

XFELinfo

Wissenswertes rund um das europäische Röntgenlaserprojekt XFEL

Inhaltsverzeichnis

Über dieses Dokument.	4
An wen richtet sich dieses Angebot?.....	4
Wissensdurststufen.	4
Wissensdurststufe 'klein'.....	4
Wissensdurststufe 'mittel'.....	5
Wissensdurststufe 'groß'.....	5
XFEL: Die längste Röntgenlichtquelle Europas.	6
Projekt: Ein europäisches Projekt in Deutschland.	7
Der Standort des XFEL.	7
Drei Betriebsgelände.	8
XFEL-Betriebsgelände DESY-Bahrenfeld.	8
XFEL-Betriebsgelände Osdorfer Born.	9
XFEL-Betriebsgelände Schenefeld.	10
FLASH.	11
Sicherheit.	12
Zahlen und Fakten.	14
Allgemeines.	14
Der Beschleuniger.	15
Der Laser.	15
Die Experimentierhallen.	16
Forschung: Forschungsvielfalt am XFEL.	18
Chemische Reaktionen filmen.	18
Die Struktur von Biomolekülen entschlüsseln.	20
Reibung verstehen.	21
Plasma erforschen.	22
Cluster untersuchen.	25
Lichtquelle: Röntgenlaserblitze der besonderen Art.	28
Licht & Co.: Das ganze Spektrum des Lichts.	29
Röntgenlicht: Licht, das unter die Haut geht.	30
Entdeckung der Röntgenstrahlung.	30
X-Strahlen.	30
Ende der Geheimniskrämerei.	31
Der neue Trend: Alles durchleuchten!.	31
Medizinische Anwendungen von Röntgenlicht.	31
Eigenschaften von Laserlicht.	33
Einfarbigkeit.	33
Laserlichtartigkeit (Kohärenz).	34
Intensität, Emittanz und Brillanz.	34

Freie-Elektronen-Laser: Gemeinsam sind sie stark.	36
Das Prinzip der Freie-Elektronen-Laser.	36
Microbunching.	37
Gemeinsam sind sie stark.	38
Geschichte der Freie-Elektronen-Laser.	39
Der Name.	39
Eigenschaften der XFEL-Röntgenlaserblitze.	39
Hohe Intensität und Laserlichtartigkeit.	39
Kurze Dauer.	40
Kurze Wellenlängen.	41
Beschleuniger: Schnelle Elektronen als Leuchten.	42
Beschleunigung: Teilchen auf Trab bringen.	43
Supraleitung: Wenn der Widerstand gefriert.	44
Supraleitung.	44
Entdeckung.	45
BCS: Paarlaufen.	46
Neue Supraleiter.	46
Supraleitung beim XFEL.	47
Längere Betriebszeiten.	48
Weniger Störwellen.	48
Vakuum: Bahn frei für die Elektronen.	50
Vakuum.	50
Horror vacui.	51
Vakuum beim XFEL.	51
Reinraum: Nicht nur sauber, sondern rein.	53
Impressum.	54
Anbieter.	54
Elektronischer Kontakt.	54
Adresse.	54
Briefanschrift.	54
Mitwirkende.	55
Standards und Barrierefreiheit.	55
Lexikon.	56

Über dieses Dokument

Dieses Dokument ist die Druckfassung des Informations- und Lernangebots **XFELinfo** unter <http://xfelinfo.desy.de>. Es beschreibt das europäische Röntgenlaserprojekt XFEL. Die jeweils aktuellste Fassung finden Sie unter der oben angegebenen Webadresse.

Dieses Dokument besteht aus verschiedenen Themen wie „Projekt“, „Anwendungen“ und „Röntgenlicht“, zu denen - je nach eingestellter Wissensdurststufe - vertiefende Informationen verfügbar sind. Das Dokument schließt mit einem Lexikon ab, in dem alle wichtigen Begriffe kurz und knapp erläutert werden.

An wen richtet sich dieses Angebot?

Dieses Angebot richtet sich an alle, die mehr über das XFEL-Projekt erfahren wollen. Es setzt - zumindest in den einfachen Wissensdurststufen - kein naturwissenschaftliches Vorwissen voraus.

Wissensdurststufen

XFELinfo gibt es in unterschiedlichen Wissensdurststufen: Je nachdem, wie viel sie über das Projekt erfahren wollen, können Sie aus den Stufen klein, mittel und groß auswählen.

Wissensdurststufe 'klein'

In der kleinen Wissensdurststufe erfahren Sie das Allerwichtigste, das es über den XFEL zu wissen gibt. Wozu ist er da? Wer baut ihn? Und wo?

Zu erkennen sind Inhalte dieser Wissensdurststufe am Symbol



Wissensdurststufe 'mittel'

In der mittleren Wissensdurststufe lernen Sie weitere Details über den XFEL: Woraus besteht die XFEL-Anlage? Welche Forschung wird mit dem XFEL möglich sein? Wie wird ein so großes Projekt geplant und durchgeführt? Zudem gibt's weitere Hintergrundinformation zum Röntgenlicht, sichtbarem Licht und Co.

Zu erkennen sind Inhalte dieser Wissensdurststufe am Symbol



Wissensdurststufe 'groß'

Die große Wissensdurststufe liefert die meisten Details zum XFEL: Wie ist sein Beschleuniger aufgebaut? Wie funktionieren Vakuumtechnik und Supraleitung? Was ist das Besondere an den Röntgenlaserblitzen?

Zu erkennen sind Inhalte dieser Wissensdurststufe am Symbol



XFEL

Die längste Röntgenlichtquelle Europas

XFELinfo liefert Wissenswertes und Allgemeinverständliches rund um das europäische Röntgenlaserprojekt XFEL.

Mit dem europäischen Röntgenlaserprojekt XFEL wird an der Grenze zwischen Hamburg und Schleswig-Holstein ein ganz besonderes Licht aufgehen. Denn die einzigartigen Röntgenlaserblitze des XFEL eröffnen völlig neue experimentelle Möglichkeiten. Mit ihnen lassen sich chemische Reaktionen filmen, atomare Details von Molekülen entschlüsseln und dreidimensionale Aufnahmen aus dem Nanokosmos machen. Der XFEL wird damit Spitzenforscherinnen und -forscher aus der ganzen Welt anziehen.

Die Abkürzung XFEL steht für „Röntgenlicht-Freie-Elektronen-Laser“ (*X-ray free-electron laser*) und beschreibt die Funktionsweise der Anlage: Im XFEL werden Elektronen zunächst auf hohe Energien beschleunigt und danach zur Aussendung von hochintensiven Röntgenlaserblitzen gebracht.

Geplant wird der Röntgenlaser als europäisches Projekt mit starker Anbindung an das Forschungszentrum DESY in Hamburg. Im Frühjahr 2008 soll mit seinem Bau und Ende 2013 mit seiner Inbetriebnahme begonnen werden.

Dieses Informationsangebot stellt Ihnen das Projekt im Detail vor. Wie stark Sie dabei in die Welt der Röntgenlaserblitze, Teilchenbeschleuniger und Supraleitung abtauchen wollen, können Sie anhand des einstellbaren Wissensdurstes selbst entscheiden.

Projekt

Ein europäisches Projekt in Deutschland

Erfahren Sie hier Details zum Projekt - zu Beteiligten, Zeitplänen und den Stand der Entwicklung.

Der Röntgenlaser XFEL ist als Projekt mit europäischer Beteiligung geplant. Am Rande der schleswig-holsteinischen Stadt Schenefeld (Kreis Pinneberg) wird hierfür ein völlig neues Forschungszentrum entstehen. Dort werden die Röntgenlaserblitze, die zuvor in einer 3,4 km langen Anlage erzeugt wurden, für Forschungszwecke genutzt. Aufgrund seiner Ausmaße ist der XFEL die längste künstliche Lichtquelle auf Erden.

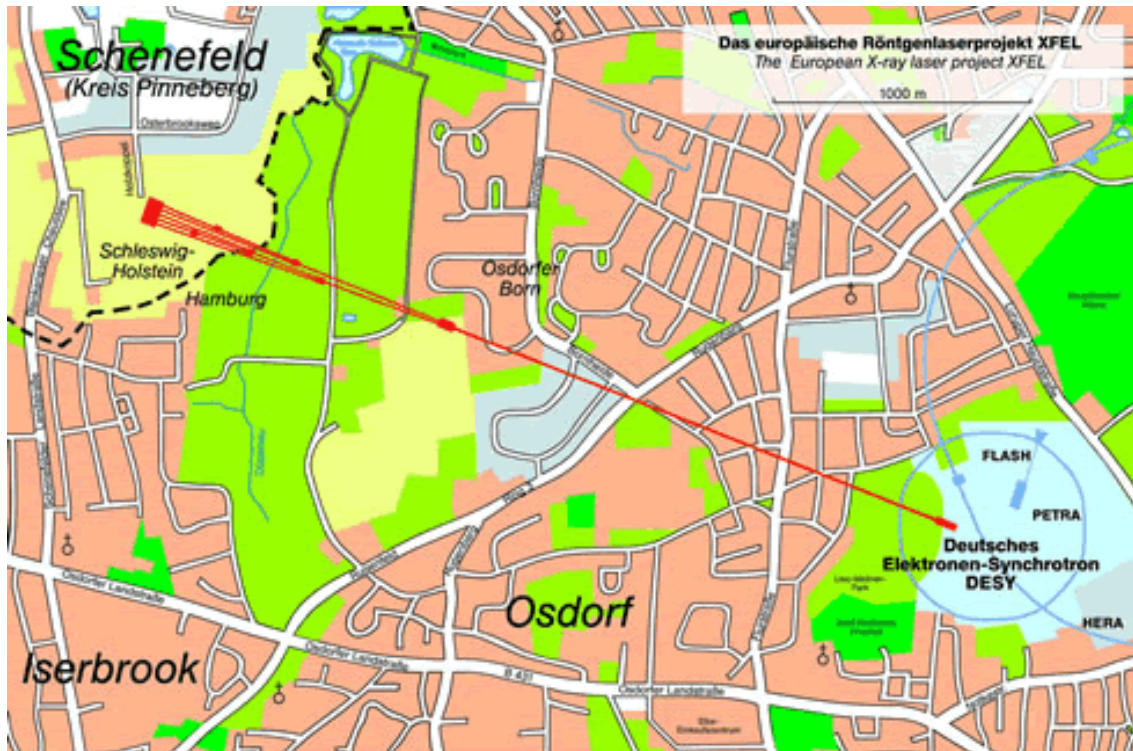
Die veranschlagten Kosten für das Projekt betragen 986 Millionen Euro. Der Baubeginn ist für das Frühjahr 2008 geplant, der Start der Inbetriebnahme für Ende 2013. Im Jahr darauf soll es dann schon heißen: Beschleuniger los, Licht an und Action!

Der Standort des XFEL

Der 3,4 Kilometer lange Röntgenlaser wird vom DESY-Gelände bis zur Stadt Schenefeld verlaufen. Der überwiegende Teil der Anlage befindet sich dabei sechs bis 38 Meter unter der Erde.

Der Plan sieht vor, die 3,4 Kilometer lange Röntgenlaseranlage auf dem DESY-Gelände in Hamburg-Bahrenfeld anfangen zu lassen. Sie wird dann in nordwestliche Richtung verlaufen und in der schleswig-holsteinischen Stadt Schenefeld (Kreis Pinneberg) enden. Hier soll eine Experimentierhalle mit zehn Messstationen errichtet werden. Das Gelände ist für eine zweite Halle ausgelegt, die in einer zweiten Ausbaustufe errichtet wird.

Der Hauptteil der Anlage befindet sich in Tunneln in einer Tiefe zwischen sechs und 38 Meter unter der Erde.



Der Standort des Projekts

Die Versorgungsgebäude – wie zum Beispiel für Kälte und Energie – können auf dem DESY-Gelände errichtet werden, so dass dafür keine neuen Grundstücke erworben werden müssen. Bestehende Einrichtungen lassen sich dabei teilweise nutzen. Die Anbindung an DESY bietet einen weiteren Vorteil: Weit in die Zukunft geschaut, könnte man den Linearbeschleuniger des Röntgenlasers später mit auf dem DESY-Gelände schon vorhandenen Teilchenbeschleunigern verbinden, um neue Möglichkeiten für die Wissenschaft zu schaffen.

Drei Betriebsgelände

Oberirdisch ist der XFEL an drei Orten angesiedelt, den XFEL-Betriebsgeländen DESY-Bahrenfeld, Osdorfer Born und Schenefeld. Hier stehen Anlagen und Gebäude, die für den Betrieb des XFEL erforderlich sind. Über die Betriebsgelände erfolgt zudem der Zugang zu den Tunneln.

XFEL-Betriebsgelände DESY-Bahrenfeld



Das Betriebsgelände DESY-Bahrenfeld als Architekturbeispiel aus der Luft

Auf dem Betriebsgelände DESY-Bahrenfeld (2 ha) in Hamburg fängt für den XFEL alles an. Hier startet der Beschleunigertunnel. Hier befindet sich der Injektorbereich, in dem die Elektronen bereitgestellt und für die Beschleunigung vorbereitet werden. In Bahrenfeld stehen zudem die Infrastrukturanlagen zur Kälte- und Energieversorgung sowie die Zugangsschächte und -hallen zum Bergen der Tunnelbohrmaschine und zur Beschickung des Beschleunigertunnels mit Komponenten.

XFEL-Betriebsgelände Osdorfer Born



Das Betriebsgelände Osdorfer Born als Architekturbeispiel aus der Luft

Die Lage des Betriebsgeländes Osdorfer Born (1,6 ha) ergibt sich aus dem Verlauf der XFEL-Trasse zwischen dem Anfangspunkt auf dem DESY-Gelände und dem Forschungsgelände in Schenefeld sowie aus der Länge des Beschleunigertunnels: Hier am Osdorfer Born endet der Hauptbeschleuniger, hier werden die Elektronenpakete erstmals auf verschiedene Tunnel für die Lichterzeugung verteilt.

XFEL-Betriebsgelände Schenefeld



Das Betriebsgelände Schenefeld als Architekturbeispiel aus der Luft

Das XFEL-Betriebsgelände Schenefeld (25 ha) ist das zentrale Forschungsgelände für den Röntgenlaser. Hier werden bis zu 350 Personen aus dem In- und Ausland arbeiten und mit dem intensiven Röntgenlicht aus dem XFEL forschen. Hier findet man – neben verschiedenen Versorgungseinrichtungen für die Anlage – die großen Experimentierhallen, Labor- und Bürogebäude sowie Hörsaal, Seminarräume, Bibliothek, Kantine und ein Informations- und Ausstellungszentrum.

FLASH

Im Jahr 2004 nahm DESY die Röntgenlaserpilotanlage FLASH in Betrieb. Dieser kleine Bruder des XFEL erreicht zwar nicht dessen Wellenlängen und Intensitäten. Dennoch sind auch hier bereits wegweisende Experimente möglich.



Die Experimentierhalle von FLASH aus der Luft

Die Röntgenlaserpilotanlage FLASH (ehemals: VUV-FEL) ist eine 260 Meter lange Version des XFEL. Sie ging aus einer Testanlage hervor, die bis 2003 auf dem DESY-Gelände betrieben wurde und an der das Funktionsprinzip für den XFEL getestet wurde. FLASH ist die erste Quelle für kurzweilige Laserblitze (im Vakuum-Ultravioletten (VUV) und im weichen Röntgenbereich) mit hoher Spitzenleuchtstärke. Das wissenschaftliche Interesse ist sehr groß: Rund 200 Wissenschaftler aus neun Ländern reichten für die erste Messperiode 29 Projektvorschläge für Experimente aus Bereichen wie Cluster-, Festkörper- und Oberflächenphysik, Plasmaforschung sowie Molekularbiologie ein.

