



## Schlussbericht

Verbund: 05K2019 - LADIAG

Zuwendungsempfänger:	Universität Hamburg
Projektleitung:	Prof. Dr. Florian Grüner
E-Mail:	florian.gruener@uni-hamburg.de
Förderkennzeichen:	05K19GUD
Förderzeitraum:	01.07.2019 - 31.12.2022
Zuwendung:	474.890,60 €
Projektträger:	Projektträger DESY
Zusätzlicher Kontakt:	andreas.maier@desy.de
Zusätzlicher Name:	Dr. Andreas Maier

Genutzte Großgeräte:	Labor	Gerät	Experiment
Diplomarbeiten:	0		
Dissertationen:	2		
Habilitationen:	0		
Referierte Publikationen:	5		
Andere Veröffentlichungen:	10		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	0		
Masterarbeiten:	1		
Staatsexamen:	0		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 25.06.2023 20:06 für eine Veröffentlichung freigegeben.

# Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:	Universität Hamburg
Projektleitung:	Prof. Florian Grüner
Verbund:	LADIAG: Neue Diagnostiken für Hoch-Intensitätslaser
Thema:	Teilprojekt 1: Numerische Stabilitätsanalyse und 3D Feldmessung mittels räumlich aufgelöster Fourier-Spektroskopie

## Zusammenfassung

Hochleistungslaser sind aus einer Vielzahl von Forschungsfeldern nicht mehr wegzudenken. In der nicht-linearen QED ist für die Interpretation von experimentellen Daten eine präzise Kenntnis der Laserpulseigenschaften von essentieller Bedeutung. Und in der Laser-Plasma-Beschleunigung wirken sich Variationen in den Laserpulseigenschaften direkt auf die Qualität und Reproduzierbarkeit der erzeugten Elektronenstrahlen aus.

Um die Leistungsfähigkeit modernen Lasersysteme in beiden Anwendungsfelder deutlich zu verbessern, hat das beantragte Vorhaben daher einen doppelten Ansatz verfolgt. Zum einen wurde eine neue Diagnostikmethode dazu verwendet, um eine präzise räumlich-zeitliche Charakterisierung von Femtosekundenlaserpulsen zu erzielen. Die gewonnenen Kenntnisse wurden direkt dazu verwendet, die Eigenschaften des untersuchten Laserpulses zu verbessern. Aufgrund dieser vielversprechenden Ergebnisse wird die Diagnostik auch in Zukunft eine wichtige Rolle spielen.

Zum anderen wurden erstmals umfangreiche Toleranz- und Parameterstudien mit Particle-In-Cell (PIC) Simulationen durchgeführt, um zu entschlüsseln, wie stabil ein Laser operieren muss, um reproduzierbar Elektronenstrahlen zu erzeugen. Die gewonnenen Erkenntnisse haben direkte und weitreichende Konsequenzen und werden z.B. dazu verwendet, ein neues Lasersystem zu spezifizieren, das erstmals anwendungstaugliche Laser-Plasma Elektronenstrahlen erzeugen soll.

Das Vorhaben wurde signifikant durch die Anfang 2020 beginnende COVID Pandemie beeinträchtigt. Dennoch konnte das Projekt alle wesentlichen Projektziele erreichen.

# Bericht

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

Femtosekundenlaser sind aus vielen verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen nicht mehr wegzudenken. Gerade an den großen Forschungsinfrastrukturen sind Laser mit Pulsen von höchster Intensität von essentieller Bedeutung. Femtosekundenlaser sind integraler Bestandteil von sogenannten Anregungs- und Abfrageexperimenten an den Experimentierstationen moderner Synchrotron Anlagen und Freie-Elektronen Laser, mit denen zeitaufgelöst die Struktur und Dynamik von Materie auf atomaren Längen und Zeitskalen untersucht wird. Hochleistungslaser auf der Terawatt- und Petawatt-Skala sind außerdem Grundlage einer neuen Generation von Beschleunigertechnologie, der sogenannten Laser-Plasma Beschleunigung, die eine besonders kompakte Quelle von hoch-energetischen Elektronenstrahlen verspricht. Und schließlich bieten Hochintensitätslaser Zugang zu neuer Physik in der nicht-linearen Quantenelektrodynamik.

Die Anwendung von Hochleistungs- und Hochintensitätslasern wird allerdings zunehmend von unseren Möglichkeiten beeinträchtigt, die Eigenschaften der Laserpulse von nur wenigen Femtosekunden dauern präzise zu vermessen, und zu kontrollieren.

