

Zwischenbericht (Sachbericht)

<b>Förderinstrument:</b>	Postdoktorandenprogramm
<b>Impulsfonds-Förderkennzeichen:</b>	PD-303
<b>Projekttitle:</b>	Ultrawideband waveform synthesizer to study ultrafast magnetism
<b>Postdoktorand/in:</b>	Anne-Laure Calendron
<b>Helmholtz-Zentrum:</b>	DESY
<b>Berichtszeitraum (=Kalenderjahr!):</b>	01/2019-12/2019

**1) Arbeitsfortschritt / Meilensteine**

*Welche Fortschritte wurden im geplanten Arbeitsprogramm gemacht. Nehmen Sie explizit Bezug auf das im Antrag beschriebene Programm und die dort aufgeführten Meilensteine. Waren Abweichungen vom Programm notwendig?*

In 2019 wurden Fortschritte erzielt in Bezug auf Proben für die Experimente, den Wiederaufbau des starken Felds, die Quelle zur Erzeugung von Einzelzirkel-THz Strahlung und den Spin-Emitter.

Nach Ende meiner Elternzeit im März 2019 erhielt mein Team Zugang zu einem Titan-Saphir (Ti-Sa) Lasersystem der Firma *Coherent*, das extrem kurze Pulse von 30 Femtosekunden (fs) erzeugen kann. Zu Beginn war die Kontrollelektronik des Lasersystem und die Kühlung der eingebauten Kristalle fehlerhaft. Diese Probleme sind im Zeitraum von März bis Oktober identifiziert und teilweise gelöst worden. Im Oktober 2019 hat der Service-Ingenieur der Firma *Coherent* das System dann so umgebaut, dass es seitdem stabil läuft und wir es zuverlässig verwenden konnten. Vor Oktober konnten wir zwar die Experimente aufbauen, das Lasersystem lief allerdings instabil und ohne die notwendige Reproduzierbarkeit. Somit konnten die Experimente nicht final optimiert werden. Der Laser war Ende 2019 noch nicht vollständig repariert. Es ist geplant, dass die Reparatur so bald wie möglich durchgeführt wird.

Im Folgenden wird dargestellt welche Meilensteine eingehalten wurden und welche angepasst werden mussten (die Meilensteine, die letztes Jahr nach dem Projektende verschoben worden sind, sind entfernt worden: Farbcode: **rot: stark verspätet oder gestrichen**, **orange: Meilenstein später als gedacht erreicht oder am Laufen**, **grün: Meilenstein erreicht**.):

- **M2a: Messungen an monokristallinem FeBO<sub>3</sub>, mit 30 fs TiSa-getriebenen Setup: ~~31. Juli 2019~~ Ende Home-office + 4 Monate**  
 Zur Erzeugung der Einzelzyklus THz Pulse mit starken Feldern (M9a) wird hier ein Aufbau für geneigte Pulsfronten (Tilted-pulse-front (TPF) Setup) benötigt. Der Setup existierte auf einem anderen Ti-Sa System mit 150 fs-langen Pulsen und musste umgezogen und auf die 30 fs-langen Pulse angepasst werden. Der Wiederaufbau fand im März 2019 statt und die Anpassung des Aufbaus an dem neuen Lasersystem inklusive Optimierung war erst nach Oktober 2019 möglich. Dies wurde Ende Februar 2020 abgeschlossen.  
 Pulse mit einer Länge von 30 fs sind sehr kurz für die optische Entzerrung (Rectification) im TPF, und die Konversionseffizienz des im Ti-Sa erzeugten Nah-Infraroten Lichts zu einer THz Welle ist niedriger als mit längeren Pulsen. Wir haben trotzdem ~5µJ THz erzeugt.  
 Wir werden nach dem Home Office während der Coronakrise überprüfen, ob dies für die Anregung des FeBO<sub>3</sub> ausreichend ist, oder ob wir an der Fokussierung des THz noch arbeiten müssen.

