

**TECHNICAL NOTE**

**Strahlenschutzmaßnahmen für  
den Betrieb des UHI-Laser am  
HED Instrument  
(in German)**

April 2014

*Th. Tschentscher  
for the HED group (WP-82)  
at the European XFEL*

European X-Ray Free-Electron Laser Facility GmbH

Albert-Einstein-Ring 19

22761 Hamburg

Germany



---

# Distribution

## **HZDR**

T. Cowan, A. Ferrari

## **DESY**

W. Clement, A. Leuschner, B. Racky, N. Tesch

## **European XFEL**

### *WP-78:*

M. Lederer, G. Priebe

### *WP-82:*

K. Appel, M. Nakatsutsumi, I. Thorpe

### *WP-83:*

A. Madsen

### *CIE:*

W. Tscheu

### *PSPO:*

T. Haas, G. Wellenreuther

### *TS:*

B. Becker-de Mos

### *Safety and Radiation Protection:*

E. Boyd, S. Kozielski

### *Management Board:*

M. Altarelli, C. Burger, S. Molodtsov, A. Schwarz, Th. Tschentscher

---

# Revisions

| <b>Version</b> | <b>Date</b>   | <b>Description</b>               |
|----------------|---------------|----------------------------------|
| 1.0            | 08 April 2014 | 1 <sup>st</sup> complete version |

---

# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Distribution</b> .....   | <b>2</b>  |
| <b>Revisions</b> .....  | <b>3</b>  |
| <b>Vorbemerkung</b> .....   | <b>5</b>  |
| <b>1 Das HED Instrument am European XFEL</b> .....                                | <b>7</b>  |
| 1.1 Auslegung des HED Instruments .....   | 8         |
| 1.2 Optische Laser am HED Instrument .....  | 12        |
| 1.3 Betrieb des HED Instruments.....  | 14        |
| 1.4 Strahlenschutzziele für den Betrieb des UHI Lasers am HED<br>Instrument ..... | 15        |
| <b>2 Erzeugung von Bremsstrahlung mit Ultrakurzpuls-Lasern</b> .....              | <b>16</b> |
| <b>3 Simulationsverfahren, Anordnung der Experimente &amp; Ergebnisse</b> .....   | <b>20</b> |
| 3.1 Simulationen für „parallele“ Geometrie .....                                  | 23        |
| 3.2 Simulationen für „senkrechte“ Geometrie .....                                 | 29        |
| 3.3 Simulationen für erweiterte Strahlparameter .....                             | 32        |
| 3.4 Aktivierung.....  | 34        |
| <b>4 Betriebliche Maßnahmen zum Strahlenschutz</b> .....                          | <b>36</b> |
| 4.1 Bauliche Maßnahmen .....  | 36        |
| 4.2 Organisatorische Maßnahmen.....   | 38        |
| <b>5 Zusammenfassung</b> .....  | <b>39</b> |
| <b>A Abkürzungen</b> .....  | <b>40</b> |
| <b>B Literatur</b> .....  | <b>41</b> |
| <b>Danksagung</b> .....   | <b>42</b> |

---

# Vorbemerkung

Das High Energy Density Physics (im folgenden HED) Instrument, als eines der wissenschaftlichen Instrumente der European X-Ray Free-Electron Laser (im folgenden European XFEL) Anlage, nutzt die Röntgen-Freie-Elektronen-Laserstrahlung (im folgenden FEL-Strahlung), welche in den Undulatoren der Anlage erzeugt wird. Diese Röntgenstrahlung und die sich daraus ergebenden baulichen und organisatorischen Maßnahmen zum Strahlenschutz sind Teil des Planfeststellungsbeschlusses für den European XFEL und sind nicht Bestandteil dieses Berichts.

- ❗ Strahlenschutzmaßnahmen betreffend Röntgenstrahlung, die mittels des Elektronenbeschleunigers des European XFEL erzeugt wird, sind nicht Bestandteil dieses Berichts.

Während der Definition und Auslegung des HED Instruments, in der Aufbau-phase des European XFEL, entstand eine zusätzliche Anforderung, die den Einbau eines Ultrakurzpuls-Laser am HED Instrument erfordert. Leistungsmerkmal dieses zusätzlichen Lasers ist eine Spitzenleistung von 100 TW am Probenort bei einer Wiederholrate von bis zu 10 Hz. Dieser Laser soll für die Erzeugung extrem dichter Plasmen eingesetzt werden, welches mittels des Röntgen-FEL-Strahls untersucht werden soll. Diese Untersuchungen werden von der wissenschaftlichen Nutzergemeinde des HED Instruments als extrem wichtig eingestuft.

Am HED Instrument werden insgesamt mehr als drei optische Lasersysteme zur Verfügung stehen. Aus im Abschnitt 1.2 beschriebenen Gründen ist lediglich das UHI-Lasersystem (UHI: Ultra High Intensity) relevant, da lediglich dieses System Bremsstrahlung erzeugen kann.

- ❗ Dieser Bericht befasst sich ausschließlich mit den Maßnahmen zum Strahlenschutz, die sich aus der Verwendung des UHI-Lasers und der dabei entstehenden Bremsstrahlung im Röntgenbereich ergeben.

Der UHI-Laser, sowie dessen Betrieb, unterliegt nicht dem Planfeststellungsbeschluss für den European XFEL, sondern stellt eine zusätzliche Einrichtung im Verantwortungsbereich der European X-Ray Free-Electron Laser GmbH (im folgenden European XFEL GmbH) mit Sitz in Schenefeld dar.

---

# 1 Das HED Instrument am European XFEL

In der Metropolregion Hamburg entsteht derzeit mit dem European XFEL eine Forschungseinrichtung der Superlative. 27.000 Lichtblitze pro Sekunde und einer Brillanz, die milliardenfach höher ist als die der besten Röntgenstrahlungsquellen herkömmlicher Art, werden völlig neue wissenschaftliche Möglichkeiten eröffnen. Forschergruppen aus der ganzen Welt können Strukturen im Nanobereich, ultraschnelle Prozesse und extreme Materiezustände untersuchen; sie werden dreidimensionale Bilder von Viren und Proteinen erzeugen und chemische Reaktionen filmen. European XFEL zählt zu den größten und ambitioniertesten Forschungsprojekten in Europa. Derzeit beteiligen sich 12 europäische Länder an diesem Projekt: Dänemark, Deutschland, Frankreich, Griechenland, Italien, Polen, Russland, Schweden, die Schweiz, die Slowakei, Spanien und Ungarn. Der European XFEL wird von einer eigenständigen Forschungsorganisation, der European X-Ray Free Electron Laser Facility GmbH, im folgenden kurz European XFEL GmbH, gebaut und betrieben. Die Gesellschaft arbeitet nicht gewinnorientiert und arbeitet eng mit dem Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg Bahrenfeld und weiteren Einrichtungen weltweit zusammen. Die Betriebsaufnahme der Anlage ist für 2016 vorgesehen. Der European XFEL bietet einzigartige Möglichkeiten für Spitzenforscherinnen und Spitzenforscher aus der ganzen Welt. Die Anlage ermöglicht neue Erkenntnisse in den verschiedensten wissenschaftlich-technischen Bereichen, darunter Medizin, Pharmazie, Chemie, Materialwissenschaften, Nanotechnologie, Energietechnik und Elektronik.

Ein wichtiges Forschungsgebiet ist der Zustand angeregter Materie, der bei extremen Temperaturen, Dichten und Drücken erreicht wird. Wenn dabei Atome ionisiert werden und einige oder alle ihrer Elektronen verlieren, spricht man von einem Plasma. Am HED-Instrument des European XFEL werden Wissenschaftler Plasmen erzeugen, die im Inneren von Planeten vorkommen oder bei der Geburt von Sternen entstehen, und mit FEL-Röntgenblitzen

erforschen. Die Daten solcher Experimente werden Astrophysiker nutzen können, um ihre Theorien zur Entstehung und zum gegenwärtigen Zustand der Erde zu überprüfen. Außerdem gewinnen die Forscherinnen und Forscher neue Erkenntnisse über die Bedingungen im Inneren von schwereren Planeten und über die Bildung und Entwicklung unseres Sonnensystems.

European XFEL erhält im Bereich des HED Instruments große Beiträge externer Partner. Am wichtigsten ist hier das HIBEF Nutzerkonsortium, das vom Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf (HZDR) koordiniert wird. Das HZDR besitzt große Erfahrung auf dem Gebiet der Forschung mit Ultrakurzpuls-Lasern mit sehr hoher Intensität und stellt somit für European XFEL einen wichtigen Partner dar was Auslegung, Betrieb und Experimentieren mit derartigen Lasern angeht. Ein weiterer wichtiger Partner ist das DESY in Hamburg Bahrenfeld.

---

## 1.1 Auslegung des HED Instruments

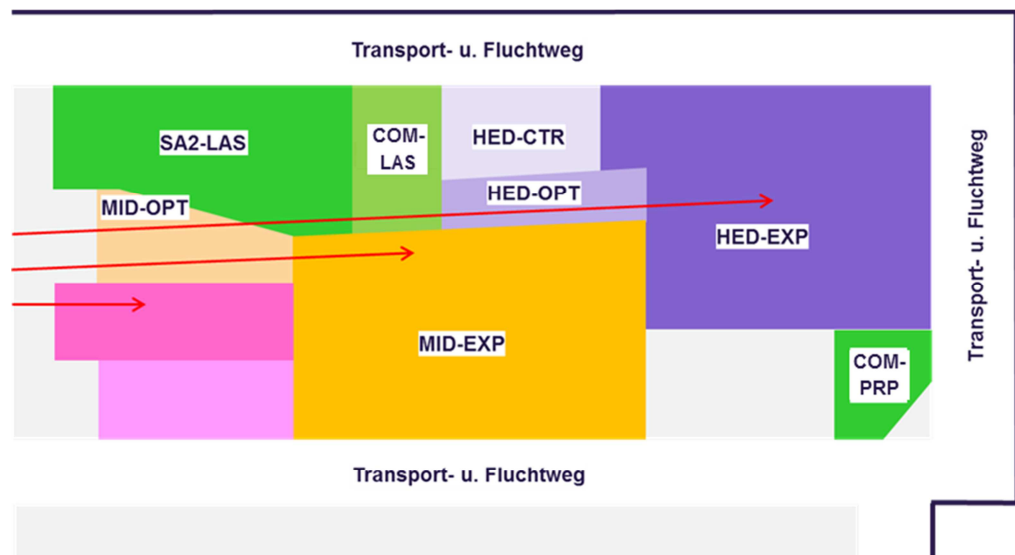
Die Experimentierhalle XHEXP1 hat eine lichte Weite von 90 m und eine Tiefe entlang des Röntgen-FEL-Strahls von etwa 46 m. Die Hallenhöhe beträgt ~12 m, wobei die obersten 4 m mit technischer Infrastruktur belegt sind. Darunter sind zwei Hallenkrane angeordnet, die etwa 60% der Hallenfläche überdecken. Im Bereich des HED-EXP Raumes ist kein Hallenkran vorhanden. Oberhalb der Experimentierhalle befindet sich das Labor- und Bürogebäude der European XFEL GmbH. In der Südwestecke der Halle befindet sich der 7 m x 4 m große Kranschacht, durch den große Komponenten in die Halle gekrant werden können.

