

Teil 1: Zusammenfassender Bericht

Ursprüngliche Aufgabe: Entwicklung eines Infrarotlasers (IR) mit hoher Durchschnittsleistung und den dazugehörigen optischen Technologien zur Herstellung eines Prototyps einer brillanten, ultrakurz gepulsten Quelle für weiche Röntgenstrahlung (SXR). Diese Quelle soll einen primären kurzwelligen IR-Laser (SWIR) und eine sekundäre SXR-Quelle umfassen. Sowohl die einzelnen Lichtquellen als auch deren Kombination sollen als drei miteinander verbundene Produkte vermarktet werden. Diese Systeme sollen basierend auf modernen, kommerziell erhältlichen Pump Lasern mit hoher Energie, hoher Wiederholrate (typischerweise 400-500 W, 10 mJ, 50 kHz) und ps-Pulsdauer aufgebaut werden. Ziel ist dabei, den Photonenfluss und die Energiegrenzen der lasergetriebenen Erzeugung höherer Harmonischer (HHG, für High Harmonic Generation) in Gasen zu erhöhen. Das Projekt soll durch die Weiterentwicklung der einzigartigen Carrier-Envelope-Phase (CEP)-stabilen Optical Parametric Chirped Pulse Amplification (OPCPA)-Lasertechnologien (Fastlite, FL), der High-End-HHG-Sekundärquellen (Ultrafast Innovations, UFI) und der bestehenden Hochleistungs-Pump Laser- und Laborinfrastrukturen (HZB) erreicht werden. Die erwarteten Projektergebnisse sind charakterisierte, brillante, kohärente, ultraschnelle SWIR- und SXR-Quellen, einschließlich: 1) SWIR-OPCPA-Laserleistungsverstärker und HHG-Sekundärquellentechnologien, die gemeinsam von HZB-FL bzw. HZB-UFI entwickelt wurden. 2) Ein Prototyp einer energiereichen SWIR-OPCPA-Laserquelle mit hohem Fluss, fs-Pulsdauer und CEP-Stabilität, gepumpt durch einen kommerziellen Ytterbium-basierten ps-Laser mit hoher Durchschnittsleistung und hoher Wiederholrate (>400 W, >50 kHz). 3) Ein Prototyp einer sekundären HHG-Quelle im SXR-Bereich, mit zugehöriger Diagnostik, die auf die angestrebte SWIR-OPCPA-Laserleistung ausgelegt ist. 4) Die Kombination von (2) und (3), die eine vollständige fs-Puls-SXR-Quelle mit hohem Fluss und hoher Photonenenergie darstellt. 5) Vollständige Charakterisierungsdaten für die typische Leistung von (2), die von FL und UFI für gemeinsame Verkaufs- und Marketingzwecke verwendet werden sollen. 6) Vollständige Charakterisierungsdaten einer optimierten Version von (3) in Verbindung mit (2), die von FL und UFI für gemeinsame Vertriebs- und Marketingzwecke verwendet werden sollen.

Wissenschaftlicher und technischer Status Quo bei Projektbeginn: Vor Projektbeginn wurden Ultrakurzpuls-SWIR-Laser mit Gasphasen-HHG-Quellen implementiert, um SXR-Quellen im Wasserfenster (284 - 543 eV) zu erzeugen. Diese HHG-basierten SXR-Quellen wurden generell basierend auf etablierten Titan:Saphir-, fs-Pulsverstärker- und zugehörigen optisch-parametrischen Verstärker-Lasersystemen betrieben. Die Leistung solcher Lasersysteme ist jedoch auf wenige Watt Durchschnittsleistung und Wiederholraten von wenigen kHz begrenzt, was wiederum den erreichbaren SXR-Fluss, die damit verbundenen Datenerfassungsraten und somit ihre Nützlichkeit einschränkt. SWIR-OPCPA-Systeme wurden ebenfalls entwickelt, waren aber durch die vorherrschenden Pump Lasertechnologien auf ähnliche Durchschnittsleistungen und Wiederholraten beschränkt.

Verlauf des Projekts: Allgemeine Projektbesprechungen fanden halbjährlich statt, der fachliche Austausch zwischen den Partnern erfolgte häufiger und nach Bedarf. HZB und FL passten die Laserentwicklungsarbeiten zu Projektbeginn an; Zusätzliche SWIR-Laser-Frontend-Montageaufgaben wurden dem HZB zugewiesen (+3 Monate aufgabenspezifische Verzögerung), und die Bestellung des Lasergehäuses wurde bis zur Fertigstellung des detaillierten Laserdesigns verschoben. Alle Partner stimmten zu, den HZB-Pump Laser aufzurüsten, um seine Stabilität und Zuverlässigkeit zu verbessern (+2 Monate). Danach verzögerte die COVID-19-Pandemie das Projekt: Die Abschaltung und der anschließende Teilbetrieb an den Partnerstandorten verlangsamten die Fertigstellung der Laser- und Gehäusekonstruktion (+3 Monate), die Unterbrechung der weltweiten Lieferkette führte zu höheren Komponentenkosten und längeren Lieferzeiten (+4 Monate). Des Weiteren verzögerten Reisebeschränkungen die Arbeiten am HZB-Pumpenlaser. Dennoch konnte im Jahr 2020 das Lasergehäuse installiert und die erste Generation von Röntgenzellen fertiggestellt werden, die erfolgreich über 5 bar getestet wurden. Die zusätzlich geplanten HZB-Arbeiten, pandemiebedingte Einschränkungen und neue

Abhängigkeiten zwischen den Projektkomponenten führten aufgrund von ergriffenen Maßnahmen in 2020 lediglich zu einer kumulativen Projektverzögerung von fünf Monaten.

Corona-bedingt konnte der Hersteller des Pumpasers die Aufrüstungsarbeiten am HZB nicht innerhalb des Jahres 2020 abschließen, so dass zusätzliche Optimierungsarbeiten Anfang 2021 (+2 Monate) an das HZB übertragen wurden. Danach bauten HZB-Mitarbeiter unter pandemischen Einschränkungen die erste SWIR-Laserhälfte mit Fernunterstützung von FL (+2 Monate). Das Frontend-System wurde gemeinsam optimiert und charakterisiert. Basierend auf den von UFI zur Verfügung gestellten Vakuumkammer und Gaszellen bauten HZB-Mitarbeiter die Strahlführung für die SXR-Erzeugung auf. Anschließend wurde der nächste Satz von Gaszellen erfolgreich mit der ersten SWIR-Laserhälfte bei Drücken oberhalb von 10 bar getestet, wobei SXR-Energien von bis zu ~ 190 eV erzeugt wurden. Die Integration und Erprobung der Hochleistungs-SWIR-Laserkomponenten wurden im Jahr 2021 fortgesetzt. Im Jahr 2021 wurden trotz der anhaltenden Pandemie-Beschränkungen und zusätzlicher zweimonatiger Laser-Upgrade-Arbeiten die Teile des Hochleistungslasersystems am HZB integriert, die meisten Laserbauarbeiten abgeschlossen und die ersten SXRs erzeugt, wenn auch mit einer kumulativen neunmonatigen Projektverzögerung.

Ende 2021 wurde der Bedarf für eine stickstoffgespülte Transportleitung für den Hochleistungs-SWIR-Strahl identifiziert, die 2022 (+2 Monate) zusätzlich vom HZB konzipiert und umgesetzt wurde. Die Komponenten des FL- und HZB-Hochleistungslaserentwicklungs- und Charakterisierungsprojekts wurden ebenfalls fortgeführt, verzögerten sich aber weiter durch COVID-Infektionen und die Beobachtung, dass das Design des Hochleistungslasers geändert werden muss, was zusätzliche Komponentenbestellungen mit verlängerten Lieferzeiten erforderte (+3 Monate). Bei zwei weiteren gemeinsamen Testkampagnen wurde eine weltweit einzigartige Laserleistung (~ 39 W, $2,1 \mu\text{m}$, $52,6$ kHz, komprimierbar auf <25 fs) erreicht. Auftretende Transportverluste bei diesen hohen Leistungen bedingten eine weitere Neukonfiguration des Lasers, die Bestellung von Optiken und deren Integration (+2 Monate). Die kumulative Projektverzögerung wurde um drei Monate verringert, indem der Schwerpunkt vorübergehend auf die Integration des Lasers und der Röntgenquelle gelegt wurde, einschließlich des stickstoffgespülten SWIR-Transportleitung, und weiterer Tests zur Erzeugung von Röntgenstrahlen bei einem Druck von über 20 bar. Danach wurde der SWIR-Laser neu konfiguriert, was zur Realisierung des bisher leistungsstärksten (>30 W), zeitlich komprimierten und mit wenigen optischen Zyklen (24 fs FWHM oder $3,4$ Zyklen) arbeitenden, CEP-stabilen SWIR-Laser ($2,1 \mu\text{m}$) führte. Anschließend wurden die letzten Laser-Röntgenquellen-Integrations- und Optimierungsaufgaben angegangen. Ohne eine Neukonfiguration des Pumpasers, eine Überarbeitung des SWIR-Lasers und den Einsatz alternativer optischer Technologien für den SWIR-Laser war es aber nicht möglich, die Bedingungen für die SXR-Erzeugung vor dem Projektende zu optimieren, das im Februar 2023 mit einer kumulativen Projektverzögerung von 14 Monaten erreicht wurde.

Wichtigste Ergebnisse & Zusammenarbeit: Am Ende des Projekts waren die wichtigsten Ergebnisse: a) Mit FL die gemeinsame Entwicklung und Charakterisierung des bisher leistungsstärksten, CEP-stabilen SWIR-Lasersystems ($2,1 \mu\text{m}$) mit wenigen optischen Zyklen, das 33 W, 24 fs zeitlich komprimierte Pulse bei einer Wiederholrate von $52,6$ kHz liefert. b) Die Herstellung eines modularen, gasgespülten (oder evakuierbaren) SWIR-Strahlführungssystems zum Transport der SWIR-Hochleistungspulse an die sekundäre SXR-Quelle. c) Zusammen mit der UFI-Herstellung und Test eines Prototyps einer HHG-Gasphasen-SXR-Quelle und eines Vakuumaufbaus, die nachweislich mit einem SXR-Gasdruck von mehr als 20 bar arbeiten und breitbandige Röntgenpulse mit einer Photonenenergie von derzeit bis zu 190 eV in Ar erzeugen können. d) Bau und Test einer SXR-Vakuum-Strahlführung zur Optimierung und Charakterisierung der entwickelten HHG-basierten SXR-Quelle im Spektralbereich von 20 bis 600 eV. Diese Ergebnisse entsprechen der Erreichung der Projektziele (1)-(5). An der Vollendung von Ziel (6) arbeiten HZB und UFI derzeit, nach dem offiziellen Projektende.

