

SwissFEL – DIE NEUE GROSSFORSCHUNGSANLAGE AM PAUL SCHERRER INSTITUT

Mirjam van Daalen und Fritz Gassmann (Villigen)

Zusammenfassung

Die heutige Forschung steht vor grossen gesellschaftlichen Herausforderungen, wie eine gesicherte und klimafreundliche Energieversorgung, eine lang anhaltende und bezahlbare Gesundheit und der Erhalt einer intakten Umwelt. Bei der Erforschung solcher fundamentaler Fragen stösst die Forschung immer wieder auf Fragestellungen, die mit den heute verfügbaren Forschungsmethoden nicht beantwortet werden können. Die Lösungen dieser fundamentalen Fragen liegen im Verständnis von Prozessen, welche auf der molekularen bzw. atomaren Ebene ablaufen. Solche Prozesse sind sehr schnell! Die Erforschung und das «Filmen» dieser Prozesse mit grösster Orts- und Zeitauflösung wird möglich mit einem Freie-Elektronen-Röntgenlaser (oder in der englischen Abkürzung «XFEL», von X-ray = Röntgenstrahlung). Diese Anlagen, die sich aus Elektronenbeschleuniger, speziellen magnetischen Strukturen und optischen Komponenten zusammensetzen, können extrem kurze Pulse von kohärentem Röntgenlicht (Röntgenlicht mit den Eigenschaften von Laserlicht) erzeugen. In diesem Artikel werden Anwendung, Funktion und das Bauprojekt des Freien-Elektronen-Röntgenlasers SwissFEL beschrieben, dessen Bau derzeit am Paul Scherrer Institut vorbereitet wird.

SwissFEL the new large scale research facility at PSI

Today's research is facing major societal challenges such as, climate-neutral energy supply, long-lasting, affordable health-care, and the maintenance of an intact environment. Trying to solve such fundamental questions, research often comes across questions that are extremely difficult or even not possible to answer using currently available research methods. The answers to these fundamental questions lie in the understanding of processes taking place on the molecular or atomic scale. These kind of processes are very fast. The investigation and even «filming» of these processes with atomic and ultrafast time resolution will become possible with X-ray free electron lasers. These facilities, consisting of electron accelerators, sophisticated magnetic structures and optical components, are able to produce extreme short X-ray pulses. In the present article the utilization, the mode of operation, and the civil engineering project of the SwissFEL X-ray free electron laser is described. The construction of SwissFEL is presently prepared at the Paul Scherrer Institute.

Schlagwörter: Freie-Elektronen-Röntgenlaser – ultra schnelle Prozesse – Femtosekunde – Bewegung von Molekülen filmen

Keywords: X-ray free electron laser – ultrafast dynamics – femto second – filming of moving molecules

1 EINLEITUNG

Mit dem Bau des Freie-Elektronen-Röntgenlasers SwissFEL will das PSI der Forschungslandschaft Schweiz ein Spitzengerät bereitstellen, das neue und vielseitige Möglichkeiten für Wissenschaft und Technologieentwicklung eröffnet. Der SwissFEL ist eine Röntgenlichtquelle, die die neusten Entwicklungen auf den Gebieten Beschleuniger-

physik, optische Laser und Magnettechnologien zu einem Forschungsinstrument kombiniert, das völlig neue Einblicke in die physikalischen, chemischen und biologischen Vorgänge ermöglicht, die unsere Umwelt bestimmen.

Eine gesicherte Energieversorgung, ein nachhaltiger Umweltschutz sowie eine langanhaltende Gesundheit einer immer älter werdenden Bevölkerung – dies sind die grossen wissenschaftlichen und technologischen Herausforderun-

gen vor denen wir stehen. Um hier bedeutende Fortschritte zu erzielen, braucht es neue Ansätze und als Basis dazu ein vertieftes Verständnis der grundlegenden Phänomene und Vorgänge in der Natur. Mit den heute zur Verfügung stehenden experimentellen Methoden können wir atomare und molekulare Strukturen untersuchen und daraus neue Erkenntnisse über den Aufbau der Natur gewinnen. Bei vielen Vorgängen in der Natur fehlen uns aber zum Verständnis grundlegende Kenntnisse und der vertiefte Einblick in funktionelle Zusammenhänge. Einen wesentlichen Schritt vorwärts erhofft sich die Wissenschaft, wenn es möglich wird, im Mikro- und Nano-Kosmos nicht nur in Einzelbildern die Strukturen abzubilden, sondern gleichzeitig die dort ablaufenden, teilweise ultraschnellen Wechselwirkungen und Vorgänge im Film zeitlupenmässig zu erfassen und sichtbar zu machen. Die damit erzielten Erkenntnisse werden über die Grundlagenforschung hinaus auch in der Energie-, Umwelt-, Bio- und Informationstechnologie zum Tragen kommen. Beispiele dafür sind effizientere Energieumwandlungsprozesse in Batterien oder Brennstoffzellen, chemische Reaktionen in sehr verdünnten Systemen, wie sie unter anderem in der Atmosphäre ablaufen sowie das Umschalten magnetischer Domänen bei ultraschnellen kompakten Datenspeichern.

Das PSI ist erfahren in Entwicklung, Bau und Betrieb von grossen Forschungsanlagen. So hat es beispielsweise im Jahr 2001 mit der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS international eine Vorreiterrolle bei der Entwicklung moderner Röntgenlichtquellen übernommen. Die neue SwissFEL-Anlage ist auf zukunftsorientierte, wissenschaftlich-technologische Herausforderungen hin konzipiert und wird als Vorreiterin einer neuen Generation von Forschungsanlagen auf dem Gebiet der Natur- und Ingenieurwissenschaften weltweit neue Trends setzen. Dabei wird sie optimal auf die Bedürfnisse der Schweizer Hochschulen und Industrie, insbesondere der Schweizer Pharmaindustrie, zugeschnitten sein. Die Realisierung des SwissFEL erfordert Forschung und Entwicklung an vorderster Front des technologisch Machbaren, insbesondere in den Bereichen Präzisionsmechanik, superschnelle Elektronik, Informationstechnik sowie Bildsensorik und Computerwissenschaften.