Das HED Instrument ist eine Experimentiereinrichtung im Hauptexperimentiergebiet SASE2 und liegt in der südwestlichen Ecke der Experimentierhalle XHEXP1 des European XFEL. Die Röntgen-FEL-Strahlung erreicht das Instrument durch den Tunnel XTD6 vom etwa 1000 m entfernten Undulator SASE2. In diesem Hauptexperimentiergebiet sind neben dem HED Instrument sind noch zwei weitere Experimentiereinrichtungen geplant, das MID Instrument sowie ein noch zu bestimmendes Instrument. Die Wände und

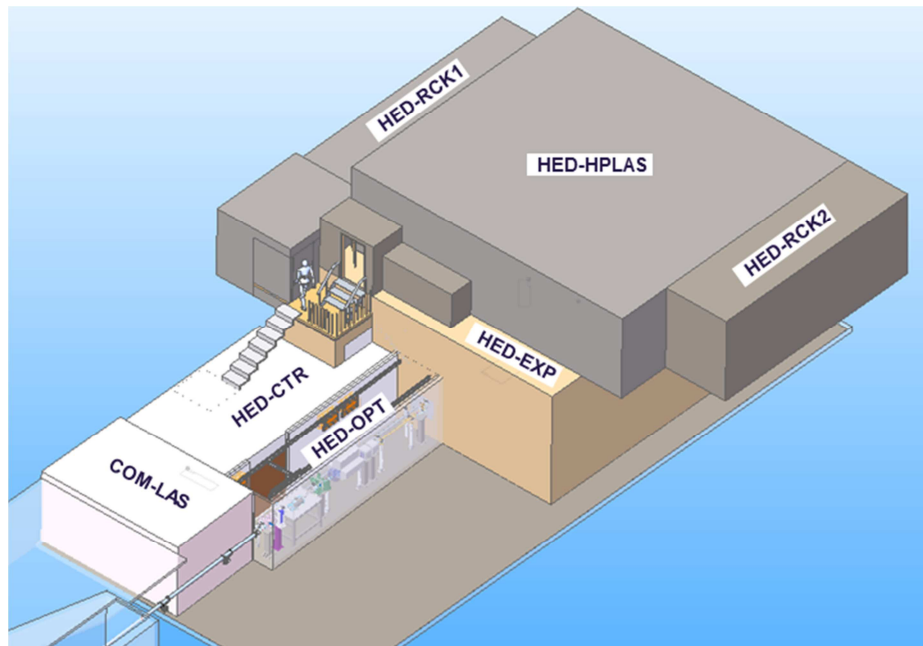


Decken der Experimentier- und Laserräume werden entsprechend den jeweiligen Anforderungen des Strahlenschutzes und des Laserschutzes ausgeführt. Die Abbildung 1 zeigt die Aufteilung der Grundfläche in diesem Bereich. Um den SASE2 Hauptexperimentierbereich liegt ein Flucht und Rettungsweg, der auch als Transportweg genutzt wird.

Direkt oberhalb der in Abbildung 1 gezeigten Ebene befinden sich Räume für elektrische Anlagen sowie ein Laserraum. Das HED Instrument besteht im Wesentlichen aus vier Räumen. In HED-OPT stehen die röntgen-optischen Elemente für die Definition der einfallenden Röntgen-FEL-Strahlung. Die Experimente mit Röntgen-FEL- und optischer Laserstrahlung werden in HED-EXP durchgeführt. Oberhalb des Experimentierraums HED-EXP liegt der HED-HPLAS Raum für die Hochenergie-Laser des HED Instruments. Die Bedienung und Kontrolle des HED Instruments, einschließlich der optischen Laser, erfolgt vom Raum HED-CTR aus. Die Abbildung 2 zeigt alle Räume, die direkt dem HED Instrument zugeordnet sind. Zusätzlich gibt es zwei Räume für elektrische Anlagen (HED-RCK1 und HED-RCK2), einen gemeinsam betriebenen Instrument-Laserraum COM-LAS, sowie den Probenpräparationsraum COM-PRP, die direkt an die Räume des HED Instruments angrenzen.



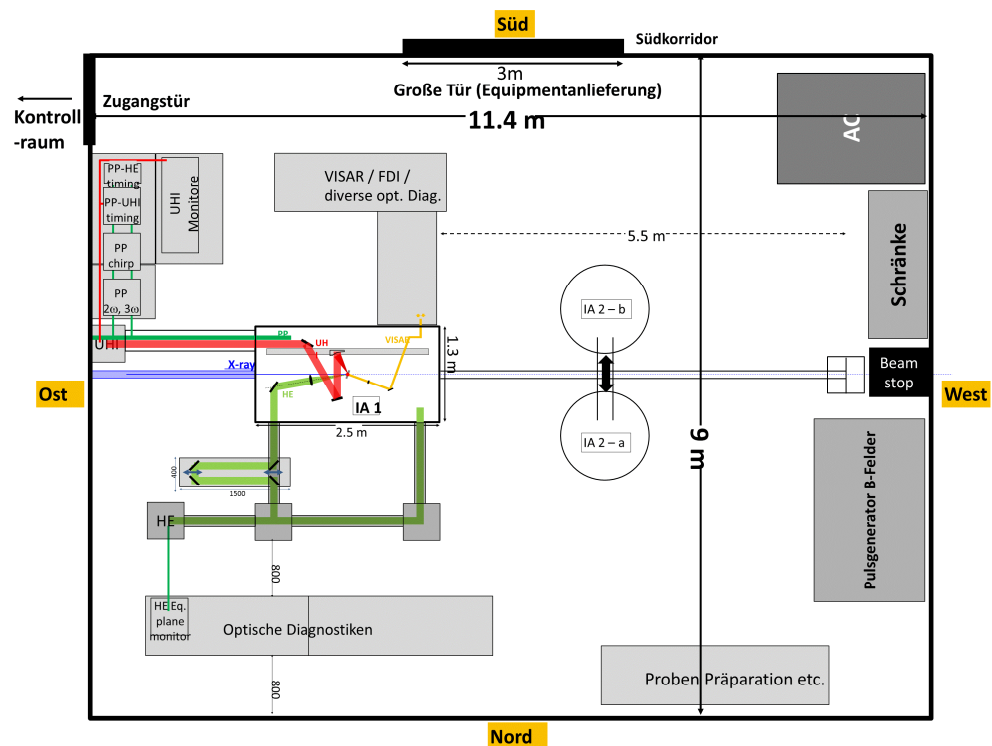
**Abbildung 1:** Anordnung der Räume für die HED und MID Instrumente im Hauptexperimentiergebiet SASE2 auf Hallenbodenniveau



**Abbildung 2:** Räume des HED Instruments in 3D-Darstellung.

Der Experimentierraum HED-EXP hat eine innere lichte Größe von 11.4 m entlang des Röntgen-FEL-Strahls (Ost-West-Richtung) und 9 m in Süd-Nord-Richtung. Der Raum ist mit 0.5 – 1.0 m starken Wänden aus Schwerbeton umgeben, die entsprechend dimensioniert wurden, um auf der Außenseite ein entsprechend niedriges Strahlungsniveau von weniger als 0.5  $\mu\text{Sv/h}$  zu gewährleisten (Details siehe Kapitel 3). Die Verwendung von Schwerbeton mit einer Dichte von min. 3.75  $\text{t/m}^3$  folgt aus der Anforderung die Flächennutzung in XHEXP1 zu optimieren. Die 0.88 m starke Decke ist aus Normalbeton (Dichte 2.35  $\text{t/m}^3$ ) wegen der besseren statischen und baodynamischen Eigenschaften. Auf dieser Decke befindet sich direkt der Laserraum HED-HPLAS, in dem die UHI und HE Lasersysteme (siehe Abschnitt 1.2) aufgebaut sind. Die Laserstrahlung beider Systeme wird mittels zweier, getrennter Strahlführungen durch die Decke in den Raum HED-EXP geführt. In HED-EXP finden die Experimente unter Nutzung der Röntgen-FEL- und optischen Laserstrahlung statt. Dazu gibt es einen großen Vakuumentank, der die Proben, die Fokussieroptiken für den UHI Laser, sowie die Röntgenspektrometer und -detektoren beinhaltet. Um diesen Tank herum sind verschiedene Apparaturen und Tische für Laserstrahlführung, Diagnostik und Röntgen-Strahlführung angeordnet. Abbildung 3 zeigt eine Aufsicht des HED-EXP Raumes.

Zugang zu HED-EXP erfolgt entweder durch ein Labyrinth in der Südostecke oder ein Tor auf der Südseite des Raumes. Während das Tor zum Transport großer Komponenten vorgesehen ist, wird der Zugang während der Durchführung von Experimenten und bei Betrieb der Lasersysteme, sowie zum Setzen des Strahlenschutzinterlocks nur über das Labyrinth erfolgen. Dieses fungiert gleichzeitig als Laserschleuse. Die lichte Öffnung des Tores beträgt 3 m x 2.5 m in Breite und Höhe. Das Tor selbst fährt auf einer im Boden eingelassenen Schiene und hat einen Überlapp von 0.5 m an den beiden Seiten und oberhalb der Öffnung. Für den Abstand zwischen Wand und Tor sind maximal 5 mm definiert. Am Boden hat das Tor einen Abstand von ebenfalls maximal 5 mm. Im oberen Bereich des Labyrinths (2.5 – 3.5 m oberhalb des Bodens) werden Kabel sowie Medien zugeführt. Zwei weitere Schikanen mit einer Fläche von 0.5 m x 0.5 m befinden sich in den südwestlichen und nordwestlichen Ecken des Raumes in einer Höhe von 3.5 m.



**Abbildung 3:** Aufsicht HED-EXP Experimentierraum.

Um den Raum HED-EXP, in dem die Laser-Experimente stattfinden werden, herum befinden sich an zwei Seiten Transportwege, an einer Seite zwei

weitere Experimentierräume, und an der vierten Seite technische Installationen. Der Laserraum HED-HPLAS oberhalb von HED-EXP kann bei eingeschaltetem Laser nur von unterwiesenen Experten betreten werden. Der Zutritt zu den Laserräumen wird mittels eines elektronischen Zugangssystems geregelt. Räume, in denen sich Arbeitsplätze befinden und sich Personen über mehrere Stunden aufhalten können, sind der HED-CTR Raum an der Südostecke, der Probenpräparationsraum COM-PRP an der Nordwestecke, sowie der Experimentierraum MID-EXP an der Nordostseite von HED-EXP.

---

## 1.2 Optische Laser am HED Instrument

Der Großteil wissenschaftlicher Experimente am HED Instrument wird neben der Röntgen-FEL-Strahlung optische Laserstrahlung im Infrarot oder sichtbaren Spektralbereich nutzen. Um die verschiedensten Anforderungen der Experimente erfüllen zu können ist es dabei notwendig drei verschiedene Lasersysteme bereitzustellen.

Der UHI-Laser wird eine Leistung von bis zu 100 TW (3 J, 30 fs) an der Probe bei einer Repetitionsrate von bis zu 10 Hz liefern. Werden Laserpulse dieser Leistungsklasse fokussiert, können Intensitäten von einigen  $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup> erreicht werden, und die Wechselwirkung des Laserpulses mit dem Material der Probe wird als relativistisch bezeichnet. Die auftretenden Feldstärken ionisieren die Atome und beschleunigen die freien Elektronen relativistisch. Bei diesen Experimenten geht es nicht um die Erzeugung von Elektronen- oder Teilchenstrahlen aus dem Laserpuls, sondern es sollen die mikroskopischen Vorgänge in den bestrahlten Materialien im Detail untersucht werden, um auf diese Weise die Erzeugung und Energieverteilung der laser-basierten Teilchenbeschleunigung für Anwendungen in anderen Anlagen (z.B. für medizinische Bestrahlungen) zu optimieren. Die hochenergetischen Elektronen sind verantwortlich für die Erzeugung der Bremsstrahlung, sowie in sehr geringem Maße für die Erzeugung von Protonen mittels Ionisation von Wasserstoffatomen. Das Energiespektrum sowie die Menge der Elektronen hängen dabei von der Intensität des optischen Lasers ab, wie in Kapitel 2 beschrieben wird.

Das UHI-Lasersystem wird ein überwiegend kommerziell gefertigter Laser basierend auf dem CPA Verstärker-Prinzip sein. Dabei werden die Laserpulse zeitlich gestreckt, dann verstärkt und abschließend wieder komprimiert. Der Kompressor steht im Laserraum HED-HPLAS und ist, genau wie der Strahltransport, ausgelegt für einen Strahldurchmesser von ~100 mm. Dieser Wert ist notwendig, um die Intensität soweit zu reduzieren, dass die Optiken für den Strahltransport nicht vom Laserstrahl beschädigt werden. Erst das letzte optische Element in der Experimentierkammer fokussiert den Laserstrahl auf der Probe zu wenigen Quadratmikrometern und erzeugt so die erforderlichen Intensitäten. Das UHI-Lasersystem ist so ausgelegt, dass eine Spitzenleistung von 100 TW an der Probe erreicht werden kann, bei einer maximalen Repetitionsrate von 10 Hz.

Für bestimmte Untersuchungen könnte es langfristig erforderlich werden, höhere Laserleistungen an der Probe bereitzustellen. Dazu müsste das UHI Lasersystem um eine zusätzliche Verstärkerstufe erweitert werden, was im Rahmen der baulichen und infrastrukturellen Gegebenheiten möglich ist. Mit diesen Erweiterungen könnten Spitzenleistungen von einigen 100 TW bis zu 1000 TW an der Probe erreicht werden. Höhere Laserleistungen an der Probe bedeuteten eine Verschiebung des Energiespektrums zu höheren Energien und können auch die Anzahl an beschleunigten Elektronen erhöhen. Allerdings würde man den UHI Laser in diesen höheren Laserleistungen bei einer 10- bis 100-fach reduzierten Repetitionsrate betreiben und so die mittlere Leistung beschränken. Erste Betrachtungen zur Abschirmung für diesen erweiterten Parameterbereich haben stattgefunden (siehe Abschnitt 3.3). Es ist jedoch festzuhalten, dass eine solche Erweiterung des UHI-Lasersystems lediglich eine langfristige Option darstellt.