Schlussbericht zum Vorhaben
„Laser & Soft-Röntgenquellen Design & Charakterisierung“

im Rahmen des Eurostars Projekts
E! 113566 Akronym
„CURE“

Dr. Iain Wilkinson

Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH (HZB)
Hahn-Meitner-Platz 1
14109 Berlin

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

Förderkennzeichen: 01QE1933C
Projektlaufzeit: 01.01.2020 – 28.02.2023

Überblick:

Das CURE-Projekt sollte ein internationales industrielles und akademisches Team zusammenbringen, um den bisher leistungsstärksten, trägerumhüllungsphasenstabilen (CEP-stabilen) Kurzwellen-Infrarotlaser (SWIR) mit wenigen optischen Zyklen zu bauen und zu vermarkten und ihn mit einer maßgeschneiderten sekundären Ultrakurzpuls-Soft-Ray-Quelle (SXR) mit hohem Lichtstrom zu kombinieren. Leider verhinderte die COVID-19-Pandemie die ursprünglich vorgesehene Integration der Partnerteams und beeinträchtigte das rechtzeitige Erreichen der Projektziele. Nationale und internationale Arbeits- und Komponentenlieferketten wurden durch die Pandemie unterbrochen, wodurch sich der Zeit- und Kostenaufwand zur Erreichung der Projektziele verlängerte. Teilweise unerwartete thermische und nichtlineare Probleme bei der Ausbreitung von SWIR-Lasern traten auch nach dem Erreichen von beispiellos hohen durchschnittlichen Leistungen bei ultrakurzen Impulsen auf, was zu einer verlängerten Laserentwicklungszeit führte. Dementsprechend wurde das Projekt um 14 Monate vor dem Ende der Projektlaufzeit überschritten, wobei zwei Projektmeilensteine (M17 und M18) und -ergebnisse (D7 und D10) noch zu erreichen waren. Über das Projektende hinaus werden diese ursprünglichen Projektziele von den Projektpartnern auf eigene Kosten weiterverfolgt, wobei die Kommerzialisierung einer Ultrakurzpuls-Tischquelle für weiche Röntgenstrahlung mit hohem Lichtstrom angestrebt wird.

Trotz der oben genannten Herausforderungen hat das Projekt bei der Entwicklung des SWIR-Lasers Ergebnisse von Weltrang erbracht. Der entwickelte Laser ist unseres Wissens immer noch das zweitstärkste CEP-stabile System mit wenigen optischen Zyklen weltweit, wobei derzeit weitere Verbesserungen angestrebt werden. Basierend auf der gleichzeitigen Entwicklung der SXR-Infrastruktur für die hochharmonische Erzeugung (HHG) wird erwartet, dass die Entwicklungen des CURE-Projekts innerhalb des nächsten Jahres zu einer wirkungsvollen und nützlichen Quelle für weiche Röntgenstrahlung führen werden.

Projektarbeit, Notwendigkeit, Angemessenheit und Zeitplan:

Der endgültige Zeitplan des Projekts, die Arbeitspakete (AP), Meilensteine (MX) und Ergebnisse (DX) sind in Abbildung 1 zusammengefasst.

Allgemeine Projekttreffen fanden alle sechs Monate statt, wobei der technische Austausch zwischen den Partnern häufiger und nach Bedarf erfolgte. Das erste Projekttreffen ("Kickoff") fand im Januar 2020 in Antibes (Fastlite, FL, Räumlichkeiten) statt (Punkt 3.1 in Tabelle 1). Aufgrund des Ausbruchs von COVID-19 und der Einschränkungen ab März 2020 fanden die folgenden Treffen der Projektpartner über die Videokonferenzsoftware Zoom statt. Während der 38-monatigen Projektlaufzeit umfassten die Aufgaben des Projektmanagements (Arbeitspaket (AP) 1) 2,9 Monate (Punkte 1.3, 1.4, 1.6), wobei 1,9 Monate auf Fach- und Fortschrittsbesprechungen mit lokalen HZB- und externen Partnern entfielen und ein Monat auf die Projektberichterstattung.

Zu Beginn des Projekts wurde der AP2-Arbeitsplan von FL und HZB angepasst, nachdem festgestellt wurde, dass die Einhausung des Antriebslasers nicht am FL untergebracht werden kann; die Pump- und OPCPA-Lasersysteme des HZB sind in einem temperaturgeregelten und wärmebelastungsbegrenzten ISO5-Reinraum eingeschlossen, um einen langfristig stabilen Betrieb der Hochleistungslasersysteme zu ermöglichen. Ein kompatibles, monolithisches, wassergekühltes, gasgespültes und reinraumtaugliches OPCPA-Lasergehäuse wurde entsprechend konstruiert und am HZB bestellt (neues AP2.2.1), zu HZB-Kosten. Da jedoch die HZB-Laborreinraumbedingungen nicht erfüllt werden konnten und das Gehäusengewicht am FL nicht handhabbar war, wurden das Gehäuse und alle laserfrontseitigen Teile an das HZB geschickt (neues AP2.3.2). Die Reinigung aller Laserteile und des Gehäuses sowie die Montage des SWIR-Laser-Frontends im Gehäuse auf dem Gelände des HZB wurde dann von Mitarbeitern des HZB übernommen. Dies führte zur Schaffung des neuen AP2.2.2. Außerdem wurden zwei zusätzliche Monate für den Bau und die Dokumentation des Lasers durch FL in AP2.4 und drei Monate für den Bau des Lasers durch das HZB in AP2.5 veranschlagt, wobei eine Fernbetreuung durch FL vorgesehen war. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass das Design des Lasergehäuses nicht abgeschlossen werden konnte, bevor die Hochleistungselemente des Laserdesigns fertiggestellt

waren, was zu einer Kopplung von AP2.1 und dem neu definierten AP2.2.1 und einer viermonatigen Verzögerung bei der Lieferung des Lasergehäuses an das HZB anstelle von FL führte.

Die ursprünglichen AP2-Teilaufgaben - AP2.1, 2.2, 2.3, 2.4 und 2.5 - wurden entsprechend modifiziert, um neue Teilaufgaben aufzunehmen - sie wurden zu AP2.2.1, 2.2.2, 2.3.1, 2.3.2, 2.4 und 2.5 -, ohne den Gesamtverfügbarkeitszeitplan für den Antriebslaser nominell zu beeinflussen. Beim Kick-off-Meeting des Projekts einigten sich die Partner außerdem darauf, dass der HZB-Pumplaser aufgerüstet (neues AP2.6) und die Ausrichtung stabilisiert werden sollte (neues AP2.7). Zu diesem Zeitpunkt war das HZB-Pumplasersystem auf einen spektral breitbandigen Titan:Saphir-Oszillatorlaser angewiesen, um die gesamte Hochleistungs-Pumplaser-Verstärkungskette anzutreiben, wobei sich der Oszillator in den vergangenen sechs Monaten als so leistungsfähig erwiesen hatte, dass der gesamte Laser nur 60 % der Zeit in Betrieb war. Dies wurde als unvereinbar mit dem Erfolg des Projekts angesehen. Die Arbeiten zur Aufrüstung des Pumplasers wurden daher auf Kosten des HZB durchgeführt und umfassten weitere zwei Monate Arbeit am HZB (neues AP2.6). Um die Stabilität des Hochleistungs-Pumplasersystems weiter zu erhöhen, einigten sich FL und HZB darauf, die Pumplaserleistung aktiv zu stabilisieren (AP2.7), bevor der zu entwickelnde SWIR-Laser zum Einsatz kommt, was weitere Wochen Arbeit für FL und HZB bedeutet.

Im Jahr 2020 wurden die ersten HZB-Laserspezifikationen wie geplant an FL geliefert (AP2.2.1; M1a). Auch ein Inkorporationsprotokoll wurde wie geplant für die Hochleistungslaseranlage am HZB erstellt (AP2.2.1; M4). Danach verzögerten die COVID-19-Pandemie und die damit verbundenen Arbeits- und Reisebeschränkungen die ersten HZB-Projektelemente in mehrfacher Hinsicht. Erstens verlangsamte die pandemiebedingte Abschaltung und der anschließende Teilbetrieb an den Partnerstandorten die Fertigstellung der Laser- (AP2.1) und Gehäusekonzepte (AP2.2.1) um drei Monate. In der Folge führte die Unterbrechung der globalen Lieferketten zu einem erheblichen Anstieg der Komponentenkosten und der Vorlaufzeiten für die Komponenten, was zu einer viermonatigen Verzögerung bei der Lieferung des Lasergehäuses bis Dezember führte (+4 Monate AP2.2.2, aufgabenspezifische Verzögerung, wie im Folgenden in Klammern angegeben). In der Zwischenzeit wurde unter Verwendung der bestehenden HZB-OPCPA-Laser- und HHG-Kammersysteme im Nahinfrarotbereich und eines von UFI bereitgestellten Spektrometers das erste Design der Röntgengeneratorzelle wie geplant erfolgreich bis zu einem Druck von 5 bar getestet (AP4.5; M7). Dies ermöglichte die Erzeugung von niederenergetischem SXR bis zu ~ 150 eV in He-Gas und die anfängliche Entwicklung der diagnostischen Strahlführung für weiche Röntgenstrahlung.

Das Design der nächsten Röntgenzellengeneration wurde dann wie geplant mit UFI diskutiert und fertiggestellt (AP4.6). In der zweiten Jahreshälfte 2020 wurden die Arbeiten zur Aufrüstung des HZB-Pumpenlasers durch den Laserhersteller aufgrund von pandemiebedingten Liefer- und Reisebeschränkungen für Komponenten mehrfach verzögert. Die damit verbundenen Arbeiten begannen mit dreimonatiger Verspätung im November und dauerten bis zum Ende des Jahres (AP2.6). Im Dezember wurde das Gehäuse des Hochleistungslasers geliefert und am HZB installiert (+6 Monate gegenüber dem ursprünglichen Plan, aber im Einklang mit dem ursprünglich revidierten Zeitplan für AP2, AP2.2.2; D1). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass trotz der Verzögerungen im Jahr 2020 das Design und der Installationsplan für die Laserkabine (AP2.2.1; M4, M3) und das anfängliche Design der Röntgenstrahlenerzeugungszelle (AP4.1, 4.2; M7) fertiggestellt wurden. Erstere wurde installiert (AP2.2.2; D1) und letztere wurde erfolgreich über 5 bar hinaus getestet (AP4.5, M9), was zur Konstruktion des nächsten Zellenprototyps (AP4.6) und der nächsten Version der projektspezifischen Strahlführung für die Diagnostik mit weichen Röntgenstrahlen (AP4, 6) führte. Die Projektverzögerungen wurden genutzt, um die Entwicklung des Hochleistungslasers über das ganze Jahr hinweg fortzusetzen, so dass mehrere verschiedene optische Konzepte erforscht werden konnten (AP2.1). Durch die zusätzlichen, sequenziellen Arbeiten des HZB, pandemiebedingte Verzögerungen und die Abhängigkeit des AP2.1 von der Fertigstellung des AP2.2.1 und des AP2.5 von der Fertigstellung des AP2.2.2 hatte sich jedoch eine fünfmonatige Projektverzögerung angesammelt. Um die Auswirkungen der Projektverzögerungen zu reduzieren und die verbleibende Projektarbeit zu unterstützen, hat das HZB Ende 2020 zugesagt, weitere 80 T€ aus eigenen Mitteln in das Projekt zu investieren, insbesondere um zusätzliche Postdocs in den AP3, 4 und 6 zu finanzieren.

