwenden Hydrodynamik im Bereich hoher Dichten und Transport-Simulationen im Bereich niedriger Dichten. Der Übergang zwischen diesen zwei Verfahren beruht auf bestimmten Näherungen und Annahmen. Man vermutet, dass dieser Übergang sehr schnell ist und auf einer Hyperfläche erfolgt. Die hydrodynamischen Gleichungen werden im ganzen Vorwärtslichtkegel gelöst und die Hyperfläche wird nur aus der Hydrodynamik aposteriori bestimmt, nicht dynamisch aus kombinierten Hydrodynamik und Transporttheorie Gleichungen. Die Teilchen werden aus der Hydrodynamik gemäß der Cooper-Frye-Formel produziert und anschließend im Rahmen der Transporttheorie beschrieben. Sie können nicht in den hydrodynamischen Bereich zurückkehren und rückstoßen. Diese Näherungen führen zu negativen Beiträgen der Cooper-Frye-Formel. Bei hohen Energien sind diese Beiträge vernachlässigbar, aber bei mittleren Energien wurden sie nie systematisch untersucht. In dieser Arbeit werden die negative Cooper-Frye Beiträge in Gold-Gold Kollisionen bei  $E_{lab} = 5\text{--}160$  A GeV für verschiedene Hadronen in verschiedenen kinematischen Regionen mithilfe des “coarse-grained” Transport-Modells UrQMD bestimmt. Diese Rechnung nimmt ein thermisches Gleichgewicht auf der Hyperfläche an. Die größten negativen Beiträge liegen für Pionen bei mittlerer Rapidity vor und machen nicht mehr als 15% aus. In Transport-Modellen kann man die Teilchen auch explizit zählen, welche die Hyperfläche von außen nach innen überqueren — das entspricht den negativen Cooper-Frye Beiträgen ohne Annahme eines Gleichgewichts. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass diese negativen Beiträge im Nichtgleichgewicht erheblich kleiner sind als im Gleichgewicht.

Die negativen Cooper-Frye Beiträge vermeidet man in einem neuen Modell, das in dieser Arbeit konstruiert wird. In gewöhnlichen Transport-Modellen im Bereich hoher Dichten wird eine Thermalisierung künstlich erzwungen, was intensiven Mehr-Teilchen-Kollisionen oder der Bildung des Quark-Gluon-Plasmas entspricht. Dieses Verfahren wurde mit dem Transport-Modell SMASH implementiert und getestet. In einem kontrollierten Szenario einer expandierenden Kugel wurde gezeigt, dass SMASH mit erzwungener Thermalisierung die Expansionsgeschwindigkeit und die Energiedichte zwischen Hydrodynamik und Transport-Modell aufweist. Bei der Simulation von Schwerionenkollisionen mit diesem Modell wurden folgende Beobachtungen gemacht: im Vergleich zum Transport wird mehr Seltsamkeit erzeugt, der mittlere transversale Impuls wird aufgrund der Druckisotropisierung erhöht und Bereiche hoher Dichten leben länger. All diese Merkmale sind den Hybrid-Modellen ähnlich, aber ohne die oben genannten Nachteile. Insgesamt führt die erzwungene Thermalisierung zu den erwarteten Ergebnissen.