Gerade die Plasma-Beschleunigung hat in der Vergangenheit äußerst beeindruckenden Fortschritt gezeigt, und dabei Beschleunigungsfelder demonstriert, die viele Größenordnungen stärker sind als die, die derzeit in modernen Radiofrequenzbeschleunigern erzeugt werden können. Basierend auf diesen Erfolgen konzentriert sich die Forschung zunehmend darauf, stabile und im Betrieb zuverlässige Plasma-Beschleuniger zu entwickeln. Dabei ist die Qualität der Laserpulse von zentraler Bedeutung. So bestimmt zum Beispiel die zeitliche Struktur der Laserpulses in der Plasma-Beschleunigung auch unmittelbar die Struktur und Form der beschleunigenden Plasmawelle, die wiederum direkten Einfluss auf die Energiebreite (genauer: den Phasenraum) der beschleunigten Elektronenstrahlen hat. In der wissenschaftlichen Gemeinschaft gibt es einen breiten Konsens darüber, dass, um die Laser-Plasma-Beschleunigung zur Anwendungsreife zu entwickeln, (a) ein besseres Verständnis darüber notwendig ist, wie sich Variationen in der Laserpulseseigenschaften auf die Dynamik des Plasma-Beschleunigungsprozesses auswirken; und (b) neuartige Diagnostiken zur Bestimmung der Laserpulseseigenschaften notwendig sind.

Insbesondere der zweite Punkt trifft auch auf andere Wissenschaftsfelder zu. Denn in ähnlich komplexer Weise wie in der Plasma-Beschleunigung beeinflussen die Laserpulseseigenschaften auch die experimentellen Ergebnisse in Laser-getriebenen Experimenten zur nicht-linearen QED. Eine genaue Kenntnis der anfänglichen Laserpulseseigenschaften ist unabdingbar, um die gewonnenen Daten korrekt zu interpretieren.

Ein besseres Verständnis der Laserpulseseigenschaften und die Entwicklung neuer Diagnostiken würde daher nicht nur die Entwicklung der Laser-Plasma Beschleunigung maßgeblich voranbringen, sondern auch die Leistungsfähigkeit von Hochintensitätslaser an Großforschungsanlagen deutlich verbessern. Als Beispiel sei hier nur Forschung an der High Energy Density Science (HED) Strahlführung des European XFEL, sowie das geplante LUXE-Experiment (ebenfalls European XFEL) zur Untersuchung der nicht-linearen QED genannt.

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

Es ist ein allgemein akzeptiertes Prinzip in der Forschung, dass nur das verbessert werden kann, was auch gemessen werden kann. Insofern wirkt sich die Verfügbarkeit von Diagnostiken direkt auf die Leistung von modernen Hochleistungslasern aus.

### *Pulslängenmessung:*

Schon die Bestimmung der Pulsedauer eines Femtosekundenlasers ist sehr anspruchsvoll, entspricht doch die typische Pulsdauer von 30 fs einer Pulslänge von lediglich 10  $\mu\text{m}$ . Etablierte Methoden zur Pulsdauerermessung beruhen oft auf einer Autokorrelation des Laserpulses. Eine der populärsten Methoden ist das sogenannte *frequency-resolved optical gating* (FROG) und verschiedene Variationen dieser Methode (GRENOUILLE, XFROG). Eine weitere Klasse von Methoden basiert auf Frequenz-aufgelösten Interferogrammen des zu messenden Pulses (SPIDER, SRSI, WIZZLER).

Alle diese Ansätze basieren im Wesentlichen auf der Annahme, dass das Elektrische Feld  $E$  der Pulses in eine zeitliche (longitudinale) und räumliche (transversale) Komponenten separiert werden kann, dass also,  $E(r,t) = E(r) \times E(t)$ . Folglich ist das Ergebnis der Messung eine rein eindimensionale Beschreibung des Pulses. Komplexe Kopplungen zwischen den spektralen und zeitlichen Eigenschaften des Pulses, wie zum Beispiel eine Verkipfung und Krümmung der Pulsfront, gehen in dieser Beschreibung verloren. Gerade diese Pulseigenschaften sind aber zum Beispiel in der Plasma-Beschleunigung besonders wichtig, da eine verkippte Pulsfront auch eine verkippte Plasmawelle antreibt, in deren Inneren dann verformte elektrische Felder wirken und damit die Eigenschaften eines beschleunigten Elektronenstrahls verschlechtert werden. Es ist also wichtig, die Pulse hinsichtlich dieser Eigenschaften genau zu kennen.