Global gibt es drei «kontinentale» Projekte, die in die gleiche Richtung wie der SwissFEL zielen. Eine Anlage ist in Europa (Deutschland, European XFEL) im Bau, zwei weitere Anlagen haben in den USA (LCLS, SLAC, Stanford University) in 2009 und in Japan (Riken, SACLA) in 2011, den Experimentierbetrieb aufgenommen. Mit dem

SwissFEL-Projekt soll eine vergleichbare Anlage realisiert werden, die mit neuen Technologien denselben Wellenlängenbereich abdeckt. Durch ihre besonderen Qualitäten wird die Anlage Spitzenwissenschaftlerinnen und Spitzenwissenschaftler aus der ganzen Welt anziehen, die ultrakurze Röntgenpulse und deren Kohärenzeigenschaften für ihre Experimente einsetzen wollen.

Das SwissFEL-Projekt ist wesentlicher Teil der strategischen Ausrichtung des PSI als Benutzerlabor für Forschung und Ausbildung der Wissenschaftsgemeinschaft aus dem ETH-Bereich, der Schweizer Universitäten und Fachhochschulen sowie der Schweizer Industrie. In den letzten Jahren haben durchschnittlich 2000 Nutzer pro Jahr die verschiedenen Grossforschungsanlagen des Institutes benutzt. Das PSI leistet zudem wesentliche Beiträge zur Förderung des Forschungs- und Industriestandortes Schweiz und der nationalen und internationalen interdisziplinären Zusammenarbeit. Die SwissFEL-Anlage wird, wie schon die Synchrotronlichtquelle SLS des PSI, ein Trendsetter für den Bau ähnlicher Anlagen weltweit sein.

2 WIE FUNKTIONIERT EIN FREIE-ELEKTRONEN-RÖNTGENLASER (XFEL)

2.1 SwissFEL – Die Anlage

Der Röntgenlaser SwissFEL wird extrem kurze Blitze aus Röntgenlicht mit Lasereigenschaften erzeugen. Diese Blitze werden von sehr schnellen Elektronen abgestrahlt, die durch starke Magnete auf eine wellenförmige Bahn gezwungen werden. Grundsätzlich erzeugen elektrisch geladene Teilchen, die auf eine gekrümmte Bahn gezwungen werden, elektromagnetische Strahlung. Ob das Radiowellen, sichtbares Licht oder Röntgenstrahlung ist, hängt von den genauen Bedingungen ab.

Entsprechend wird der SwissFEL aus drei wesentlichen Teilen bestehen (Abb. 1):

- Einer Elektronenquelle, in der die freien Elektronenpakete erzeugt werden.
- Einem Beschleuniger, der die Elektronen auf die benötigte hohe Bewegungsenergie bringt.
- Einer Undulatorstrecke, in der die Elektronen von starken Magneten auf eine Wellenbahn gezwungen werden und die Röntgenpulse erzeugen.

Hinzu kommen noch optische Komponenten, in denen das Röntgenlicht für die Experimente aufbereitet wird und die eigentlichen Messplätze, an denen die Experimente stattfinden. Die gesamte SwissFEL-Anlage wird

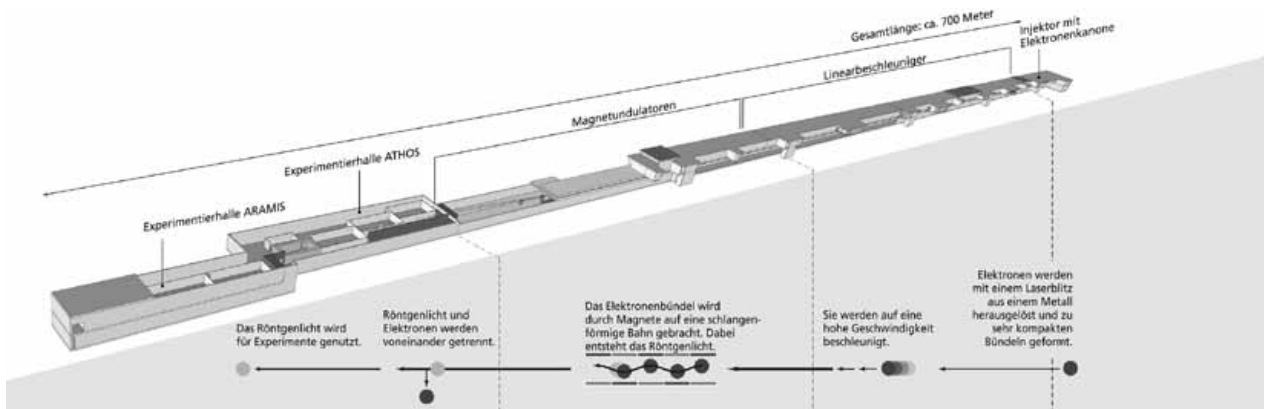


Abb. 1. Schematische Darstellung der SwissFEL-Anlage und ihrer Funktionalität.

Fig. 1. Schematic drawing of the SwissFEL facility, and its functionality.

ca. 715 Meter lang sein. Dabei entfallen 550 Meter auf die Beschleuniger, 60 Meter auf die Undulatorstrecke und der Rest auf die Röntgenoptik und die eigentlichen Messplätze.

Das Besondere an der Art, wie ein XFEL Röntgenlicht erzeugt ist, dass nicht nur der Elektronenstrahl das Licht abstrahlt, sondern dass auch das erzeugte Licht wieder den Elektronenstrahl beeinflusst. Durch diese Wechselwirkung wird der anfangs schwache Röntgenstrahl deutlich verstärkt – Fachleute sprechen von einer «lawinenartigen Verstärkung» (dasselbe Prinzip führt bei einem optischen Laser zur hohen Lichtintensität).

Anlagen, an denen Laserlicht wie am SwissFEL erzeugt wird, nennt man Freie-Elektronen-Laser (FEL), weil die Elektronen sich darin frei im Vakuum bewegen – und nicht innerhalb eines Materials, wie in üblichen optischen Lasern. Genau genommen ist der SwissFEL ein «XFEL», weil er Röntgenstrahlen – auf Englisch X-Rays – erzeugt.

2.2 Erzeugung des Elektronenstrahls mittels einer Elektronenquelle

Als Elektronenquelle (Abb. 2) wird am SwissFEL eine sogenannte Elektronenkanone eingesetzt. Die wichtigsten Komponenten sind eine Metallscheibe und ein Laser, der Lichtblitze aus ultraviolett Licht erzeugt.