Nachdem der Hersteller des Pumplasers im Jahr 2021 nicht in der Lage war, die geplanten Aufrüstungsarbeiten innerhalb des Jahres 2020 abzuschließen, wurden zusätzliche zwei Monate Optimierungsarbeiten an das HZB übertragen (+5 Monate, AP2.6), wodurch sich die Verfügbarkeit des Pumplasers bis Ende Februar 2021 verzögerte (dann wurde M1b erfüllt). Ein teilweise überarbeiteter Satz von HZB-Pumplaserspezifikationen wurde dann FL zur Verfügung gestellt, das das Design des Hochleistungs-SWIR-Lasers 11 Monate später als ursprünglich geplant fertigstellte (AP2.1), ohne dass dies Auswirkungen auf den Gesamtprojektplan hatte. Danach installierten HZB-Mitarbeiter unter pandemiebedingten Arbeitseinschränkungen am HZB das System zur Stabilisierung der Laserausrichtung (+2 Monate, AP2.7) und bauten das Laser-Frontend über vier Monate mit Fernunterstützung von FL (AP2.4, 2.5). Das Front-End-System wurde dann mit Vor-Ort-Unterstützung von FL am HZB im Mai und Juli mit einer zusätzlichen zweimonatigen Verzögerung optimiert und charakterisiert (+7 Monate, AP2.4, 2.5). Parallel dazu wurde im Jahr 2021 eine zweite Iteration der Strahlführung für die Erzeugung weicher Röntgenstrahlung durch technisches Personal des HZB aufgebaut, basierend auf den vom UFI zur Verfügung gestellten Erzeugungszellen und der zugehörigen Vakuumkammer. Anschließend wurde im August/September die nächste Generation von Röntgenzellen mit dem zusammengebauten SWIR-Laser-Frontend erfolgreich bei Drücken jenseits von 10 bar getestet (+7 Monate, AP4.9; M11), wobei weiche Röntgenpulse bis zu ~190 eV erzeugt wurden, was zur Konstruktion des Prototyps der nächsten Röntgengeneration führte (+7 Monate, 4.10). Danach, mit einem weiteren Monat Verzögerung im Oktober, begannen die Integration und das Testen der Hochleistungs-SWIR-Laserkomponenten (AP3.1), die bis zum Ende des Jahres andauerten. Trotz der anhaltenden Arbeits-, Reise- und Lieferkettenbeschränkungen und zusätzlicher zweimonatiger Laseraufrüstungsarbeiten wurden das Gehäuse und die Optik des Hochleistungslasersystems am HZB integriert (AP2.5, 2.4), die meisten Laserbauarbeiten (AP2.4, 3. 1) abgeschlossen, und im Jahr 2021 wurde weiche Röntgenstrahlung mit höherer Energie erzeugt (AP4.9), wenn auch mit einer kumulierten Verzögerung von acht Monaten und, basierend auf der Identifizierung zusätzlicher AP6-Aufgaben (siehe unten) gegen Ende des Jahres, der Erwartung, dass sich diese Verzögerung auf 11 Monate im Jahr 2022 erhöhen würde.

Im letzten Quartal 2021 wurde festgestellt, dass am HZB stickstoffgespülte oder evakuierte Transportleitungen entworfen, installiert und implementiert werden müssen, um die erzeugten Hochleistungs-SWIR-Laserstrahlen zu den Zellen für die Erzeugung weicher Röntgenstrahlung zu leiten und schädliche Strahlenausbreitungsprobleme in der Luft zu vermeiden. Dies führte zu zusätzlichen zwei bis drei Monaten an Entwurfs- und Installationsarbeiten für das HZB im Jahr 2022 (AP6.1) und einer kumulativen Projektverzögerung von 11 Monaten. Die Projektkomponenten Hochleistungslaserentwicklung und -charakterisierung (AP3.1 bzw. 3.2) wurden 2022 fortgesetzt, verzögerten sich aber weiter, wobei sich ersteres um einen Monat verzögerte, als sich wichtige FL-Mitarbeiter kurz vor dem Start einer geplanten gemeinsamen experimentellen Kampagne am HZB im Februar mit COVID infizierten. Während der neu angesetzten Kampagne stellte sich heraus, dass der ursprüngliche Laserentwurf geändert werden musste, was die Bestellung zusätzlicher Komponenten mit einer Vorlaufzeit von bis zu drei Monaten und einen weiteren Monat Arbeit in AP3 erforderte. Während zweier weiterer gemeinsamer Testkampagnen wurde eine weltweit führende Laserleistung (~39 W, 2,1 μm , <25 fs, 52,6 kHz) erreicht. Nach dem letzten Verstärker wurden jedoch unerwartet hohe Strahltransportverluste festgestellt, die eine weitere Neukonfiguration des Lasers, die Bestellung optischer Komponenten und eine erneute Charakterisierung des Lasers erforderlich machten.

Dies führte zu zwei weiteren Monaten Verzögerung und einem Monat zusätzlicher Arbeit in AP3.2, was einer sechsmonatigen Verzögerung von 2022 bis zum Abschluss von AP3 entspricht (+14 Monate, AP3.1; +16 Monate, AP3.2). Weitere Verzögerungen konnten jedoch durch die Verlagerung des HZB-Projektschwerpunkts auf AP4.13 und AP6.1 während der COVID- und komponentenbedingten Verzögerungen bei der Fertigstellung von AP3 abgefedert werden. Das SWIR-Strahltransfersystem wurde zwischen April und Juni erfolgreich installiert (6.1), eine größere HHG-Kammer wurde von UFI zur Verfügung gestellt und vom HZB installiert (AP4, 6), die Pumpleitungen für die SXR-Strahllinie wurden auf größere Durchmesser aufgerüstet, um die Gaspumpgeschwindigkeiten zu verbessern (AP6.1), und die Röntgengeneratorzellen der nächsten Generation wurden im Juni und Juli mit einem

Druck von mehr als 20 bar getestet, wodurch AP4 im Wesentlichen abgeschlossen wurde (+12 Monate, AP4.13; M13, M14, D7 konnten erst nach Abschluss von AP3 in Angriff genommen werden). SWIR-Dünnschichtfilter mit höherer Wärmeleitfähigkeit wurden installiert (AP6.1), die SXR-Strahllinie wurde erweitert, um die Intensität des Hochleistungs-SWIR-Strahls auf den Dünnschichtfiltern zu minimieren (AP6.1), und die Ausrichtung des Spektrometers wurde gedreht, um die SXR-Beugungseffizienz und die Nachweisgrenze zu verbessern (AP6.2). Im September/Okttober wurde das SWIR-Lasersystem umkonfiguriert, um AP3 (M6) abzuschließen. Das Ergebnis ist der SWIR-Laser (2,1 μm) mit der höchsten Durchschnittsleistung (>40 W) und wenigen optischen Zyklen (24 fs FWHM oder 3,4 Zyklen). Anschließend konzentrierte sich das HZB auf die verbleibenden AP6-Aufgaben bis zum Ende des Jahres. Durch die Umstrukturierung des Projekts war es möglich, die bis zu sechsmonatiger Verzögerung von AP3 und die zusätzlichen zwei Monate der AP6-Aufgaben und die damit verbundenen Verzögerungen abzumildern, was zu einer kumulativen Projektverzögerung von 14 Monaten führte.

In den ersten beiden Monaten des Jahres 2023 wurden weitere Anstrengungen unternommen, um AP6 abzuschließen. Die außerordentlich hohe Leistung des entwickelten SWIR-OPCPA-Lasersystems (bis zu 44 W) führte jedoch zu weiteren technischen Herausforderungen bei der zeitlichen Kompression des Lasers, der effizienten SWIR-Strahlführung zu den Röntgengeneratorzellen und der nachhaltigen Erzeugung weicher Röntgenstrahlung. Die implementierte Optik mit variabler Strahldämpfung und die Chirp-Spiegel-Zeitkompressor-Baugruppe wiesen weiterhin höhere Verluste auf als erwartet, insbesondere bei hohen Durchschnittsleistungen. Auch bei der Zuführung des Hochleistungs-SWIR-Strahls zu den Röntgenstrahl-Erzeugungszellen traten größere Verluste als erwartet auf. Die Neukonfiguration des Laserausgangsteleskops verbesserte die Übertragung zu den Zellen für die Erzeugung weicher Röntgenstrahlung und ermöglichte eine Leistung von bis zu 24 W am Zielort (was immer noch zu inakzeptabel hohen Kompressions- und Transportverlusten führte). Mit der maximal lieferbaren Laserleistung wurde kurzzeitig eine Röntgenstrahlenerzeugung bis zu ~ 190 eV in Ar-Gas mit ähnlicher Leistung wie im Laser-Frontend erreicht (AP4.9-Ergebnis, 4 W, 22 fs), und zwar bei dreifach höherer Laserleistung und ähnlicher Pulsdauer (12 W, 24 fs), was darauf hindeutet, dass die Intensität des SWIR-Strahls (Profil und potenziell komprimierte Dauer) bei der Übertragung zu den Röntgenstrahlenerzeugungszellen beeinträchtigt wurde. Mit der maximalen Leistung des Lasers wurden auch die entwickelten Hochdruck-Röntgentargets wiederholt in Stundenzeiten zerstört. Als Alternative wurden wärmeleitende Targets verwendet, die thermische Ausdehnung und Ausrichtungsprobleme im Minutenbereich aufwiesen. Es war daher nicht möglich, die Bedingungen für die Erzeugung weicher Röntgenstrahlung mit der gewählten Konfiguration des Lasers und der Strahlführungsoptik zu optimieren.

Auf der Grundlage aller verfügbaren SWIR- und SXR-Strahldiagnosen, die Anfang 2023 aufgezeichnet wurden, wurde festgestellt, dass eine Herstellerwartung des Pumpasers (mit Schwerpunkt auf Strahlprofilverbesserungen), eine daraus resultierende Überarbeitung der SWIR-OPCPA-Laserstufen und der Austausch der Hochleistungs-SWIR-Laserführung, des Kompressors und der Strahlführungsoptik durch maßgeschneiderte Alternativen (speziell entwickelt für den Ultrakurzpulsbetrieb mit mehr als 50 W) erforderlich sein würden, um die endgültigen Projektziele zu erreichen. Diese Arbeiten sollten weitere neun bis 12 Monate in Anspruch nehmen. Zu diesem Zeitpunkt, nach Ausschöpfung der Projektmittel und der Übernahme des Laserentwicklungspartners FL durch die Amplitude Laser Group (Änderung des Status als KMU-Partner), wurde das Projekt beendet, da das HZB und die Partner nicht in der Lage waren, die letzten beiden Meilensteine (+14 Monate, AP6.1 und 6.2; M17 bzw. M18) und Ergebnisse (+18 Monate, AP4.13 und +14 Monate, AP6.2; D7 bzw. D10) vor dem Ende des Projekts im Februar 2023 zu erreichen. Diese Projektziele werden jedoch von HZB und UFI mit fachlicher Beratung durch FL auch über das Projektende hinaus weiterverfolgt.