Bis zum Jahr 2009 wird der FLASH der weltweit einzige Freie-Elektronen-Laser für den Bereich der weichen Röntgenstrahlung sein, der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern für ihre Forschungen zur Verfügung steht. Sein Betrieb liefert wichtige Erkenntnisse für den geplanten Röntgenlaser XFEL, der noch kürzere Wellenlängen erzeugen wird. Zugleich führen die Wissenschaftler an der Anlage die Entwicklungsarbeiten für einen neuen Beschleuniger für die Teilchenphysik fort.

Die FLASH-Anlage beschleunigt Elektronen auf eine Energie von einer Milliarde Elektronenvolt. (Zum Vergleich: Der XFEL wird 20 Milliarden Elektronenvolt erreichen.) Anschließend durchlaufen die Elektronen eine 30 Meter lange Magnetfeldanordnung (Undulator), in der Laserblitze im Vakuum-Ultravioletten und weichen Röntgenbereich erzeugt werden. (Die Undulatoren des XFEL werden bis zum 150 Meter lang sein.) Schließlich werden die intensiven Lichtblitze auf insgesamt fünf Messplätze verteilt.

Sicherheit

Trotz der Durchschlagungskraft der Röntgenlaserblitze: Der XFEL ist ungefährlich und kann ohne Risiken unter und in dicht besiedeltem Gebiet betrieben werden. Mehrfache Sicherheitsmechanismen sorgen dafür, dass von ihm keine Gefährdung für die Umwelt ausgeht, selbst bei einer eventuellen Betriebsstörung nicht.

DESY ist weltweit das Forschungsinstitut mit der umfassendsten Erfahrung bei der Errichtung und beim Betrieb von Teilchenbeschleunigern und Röntgenstrahlungsquellen in der Nachbarschaft von Wohngebieten. Seit über 40 Jahren betreibt DESY Beschleunigeranlagen mitten in Hamburg. Dazu gehören derzeit der 6,3 Kilometer lange unterirdische Ringbeschleuniger HERA, der unter Wohn- und Gewerbegebieten und dem Hamburger Volkspark verläuft, sowie die Röntgenstrahlungsquelle DORIS. Der Betrieb dieser Anlagen verläuft völlig problemlos; in all den Jahren kam es zu keinerlei Belastungen der Bevölkerung.



Der 6,3 Kilometer lange unterirdische HERA-Beschleuniger bei DESY ist seit 1992 im Forschungsbetrieb. Er verläuft zu 80 Prozent außerhalb des DESY-Geländes – unter Wohn- und Gewerbegebieten, der Bahrenfelder Trabrennbahn und dem Hamburger Volkspark.

Auch der XFEL kann ohne Risiken unter und in besiedeltem Gebiet errichtet und betrieben werden: Er erzeugt weder Lärm noch giftige Abgase und kann auch nicht explodieren. Lediglich im Betrieb entsteht ionisierende Strahlung (umgangssprachlich „radioaktive Strahlung“), so dass sich Menschen während des Betriebs der Anlage nicht innerhalb der Tunnel sowie in unmittelbarer Nähe der Experimentiereinrichtungen aufhalten dürfen. Dass niemand die entsprechend gesperrten Bereiche betritt, gewährleisten erprobte, bei DESY seit Jahren übliche Zugangskontrollsysteme.

Da sowohl der Beschleunigertunnel als auch der Röntgenlaserfächer tief genug unter der Erde verlaufen, ist die Strahlung, die durch das Erdreich bis an die Oberfläche dringen kann, im

Vergleich zu der überall vorhandenen natürlichen Strahlung vernachlässigbar gering. Auch für Erdreich, Wasser und Luft geht vom XFEL keine Gefahr aus: Selbst unmittelbar in der Umgebung der Tunnelröhre ist die in 20 Betriebsjahren entstehende Radioaktivität im Erdreich geringer als die im Boden von Natur aus vorhandene Radioaktivität, und die radioaktive Belastung für Grundwasser und Tunnelluft liegt weit unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte.

Auch bei einer eventuellen Betriebsstörung bestehen für die Umwelt keine Gefahren: Eine aus technischer Sicht gravierende Störung tritt auf, wenn der Elektronenstrahl seine Bahn im Beschleuniger verlässt. Wegen seiner gebündelten hohen Energie würde er dann Teile des Röntgenlasers zerstören, was zu einem langen Ausfall der gesamten Anlage führen würde. Schon deshalb ist der XFEL bereits vom Prinzip her so konzipiert, dass in solch einem Fall die Teilchenstrahlen sogleich in die entsprechenden Elektronenauffänger gelenkt werden und die ganze Anlage sofort automatisch abgeschaltet wird. Auch im Normalbetrieb werden die für den XFEL benötigten Elektronen nach der Erzeugung der Röntgenstrahlung in Elektronenauffänger gelenkt, in denen sie abgebremst werden und ihre Energie in Wärme umgewandelt wird. Diese Elektronenauffänger befinden sich in speziell abgeschirmten Schächten tief unter der Erde, so dass auch hier die an die Erdoberfläche gelangende Strahlung gegenüber der in der Natur immer vorhandenen Strahlung vernachlässigbar gering ist. Was die Röntgenlaserstrahlung betrifft, so kann diese gleich hinter den Experimenten in Auffängern aus Blei abgebremst und vernichtet werden. Die einzelnen Experimentierstationen befinden sich hinter entsprechenden Abschirmwänden und in unzugänglichen Bereichen, so dass in den Experimentierhallen außerhalb dieser Bereiche auch während des Betriebs gearbeitet werden kann.

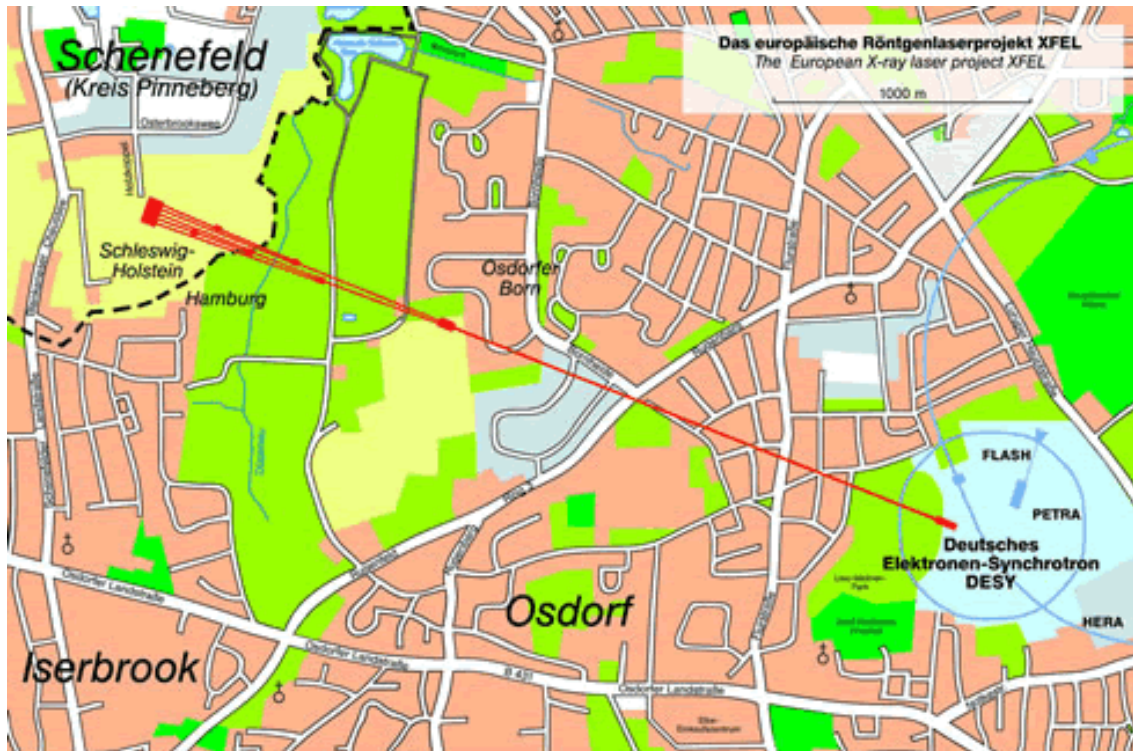
Zahlen und Fakten

Erfahren Sie hier mehr zu den Kosten und der Funktionsweise des XFEL in einer Übersicht der wichtigen Details.

Allgemeines

- **Gesamtlänge der Anlage:** ca. 3,4 Kilometer
- **Standort:** Die Anlage wird auf dem DESY-Gelände in Hamburg-Bahrenfeld beginnen und in nordwestliche Richtung bis zur schleswig-holsteinischen Stadt Schenefeld (Kreis Pinneberg) verlaufen.
- **Betriebsgelände:** Ein Großteil der Anlage befindet sich in Tunneln unter der Erde. Oberirdisch wird die Anlage an drei Betriebsgeländen in Erscheinung treten (DESY-Bahrenfeld, Osdorfer Born und Schenefeld). Dort befinden sich Versorgungsbauwerke sowie Zugangs- und Experimentiergebäude.
- **Kosten:** Für den Bau des XFEL wird derzeit mit Kosten in Höhe von ca. 986 Millionen Euro gerechnet. Deutschland trägt als Sitzland etwa 60 Prozent der Kosten, die

verbleibende Summe wird von den europäischen Partnern eingeworben.



Der Standort des Projekts

Der Beschleuniger

Um die XFEL-Röntgenlaserblitze zu erzeugen, werden zunächst Elektronen auf hohe Energien beschleunigt.

- **Länge des Beschleunigertunnels:** ca. 2,1 Kilometer
- **Tiefe der Tunnel unter der Erde:** ca. 6 – 38 Meter
- **Energie der Elektronen:** 10 bis 20 Milliarden Elektronenvolt
- **Betriebstemperatur der Beschleunigerelemente:** minus 271 Grad Celsius

Der Laser

Nach der Beschleunigung werden die Elektronen in einem Tunnelfächer auf Magnetfeldanordnungen (so genannte Undulatoren) verteilt, in denen sie zur Erzeugung von Röntgenlaserblitzen angeregt werden.

- Die **Leuchtstärke** des XFEL setzt neue Maßstäbe: Seine Spitzenbrillanz milliardenfach größer als die herkömmlicher Strahlungsquellen, die mittlere Brillanz immer noch 10 000-mal größer.
- Die **Dauer** der Lichtpulse wird bei unter 100 milliardstel Sekunden (100 Femtosekunden) liegen. Damit lassen sich selbst chemische Reaktionen filmen, die für andere Verfahren viel zu schnell ablaufen.
- Die **Wellenlänge** der Röntgenlaserblitze kann im Bereich von 0,085 bis 6 milliardstel Metern (Nanometer) variiert werden. Damit werden selbst atomare Details erkennbar.
- Die Röntgenlaserblitze werden die Eigenschaften von **Laserlicht** aufweisen. Damit werden beispielsweise dreidimensionale Aufnahmen aus dem Nanokosmos möglich.
- Zur Lichterzeugung kommt der **SASE-Effekt** (*self-amplified spontaneous emission*) zum Einsatz. Dabei wechselwirken die Elektronen mit der Strahlung, die sie (oder ihre Nachbarn) aussenden. Dadurch bilden die Elektronen Kleinstgruppen, die so angeordnet sind, dass sich die spontan abgegebene Strahlung laserlichtartig verstärkt.

Die Experimentierhallen

In Experimentierhallen stehen die Röntgenlaserblitze Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern für ihre Forschung zur Verfügung.

- **Experimentierhallen:** zunächst wird eine unterirdische Experimentierhalle mit 10 Messplätzen an 5 Strahlführungen realisiert. Für die Ausbaustufe des XFEL ist eine weitere solche Halle geplant. Die Messplätze werden im 24-Stunden-Betrieb genutzt.



Die Experimentierhalle (Architekturbeispiel)

Forschung

Forschungsvielfalt am XFEL

Lernen Sie, welche Möglichkeiten der XFEL für die Forschung eröffnen wird.

Das europäische Röntgenlaserprojekt XFEL wird Experimentierfelder erschließen, von denen Wissenschaftler bisher nur träumen durften.

Die XFEL-Röntgenlaserblitze sind beispielsweise so kurz, dass sich damit chemische Reaktionen filmen lassen. Belichtungszeiten im Bereich von milliardstel Sekunden garantieren, dass nichts verwackelt. Nutzen lassen sich solche Aufnahmen etwa, um die Prozesse in Brennstoff- und Solarzellen besser zu verstehen. Die Forscher können aber auch Biomolekülen bei der Arbeit zuschauen oder im Detail untersuchen, wie sich Atome und Moleküle zu Werkstoffen formen.

Bei den möglichen Anwendungen der XFEL-Röntgenlaserblitze ist für jeden etwas dabei: Ob Chemiker, Biologen, Materialforscher oder Physiker – das Projekt wird von interdisziplinärem Nutzen sein. Auch der Industrie werden sich ganz neue Möglichkeiten eröffnen.

Zudem bringt der XFEL viele unterschiedliche Denk- und Wissensrichtungen zusammen, die sich gegenseitig fordern und fördern werden. Die Erfahrung zeigt, dass aus einem solchen Wechselspiel vielfältige Anregungen und Ideen erwachsen, die zu konkreten Produkten und Produktverbesserungen führen.

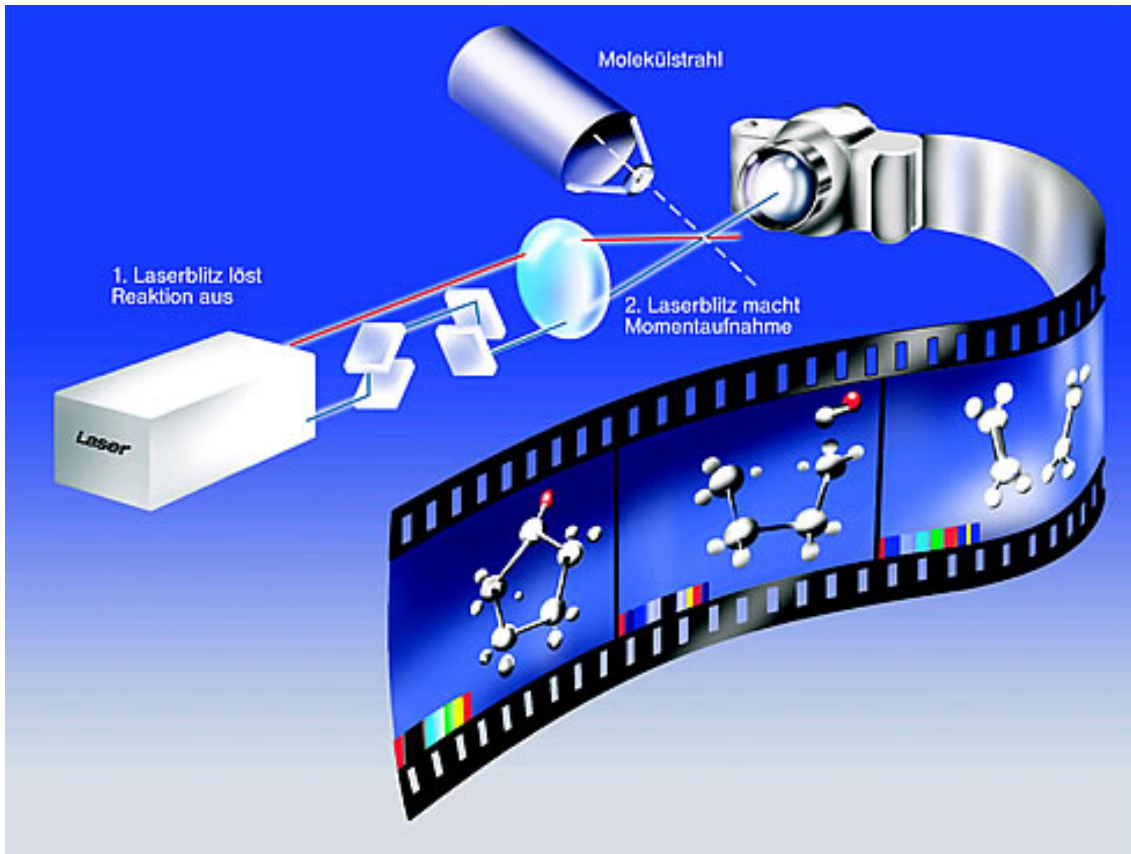
Chemische Reaktionen filmen

Mit den XFEL-Röntgenlaserblitzen lassen sich chemische Reaktionen filmen. Belichtungszeiten unter einer milliardstel Sekunde sorgen dafür, dass nichts verwackelt. Nutzen lassen sich diese Aufnahmen, um beispielsweise Prozesse in Brennstoff- und Solarzellen besser zu verstehen.