Der Laser wird auf die ultrafein bearbeitete Metallscheibe gerichtet und setzt mit jedem Lichtblitz aus der Platte Elektronen frei. Diese werden sofort in einer ersten Hochfrequenzkavität – einem speziell geformten Hohlraum, von 100MV/m starken elektrischen Wechselfeldern beschleunigt und zu einem Elektronenstrahl geformt. Von da fliegen die Elektronen zum eigentlichen Beschleuniger weiter.

Die Eigenschaften der SwissFEL Elektronenquelle sind für das Funktionieren der ganzen Anlage von entscheidender Bedeutung. Sind die hier erzeugten Elektronenpulse nicht «gut genug», lässt sich das auf dem weiteren Weg der Elektronen nicht reparieren und führt unter Umständen dazu, dass die für Experimente benötigten Röntgenlichtpulse gar nicht erst erzeugt werden können. Der einzige Ausweg wäre, die ganze Anlage länger zu machen, um die Strahlenergie zu erhöhen. «Gut» sind dabei Elektronenpulse, in denen die Elektronen möglichst wenig «auseinanderfliegen», sich also alle möglichst genau in die vorgege-

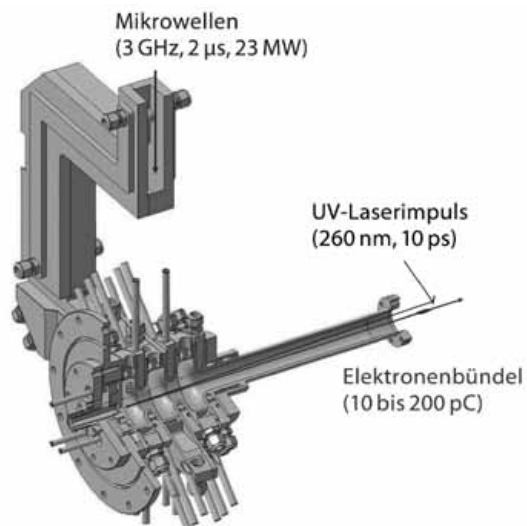


Abb. 2. Abbildung der SwissFEL Elektronenkanone mit Laserstrahl, Metallplatte und erzeugter Elektronenstrahl.

Fig. 2. Image of the SwissFEL electron gun with laser beam, metal disc and electron beam.

bene Richtung bewegen und dicht zusammenbleiben. Die Fachleute sprechen dann von niedriger Emittanz.

2.3 Beschleunigung der Elektronen im Linearbeschleuniger

Die Elektronen werden im Linearbeschleuniger (Abb. 3) durch starke Mikrowellenfelder beschleunigt. Dabei wird das Mikrowellenfeld durch eine Aufeinanderfolge von speziell geformten Kupferhohlräumen, im Fachjargon «HF-Kavitäten» genannt, für die Beschleunigung erzeugt. Eine Kavität besteht aus zwei Ultra-Präzisions-Kupfertassen (siehe Abb. 3).

Der grösste Teil der Beschleunigung findet im Linearbeschleuniger statt, der aus insgesamt 104 Strukturen (je 2m lang), von jeweils 113 Kupfertassen (insgesamt 11752 Kupfertassen!) besteht. Die Tassen bestehen aus sehr reinem Kupfer und müssen extrem genau gefertigt sein. Im Linearbeschleuniger werden die Elektronen mittels Mikrowellen auf hohe Energien beschleunigt. Die Beschleunigung der Elektronen mittels der Mikrowellen kann man sich vorstellen wie ein Surfer, der von einer Welle vorwärts gedrückt wird.

2.4 Erzeugung des Röntgenlichts im Undulator

Die im Beschleuniger auf praktisch Lichtgeschwindigkeit beschleunigten Elektronen durchfliegen nun die so genannten Undulatoren, eine Reihe von aneinander gereihten Magneten mit abwechselnder Polarität (siehe Abb. 4). Das magnetische Feld dieser Anordnung zwingt die Elektronen auf eine Slalombahn. Diese hin-und-her Bewegung führt zur Emission von Röntgenlicht, das sich «lawinenartig»

innerhalb des Undulators verstärkt. Es entstehen am Ende des Undulators «laserartige» intensive Röntgenblitze. Das Röntgenlicht wird mittels röntgenoptischer Komponenten weiter zu den Experimentieranlagen geführt.

Am SwissFEL wird es zunächst zwei Undulatorstrecken geben, die Röntgenlicht mit unterschiedlichen Eigenschaften erzeugen – eine für «harte» Röntgenstrahlen mit kurzer Wellenlänge und eine für «weiche» Röntgenstrahlen mit längerer Wellenlänge. Je nach Fragestellung wird man für Experimente entweder die eine oder die andere Art von Röntgenlicht nutzen.

Die Undulatorstrecke für das harte Röntgenlicht enthält 12 Undulatoren in denen je 1060 ultrastarke Neodym-Magnete eingesetzt sind. Abbildung 5 zeigt einen solchen Undulator. Diese 12 Undulatoren werden zu einer Undulatorstrecke von insgesamt 60 Metern Länge zusammengesetzt. Die Periode der Elektronenbahn, also die Strecke, auf der die Elektronen einmal nach links und einmal nach rechts fliegen, wird 1,5 Zentimeter betragen. Damit das Röntgenlicht überhaupt erzeugt wird, muss die Magnetstruktur mit einer Genauigkeit von wenigen Mikrometern angeordnet sein. Die Magnetstrukturen der Undulatoren können mechanisch gegeneinander verstellt werden – so kann man die Wellenlänge des Lichts regeln, indem man die Position der Magnete verändert. (Abb. 5)

Die Balken aus nicht-magnetisierbarem Stahl, an denen die Magnete befestigt sind, können über eine aufwändige Konstruktion bewegt werden, um den Abstand zwischen den Magneten fein zu justieren. Die magnetischen Strukturen befinden sich in einer Vakuum-Kammer, damit man sie möglichst nah an den Elektronenstrahl heranführen kann.