Der sich ebenfalls in HED-HPLAS befindende HE-Laser (HE: High Energy) wird in der Lage sein 100 J Laser-Pulse mit einer Repetitionsrate bis zu 10 Hz liefern. Dabei wird eine Pulsdauer von etwa 1 – 20 ns, sowie die einstellbare zeitliche Pulsform, es ermöglichen, Materie mittels Laserpuls zu komprimieren und auf diese Weise Systeme zu untersuchen wie sie im Erdinneren oder in Exoplaneten vorkommen. Wegen der langen Pulse ist die Spitzenintensität in diesen Pulsen zu gering ( $<10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>) um Bremsstrahlung zu

erzeugen und wir werden dieses Lasersystem daher nicht weiter berücksichtigen.

Der PP-Laser (PP: Pump-Probe) ist als einziges Laser-System in der Lage dieselbe Sequenz von Laser-Pulsen bereitzustellen, die auch der Röntgen-FEL liefert. Dies bedeutet Repetitionsraten bis zu 4.5 MHz, sowie das 10 Hz ‚burst‘ Raster, mit einer Anwendung insbesondere in Anregung-Abfrage Experimenten an reversiblen Prozessen. Dabei können Pulsenergien von bis zu einigen mJ bei Pulsdauern von 15 – 75 fs oder von etwa 100 mJ bei einer Pulsdauer von 1 ps erreicht werden. Da bei diesen Pulsenergien keine Bremsstrahlung erzeugt werden kann, werden wir auch dieses Lasersystem nicht weiter berücksichtigen.

---

## 1.3 Betrieb des HED Instruments

Experimente am HED Instrument werden im Allgemeinen von externen Gruppen beantragt und durchgeführt. Dabei wird die Durchführung des Experiments durch das Personal der European XFEL GmbH maßgeblich unterstützt. So kann der Betrieb der Lasersysteme nur durch entsprechend qualifiziertes Personal der European XFEL GmbH gewährleistet werden. Experimente werden etwa 3-6 Tage dauern und es ist vorgesehen, jedem Instrument 12 Stunden Betrieb mit Röntgen-FEL-Strahlung pro Tag zur Verfügung zu stellen. Während der restlichen 12 Stunden können Umbauten oder Datenauswertungen vorgenommen werden.

Die Experimente laufen so ab, dass zunächst Justage- und Kalibriermessungen durchgeführt werden und erst danach die eigentlichen Messreihen durchgeführt werden. Nur während der Durchführung der Messreihen kann die maximale Repetitionsrate von 10 Hz über längere Zeiten erreicht werden. Somit ist davon auszugehen, dass über die Dauer eines Experiments eine mittlere Repetitionsrate deutlich unterhalb von 10 Hz genutzt werden wird. Wir gehen von maximal 1 Hz aus. Selbst während der Messreihen kann die 10 Hz Rate nur für begrenzte Zeiträume eingesetzt werden, da jeder Puls eine frische Probe benötigt und Probenräger mit etwa 1000 Proben bereits als anspruchsvoll anzusehen sind. Mit einem automatisierten Wechsel des

Probenträgers wäre die Untersuchung von Proben auf bis zu 10 Trägern pro Stunde im Bereich des Möglichen. Dies entspräche etwa 10.000 Proben pro Stunde oder  $\sim 3$  Hz im Mittel.

In den Abschätzungen zur Strahlendosisleistung in Kapitel 3 gehen wir konservativ von einem Betrieb des UHI Lasers bei 10 Hz über einen Zeitraum von 4 Stunden aus. Es werden 1000 Betriebsstunden des UHI Lasers pro Jahr angesetzt, was in etwa 50% der gesamt zur Verfügung stehenden Zeit für Experimente am HED Instrument entspricht.

---

## 1.4 Strahlenschutzziele für den Betrieb des UHI Lasers am HED Instrument

Für den Betrieb des European XFEL ist die Experimentierhalle XHEXP1 als betrieblicher Überwachungsbereich ausgelegt. Die sich in der Halle aufhaltenden Mitarbeiter und Nutzer werden als beruflich nicht strahlenexponiert eingestuft. Das Strahlenschutzziel für diese Personengruppe ist ein Jahresgrenzwert von 1 mSv/Jahr. Bei 2000 Stunden Arbeitszeit und einer typischen Aufenthaltsdauer von  $\sim 4$  Stunden ergibt sich das Schutzziel, die Dosisleistung unterhalb von  $2 \mu\text{Sv}$  über einen Zeitraum von 4 Stunden zu halten. Dies entspricht einem Mittelwert von  $<0.5 \mu\text{Sv/h}$ . Für den Betrieb des UHI Lasers gilt exakt dasselbe Strahlenschutzziel.

Hier ist zu berücksichtigen, dass die Expositionen beider Strahlungsquellen, des Röntgen-FEL-Strahls sowie der Bremsstrahlung durch den UHI-Laser, addiert werden müssen. Die im Folgenden für die Bremsstrahlung diskutierte Abschirmung ist allerdings mehr als fünf Zehntelwertschichtdicken stärker als für die Abschirmung der Röntgenstrahlung notwendig. Daher wird auf die Betrachtung der Röntgen-FEL-Strahlung in diesem Bericht verzichtet.

---

## 2 Erzeugung von Bremsstrahlung mit Ultrakurzpuls-Lasern

Die relativ neuartige Methode der Erzeugung und Beschleunigung von Elektronen nutzt die Wechselwirkung ultrakurzer Laserpulse mit festen Körpern oder Gasen aus. Dabei können elektrische Felder in der Größenordnung von TV/m ( $\text{MV}/\mu\text{m}$ ) die Elektronen auf sehr kurzen Distanzen stark beschleunigen. Im Gegensatz zu konventionellen Beschleunigern ist die primäre Energiequelle der einfallende Laserpuls. Auch wenn diese Pulse extrem hohe Spitzenintensitäten von bis zu  $10^{22} \text{ W}/\text{cm}^2$  erreichen können, ist die mittlere optische Strahlleistung zumeist auf wenige 10 Watt beschränkt: Im vorliegenden Fall auf maximal 30 W (3 J Pulsenergie bei 10 Hz oder 30 J Pulsenergie bei 1 Hz). Die wissenschaftlichen Untersuchungen in diesem Bereich und unter Ausnutzung des UHI-Lasersystems betreffen die Transportprozesse der Elektronen, sowie die Eigenschaften des heißen Elektronen-Plasmas innerhalb der Festkörper-Probe. Die nachfolgend beschriebenen Prozesse der Erzeugung von Bremsstrahlung und die eventuelle Erzeugung von Ionen sind sekundäre Prozesse, die nicht primär Ziel der Untersuchungen sind.

Die Untersuchungen am HED Instrument werden ausschließlich an Festkörper-Proben durchgeführt. Bei dieser Art der Wechselwirkung kommt es zu einem Energieübertrag in heiße, gerichtete Elektronen, die durch den Festkörper propagieren. Beim Auftreffen des fokussierten Laserpulses auf den Festkörper wird das Material bereits vor Erreichen der Maximalintensität ionisiert, typischerweise einige 10-100 ps vorher. Insofern trifft der Laserpuls gar nicht direkt auf den Festkörper, sondern auf eine dünne Plasmaschicht in die er wegen der geringeren Dichte eindringen kann. Hier wechselwirkt der Laserpuls insbesondere mit den freien Elektronen, die wesentlich leichter sind als die Ionen. Das schnell oszillierende elektrische Feld des Laserpulses beschleunigt die Elektronen auf relativistische Energien und durch Feldgradienten und interne Magnetfelder werden die Elektronen senkrecht zur Oberfläche in den Festkörper hinein beschleunigt. Ab einer gewissen Dichte kann der Laserpuls nicht weiter in den Festkörper hinein propagieren und wird reflek-



tiert. Von diesem Punkt an ist die Propagation der Elektronen durch die eigene Wechselwirkung mit dem Festkörper bestimmt. Die Energieverteilung der Elektronen ist in guter Näherung exponentiell abfallend

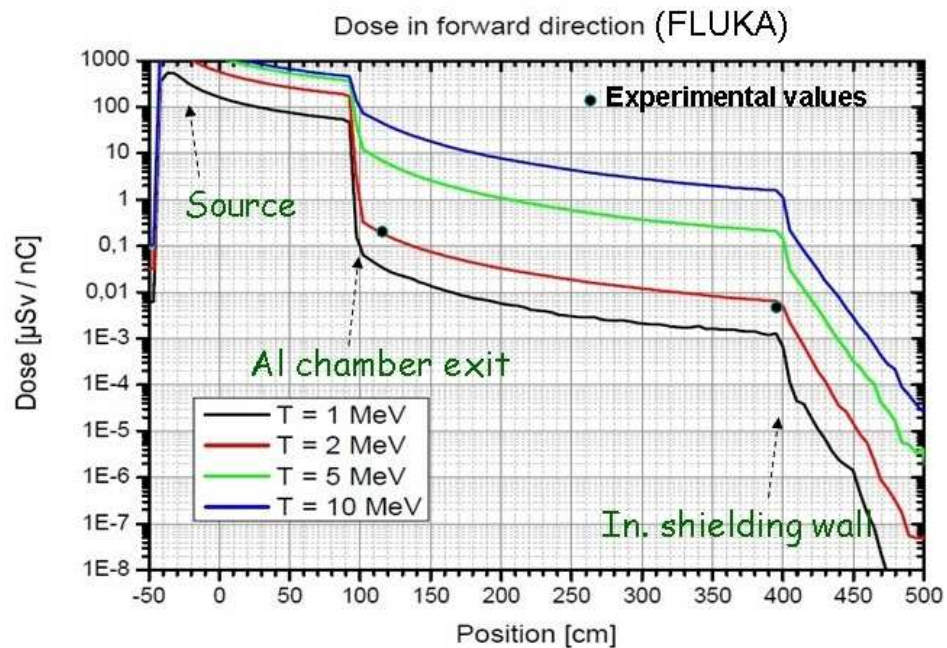
$$\frac{dN}{dE} = \frac{N_{ges}}{T_{el}} \times e^{-E/T_{el}} \quad (1)$$

und wird durch eine mittlere Energie bzw. „Temperatur“  $T_{el}$  charakterisiert.  $T_{el}$  kann nach Kluge et al. [1] simuliert werden. Das in [1] benutzte Modell ist gegenwärtig am genauesten bzgl. der zu Grunde liegenden physikalischen Abläufe und bzgl. des Vergleichs mit experimentellen Daten. Ebenfalls entsprechen die Ergebnisse dieses Modells denen von spezialisierten und aufwändigen Simulationsverfahren (sogenannte Particle-in-cell Simulationen). Diese Beschreibung gilt jedoch nur für ebene Proben und eine gut charakterisierte, dünne Plasmaschicht. Letzteres bedingt sich aus dem zeitlichen Profil des Laserpulses (hoher zeitlicher Kontrast) und erfordert eine genaue Justage sowie permanente Kontrolle des UHI-Lasersystems.

Die zweite charakteristische Größe ist die Ladung  $Q$ , bzw. die Anzahl  $N$  beschleunigter Elektronen. Die Energie des Laserpulses wird nur partiell an die Elektronen übertragen und die Konversionseffizienz beträgt typischerweise  $\sim 10\%$ . Somit ergibt sich eine mittlere primäre Elektronen-Strahlleistung von 3.2 W. Die Gesamtzahl der Elektronen kann aus der Energieerhaltung berechnet werden, wobei als Energie der Elektronen das Produkt  $N \times T_{el}$  angenommen wird. Bei einer Laserspitzenleistung von 100 TW können Temperaturen  $T_{el} = 2$  MeV und Ladungen  $Q = 0.16 \mu\text{C}$  erreicht werden (vgl. Tabelle 1).

Um die tatsächlich anfallende Dosis experimentell bestätigen zu können wurden am DRACO Lasersystem am HZDR in Dresden Messungen der Dosisleistung durchgeführt. Die DRACO Laserparameter für diese Tests waren 5 J Pulsenergie, 30 fs Pulsdauer (150 TW),  $30 \mu\text{m}^2$  Fokusgröße, 80% der Laserenergie im Fokus und entsprechen in etwa denen der Basisausstattung des UHI-Lasers. Der Interaktionspunkt befindet sich im inneren einer Aluminium-Vakuumkammer mit 3 cm dicken Wänden. Insgesamt wurden über 650 Laserschüsse bei ähnlichen Bedingungen durchgeführt, wobei die Dosis an unterschiedlichen Stellen im Experimentierraum gemessen wurde. Als Target wurden dickere Folien als üblich eingesetzt, da diese eine höhere

Dosis verursachen und auf diese Weise eine konservative Abschätzung ermöglichen. Abbildung 4 zeigt einen Vergleich von Messdaten und den Ergebnissen der FLUKA-Simulationsrechnungen für verschiedene Elektronentemperaturen  $T_{el}$ . Es zeigt sich, dass die gemessenen Werte sehr genau mit den Simulationsrechnungen übereinstimmen.