CURE Teilprojektbalkenplan

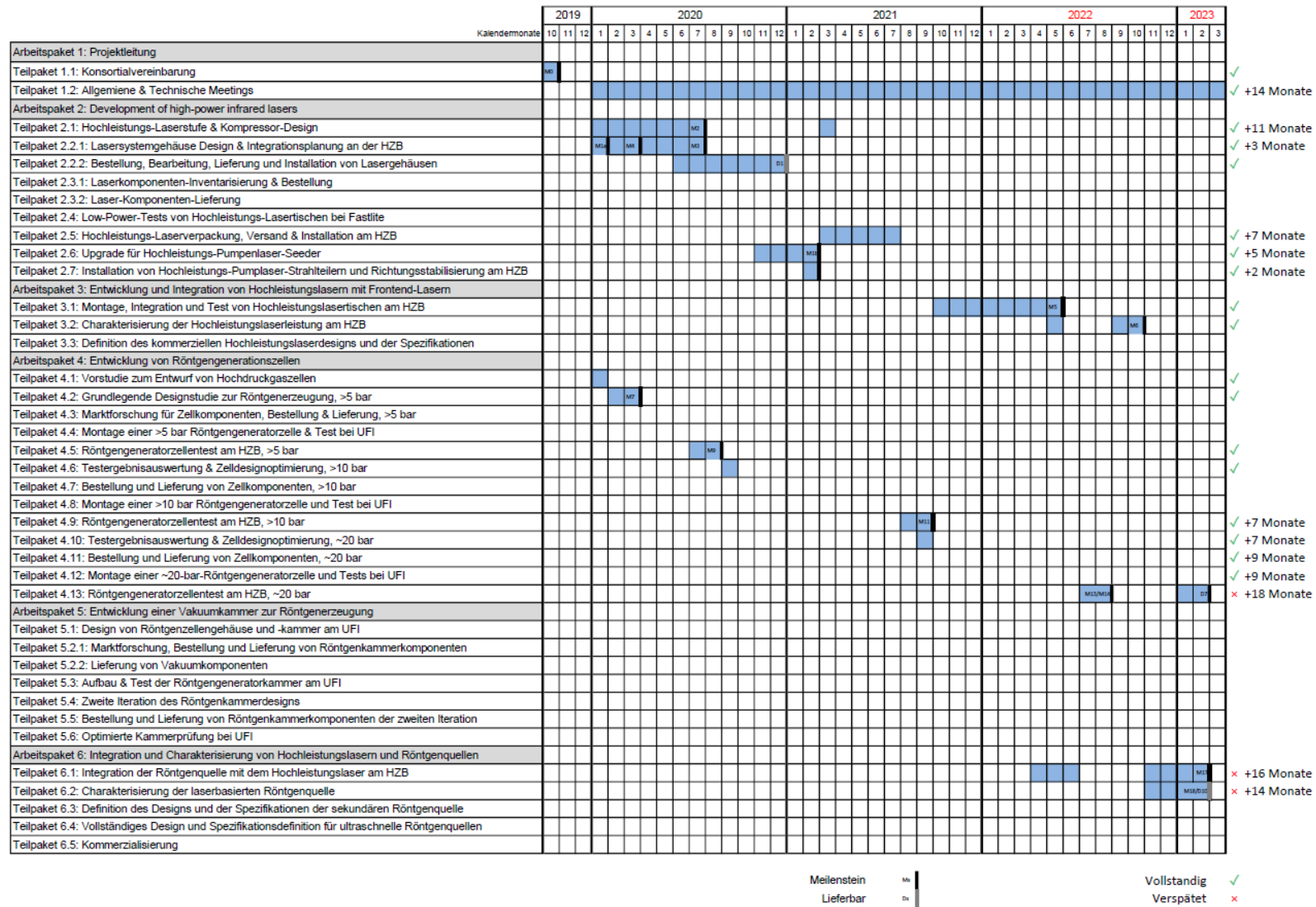


Abbildung 1: Projektarbeitspakete und endgültiger Projektzeitplan.

Artikel	Datum(e)	Beschreibung	Projekt Verwendung	Projektkosten / T€
1.1	07.2020 - 01.2021	Volles Postdoc-Gehalt	WP2, WP4	80.70
1.2	01.2021 - 10.2021	Volles Postdoc-Gehalt	WP2, WP4	105.10
1.3	01.2020 - 01.2021	Gehaltskomponente für den Projektleiter	WP1	13.40
1.4	01.2021 - 01.2022	Gehaltskomponente für den Projektleiter	WP1	8.60
(1.5)	10.2021 - 12.2021, 02.2022 - 07.2022, 01.2023	Volles Postdoc-Gehalt	WP3, WP4, WP6 (HZB-finanziert)	0.00
(1.6)	01.2021 - 03.2023	Gehaltskomponente für den Projektleiter	WP1 (HZB-finanziert)	0.00
(1.7)	02.2020 - 04.2020, 12.2020	100%, diverse technische Mitarbeiter Zeit	WP2.2.2 (HZB-finanziert)	0.00
(1.8)	08.2021 - 09.2021, 06.2022 - 07.2022	85%, diverse technische Mitarbeiter Zeit	WP4.9, WP4.13 (HZB-finanziert)	0.00
(1.9)	04.2022 - 06.2022	90%, diverse technische Mitarbeiter Zeit	WP6.1 (HZB-finanziert)	0.00
2.1	2020	Vielfältige Komponenten	WP2, WP4 - Optomechanische Kleinteile und Vakuumteile	0.82
2.2	11.202	Schalter für Lasergehäuse	WP2, 3 - Laser-Sicherheits-Verriegelungsschalter	0.47
2.3	07.202	Neon-Gasflasche	WP4.5, 4.9, 4.13, 6.1, 6.2 - Gas zur Erzeugung weicher Röntgenstrahlung	1.63
2.4	07.202	IR-Laserabweisende Dünnschichtfilter	WP4 - Röntgendetektor-Schutzfilter	2.10
2.5	08.202	SXR-Photodiode mit niedriger Laserleistung	WP4.6, 4.9 - Diagnostik zur Optimierung und Charakterisierung von SXR-Signalen	0.20
2.6	10.202	SXR-Photodiode mit hoher Laserleistung	WP4.13, 6.2 - Diagnostik für die Optimierung und Charakterisierung von SXR-Signalen mit hohem Durchfluss	0.67
2.7	01.2021	SXR-Strahlrohr-Detektorventil	WP4.9, 4.13, 6.2 - Ventil für den Betrieb der SXR-Strahlführung und die Isolierung und den Schutz des Detektors	1.00
2.8	02.2021	Kammerventil der Generation SXR	WP4.9, 4.13, 6.2 - Ventil für die Isolierung und Wartung der Vakuumkammer der SXR-Quelle	0.70
2.9	2021	Vielfältige Komponenten	WP2, WP4 - SXR-Beamline-Vakuum und optische Diagnoseteile	3.19
2.10	10.2021	Mechanische Verbinder mit Laserriegelung	WP2, 3 - Lichtdichte, lasersichere Anschlussstücke für Not-Aus-Hochleistungsstrahlblende	0.85
2.11	09.2021	Gas-Spülungs-VersorgungsfILTER für Lasergehäuse	WP3 - Gaszuführungskomponenten zur Spülung des Hochleistungslasers mit Stickstoffgas und zur Vermeidung schädlicher Absorptions- und Ausbreitungseffekte in Luft	0.73
2.12	2021	Diverse elektrische Komponenten	WP2, 3 - Kabel und Schalter mit Laser-Sicherheitsverriegelung, USB-Kabel und -Hubs, Signalkabel, Steckdosenleisten	0.69
2.13	03.2021	Laser-Kristalle	WP4 - Ersatz von IR-Laserkristallen, die während WP4.5 beschädigt wurden	1.64
2.14	06.2021	SWIR-optische Teile	WP3.2, 4.9 - Infrarotfilter und Diagnoseobjektive	1.13
2.15	07.2021	Hochstabile Spiegelhalterungen	WP4.9, 6.2, 6.3 - Hochleistungs-SWIR-Laserstrahlübertragung zu Zellen der SXR-Generation	2.70
2.16	2021	Diverse Labormaterialien	WP2, 3.1, 4.9 - Komponentenreinigungszubehör, Materialien zur Wartung des Pumpenlaser-Kühlwassers, Computer-Montagezubehör, Vakuumkammerhalterungen	4.40
2.17	08.2021	SWIR-Laser- und SXR-Beamline-Tools	WP3.1, 4.9, 4.13, 6.1, 6.2 - Schraubenziehersatz für Optik- und Gehäusebefestigung	0.02
2.18	02.2021	Stahlrohr	WP3 - Laserschutz-Schutzschlauch zur Abdeckung von Hochleistungspumpstrahlen	0.20
2.19	12.2021	HZB-Workshop-Kosten	WP3, 4.13, 6.1 - Ausgangsportplatte für das Lasergehäuse, abgestimmt auf das Hochleistungslaserdesign; gasausspülbare oder evakuierbare Hochleistungslaserspiegelgehäuse für SWIR-Strahltransportlinie; kundenspezifische Optikhalterungen	4.82
2.20	09.2021	Komponentenversand an Fastlite	WP3 - Versand des aktiven Laserkomponentengeräts an Fastlite zur Bewertung und möglichen Reparatur	0.13

Tabelle 1: Beschreibung der Projektausgaben und der damit verbundenen Verwendungszwecke während der Projektlaufzeit. (Fortsetzung auf der nächsten Seite.)