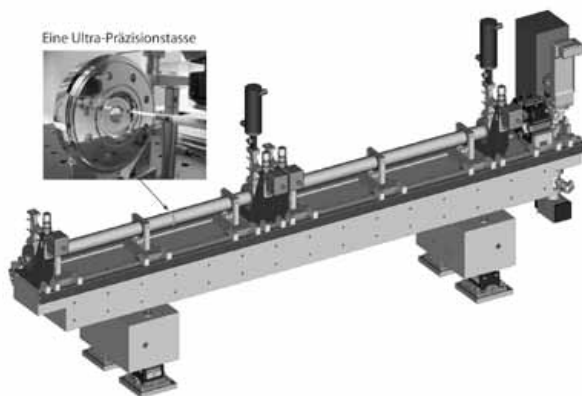


Abb. 3. Darstellung von zwei Strukturen des SwissFEL Linearbeschleunigers (jede Struktur ist 2m lang), Ausschnitt einer Ultra-Präzisionstasse.

Fig. 3. Drawing of two linear accelerator structures (one structure has a length of 2m), cross section of a ultra high precision cup.

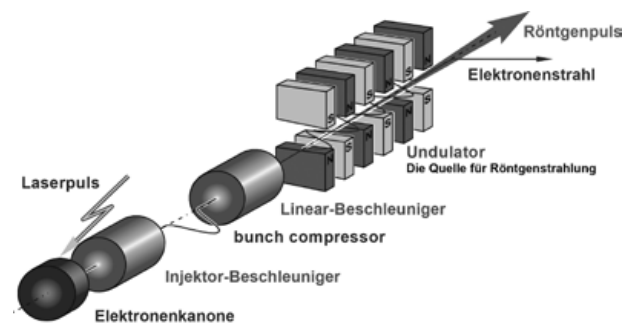


Abb. 4. Schematische Darstellung eines Röntgenlasers mit Funktionsweise eines Undulators (mit den Magneten abwechselnder Polarität).

Fig. 4. Schematical drawing of an XFEL incorporating the mode of operation of an undulator (with magnets of changing polarity).

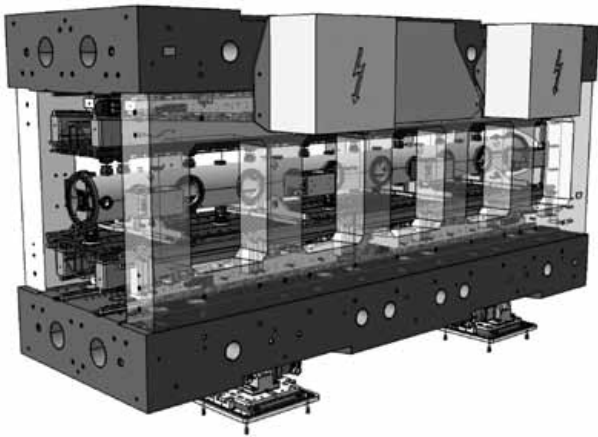


Abb. 5. Schematische Darstellung des SwissFEL-Undulatorgestells mit vertikaler Verstelleinheit. Gestell aus Mincralguss. Grösse L x B x H: 4m x 1.4m x 2m, ca. 20 t.

Fig. 5. Schematic drawing of the SwissFEL undulator base frame with vertical adjusting unit. Base frame made of polymer concrete. Scale l x w x h: 4m x 1.4m x 2m, ca. 20 t.

Nach Durchlaufen der Undulatorstrecke werden die Elektronen nicht mehr benötigt und in einem Beam-Dump – einem Strahlstopper – aufgefangen. Das Röntgenlicht wird zu den Messplätzen geführt, wo es für Experimente verwendet wird.

2.4.1 Laserlicht durch «lawinenartige Verstärkung»

Das Röntgenlicht des SwissFEL wird die Eigenschaften von Laserlicht haben. Licht ist von seiner Natur her eine Welle – und das Licht, mit dem wir im Alltag meist zu tun haben, besteht aus vielen «unkoordinierten» Wellen – Fachleute sagen, es ist nicht kohärent. Laserlicht hingegen ist kohärent – seine Wellen sind «in Phase». Das heisst,

dass die Wellenberge und Täler aller Wellen zusammenfallen (Abb. 6).

Diese koordinierte Schwingung macht die Stärke des Laserlichts aus, denn so wirken alle Anteile des Lichts zusammen, und das Licht kann die maximale Wirkung entfalten – so wie mehrere Personen auf einem Tandem grössere Lasten transportieren können, wenn sie alle im gleichen Rhythmus in die Pedale treten (Abb. 7).

Am SwissFEL wird das Röntgenlicht von kleinen Grüppchen von Elektronen (Microbunches; Abb. 8) auf ihrem Weg durch den Undulator ausgesandt. Zunächst kommen die Elektronen aus dem Beschleuniger in grossen «Paketen» an. Auf dem Weg durch den Undulator senden sie dann Röntgenlicht aus, und – das ist das Besondere an einem FEL – das Licht wirkt auf die Elektronenpakete zurück und verändert sie. Dabei teilt sich das grosse Paket unter Einfluss des Röntgenlichts in «Scheiben» auf, die nun hintereinander fliegen – und zwar in einem Abstand, der gleich der Wellenlänge des ausgesandten Lichts ist. So strahlen die einzelnen kleinen Pakete ihr Licht nun in Phase aus. Das so erzeugte Licht ist stärker als das, das vorher auf das Elektronenpaket gewirkt hat – es wurde verstärkt. Der Vorgang setzt sich fort, die Elektronenpakete werden kleiner, das Licht immer stärker – wie intensiv der Prozess ist zeigt sich auch darin, dass die Fachleute gerne von «lawinenartiger Verstärkung» sprechen. Der Prozess, bei dem sich die grossen Elektronenpakete in kleinere aufteilen, wird als «Microbunching» bezeichnet.