**Abbildung 4:** Darstellung der Dosis pro Laserpuls in Abhängigkeit des Abstands zum Wechselwirkungspunkt für Experiment und FLUKA-Simulation. Die Werte wurden auf die Ladung im Elektronenpulse normalisiert.

Die experimentell bestimmte Dosis entspricht dabei einer einer Konversions-effizienz von 10%. Zusätzlich konnte in diesen Untersuchungen die Raumwinkelverteilung relativ zum einfallenden Laserstrahl bestimmt werden. Es zeigte sich, dass die Elektronen hauptsächlich in einen Vorwärtskegel mit einem Öffnungswinkel von etwa  $45^\circ$  emittiert werden, was auch in guter Übereinstimmung steht mit Messungen von anderen Laser-Systemen, beispielsweise am SLAC in Kalifornien.

Die beschleunigten Elektronen propagieren durch die Festkörper-Probe (Dicken von wenigen  $\mu\text{m}$  bis zu einigen  $100 \mu\text{m}$ ) und kollidieren dabei mit den Atomen, bzw. werden absorbiert. Bei diesem Prozess wird stark gerichtete Bremsstrahlung erzeugt. Ein geringer, meist energiereicher Teil der Elektro-

nen kann die Probe an der Rückseite verlassen, wodurch sich die Probe auflädt und sich ein elektrisches Feld mit Feldstärken bis zu TV/m an der rückwärtigen Oberfläche aufbaut. Dieses Feld verhindert die Emission weiterer Elektronen und ermöglicht auf der Oberfläche adsorbierte Atome zu ionisieren und nachfolgend zu beschleunigen. Besonders relevant ist hier die Erzeugung und Beschleunigung von Protonen aus an der Probenoberfläche adsorbierten Wasserstoffatomen. Die Energieverteilung derartig beschleunigter Protonen ist kontinuierlich und besitzt eine Maximalenergie. Für die 100 TW Laserpulse wurde eine Maximalenergie von etwa 15 MeV simuliert [1], für 1000 TW Pulse ergeben sich 50 MeV. Die Gesamtenergie in den Protonen kann dabei bis zu 1% der ursprünglichen Laserenergie betragen.

**Table 1:** Parameter des UHI Lasers sowie charakteristische Daten der erzeugten Elektronenverteilungen.

| Parameter                             | Grundausrüstung                   | Erweiterung                       |
|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Pulsenergie an Probe                  | 3J                                | 30 J                              |
| Pulsdauer                             | 30 fs                             | 30 fs                             |
| Spitzenleistung an Probe              | 100 TW                            | 1000 TW                           |
| Fokusgröße an Probe (80%)             | 5 $\mu\text{m}$                   | 5 $\mu\text{m}$                   |
| Spitzenintensität                     | $5 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ | $5 \times 10^{21} \text{ W/cm}^2$ |
| Repetitionsrate (max.)                | 10 Hz                             | 0.1 – 1 Hz                        |
| Elektronentemperatur                  | 2 MeV                             | 5 MeV                             |
| Ladung pro Puls                       | 0.16 $\mu\text{C}$                | 0.8 $\mu\text{C}$                 |
| Mittlere Leistung im Elektronenstrahl | 3.2 W                             | 0.4 – 4 W                         |

---

### 3 Simulationsverfahren, Anordnung der Experimente & Ergebnisse

Die Berechnungen der Strahlungsfelder wurden von Dr. Anna Ferrari am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) durchgeführt und basieren auf der FLUKA Monte Carlo Methode [2]. Das HZDR betreibt seit einigen Jahren Hochleistungs-Lasersysteme ähnlich zu den hier verwandten und hat weitgefächerte Erfahrungen mit der Simulation der physikalischen Vorgänge [1], der Simulation der auftretenden Strahlendosen [2], sowie dem experimentellen Betrieb derartiger Systeme [3]. Das HZDR hatte somit die Möglichkeit, physikalische Modelle, statistische Simulationen und Experimente für gleiche Parametersätze durchzuführen und miteinander abzugleichen. Dieser Abgleich ermöglicht eine besonders gute Verlässlichkeit der hier beschriebenen Simulationsrechnungen. Das HZDR hat kürzlich die Genehmigung für den Betrieb eines 150 TW Lasersystems erhalten, allerdings mit dem verschiedenen Anwendungsbereich der Erzeugung und Beschleunigung von hochenergetischen Teilchenstrahlen. Bei der gesamten Vorbereitung, Planung, Durchführung und dem späteren Betrieb hat und wird die European XFEL GmbH eng mit dem HZDR zusammen arbeiten.

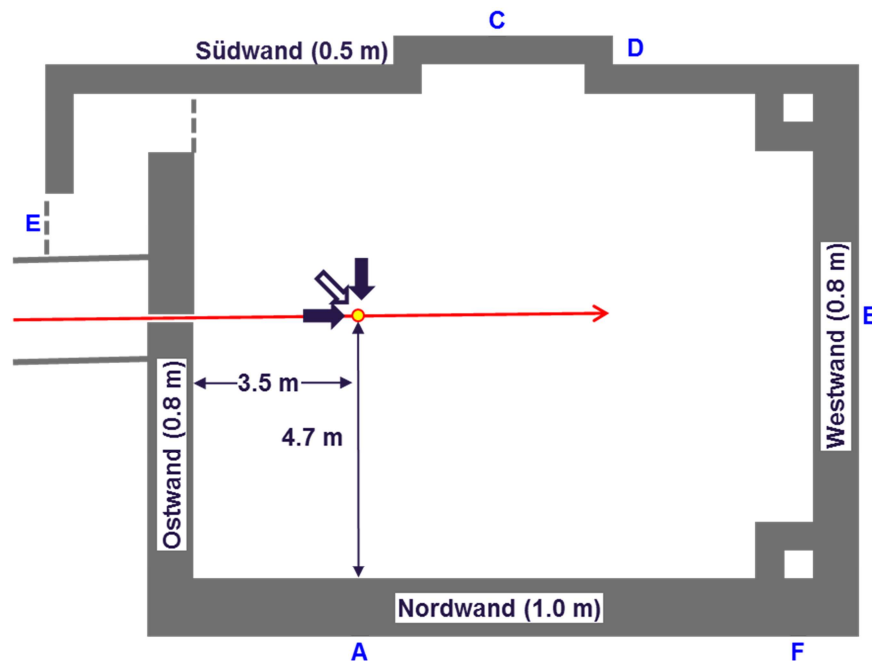
Die Simulationen starten mit einem Elektronenpuls mit einer Maxwell-Boltzmann- Energieverteilung und  $kT=T_{el}=2$  MeV sowie einer Ladung von  $Q=0.16$   $\mu\text{C}$  (vergleiche Tab. 1). Zusätzlich wurde bestimmte Simulationen für die Parameter  $kT=T_{el}=5$  MeV und  $Q=0.8$   $\mu\text{C}$  durchgeführt, die einer zukünftigen Erweiterung des Lasersystems entsprechen. Die Elektronenstrahlen laufen parallel zur Richtung des Laserstrahls mit einem Öffnungswinkel von 45 Grad. Es wurden zwei Experiment-Geometrien betrachtet, die das Spektrum der am HED Instrument möglichen Experimente unter Nutzung des UHI-Lasers abdecken (siehe Abbildung 5). Die erste Geometrie „parallel“ benutzt einen Elektronen-Strahl, der parallel zum Röntgen-FEL-Strahl verläuft und somit ein Maximum der Bremsstrahlungsemission in Richtung West hat. Die

zweite Geometrie „senkrecht“ benutzt einen Elektronen-Strahl, der senkrecht zum Röntgen-FEL-Strahl verläuft und ein Maximum der Bremsstrahlungsemission in Richtung Nord hat. In Experimenten können auch Laserpuls-Einfallrichtungen benutzt werden, deren Maxima der Bremsstrahlungsemission zwischen diesen beiden Richtungen liegen. Aufgrund der Anordnung des HED-EXP Raumes ist davon auszugehen, dass die für die Simulation gewählten Geometrien diese Fälle mit einschließen.

Für die Rechnung in beiden Geometrien trifft der Elektronenstrahl auf einen 20 µm dicken Gold-Festkörper als Streuobjekt am Wechselwirkungspunkt, der dem Ort der Probe im Experiment entspricht. Der Wechselwirkungspunkt liegt in beiden Geometrien 3.5 m von der östlichen Wand, 4.3 m von der südlichen Wand und 1.4 m oberhalb des Bodens. Die nachfolgend dargestellten Simulationsergebnisse sind das Ergebnis einer Iteration und berücksichtigen bereits die vollständige Geometrie des geplanten HED-EXP Raumes. Es wurden Wandstärken von 1.0, 0.8 und 0.5 m gewählt für die Nord-, Ost- und West-, und Südwände. In den Simulationen wurden geringfügig abweichende mittlere Dichten für Beton angenommen, als sie in den aktuellen Baubeschreibungen aufgeführt sind. Für Schwerbeton wurde in den Simulationen eine Dichte von 3.6 t/m<sup>3</sup> angenommen, die geringfügig unterhalb der angesetzten Spezifikation von 3.75-3.9 t/m<sup>3</sup> liegt. Hier ist die reale Situation auf der sicheren Seite. Für Normalbeton wurde in den Simulationen eine Dichte von 2.6 t/m<sup>3</sup> benutzt, die ~10% höher ist als der ausgeschriebene Wert von 2.35 t/m<sup>3</sup>. Dieser Differenz wurde Rechnung getragen, indem die Ausführung der Decke mit 88 cm stärker ist als die in den Simulationen eingesetzten 80 cm. In allen Abbildungen erfolgt eine Darstellung des Dosisinkrements pro Laserpuls.

Die Simulationen sind konservativ angelegt, indem keinerlei lokale Abschirmung berücksichtigt wird. In Realität werden die Experimente in einer Vakuumkammer durchgeführt, die aus mehreren Zentimeter starkem Aluminium konstruiert sein wird. Da aber die Kammer keine vollständige ( $4\pi$ ) Abschirmung ermöglicht, sondern eine Vielzahl von Flanschen und Fenstern haben wird, wurde auf die Integration der noch zu konstruierenden Kammer in die Simulationen verzichtet. Auch die Verwendung von Gold als Streuobjekt führt zu einer erhöhten Erzeugung von Bremsstrahlung und ist somit als ein

weiteres konservatives Element anzusehen. Die Proben sind im Allgemeinen aus leichteren Elementen aufgebaut.



**Abbildung 5:** Darstellung des HED-EXP Experimentier-Raumes mit dem Wechselwirkungspunkt (gelb) sowie den beiden simulierten Elektronenstrahl-Geometrien „parallel“ und „senkrecht“ (schwarze Pfeile).

In den nachfolgenden Simulationen und Auswertungen werden wir besonders auf die Strahlendosen an bestimmten Orten außerhalb des Experimentier-Raumes HED-EXP eingehen (vgl. Abbildung 5):

- A : Außerhalb der Nordwand, auf Höhe des Wechselwirkungspunkts. In diesem Bereich befinden sich keinerlei Arbeitsplätze, so dass sich keine Personen über einen längeren Zeitraum hier aufhalten (Aufenthaltswahrscheinlichkeit 0.1).
- B : Außerhalb der Westwand, auf Höhe des Wechselwirkungspunkts. In diesem Bereich befinden sich keinerlei Arbeitsplätze, so dass sich keine Personen über einen längeren Zeitraum hier aufhalten (Aufenthaltswahrscheinlichkeit 0.1).
- C : Außerhalb des Tores in der Südwand, auf Höhe des Wechselwirkungspunkts. In diesem Bereich befinden sich keinerlei Arbeitsplätze, so

dass sich keine Personen über einen längeren Zeitraum hier aufhalten (Aufenthaltswahrscheinlichkeit 0.1).