In der Zwischenzeit sind Simulationen und Berechnungen des gemessenen MOKE Signal fortgeschritten.

- **M4: Laser angepasst: Meilenstein gestrichen**

Der Gruppenleiter Prof. Kärtner hatte Ende 2018 und Anfang 2019 vorgeschlagen, das ursprünglich für dieses Projekt geplante Lasersystem neu aufzubauen. Im März 2019 fiel die Entscheidung, dass ich, der Doktorand mit 2 anderen Gruppenmitgliedern (inklusive Projektleiter) parallel zu anderen Arbeiten am Neuaufbau arbeiten. Eine realistische Planung hat gezeigt, dass der Neuaufbau etwa 2,5 Jahre dauern würde, zuzüglich den THz und HHG („High Harmonic Generation“) Entwicklungen. Dies wäre zu lang für das vorliegende Projekt. Der Prototyp des Front-end dieses Systems ist veröffentlicht und auf Konferenzen vorgestellt worden.

- **M5: Interaktionskammer für Experimenten: 31. März 2019**

Die Kammer ist verfügbar und funktionsfähig. Wir haben jetzt auch eine Heizung der Proben vorgesehen und implementiert, um Temperatur abhängige Experimente durchzuführen.

- **M5a: weitere Tests und Automatisierung: 30. Juni 2019**

Die Automatisierung ist gemäß Zeitplan erfolgt.

- **M6: erstes THz-Anrege - HHG-Abfrage Experiment durchgeführt: verschoben nach Projekt-Ende**

Die Erzeugung von XUV-Strahlung mit dem 30 fs Ti-Sa Lasersystem wurde nochmals in Betracht gezogen. Es wäre möglich gewesen, die Hauptpulsenergie für die THz-Erzeugung zu behalten, und  $<0.5$  mJ für die Erzeugung der XUV Strahlung zu erhalten. Dabei würde allerdings die höchst erreichbare Photonenenergie nicht so hoch wie ursprünglich angestrebt werden, sondern wäre unter  $\sim 100$  eV begrenzt. Dies ist für unser Experiment trotzdem interessant, da die M- oder N-Kanten verschiedener Metalle unter 100 eV liegen.

- **M7: Identifizierung weiterer Proben und deren Herstellung: 31. Dezember 2019**

Anregung der antiferromagnetische Moden wie im  $\text{FeBO}_3$ : eine andere mögliche Probe ist YIG.

Spin Emitter Untersuchung: Die Gruppe von Prof. Röhlberger hat Proben mit Permallegierung sowie mithilfe Deposition unter schrägem Einfall („oblique incidence deposition“ Technik) erstellt. Eine antiferromagnetische Konfiguration ist auch hergestellt worden.

- **M8a: Messungen anderer Samples mit THz-pump-800nmProbe: bis Projektende**

- **M9a: mit 30fs-TiSa getriebenen pulse-front-tilt setup: 31. Mai 2019 Ende Februar 2020**

Aufgrund der Reparatur des Lasersystems, die im Oktober 2019 das System stabilisiert hat, waren die Optimierung und Anpassung des TPF Aufbaus erst Ende 2019 möglich. Dies wurde Ende Februar 2020 erreicht.

Die THz-Pulse werden durch elektro-optisches Abtasten aufgenommen. Für unsere Experimente ist allerdings notwendig das elektrische Feld der THz Pulse am Interaktionsort zu kennen, nicht am nur Detektionsort. Wir haben die schon veröffentlichte Dekonvolution der Messung erweitert und bei einer Konferenz vorgestellt.