2.4.2 Keime für das Licht

Die Erzeugung von Röntgenlaserlicht im SwissFEL startet nicht von selbst – sie braucht immer etwas Licht, das sie dann verstärken kann. Im einfachsten Fall nutzt man dafür etwas von dem Licht, das die Elektronen am Anfang

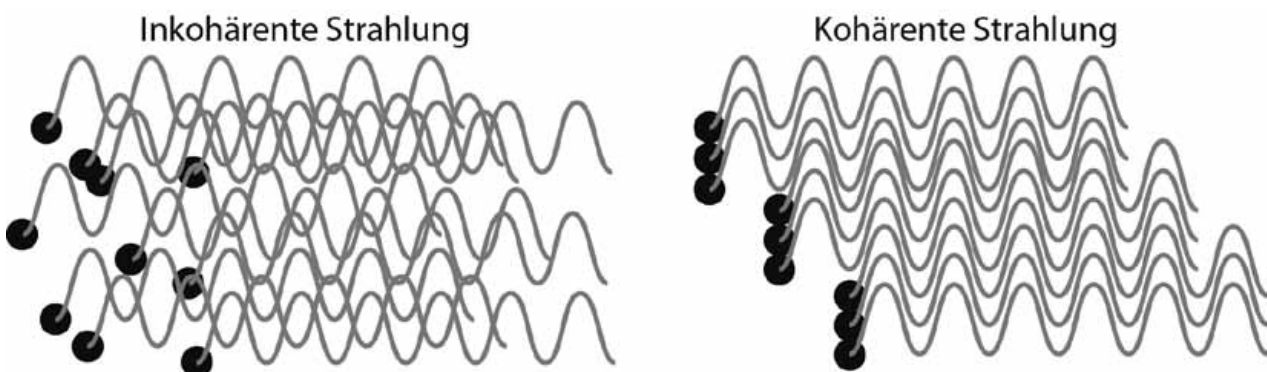


Abb. 6. Unterschied zwischen inkohärenter- und kohärenter Strahlung.

Fig. 6. Difference between incoherent- and coherent radiation.



Abb. 7. Beispiel der Kohärenz; durch kohärentes Fahren können die Tandemfahrer grössere Lasten transportieren.

Fig. 7. Example of coherence; by cycling coherently the cyclists can transport higher weights.

ihres Weges durch den Undulator spontan abstrahlen. Dieses wird dann verstärkt, so dass am Ende der Laserblitz entsteht. Der Nachteil dieses Verfahrens ist, dass man für bestimmte Anwendungen nicht im Voraus mit der gewünschten Genauigkeit planen kann, welche Eigenschaften das verstärkte Licht hat. So werden sich aufeinanderfolgende Lichtblitze geringfügig voneinander unterscheiden – das erschwert in bestimmten Fällen die Messungen in den Experimentieranlagen.

Alternativ kann man in FELs von aussen Licht mit genau vorgegebenen Eigenschaften einspeisen, das gewissermassen als Keim für den Röntgenlaser wirkt. So kann man dem endgültigen Lichtblitz die gewünschten Eigenschaften aufprägen. Dieser Prozess wird in der FEL Fachliteratur als «seeding» bezeichnet. Beim XFEL stellt sich aber ein Henne-Ei Problem, da der ideale Keim kohärentes Röntgenlicht ist, welches nur von XFELs erzeugt werden kann. Ein Ziel der Entwicklungen für SwissFEL ist es, neue seeding Methoden zu entwickeln um dieses Problem zu umgehen.

3 SWISSFEL ANWENDUNGSBEISPIELE – EXPERIMENTE

3.1 Röntgenlaserpulse für das Filmen ultraschneller Prozesse zwischen Atomen und Molekülen

Die extrem kurzen und intensiven Röntgenblitze werden mit Hilfe von röntgen-optischen Elementen bis zu den Messplätzen geführt und stehen dann den Forschenden für ihre Experimente zur Verfügung. Wie die anderen Grossanlagen des PSI wird auch der SwissFEL Forschenden von Forschungszentren und Universitäten sowie aus der Indus-

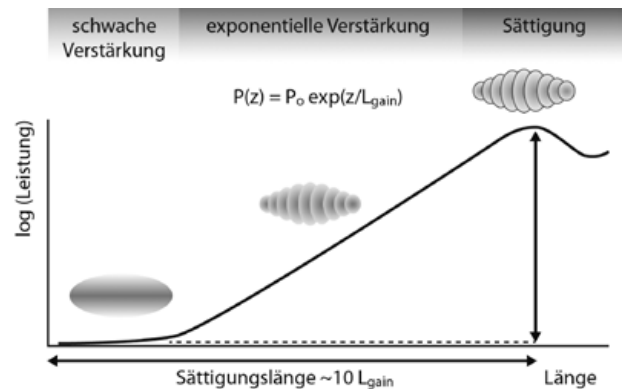


Abb 8. Aufteilung des Elektronenpulses in Microbunches.

Fig. 8. Distribution of electrons in micro bunches.

trie zur Verfügung stehen. Auch hier werden Forschende, die ihre wissenschaftlichen Resultate veröffentlichen, kostenlos Zugang zu den Messmöglichkeiten erhalten. Für Industriepartner werden auch hier individuelle Modelle für die Nutzung der Anlagen entwickelt werden.

Die Grundbausteine der Materie – Atome, Moleküle – haben kleine Dimensionen: der atomare Gitterabstand oder die Bindungslängen in Molekülen sind in der Grössenordnung eines Zehntel Nanometers. In grundlegenden Prozessen, wie z.B. beim Umformen von Biomolekülen, beim Umpolen von magnetischen Anordnungen in Computerspeichern oder bei chemischen Reaktionen, spielt die koordinierte Bewegung der Atome eine entscheidende Rolle. Diese Prozesse verlaufen in sehr kurzen Zeiten – von einigen Femtosekunden bis hunderte von Femtosekunden. Was hier im Einzelnen passiert ist noch unbekannt. Deshalb möchte man diese Vorgänge sichtbar machen. Um Atome zu sehen, braucht es ein besonderes Licht: Es muss wie Röntgenlicht eine kurze Wellenlänge haben. Um scharfe Bilder von Atomen in Bewegung aufzunehmen, müssen die Röntgen-Pulse nicht nur intensiv, sondern auch sehr kurz sein. Dies ist erstmals mit Röntgenlasern möglich.