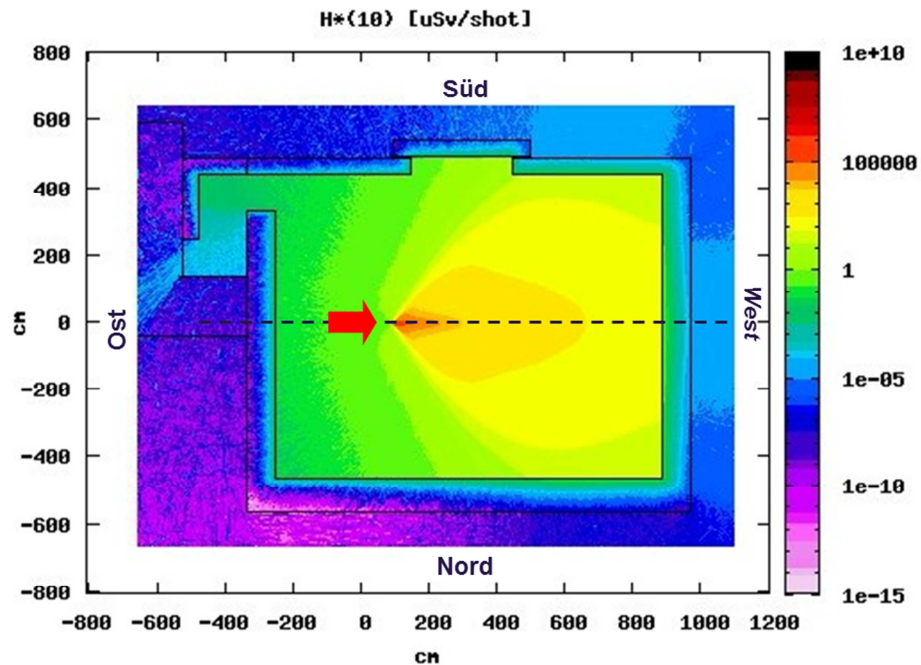
- D : Außerhalb des Tores in der Südwand am westlichen Spalt zwischen Tor und Wand, auf Höhe des Wechselwirkungspunkts. In diesem Bereich befinden sich keinerlei Arbeitsplätze, so dass sich keine Personen über einen längeren Zeitraum hier aufhalten (Aufenthaltswahrscheinlichkeit 0.1).
- E : Im Raum HED-CTR vor der Zugangstür, auf Höhe des Wechselwirkungspunkts. In diesem Bereich befinden sich die Arbeitsplätze der Experimentatoren (Aufenthaltswahrscheinlichkeit 1.0).
- F : Außerhalb der Kabeldurchführung in der nordwestlichen Ecke, in 3.5 - 4 m Höhe. In diesem Bereich befinden sich keinerlei Arbeitsplätze, so dass sich keine Personen über einen längeren Zeitraum hier aufhalten (Aufenthaltswahrscheinlichkeit 0.1).
- G : Oberhalb der Decke im Raum HED-LAS am Ort maximaler Dosis. In diesem Bereich können sich während des Laserbetriebs ausschließlich Laser-Operateure aufhalten (Aufenthaltswahrscheinlichkeit 0.1).
- H : Unterhalb der Geschossdecke von XHEXP am Ort maximaler Dosis. Dieser Ort repräsentiert den über der Geschossdecke liegenden Labortrakt, in dem sich Arbeitsplätze befinden (Aufenthaltswahrscheinlichkeit 1.0).

---

## 3.1 Simulationen für „parallele“ Geometrie

In dieser Geometrie verläuft der auf die Probe einfallende Laserstrahl parallel oder quasi parallel zum Röntgen-FEL-Strahl. Die Abbildung 6 zeigt als Ergebnis der Simulation das Dosisinkrement pro Laserpuls unter Berücksichtigung der Anordnung des Experimentierraumes HED-EXP. In der Abbildung sind die Konturen der Wände den Simulationsergebnissen zur verständlicheren Darstellung überlagert. Man erkennt die sehr hohen Dosen nahe dem Wechselwirkungspunkt und ebenfalls die gerichtete Ausbreitung der Strahlung entlang der Achse des Laser-Plasma-Elektronenstrahls. Man kann

erkennen, dass die höchste Dosis auf der Außenseite der Abschirmwand sich an der Westwand auf der Strahlachse befindet (Ort B). Ebenfalls zu erkennen ist das deutlich geringere Strahlungsniveau in ‚Rückstreu‘-Richtung.

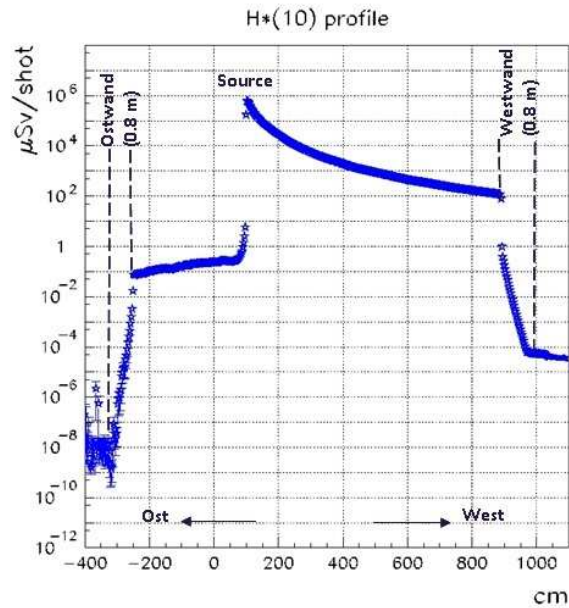


**Abbildung 6:** Falschfarbendarstellung der Dosis pro Laserpuls für die Strahlebene (1.4 m über dem Boden). Laser-Parameter entsprechen der Basisausstattung. Die Dosiskala in Einheiten von  $\mu\text{Sv}/\text{Puls}$  ist rechts wiedergegeben und die Konturen des HED-EXP Raumes wurden den Simulationsergebnissen überlagert. Der rote Pfeil deutet die Laser-Einfallrichtung (=Elektronenstrahlrichtung) an, die gestrichelte Linie ein ‚Line-out‘, das in Abbildung 7 gezeigt wird.

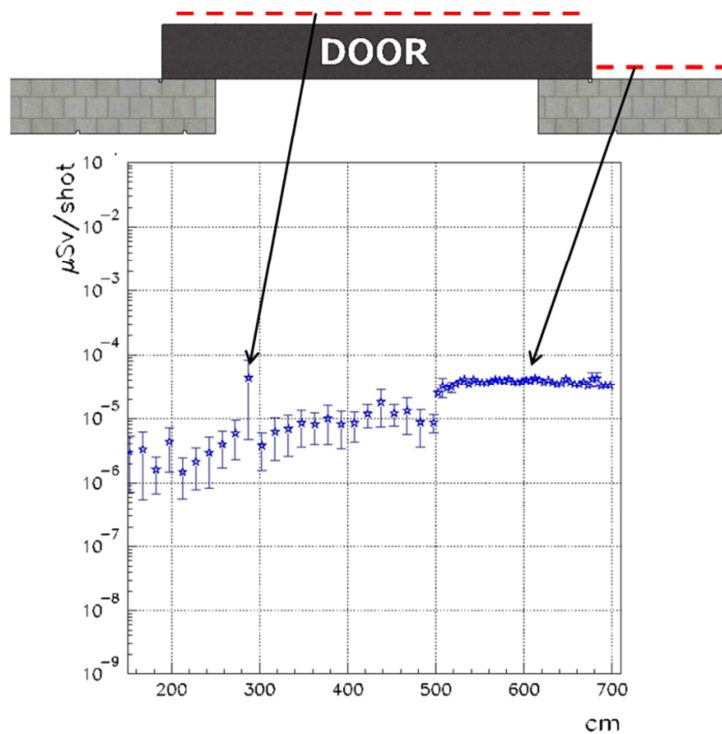
Abbildung 7 zeigt das zu derselben Simulation gehörige ‚Line-out‘, dessen Geometrie in Abbildung 6 angedeutet ist. Man erkennt deutlich den Abfall der Dosis als Funktion des Abstands vom Wechselwirkungspunkt sowie die Abschirmung durch die Ost- und Westwände. Es lässt sich ablesen, dass das Dosisinkrement auf der Außenseite der Abschirmwand an der Westwand auf der Strahlachse (Ort B)  $\sim 5 \times 10^{-5} \mu\text{Sv}$  beträgt. Auf der Ostseite ist das Dosisinkrement mit  $< 10^{-8} \mu\text{Sv}$  deutlich geringer. Wegen der gerichteten Abstrahlung ist für diese Geometrie zu prüfen, welche Dosisinkremente sich an den

Orten C, D und F ergeben. In den Abbildung 8 ist das ‚Line-out‘ für die Orte C und D in Strahlhöhe gezeigt und zeigt ein maximales Dosisinkrement von





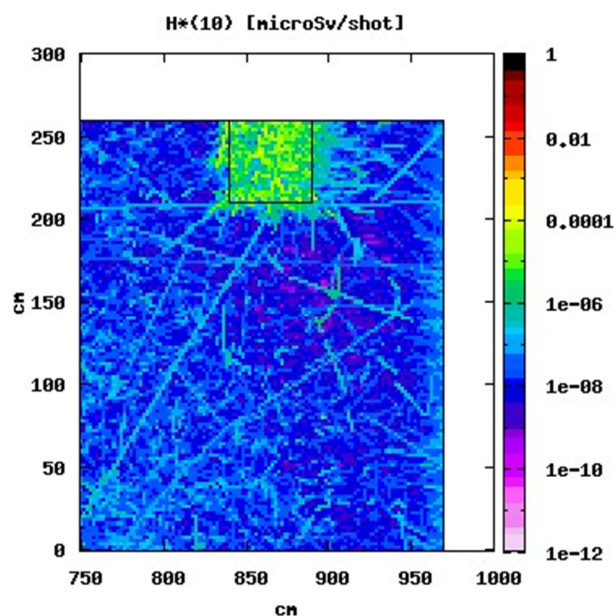
**Abbildung 7:** ‚Line-out‘ der Dosis pro Laserpuls entlang der in Abbildung 6 eingezeichneten gestrichelten Linie und 1.4 m über dem Boden. Laser-Parameter entsprechen der Basisausstattung.



**Abbildung 8:** ‚Line-out‘ der Dosis pro Laserpuls am Ort C und D außerhalb des Tores in der Südwand auf Strahlenniveau. Laser-Parameter entsprechen der Basisausstattung.

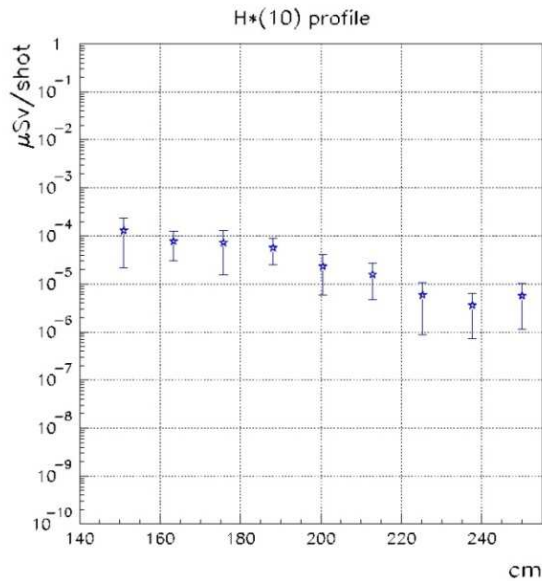
$<5 \times 10^{-5} \mu\text{Sv}$  im Bereich der Wand westlich des Tores. Die Abbildung 9 zeigt einen Falschfarbenplot am Ort F vor und unterhalb der Kabelschikane auf der Außenseite der Betonwand. Direkt vor der Schikane, 3,5-4 m oberhalb des Fußbodens, ist ein Dosisinkrement von  $\sim 1.2 \times 10^{-5} \mu\text{Sv}$  zu finden.

Ein weiterer Ort, der besondere Betrachtung erfordert, ist der Ort E außerhalb der Zugangstür im Raum HED-CTR, da sich hier die Arbeitsplätze der Experimentatoren befinden. Die Abbildung 10 zeigt dazu ein ‚Line-out‘ außerhalb der Schikane vor der Zugangstür mit einem maximalen Dosisinkrement von  $10^{-4} \mu\text{Sv}$  pro Laserpuls. Im nächsten Abschnitt stellen wir Ergebnisse von Berechnungen vor, bei denen eine zusätzliche Abschirmung von 4 mm Blei an der Tür vom Labyrinth zum HED-CTR Raum eingesetzt wurde. Es wird sich zeigen, dass diese zusätzliche Abschirmung das Dosisinkrement an diesem Ort ausreichend stark reduziert.