Chemische Reaktionen laufen oft unglaublich schnell ab: Hier sind Größenordnungen im Bereich von Billiardstel Sekunden (Femtosekunden) keine Seltenheit. In solch kurzen Momenten finden die atomaren Veränderungen statt, wenn Moleküle miteinander reagieren.

Die XFEL-Röntgenlaserblitze ermöglichen es, solche schnellen Abläufe zu filmen und das in

einer bislang unerreichten Qualität: Weil die Blitzdauer weniger als 0,1 billionstel Sekunden (100 Femtosekunden) beträgt, können Aufnahmen gemacht werden, ohne dass bewegte Details verschwommen sind. Und dank der kurzen Wellenlänge werden in den Filmen atomare Einzelheiten sichtbar. So ermöglichen es die XFEL-Röntgenlaserblitze, den genauen Verlauf einer chemischen Reaktion zu verfolgen und zu verstehen.



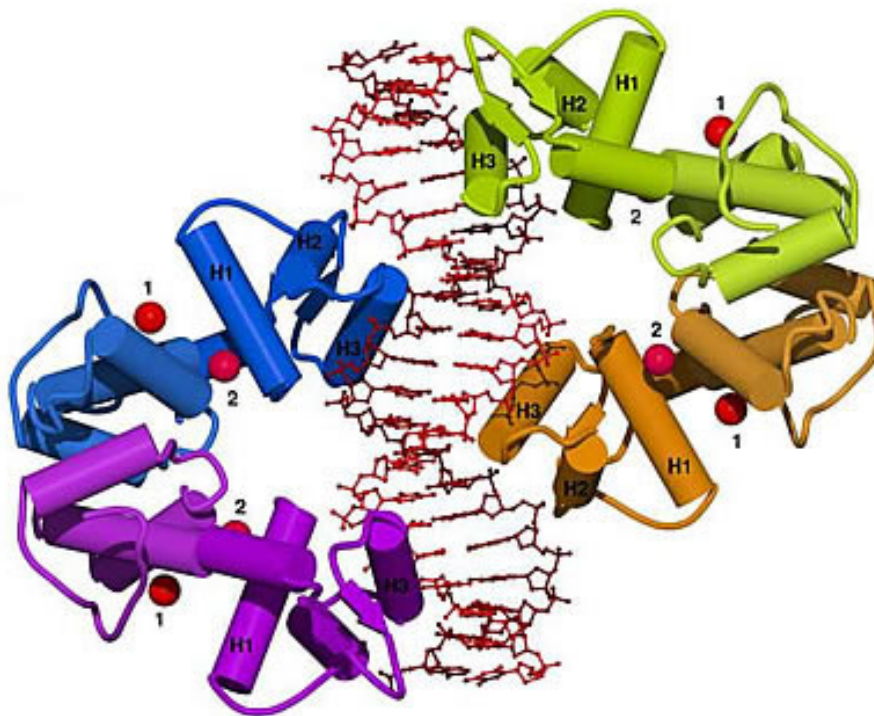
Atomares Hollywood: Um eine chemische Reaktion aufzunehmen, braucht man eine Folge von Röntgenlaserblitz-Paaren. Der erste Blitz löst jeweils die chemische Reaktion aus. Mit dem zweiten Blitz wird dann eine Momentaufnahme gemacht. Beim XFEL kann nun die Zeitspanne zwischen den beiden Blitzen auf eine milliardstel Sekunde (Femtosekunde) genau verändert werden. Auf diese Weise lässt sich eine Serie von Momentaufnahmen zu verschiedenen Zeiten nach der Reaktionsauslösung machen. Gefilmt werden dabei zwar jeweils andere Moleküle, aber die Aufnahmen lassen sich zu einem Film zusammensetzen.

Untersucht werden können dabei beispielsweise Reaktionen, die in Brennstoff- oder Solarzellen ihre Anwendung finden. Mehr Verständnis kann hier Verbesserungen zur Folge haben. Die Forscher können aber auch Biomoleküle bei der Arbeit zuschauen oder im Detail untersuchen, wie sich Atome und Moleküle zu Werkstoffen formen.

Die Struktur von Biomolekülen entschlüsseln

Mit den XFEL-Röntgenlaserblitzen können Forscher die Struktur von weit mehr Biomolekülen entschlüsseln, als es derzeit möglich ist. Denn die Blitze sind so intensiv, dass einzelne Moleküle abgelichtet werden können und keine Kristalle für die sonst üblichen Gruppenaufnahmen gezüchtet werden müssen.

Wissenschaftler verfügen schon heute über Röntgenlicht, mit dem sich die Struktur von Biomolekülen im Detail analysieren lässt. Doch die Lichtquellen sind so schwach, dass die Bilder von vielen Molekülen zusammengenommen werden müssen, um die atomare Struktur genau zu entschlüsseln. Dazu werden aus den Biomolekülen Kristalle gezüchtet. In diesen Kristallen sind die Moleküle regelmäßig angeordnet, so dass sich ihre Bilder gegenseitig verstärken, bis schließlich ein brauchbares Resultat entsteht. Doch diese Kristallisation ist sehr mühsam und nur bei etwa der Hälfte aller biologisch relevanten Substanzen möglich. Der Rest der Moleküle bleibt außen vor.



Diese Struktur wurde in der Außenstelle des Europäischen Laboratoriums für Molekularbiologie (EMBL) bei DESY mit der Methode der Proteinkristallographie untersucht. Allerdings sind Komplexe aus der Erbsubstanz DNA und verschiedenen Proteinen häufig sehr groß und daher extrem schwierig zu kristallisieren. Um ihre Struktur und Funktion im lebenden Organismus aufzuklären, bietet der Röntgenlaser neue Möglichkeiten, die ohne die herkömmliche Kristallisation auskommen. (Quelle: EMBL Hamburg)

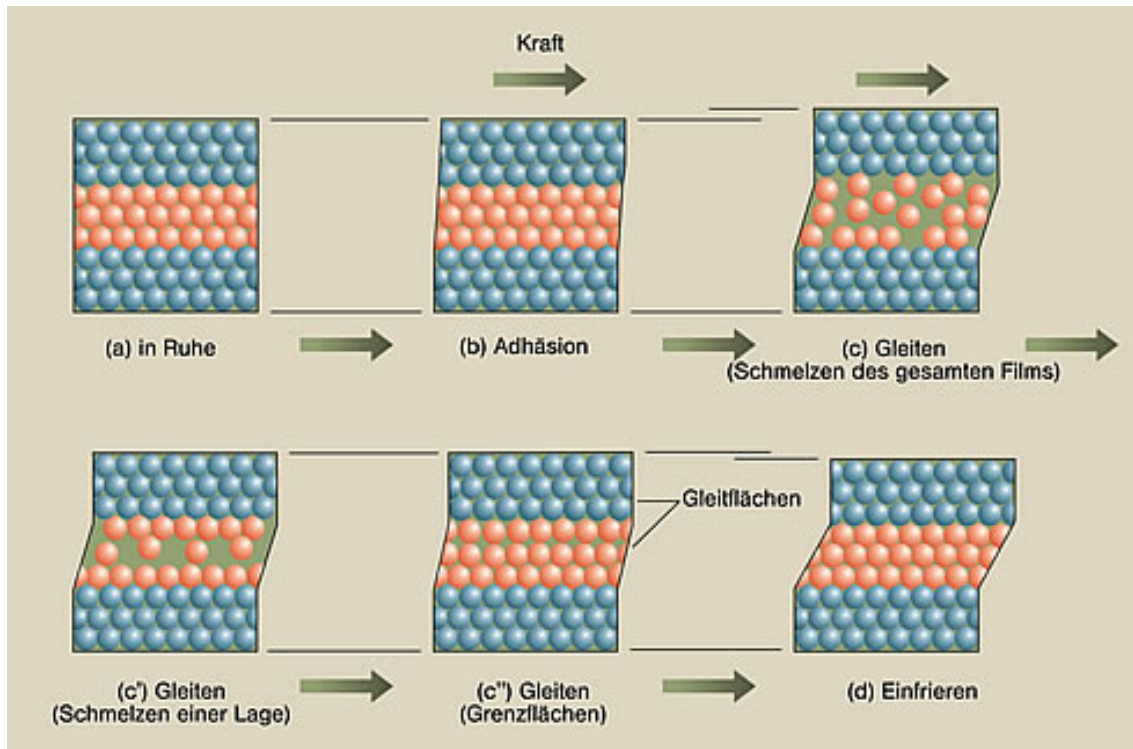
Die XFEL-Röntgenlaserblitze eröffnen hier völlig neue Möglichkeiten. Denn sie sind so intensiv, dass man sich den Umweg über die Kristallisation sparen kann. Zudem ist die Blitzdauer kurz genug (nicht länger als 100 billionstel Sekunden), um das Bild aufzunehmen, bevor die Probe von der intensiven Röntgenstrahlung zerstört wird.

Mit heutigen Techniken lassen sich große Molekülkomplexe nur sehr schwer untersuchen. Der Röntgenlaser bietet neue Möglichkeiten, größere biologische Strukturen wie einzelne Viruspartikel im atomaren Detail abzubilden. Zudem lassen sich mit den ultrakurzen Röntgenlaserblitzen Bewegungen von Molekülen zeitaufgelöst verfolgen. Solche neuen Einsichten, beispielsweise in den molekularen Ablauf von Infektionen, bilden auch eine wichtige Grundlage, um neue Medikamente zu entwickeln.

Reibung verstehen

Um neue Werkstoffe zu entwickeln und bestehende zu verbessern, müssen Materialforscher Prozesse wie Reibung und Verschleiß auf atomarer Ebene verstehen. Die XFEL-Röntgenlaserblitze helfen dabei.

Damit Räder rollen und Motoren verlustarm ihren Dienst verrichten, sollte es wie geschmiert laufen. Daher kommen hier beispielsweise dünne Gleitfilme zum Einsatz, um die Abnutzung von Werkstoffen zu verringern. Doch dabei tritt die so genannte Stick-Slip-Reibung (Kleben-Rutschen-Reibung) auf. Das abwechselnde Kleben und Rutschen wird vermutlich dadurch verursacht, dass der hauchdünne Gleitfilm im Wechsel gefriert und schmilzt. Solche Übergänge lassen sich mit Röntgenstrahlung untersuchen.



Ein Modell für die verschiedenen Phasen der Stick-Slip-Reibung, die durch abwechselndes Schmelzen und Gefrieren des Gleitfilms erzeugt wird. Ein genaueres Verständnis der Gleitphase [c] und das Verhindern des Einfrierens [d] können Reibungsverluste mindern. Mit den XFEL-Röntgenlaserblitzen lassen sich Reibungsvorgänge im atomaren Detail studieren.

Allerdings sind die Gleitfilme extrem dünn. Heutige Röntgenquellen können nicht in derart kleine Dimensionen vorstoßen – der XFEL-Röntgenlaser hingegen schon. Zudem ermöglicht die kurze Dauer seiner Lichtblitze, die Abläufe bei der Stick-Slip-Reibung zu filmen.

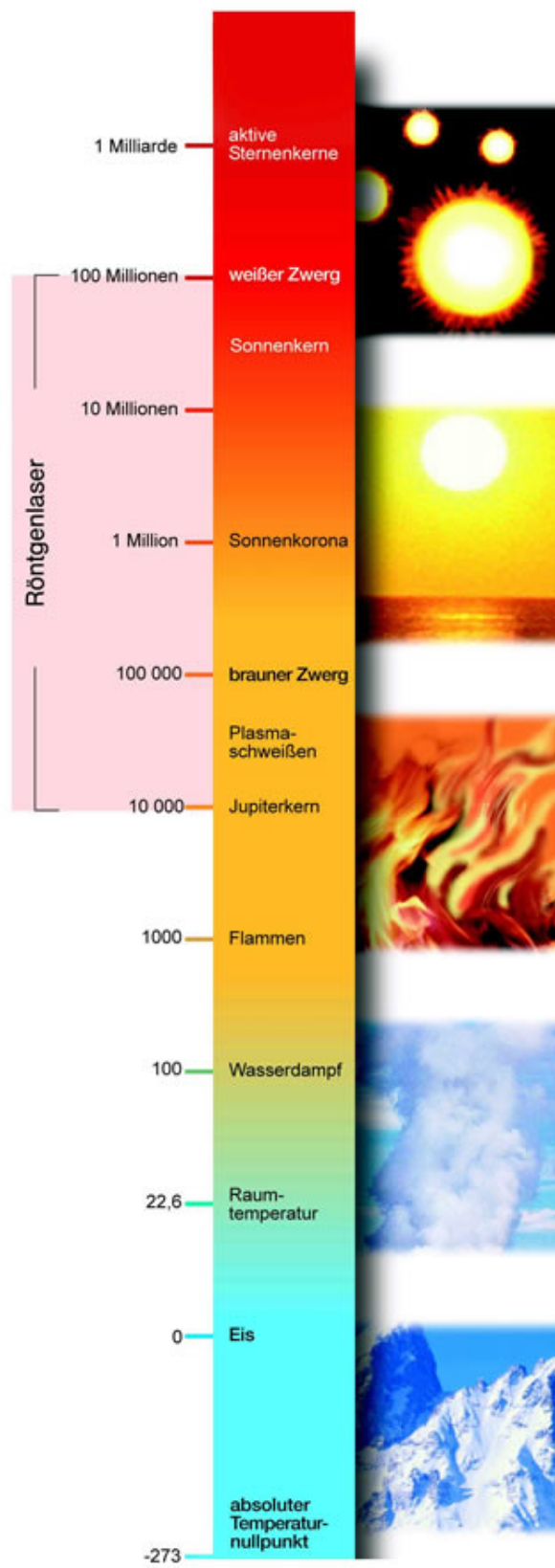
Mit den Lichtpulsen des Röntgenlasers lassen sich aber auch andere schnelle Übergänge zwischen verschiedenen Materiezuständen untersuchen. Dies ist die Grundlage, um maßgeschneiderte Materialien im Nanobereich für die Elektronik der Zukunft zu entwickeln.

Plasma erforschen

Mit den XFEL-Röntgenblitzen kann ein Zustand von Materie untersucht werden, der erst bei sehr hohen Temperaturen entsteht: Plasma. Diese Materieform ist maßgeblich an der Energieerzeugung in unserer Sonne beteiligt. Ein besseres Verständnis ist daher wichtig, wenn man diese Prozesse auf der Erde nachahmen will. Die Untersuchung von Plasmen ist aber auch für die Herstellung von Computerchips und neuen Werkstoffen von großem Interesse.