Dabei wird eine «stroboskopische» Methode angewandt: Der Versuch wird häufig durchgeführt, jedes Mal wird eine Momentaufnahme ein wenig zeitversetzt fotografiert. Auf diese Weise erhält man Bilder zu verschiedenen Zeitpunkten eines Vorgangs, die mit Hilfe von Computer-Programmen zu einem Film des Gesamtprozesses zusammengesetzt werden können (Abb. 9). Das Filmen von Molekülen kann man zum Beispiel vergleichen mit Belichtungszeiten im Tausendstel-Sekunden-Bereich, die mit einem Profifotoapparat erreicht werden können. Damit lassen sich auch sehr schnelle Bewegungen – etwa spritzendes Was-

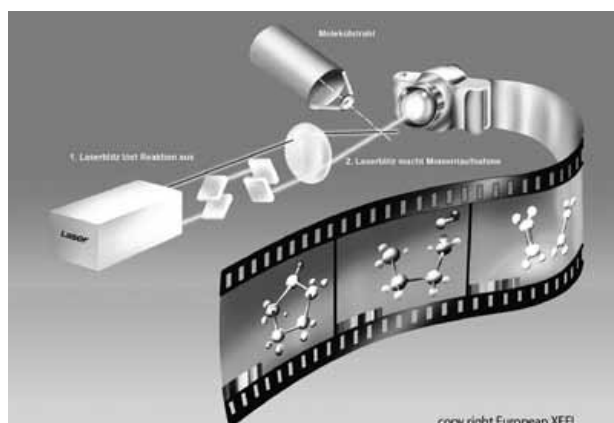


Abb. 9. Filmen von tanzenden Molekülen mit dem SwissFEL.

Fig. 9. Filming of dancing molecules with SwissFEL.

ser – quasi einfrieren. Für das Auge entsteht ein gestochen scharfes Bild. Am SwissFEL können Prozesse beobachtet werden, die um ein Vielfaches schneller ablaufen als fliegende Wassertropfen. Dafür werden Röntgenpulse im Femtosekundenbereich erzeugt, rund ein Billionstel der Belichtungszeit eines Profi-Fotoapparates. Einige Beispiele für solche Anwendungen werden hier vorgestellt.

3.2 Grundlagen für eine intakte Umwelt und eine gesicherte, klimaneutrale Energieversorgung

Ob Abgasreinigung oder Herstellung von Grundstoffen für die chemische Industrie: Bei zahllosen technischen Vorgängen werden Stoffe in chemischen Reaktionen ineinander umgewandelt. Besondere Substanzen, die Chemiker als Katalysatoren bezeichnen, sorgen dafür, dass solche Reaktionen möglichst effizient ablaufen können. Diese betei-

gen sich zwar an den Reaktionen, werden dabei aber nicht verbraucht. Obwohl Reaktionen mit Katalysatoren seit vielen Jahrzehnten in unzähligen Anwendungen genutzt werden, ist ihre Funktionsweise oft nicht verstanden. Ein solches Verständnis könnte zum Beispiel helfen Katalysatoren zu entwickeln, mit denen Stoffe umweltfreundlicher und energiesparender ineinander umgewandelt werden können.

Dass man die Vorgänge bis heute nicht im Detail versteht, liegt unter anderem daran, dass chemische Reaktionen extrem schnell ablaufen: Die Zeit, die vergeht, wenn sich Bindungen in einem einzelnen Molekül lösen und neue Bindungen für ein neues Molekül eingehen, dauert oft gerade mal 0,1 billionstel Sekunde (Billionstel = Millionstel eines Millionstels).

Um die Reaktionsabläufe genau zu verstehen, möchten die Wissenschaftler die einleitenden Schritte einer chemischen Reaktion beobachten, also gewissermassen einen Film mit einer extrem kurzen Belichtungszeit für die einzelnen Bilder aufnehmen. Der SwissFEL wird genau dies möglich machen, indem er intensive Röntgenlichtblitze erzeugen wird, die jeweils nur rund 10 Femtosekunden (Femtosekunde = 0,001 billionstel Sekunde) dauern und so einzelne Schritte der Reaktion ablichten können. (Abb. 10)

3.3 Grundlagen für massgeschneiderte Medikamente

Proteine bilden die Grundbausteine lebender Organismen und sind für zahllose lebenswichtige Vorgänge verantwortlich. Viele Proteine üben auch katalytische Funktionen für chemische Reaktionen aus, andere binden Hormone und Signalmoleküle, die das Verhalten von Zellen und ganzen Organen steuern. Ein kompliziert aufgebautes Proteinmole-

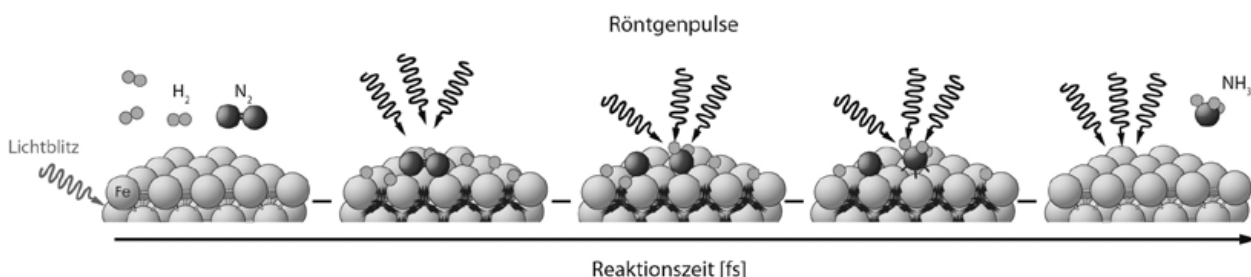


Abb. 10. Produktion von Ammoniak aus Wasserstoff und Stickstoff: Ammoniak ist einer der Grundstoffe für die Herstellung von Kunstdünger und leistet dadurch einen wichtigen Beitrag zur Welternährung. Möglich macht diese Reaktion erst die Vermittlung des Katalysators Eisen (hellgrau). Im SwissFEL wird man diese gut untersuchte Reaktion als Beispiel nutzen, um die wissenschaftlichen Möglichkeiten der Anlage zu erproben.

Fig. 10. Production of ammonia from hydrogen and nitrogen: ammonia is one of the basic materials used in the manufacture of artificial fertilizers and therefore makes an important contribution to global nutrition. This reaction can only succeed with the help of a catalyst – in this case iron (light grey). Although this is a well-understood reaction, it will be used as an example at the SwissFEL, in order to check the scientific potential of the facility.

kül besteht aus vielen tausend Atomen, die auf einzigartige Weise angeordnet sein müssen, damit das Molekül seine Aufgabe erfüllen kann. Dabei sind Proteine innerhalb einer lebenden Zelle keine starren Körper, sondern führen Bewegungen aus, deren Dauer zwischen Femtosekunden und einigen Sekunden liegen.