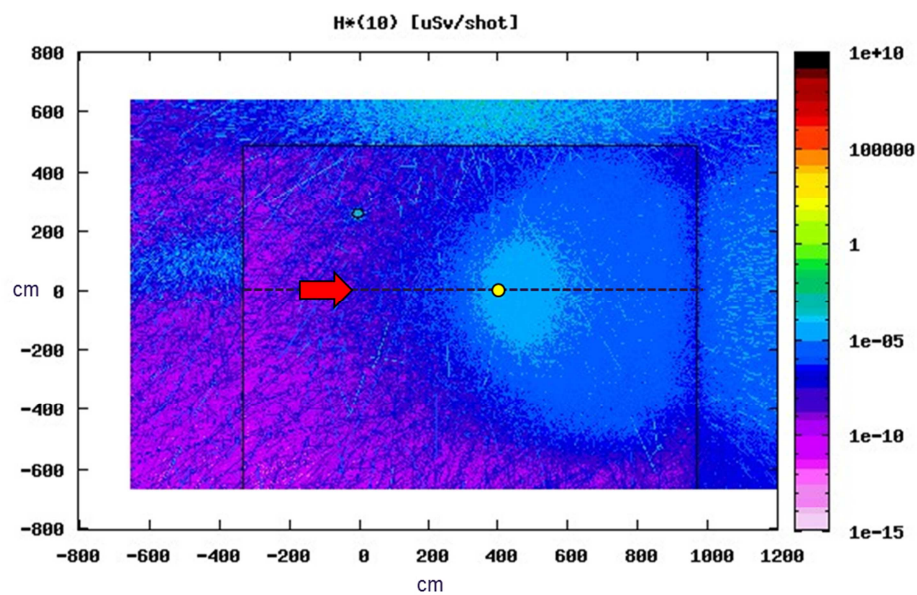


**Abbildung 9:** Dosis pro Laserpuls am Ort F für die Kabel-Schikane in der nordwestlichen Ecke in einer Höhe von 1,4-4 m. Die Dosissskala in Einheiten von  $\mu\text{Sv}/\text{Puls}$  ist rechts wiedergegeben. Laser-Parameter entsprechen der Basisausstattung. Die x- und y-Werte geben den Abstand vom und die Höhe über dem Interaktionspunkt an..

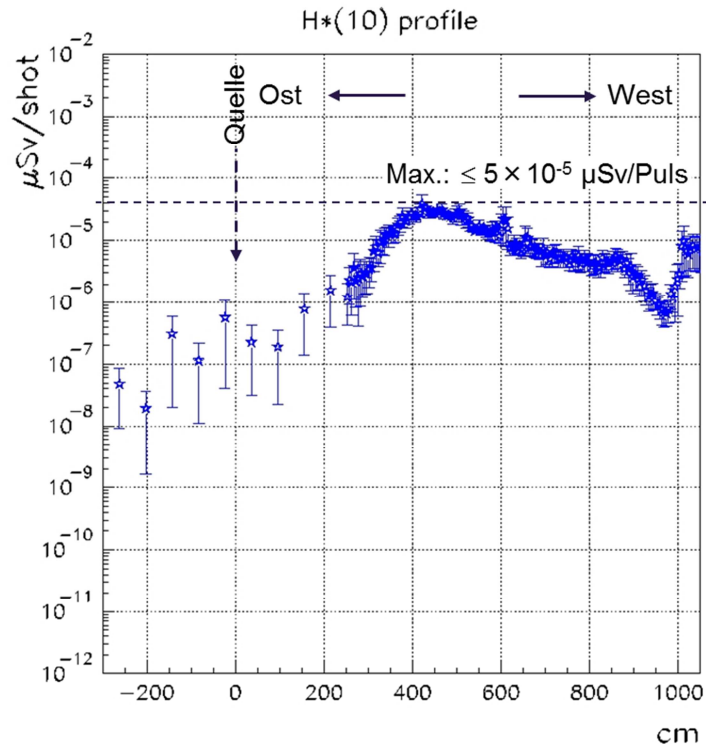
Ebenfalls zu betrachten ist für diese ‚Parallel‘-Geometrie welche Dosen sich oberhalb der Strahlenschutzdecke im Laserraum HED-LAS ergeben (Ort G). In der Abbildung 11 ist die räumliche Verteilung der Dosis pro Laserpuls in



**Abbildung 10:** ‚Line-out‘ der Dosis pro Laserpuls am Ort E außerhalb der Zugangstür zu HED-EXP und innerhalb des Raums HED-CTR auf Strahlenniveau. Die Türöffnung ist 100 cm und der Wert von 140 cm entspricht der Wand zu HED-OPT. Laser-Parameter entsprechen der Basisausstattung.



**Abbildung 11:** Falschfarbendarstellung der Dosis pro Laserpuls für die Ebene parallel und oberhalb der Strahlenschutzdecke von HED-EXP. Laser-Parameter entsprechen der Basisausstattung. Die Dosis skala in Einheiten von µSv/Puls ist rechts wiedergegeben. Der gelbe Punkt entspricht dem Ort G oberhalb des Wechselwirkungspunkts und die gestrichelte Linie deutet das ‚Line-out‘ in Abbildung 12 an.



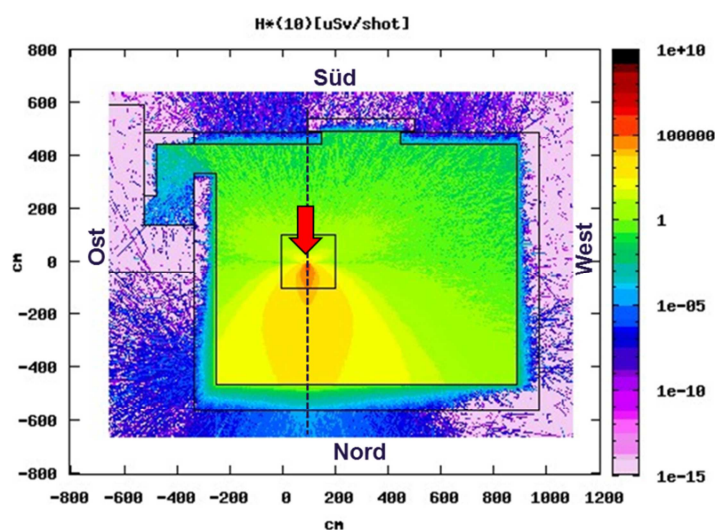
**Abbildung 12:** ‚Line-out‘ der Dosis pro Laserpuls oberhalb der Strahlenschutzdecke von HED-EXP und durch den Ort G. Laser-Parameter entsprechen der Basisausstattung.

einer Ebene parallel und oberhalb der Strahlenschutzdecke gezeigt. Die Umrisse des HED-EXP Raums wurden dem Bild überlagert. Die Abbildung 3 zeigt das dazugehörige ‚Line-out‘ entlang einer Linie, wie in Abbildung 1 eingetragen. Man erkennt, dass das maximale Dosisinkrement pro Laserpuls (Ort G) etwa ~4 m westlich des Wechselwirkungspunkts  $\sim 5 \times 10^{-5} \mu\text{Sv}$  beträgt. Mit den Ergebnissen aus den Abbildungen 11 und 12 lässt sich auch eine Abschätzung des Dosisinkrements am Ort H (oberhalb G) erstellen. Das Verhältnis der geometrischen Abstände der Orte H und G zum Quellpunkt beträgt ~3 und selbst mit der konservativen Annahme, dass keine signifikante Abschirmung in diesem Bereich stattfindet, ergibt sich aus dem Abstand eine Reduktion des Dosisinkrements um eine Größenordnung. Eine zusätzliche Abschirmung erfolgt durch die Betondecke mit einer Stärke von 30 cm (entspricht ~2 HWS).

Eine der Zusammenfassung der Berechnungen für die ‚parallele‘ Geometrie sowie für die verschiedenen Orte ist in der Tabelle 2 zu finden.

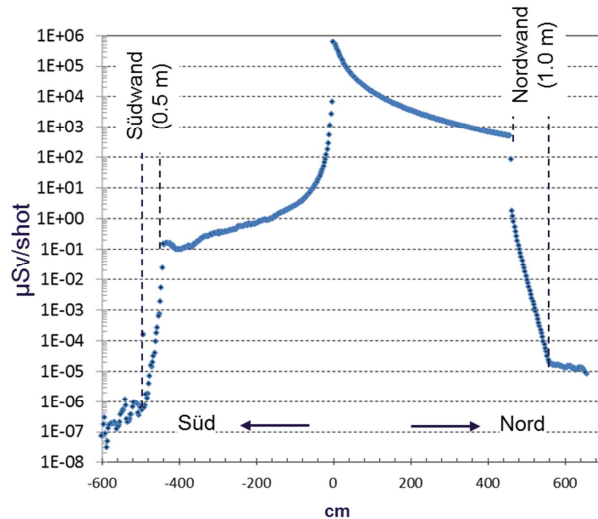
## 3.2 Simulationen für „senkrechte“ Geometrie

In dieser Geometrie verläuft der auf die Probe einfallende Laserstrahl, bzw. der Elektronenstrahl senkrecht zum Röntgen-FEL-Strahl. Die Abbildung 13 zeigt als Ergebnis der Simulation das Dosisinkrement pro Laserpuls unter Berücksichtigung der Anordnung des Experimentierraumes HED-EXP. In der Abbildung sind die Konturen der Wände den Simulationsergebnissen zur verständlicheren Darstellung überlagert. Man erkennt die sehr hohen Dosen nahe des Wechselwirkungspunkts und wiederum die gerichtete Ausbreitung der Strahlung entlang der Achse des Laser-Plasma-Elektronenstrahls. Man kann erkennen, dass die höchste Dosis auf der Außenseite der Abschirmwand sich an der Nordwand auf der Strahlachse befindet (Ort A). Ebenfalls zu erkennen ist das deutlich geringere Strahlungsfeld in ‚Rückstreu‘-Richtung. Abbildung 14 zeigt das zu derselben Simulation gehörige ‚Line-out‘, dessen Geometrie in Abbildung 13 angedeutet ist. Man erkennt deutlich den Abfall der Dosis als Funktion des Abstands vom Wechselwirkungspunkt sowie die Abschirmung durch die Süd- und Nordwände. Es lässt sich ablesen, dass die



**Abbildung 13:** Falschfarbendarstellung der Dosis pro Laserpuls für die Strahlebene (1.4 m über dem Boden). Laser-Parameter entsprechen der Basisausstattung. Die Dosissskala in Einheiten von  $\mu\text{Sv}/\text{Puls}$  ist rechts wiedergegeben und die Konturen des HED-EXP Raumes wurden den Simulationsergebnissen überlagert. Der rote Pfeil deutet die Laser-Einfallrichtung senkrecht zum Röntgen-FEL-Strahl an, die gestrichelte Linie ein ‚Line-out‘, das in Abbildung 14 gezeigt wird.



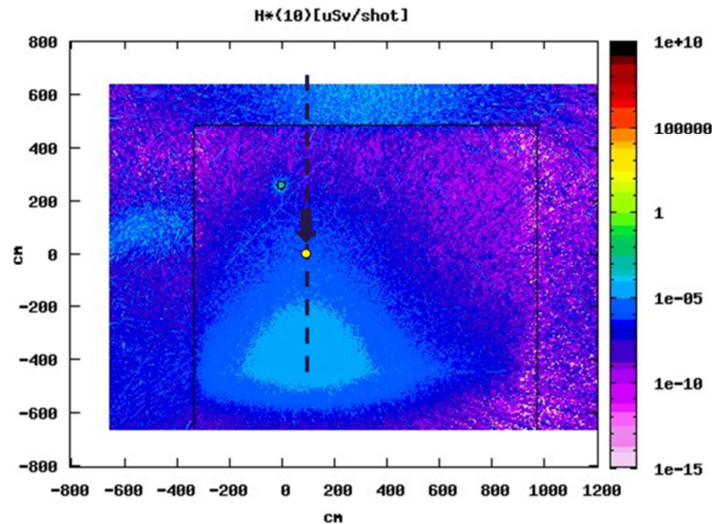


**Abbildung 14:** ‚Line-out‘ der Dosis pro Laserpuls entlang der in Abbildung 13 eingezeichneten gestrichelten Linie und 1.4 m über dem Boden. Laser-Parameter entsprechen der Basisausstattung.

Dosis auf der Außenseite der nördlichen Abschirmwand auf Strahlachse (Ort A) weniger als  $2 \times 10^{-5}$   $\mu\text{Sv}$  beträgt. Auf der Südseite ist die Dosis in dieser Geometrie mit  $< 10^{-6}$   $\mu\text{Sv}$  deutlich geringer. Wegen der gerichteten Abstrahlung ist in dieser Geometrie an den Orten C, D und F eine deutlich geringere Dosis zu erwarten. Dies bestätigt die in Abbildung 13 gezeigte Simulation.