Wenn man einen Eiswürfel erwärmt, beginnt er zu schmelzen: Er wird flüssig. Erhöht man die

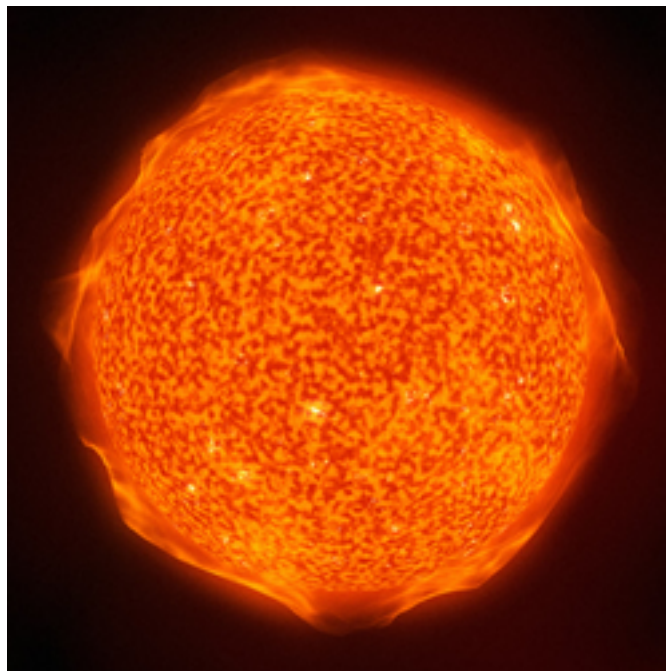
Temperatur weiter, so ändert das Wasser erneut seine Zustandsform und es entsteht ein Gas. Fest, flüssig, gasförmig sind die drei Materiezustände, die wir aus dem Alltag kennen. Das sind aber noch nicht alle. Denn bei extrem hohen Temperaturen zerfallen die Wassermoleküle in ihre Bestandteile, die Elektronen und Atomkerne. Eine solche Zustandsform von Materie wird Plasma genannt.



Temperatur in Grad Celsius

Mit dem XFEL lassen sich hohe Temperaturbereiche erforschen.

So exotisch dieser vierte Zustand auf den ersten Blick erscheinen mag, in der Technik spielen Plasmen mittlerweile eine große Rolle: Computerchips beispielsweise werden mit ihrer Hilfe geätzt und neue Werkstoffe lassen sich mit Plasmabrennern erzeugen. Auch für eine mögliche Energiequelle der Zukunft ist ein genaues Verständnis von Plasmen von großem Interesse. Denn in Sternen existiert Materie als Plasma und in diesem Zustand läuft die Kernfusion ab, die unsere Sonne und Erde mit Energie versorgt. Eine aktuelle Herausforderung der Plasmaphysik ist es, diesen Prozess auf der Erde nachzubilden, um Energie zu gewinnen.



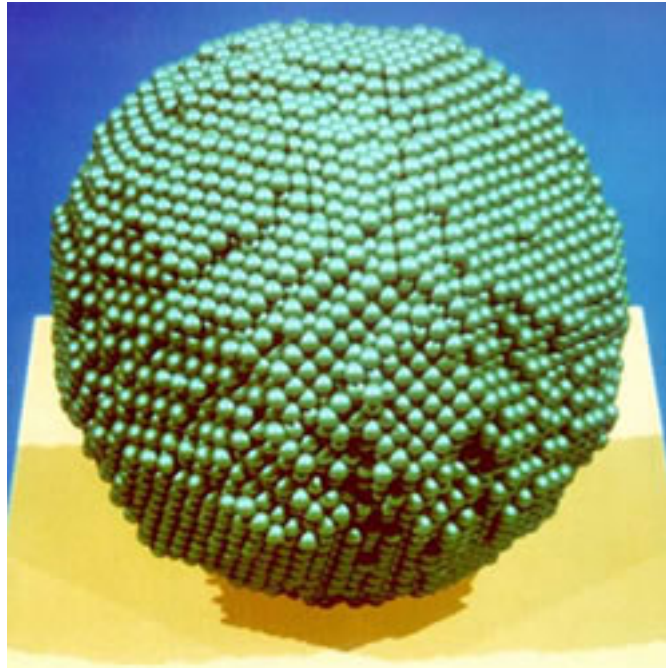
Einblick in die universelle Energieversorgung: Mit dem XFEL lassen sich Plasmen untersuchen.

Der Röntgenlaser bietet ganz neue Möglichkeiten, um Eigenschaften und Prozesse in Plasmen zu untersuchen: Seine extrem hohe Strahlungsintensität ermöglicht es, mit einem einzigen ultrakurzen Röntgenlichtblitz heißes Plasma zu erzeugen und zugleich – mit einem zweiten, unmittelbar darauf folgenden Blitz – eine hochauflösende Momentaufnahme des Materiezustands zu machen.

Cluster untersuchen

Die XFEL-Röntgenlaserblitze ermöglichen neue Erkenntnisse über die in vielen Bereichen noch rätselhafte Welt zwischen Gasen und Festkörpern. Dort ist auch die Nanotechnologie zu Hause.

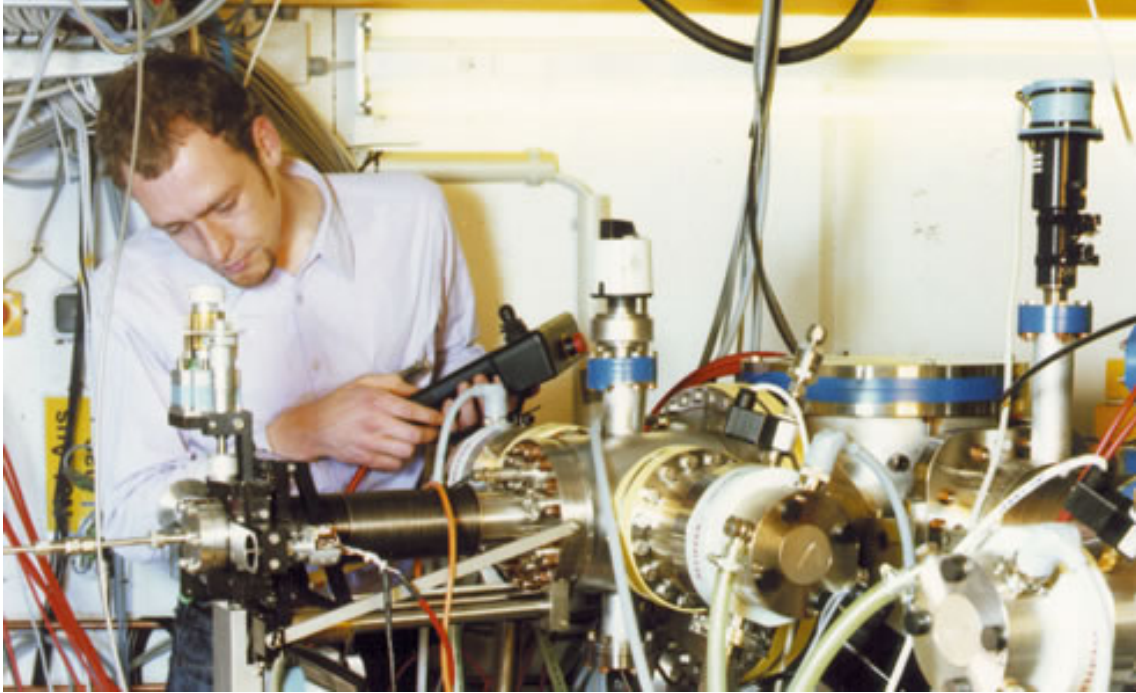
Bei Clustern handelt es sich um Materieklümpchen aus einigen wenigen bis zehntausenden Atomen. Beispiele sind Kohlenstoffkugeln und -röhrchen, die als aussichtsreiche Kandidaten für Bauteile in der Nanotechnologie gelten.



Cluster sind winzige Klümpchen aus Atomen oder Molekülen. Das Bild zeigt eine Computerberechnung eines Clusters aus 17 000 Kupfer-Atomen.

In den intensiven XFEL-Röntgenlaserblitzen geben Cluster eine Vielzahl ihrer ungewöhnlichen Eigenschaften zu erkennen. Die hohe Intensität ist erforderlich, weil sich viele Cluster nur in geringer Zahl in Form von hochverdünnten Gasstrahlen herstellen lassen. Um die wenigen Atome oder Moleküle überhaupt mit Röntgenlicht erfassen zu können, müssen sie mit sehr viel Licht bestrahlt werden.

Die Ergebnisse eines ersten Clusterexperiments an der Freie-Elektronen-Laser-Testanlage bei DESY wurden bereits veröffentlicht. Hierbei nutzte ein internationales Wissenschaftlerteam Laserblitze der Testanlage. Anhand von winzigen Clustern aus Edelgasatomen konnten die Forscher erstmalig die Wechselwirkung von Materie mit intensivem Röntgenlicht aus einem Freie-Elektronen-Laser auf extrem kurzen Zeitskalen untersuchen. Veröffentlicht wurden die Ergebnisse in der renommierten Fachzeitschrift *Nature*.



Der Physiker Hubertus Wabnitz, einer der Autoren der *Nature*-Studie, am Clusterexperiment

Lichtquelle

Röntgenlaserblitze der besonderen Art

Begreifen Sie, was Licht ist, wie Laser funktionieren und wie die Röntgenblitze entstehen.

Die Röntgenlaserblitze des XFEL sind von ganz besonderer Art:

- Die Dauer der XFEL-Blitze beträgt weniger als 100 billionstel Sekunden (100 Femtosekunden). Das ermöglicht beispielsweise das Filmen von chemischen Reaktionen, ohne dass die Aufnahmen verwackeln.
- Die XFEL-Blitze sind so kurzweilig, dass sich mit ihnen atomgroße Objekte untersuchen lassen.
- Die Spitzenleistung des XFEL wird das Milliardenfache moderner Röntgenquellen erreichen. Dadurch lassen sich beispielsweise ganz neue Klassen von Molekülen untersuchen.
- Zudem sind die Blitze laserlichtartig, wodurch unter anderem dreidimensionale Aufnahmen aus der Nanowelt ermöglicht werden.

Licht & Co.

Das ganze Spektrum des Lichts

Lernen Sie das elektromagnetische Spektrum kennen.

Die Röntgenlaserblitze des XFEL werden mit bloßen Augen nicht zu sehen sein. Denn obwohl Röntgenstrahlung eng mit dem sichtbaren Licht verwandt ist, kann es von unseren Augen nicht wahrgenommen werden. Röntgenstrahlung wie auch sichtbares Licht stellen Formen elektromagnetischer Strahlung dar und bilden zusammen mit Mikro- und Radiowellen, Infrarot-, Ultraviolett- und Gammastrahlung das elektromagnetische Spektrum.

Die einzelnen Bereiche des elektromagnetischen Spektrums unterscheiden sich in ihren Wellenlängen. Die Wellenlängen der XFEL-Röntgenlaserblitze sind dabei so kurz, dass sie den Forschern ermöglichen, Objekte von atomarer Größe zu untersuchen.

Dieses Thema stellt Ihnen die einzelnen Bereiche des elektromagnetischen Spektrums im Detail vor.

Röntgenlicht *Licht, das unter die Haut geht*

Erfahren Sie mehr über den energiereichen Verwandten von sichtbarem Licht.

Der XFEL erzeugt Röntgenstrahlung. Wilhelm Conrad Röntgen entdeckte diese energiereiche Verwandte von sichtbarem Licht im Jahr 1895. Und schon nach kurzer Zeit war das Ergebnis reiner Grundlagenforschung aus der Medizin nicht mehr wegzudenken.

Über 100 Jahre nach Röntgens Entdeckung entsteht mit dem Röntgenlaser XFEL eine Strahlungsquelle, die eine milliardenfach höhere Spitzenleistung liefern wird als die modernster Röntgenquellen. Das eröffnet völlig neue Forschungsmöglichkeiten.

Entdeckung der Röntgenstrahlung

Bei seinen Experimenten machte Wilhelm Conrad Röntgen eine bemerkenswerte Entdeckung: Strahlung, mit der man einen Körper durchleuchten kann.

Wilhelm Conrad Röntgen war ein vielseitiger, ausgezeichnete Experimentator. 1895, im Alter von 50 Jahren, experimentierte er mit so genannten Entladungsröhren. Darin fließt ein elektrischer Strom durch ein Gas, das unter extrem niedrigem Druck gehalten wird.

X-Strahlen

Am 8. November 1895 machte Röntgen in seinem Labor an der Universität Würzburg eine bemerkenswerte Entdeckung: Einige Meter von einer Entladungsröhre entfernt befand sich ein speziell beschichtetes Papier. Bei eingeschalteter Röhre begann das Papier zu leuchten – auch dann noch, als die Entladungsröhre mit dicker schwarzer Pappe umschlossen war.

Das Stück Papier wurde von einer bislang unbekanntem Art von Strahlung zum Leuchten gebracht. Röntgen nannte sie „X-Strahlen“ und erzählte zunächst fast keiner Menschenseele von seiner Entdeckung. Lediglich seiner Frau teilte er mit: „Ich mache etwas, wovon die Leute, wenn sie es erfahren, sagen werden: Der Röntgen ist wohl verrückt geworden.“ Er verbrachte

die folgenden Wochen fast rund um die Uhr in seinem Labor, um die Eigenschaften der Strahlen zu erforschen.

Ende der Geheimniskrämerei

Bei der Untersuchung der von ihm entdeckten Strahlung ging Röntgen mit jener Sorgfalt und Präzision vor, für die er unter Physikern ein so hohes Ansehen genoss. Bis zum Januar 1896 schrieb er drei wissenschaftliche Forschungsberichte zu den X-Strahlen. Er war bei seinen Experimenten so gründlich, dass danach fast ein Jahrzehnt lang nichts Neues über die Strahlung herausgefunden wurde.

Am 23. Januar 1896 hielt Röntgen vor der Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft in Würzburg seinen einzigen öffentlichen Vortrag über die X-Strahlen. Anwesend waren neben Wissenschaftlern auch hochrangige Offiziere und andere Prominenz. Mehrmals tobte die Menge vor Begeisterung. Der Höhepunkt war die Durchleuchtung der Hand des Anatomen von Kölliker, welcher daraufhin vorschlug, die Strahlung „Röntgenstrahlung“ zu nennen. Im Englischen wird nach wie vor das Wort *x-rays* verwendet, was der Abkürzung XFEL auch zu ihrem X verhilft.

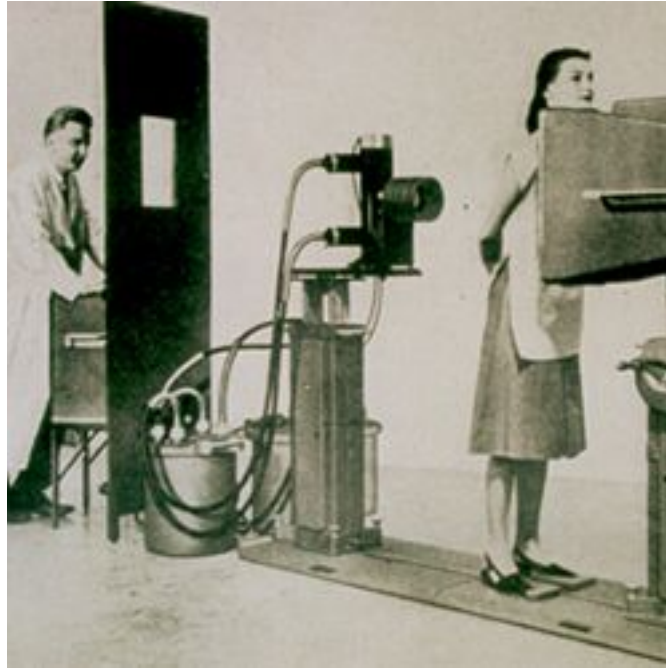
Der neue Trend: Alles durchleuchten!

