

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Schlussbericht

Verbund: 05P2021 - Run 3 von ALICE am LHC

Zuwendungsempfänger: Universität Bielefeld  
Projektleitung: JProf. Sören Schlichting  
E-Mail: sschlichting@physik.uni-bielefeld.de  
Förderkennzeichen: 05P21PBCAA  
Förderzeitraum: 01.07.2021 - 30.06.2024  
Zuwendung: 180.609,60 €  
Projektträger: Projektträger DESY  
  
Zusätzlicher Kontakt: sschlichting@physik.uni-bielefeld.de  
Zusätzlicher Name: Soeren Schlichting

Genutzte Großgeräte:	Labor	Gerät	Experiment
	CERN	LHC	ALICE
Diplomarbeiten:	0		
Dissertationen:	1		
Habilitationen:	0		
Referierte Publikationen:	6		
Andere Veröffentlichungen:	6		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	1		
Masterarbeiten:	1		
Staatsexamen:	0		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 27.12.2024 13:50 für eine Veröffentlichung freigegeben.

# Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:	Universität Bielefeld
Projektleitung:	Prof. Dr. Sören Schlichting
Verbund:	05P2021 (ErUM-FSP T01) – Run 3 von ALICE am LHC
Thema:	Fluktuationen und Korrelationen erhaltener Ladungen und Teilchen in Schwerionenkollisionen

## Zusammenfassung

Dieses Projekt hat naturwissenschaftliche Grundlagenforschung auf dem Gebiet "Hadronen- und Kernphysik" betrieben, und zielte darauf ab ein tieferes Verständnis der stark wechselwirkenden Materie unter extremen Bedingungen wie in Schwerionenkollisionen am LHC zu erlangen. Im Fokus stand die Entwicklung von Simulationen auf Basis der Quantenchromodynamik (QCD), um Nicht-Gleichgewichtsprozesse im Quark-Gluon-Plasma (QGP) zu analysieren und experimentelle Messungen des ALICE Experiments theoretisch zu untermauern. Wichtige theoretische Fortschritte wurden in der Beschreibung von Nicht-Gleichgewichtsprozessen in Jets erzielt und phänomenologische Studien lieferten signifikante Erkenntnisse zur Photonen- und Dileptonenproduktion, die für derzeitige und zukünftige Schwerionenkollisionsexperimente am LHC von Bedeutung sind. Die Ergebnisse wurden in Fachzeitschriften veröffentlicht und auf internationalen Konferenzen präsentiert, um die experimentelle Forschung am LHC zu unterstützen.

# Bericht

## 1. Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt hat naturwissenschaftliche Grundlagenforschung auf dem Gebiet "Hadronen- und Kernphysik" betrieben mit dem Ziel, tiefere Einblicke in die Natur von stark wechselwirkender Materie bei extremen Bedingungen zu gewinnen, wie sie in Schwerionenkollisionen am LHC erzeugt wird. Grundlage für diese Untersuchungen ist eine effektive kinetische Beschreibung der Quantenfeldtheorie der starken Wechselwirkung, Quantenchromodynamik (QCD), auf deren Basis Nicht-Gleichgewichtsprozesse stark-wechselwirkender Materie konsistent beschrieben werden können.

Das Ziel dieses Vorhabens war es numerische Simulationen QCD kinetischen Theorie systematisch weiterzuentwickeln um so neue Observablen zur gezielten Untersuchung von Thermalisierungsprozessen im Quark-Gluon Plasma (QGP) zu entwickeln um präzise experimentelle Messungen des ALICE Experiment im LHC Run 3 und 4 bestmöglich theoretisch zu begleiten.

## 2. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Bei der theoretischen Beschreibung von Nicht-Gleichgewichtsprozessen im Quark-Gluon Plasma wurden basierend auf effektiven kinetischen Beschreibungen in der perturbativen QCD wichtige Fortschritte erzielt, die eine dynamische Beschreibung der Nicht-Gleichgewichtsphase am Anfang einer Schwerionenkollision ermöglichen. Die mikroskopischen QCD Prozesse, die zum Energieverlust von Jets und der Thermalisierung seiner niederenergetischen Fragmente führen, sind im wesentlichen identisch mit den Nicht-Gleichgewichtsprozessen zum Beginn der zeitlichen Entwicklung von Schwerionenkollisionen, die der Thermalisierung des Quark-Gluon Plasmas zugrundeliegen. Daher bietet die theoretische und experimentelle Untersuchung von nieder- und hoch-energetischen Hadronen, die mit Jets oder anderen hoch-energetischen Triggern korreliert sind, die Möglichkeit, Einblicke in Nicht-Gleichgewichtsprozesse des Quark-Gluon Plasma zu erlangen. Dazu hatte unsere Gruppe eine effektive QCD kinetische Beschreibung der Jet Evolution im Quark-Gluon Plasma entwickelt, die eine vereinheitlichte Beschreibung von thermischen und hoch-energetischen Anregungen des Quark-Gluon Plasmas ermöglicht.