Im Unterschied zur ‚parallelen‘ Geometrie, wurde in dieser Berechnung die Zugangstür zum Labyrinth mit 4 mm Blei ausgelegt. Auf diese Weise kann das höhere Dosisinkrement, das in den Abbildungen 6 und 10 für den Ort E zu erkennen ist, sehr effizient auf einen Wert kleiner als  $10^{-9}$   $\mu\text{Sv}$  pro Puls reduziert werden. Für derartig geringe Dosisinkremente ist ein ‚Line-out‘ analog zur Abbildung 10 nicht mehr möglich. Wir übernehmen diesen Wert für das Dosisinkrement im Folgenden auch für die ‚parallele‘ Geometrie.

In Abbildung 15 ist die räumliche Verteilung der Dosis pro Laserpuls in einer Ebene parallel und oberhalb der Strahlenschutzdecke gezeigt. Die Umrisse des HED-EXP Raums wurden dem Bild überlagert.



**Abbildung 15:** Falschfarbendarstellung der Dosis pro Laserpuls für die Ebene parallel und oberhalb der Strahlenschutzdecke von HED-EXP. Laser-Parameter entsprechen der Basisausstattung. Die Dosissskala in Einheiten von  $\mu\text{Sv}/\text{shot}$  ist rechts wiedergegeben. Der gelbe Punkt entspricht dem Ort G oberhalb des Wechselwirkungspunkts und der schwarze Pfeil Linie deutet die Laserachse an.

**Tabelle 2:** Zusammenstellung der Dosisinkremente pro Laserpuls sowie für eine 4 Stunden (4h) Periode für die repräsentativen Orte A bis H und Laser-Parameter der Basisausstattung (100 TW, 10 Hz).

| Ort        | Aufenthalts-<br>wahrschein-<br>lichkeit | Dosis/Puls<br>(‘parallele’<br>Geometrie)<br>[pSv] | Dosis/Puls<br>(‘senkrechte’<br>Geometrie)<br>[pSv] | ‘4h – Dosis’<br>(Max. (p,s))<br>[μSv] |
|------------|---|---|--|---------------------------------------|
| A          | 0.1                                     | <1  | 20   | 0.29                                  |
| B          | 0.1                                     | 50  | <1   | 0.72                                  |
| C          | 0.1                                     | 10  | <1   | 0.15                                  |
| D          | 0.1                                     | 50  | <1   | 0.72                                  |
| E          | 1.0                                     | <10 <sup>-3</sup>                                 | <10 <sup>-3</sup>                                  | <10 <sup>-3</sup>                     |
| F          | 0.1                                     | 12  | <12  | 0.18                                  |
| G          | 0.1                                     | 50  | <50  | 0.72                                  |
| H          | 1.0                                     | 1.25  | <1.25  | 0.18                                  |
| Schutzziel |   |   |  | 2.0                                   |

Die Zusammenfassung der Ergebnisse der Berechnungen des Dosisinkrements pro Laserpuls für die beiden betrachteten Geometrien zeigt Tabelle 2. Für die ‚4h-Dosis‘ wurden hierbei die Maximalwerte der Dosisinkremente pro Laserpuls mit der maximal möglichen Anzahl von Laserpulsen pro 4 Stunden-Intervall ( $3.6 \times 10^4$ ) sowie der Aufenthaltswahrscheinlichkeit skaliert. Ein Vergleich der maximalen Ortsdosen mit dem Schutzziel zeigt, dass dieses in dieser konservativen Abschätzung für die Basisausstattung der Laserparameter (100 TW, 10 Hz) und alle repräsentativen Orte eingehalten wird.

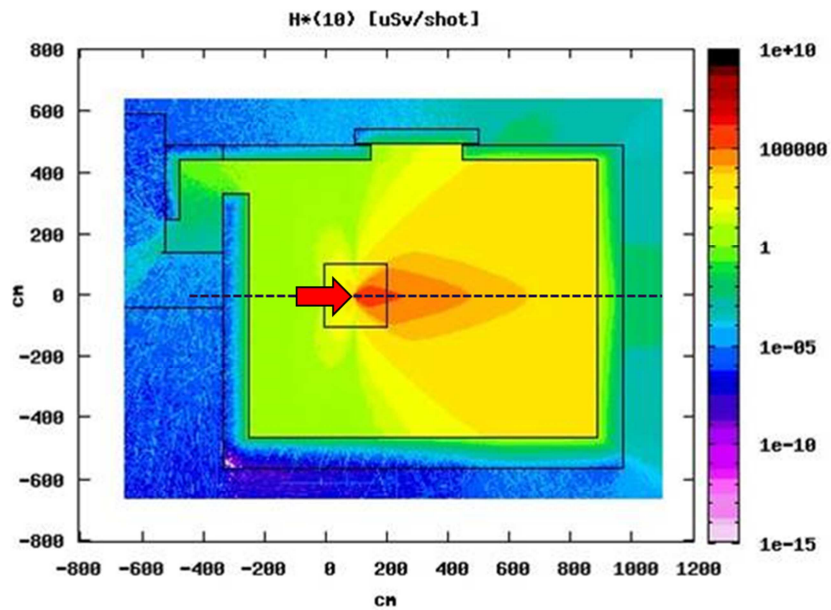
---

### 3.3 Simulationen für erweiterte Strahlparameter

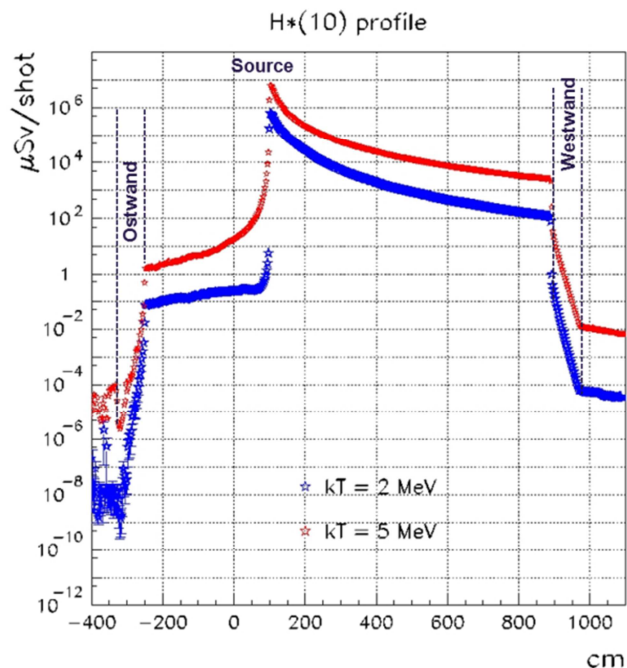
Wir haben zusätzlich Simulationsrechnungen für den Fall erweiterter Strahlparameter für den UHI-Laser durchgeführt. Wie in Abschnitt 1.2 beschrieben könnte eine derartige Erweiterung der Strahlparameter nur nach umfangreichen Umbau- und Erweiterungsmaßnahmen Lasersystems erfolgen. Diese Erweiterung ist für die kommenden Jahre nicht vorgesehen und die exakten Laserparameter werden sich ebenfalls erst zukünftig aus den wissenschaftlichen Anforderungen ergeben. Ein möglicher Parametersatz ist in Tabelle 1 gezeigt und wurde für die nachfolgend beschriebene Simulationsrechnung verwandt. Bei diesen erweiterten Laserparametern muss die Repetitionsrate um den Faktor 10 – 100 reduziert werden, um die mittlere Laserleistung von 30 W einzuhalten oder gegebenenfalls zu reduzieren (vgl. Tabelle 1). Die mittlere Leistung des Lasersystems ist ein Systemparameter, der im Betrieb nicht überschritten werden kann da dies den stabilen Betrieb des Lasers beeinträchtigen, bzw. optische Komponenten schädigen würde.

Die Simulationsrechnungen wurden analog zu den im Abschnitt 3.1 beschriebenen Rechnungen für die in Tabelle 1 angeführten Quellparameter durchgeführt. Das Dosisprofil in Analogie zu Abbildung 6 ist in Abbildung 16 dargestellt. Außerhalb der Abschirmung beträgt der zu erwartende Dosisanteil von Neutronen etwa 1%. Er wird daher hier, und genauso bei der Basisvariante vernachlässigt. Ein ‚Line-out‘ der erwarteten Strahlungsdosis entlang der Strahlachse ist in Abbildung 17 dargestellt. In dieser Abbildung wurden zum Vergleich die Ergebnisse der Berechnungen für die Basisaus-





**Abbildung 16:** Falschfarbendarstellung der Dosis pro Laserpuls für die Strahlebene (1.4 m über dem Boden). Laser-Parameter entsprechen der Erweiterung. Die Dosis-skala in Einheiten von  $\mu\text{Sv}/\text{Puls}$  ist rechts wiedergegeben und die Konturen des HED-EXP Raumes wurden den Simulationsergebnissen überlagert. Der rote Pfeil deutet die Laser-Einfallrichtung (=Elektronenstrahlrichtung) an, die gestrichelte Linie ein ‚Line-out‘, das in Abbildung 17 gezeigt wird.



**Abbildung 17:** ‚Line-out‘ der Dosis pro Laserpuls entlang der Laserachse für die Erweiterung (rote Linie) im Vergleich zur Basisausstattung (blaue Linie).

stattung des Lasers eingetragen. Aus Abbildung 17 kann man entnehmen, dass am Ort B ein etwa 50-100-fach höheres Dosisinkrement als für die Basisausstattung zu erwarten ist. Es ist hier zu beachten, dass die Rechnungen von denselben, konservativen Annahmen ausgehen wie auch im Fall der Basisausstattung angewandt. Mit Hilfe der Betriebserfahrungen aus der Basisvariante sowie Messungen des Dosisinkrements können die groben und konservativen Annahmen für die Rechnungen zukünftig verfeinert werden. Derartig verbesserte Simulationsrechnungen werden daher weniger konservative Annahmen enthalten und es ist zu erwarten, dass dies die simulierten Dosisinkremente reduzieren wird. Berücksichtigt man zudem die geringere Repetitionsrate sowie die Möglichkeit lokale Abschirmung im Bereich der Quelle zu installieren, lassen sich die beschriebenen Strahlenschutzziele für die repräsentativen Orte zu erreichen.

---

## 3.4 Aktivierung

Für die Energie und Ladung der in der Basisausstattung erzeugten Elektronen ist nicht mit einer relevanten Aktivierung von Komponenten des HED Experiments zu rechnen. Radionuklide werden hauptsächlich durch Photonenreaktionen (z.B.  $^{23}\text{Na}(\gamma,n)^{22}\text{Na}$ ) in der Nähe des Wechselwirkungspunkts erzeugt. Die nachfolgende Abschätzung basiert auf einer konservativen Berechnung der Aktivierung über einen Zeitraum von vier Wochen für den Laserstrahl in der Basisausstattung. Dabei wird von einer Beleuchtung mit 10 Hz über einen Zeitraum von 12 Stunden pro Tag und 5 Tage die Woche ausgegangen.

Die aktivierten Materialien sind die Vakuumkammer aus Aluminium sowie in der Vakuumkammer installierte Komponenten, ebenfalls zumeist in Aluminium ausgeführt. Die dominanten Radionuklide mit Halbwertszeiten über 10 min, die durch Aktivierung von Aluminium produziert werden können, sind in Tabelle 3 mit den zu erwartenden spezifischen Aktivierungen, sowie den Grenzwerten für die jeweiligen Radionuklide aufgeführt. Man erkennt, dass in dieser konservativen Abschätzung die Aktivierungen deutlich unterhalb der

**Table 3:** Spezifische Aktivitäten von Radionukliden, die in der Experimentierkammer entstehen können. Grundlage für die simulierten Werte ist das im Text beschriebene vier-wöchige Bestrahlungsprotokoll.

| Radionuklid      | T <sub>1/2</sub> | Simulationswerte             | Uneingeschränkte Freigabe laut Anlage 3, Tabelle 1, Spalte 5, StrISchV |
|------------------|------------------|------------------------------|--|
|                  |                  | Spezifische Aktivität [Bq/g] | Spezifische Aktivität [Bq/g]   |
| <sup>24</sup> Na | 14.96 h          | 1.1×10 <sup>-4</sup>         | 1×10 <sup>1</sup>  |
| <sup>22</sup> Na | 2.60 y           | 5×10 <sup>-6</sup>           | 1×10 <sup>-1</sup>   |

Grenzwerte liegen. Die sich aus diesen geringen Aktivierungen ergebenden Dosisleistungen sind so gering, dass wir sie hier nicht im Detail diskutieren.