Die Resonanz auf Röntgens Entdeckung war gewaltig. Der deutsche Kaiser Wilhelm II. ließ den Physiker schon am 13. Januar 1896 zu sich nach Berlin kommen, um sich von den geheimnisvollen, alles durchdringenden X-Strahlen berichten zu lassen. Die Sensation, dass man damit in seinen eigenen Körper blicken konnte, wurde zu einer der populärsten physikalischen Entdeckungen aller Zeiten. Im Jahr 1901 kam Röntgen dann auch der erste Physik-Nobelpreis der Weltgeschichte zuteil.

Da Röntgen bewusst auf eine Patentierung seines Experiments verzichtete, konnte theoretisch jedermann einen Röntgenapparat bauen. Da die Gefahren der Strahlung noch völlig unbekannt waren, wurde zügellos drauflosgeröntgt. Das Durchleuchten war so populär, dass das Röntgen gar zum Partyspaß wurde. Doch auch sinnvolle medizinische Anwendungen ließen nicht lange auf sich warten.

Medizinische Anwendungen von Röntgenlicht

Schon kurz nach ihrer Entdeckung hat die Röntgenstrahlung ihre Anwendung in der Medizin gefunden. Auch heute noch bildet sie eine wichtige Säule der medizinischen Diagnostik.



Erste Röntgenblicke

Röntgenstrahlung kann Materie zum Teil durchdringen, wodurch beispielsweise tiefe Einblicke in das Innere des menschlichen Körpers möglich werden. Diese Eigenschaft wurde bereits wenige Wochen nach der Strahlung selbst entdeckt und führte zu wesentlichen Anwendungen in der medizinischen Diagnostik.

Die Gefahr, die die unkontrollierte Dosierung von Röntgenstrahlung mit sich bringt, war damals noch nicht bekannt, und einige Ärzte und Wissenschaftler starben an den Folgen der frühen Forschung mit Röntgenstrahlung.

Im Laufe der Jahre wurden immer raffiniertere und sicherere Röntgenapparate gebaut, die von der Ganzkörperaufnahme bis zum Filmen von Prozessen im Körper eine Vielzahl von Untersuchungsmöglichkeiten boten.

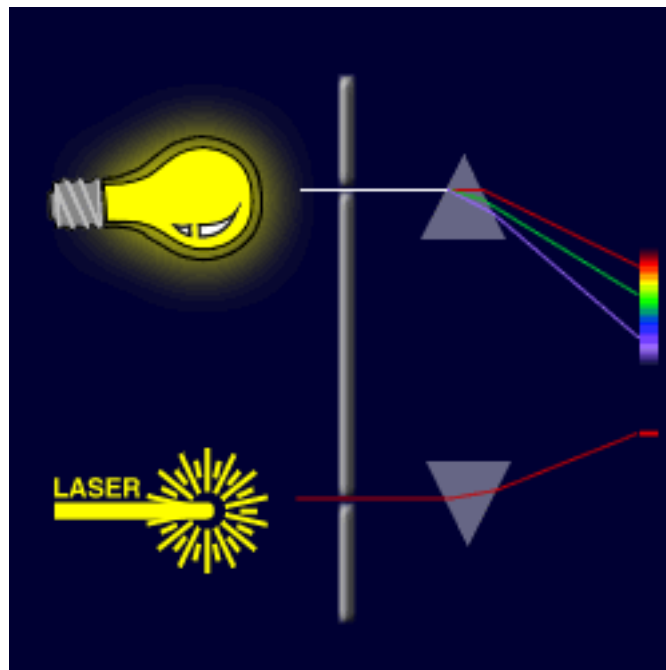
- 28. Dezember 1895: Gustav Werner fertigt in Wien die erste medizinische Röntgenaufnahme an.
- Januar 1896: Dem Braunschweiger Zahnarzt Walkhoff gelingen in Braunschweig die ersten Dentalaufnahmen.
- Februar 1896: Der Schotte John MacIntire fertigt die erste Aufnahme eines lebenden Herzens an.
- März 1896: MacIntire erstellt den ersten Röntgenfilm. Er zeigt die Bewegung eines Froschschenkels.

- Juni 1896: L. Zehnder in Freiburg und D.C. Miller in Cleveland, USA, zeigen die ersten aus Einzelaufnahmen zusammengesetzten Ganzkörperaufnahmen.
- 1902: G.E. Pfahler und C.K. Mills präsentieren die erste Aufnahme eines Schädeltumors.
- 1905: F. Voelker und A. von Lichtenberg gelingt die erste Röntgendarstellung von Nieren.

Eigenschaften von Laserlicht

Laserlicht zeichnet sich durch viele Besonderheiten aus: Es ist einfarbig, verfügt über wohlgeformte Wellenzüge und ist stark gebündelt.

Einfarbigkeit



Schickt man Licht durch ein Prisma, so geben sich die darin enthaltenen Farben zu erkennen. Das Licht der Sonne oder das einer Glühlampe besteht aus vielen Farben. Laserlicht nur aus wenigen.

Das Licht der Sonne oder das aus einer Taschenlampe besteht aus einer Vielzahl von Wellenzügen ganz unterschiedlicher Wellenlängen. Diese einzelnen Wellenzüge würden wir als verschiedene Farben wahrnehmen, zusammen erzeugen sie aber den weiß-gelblichen Eindruck.

Bei Lasern ist Schluss mit dieser Vielfalt. Denn sie erzeugen in der Regel nur Strahlung einer bestimmten Wellenlänge – sprich: Farbe.

Laserlichtartigkeit (Kohärenz)

In der Webversion dieses Angebots finden Sie hier einen Trickfilm oder eine Interaktion.

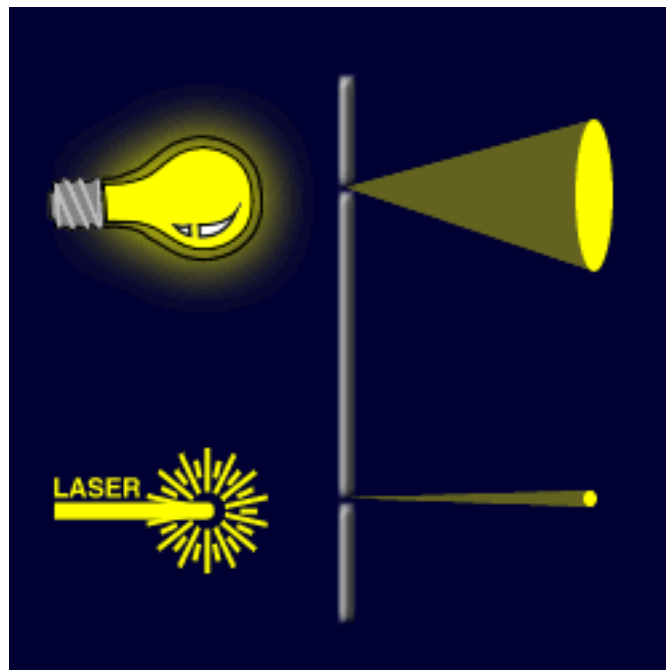
[Animation] Der Trickfilm zeigt, dass die Wellenzüge, die von einer Glühlampe abgegeben werden, weit kürzer sind als die eines Lasers.

Laserlicht zeichnet sich durch sehr lange Wellenzüge aus.

Eine elektromagnetische Strahlung mathematisch genau zu beschreiben, ist keine leichte Aufgabe. In der Regel hilft es, sich die Strahlung aus einzelnen Wellenzügen zusammengesetzt vorzustellen. Ein solcher Wellenzug zeichnet sich durch eine feste Wellenlänge, seine Länge und Position aus.

Für Laserlicht gilt, dass die einzelnen Wellenzüge sehr lang sein können und dass die sich nebeneinander befindenen Züge im Gleichtakt schwingen. Diese Eigenschaft heißt Kohärenz und ist beispielsweise Voraussetzung, wenn dreidimensionale Aufnahmen von Objekten gemacht werden sollen.

Intensität, Emittanz und Brillanz



Laserstrahlen weiten sich nur geringfügig auf.

Laserstrahlen können extrem dünn sein. So lassen sich ohne große Probleme Strahldurchmesser von weniger als einem hundertstel Millimeter erreichen. Da das Licht daher auf eine sehr kleine Fläche konzentriert ist, ist es meist sehr intensiv und kann beispielsweise zum Schweißen von Metall genutzt werden.

Laserstrahlen sind nicht nur dünn, sie bleiben es in der Regel auch und fächern sich nicht weiter auf. Dieses Auffächern wird mit Hilfe der Emittanz beschrieben. Sie gibt an, wie breit ein Strahl ist und wie stark er sich öffnet. Je kleiner die Emittanz, umso fokussierter ist der Strahl.

Berücksichtigt man zusätzlich zum Auffächern die Strahlenergie, so kommt man zum Begriff der Brillanz. Sie ist umso größer, je größer die Energie ist und je kleiner die Emittanz. Da die Energie von der Wellenlänge abhängt, gilt dies auch für die Brillanz. Die Brillanz eines Lasers ist weit größer als die der Sonne. Die durchschnittliche Brillanz des Röntgenlasers XFEL wird die Brillanz herkömmlicher Röntgenquellen um das 10 000-fache übertreffen.

Freie-Elektronen-Laser

Gemeinsam sind sie stark

Lernen Sie, wie man beim XFEL Elektronen dazu bringt, im Gleichtakt zu strahlen und so laserartiges Röntgenlicht zu erzeugen.

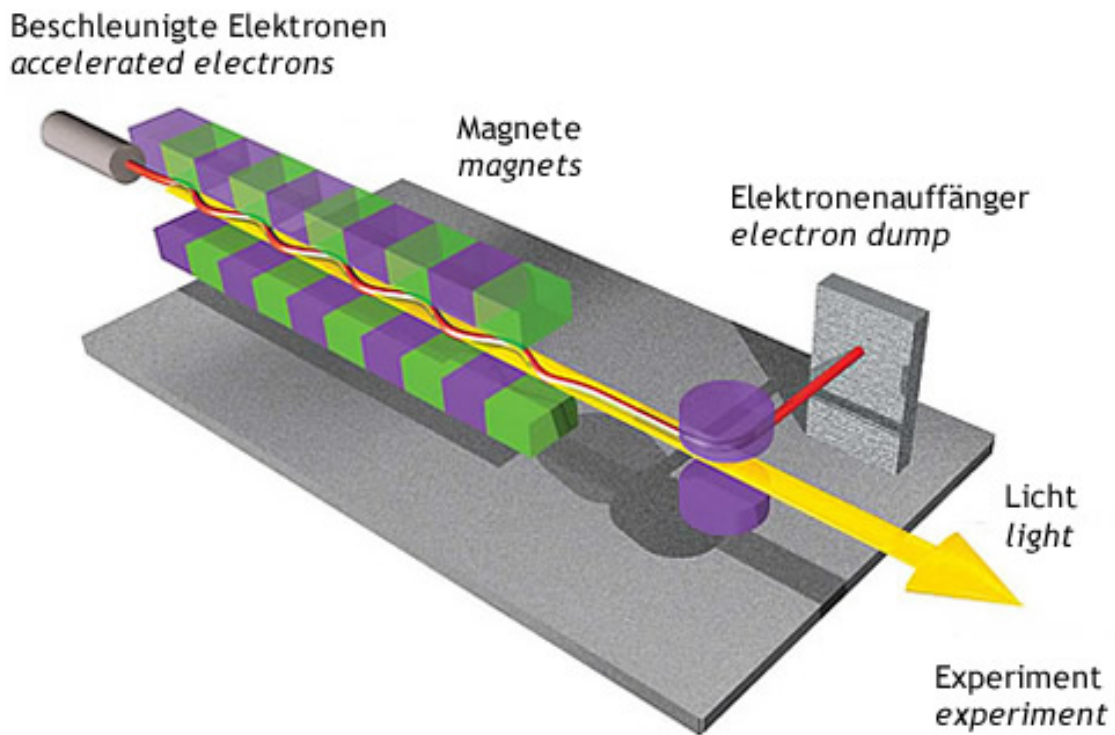
Sausen Elektronen um die Kurve, so senden sie Licht aus. In modernen Röntgenlichtquellen werden die Teilchen daher auf Slalomkurse gebracht, um Röntgenlicht zu erzeugen.

Der Röntgenlaser XFEL ist dabei so konstruiert, dass die Elektronen im Gleichtakt Licht abgeben. Das Ergebnis sind hochintensive Röntgenblitze mit den Eigenschaften von Laserlicht.

Das Prinzip der Freie-Elektronen-Laser

Im Röntgenlaser XFEL werden fast lichtschnelle Elektronen zur Aussendung besonders intensiver Röntgenblitze mit Laserlicheigenschaften gebracht.

Der erste Teil eines Freie-Elektronen-Lasers (FEL) besteht aus einem Teilchenbeschleuniger, in dem Elektronen auf Fast-Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. Im zweiten Teil werden die Elektronen in speziellen Magnetfeldanordnungen (so genannten Undulatoren) auf einen Slalomkurs gebracht und geben dabei Strahlung ab.



In einem FEL werden freie Elektronen beschleunigt und zur Lichtaussendung gebracht.

Diesen Aufbau haben FELs mit konventionellen modernen Röntgenlichtquellen gemeinsam. Der Trick bei einem FEL ist nun, die Elektronen auf ihrem Weg durch das Magnetfeld mit einer Strahlung wechselwirken zu lassen, die genau die Wellenlänge der Strahlung hat, die die Elektronen aussenden. Dann entsteht ein FEL, der um ein Vielfaches intensiver leuchtet.

Microbunching

Durch die Wechselwirkung der Elektronen mit der Strahlung kommt es zur Bildung von Kleinstgruppen – ein Phänomen mit dem Namen *microbunching*.

In der Webversion dieses Angebots finden Sie hier einen Trickfilm oder eine Interaktion.

[Animation] Die Animation zeigt drei Elektronen, die sich jeweils auf einem Slalomkurs durch eine FEL-Magnetfeldanordnung bewegen. Die Energie der drei Elektronen ist unterschiedlich. Je kleiner die Energie, umso weiter ist der Slalomkurs. Daher kommen die energiearmen Elektronen langsamer durch die Magnetfeldanordnung.

Elektronen mit unterschiedlicher Energie verfolgen unterschiedliche Slalomkurse. Je

größer dabei die Elektronenenergie ist, desto flacher werden die Kurvenbögen.

Am Anfang des Undulators haben alle Elektronen noch dieselbe Energie. Dies ändert sich jedoch, wenn die Teilchen mit der Strahlung wechselwirken. Dabei können die Ladungen von der Strahlung Energie aufnehmen oder an sie abgeben.

Nun gehört im Undulator zu jeder Elektronenenergie ein bestimmter Slalomkurs und zu jedem Slalomkurs eine bestimmte Vorwärtsgeschwindigkeit. Ein Skifahrer kommt ja auch schneller ins Tal, wenn er dicht an den Slalomstangen entlang fährt, als wenn er weit ausholt. Aus diesem Grund sorgt eine Energieaufnahme oder -abgabe dafür, dass die Elektronen vorausseilen oder zurückfallen.

In der Webversion dieses Angebots finden Sie hier einen Trickfilm oder eine Interaktion.