Der Separationsansatz wirft noch ein weiteres Problem auf: sollten spektral-zeitliche Kopplungen vorhanden sein, resultiert die Messung basierend auf dem Ansatz  $E(r,t) = E(r) \times E(t)$  in einer falschen Aussage, und folglich in einer falschen Interpretation der Daten.

Zum Zeitpunkt der Antragsstellung existierten zwar einige Ansätze, um isoliert z.B. die Krümmung oder Verkipfung der Pulsfront zu messen, diese waren aber nicht dazu geeignet die komplette 3D Feldverteilung eines Pulses zu messen. Es galt eine entsprechende Methode in der Praxis anzuwenden, um die komplexe Feldverteilung zu bestimmen, und entsprechend die Laserpulse darauf zu optimieren. Diese Problemstellung ließ sich auch leicht auf andere Anwendungsfelder übertragen. So bestimmt das zeitliche Profil eines Laserpulses letztlich die instantane Intensität des Lasers – ein Parameter, der auch in Experimenten zur nicht-linearen QED von essentieller Bedeutung ist. Die Entwicklung von neuen Diagnostikmethoden für Hochintensitätslaser war also ein drängendes Problem für gleich mehrere Forschungsfelder.

### *Numerische Simulationen:*

Numerische Simulationen mit sogenannten Particle-in-Cell (PIC) Codes sind bei der Beschreibung der Laser-Plasma Interaktion ein unverzichtbares Werkzeug, da die zugrunde liegenden Prozesse höchst nicht-linear sind, und sich damit insbesondere einer analytischen Beschreibung entziehen. Allerdings sind PIC-Simulationen, welche die Laser-Plasma Interaktion mit ausreichender Genauigkeit beschreiben, und alle relevanten physikalischen Effekte mitnehmen, sehr teuer – sie benötigen also extrem viel Rechenzeit. Eine 3D Simulation unter Verwendung eines der bislang etablierten PIC-Codes (wie z.B. WARP oder OSIRIS) kann leicht mehrere 100.000 CPU Stunden Rechenzeit benötigen bei einer Laufzeit von mehreren Tagen – und das für nur eine einzige Simulation.

Bei diesen hohen Kosten übersteigt eine systematische Parameterstudie oder eine Toleranzanalyse die Kapazitäten selbst der modernsten Supercomputer. Genau solche Studien wären für die Plasma-Beschleunigung aber besonders wichtig, um z.B. die Auswirkungen von Schuss-zu-Schuss

Variationen in den Laserpulsparametern auf die Elektronenstrahlen zu verstehen. Aus diesen Erkenntnissen könnten auch Spezifikationen für zukünftige Lasersysteme und deren Diagnostiken abgeleitet werden.

Zum Zeitpunkt der Antragsstellung war gerade ein neuer PIC-Code verfügbar geworden – FBPIC – der aufgrund seiner besonderen Architektur erstmals dazu geeignet war, umfangreiche Toleranzstudien durchzuführen. Der Code war unter anderem für derartige Studien optimiert worden, und verwendet dazu z.B. eine reduzierte Geometrie (Zylindersymmetrie) und Grafikkarten zur Beschleunigung der Berechnungen. FBPIC kann außerdem in einem besonderen relativistischen Bezugssystem arbeiten, wodurch sich die verschiedenen Zeit- und Längenskalen im Plasmabeschleuniger angleichen.

Dadurch kann die benötigte Rechenzeit effektiv um einen Faktor x100 reduziert werden. Im Rahmen des beantragten Vorhabens sollten mit diesem speziellen Code erstmals Toleranzstudien durchgeführt werden, wie sie auch an modernen Radiofrequenz-Beschleunigern üblich sind.

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

Das beantragte Vorhaben wurde in einem Verbund aus mehreren Projektpartnern durchgeführt. Der Verbund bestand aus den Projektpartnern Univ. Hamburg, Univ. Jena, Univ. Düsseldorf, und dem Helmholtzzentrum Dresden-Rossendorf, sowie den unterstützenden Partnern DESY und GSI. Im Verbund haben die Partner gemeinsam verschiedene Aspekte der Metrologie von Ultrakurzen Laserpulsen adressiert.

Für die Universität Hamburg war DESY ein besonders wichtiger Projektpartner, da mit DESY seit vielen Jahren eine enge und fruchtbare Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Beschleunigerphysik, und hier insbesondere auch der Laser-Plasma Beschleunigung existierte.