- **M9b: Pulskompression und Spin-emitter-Setup: 30. September 2019 Ende Dezember 2019**

Auch aufgrund der Laserreparatur war dies zuverlässig erst Ende 2019 möglich. Der Aufbau zur Pulskompression liefert zuverlässig 20 fs lange Pulsen (obwohl der kommerzielle Laser eigentlich nur 40-45 fs lange Pulse am Ausgang liefert statt der geplanten 30 fs) und wir haben Spin-emitters Proben gemessen. Es hat sich heraus gestellt, dass wir die Spin-Emitter Proben nicht als Anregungspumpe verwenden können, da die Konversionseffizienz zu niedrig ist. Es wurden allerdings neue Erkenntnisse erlangt, da interessante Effekte gemessen werden konnten, wie eine Verschiebung der Träger-Einhüllenden-Phase des gestrahlten THz-Puls mit der Laserbestrahlung. Außerdem haben wir neue Spin-emitters Proben von Prof. Röhlberger Gruppe erhalten und untersucht.

Wir haben mit diesen Proben erfolgreich demonstriert, dass der Effect eines externen magnetischen Feldes durch die Anisotropie der Schichten in den Proben ersetzt werden kann. Die Antiferromagnetische Konfiguration ist ebenfalls sehr effizient. Wir haben erste Beobachtungen über das Verhalten der THz-Pulse und die experimentellen Bedingungen gemacht, die wir verfolgen und verstehen möchten.

- **M10: Strahlzeit bei FLASH oder European XFEL definieren und einreichen: Juni 2019**

Wir haben bis Juni 2019 Themen abgewägt und diskutiert, und letztendlich entschieden, keine Strahlzeit einzureichen, und uns auf die möglichen Experimenten mit dem 30 fs-Ti-Sa zu konzentrieren.

Für die Analyse der Messungen des  $\text{FeBO}_3$  und der Spin-Emitter Proben sind Materialparameter wie Brechungsindex und Absorption im THz Bereich gemessen worden. Eine tiefere Analyse dieser Messungen ist mit physikalischen Modellen möglich, die in der Gruppe von Dr. Peretti (Universität Lille) verfügbar sind. Eine Kollaboration mit dieser Gruppe ist nach einer Konferenz entstanden.

## 2) Finanz-/Zeitplan

*Können Sie Finanz- und Zeitplan einhalten oder sind Anpassungen notwendig?*

Der Umbau und die Anpassung des Aufbaus auf das 30 fs-Ti-Sa Lasersystem hat aufgrund technischer Probleme bis Ende 2019 / Anfang 2020 gedauert. Das Ti-Sa Lasersystem wird erst dieses Jahr vollständig repariert. Die Reparatur wird die Energie des Lasers erhöhen, und die Pulslänge von 45 fs auf nominal 30 fs reduzieren, und damit könnte XUV Strahlung erzeugt werden. Da das Projekt allerdings dieses Jahr endet, und der Aufbau einer HHG-Linie Monate dauert, müssen wir leider auf die THz-Anregung - XUV-Sondierung verzichten.

Wir werden uns auf den Abschluss der jetzigen laufenden Experimenten konzentrieren.

- Die Meilenstein M2 (Messungen von  $\text{FeBO}_3$  Sample) ist mit Messungen an Kristallen mit besserer Qualität ergänzt (M2a).
- Die Meilenstein M7 wird verlängert.
- Die Meilenstein M9 wird ergänzt: M9c konzentriert sich auf das Verständnis des Verhaltens der THz-Pulse, die von Spin Emitters erzeugt werden. Dafür werden Proben mit verschiedenen Parametern hergestellt und gemessen. Parallel dazu arbeiten wir an einer Makro-Modelierung der Spin-Emitter und daran, die Effekte zu verstehen. M9d wird mit niedrigerer Priorität weiter verfolgt, und betrifft die Verbesserung der Pulskompression mit dem Ziel einer Veröffentlichung.
- Die Meilenstein M10 betrifft die Charakterisierung der Materialien und Proben im THz Bereich.