Für die simulierte einmonatige Bestrahlung ist die spezifische Aktivität von <sup>24</sup>Na bereits in der Sättigung und höhere Werte sind auch nach längeren Bestrahlungszeiten nicht zu erwarten. Die spezifische Aktivität von <sup>22</sup>Na wird hingegen nach einem Jahr auf etwa 6×10<sup>-5</sup> Bq/g angestiegen sein.

---

## 4 Betriebliche Maßnahmen zum Strahlenschutz

Zur Durchführung des Strahlenschutzes sind sowohl bauliche als auch organisatorische Maßnahmen vorgesehen. Diese werden in den beiden folgenden Abschnitten vorgestellt. Es soll hier darauf hingewiesen werden, dass sich diese Maßnahmen in diejenigen Maßnahmen integrieren, die aus dem Beschleuniger- und Röntgen-Betrieb des European XFEL ergeben. So wird zum Beispiel das Personen-Interlocksystem für den Betrieb des Röntgen-FEL genutzt um sicherzustellen, dass sich bei Hochleistungs-Laserbetrieb keine Personen im Experimentierraum HED-EXP aufhalten können. Ebenso sind die organisatorischen Maßnahmen harmonisiert um eine eindeutig geregelte Durchführung der Strahlenschutzmaßnahmen zu gewährleisten.

---

### 4.1 Bauliche Maßnahmen

Die wesentliche Maßnahme zur Abschirmung der auftretenden Bremsstrahlung ist die Auslegung des Experimentierraums HED-EXP mit Strahlenschutzwänden und -decken aus Schwer-, bzw. Normalbeton sowie dem Einbau von Labyrinth für Personenzugang sowie Kabel- und Medienzuführung. Die Auslegung der Abschirmung wurde mit Simulationen der auftretenden Dosis überprüft und gewährleistet so das gesetzte Schutzziel für Personal und Nutzer. Aktive Strahlungsmonitore überwachen das Dosisinkrement über einen definierten 4-Stunden Zeitraum. Diese Monitore sind im Interlocksystem eingebunden und unterbrechen den Betrieb für den Fall, dass das entsprechende Strahlenschutzziel überschritten wird. Zusätzlich ermöglichen passive Ortsdosimeter die Dosisbilanzierung über längere Zeiträume, etwa Monate.

Ein Personen-Interlocksystem gewährleistet die Beschränkung des Zugangs zu Bereichen mit erhöhten Strahlungsniveaus. Der Experimentierraum HED-EXP ist während Betrieb des Lasers mit komprimierten Laser-Pulsen als Sperrbereich einzustufen. Für diese Funktion wird das für den Röntgen-FEL im Raum HED-EXP installierte Personen-Interlock System benutzt. Dieses System ermöglicht die Absuche und Verriegelung des HED-EXP Raumes und generiert eine Freigabe, die in das dedizierte Laser-Interlocksystem eingespeist wird. Wird das Interlock gebrochen, so wird die Freigabe entzogen und damit der Laserbetrieb unterbrochen.

Zusätzlich zum Personen-Interlocksystem für den Strahlenschutz gibt es ein Laser-Interlocksystem für Definition der Betriebsmodi des Lasers sowie zur Kontrolle des Zugangs der Laserräume während Laserbetrieb. Es ist vorgesehen, den UHI Laserstrahl bei stark abgeschwächten Pulsenergien, bei denen keine Bremsstrahlung erzeugt werden kann, zur Justage in den Raum HED-EXP und zur Probe zu transportieren. Dieser Betriebsmodus entspricht einem Zustand des Laser-Systems, in dem nur ein Teil der Verstärker eingeschaltet ist. Dieser Zustand wird vom Laser-Interlocksystem sichergestellt. Der Zugang zu HED-EXP in diesem Betriebsmodus ist auf erfahrene und eingewiesene Laser-Operateure beschränkt und mit einem elektronischen Zugangskontrollsystem sichergestellt.

Die Strahlzuführungen zu HED-EXP werden für die Laserstrahlführungen (PP, HE, UHI) als Schikanen ausgelegt und entsprechend mit Bleiplatten bzw. -steinen abgeschirmt, um ein Entweichen von Strahlung zu verhindern. Gleichzeitig sind diese Durchführungen so angelegt, dass von außerhalb HED-EXP kein direkter Strahlweg zum Wechselwirkungspunkt möglich ist. Für die Röntgen-FEL-Strahlführung, die keine Schikanen haben kann und direkt auf den Wechselwirkungspunkt zeigt, muss unterschieden werden zwischen Betrieb ohne und mit Röntgen-FEL. Im ersten Fall wird durch einen Strahlverschluss am Übergang HED-EXP zu HED-OPT sichergestellt, dass keine Strahlung in den HED-EXP vorangehenden Raum HED-OPT für die Röntgenstrahl-Optiken entweichen kann. Im zweiten Fall ist HED-OPT ebenfalls Sperrbereich und wird durch das Röntgen-FEL Personen-Interlock überwacht. Der gesamte Strahlweg des Röntgen-FELs vom Tunnel bis zu HED-EXP ist in diesem Fall offen und die Störstrahlung könnte prinzipiell entgegen

der FEL-Strahlung durch diese Strahlführung propagieren. Allerdings ist der Strahlweg an mehreren Stellen kollimiert und erst ab einer Entfernung von >9 m ist es möglich, in die Nähe des Strahlrohrs zu gelangen.

---

## 4.2 Organisatorische Maßnahmen

Da dieser Störstrahler im Verantwortungsbereich der European XFEL GmbH liegt sind deren Strahlenschutzregularien von Belang. Die European XFEL GmbH hat eine Strahlenschutzorganisation, die bereits den Betrieb von Röntgen-Generatoren und die Nutzung radioaktiver Quellen überwacht. Hierzu hat die Geschäftsführung in Hamburg als Strahlenschutzverantwortlicher mehrere Strahlenschutzbeauftragte und einen Strahlenschutzbevollmächtigten berufen. Mit dem Umzug der European XFEL GmbH im Jahr 2016 nach Schenefeld, Schleswig-Holstein, wird eine entsprechende Beantragung bei der Aufsichtsbehörde in Kiel erfolgen.

Für den Betrieb des UHI-Lasers werden Strahlenschutzbeauftragte mit einem entsprechenden Verantwortungsbereich berufen werden. Personal der European XFEL GmbH sowie Nutzer des HED Instruments, die Experimente mit dem UHI Laser durchführen werden, werden vor Aufnahme der Tätigkeit unterwiesen und vor Ort eingewiesen werden.

Die aktive und passive Messung der Ortsdosis an repräsentativen Positionen in den zugänglichen Überwachungsbereichen bestätigt die Einhaltung der Schutzziele. Mit unserem Schutzziel von weniger als 1 mSv pro Jahr wird auf die Messung der Personendosis hier verzichtet, wie in der gesamten Experimentierhalle XHEXP1 unter der Verantwortung des Röntgen-FELs.

## 5 Zusammenfassung

Am HED Instrument des European XFEL soll ein Hochleistungslaser, genannt UHI-Laser, installiert werden, dessen komprimierte und fokussierte Laserpulse beim Auftreffen auf Festkörper-Proben Atome ionisieren und die freien Elektronen relativistisch beschleunigen. Die bei der anschließenden Absorption der Elektronen auftretende Bremsstrahlung ist so hochenergetisch und intensiv, dass bauliche und organisatorische Maßnahmen zum Strahlenschutz erforderlich sind. Dieser Bericht enthält eine Beschreibung und Simulation der auftretenden Strahlungsfelder und beschreibt zudem die baulichen und organisatorischen Maßnahmen, die die European XFEL GmbH ergreift, um eine Strahlenexposition von Mitarbeitern, Nutzern der Anlage, sowie Besuchern zu vermeiden.

In der Grundausstattung wird der UHI-Laser eine Spitzenleistung von bis zu 100 TW am Ort der Probe bei einer Repetitionsrate von bis zu 10 Hz ermöglichen. Fluka-Monte-Carlo-Simulationen der Strahlungsfelder zeigen, dass mittels Umbauung des Experimentierraums durch 0.5-1.0 m dicke Strahlenschutzwände aus Schwerbeton die Einzelpuls-Dosen auf ein Niveau  $<5 \times 10^{-5}$   $\mu\text{Sv}$  reduziert werden kann. Damit kann die Einhaltung des Grenzwerts für beruflich nicht strahlenexponierte Personen von 1 mSv pro Jahr eingehalten werden. Bauliche und organisatorische Maßnahmen zum Strahlenschutz wurden definiert, die die Einhaltung dieses Schutzziels sicherstellen.

Nach unserer Auffassung bedarf die Errichtung des UHI-Lasers nach §11 (1) keiner Genehmigung mit folgender Begründung: In dieser Anlage werden weder  $10^{12}$  Neutronen pro Sekunde erzeugt, noch ist die mittlere Strahlleistung höher als 1 kW, noch werden Elektronen mit Energien oberhalb von 150 MeV erzeugt.

Da die Anlage nicht zur Erzeugung ionisierender Strahlen betrieben wird, sondern zur Erzeugung eines Plasmas, ist unsere Einschätzung, dass der Betrieb dieser Anlage keine Betriebsgenehmigung gemäß §11 (2) StrlSchV, sondern nur eine Anzeige gemäß §12 (1) StrlSchV erfordert.

# A Abkürzungen

|             |  |
|-------------|--|
| <b>CPA</b>  | Chirped Pulse Amplification                      |
| <b>DESY</b> | Deutsches Elektronensynchrotron DESY             |
| <b>FEL</b>  | Free-Electron Laser oder Freier Elektronen-Laser |
| <b>PP</b>   | Pump Probe (Laser)                               |
| <b>HE</b>   | High Energy (Laser)                              |
| <b>HED</b>  | High Energy Density                              |
| <b>HZDR</b> | Helmholtz-Zentrum Dresden Rossendorf             |
| <b>UHI</b>  | Ultra High Intensity (Laser)                     |
| <b>XFEL</b> | X-ray Free-Electron Laser                        |



---

## B Literatur

- [1] T. Kluge, T. Cowan, A. Debus, U. Schramm, K. Zeil, and M. Bussmann: "Electron Temperature Scaling in Laser Interactions with Solids", Phys. Rev. Lett. **107**, 205003 (2011)
- [2] A. Fasso, A. Ferrari, J. Ranft, P.R. Sala, "FLUKA: a multi-particle transport code", CERN-2005-10 (2005), INFN/TC\_05/11, SLAC-R-773; G. Battistoni et al., "The FLUKA code: description and benchmarking", Proceeding of the Hadronic Shower Simulation Workshop 2006, Fermilab 6–8 September 2006, M. Albrow, R. Raja editors, AIP Conference Proceeding **896**, 31 (2007)
- [3] K. Zeil et al.: "The scaling of proton energies in ultrashort pulse laser plasma acceleration", New J. Phys. 12 045015 (2010)  
doi:10.1088/1367-2630/12/4/045015

---

# Danksagung

Dieser Report basiert auf einer engen Zusammenarbeit mit A. Ferrari, T. Cowan, H.-P. Schlenvoigt, U. Schramm und A. Pelka vom Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf. Basierend auf den Erfahrungen am HZDR wurde das Konzept für diese Anlage entwickelt und A. Ferrari hat alle Simulationen durchgeführt. Die Dimensionierung der Abschirmung wurde nur durch diese Vorarbeiten ermöglicht. H.-P. Schlenvoigt hat in einer frühen Phase einige der Texte verfasst und A. Pelka war in die Schlussredaktion des Berichts involviert.

Bei European XFEL sind insbesondere M. Nakatsutsumi, G. Priebe und S. Kozielski zu nennen. M. Nakatsutsumi vom HED Instrument hat viele Gespräche und Diskussionen geführt und hat Texte auf Englisch vorformuliert. G. Priebe hat sich insbesondere um die Einbindung und Realisierung des UHI Lasersystems gekümmert sowie seine Erfahrungen vom Betrieb einer ähnlichen Anlage am Max-Born-Institut eingebracht. S. Kozielski hat als Strahlenschutzbeauftragte der European XFEL GmbH viele Anregungen gegeben wie die Strahlenschutzziele umzusetzen sind und welche organisatorischen Maßnahmen einzurichten.

Besonderer Dank gilt weiterhin A. Leuschner von DESY für wertvolle Hinweise bei der Aus- und Bewertung der Simulationen, sowie N. Tesch von DESY beim Erstellen dieses Berichts.