Artikel	Datum(e)	Beschreibung	Projekt Verwendung	Projektkosten / T€
2.22	02.2022	Verbindungsstücke aus Stahl	WP2, 3, 4 - Montagezubehör für Optik- und Vakuumteile	0.45
2.23	02.2022	Hochvakuum-Komponenten	WP4.13, 6.1, 6.2 - Hochvakuum-SXR-Beamline-Teile und -Dichtungen zur Verbesserung der SXR-Diagnose, zur Reduzierung von Schäden an Dünnschichtfiltern und zur Verbesserung der SXR-Übertragungseffizienz der Beamline	2.56
2.24	03.2022	Komponenten für die Hochdruckgasversorgung	WP4.13, 6.1, 6.2 - Gasversorgungsanschlüsse für SXR-Zellenbetrieb über 20 bar	1.18
2.25	04.2022	SXR-HHG-Kammerabsperrventil	WP4.13, 6.1, 6.2 - Großes Evakuierungsleitungs-Absperrventil mit hohem Durchsatz für Hochdruck-Wasserstoffquellen	2.12
2.26	04.2022	Zentrierringe für Vakuumpumpleitungen	WP4.13, 6.1, 6.2 - Große Zentrierringe für die Vakuumleitung mit hohem Durchsatz	0.65
2.27	04.2022	Hochvakuum-Komponenten	WP4.13, 6.1, 6.2 - Hochvakuum-SXR-Beamline-Röhren und -Aperturen zur Verwendung mit Hochleistungs-SWIR-Strahlen und Längenverlängerung, um Schäden an SWIR-Dünnschichtfiltern zu mildern	0.85
2.28	05.2022	SWIR-Strahltransportleitungsverbinder	WP6.1 - Maßgeschneiderte metallische Verbindungsstücke zur Verwendung zwischen dem SWIR-Lasergehäuse und der SXR-Generationskammer	0.58
2.29	06.2022	Komponenten der Vakuumpumpleitung	WP4.13, 6.1, 6.2 - Große Vakuumleitungsrohre und Winkelkomponenten mit hohem Durchsatz	1.34
2.30	2022	Vielfältige Komponenten	WP4.13, 6.1, 6.2 - Gaszuführungsleitungen, größere SXR-Generationskammer-Installationsteile, Vakuumteile für die SXR-Beamline-Anpassung an den Betrieb von Hochdruckgaszellen und Hochleistungs-SWIR-Lasern	1.58
2.31	06.2022	Hochfluss-IR-Laser-Unterdrückungs-Dünnschichtfilter	WP4.13, 6.1, 6.2 - Silberfilter auf Kupfergittern zur Unterdrückung von Hochleistungs-SWIR-Lasern, zur Erkennung von Röntgenstrahlen mittlerer Energie und zum Schutz von Röntgendetektoren	2.26
2.32	2022	Dienstleistungen für elektronische Teile	WP3.2, 6.1 - Überholung und Kalibrierung von Laserleistungsköpfen und -lehren, die während der Hochleistungslaserentwicklung beschädigt wurden	0.88
2.33	04.2022	Helium-Gasflaschen	WP4.13, 6.1, 6.2 - Gas zur Erzeugung weicher Röntgenstrahlen	0.49
2.34	01.2022	SWIR-Optik	WP3.2, 4.13, 6.1, 6.2 - Optische SWIR-Filter und Diagnoselinsen, Linsen der SXR-Generation und Optomechanik	2.14
2.35	01.2022	Hochleistungs-SWIR-Optiksubstrate	WP3.1, 3.2, 6.1, 6.2 - Hochleistungsfähige, wärmeleitende Spiegelsubstrate	2.25
2.36	02.2022	Laserfenster	WP3.1, 3.2, 6.1, 6.2 - SWIR-Lasergehäusefenster zum Spülen des Gehäuses mit Stickstoffgas und zur Vermeidung von Absorption und Strahlbeeinträchtigung in der Luft	0.71
2.37	02.2022	SWIR-verstärkte Metallspiegelbeschichtung	WP3.1, 3.2, 6.1, 6.2 - Hochreflektierende Spiegelbeschichtung auf Artikel 2.35 für den Einsatz mit	2.94
2.38	06.2022	Hochfluss-IR-Laser-Unterdrückungs-Dünnschichtfilter	WP4.13, 6.1, 6.2 - Aluminiumfilter auf Kupfergittern für die Unterdrückung von Hochleistungs-SWIR-Lasern, die Detektion von hochenergetischen Röntgenstrahlen und den Schutz von Röntgendetektoren	3.15
2.39	07.2022	Hochdruckgasregler	WP4.13, 6.1, 6.2 - Bis zu 50 bar Helium-Gasregler zum Testen und Anwenden der Hochdruck-Gaszellen der SXR-Generation	0.94
2.40	2022	Diverse Labormaterialien	WP3.1, 3.2, 4.13, 6.1, 6.2 - Kleine optische und optomechanische Aufträge, Reinigungsmaterialien	1.91
2.41	07.2021	Optische Beschichtung	WP3.1, 3.2 - Beschichtung des Abgriffenfensters für die Laserdiagnose	0.30
2.42	03.2022	Fensterhalter aus Metall	WP3.1, 3.2, 6.1, 6.2 - Pumplaser- und SWIR-Laserfensterhalter für das SWIR-Lasergehäuse, das SWIR-Strahltransportsystem und die SXR-Erzeugungskammer, um die Stickstoffgasspülung zu ermöglichen	0.75
3.1	01.2020	Reisen Sie zu Fastlite	WP1 - Flug, Mietwagen und Hotelübernachtung für das Kick-off-Meeting des Projekts	0.28
4.1	12.2022	Gasspülbare Spiegelhalter	WP6.1 - Großes, spülbares Gehäuse für automatisierte, richtungsstabilisierte Spiegelbaugruppen, um die SWIR-Strahlstabilisierung an den SXR-Zellenzielen zu ermöglichen	6.00

Tabelle 1: (Fortsetzung von der vorherigen Seite.) Liste der Projektausgaben und der damit verbundenen Verwendungszwecke im Laufe des Projekts.

Projekt-Ausgaben:

Die Gesamtausgaben des Projekts sind im Zahlenmäßigen Verwendungsnachweis zusammengefasst, der durch kurze Beschreibungen der Verwendung der einzelnen Kostenpositionen innerhalb des Projekts in Tabelle 1 ergänzt wird.

Der größte Teil der Projektausgaben entfiel auf das Gehalt eines projektgebundenen Postdocs am HZB (AP2, 3, 4, 5 und 6; Positionen 1.1, 1.2 und 1.5 in Tabelle 1, wobei letztere vom HZB finanziert wurden). Dieser Wissenschaftler hat den Großteil der HZB-Arbeiten in den AP 2, 3, 4 und 6 durchgeführt. Der zweite große Kostenblock war das Gehalt des Projektleiters für die Zeit, die er dem Projekt widmete (AP1; Punkte 1.3, 1.4 und 1.6, wobei letzterer vom HZB finanziert wurde). Darüber hinaus hat ein breites Spektrum an technischen Mitarbeitern des HZB auf Kosten des HZB in das Projekt investiert, was insgesamt 7,4 Arbeitsmonate ausmachte (AP2, AP4, AP6; Punkte 1.7, 1.8 und 1.9).

Die zweitgrößten Projektkosten am HZB waren Material- und sonstige unmittelbare Projektkosten. Davon wurden 19,4 T€ für optische Komponenten in den Arbeitspaketen 2, 3, 4 und 6 ausgegeben (Posten 2.1, 2.4, 2.5, 2.6, 2.13, 2.14, 2.31, 2.34, 2.35, 2.37, 2.38 und 2.41). 12,7 T€ wurden für die gasgespülten Hochleistungs-SWIR-Strahlentransportleitungen im Zusammenhang mit AP6.1 ausgegeben (Posten 2.15, ~70% von 2.19, 2.28 und 4.1). 12,4 T€ wurden für die Integration der SXR-Erzeugungskammern von UFI und den Bau der SXR-Vakuum-Strahlführung ausgegeben, die in AP4 und 6 verwendet wird (Posten 2.7, 2.8, 2.9, 2.23, 2.25, 2.26, 2.27 und 2.29). 5,9 T€ wurden für die Integration der Hochleistungslaser-Einhausung und der zugehörigen Laserschutz-Infrastruktur in das HZB-Labor ausgegeben (AP2 und 3; Posten 2.2, 2.10, 2.12, 2.17, 2.18, ~30% von 2.19, 2.36 und 2.42). Im Rahmen von AP4 wurden 3,9 T€ für Teile der Gasleitung (Posten 2.29, 2.30 und 2.39) und 2,1 T€ für Gasflaschen der SXR-Generation (Posten 2.3 und 2.33) ausgegeben. In den Arbeitspaketen 3, 4 und 6 wurden 1,9 T€ für die Überholung und Kalibrierung des SWIR-Leistungskopfes (der in Arbeitspaket 3.1 beschädigt und für den Einsatz in Arbeitspaket 3.2 repariert wurde; Posten 2.32) und für SXR-Photodioden-Sensoren (Posten 2.5 und 2.6) ausgegeben. Die restlichen Materialausgaben des Projekts in Höhe von 5,7 T€ deckten die Kosten für Verbrauchsmaterialien ab, wie z.B. Reinigungsmittel für Komponenten und den regelmäßigen Austausch von Laserkühlwasser.

Insgesamt 0,28 T€ wurden für projektbezogene Reisen ausgegeben, insbesondere für die Projektauftraktssitzung in Antibes, Frankreich, im Januar 2020, vor dem COVID-19-Ausbruch (AP1; Punkt 3.1).

Verwandte Entwicklungen im Laufe des Projekts:

Vor Beginn des Projekts wurden Ultrakurzpuls-SWIR-Laser mit Gasphasen-HHG-Quellen eingesetzt, um SXR-Quellen zu erzeugen, die ein Wasserfenster (284-543 eV) überspannen und attraktive Eigenschaften für Anwendungen aufweisen: breite spektrale Bandbreiten, ultrakurze Pulsdauern, transversale und longitudinale Kohärenz, inhärente Synchronisation mit dem SWIR-Erzeugungslaser (siehe z. B. Referenz [1]). Diese HHG-basierten SXR-Quellen wurden überwiegend von vollständig entwickelten Titan:Saphir-Verstärkern mit fs-Pulsdauer und zugehörigen optisch-parametrischen Verstärker-Lasersystemen angetrieben, möglicherweise mit nichtlinearer, faserbasierter Nachkompression [2], [3], [4], [5]. Die Leistung solcher Lasersysteme ist nach wie vor auf mittlere Leistungen von wenigen Watt und Wiederholraten von wenigen kHz begrenzt, was wiederum die erreichbaren Gasphasen-HHG-SXR-Flussraten, die damit verbundenen Datenerfassungsraten und ihren Nutzen einschränkt. SWIR-OPCPA-Systeme wurden ebenfalls entwickelt (siehe z. B. Referenzen [6] und [7]), waren aber durch die vorherrschenden Pumplaser-Technologien auf ähnliche Durchschnittsleistungen und Wiederholraten beschränkt.

Während des Projekts arbeiteten mehrere andere akademische Forschungsgruppen an der Entwicklung von Hochleistungs-SWIR-OPCPA-Lasertechnologien auf der Grundlage neuer, marktreifer Hochleistungslasersysteme auf Ytterbium-Basis. Zwei bemerkenswerte Beispiele aus dem ersten Projektjahr sind die von Pupeikis et al. [8] (25 W, 2,2 μm zentrale Wellenlänge, 17 fs full-width half-maximum, FWHM, Pulsdauer) und Feng et al. [9] (27 W, 2,1 μm zentrale Wellenlänge, 30 fs, FWHM,

Pulsdauer) entwickelten SWIR-OPCPA-Systeme, die bis dahin die höchste Leistung aufwiesen. Darüber hinaus berichteten Zou et al. [10] im Jahr 2021 über ein länger welliges OPCPA-System mit ähnlicher Durchschnittsleistung (27 W, 3,0 μm zentrale Wellenlänge, 125 fs FWHM-Pulsdauer). Am Ende des CURE-Projekts war der entwickelte Laser unseres Wissens nach das bisher leistungsstärkste Ultrakurzpuls-SWIR-Lasersystem der Welt.

Alternative SWIR-Lasertechnologien mit ultrakurzen Impulsen wurden auch in der Wissenschaft erforscht, und zwar im Zusammenhang mit Thulium-dotierten Faserlasertechnologien und gasgefüllten Fasern oder auf Multipass-Zellen basierenden Techniken zur postlaserzeitlichen Komprimierung. Besonders erwähnenswert ist, dass Gierschke et al. 2022 über ein leistungsstarkes SWIR-Lasersystem mit ultrakurzen Impulsen berichteten [11] (51 W, 2 μm zentrale Wellenlänge, 35 fs FWHM-Impulsdauer). Nach unserem Kenntnisstand übertraf dieses System die durchschnittliche Leistung aller bisher berichteten SWIR-OPCPA-Systeme, einschließlich des im Rahmen des CURE-Projekts entwickelten Systems. Solche Faserlasersysteme und ihre weitere Entwicklung stellen die Hauptkonkurrenz zu den in diesem Projekt entwickelten OPCPA-Lasertechnologien dar.