Mit ultrakurzen Röntgenblitzen, wie sie am SwissFEL erzeugt werden, lassen sich Bewegungen von Molekülen zeitlich verfolgen und so die Prozesse beobachten, an denen diese Moleküle beteiligt sind. Zukünftige Experimente sollen beispielsweise dazu beitragen, die molekularen Prozesse zu verstehen, die bei Infektionskrankheiten, funktionseinschränkenden Erkrankungen der Zellen in Organen wie z.B. des Nervensystems, der Gelenke, der Organe des Verdauungstraktes oder bei Tumorerkrankungen eine Rolle spielen. Diese Erkenntnisse werden in Zukunft die Entwicklung von massgeschneiderten Medikamenten ermöglichen.

Der räumliche Aufbau von Proteinen kann schon heute sehr erfolgreich mit dem Verfahren der Proteinkristallographie an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS) untersucht werden. Solche Messungen ergeben aber nur ein statisches Bild dieser komplexen biologischen Maschinen. Gleichzeitig gibt es eine grosse Zahl wichtiger Proteine, die sich mit diesem Verfahren nur sehr schwer untersuchen lassen – die sogenannten Membranproteine, die in der Aussenhaut der Zellen eingebettet sind. Deshalb kennen wir die Struktur von vielen Membranproteinen nicht. Der SwissFEL ermöglicht die Entwicklung neuer Experimentiermethoden, mit denen zukünftig sowohl Membranproteine als auch die Strukturen von ganzen Proteinkomplexen, die in vielen Varianten in Zellen und Organen auftreten, untersucht werden könnten. Mit ähnlichen Methoden sollen auch katalytisch wirksame Proteine, sogenannte Enzyme, direkt bei der Arbeit beobachtet werden. Diese Enzyme beeinflussen wichtige chemische Umwandlungen und erleichtern den Ablauf chemischer Reaktionen und die gezielte Herstellung chemischer oder biologischer Moleküle. Dank der hohen Zeitauflösung des SwissFEL wird es möglich sein, einzelne Reaktionsschritte, wie das Aufbrechen und Neubilden chemischer Bindungen, zeitlich aufzulösen.

3.4 Weitere mögliche Anwendungen

Ein anderes spannendes Thema, das die Grundlagenforscher am PSI beschäftigt, ist die Fotosynthese: Durch Sonnenlicht stellen grüne Pflanzen energiereiche Stoffe aus Wasser und CO₂ her. Einen ähnlichen Vorgang könnte man künftig nutzen, um flüssigen Treibstoff (Methanol) mit

Sonnenenergie herzustellen. Um aber effiziente und stabile Systeme für eine künstliche Photosynthese zu entwickeln, muss man die Zwischenschritte innerhalb des Prozesses genau kennen. Das Ergebnis wäre eine erneuerbare grüne Energiequelle, die CO₂-neutral ist.

Auch in der Materialforschung wollen die Schweizer Forschenden vom SwissFEL profitieren. Zum Beispiel auf der Suche nach neuen magnetischen Materialien für die schnellere und effizientere Speicherung von Daten. Elektronische Geräte sollen heutzutage möglichst komfortabel sein. Das heisst in der Regel klein und leicht. Gleichzeitig sollen sie jedoch schnell grosse Mengen von Daten speichern. Heutige Techniken der Datenspeicherung stossen langsam an ihre Grenzen, und so wird an neuen Technologien mit neuen Materialien geforscht. Die Erforschung von winzigen magnetischen Strukturen oder Materialien, deren magnetische Struktur sich unmittelbar mit einem elektrischen Strom verändern lässt, interessiert die Wissenschaftler. Das Umschalten der Struktur geschieht ultraschnell und könnte dank der hohen Zeitauflösung des SwissFEL besser verstanden und dann optimiert werden.

4 SWISSFEL – DAS BAUPROJEKT – FORSCHUNG AUF 700 M LÄNGE IM EINKLANG MIT DER NATUR

Der Röntgenlaser SwissFEL soll in der Nähe des Geländes des Paul Scherrer Instituts im Würenlinger Wald gebaut werden. Der gewählte Standort erfüllt als einziger die Bedingungen für einen erfolgreichen Betrieb. Leicht gemacht hat es sich das PSI nicht mit der Auswahl des Standorts. Seit 2006 hat es 7 Standortmöglichkeiten für die neue, 700 m lange Anlage im Detail überprüft. Aufgrund der extrem hohen Empfindlichkeit des SwissFEL auf Erschütterungen und Vibrationen schied ein Standort nach dem anderen aus. Als einzig geeignet stellte sich letztendlich der Standort Würenlinger Unterwald heraus. (Abb. 11)

Hier werden auch die anderen Voraussetzungen für die Anlage erfüllt: Anbindung an die Infrastruktur des PSI, eine konstante Betriebstemperatur der Anlage dank Grundwasserkühlung und geringe Temperaturschwankungen – die für die Präzision des Röntgenlaserstrahls im Inneren der Anlage wichtig sind – durch das Mikroklima im Wald. (Abb. 12)

Da gegen einen Bau im Wald verständlicherweise Vorbehalte bestehen, hat das PSI von Anfang an versucht, alle Interessenvertreter in die Gestaltung mit einzubeziehen. So wurden zwei Informationsveranstaltungen in der



Abb. 11. Ansicht Standort SwissFEL im Würenlinger Wald (Karte aus Google Earth).

Fig. 11. Map of SwissFEL location within the Würenlinger Wald (Map copied from Google Earth).

Gemeinde, zu der der Wald gehört, durchgeführt und eine Arbeitsgruppe ins Leben gerufen. Diese bestand neben den Experten des PSI aus Vertretern des Kantons, der Gemeinde Würenlingen, dem zuständigen Jagdleiter und Förster, einem Landschaftsarchitekten und einem Beratungsbüro für Ökologie und Landschaftsplanung. Gemeinsam wurde ein Konzept ausgearbeitet mit dem Ziel, die temporär und permanent zu rodende Waldfläche sowie die Beeinträchtigung für die Erholungssuchenden zu minimieren. Auch Waldbewirtschaftung und Wildwechsel wurden berücksichtigt. Als Ergebnis der Überlegungen konnte das PSI der zuständigen Kommission des Grossen Rates im Mai 2011 ein Konzept präsentieren, das auf die Bedürfnisse aller Interessenvertreter Rücksicht nimmt. So wird die Anlage fast gänzlich mit Erde überdeckt werden, so dass eine Waldlichtung mit neuen ökologisch hochwertigen Landschaftselementen entsteht. Der gegenwärtig geschlossene Wald mit Reh, Fuchs und Wildschwein soll auch

ein Lebensraum für Tagfalter, Wildbienen, Reptilien und Amphibien werden. Ein stufiger Waldrand, offene Bodenstellen mit Blütenreichtum, Stauden, Hecken, Pioniergehölze sollen dies genauso ermöglichen wie Weiher, Steinhäufen und Wurzelstöcke. Damit erhält der Wald insgesamt eine ökologische Aufwertung zum Nutzen von Flora und Fauna, aber auch der Menschen, die hier ihre Freizeit verbringen.