Das Projekt wurde ursprünglich von Andreas Maier (Univ. Hamburg) beantragt, und nach der Bewilligung des Projekts anfänglich auch geleitet. Herr Maier wechselte Anfang 2020 als Gruppenleiter zu DESY. Die Projektleitung übernahm daraufhin Prof. Grüner. Herr Maier hat das gemeinsame Projekt dann in seiner neuen Funktion als Vertreter des Projektpartners DESY weiter begleitet und vorangetrieben.

Im Herbst 2019 gab es ein Kick-Off Meeting der Projektpartner in Hamburg, bei dem verschiedene Problemstellungen in der Laserdiagnostik diskutiert wurden. Es wurde vereinbart, verschiedene Diagnostiken zu entwickeln, und diese dann gemeinsam an den Lasersystemen der beteiligten Institute zu testen.

Das Aufkommen der Corona Pandemie hat diese ursprünglichen Pläne aber zunichte gemacht. Gerade zu Beginn der Pandemie war über mehrere Wochen kein Laborbetrieb möglich. Im weiteren Verlauf der Pandemie war der Laborbetrieb stets stark eingeschränkt, da z.B. durch Hygienebestimmungen die maximale Anzahl der Personen im Labor sehr stark eingeschränkt war. In der Folge kamen sämtliche Pläne zum Experimentierbetrieb durcheinander. Auch Reisen zu Partnerinstituten für gemeinsame Messungen waren durch die Corona Beschränkungen sehr erschwert.

Als Konsequenz draus, wurden die Projektpläne modifiziert, und der Schwerpunkt auf die Simulationsarbeiten (Toleranzstudien) verlegt. Diese konnten ohne größere Probleme auch aus dem Home Office erledigt werden.

In einer Masterarbeit wurden verschiedene Konvergenzstudien durchgeführt. Dabei wurde die Frage untersucht, inwieweit die Ergebnisse einer PIC-Simulation von der gewählten räumlichen und zeitlichen Auflösung, aber auch von Parametern wie der anfänglichen Plasma Temperatur abhängen [J. Neuhaus-Steinmetz, „Temperature effects on convergence of Particle-In-Cell simulations of Laser Wakefield Acceleration“, Masterarbeit Univ. Hamburg (2019)]. Die weiteren Arbeiten bauten auf diesen Ergebnissen auf.

Parallel dazu wurde der Code FBPIC weiterentwickelt. Hier gab es eine Reihe von fundamentalen Arbeiten, mit denen die Genauigkeit und Ausführungsgeschwindigkeit der PIC-Simulationen deutlich verbessert werden konnte. Diese Arbeiten basieren in großen Teilen auf einem neuen Konzept, nämlich der Formulierung der Lorentz-Boosted-Frame PIC-Gleichungen in einem mitbewegten Koordinatensystem (Galilean comoving frame). Durch diese geschickte Formulierung der Gleichung konnte die Numerische Cherenkov Strahlung als wesentlicher Grund für numerische Instabilität eliminiert werden [M. Kirchen et al., Phys. Rev. E 102, 013202 (2020)].

FBPIC wurde sehr rasch dazu verwendet, experimentelle Daten zu analysieren. Aufgrund der deutlich gesteigerten Ausführungsgeschwindigkeit war es auf einmal möglich, in kurzer Zeit viele hundert Simulationen durchzuführen und damit die experimentellen Daten zu interpretieren [S. Jolas et al., Phys. Rev. Lett. 126, 104801 (2021)].

Das wesentliche Ziel des Vorhabens war es, ein besseres Verständnis zu entwickeln, wie sich Instabilitäten des Treiberlaserpulses auf die Stabilität der beschleunigten Plasma Elektronenstrahlen

auswirken. Wir konnten im Experiment zeigen, dass sich aus gemessenen Eigenschaften des Treiberlaserpulses, die Eigenschaften des Elektronenstrahls mit hoher Genauigkeit vorhersagen lassen [M. Kirchen et al., Phys. Rev. Lett. 128, 174807 (2021)]. Die Ergebnisse sind für die Laser-Plasma-Beschleunigung von großer Bedeutung. Wir sind nun in der Lage, konkrete Spezifikationen für den Betrieb und die Stabilität eines Hochleistungslasers abzuleiten, um damit Elektronenstrahlen mit einer gewissen Stabilität zu erzeugen. Darüber hinaus eröffnen die Ergebnisse die Möglichkeit, mittels aktiver Stabilisierung und Rückkopplung, die Leistungsfähigkeit eines Plasmabeschleunigers im Betrieb zu verbessern. Damit wurde ein wesentliches Ziel des Vorhabens erreicht.