Auf der Gasphasen-SXR-HHG-Seite des Projekts wird weiterhin an der Steigerung des SXR-Photonenflusses mit SWIR-OPCPA-Technologien gearbeitet [9], [12], um bis zum Ende des Projekts 104 Photonen/s/eV bei ~ 300 eV zu erreichen. Die Vorteile gegenüber den SXR-Quellen mit den höchsten Flüßen, die mit besser etablierten Titan:Saphir-Lasern, zugehörigen parametrischen Femtosekunden-Pulsverstärkern und gasgefüllten, nachverdichteten Kapillarsystemen (die bis zu 105 Photonen/s/eV bei 300 eV erzeugen [2], [13], [1]) erzeugt werden, müssen jedoch noch nachgewiesen werden. Was die postkomprimierten modernen Faserlaserquellen betrifft, so wurden im Jahr 2021 mit 2 μm postkomprimierten Thulium basierten Systemen mit wenigen Zyklen 106 Photonen/s/eV Photonenfluss nachgewiesen [14]. Es wird erwartet, dass mit SWIR-OPCPA-Technologien ähnliche oder größere SXR-Flüsse erreicht werden können. Wichtige Arbeiten im Anschluss an das CURE-Projekt bestehen dementsprechend in der Demonstration der Erzeugung von SXR mit hohem Fluss mit SWIR-OPCPA-Quellen, insbesondere angesichts des Potenzials, mit Hilfe der Stabilität der Träger-Hüllen-Phase, die die im CURE-Projekt entwickelten OPCPA-Technologien bieten, robust auf höhere Wasserfenster-Photonenenergien hinzuarbeiten.

Ergebnisse:

Die wichtigsten Projektergebnisse am Ende des Projekts waren:

- Mit FL die gemeinsame Entwicklung und Charakterisierung des bisher leistungsstärksten, CEP-stabilen SWIR-Lasersystems (2,1 μm) mit wenigen optischen Zyklen, das 33 W, 24 fs zeitlich komprimierte Pulse bei einer Wiederholrate von 52,6 kHz liefert.
- Herstellung eines modularen, gasgespülten (oder evakuierbaren) SWIR-Strahlübertragungssystems für die Lieferung von SWIR-Hochleistungspulsen an die sekundäre SXR-Quelle.
- Mit UFI-Herstellung und Test eines Prototyps einer Gasphasen-HHG-SXR-Erzeugungsquelle und eines Vakuumaufbaus, die nachweislich über 20 bar SXR-Erzeugungszellen-Gasdruck hinaus arbeiten und während des Projekts breitbandige Röntgenpulse mit bis zu 190 eV Photonenenergie in Ar erzeugen können.
- Bau und Test einer SXR-Vakuum-Quellendiagnose-Strahlführung zur Optimierung und Charakterisierung der entwickelten HHG-basierten SXR-Quelle im Spektralbereich von 20 bis 600 eV.

Darüber hinaus wurde am HZB der Prototyp eines wassergekühlten, gasgespülten Hochleistungslasergehäuses hergestellt, in dem das komplette OPCPA-Hochleistungssystem untergebracht und stabilisiert wurde (siehe Abbildung 2, linke Seite). Dieses Gehäuse ermöglichte die systematische Untersuchung der Laserleistung mit und ohne Gasspülung, um das Ausmaß der luftbasierten Hochleistungs-SWIR-Strahldegradation zu bestimmen, sowie die aktive Gehäusekühlung, um die Vorteile des aktiven Kühlsystems zu quantifizieren.

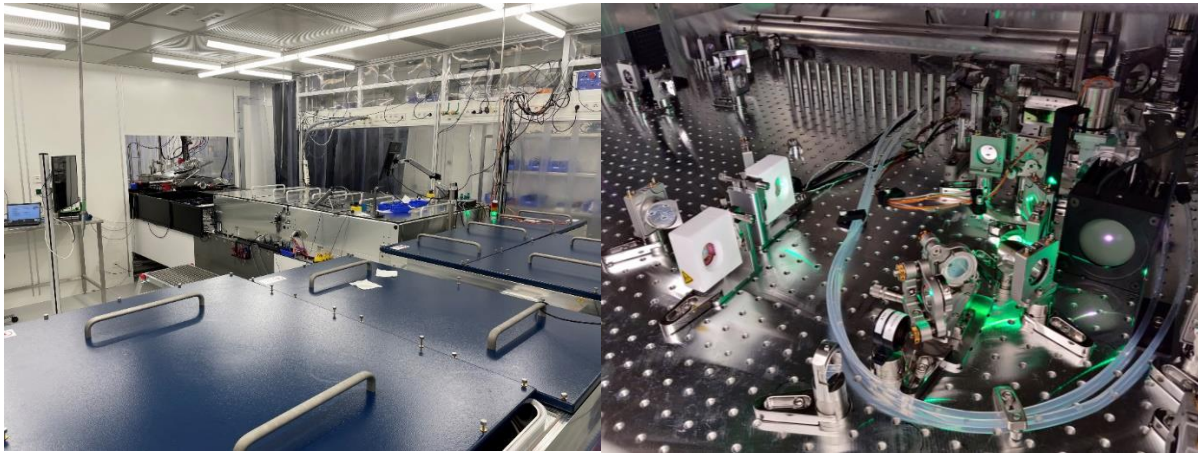


Abbildung 2: (Links) Hochleistungs-Pumplaser auf Ytterbium-Basis (blaue Abdeckungen) und das im Rahmen des CURE-Projekts entwickelte Hochleistungs-SWIR-OPCPA-Lasersystem (AP2 und 3; silberne, zentrale Einfassung) am HZB. (Rechts) Innenansicht der im Rahmen des CURE-Projekts entwickelten Hochleistungs-SWIR-OPCPA-Stufen und der Pumpstrahlführungsoptik (AP3.1).

Nach der Montage des SWIR-OPCPA-Laser-Frontends im HZB-Gehäuse und der Erzeugung von 3,4 W, 2,1 μm Seed-Pulsen wurde eine effiziente OPCA mit hoher Leistung und wenigen optischen Zyklen demonstriert. Es wurden zwei leistungsstarke OPCA-Stufen mit 105 W und 310 W Pumpleistung im nahen Infrarot entwickelt, um eine 13-fache Front-End-Pulsverstärkung durch eine etwa 4-fache Seed-Verstärkung in jeder Stufe zu ermöglichen (unter Berücksichtigung aller Verluste zwischen den beiden leistungsstarken OPCA-Stufen). Die beiden OPCA-Stufen erzeugten 44 W, 2,1 μm Signalpulse mit ausgezeichneten $\sim 11\%$ Pump-zu-Signal-Konversionswirkungsgraden in jeder Stufe. Die Ausgangspulse wurden erfolgreich auf eine Pulsdauer von 24 fs oder 3,4 optische Zyklen komprimiert (siehe Abbildung 3). Die beispiellos hohen, ultrakurzen SWIR-Pulsleistungen und die damit verbundenen Spitzenintensitäten führten jedoch zu zahlreichen thermischen und nichtlinearen Ausbreitungsproblemen mit dem erzeugten SWIR-Licht und den nachfolgenden optischen Baugruppen. Dies führte zu systematischen Untersuchungen der mittleren Leistung und Spitzenintensität von Pump- und SWIR-Signalstrahlen im nahen Infrarotbereich, die die oben erwähnten Probleme bei der Strahlausbreitung in ihrer Vielschichtigkeit aufzeigten. Es wurden mehrere Eingangsstrahlpulsdauern und OPCA-Seed-Pulslaser-Wiederholraten untersucht, um die durch die Durchschnittsleistung und Spitzenintensität verursachten Strahldegradationseffekte nach der OPCA-Stufe zu entschlüsseln. Außerdem wurden Wärmebildverfahren eingesetzt, um die problematischsten Optiken zu identifizieren. Mehrere Ausgangsstrahl-Teleskopkonfigurationen, SWIR-Spiegeltechnologien, Laser-Gas-Spülkonfigurationen und zeitliche Pulskompressionsschemata wurden ebenfalls mit einer Durchschnittsleistung von >40 W getestet. Dies führte zu iterativen Verbesserungen der SWIR-Leistungsübertragung zu den SXR-Erzeugungszellen (siehe unten) und vor allem zu dem überarbeiteten Design der Hochleistungs-SWIR-OPCPA-Stufe, das nun vom HZB in Absprache mit FL nach Abschluss des Projekts weiterverfolgt wird.

Nach dem Bau der OPCA-Hochleistungsstufen des CURE-Lasers und der Bewertung der Auswirkungen der Luftfeuchtigkeit auf den Hochleistungs-SWIR-Strahl in der spülbaren Laserkabine wurde ein modulares, starres, gasgespültes (oder evakuierbares) Spiegelgehäuse und Strahlübertragungssystem für die Lieferung von Hochleistungs-SWIR-Pulsen an die sekundäre SXR-Quelle gebaut. Wie bei der Laserkabine konnte gezeigt werden, dass das System mit einer Stickstoffspülung in der Lage ist, die relative Luftfeuchtigkeit von $\sim 40\%$ auf $<1\%$ (sensorbegrenzt) zu reduzieren und die SWIR-Wasserdampfabsorption, die Erzeugung thermischer Luftströme und die Verschlechterung des SWIR-Strahls auf dem Weg zur SXR-HHG-Kammer zu vermindern.

Die Konzepte zur Erzeugung von Röntgenstrahlung im Rahmen des CURE-Projekts wurden von HZB und UFI durch die erfolgreiche Erzeugung von weicher Röntgenstrahlung mit Photonenenergien bis zu ~ 150 eV in Heliumgas getestet. Ein bereits existierender OPCA-Laser auf HZB-Basis (10 W Durchschnittsleistung, 850 nm, 10 fs FWHM-Pulsdauer), die HHG-Quelle des UFI, eine HHG-Kammer

des HZB, die erste Iteration der CURE-Projekt-Strahlführung für weiche Röntgenstrahlung und ein Everest-Spektrometersystem des UFI wurden zur Durchführung der Messungen eingesetzt, was zum Design der ersten Variante der CURE-Projekt-Strahlführung für die Erzeugung von weicher Röntgenstrahlung und für diagnostische Zwecke führte.

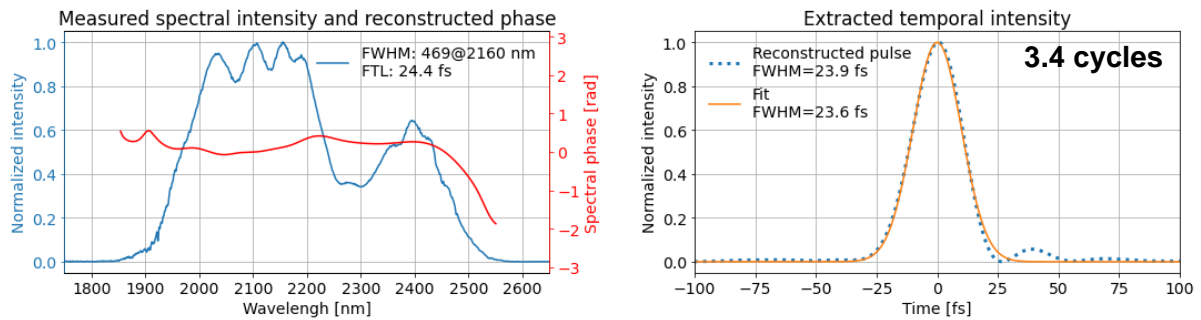


Abbildung 3: (Links) Spektrale und (Rechts) zeitliche Charakterisierung der komprimierten SWIR-OPCPA-Laserleistung (AP3.2). Trotz unerwartet hoher Verluste im Chirped-Mirror-Kompressoraufbau wurde eine komprimierte Ausgangsleistung von bis zu 33 W mit einer FWHM-Pulsdauer von 24 fs erreicht, wie mit selbstreferenzierenden spektralen Interferometriemessungen (SRSI) zur Pulscharakterisierung ermittelt wurde. Am Ende des Projekts entsprach dies der bisher höchsten durchschnittlichen SWIR-OPCPA-Ausgangsleistung mit wenigen optischen Zyklen.