[Animation] Die Animation zeigt die Bildung von Kleinstgruppen anhand dreier Szenen. (1) Die Elektronen sind langsamer als das Licht. Elektronengeschwindigkeit und Lichtgeschwindigkeit sind so aufeinander abgestimmt, dass die Elektronen nach zwei Kurven um eine Wellenlänge zurückgefallen sind. (2) Einige Elektronen nehmen daher nur Energie auf, andere geben nur Energie ab. (3) Einige Elektronen eilen voraus, andere fallen zurück: Es bilden sich Kleinstgruppen.

Bildung von Kleinstgruppen

Bei einem FEL sind die Geschwindigkeit der Elektronen und die Form der Magnetfeldanordnungen nun so aufeinander abgestimmt, dass die Ladungen nach zwei Kurven im Undulator genau eine Wellenlänge zurückfallen. Die Ladungen sind dann in derselben Situation wie zuvor: Ein Elektron, das zuvor ein wenig Energie verlor, wird jetzt schon wieder gebremst. Andere Elektronen werden hingegen ausschließlich beschleunigt. Das geht so lange, bis alle Elektronen in Bereiche geschoben wurden, in denen kein Energieaustausch mehr stattfindet. So rücken die Elektronen zu kleinen Grüppchen zusammen.

Gemeinsam sind sie stark

Das Licht ordnet das Elektronenpaket also nach und nach zu Kleinstgruppen an, die immer mehr wie Pfannkuchen aussehen. Ihr Abstand beträgt genau eine Wellenlänge der ordnenden Strahlung.

In der Webversion dieses Angebots finden Sie hier einen Trickfilm oder eine Interaktion.

[Animation] Die Animation zeigt, wie die Kleinstgruppen im Gleichtakt auf ihrem Slalomkurs Strahlung abgeben.

Die kleinstgruppierten Elektronen senden Licht im Gleichtakt aus.

Nach wie vor geben die Elektronen Strahlung ab, nicht mehr und nicht weniger als zuvor. Dennoch ist das Resultat ein viel intensiveres Licht. Denn die Strahlung der Elektronen in den Kleinstgruppen überlagert sich perfekt.

Geschichte der Freie-Elektronen-Laser

Die Idee zum Freie-Elektronen-Laser wurde erstmals im Jahr 1971 von John M. J. Madey vorgeschlagen. Auf ihre erste Umsetzung musste sie jedoch sechs Jahre warten. Damals entwickelte Madey mit seinen Kollegen an der Universität von Stanford den ersten Freie-Elektronen-Laser.

Der Name

Der Röntgenlaser XFEL unterscheidet sich von gewöhnlichen Lasern dadurch, dass die Elektronen nicht *fest* an Atome gebunden sind, sondern sich *frei* durch eine Magnetfeldanordnung bewegen. Daher spricht man von *Freie*-Elektronen-Lasern (FEL).

Eigenschaften der XFEL-Röntgenlaserblitze

Die XFEL-Röntgenlaserblitze sind hochintensiv, laserlichtartig, von außergewöhnlich kurzer Dauer und besitzen besonders kurze Wellenlängen.

Hohe Intensität und Laserlichtartigkeit

Die Röntgenlaserblitze sind hochintensiv und laserlichtartig, weil sich die Elektronen bei der Lichtaussendung gegenseitig unterstützen.

In der Webversion dieses Angebots finden Sie hier einen Trickfilm oder eine Interaktion.

[Animation] Die Animation zeigt, wie die Kleinstgruppen in Gleichtakt auf ihrem Slalomkurs Strahlung abgeben.

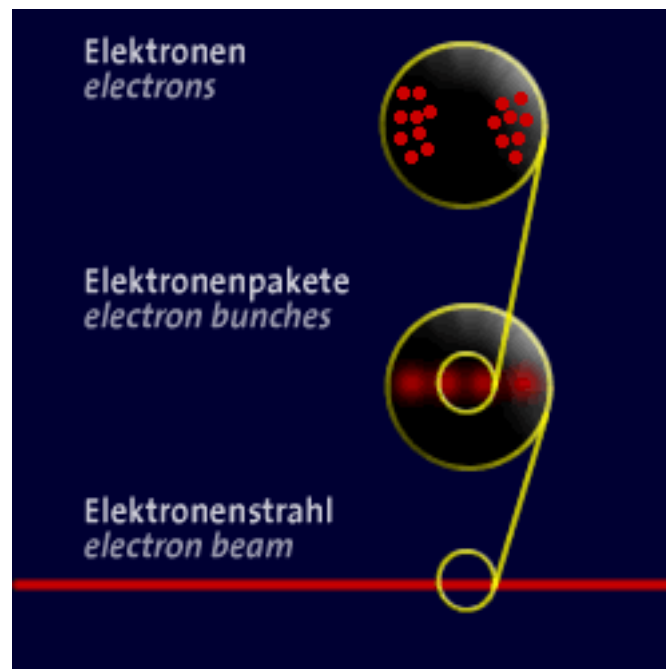
Die kleinstgruppierten Elektronen senden Licht im Gleichtakt aus.

Das Geheimnis hinter den intensiven Blitzen aus dem Röntgenlaser liegt in der Kleinstgruppenbildung der Elektronen: Anfangs sind alle Elektronen noch gleichmäßig verteilt. Doch durch die Wechselwirkung mit der Strahlung rücken die Ladungen zu Kleinstgruppen zusammen, die einen Abstand von einer Wellenlänge der Strahlung haben. Durch diese Anordnung kann sich die gesamte abgegebene Strahlung ideal überlagern: Stets liegen Wellenberge und Wellentäler optimal übereinander. Dies führt zu den hohen Intensitäten und der Laserlichtartigkeit.

Allgemein gilt: N Elektronen im FEL strahlen N -Quadrat-mal so intensiv wie ein einzelnes Elektron und N -mal so stark wie N Elektronen ohne Kleinstgruppierung.

Kurze Dauer

Die XFEL-Röntgenlaserblitze sind von weniger als 100 billionstel Sekunden Dauer und ermöglichen damit zum Beispiel das Filmen chemischer Reaktionen.



Der Elektronenstrahl besteht aus winzigen Paketen.

Wenn die Elektronen durch den XFEL fliegen, sind sie nicht gleichmäßig wie auf einer Perlenschnur aufgereiht. Stattdessen flitzen die Ladungen in kleinen Paketen durch die Anlage. Die Pakete entstehen bereits zu Beginn der Anlage im Elektronen-Injektor; über sechs Milliarden Elektronen enthält ein solches Paket. (Diese Pakete sind von den Kleinstgruppen zu unterscheiden.)

Jedes dieser Pakete erzeugt einen Röntgenlaserblitz, dessen Dauer von der Länge des Pakets abhängt. Beim XFEL wird ein solches Paket ein zwanzigstel Millimeter lang sein. Der

Röntgenblitz hat dann eine Dauer von 100 billionstel Sekunden.

Maximal 32 500 Elektronenpakete werden im XFEL pro Sekunde erzeugt und zum Leuchten angeregt. Die Pakete werden dazu in bis zu zehn so genannten Pulszügen angeordnet. Ein Zug besteht aus maximal 3250 Elektronenpaketen.

Kurze Wellenlängen

Bei einem Freie-Elektronen-Laser kann die Wellenlänge der Strahlung über die Energie der Elektronen variiert werden. Dabei gilt: Je höher die Energie umso kleiner die Wellenlänge. Mit Hilfe des 2,1 Kilometer langen Beschleunigers lassen sich beim XFEL sehr hohe Energien erreichen (20 Milliarden Elektronenvolt). Damit wird der XFEL Wellenlängen von bis zu 0,1 Nanometern erreichen – eine Wellenlänge, mit der sich Strukturen in der Größenordnung von Atomen untersuchen lassen.

Beschleuniger *Schnelle Elektronen als Leuchten*

Verstehen Sie, wie Elektronen beim XFEL fast lichtschnell werden.

Beim XFEL sorgen freie Elektronen für die Lichterzeugung. Damit die Teilchen energiereiches Röntgenlicht aussenden, müssen sie zunächst auf hohe Energien gebracht werden. Dazu durchlaufen sie beim XFEL einen rund 2,1 Kilometer langen Teilchenbeschleuniger.

Damit am Ende hochintensive Röntgenlaserblitze der gewünschten Qualität entstehen, muss der Beschleuniger höchsten Anforderungen genügen: Herunterkühlen auf tiefste Temperaturen, Luftleere und Reinräume helfen dabei.

Beschleunigung Teilchen auf Trab bringen

Begreifen Sie, wie Physiker Elektronen auf Trab bringen.

Mit Hilfe elektrischer Kräfte werden Elektronen beim XFEL zunächst auf hohe Energien gebracht, bevor sie zur Aussendung von Röntgenlaserblitzen veranlasst werden. Am Ende sind die Elektronen fast mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs, dem absoluten Tempolimit im Universum.

Die Beschleunigung erfolgt in speziellen Elementen, deren Form dafür sorgt, dass die Elektronen den strengen Anforderungen genügen, die durch die hohe Qualität der XFEL-Röntgenlaserblitze vorgegeben werden.

Supraleitung

Wenn der Widerstand gefriert

Wieso die Beschleunigerelemente auf minus 271 Grad Celsius abgekühlt werden, erfahren Sie hier.

Beim Röntgenlaser XFEL wird es weit kälter als nur frostig sein: Die Beschleunigerelemente, in denen die Elektronen vor der Lichtaussendung auf hohe Energien gebracht werden, arbeiten bei minus 271 Grad Celsius.

Zwei Grad über der tiefstmöglichen Temperatur können diese Bauteile Strom ohne elektrischen Widerstand leiten, sie sind supraleitend. Das Ergebnis sind Elektronen, die für die Erzeugung der XFEL-Röntgenblitze optimal beschleunigt sind.

Supraleitung

Manche Materialien zeigen verblüffende Eigenschaften, wenn sie auf sehr tiefe Temperaturen gekühlt werden: Sie verlieren ihren elektrischen Widerstand und werden supraleitend.



Elektrischer Widerstand bringt eine Glühlampe zum Leuchten.

Einige Materialien können elektrischen Strom leiten, weil sich in ihnen Elektronen frei bewegen können. Die Elektronen können dabei gegen Atome stoßen. Dabei verlieren die Teilchen Energie, sie spüren einen elektrischen Widerstand und bringen beispielsweise den Draht in einer Glühbirne zum Leuchten.

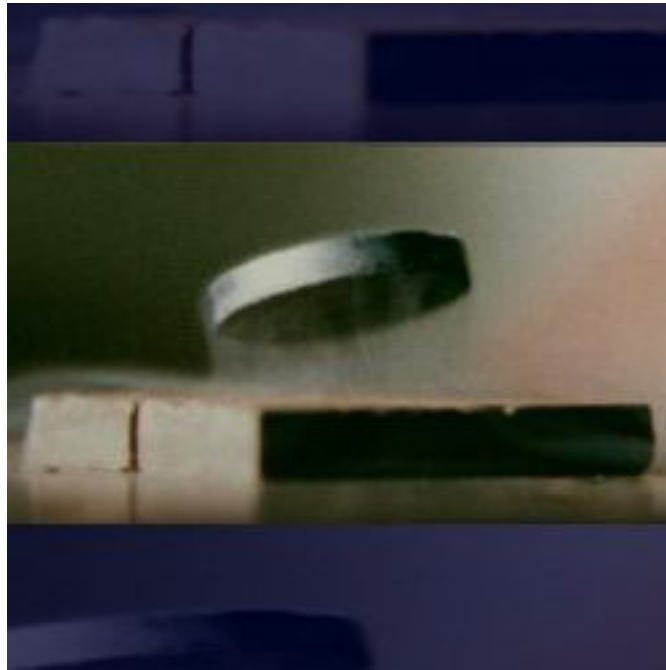
Manche elektrische Leiter zeigen nun verblüffende Eigenschaften, wenn sie auf sehr tiefe Temperaturen gekühlt werden: Sie verlieren ihren elektrischen Widerstand. Dieser Zustand heißt Supraleitung. Er tritt sprunghaft ein, sobald eine bestimmte Temperatur unterschritten wird. Diese Grenzen sind für die verschiedenen Supraleiter unterschiedlich, liegen aber in der Regel deutlich unter minus 240 Grad Celsius.

Entdeckung

Im Jahr 1911 entdeckte der holländische Physiker Heike Kamerlingh Onnes, dass Quecksilber keinen elektrischen Widerstand mehr besitzt, wenn es auf minus 269 Grad Celsius abgekühlt wird. Den Effekt nannte er Supraleitung. Onnes erhielt 1913 den Physik-Nobelpreis für seine Experimente bei tiefen Temperaturen.

Das von ihm entdeckte Phänomen blieb jahrzehntelang unverstanden. Zwar fand man immer mehr supraleitende Materialien, aber eine Erklärung, wie es überhaupt zur Supraleitung kommt, ließ auf sich warten. Bis 1957. Damals präsentierte das US-Forschertrio John Bardeen, Leon Cooper und J. Robert Schrieffer eine Theorie der Supraleitung, die unter dem Namen BCS-Theorie bekannt wurde und ihren Entdeckern 1972 den Nobelpreis einbrachte.

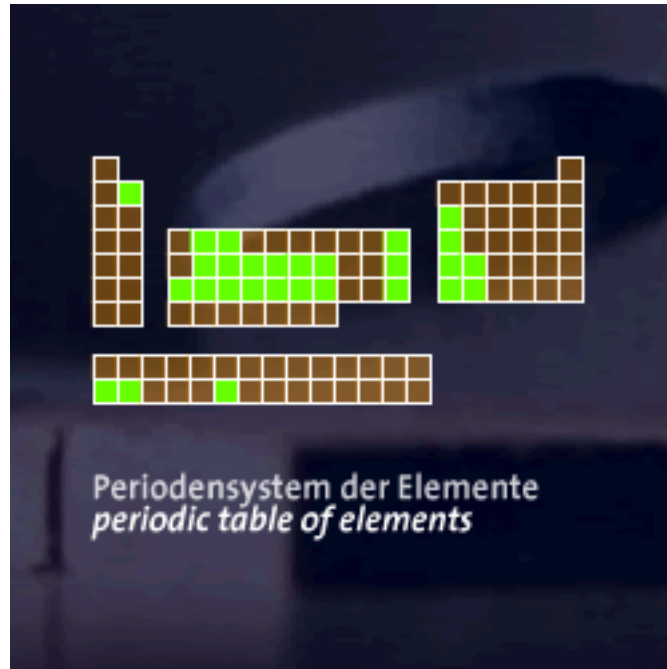
BCS: Paarlaufen



Ein Supraleiter in einem Magnetfeld

Die BCS-Theorie erklärt Supraleitung durch die Bildung von Elektronenpaaren unterhalb einer materialabhängigen Sprungtemperatur. Für diese Paare gelten vollkommen andere physikalische Gesetze als für einzelne Elektronen (die technische Erklärung: Der Spin der Paare ist 0, im Vergleich zum Spin $1/2$ der Elektronen). Dies hat zur Folge, dass die Paare zusammen eine starre Gesamtheit bilden und sich als Einheitspulk nicht mehr an Zusammenstößen mit den kleinen Atomen stören: Der Strom fließt ohne Widerstand.

Neue Supraleiter



Supraleitende Elemente

Seit der Entdeckung der Supraleitfähigkeit bei Quecksilber im Jahre 1911 wurde die Eigenschaft bei einer Vielzahl weiterer Stoffe nachgewiesen. Dazu gehören 26 andere Elemente wie Blei oder Zinn und einige tausend Legierungen. Normale Leiter wie Kupfer oder Gold gehören nicht dazu, ebenso wenig Eisen oder Nickel.