## 3. Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Die Entwicklung von Simulationen zur Beschreibung der Zeitentwicklung von hoch-energetischen Jets im Quark-Gluon Plasma, mit Hilfe einer QCD kinetischen Beschreibung wurde erfolgreich durchgeführt und erste Ergebnisse zur Berechnung des Energieverlusts außerhalb des Jet Cones und der Studie von Observablen (z.B. RAA) wurden in Y.Mehtar-Tani, S.Schlichting, I.Soudi JHEP 05 (2023) 091 publiziert.

Diese Studien haben ergeben, dass es zur konsistenten Beschreibung des Energieverlusts von Jets in Schwerionenkollisionen notwendig ist die explizite Zeitabhängigkeit der Raten für induzierte Bremsstrahlung zu berücksichtigen. Basierend auf dieser Erkenntnis wurde zunächst auf weitere phänomenologische Studien verzichtet und im Anschluss erste Schritte zur Implementierung der zeitabhängigen Raten aus S.Schlichting, I.Soudi Phys.Rev.D (105) (2022)7, 076002 in die QCD kinetischen Simulationen von Jets eingeleitet. Dies hat sich jedoch als technisch sehr anspruchsvoll erwiesen, und konnte leider bis zum Ende der Projektlaufzeit nicht erfolgreich abgeschlossen werden.

Damit dennoch experimentell verwertbare Ergebnisse zur Identifikation von Nicht-Gleichgewichtsprozessen im Quark-Gluon Plasma bereitgestellt werden können, wurden zusätzlich phänomenologische Untersuchungen zu Photonen- und Dileptonenproduktion durchgeführt. Die entsprechenden Ergebnisse wurden in Oscar Garcia-Montero, Philip Plaschke and Sören Schlichting, JHEP 03 (2024) 05 und Oscar Garcia-Montero, Aleksas Mazeliauskas, Philip Plaschke and Sören Schlichting, arXiv:

2403.04846 [hep-ph] veröffentlicht. Insbesondere die theoretischen Vorhersagen für Dileptonen, zeigen eine klare Dominanz von Nicht-Gleichgewichtsbeiträgen für Invariante Massen  $\sim 2-5$  GeV und bilden die Grundlage für experimentelle Messungen in LHC Run 3 und zukünftigen Runs.

Die Ergebnisse des Projekts wurden beim jährlichen Kollaborationstreffen mit den Projektpartnern diskutiert und bei internationalen Konferenzen und Workshops vorgestellt.

#### **4. Verwendung der Zuwendung (wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises, z. B. Investitionen, Personalmittel)**

Aus den genehmigten Personalmitteln wurden folgende Personen finanziert:

*Ismail Soudi*: Durchführung Arbeitspakete B1. und B2. zur Berechnung von Jet RAA in kinetischen Simulationen

*Dr. Oscar Garcia Montero*: Durchführung des Arbeitspaketes B.3 zur Einbindung einer realistischen Zeitabhängigkeit der Temperatur des Quark-Gluon Plasmas in kinetische Simulationen von Jet Quenching. Berechnung von Photonen- und Dileptonenproduktion in Schwerionenkollisionen.

#### **5. Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele**

Das grundlegende wissenschaftlich Ziel des Vorhabens, nämlich theoretische Vorhersagen zu Signaturen der Nicht-Gleichgewichtsdynamik des Quark Gluon Plasmas zu treffen und somit die Grundlage für experimentelle Untersuchungen zu legen wurde erreicht. Da sich die theoretische Beschreibung der Nicht-Gleichgewichtsdynamik von geladenen Teilchen in Jets als deutlich anspruchsvoller herausgestellt hat, als zu Beginn des Projekts angenommen werden konnte, wurde hierzu, anders als ursprünglich geplant, keine geladenen Teilchen in Jets sondern Photonen und Dileptonen als Proben verwendet. Die in arXiv: 2403.04846 [hep-ph] veröffentlichten theoretischen Vorhersagen für Dileptonen, zeigen eine klare Dominanz von Nicht-Gleichgewichtsbeiträgen für Invariante Massen  $\sim 2-5$  GeV und bilden die Grundlage für experimentelle Messungen in LHC Run 3 und zukünftigen Runs.