Anschließend wurden im Jahr 2021 - unter Verwendung der ersten Hälfte des CURE-Projektlasers (CEP-stabile, 2,1 μm , 4 W-Pulse, die zeitlich auf 22 fs Dauer komprimiert wurden), der SXR-HHG-Gaszelle, der HHG-Kammer und der neu errichteten SXR-Strahllinie-Systeme (siehe Abbildung 4) - SXR-Pulse unter eng fokussierenden Bedingungen erzeugt. Es wurden Photonenenergien bis zu 190 eV in Argongas bei 2-3 bar Versorgungsdruck erzeugt (siehe Abbildung 5). Es wurde nachgewiesen, dass die zugehörige SXR-Optik bei einem SXR-HHG-Gaszelleneinlassdruck von bis zu 10 bar problemlos funktioniert. Solche Drücke sind nachweislich ausreichend für die wasserfensterübergreifende SXR-Erzeugung mit SWIR-Pulsen im mJ-Bereich mit wenigen Zyklen [2], [3], [4], wie sie in AP3 des CURE-Projekts angestrebt werden. Mit den $\sim 75 \mu\text{J}$ Pulsenergien, die das OPCA-Laser-Frontend bietet, sollten jedoch deutlich höhere Heliumgasdrücke ($\sim 15 \text{ bar}$) erforderlich sein, um energiereichere SXR-Photonen zu erzeugen.

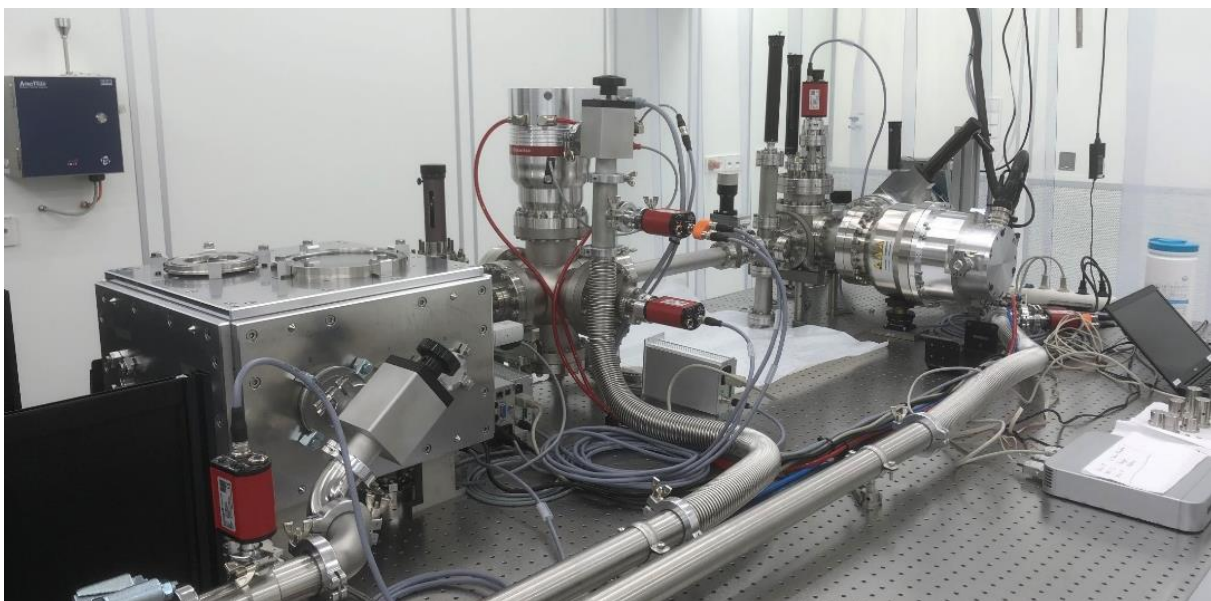


Abbildung 4: Die Variante 2021 des CURE-Projekts SXR-Erzeugungsquelle und diagnostische Strahllinie am HZB (AP4 und 6).

Im Jahr 2022 wurde die SXR-Vakuum-Strahllinie aufgerüstet, um Gasversorgungsdrücke von >20 bar mit den im Projekt implementierten Gaszellentargets zu unterstützen. Weitere Schritte wurden unternommen, um die Detektion von SXR zu unterstützen, die mit bis zu 50 W SWIR-Strahlen und längeren SWIR-Strahlbrennweiten der SXR-Generation erzeugt wurden. Diese Aufrüstungen ermöglichten die kontinuierliche Anwendung von 23 bar Heliumgasdruck auf die SXR-Erzeugungszellen und die Charakterisierung von HHG-basierten SXR-Quellen im Spektralbereich von 20 bis 600 eV. In den letzten Phasen des Projekts wurden solche SXR-Erzeugungstests jedoch durch Probleme mit der Verschlechterung des SWIR-Hochleistungsstrahlprofils und damit zusammenhängende Probleme mit der durch den SWIR-Laser verursachten Erwärmung und Beschädigung der Gaszellen behindert. Es wurde eine Reihe von SXR-Zellen getestet, unter anderem mit größerer optischer Apertur, unterschiedlicher Länge, unterschiedlich gepumpt und mit wärmeleitenden, folienversiegelten Varianten. In allen Fällen konnte die SXR-Erzeugung mit den eingesetzten Hochleistungs-SWIR-Antriebslaserstrahlen jedoch nicht länger als einige Minuten aufrechterhalten werden. Wie beim Laser-Frontend konnten auch im Argongas Photonenenergien bis ~190 eV erzeugt werden, allerdings bei dreifach höheren Laserleistungen und nur für kurze Zeit. Diese Ergebnisse führten dazu, dass im Anschluss an das Projekt geplant wurde, den Großteil der Hochleistungs-SWIR-Strahlführung und der Manipulationsoptiken zu ersetzen, um das Profil des propagierten SWIR-Strahls, die Fokussierbarkeit und die Spitzenintensität in einem genau definierten SXR-Erzeugungsvolumen zu verbessern.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass am Ende des Projekts der SWIR-OPCPA-Laser mit der bisher höchsten Durchschnittsleistung und wenigen optischen Zyklen entwickelt worden war. Auch die Infrastruktur für die SXR-Erzeugung und -Diagnose war entwickelt und experimentell überprüft worden. Die Probleme mit der Ausbreitung des SWIR-Strahls und der Verschlechterung des Strahlprofils blieben jedoch bestehen und mussten noch gelöst werden. Die damit verbundenen sekundären Herausforderungen bei der SXR-Erzeugung ergaben sich aus thermischen Problemen und in einigen Fällen aus Problemen mit der Materialschädigungsschwelle bei den verfügbaren optischen SWIR-Technologien. Die CURE-Projektpartner arbeiten weiterhin an der Umgehung dieser Herausforderungen, um die SWIR-OPCPA-Laser und sekundären SXR-Quellen mit dem bisher höchsten Fluss zu entwickeln.

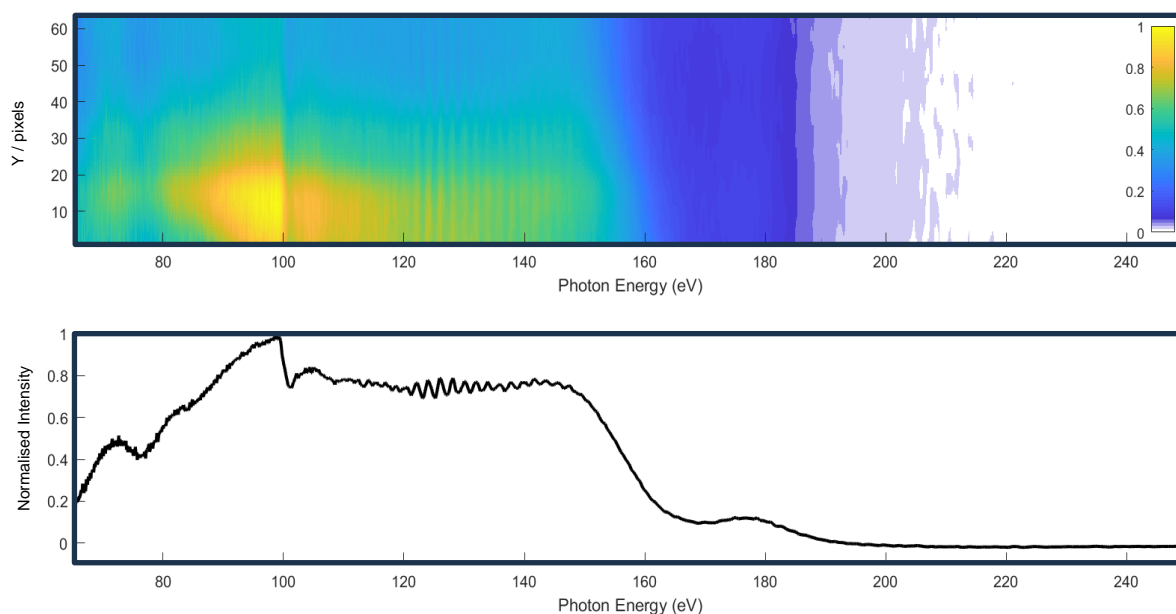


Abbildung 5: (Oben) Photonenergie-kalibriertes Soft-Ray-Kamerabild, das mit der ersten Hälfte des von CURE entwickelten SWIR-OPCPA-Systems (4 W, 2,1 μm , 22 fs FWHM-Pulsdauer), einer mit Argon gefüllten HHG-Zelle, der von CURE entwickelten SXR-Strahllinie (siehe Abbildung 4) und dem UFI Everest-Spektrometer (AP4.9 Ergebnis) erzeugt wurde. Der SXR-Strahl wurde mit einem Zirkonium-Dünnschicht-Metallfilter SWIR-gefiltert (~70-200 eV Transmission). (Unten) Räumlich integriertes Spektrum, das aus dem obigen SXR-Kamerabild abgeleitet wurde.