Die Meilensteine sind wie folgt angepasst (alte Meilensteine werden nicht aufgeführt):

- M2a: Messungen an monokristallinem  $\text{FeBO}_3$ , mit 30 fs Ti-Sa-getriebenen TPF Aufbau: Ende Home-office wegen Corona-Pandemie + 4 Monate
- **M7: Identifizierung weiterer Proben und deren Herstellung: bis Projekt-Ende**
- M8a: Messungen anderer Proben mit THz-pump-800nm-Probe: bis Projektende
- M8b: Experimente mit THz-pump-EUV-Probe: nach Projektende
- M9a: mit 30 fs-Ti-Sa getriebenen TPF Aufbau: Ende Februar 2020
- M9c: Verständnis des Verhaltens der THz-Pulse erzeugt von Spin Emittlern (bis Projektende)
- M9d: Verbesserung der Pulskompression (bis Projektende)
- M10: Materialcharakterisierung (bis Projektende)

Der Doktorand Elias Kueny und ich haben an die European School on Magnetism im September 2019 teilgenommen. Dies wurde über das Projekt abgerechnet.

Die Finanzmittel sind Ende 2019 aufgebraucht worden - der Doktorand und ich werden jetzt über das Budget von Prof. Kärtner bezahlt. Es ist mir abgeraten worden, zusätzliche Finanzmittel wie „Eigene Stelle“ von der DFG einzuholen, um das Projekt zu beenden.

### 3) Publikationen / Preise

#### Journals:

- D. Zhang, M. Fakhari, H. Cankaya, A.-L. Calendron, N. H. Matlis, and F. X. Kärtner, "Cascaded Multicycle Terahertz-Driven Ultrafast Electron Acceleration and Manipulation," PRX, accepted (2020)
- D. Zhang, A. Fallahi, M. Hemmer, H. Ye, M. Fakhari, Y. Hua, H. Cankaya, A.-L. Calendron, L. E. Zapata, N. H. Matlis, and F. X. Kärtner, "Femtosecond phase control in high-field terahertz-driven ultrafast electron sources," *Optica* **6**, 872-877 (2019)
- G. Cirmi, H. Çankaya, P. Krogen, A.-L. Calendron, Y. Hua, B. Debord, F. Gérôme, F. Benabid, and F. X. Kärtner, "Novel method for the angular chirp compensation of passively CEP-stable few-cycle pulses," *Opt. Express* **28**, 3171-3178 (2020)
- S. W. Jolly, N. H. Matlis, F. Ahr, V. Leroux, T. Eichner, A.-L. Calendron, H. Ishizuki, T. Taira, F. X. Kärtner, and A. R. Maier, « Spectral phase control of interfering chirped pulses for high-energy narrowband terahertz generation, » *Nat Commun* **10**, 2591 (2019)