#### **6. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die geleistete Arbeit entspricht den Aufgaben, die im Projektantrag dargestellt und mit dem Förderbescheid bewilligt wurden. Für die Erfüllung des angesetzten Vorhabens war die geleistete Arbeit deswegen notwendig und angemessen.

#### **7. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse wurden in einschlägigen Fachzeitschriften publiziert und bei nationalen und internationalen Konferenzen und Workshops präsentiert. Die theoretischen Vorhersagen dienen der Vorbereitung, Durchführung und Interpretation von experimentellen Untersuchungen am LHC, insbesondere durch die ALICE Kollaboration, im Run 3 und darüber hinaus.

Eine wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse ist nicht absehbar/geplant.

## 8. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Das Projekt stand während der gesamten Projektlaufzeit in regelmäßigen Austausch mit den Verbund und hat seine Ergebnisse auf internationalen Konferenzen und Workshops vorgestellt.

Die Beschreibung von Jets und hoch-energetischen Hadronen in Schwerionenkollisionen ist ein sehr aktives Forschungsgebiet, bei dem im Rahmen der Projektlaufzeit eine Vielzahl neuer experimenteller Ergebnisse erzielt wurden. Dabei wurden vor allem sogenannten Sub-Struktur Observablen untersucht. Die theoretische Beschreibung von Jets hat sich ebenso weiterentwickelt, allerdings bleibt die simultane Beschreibung hoch- und nieder-energetischer Fragmente von Jets nach wie vor ein Alleinstellungsmerkmal dieses Projekts.

Bei der experimentellen Untersuchung von Dileptonen mit ALICE wurden während der Projektlaufzeit erhebliche Fortschritte erzielt, die erste experimentelle Messungen mit einer Unterdrückung von Hintergründen durch den Zerfall schwerere Quarks in LHC Run 3 ermöglichen. Die theoretischen Vorhersagen in diesem Projekt dienen der Vorbereitung dieser experimentellen Untersuchungen.

## 9. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

### 9.1. Referierte Publikationen (z. B. in Fachzeitschriften oder -büchern und referierte Konferenzproceedings)

Oscar Garcia-Montero and Sören Schlichting:

Baryon stopping and charge deposition in heavy-ion collisions due to gluon saturation

e-Print: 2409.06788 [hep-ph]

Oscar Garcia-Montero, Philip Plaschke and Sören Schlichting:

Scaling of pre-equilibrium dilepton production in QCD Kinetic Theory

e-Print: 2403.04846 [hep-ph]

Oscar Garcia-Montero, Hannah Elfner and Sören Schlichting:

McDIPPER: A novel saturation-based 3+1D initial-state model for heavy ion collisions

Phys.Rev.C 109 (2024) 4, 044916

Oscar Garcia-Montero, Aleksas Mazeliauskas, Philip Plaschke and Sören Schlichting:

Pre-equilibrium photons from the early stages of heavy-ion collisions

JHEP 03 (2024) 053.

Y. Mehtar-Tani, S. Schlichting and I. Soudi:

Jet thermalization in QCD kinetic theory

JHEP 05 (2023) 091.

Sören Schlichting and Ismail Soudi:

Splitting rates in QCD plasmas from a nonperturbative determination of the momentum broadening kernel  $C(q_{\perp})$

Phys.Rev.D 105 (2022) 7, 076002.

### 9.2. Andere Veröffentlichungen (z. B. Konferenzbeiträge wie Vorträge und Poster, unreferierte Proceedings, Conference Notes)

Oscar Garcia-Montero, Aleksas Mazeliauskas, Philip Plaschke and Sören Schlichting:

Pre-equilibrium photon and dilepton production

Contribution to Quark Matter 2023, EPJ Web of Conferences 296, 07003 (2024)

Nils Sass, Marco Müller, Oscar Garcia-Montero, Hannah Elfner:  
Global angular momentum generation in heavy-ion reactions within a hadronic transport approach  
Contribution to Quark Matter 2023, EPJ Web Conf. 296, 14011 (2024).

Sören Schlichting:  
New theoretical developments on the early-time dynamics and approach to equilibrium in Heavy-Ion collisions  
Contribution to Quark Matter 2023, EPJ Web Conf. 296, 01020 (2024)

Oscar Garcia-Montero, Aleksas Mazeliauskas, Philip Plaschke and Sören Schlichting:  
Pre-equilibrium photon production in QCD Kinetic Theory  
Contribution to HP2023, PoS Hard Probes 2023 (2024) 075.