Verwertbarkeit der Ergebnisse:

Der Laser des CURE-Projekts wurde um ein besonders leistungsstarkes, ultrakurz gepulstes Ytterbium:Yttrium-Aluminium-Granat-Lasersystem von Trumpf Scientific Lasers (DIRA 500-50; 500 W, 1,03 μm , 850 fs FWHM Pulsdauer, 52,6 kHz Wiederholrate) herum entwickelt. Vor Beginn des Projekts hatte FL SWIR-OPCPA-Laser im Bereich, der bis zu 200 W starken Varianten dieser Systeme entwickelt. Folglich wurde während der AP3-Komponente des CURE-Projekts neues geistiges Eigentum von FL und HZB gemeinsam generiert, insbesondere als die Hochleistungs-SWIR-OPCPA-Stufen, die zeitliche Kompression und die nachfolgenden optischen Baugruppen entwickelt wurden. Kurz nach dem Ende des Projekts wurde jedoch die Übernahme von FL durch die Amplitude Laser Group abgeschlossen. Dies führte zu einer Änderung des KMU-Status von FL und der Entwicklungs- und Vermarktungsstrategie für OPCPA-Laser. FL wird nun nur noch OPCPA-Laser mit Amplitude-Pumplaser herstellen und vermarkten, die derzeit eine durchschnittliche Leistung von bis zu 300 W bieten. Dies hat zur Folge, dass die Laserentwicklungen des CURE-Projekts nicht mehr direkt genutzt werden können, um die SWIR-OPCPA-Systeme mit der bisher höchsten Durchschnittsleistung auf den Markt zu bringen, wie es im ursprünglichen Projektvorschlag vorgesehen war.

Im Hinblick auf die zukünftige Kommerzialisierung von SWIR-OPCPA-Lasersystemen mit Pulsdauern von wenigen optischen Zyklen und einer Leistung von mehr als 40 Watt sind nach der OPCPA-Phase noch weitere Entwicklungsarbeiten erforderlich, um solche Laser effizient zu komprimieren, zu manipulieren und anzuwenden, ohne dass es zu einer Verschlechterung des Strahlprofils kommt. Diese Arbeiten werden weiterhin am HZB durchgeführt, in regelmäßiger Abstimmung mit FL. Die Kommerzialisierung der verfeinerten Version des aktuellen CURE-Projekt-Prototyp-Lasersystems, das von einem noch zu kommerzialisierenden Amplituden-Pumplaser mit höherer Leistung angetrieben wird, durch FL könnte dementsprechend in den nächsten Jahren realisierbar sein. Alternativ könnte ein alternativer OPCPA-Laserhersteller auf der Grundlage von Elementen der noch zu veröffentlichenden Beschreibung des von CURE entwickelten Lasers die derzeit verfügbaren modernen Ytterbium-Lasertechnologien mit einer Leistung von 500 W übernehmen, um ein CEP-stabiles Lasersystem mit einer Leistung von 50 W und wenigen optischen Zyklen auf den Markt zu bringen.

Auf der Seite der sekundären SXR-Quelle müssen die bereits erwähnten Herausforderungen der Post-OPCPA-Stufe, der effizienten Hochleistungspuls-Kompression, der Strahldämpfung und der Strahlführung noch angegangen werden, bevor die gemeinsam mit dem UFI entwickelte SXR-Quelle und Strahllinie vollständig optimiert und charakterisiert werden können und die endgültigen Projektmeilensteine und Ergebnisse des CURE-Projekts erreicht und genutzt werden können. Diese Herausforderungen werden weiterhin am HZB in Absprache mit UFI und FL und auf eigene Kosten der Partner gelöst. Basierend auf diesen Arbeiten soll eine optimierte, leistungsstarke, SWIR-Laserkompatible SXR-Quelle gemeinsam mit UFI entwickelt werden und im Jahr 2024 zur Kommerzialisierung durch UFI bereit sein, wobei die entsprechenden Umsatzbeteiligungen an das HZB gehen sollen.

Die allgemeine Nutzbarkeit der Projektergebnisse ist nach wie vor hoch, und die Zahl der akademischen Einrichtungen, die ähnliche Infrastrukturen wie die im CURE-Projekt entwickelten einsetzen wollen, wächst weiter. Darüber hinaus werden am HZB weiterhin hervorragende Fortschritte gemacht, um die in CURE entwickelten Laser- und SXR-Quellen-Prototypen über das Ende des CURE-Projekts hinaus in der akademischen Forschung einzusetzen. So werden die Erfahrungen, die die HZB-Wissenschaftler während des Projekts gesammelt haben, genutzt, um SXR-Strahllinie-Infrastrukturen rund um die CURE-Projekt-Lichtquellen zu entwickeln. Es wird erwartet, dass die optimierte CURE-Projekt-SXR-Quelle und die damit verbundenen Entwicklungen von röntgenoptischen Baugruppen zu weiteren akademischen Forschungs- und Technologietransfermöglichkeiten am HZB innerhalb Deutschlands und der Europäischen Union führen werden.

Veröffentlichungen:

Die CURE-Laserquelle, gekoppelt an den 1,03- μm -Pumplaser mit 500 W und 850 fs Pulsdauer, liefert erstklassige Ergebnisse. Das System wird weiter optimiert und ein wissenschaftlicher Artikel wird für die Einreichung bei einer Fachzeitschrift im Jahr 2024 vorbereitet. Die kombinierte Leistung des Lasers und des Soft-Ray-Generators wird nach weiteren Optimierungsarbeiten erneut gemessen werden, d.h. wenn das von CURE entwickelte Lasersystem mit verbesserten Pumplaserspezifikationen neu optimiert wurde und neue Hochleistungs-SWIR-Kompressions- und Routing-Optiken installiert sind. Danach werden die Ergebnisse der Erzeugung weicher Röntgenstrahlung voraussichtlich 2024 in einem wissenschaftlichen Artikel beschrieben.

Referenzen:

- [1] D. Popmintchev, B. R. Galloway, M.-C. Chen, F. Dollar, C. A. Mancuso, A. Hankla, L. Miaja-Avila, G. O'Neil, J. M. Shaw, G. Fan, S. Ališauskas, G. Andriukaitis, T. Balčiunas, O. D. Mücke, A. Pugzlys, A. Baltuška, H. C. Kapteyn, T. Popmintchev und M. M. Murnane, „Near- and Extended-Edge X-Ray-Absorption Fine-Structure Spectroscopy Using Ultrafast Coherent High-Order Harmonic Supercontinua,“ *Phys. Rev. Lett.*, Bd. 120, Nr. 9, p. 093002, March 2018.
- [2] S. M. Teichmann, F. Silva, S. L. Cousin, M. Hemmer und J. Biegert, „0.5-keV Soft X-ray attosecond continua,“ *NATURE COMMUNICATIONS*, Bd. 7, May 2016.
- [3] V. Cardin, B. E. Schmidt, N. Thiré, S. Beaulieu, V. Wanie, M. Negro, C. Vozzi, V. Tosa und F. Légaré, „Self-channelled high harmonic generation of water window soft x-rays,“ *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, Bd. 51, p. 174004, August 2018.
- [4] A. S. Johnson, D. R. Austin, D. A. Wood, C. Brahms, A. Gregory, K. B. Holzner, S. Jarosch, E. W. Larsen, S. Parker, C. S. Strüber, P. Ye, J. W. G. Tisch und J. P. Marangos, „High-flux soft x-ray harmonic generation from ionization-shaped few-cycle laser pulses,“ *Science Advances*, Bd. 4, p. eaar3761, 2018.
- [5] C. Schmidt, Y. Pertot, T. Balciunas, K. Zinchenko, M. Matthews, H. J. Wörner und J.-P. Wolf, „High-order harmonic source spanning up to the oxygen K-edge based on filamentation pulse compression,“ *Opt. Express*, Bd. 26, p. 11834–11842, April 2018.
- [6] Y. Deng, A. Schwarz, H. Fattahi, M. Ueffing, X. Gu, M. Ossiander, T. Metzger, V. Pervak, H. Ishizuki, T. Taira, T. Kobayashi, G. Marcus, F. Krausz, R. Kienberger und N. Karpowicz, „Carrier-envelope-phase-stable, 1.2 mJ, 1.5 cycle laser pulses at 2.1 μm ,“ *Opt. Lett.*, Bd. 37, p. 4973–4975, December 2012.
- [7] K.-H. Hong, S.-W. Huang, J. Moses, X. Fu, C.-J. Lai, G. Cirmi, A. Sell, E. Granados, P. Keathley und F. X. Kärtner, „High-energy, phase-stable, ultrabroadband kHz OPCPA at 2.1 μm pumped by a picosecond cryogenic Yb:YAG laser,“ *Opt. Express*, Bd. 19, p. 15538–15548, August 2011.
- [8] J. Pupeikis, P.-A. Chevreuril, N. Bigler, L. Gallmann, C. Phillips und U. Keller, „Water window soft x-ray source enabled by 25-W few-cycle mid-IR OPCPA at 100 kHz,“ *Optica*, Bd. 7, December 2019.

- [9] T. Feng, A. Heilmann, M. Bock, L. Ehrentraut, T. Witting, H. Yu, H. Stiel, S. Eisebitt und M. Schnürer, „27 W 2.1 μm OPCPA system for coherent soft X-ray generation operating at 10 kHz,“ *Opt. Express*, Bd. 28, p. 8724–8733, March 2020.
- [10] X. Zou, W. Li, S. Qu, K. Liu, H. Li, Q. J. Wang, Y. Zhang und H. Liang, „Flat-Top Pumped Multi-Millijoule Mid-Infrared Parametric Chirped-Pulse Amplifier at 10 kHz Repetition Rate,“ *Laser & Photonics Reviews*, Bd. 15, p. 2000292, 2021.
- [11] P. Gierschke, C. Grebing, M. Abdelaal, M. Lenski, J. Buldt, Z. Wang, T. Heuermann, M. Mueller, M. Gebhardt, J. Rothhardt und J. Limpert, „Nonlinear pulse compression to 51-W average power GW-class 35-fs pulses at 2- μm wavelength in a gas-filled multi-pass cell,“ *Opt. Lett.*, Bd. 47, p. 3511–3514, July 2022.
- [12] P.-A. Chevreuil, F. Brunner, S. Hrisafov, J. Pupeikis, C. Phillips, U. Keller und L. Gallmann, „Water-window high harmonic generation with 0.8- μm and 2.2- μm OPCAs at 100 kHz,“ *Optics Express*, Bd. 29, September 2021.
- [13] L. Barreau, A. D. Ross, S. Garg, P. M. Kraus, D. M. Neumark und S. R. Leone, „Efficient table-top dual-wavelength Strahllinie for ultrafast transient absorption spectroscopy in the soft X-ray region,“ *SCIENTIFIC REPORTS*, Bd. 10, April 2020.
- [14] M. Gebhardt, T. Heuermann, R. Klas, C. Liu, A. Kirsche, M. Lenski, Z. Wang, C. Gaida, J. E. Antonio-Lopez, A. Schulzgen, R. Amezcua-Correa, J. Rothhardt und J. Limpert, „Bright, high-repetition-rate water window soft X-ray source enabled by nonlinear pulse self-compression in an antiresonant hollow-core fibre,“ *LIGHT-SCIENCE & APPLICATIONS*, Bd. 10, February 2021.
- [15] Z. Wang, T. Heuermann, M. Gebhardt, M. Lenski, P. Gierschke, R. Klas, J. Rothhardt, C. Jauregui und J. Limpert, „Nonlinear pulse compression to sub-two-cycle, 1.3 mJ pulses at 1.9 μm wavelength with 132 W average power,“ *Opt. Lett.*, Bd. 48, p. 2647–2650, May 2023.
- [16] M. Seeger, D. Kammerer, J. Blöchl, M. Neuhaus, V. Pervak, T. Nubbemeyer und M. Kling, „49 W carrier-envelope-phase-stable few-cycle 2.1 μm OPCPA at 10 kHz,“ *Optics Express*, Bd. 31, June 2023.