Durch die Pandemie war der experimentelle Betrieb sehr eingeschränkt, und die ursprünglich geplante Entwicklung einer Diagnostik mittels räumlich aufgelöster Fourier-Spektroskopie sehr erschwert. Nachdem inzwischen die kommerzielle Version einer solchen Diagnostik verfügbar geworden war, hat der Projektpartner DESY ein entsprechendes Gerät erworben, und dem Projekt zur Verfügung gestellt.

Mit diesem Gerät wurden in der Folge mehrere Messungen unternommen. Speziell wurde die Qualität der Laserpulse aus dem sogenannten Seedlaser charakterisiert. Die Messungen trugen maßgeblich dazu bei, die Einflussfaktoren auf die Pulsqualität im Seedlaser zu bestimmen, und in Folge die Qualität der Pulse zu verbessern [T. Eichner et al., Opt. Express 30, 3404 (2022)].

Auch wenn sich die ursprünglichen Pläne für gemeinsame Experimentierkampagnen der Verbundpartner nicht wie geplant umsetzen ließen, so befinden sich die Partner dennoch im Austausch zu den Ergebnissen ihrer Arbeit.

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

Mit dem Beginn der Corona Pandemie und den damit verbundenen Einschränkungen wurde die Schwerpunkte des Projektes neu gesetzt.

Es wurde ein Antrag zur Umwidmung der Projektmittel gestellt. Die ursprünglich beantragten Investitionsmittel und ein Großteil der Reisemittel wurden in Personalmittel umgewidmet. Im Verlauf des Projektes wurde auch eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung des Projektes um 6 Monate bewilligt. In Summe dienten diese Maßnahmen dazu, die Beschäftigungszeit der auf dem Projekt beschäftigten Doktoranden und PostDocs zu verlängern. Dadurch konnten die Pandemiebedingten Projektverzögerungen im Wesentlichen aufgefangen, und Auswirkungen auf den Projekterfolg minimiert werden.

DESY als Projektpartner der Univ. Hamburg hat für den Projekterfolg notwendige Investitionen, wie zum Beispiel den Erwerb des kommerziellen Diagnostikgerätes, übernommen.



## 5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

Trotz der Pandemie-bedingten Schwierigkeiten konnten alle wesentlichen Projektziele erreicht werden.

### **Teilprojekt 1 Tolerance Studies with PIC Codes**

*Aufgabe 1.1 Plasma Temperature and Convergence:* Die Konvergenzstudien wurden durchgeführt und in einer Masterarbeit beschrieben.

*Aufgabe 1.2 und Aufgabe 1.4 Tolerance Studies:* Die Toleranzstudien wurden in verschiedenen Konfigurationen durchgeführt. Die entsprechenden Studien war Grundlage mehrerer Publikationen.

*Aufgabe 1.3 Implement Advanced Laser Model:* Das im Antrag beschriebene Modul wurde entwickelt und als Teil des Codes FBPIC implementiert. Es wurde als open source veröffentlicht [[https://fbpic.github.io/api\\_reference/lpa\\_utilities/laser\\_profiles/flattened.html](https://fbpic.github.io/api_reference/lpa_utilities/laser_profiles/flattened.html)].

*Aufgabe 1.5. Data Interpretation and Conclusions:* Die gewonnenen Erkenntnisse und neu entwickelte Methodiken bilden die Grundlage für die Spezifikation des neuen Lasersystems KALDERA, das nun bei DESY entwickelt wird.

### **Teilprojekt 2 Development of spatially-resolved Fourier-spectroscopy**

*Aufgabe 2.1 und 2.4: Setup of Spatially-Resolved Fourier-transform Spectroscopy:* Auf eine Eigenentwicklung wurde aus oben genannten Gründen verzichtet. Da inzwischen ein kommerzielles Gerät mit ähnlicher Leistungsfähigkeit verfügbar war, wurde durch den Projektpartner DESY ein entsprechendes Gerät erworben und für das Projekt zur Verfügung gestellt.

*Aufgabe 2.2: Laser System Characterization:* Das Lasersystem MALCOLM wurde unter Verwendung der räumlich aufgelösten Fourier-Spektroskopie im Detail charakterisiert, und basierend auf diesen Erkenntnissen verbessert. Auf eine Charakterisierung anderer Lasersysteme wurde verzichtet.