Oscar Garcia-Montero, Hannah Elfner and Sören Schlichting:  
Charge and energy deposition in the McDIPPER framework  
Contribution to HP2023, PoS HardProbes2023 (2024) 070

Hannah Elfner, Niklas Götz, Oscar Garcia Montero, Jean-Francois Paquet, Charles Gale:  
Photon momentum anisotropies from the late stages of relativistic heavy-ion collisions  
Contribution to HP2023, PoS HardProbes2023 (2024) 070.

Sören Schlichting and Ismail Soudi:  
Non-perturbative Determination of the Collisional Broadening Kernel and Medium-induced Radiation in QCD Plasmas  
Contribution to Quark Matter 2022, Acta Phys.Polon.Supp. 16 (2023) 1, 121.

### 9.3. Abschlussarbeiten (Bachelor, Master, Diplom, Staatsexamen, Promotion, Habilitation)

#### Promotionen:

Ismail Soudi:  
Energy loss and equilibration of a highly energetic parton in QCD plasmas (2021)  
Philip Plaschke: Pre-equilibrium photon and dilepton production from the early stages of high-energy heavy-ion collisions (2024)

#### Masterarbeiten:

Yannik Hoffmann: Saturation effects in exclusive vector meson production (2025)

#### Bachelorarbeiten:

Lisa Kröger: Monte-Carlo sampling of nucleon positions in the nuclear shell model for heavy-ion collisions (2024)

## Kurzbericht

- öffentlich -

Zuwendungsempfänger: Universität Bielefeld

Projektleitung: Prof. Dr. Sören Schlichting

Verbund: 05P2021 (ErUM-FSP T01) – Run 3 von ALICE am LHC

Thema: Fluktuationen und Korrelationen erhaltener Ladungen und Teilchen in Schwerionenkollisionen

\*

### 1. Ziel und Inhalt des Projektes

\*\*\*\*\*

Das Projekt hat naturwissenschaftliche Grundlagenforschung auf dem Gebiet "Hadronen- und Kernphysik" betrieben mit dem Ziel, tiefere Einblicke in die Natur von stark wechselwirkender Materie bei extremen Bedingungen zu gewinnen, wie sie in Schwerionenkollisionen am LHC erzeugt wird. Grundlage für diese Untersuchungen ist war eine effektive kinetische Beschreibung der Quantenfeldtheorie der starken Wechselwirkung, Quantenchromodynamik (QCD), auf deren Basis Nicht-Gleichgewichtsprozesse starkwechselwirkender Materie konsistent beschrieben werden können.

Der Schwerpunkt der theoretischen Arbeiten lag auf der systematischen Weiterentwicklung numerischer Simulationen um so neue Observablen zur gezielten Untersuchung von Nicht-Gleichgewichtsprozessen im Quark-Gluon Plasma (QGP) zu entwickeln und präzise experimentelle Messungen des ALICE Experiment im LHC Run 3 und 4 bestmöglich theoretisch zu begleiten.

### 2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Die Entwicklung von Simulationen zur Beschreibung der Zeitentwicklung von hoch-energetischen Jets im Quark- Gluon Plasma, mit Hilfe einer QCD kinetischen Beschreibung wurde erfolgreich durchgeführt und erste Ergebnisse zur Berechnung des Energieverlust ausserhalb des Jet cones und der Studie von Observablen (z.B. RAA) publiziert.

Zur Identifikation von Nicht-Gleichgewichtsprozessen im Quark Gluon Plasma wurden zusätzlich phänomenologische Untersuchungen zu Photonen- und Dileptonenproduktion durchgeführt. Die theoretischen Vorhersagen für Dileptonen, zeigen eine klare Dominanz von Nicht-Gleichgewichtsbeiträgen für Invariante Massen  $\sim 2-5$  GeV und bilden die Grundlage für experimentelle Messungen in LHC Run 3 und zukünftigen Runs.

### **3. Darstellung der wesentlichen Ergebnisse und deren konkreter Nutzen sowie ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen**

Das Projekt hat im Rahmen der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung neue Erkenntnisse zu den Eigenschaften stark-wechselwirkender Materie bei extremen Bedingungen geliefert. Speziell, wurde die theoretische Beschreibung der Nicht-Gleichgewichtsdynamik von Schwerionenkollisionen weiterentwickelt und Vorhersagen für die Nicht-Gleichgewichtsproduktion von Photonen und Dileptonen in Schwerionenkollisionen am LHC bestimmt. Die im Rahmen dieses Projekts erzielten theoretischen Erkenntnisse und Vorhersagen bilden die Grundlage für experimentelle Untersuchungen der Nicht-Gleichgewichtsdynamik stark-wechselwirkender Kernmaterie in LHC Run 3 und 4.