Bis in die späten 1980er Jahre war Supraleitung nur bei Temperaturen unter minus 238 Grad Celsius bekannt. Dann jedoch wurden die Hochtemperatur-Supraleiter entdeckt. Bei Zimmertemperatur funktionieren diese aber immer noch nicht: Minus 140 Grad Celsius müssen es schon noch sein. Hochtemperatur-Supraleiter sind in der Regel komplexe Keramikverbindungen, die aus Kupfer, Sauerstoff und einigen selteneren Elementen bestehen. Wie die Hochtemperatur-Supraleitung zustande kommt, ist noch nicht geklärt und ein aktuelles Forschungsgebiet der Physik.

Supraleitung beim XFEL

Die Supraleitung sorgt beim XFEL für einen besseren Elektronenstrahl.

Beim XFEL werden Elektronen zunächst auf hohe Energien beschleunigt, bevor sie zur Lichtaussendung gebracht werden. Die Beschleunigung erfolgt in Elementen, die aus reinem Niob bestehen und auf minus 271 Grad Celsius gekühlt werden. Bei dieser Temperatur ist das Metall supraleitend, was gleich mehrere Vorteile mit sich bringt.

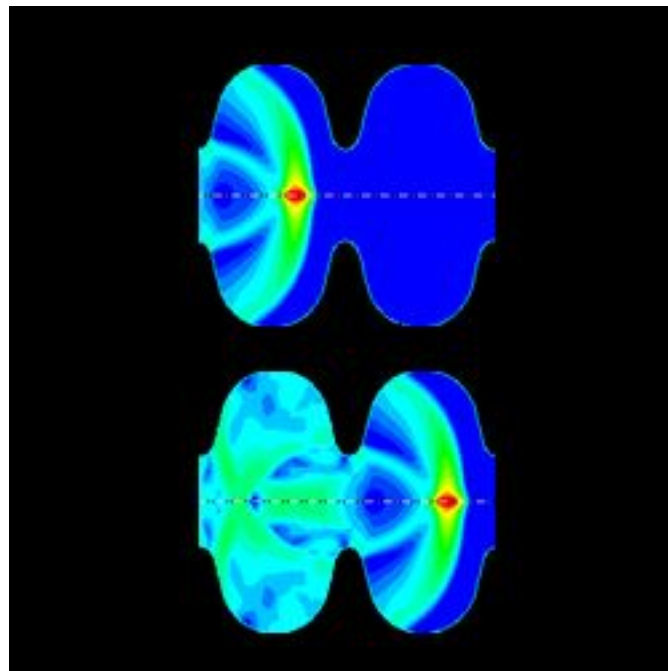
Längere Betriebszeiten

Die Beschleunigerelemente können länger betrieben werden, als dies bei normalleitenden Beschleunigern möglich ist.

Denn bei normalleitenden Beschleunigern bildet sich aufgrund des elektrischen Widerstandes eine solche Hitze, dass das Metall verdampfen würde, wenn die Beschleunigung nicht immer wieder unterbrochen würde. Die Supraleitung ermöglicht daher eine höhere Zahl an Elektronenpaketen, die hintereinander beschleunigt werden.

Weniger Störwellen

Die äußerst geringen elektrischen Verluste in den Niobwänden erlauben es zudem, größere Beschleunigerelemente zu bauen, wodurch Störwellen reduziert werden, die die Qualität des Elektronenstrahls vermindern.



Störwellen in einem Beschleunigerelement, das von Elektronen durchflogen wird.

Störwellen entstehen immer, wenn Elektronen durch ein Beschleunigerelement rasen. Denn die sich bewegenden Ladungen erzeugen selbst elektromagnetische Wellen und hinterlassen den Elektronen dahinter ein störendes Durcheinander. Das kann mit einem Schnellboot in einem Kanal verglichen werden. Das Schiff zieht Bugwellen nach sich, die von den Kanalufeln zurückschwappen und nachfolgende Boote zum Schaukeln oder Kentern bringen können. Ein breiterer Kanal verbessert nun die Situation auf dem Wasser. Ebenso verringert ein größerer

Durchmesser des Hohlraumresonators die Störwellen und der Elektronenstrahl wird schärfer.

Vakuum *Bahn frei für die Elektronen*

Informieren Sie sich, wie dem Beschleuniger die Luft genommen wird.

Jedes Luftmolekül, auf das die Elektronen bei ihrem Weg durch den Beschleuniger stießen, würde sie aus der Bahn werfen. Die Folge wären Röntgenlaserblitze von geringerer Qualität.

Beim XFEL kommt daher ausgeklügelte Vakuumtechnik zum Einsatz, damit den Beschleunigerelementen die Luft ausgeht.

Vakuum

Vakuum ist weit mehr als nur nichts.



Auch zwischen den Sternen ist das Universum nicht völlig leer.

Vakuum ist, wo nichts ist. Wenigstens meinten dies die alten Römer, denn das lateinische Wort „vacuus“ bedeutet „leer“. Den Vakuumtechniker packt bei dieser Definition die Ehrfurcht, denn eine solche Leere kann selbst mit den besten Vakuumpumpen nicht erreicht werden. Und auch das Vakuum im Universum ist nicht perfekt: Es beinhaltet immer noch einige Wasserstoffmoleküle pro Kubikmeter.

So lautet dann auch die Deutsche Industrie-Norm 28400 ganz pragmatisch und sinngemäß: „Vakuum entspricht dem Druckbereich unterhalb des Atmosphärendrucks.“ Danach herrscht Vakuum in jedem Raum mit verdünnter Luft.

Horror vacui

Den alten Griechen war die vollkommene Leere, das Nichts, überhaupt nicht geheuer. Aristoteles erfand sogar ein fünftes Element (neben Feuer, Wasser, Luft und Erde), das den Raum ausfüllt, damit er nur nicht leer sei. Auch Albertus Magnus, Thomas von Aquin und Galileo Galilei glaubten noch, dass die Natur eine Abscheu gegen die Leere (horror vacui) hätte: Die Existenz des Nichts stünde schließlich im Widerspruch zur Allgegenwärtigkeit Gottes.

In der Webversion dieses Angebots finden Sie hier einen Trickfilm oder eine Interaktion.

[Animation] Die Animation zeigt, wie im Vakuum ständig virtuelle Teilchenpaare entstehen und sich sofort wieder vernichten.

Es gibt keinen leeren Raum.

Die Herren hatten Recht. Aber auf eine andere Art: In der modernen Physik weiß man, dass es kein perfektes Vakuum gibt. So steckt das Universum voller Teilchen. Ständig bilden sich Teilchen-Antiteilchen-Paare, die sich etwa 0,000 000 000 000 000 000 01 Sekunden nach ihrer Entstehung wieder vernichten. Das Universum borgt sich dazu Energie, lebt ständig auf Pump und zerstört so das Nichts.

Vakuum beim XFEL

Vakuumtechnik kommt beim Röntgenlaser XFEL an verschiedenen Orten zum Einsatz – zum Beispiel im Beschleuniger, aber auch zur Wärmeisolation.

Gleich in drei Bereichen spielt Vakuumtechnik beim XFEL eine wichtige Rolle:



Wo Kabel in das Beschleunigermodul führen, ist ein Zusatz-Vakuumsystem nötig.

- Ein besonders gutes Vakuum ist für den Teil des Beschleunigers wichtig, durch den die Elektronen flitzen. Es sorgt dafür, dass sich dort keine störenden Gasmoleküle tummeln. Das ist für die Qualität des Elektronenstrahls von großer Bedeutung. Denn jeder Zusammenstoß mit Luftmolekülen sorgt für Durcheinander im Elektronenstrahl. Darüber hinaus könnte Gas am minus 271 Grad kalten Niob kondensieren und so die Supraleitung zusammenbrechen lassen.
- Das zweite Einsatzgebiet der Vakuumtechnik beim Röntgenlaser ist die Kühlanlage. Hier dient Vakuum der Wärmeisolation.
- Das dritte Vakuumsystem sichert die Stellen des Beschleunigers ab, an denen Komponenten an die Beschleunigermodule angedockt sind, um beispielsweise die beschleunigende Mikrowellenstrahlung hineinzuleiten.

Reinraum

Nicht nur sauber, sondern rein

Wie die Beschleunigerelemente rein werden, lernen Sie hier.

Verunreinigungen wie Schmutzpartikel und Staub im Inneren und an den Wänden der Beschleunigerelemente des XFEL würden zu schwerwiegenden Beeinträchtigungen beim Betrieb der Anlage führen. Folgen wären Röntgenlaserblitze von schlechter Qualität und womöglich der Totalausfall der Anlage.

Um diese Probleme zu vermeiden, werden viele der Bauteile in speziellen Reinräumen bearbeitet. Damit wird der XFEL nicht nur sauber, sondern rein.

Impressum

Hier erfahren Sie, wer hinter diesem Angebot steckt und wie Sie Kontakt aufnehmen können.

Anbieter

Anbieter dieses Informations- und Lernangebots ist im Rechtssinne das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY. DESY ist Mitglied in der Helmholtz-Gemeinschaft.

Elektronischer Kontakt

E-Mail: xfel-kontakt@desy.de
Telefon: +49 (0)40-8998-1919

Adresse

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
Notkestraße 85
D-22607 Hamburg
<http://www.desy.de>

Briefanschrift

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY

Mitwirkende

- Sand und Schiefer, Hamburg
(Konzept, Inhalte, Programmierung, Design)
- Tricklabor, Berlin
(Medienproduktion)
- Textlabor, Jena
(Lektorat, Übersetzung)
- TransForm GmbH, Köln
(Übersetzung)

Standards und Barrierefreiheit

Das Webangebot <http://xfelinfo.desy.de> erfüllt die Webstandards XHTML und CSS. Es ermöglicht den barrierefreien Zugang.

Lexikon

Absoluter Nullpunkt

Der absolute Nullpunkt beschreibt die tiefste »*Temperatur*, die theoretisch erreicht werden kann. Er entspricht minus 273,15 Grad »*Celsius*. Die »*XFEL-Beschleunigerelemente* arbeiten gut 2 Grad über dem absoluten Nullpunkt.

Absorption

Unter Absorption versteht man die Aufnahme von »*Energie*, »*Strahlung* oder Materie durch ein absorbierendes System.

Aminosäure

Aus Aminosäuren setzen sich »*Proteine* zusammen. Diese »*Biomoleküle* sind ein wichtiger Untersuchungsgegenstand für den »*XFEL*.

Amplitude

Die Amplitude ist eine Eigenschaft einer »*Welle*. Sie gibt ihren maximalen Ausschlag an.

Atom

Atome heißen die kleinsten Bausteine, aus denen chemische Elemente (wie z.B. Wasserstoff oder Eisen) aufgebaut sind. Sie bestehen aus einem positiven Atomkern, um den sich »*Elektronen* bewegen. Die »*Wellenlänge* der »*XFEL-Röntgenlaserblitze* entspricht in etwa dem räumlichen Ausmaß von Atomen. Mit dem XFEL können sich daher Details auf atomarem Niveau auflösen lassen (»*Auflösungsvermögen*).

Auflösungsvermögen

Das Auflösungsvermögen ist eine Eigenschaft von Messgeräten zur Untersuchung physikalischer Größen. Es gibt an, welche Größenunterschiede von dem Gerät noch unterschieden werden können. Dabei kann es sich beispielsweise um Zeit- (Zeitauflösung), »*Energie-* oder »*Wellenlängenunterschiede* (Energieauflösung) oder räumliche Abstände (räumliches Auflösungsvermögen) handeln. Der »*XFEL* wird atomare Abstände in Zeitspannen von weniger als zehnbillionstel Sekunden (100 Femtosekunden) unterscheiden können.

Bar

Das Bar ist eine Maßeinheit für Druck. Ein Bar ist dabei die Gewichtskraft von rund einem Kilogramm auf einen Quadratzentimeter. 1,013 bar entsprechen dem normalen Atmosphärendruck.

Beschleunigungsgradient

Der Beschleunigungsgradient ist ein Maß dafür, wie stark ein »*Teilchenbeschleuniger* die »*Energie* eines Teilchens pro Strecke erhöhen kann. Eine typische Maßeinheit ist das Volt pro Meter. Die »*XFEL-Beschleunigerelemente* verfügen mit 23 Millionen Volt pro Meter trotz ihrer supraleitenden Funktionsweise über einen besonders hohen Beschleunigungsgradienten.

Beugung

Beugung ist ein Phänomen, das entsteht, wenn die Ausbreitung von »*Wellen* (wie Wasserwellen, Licht, Schall) durch Hindernisse verändert wird. Dabei entstehen Muster, die Rückschlüsse auf das Hindernis erlauben. Mit dem »*XFEL* wird auf diese Weise beispielsweise die Struktur von »*Molekülen* und Kristallen untersucht.

Biomolekül

Biomoleküle sind »*Moleküle*, die bei Lebensvorgängen in Zellen eine wesentliche Rolle spielen. Sie bestehen meist aus sehr vielen »*Atomen*. Mit Hilfe des »*XFEL* können der Aufbau und die Funktionsweise von Biomolekülen untersucht werden.

Brillanz

Die Brillanz ist eine Eigenschaft von Strahlungsquellen. Sie gibt die Zahl der »*Photonen* pro Fläche, Raumwinkel und Zeit innerhalb eines schmalen »*Wellenlängenbereichs* an. Die Brillanz des »*XFEL* setzt neue Maßstäbe: Seine Spitzenbrillanz ist rund eine Milliarde Mal höher als die herkömmlicher Strahlungsquellen, die mittlere Brillanz immer noch 10 000-mal größer.

Celsiuskala

Mit Hilfe der Celsiuskala können »*Temperaturangaben* gemacht werden. Die Skala ist derart gewählt, dass sich der Gefrierpunkt von Wasser bei 0 Grad Celsius und sein Siedepunkt bei 100 Grad Celsius befindet. Eine alternative Temperaturskala ist die »*Kelvinskala*.

Cluster

Als Cluster werden winzige materielle Objekte bezeichnet, deren Größen von einigen wenigen bis hin zu mehreren zehntausend »*Atomen* bzw. »*Molekülen* reichen. Cluster befinden sich damit in einem für die Forschung spannenden Bereich zwischen Gas und Festkörper. Große Cluster werden auch Nanoteilchen genannt. Die Eigenschaften der [xfel-roentgenlaserblitz|XFEL-Röntgenlaserblitze]] bieten neue Möglichkeiten, Cluster zu untersuchen.

DESY

Das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY ist ein Forschungsinstitut mit Standorten in Hamburg und Zeuthen. Bei DESY wird in den Bereichen Teilchenphysik, Forschung mit Photonen und Beschleunigertechnik gearbeitet. Das Institut ist eine der 15 Forschungseinrichtungen der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren. Das »*XFEL*-Projekt wurde von DESY und seinen internationalen Partnern vorgeschlagen und wird mit unmittelbarer Anbindung an das DESY-Gelände in Hamburg und Schleiwig-Holstein gebaut.

Dipolmagnet

Ein Dipolmagnet ist ein Gerät mit einem magnetischen Nord- und einem Südpol. Mit ihm können geladene Teilchen wie etwa »*Elektronen* auf eine Kurvenbahn gebracht werden.

Dipolmagnete kommen beispielsweise in »*Teilchenbeschleunigern* wie dem des »XFEL zum Einsatz, um die Elektronen auf die unterschiedlichen Abschnitte der Anlage zu verteilen.