*Aufgabe 2.3: Feedback to simulations:* In Teilprojekt 1 fanden Untersuchungen mit komplexeren Pulsstrukturen statt.

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

Die Arbeiten zur Weiterentwicklung der PIC Simulation FBPIC und die in der Folge durchgeführten Toleranzstudien waren notwendig und in ihrem Umfang angemessen, um die wichtige Frage zu beantworten, wie sich Variationen in den Treiberlaserparametern auf die Qualität von Plasma-Elektronenstrahlen auswirken.

Gleiches gilt für die Arbeiten zur Charakterisierung von Laser-Pulsen mittels räumlich aufgelöster Fourier Spektroskopie. Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig und in ihrem Umfang angemessen, um ein besseres Verständnis für die Qualitätsbestimmenden Faktoren in der Erzeugung von Seedlaserpulsen zu gewinnen.

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

Die räumlich aufgelöste Fourier-Spektroskopie ist eine relative neue aber wichtige Methode zur Charakterisierung von Femtosekunden Laserpulsen. Sie findet zunehmend Verbreitung, und wird mit Sicherheit in Zukunft vermehrt dazu eingesetzt werden, detaillierte Informationen zur zeitlichen und räumlichen 3D Struktur von Ultrakurzen Laserpulsen zu bekommen. Konkret wurde sie in diesem Projekt benutzt, um die Ursachen von Störungen in der räumlichen und zeitlichen Struktur von Seedlaserpulsen zu identifizieren und letztlich auch zu beheben. Es ist absehbar, dass die Methode auch weiterhin dazu verwendet wird, die Leistungsfähigkeit moderner Hochleistungslaser zu verbessern.

Mit der Etablierung von modernen, sehr schnellen und präzisen PIC-Codes, und hier im Speziellen FBPIC, werden umfangreiche Toleranz- und Parameterstudien ermöglicht. Unser Vorhaben hat erstmals derartige Studien durchgeführt, und damit eine neue Methodik im Feld der Laser-Plasma Beschleunigung etabliert. Sie ermöglicht es erstmals, den Laser-Plasma Beschleuniger gezielt auf bestimmte Elektronenstrahleigenschaften hin zu optimieren. Desweiteren wurde glaubhaft gezeigt, dass mit gezielten Rückkopplungsschleifen die Leistung eines Plasmabeschleunigers soweit stabilisiert und verbessert werden kann, dass erste Anwendungen in greifbare Nähe rücken werden. Eine experimentelle Demonstration dieser Konzepte ist derzeit in Vorbereitung.

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

Auch wenn eine Zusammenarbeit im Verbund durch die Corona Pandemie sehr erschwert wurde, so haben dennoch alle Projektpartner die ursprünglichen Ziele weiterverfolgt.

Wie oben bereits erwähnt, ist derzeit ein Diagnosegerät zur räumlich aufgelösten Fourier Spektroskopie kommerziell erhältlich. Um Pandemie-bedingte Zeitverluste aufzufangen, wurde von DESY als UHH-Kooperationspartner das entsprechende kommerzielle Gerät erworben, um es für die geplanten Messungen einzusetzen.

Unter Beteiligung des Verbundpartners HZDR, wurde eine umfangreiche Untersuchung zur Entwicklung von spektral-räumlichen Kopplungen entlang der Verstärkerkette eines Hoch-Intensitätslasers veröffentlicht: A. Jeandet et al., Opt. Express 30, 3262 (2022).

Die Diagnose von spektralen-räumlichen Kopplungen ist immer noch ein sehr relevantes Thema. Neue Diagnostikmethoden, wie z.B. die spektral aufgelöste Messung der Laserwellenfront, werden weiterhin entwickelt: N. Weisse et al., Opt. Express 31, 19733 (2023).

Diese und andere Veröffentlichungen zeigen, dass die präzise Diagnose von spektral-zeitlichen Kopplungen in Femtosekunden Laserpulsen immer noch ein sehr aktives Forschungsgebiet ist. Die Arbeiten im Rahmen dieses Vorhabens, haben zu diesem Thema wichtige Beiträge geleistet.