#### Konferenzen:

- F. X. Kärtner, D. Zhang, M. Hemmer, M. Fakhari, Y. Hua, H. Cankaya, A.-L. Calendron, X. Wu, L. E. Zapata, and M. H. Matlis, "Compact terahertz driven electron and X-ray sources," Proc. SPIE 11270, *Frontiers in Ultrafast Optics: Biomedical, Scientific, and Industrial Applications XX*, 1127002 (2020)
- A.-L. Calendron, E. Kueny, S. Velten, L. Bocklage, R. Röhlberger, and F. X. Kärtner, "Strong-field THz source for magneto-optic experiment," in *International Photonics and OptoElectronics Meeting 2019 (OFDA, OEDI, ISST, PE, LST, TSA)*, OSA Technical Digest, paper TW2F.2 (2019)
- F. X. Kärtner, D. Zhang, M. Fakhari, Y. Hua, H. Cankaya, A.-L. Calendron, L. Zapata, and N. H. Matlis, "Terahertz Acceleration," in *International Photonics and OptoElectronics Meeting 2019 (OFDA, OEDI, ISST, PE, LST, TSA)*, OSA Technical Digest, paper TW5B.1 (2019)
- A.-L. Calendron, E. Kueny, L. Song, G. Cirmi, L. Bocklage, F. X. Kärtner, and R. Röhlberger, « Excitation and control of spin waves in FeBO<sub>3</sub> by a strong-field THz pulse, » EPJ Web Conf. 205 07008 (2019)
- D. Zhang, A. Fallahi, M. Hemmer, X. Wu, M. Fakhari, Y. Hua, H. Cankaya, A.-L. Calendron, L. E. Zapata, N. H. Matlis and F. X. Kärtner, « Segmented Terahertz device for ultrashort electron acceleration, compression, focusing and streaking, » EPJ Web Conf., 205 01013 (2019)
- E. Kueny, A.-L. Calendron, and F. X. Kärtner, "Electro-Optic Sampling of Terahertz Pulses in Multilayer Crystals," in *Laser Congress 2019 (ASSL, LAC, LS&C)*, OSA Technical Digest, paper JTU3A.16 (2019)
- G. Cirmi, H. Çankaya, P. Krogen, A. Calendron, Y. Hua, B. Debord, F. Gérôme, F. Benabid, and F. X. Kärtner, "Novel method for CEP-stable seeding of few-cycle OPCPAs," in *Laser Congress 2019 (ASSL, LAC, LS&C)*, OSA Technical Digest, paper AM2A.3 (2019)
- M. Hemmer, H. Olgun, U. Demirbas, Y. Hua, A.-L. Calendron, H. Çankaya, and F. Kärtner, "Efficient Extraction From a Multi-Pass Yb:YAG Amplifier Via Multi-Pulse Amplification," in *2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference*, OSA Technical Digest, paper ca\_9\_1 (2019)
- E. Kueny, A.-L. Calendron, and F. X. Kärtner, "Electro-Optic Sampling of Terahertz Pulses in Multilayer Crystals," in *Laser Congress 2019 (ASSL, LAC, LS&C)*, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2019), paper JTU3A.16 (2019)
- F. X. Kärtner, D. Zhang, M. Fakhari, Y. Hua, H. Cankaya, A.-L. Calendron, L. Zapata, and N. H. Matlis, "Terahertz Acceleration," in *International Photonics and OptoElectronics Meeting 2019 (OFDA, OEDI, ISST, PE, LST, TSA)*, OSA Technical Digest, paper TW5B.1 (2019)
- F. X. Kärtner, D. Zhang, A. Fallahi, M. Hemmer, M. Fakhari, Y. Hua, H. Cankaya, A.-L. Calendron, X. Wu, L. E. Zapata, N. H. Matlis, "Terahertz generation and acceleration," Proc. SPIE 10917, *Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications XII*, 109170I (2019)
- L. E. Zapata, S. Schweisthal, J. Thesinga, C. Zapata, M. Schust, L. Yizhou, A.-L. Calendron, M. Pergament, and F. X. Kaertner, "Joule-class 500 Hz cryogenic Yb:YAG Chirped Pulse

Amplifier," in *2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference*, OSA Technical Digest, paper ca\_8\_1 (2019)

- D. Zhang, A. Fallahi, M. Hemmer, H. Ye, M. Fakhari, Y. Hua, H. Cankaya, A.-L. Calendron, L. E. Zapata, N. H. Matlis, F. X. Kärtner, „Energy Spread And Emittance Control In Segmented High Field Terahertz Driven Electron Accelerators,“ 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), INTSOCIMTW-THz2019-4432612 (2019)
- F. X. Kärtner, D. Zhang, A. Fallahi, M. Fakhari, H. Cankaya, A.-L. Calendron, F. Ahr, K. Ravi, S. Jolly, V. Leroux, T. Eichner, H. Ishizuki, T. Taira, A. Maier and N. H. Matlis, « THz Acceleration for Compact Electron & X-ray Sources », Conference on Optical Terahertz Science and Technology, March 2019