Kritisch wurde die Frage der Grundwasserentnahme zum Zweck der Kühlung des SwissFEL geprüft. Diese wird in ähnlicher Menge wie bei anderen benachbarten Fassungen stattfinden und wird gemäss einer Studie das Grundwassersystem nicht ungebührlich beeinflussen. Um den Berechnungen Hand und Fuss zu geben, wird das PSI in einem nächsten Schritt einen Pumpversuch an der Stelle durchführen, wo später das Wasser entnommen werden soll.

Für die Rückgabe von erwärmtem Wasser in die Aare hält das PSI eine Konzession. Die bewilligte Menge wird auch mit der zusätzlichen Rückgabe des Kühlwassers, das durch den Betrieb des SwissFEL anfällt, nicht überschritten werden. Die Rückführung des durch den Kühlvorgang auf 30 Grad erwärmten Wassers in die Aare würde – ohne weitere Massnahmen – zu einer Temperaturerhöhung der Aare von weit unter 0,1 Grad führen und somit keine messbaren Auswirkung haben. Gleichzeitig läuft am PSI die Vorbereitung von Wärmerückgewinnungsmassnahmen, um die Menge der vom PSI in die Aare eingebrachten Wärme insgesamt zu reduzieren und die Wärmeenergie möglichst effizient innerhalb des PSIs zu nutzen. Das PSI freut sich, dass es mit seinen weitreichenden Vorkehrungen und Planungen Politik und Bevölkerung davon überzeugen konnte, dass die geplante Anlage ökologisch vertretbar



Abb. 12. Ansichten der zukünftigen SwissFEL Anlage. Ansicht A Wildübergang; Erdwall über den SwissFEL Strahlentunnel. Ansicht B Weg zum Eingang der SwissFEL Experimentierhalle.

Fig. 12. Views of the future SwissFEL facility. View A passage for wildlife. View B right entrance to the experimental hall.

Einbettung SwissFEL

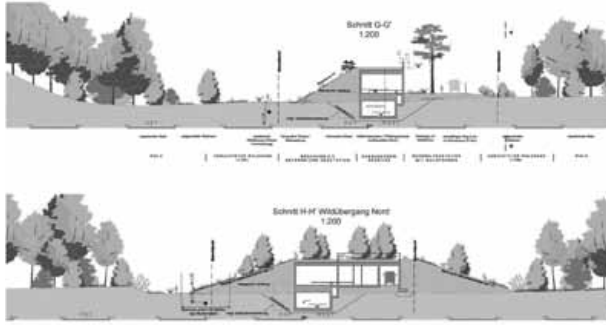


Abb. 13. Querschnitte der SwissFEL Anlage in der Landschaft eingebettet.

Fig. 13. Cross sections of SwissFEL facility within landscape.

ist. Das spiegelt sich auch darin wider, dass die Ortsbürgergemeinde Würenlingen Anfang Juni 2011 den Vorvertrag zum Baurechtsvertrag des SwissFEL im Würenlinger Unterwald einstimmig angenommen hat.

4.1 Das Gebäude

Das gesamte Gelände wird 750 Meter lang und 40 bis 70 Meter breit sein, die Anlage selbst wird eine Länge von gut 715 Metern haben. Wesentliche Teile des SwissFEL werden unterirdisch gebaut, der oberirdische Teil wird grösstenteils mit Erde überdeckt, so dass auf der Anlage wertvolle Lebensräume für Tiere und Pflanzen entstehen können. Der Beschleuniger des SwissFEL benötigt für den Betrieb zusätzliche Versorgungsanlagen, für die über dem Beschleunigertunnel ein rund 450 Meter langer schmaler oberirdischer Gebäudeteil errichtet wird. Am Ende verbreitert sich das Gebäude, so dass Platz für die Experimentierhallen entsteht – in diesem Bereich ist es aber nur einstöckig angelegt, so dass es im Wesentlichen unterirdisch sein wird. (Abb. 13)

Die Kosten des SwissFEL betragen rund 275 Millionen Franken und sollen zum grössten Teil vom Bund getragen werden. Endgültig wird über die Finanzierung im Herbst 2012 entschieden. Der Kanton Aargau hat sich schon im vergangenen Jahr vom Nutzen des SwissFEL für Forschung und Industrie überzeugt und beteiligt sich mit 30 Millionen Franken an der Finanzierung.

Tab. 1. Eckdaten SwissFEL.

Tab. 1. Key data of SwissFEL.

Eckdaten für den Bau des SwissFEL	
Genehmigung Richtplanänderung	August 2011
Genehmigung Bau und Nutzungsordnung	November 2011
Baubeginn	Frühjahr 2013
Inbetriebnahme der Maschine	2016
Bauzone	4.7 ha
Der Natur entzogene Fläche	1.0 ha oder 22 %; eine entsprechende Fläche wird im Bärengraben Würenlingen wieder aufgeforstet.
Länge der Anlage	ca. 700 m
Gebäude-Volumen	ca. 77'000 m ³ ca. 100 kleinere Einfamilienhäuser
Geschossflächen	16'000m ² ein Fussballfeld (FIFA ab WM2002 105 m lang und 68 m breit 7'140 m ²)
Aushub:	ca. 100'000 m ³
Verbauter Beton:	ca. 25'000 m ³

Dr. Mirjam van Daalen, wissenschaftliche Koordinatorin SwissFEL, Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen, mirjam.vandaalen@psi.ch
 Dr. Fritz Gassmann, Schülerlabor iLab, Paul Scherrer Institut, 5253 Villigen, fritz.gassmann@psi.ch