Ein zweiter Schwerpunkt des Vorhabens war die erstmalige Durchführung von Toleranzstudien mittels PIC-Simulationen. Dieser Ansatz wurde durch unsere Gruppe maßgeblich mitentwickelt und vorangetrieben. Nachdem der verwendete Code FBPIC konsequent als open-source Code entwickelt und zur Verfügung gestellt wird, profitieren davon auch andere Arbeitsgruppen im Feld. Toleranzstudien werden zunehmend auch von anderen Arbeitsgruppen verwendet. Hier hat das Vorhaben einen sehr wichtigen Beitrag für das Feld geleistet.

Bezüglich des Ansatzes, aus Simulationsergebnissen Spezifikationen für zukünftige Lasersysteme abzuleiten, sind uns derzeit keine Arbeiten anderer Gruppen bekannt.

## 9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

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

T. Eichner, T. Hülsenbusch, J. Dirkwinkel, T. Lang, L. Winkelmann, G. Palmer, and A. R. Maier, "Spatio-spectral couplings in saturated collinear OPCPA", *Opt. Express* 30, 3404-3415 (2022)

M. Kirchen, S. Jalas, P. Messner, P. Winkler, T. Eichner, L. Hübner, T. Hülsenbusch, L. Jeppe, T. Parikh, M. Schnepf, and A. R. Maier, "Optimal beam loading in a laser-plasma accelerator", *Phys. Rev. Lett.* 126, 174801 (2021)

S. Jalas, M. Kirchen, P. Messner, P. Winkler, L. Hübner, J. Dirkwinkel, M. Schnepf, R. Lehe, and A. R. Maier, "Bayesian optimization of a laser-plasma accelerator", *Phys. Rev. Lett.* 126, 104801 (2021)

A. R. Maier, N. M. Delbos, T. Eichner, L. Hübner, S. Jalas, L. Jeppe, S. W. Jolly, M. Kirchen, V. Leroux, P. Messner, M. Schnepf, M. Trunk, P. A. Walker, C. Werle, and P. Winkler, "Decoding Sources of Energy Variability in a Laser-Plasma Accelerator", *Phys. Rev. X* 10, 031039 (2020)

M. Kirchen, R. Lehe, S. Jalas, O. Shapoval, J.-L. Vay, and A. R. Maier, "Scalable spectral solver in Galilean coordinates for eliminating the numerical Cherenkov instability in particle-in-cell simulations of streaming plasmas", *Phys. Rev. E* 102, 013202 (2020)

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

Verschiedene Konferenzbeiträge, darunter Advanced Accelerator Concepts (AAC), und European Advanced Accelerator Concepts (EAAC).

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

J. Neuhaus-Steinmetz, „Temperature effects on convergence of Particle-In-Cell simulations of Laser Wakefield Acceleration“, Masterarbeit Univ. Hamburg (2019)

Zwei Abschlussarbeiten (Promotion) sind in Vorbereitung und werden voraussichtlich Ende 2023 abgeschlossen.

## Kurzbericht

- öffentlich -

Zuwendungsempfänger: Universität Hamburg

Projektleitung: Prof. Grüner

Verbund: LADIAG: Neue Diagnostiken für Hoch-Intensitätslaser

Thema: Teilprojekt 1: Numerische Stabilitätsanalyse und 3D Feldmessung mittels räumlich aufgelöster Fourier-Spektroskopie

### 1. Ziel und Inhalt des Projektes

Hochleistungslaser sind aus einer Vielzahl von Forschungsfeldern nicht mehr wegzudenken. In der nicht-linearen QED ist für die Interpretation von experimentellen Daten eine präzise Kenntnis der Laserpulseigenschaften von essentieller Bedeutung. Und in der Laser-Plasma-Beschleunigung wirken sich Variationen in den Laserpulseigenschaften direkt auf die Qualität und Reproduzierbarkeit der erzeugten Elektronenstrahlen aus. Um die Leistungsfähigkeit von Hochintensitätslasern für die Anwendungen in der Forschung, und dabei insbesondere auch als Grundlage neuer Beschleunigertechnologie zu nutzen, ist es daher dringend notwendig, die Diagnostik von ultrakurzen Laserpulsen weiter zu verbessern. Zusätzlich gilt es mit numerische Simulationen die Mechanismen zu entschlüsseln, durch die sich Variationen in den Laserpulseigenschaften auf die erzeugten Plasma-Elektronenstrahlen auswirken. Vor allem müssen die dazu verwendeten Simulationscodes in ihrer Genauigkeit verbessert, und ihrer Ausführungsgeschwindigkeit massiv beschleunigt werden, um umfangreiche Toleranz- und Parameterstudien zu ermöglichen.

### 2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Das Projekt startete in der zweiten Hälfte 2019, und war somit durch die Anfang 2020 einsetzende Corona Pandemie direkt betroffen. Experimentelle Arbeiten deutlich erschwert. Das Projekt verlagerte daher den Schwerpunkt auf die Simulationsarbeiten.

Zunächst wurden numerische Konvergenzstudien durchgeführt, in der vor allem auch der Effekt der initialen Plasmatemperatur auf die Konvergenz der Simulationsergebnisse untersucht wurde. Die Ergebnisse bildeten die Grundlage für die weiteren Arbeiten.

Der verwendete Particle-In-Cell Code (PIC) FBPIC wurde im Laufe des Projektes erheblich erweitert und verbessert. So wurde eine neue Beschreibung für den Treiberlaserpuls implementiert, der die experimentelle Wirklichkeit sehr gut in der Simulation abbildet. Das Modul wurde als Open Source veröffentlicht.

In PIC.Simulationen beeinträchtigt oft das Auftreten der sogenannten Numerischen Cherenkov Strahlung die Genauigkeit der Simulationsergebnisse. Das Problem ist seit

längerem bekannt, wurde aber in der Vergangenheit nur teilweise gelöst. Im Rahmen des Vorhabens wurde ein neuartiges Konzept weiter vertieft und ausgearbeitet, welches die Numerische Cherenkov Strahlung durch eine elegante Formulierung der PIC-Gleichungen in einem mitbewegten Koordinatensystem vermeidet. Dadurch konnten sowohl eine dramatisch gesteigerte Ausführungsgeschwindigkeit des Codes, als auch wesentlich genauere Simulationsergebnisse erzielt werden.

Diese Möglichkeiten wurden in der Folge für umfangreiche Toleranz- und Parameterstudien genutzt.

Parallel zu den Simulationsarbeiten wurde auch eine Verbesserung der Laserpulsdiagnostik im Experiment weiterverfolgt. Nachdem zwischenzeitlich ein Diagnosegerät nach dem Prinzip der räumlich aufgelösten Fourier-Spektroskopie kommerziell erhältlich war, wurde auf eine Eigenentwicklung verzichtet. Ein entsprechendes Gerät wurde vom Verbundpartner DESY beschafft, und dem Projekt zur Verfügung gestellt. Durch diese Maßnahme konnte auch ein Pandemie-bedingter Zeitverlust teilweise ausgeglichen werden. Das Gerät wurde verwendet, um wichtige Subsysteme eines Hochleistungslasers zu charakterisieren und zu verbessern.

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

Die räumlich aufgelöste Fourier-Spektroskopie ist eine relative neue Methode zur Charakterisierung von Femtosekunden Laserpulsen. Konkret wurde sie in diesem Vorhaben erfolgreich benutzt, um die Ursachen von Störungen in der räumlichen und zeitlichen Struktur von Seedlaserpulsen eines Hochleistungslasers zu identifizieren, und letztlich auch zu beheben. Damit ist absehbar, dass die Methode auch in Zukunft dazu verwendet wird, die Leistungsfähigkeit moderner Hochleistungslaser zu verbessern.

Mit der Etablierung von modernen, sehr schnellen und präzisen PIC-Codes, und hier im Speziellen FBPIC, werden umfangreiche Toleranz- und Parameterstudien ermöglicht. Diese Tatsache stellt für das gesamte Feld der Laser-Plasma Beschleunigung einen wesentlichen Fortschritt dar. Damit werden auch in der Plasma-Beschleunigung Methoden etabliert, die in der modernen (Radiofrequenz) Beschleunigertechnologie seit langem gängige Praxis sind. Das Vorhaben hat erstmals solche Toleranz-Studien durchgeführt. Es konnte glaubhaft gezeigt werden, dass mit gezielten Rückkopplungsschleifen die Leistung eines Plasmabeschleunigers soweit stabilisiert und verbessert werden kann, dass erste Anwendungen in greifbare Nähe rücken werden. Eine experimentelle Demonstration dieser Konzepte ist derzeit in Vorbereitung.

Ursprünglich war eine enge Zusammenarbeit mit gemeinsamen Experimente im Rahmen des Verbundes zusammen mit den Partnern geplant. Pandemie-bedingt, vor allem aber durch Einschränkungen im Laborbetrieb und der Reisemöglichkeiten, konnten diese nicht wie ursprünglich geplant verfolgt werden.