Einstein, Albert

Deutsch-schweizerisch-amerikanischer Physiker (1879-1955). Einsteins Arbeiten sind in vielfacher Weise für den »XFEL von Bedeutung, darunter die »*Spezielle Relativitätstheorie*, die Erklärung des »*Photoeffekts* sowie maßgebliche Vorarbeiten für die Entwicklung des »*Lasers*.

Elektromagnetische Kraft

Elektromagnetische Kräfte wirken zwischen elektrischen Ladungen. Mit ihrer Hilfe werden beim »XFEL »*Elektronen* auf große »*Energien* beschleunigt sowie auf Slalomkurse und damit zur Lichtaussendung gebracht.

Elektromagnetische Strahlung

Bei elektromagnetischer Strahlung handelt es sich ganz allgemein um Bündel »*elektromagnetischer Wellen*. Die »*Wellenlängen*, Ausbreitungsrichtungen und Schwingungszustände dieser einzelnen Wellen können ganz unterschiedlich oder aber aufeinander abgestimmt sein (»*laserlichtartig*), so wie es beim »XFEL der Fall ist.

Elektromagnetische Welle

Phänomene wie »*sichtbares Licht*, »*Infrarotstrahlung* und »*Röntgenstrahlung* können mit Hilfe elektromagnetischer »*Wellen* beschrieben werden. Dabei handelt es sich um wellenförmige Veränderungen im »*elektromagnetischen Feld*.

Elektromagnetisches Feld

Mit Hilfe von elektromagnetischen Feldern lassen sich »*elektromagnetische Kräfte* beschreiben. Die Felder geben an, wie stark die Kraft zu einer bestimmten Zeit an einem gegebenen Ort ist. »*Elektromagnetische Wellen* sind sich ausbreitende Veränderungen im elektromagnetischen Feld.

Elektromagnetisches Spektrum

Je nach »*Wellenlänge* werden »*elektromagnetische Wellen* als »*Radiowellen*, »*Mikrowellenstrahlung*, »*Infrarotstrahlung*, »*sichtbares Licht*, »*Ultraviolettstrahlung*, »*Röntgenstrahlung* oder »*Gammastrahlung* bezeichnet. Die »*Wellenlängen* können dabei einige Kilometer oder auch wenige billionstel Millimeter betragen. Zusammen bilden die verschiedenen Wellenlängenbereiche das elektromagnetische Spektrum.

Elektron

Elektronen sind elektrisch negativ geladene Teilchen, die sich in »*Atomen* um den Atomkern bewegen. Beim »XFEL werden Elektronen auf hohe »*Energien* beschleunigt und zur Aussendung der »*XFEL-Röntgenlaserblitze* gebracht.

Elektronenmikroskop

Ein Elektronenmikroskop ist ein Gerät, mit dem winzige Strukturen untersucht werden können. Es arbeitet nicht mit »*sichtbarem Licht* wie Lichtmikroskope, sondern nutzt »*Elektronen*, die nach der »*Quantentheorie* - ganz so wie das Licht - »*Welleneigenschaften* besitzen. Zwar kommen im »XFEL auch Elektronen zum Einsatz, er ist jedoch kein Elektronenmikroskop, da die Elektronen im XFEL dazu verwendet werden, Licht zu erzeugen.

Elektronenvolt

Das Elektronenvolt (Abkürzung: eV) ist eine Maßeinheit für die »Energie von Teilchen. 1 eV ist dabei die Energie, die ein »Elektron aufnimmt, wenn es eine elektrische Spannung von 1 Volt durchfliegt. Beim »XFEL werden »Elektronen auf 20 Milliarden Elektronenvolt beschleunigt, bevor sie die hochintensiven »XFEL-Röntgenlaserblitze aussenden.

Emission

Unter Emission versteht man das Aussenden von »Energie, »Strahlung oder Materie durch ein emittierendes System.

Emittanz

Die Emittanz ist eine Eigenschaft von Teilchenstrahlen wie denen in »Teilchenbeschleunigern. Sie beschreibt das Auffächern des Strahls, sie gibt also an, wie groß der Querschnitt eines Strahls ist und wie stark er sich öffnet. In der Regel heißt es: Je kleiner die Emittanz, umso besser die Qualität des Strahls. Die Emittanz der Elektronenquelle des »XFEL muss extrem klein sein, um die Voraussetzungen für die Erzeugung der »Röntgenlaserblitze zu erfüllen.

Endvakuum

Das Endvakuum ist eine Eigenschaft einer »Vakuumpumpe. Es gibt den minimalen Druck an, den die Pumpe erzeugen kann.

Energie

Energie ist ein grundlegender Begriff der Physik. Wenn etwas Energie hat, kann es damit etwas anderes tun (= Arbeit verrichten). Nach der »Speziellen Relativitätstheorie können Masse und Energie ineinander überführt werden. Beim »XFEL-Beschleuniger werden »Elektronen zunächst auf hohe Energien gebracht, bevor sie »Röntgenstrahlung aussenden, deren »Photonen weit energiereicher sind als die von »sichtbarem Licht.

FLASH

FLASH ist ein »Freie-Elektronen-Laser bei »DESY zur Erzeugung von »Vakuum-Ultraviolettstrahlung und weicher »Röntgenstrahlung bis hinunter zu 6 milliardstel Metern »Wellenlänge. FLASH ist die erste Quelle für kurzweilige, »laserlichtartige Strahlung mit hoher Spitzenleuchtstärke und ultrakurzen Lichtpulsen. Er wird bis zum Jahr 2009 der weltweit einzige »Freie-Elektronen-Laser für den Bereich der weichen Röntgenstrahlung sein. Sein Betrieb liefert auch wichtige Erkenntnisse für den »XFEL. Bis April 2006 trug FLASH den Namen VUV-FEL. Die Abkürzung FLASH steht für "reie Elektronen-er in amburg".

Fluoreszenz

Als Fluoreszenz bezeichnet man das Phänomen, dass manche (= fluoreszierenden) Materialien nach rund einer millionstel Sekunde Strahlung aussenden, wenn man sie mit »elektromagnetischen Wellen bestrahlt. Die ausgesendete Strahlung ist dabei von gleicher oder niedrigerer »Frequenz.

Freie-Elektronen-Laser (FEL)

Freie-Elektronen-Laser (FEL) sind Anlagen, in denen sich Strahlung erzeugen lässt, die über für die Forschung sehr nützliche Eigenschaften verfügt. Dazu werden »Elektronen zunächst auf hohe »Energien beschleunigt. Anschließend werden sie zur Lichtaussendung veranlasst, indem sie durch Magnetfelder auf einen Slalomkurs gebracht werden. Bei »DESY befindet sich mit

dem »VUV-FEL ein FEL in Betrieb und mit dem »XFEL ein weiterer in Planung.

Frequenz

Die Frequenz ist eine Eigenschaft einer »Welle. Sie gibt die Zahl der Schwingungen pro Zeit an. Die gängige Einheit ist das Hertz; es entspricht einer Schwingung pro Sekunde. Der »XFEL wird »elektromagnetische Wellen mit Frequenzen bis zu 3 Billionen Hertz erzeugen.

Gammastrahlung

Die Gammastrahlung ist ein Teil des »elektromagnetischen Spektrums. Dazu zählen »elektromagnetische Wellen mit »Wellenlängen unter einem billionstel Meter. Sie ist die energiereichste Form »elektromagnetischer Strahlung und entsteht beispielsweise bei radioaktiven Prozessen und in kosmischen Großereignissen.

HASYLAB

Abkürzung für „Hamburger Synchrotronstrahlungslabor“. Das HASYLAB ist eine »DESY-Einrichtung, in der Experimente mit intensiver »elektromagnetischer Strahlung vorbereitet, durchgeführt und koordiniert werden. Zudem werden hier neue Strahlungsquellen entwickelt und geplant.

Holographie

Bei der Holographie handelt es sich um ein Verfahren, mit dem dreidimensionale Informationen von einem Objekt fotografisch aufgezeichnet werden können. Mit Hilfe des »XFEL können holographische Aufnahmen von kleinsten Objekten gemacht werden.

Infrarotstrahlung

Die Infrarotstrahlung ist ein Teil des »elektromagnetischen Spektrums. Zu ihr zählen »elektromagnetische Wellen mit »Wellenlängen zwischen rund einem tausendstel und einem millionstel Meter. Wir Menschen nehmen Infrarotstrahlung als Wärme wahr.

Intensität

Die Intensität ist eine Eigenschaft von »Wellen oder Strahlungsquellen. Sie entspricht der »Energie pro Zeit und Fläche. Die Intensität einer Welle (Schall oder Licht) wächst mit dem Quadrat ihrer »Amplitude.

Interferenz

Interferenz ist ein Phänomen, das auftritt, wenn sich zwei oder mehr »Wellen an derselben Stelle befinden. Dabei können sich die Wellen gegenseitig verstärken oder auslöschen. In bestimmten Fällen entstehen zeitlich feste Interferenzmuster, aus denen sich Rückschlüsse über die Wellen und etwaige Hindernisse auf deren Ausbreitungsweg ziehen lassen.

Ionengetterpumpe

Eine Ionengetterpumpe ist eine »Vakuumpumpe, die Gasmoleküle aus einem Behälter entfernt, indem sie diese chemisch bindet. Dieser Pumpentyp wird verwendet, um einen bereits vorevakuierten Behälter noch stärker zu entleeren.

Kelvinskala

Die Kelvinskala kann benutzt werden, um »Temperaturangaben zu machen. Sie ist derart gewählt, dass sich der »absolute Nullpunkt bei 0 Kelvin und der Gefrierpunkt von Wasser bei 273,15 Kelvin befinden. Eine alternative Temperaturskala ist die »Celsiuskala.

Kohärenz

Als Kohärenz bezeichnet man die Eigenschaft einer »Strahlung, wenn die Schwingungszustände (»Phasen) ihrer einzelnen Wellenpakete in festen Beziehungen zueinander stehen. Man unterscheidet »räumliche und »zeitliche Kohärenz. Die »XFEL-Röntgenlaserblitze zeichnen sich durch eine hohe Kohärenz aus, wodurch zahlreiche Experimente erst möglich werden.

Kohärenz, räumliche

Die räumliche »Kohärenz gibt an, ob die einzelnen »Wellenpakete, die nebeneinander angeordnet eine Strahlung bilden, in einer festen Beziehung zueinander schwingen. Dies ist der Fall, wenn die Wellenpakete die gleiche Farbe (»Wellenlänge) besitzen und sehr lang sind (Ausdehnung).

Kohärenz, zeitliche

Mit der zeitlichen »Kohärenz wird die räumliche Länge der einfarbigen »Wellenpakete in einer »Strahlung beschrieben. Der Name kommt daher, dass durch die zeitliche Kohärenz festgelegt ist, wie lange die Strahlung an einem Punkt mit Hilfe des einfarbigen Wellenpakets beschrieben werden kann. Bei weißem Licht sind das gerade einmal 3 milliardstel Sekunden; die einzelnen einfarbigen Wellenpakete sind entsprechend kurz. Bei »Laserlicht kann die Kohärenzzeit bis zu einigen zehntel Sekunden betragen.

Laser

Ein Laser ist ein Gerät, mit dem sich »Strahlung erzeugen lässt, die »laserartig schwingt. Aufgrund dieser Eigenschaft ist die Laserstrahlung für die Forschung von besonderer Bedeutung. Laser ist die Abkürzung für .

laserlichtartig (kohärent)

Als laserlichtartig wird hier »Strahlung bezeichnet, deren Bestandteile (»Wellenpakete) in festen Beziehungen zueinander schwingen. Für viele der möglichen Experimente am »XFEL ist diese Eigenschaft der »Röntgenlaserblitze von großer Bedeutung. Der Fachausdruck lautet »Kohärenz.

Lichtgeschwindigkeit

Die Lichtgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit, mit der sich »sichtbares Licht und alle »elektromagnetischen Wellen ausbreiten. Im Vakuum beträgt sie 299 792 458 Meter pro Sekunde. Nach der »speziellen Relativitätstheorie ist die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit eine universelle Konstante und gibt die obere Grenze der Geschwindigkeit an, mit der sich »Energie, Teilchen oder Information ausbreiten können. Im »XFEL werden »Elektronen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt.

Microbunching

heißt das Phänomen, das in »Freie-Elektronen-Lasern zur Entstehung von »laserlichtartiger Strahlung führt. Durch die Wechselwirkung der »Elektronen mit der ausgesendeten »Strahlung bilden sich in den Elektron-Teilchenpaketen Kleinstgruppen, die so angeordnet sind, dass sich ihre Strahlung gegenseitig gleichförmig verstärkt.

Mikrowellenstrahlung

Die Mikrowellenstrahlung bildet einen Teil des »elektromagnetischen Spektrums. Zu ihr zählen

alle »*elektromagnetischen Wellen* mit »*Wellenlängen* zwischen rund einem Millimeter und einem Meter. In Mikrowellenherden regen Mikrowellen Wassermoleküle zu Schwingungen an und erwärmen auf diese Weise das Essen. Im »*XFEL* kommen Mikrowellen zur Beschleunigung von »*Elektronen* zum Einsatz.

Molekül

Ein Molekül ist ein Objekt, das aus mindestens zwei miteinander verbundenen »*Atomen* besteht. Mit Hilfe der »*XFEL-Röntgenlaserblitze* des »*XFEL* können Moleküle und ihre Veränderungen untersucht werden.

Monochromator

Mit einem Monochromator können aus einer »*Strahlung* »*Wellen* einer bestimmten »*Wellenlänge* herausgefiltert werden. Die Übersetzung von Monochromator lautet „Einfarbigmacher“. Denn nach dem Monochromator besteht die »*Strahlung* nur noch aus einer Farbe.

Niob

Die »*Beschleunigerelemente* des »*XFEL* bestehen aus Niob, einem Metall, das bei minus 265 »*Grad Celsius* seinen elektrischen Widerstand verliert. Es entsteht dann »*Supraleitung*.

Phase

Die Phase ist eine Eigenschaft einer »*Welle* an einem bestimmten Ort zu einer gegebenen Zeit. Sie gibt den Schwingungszustand einer Welle an, also ob sich zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort gerade ein Wellenberg, ein Wellental oder etwas dazwischen befindet. Wenn sich mehrere Wellen an einem Ort befinden, legt die Phase fest, ob sich die Wellen gegenseitig verstärken oder auslöschen.

Photoeffekt

Der Photoeffekt ist ein Phänomen, bei dem »*Elektronen* aus einer Metallplatte gelöst werden, wenn »*Strahlung* auf sie trifft. Auf diese Weise gelangen die »*Elektronen* beim »*XFEL* in den »*Beschleunigerteil* der Anlage. Der Photoeffekt wurde 1905 von Albert »*Einstein* mit Hilfe der »*Quantentheorie* erklärt, indem er Licht als aus »*Photonen* zusammengesetzt beschrieb.

Photon

Einige der Eigenschaften von »*elektromagnetischen Wellen* lassen sich nur erklären, wenn man es sich aus Teilchen zusammengesetzt vorstellt. Diese Objekte werden Photonen genannt.

Plasma

Plasma ist ein Zustand von Materie, der bei hohen »*Temperaturen* entsteht. Mit Hilfe des »*XFEL* können die Eigenschaften von Plasmen studiert werden.

Polarisation

Die Polarisation ist eine Eigenschaft von »*Wellen*, die senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung schwingen. Wenn solche Wellen in einer bestimmten Ebene schwingen, nennt man sie polarisiert. Dies wird bei den »*XFEL-Röntgenlaserblitzen* der Fall sein.

Protein

Proteine werden auch Eiweiße genannt. Es handelt sich dabei um »*Biomoleküle*, die bei vielen Lebensvorgängen eine entscheidende Rolle spielen. Proteine sind aus »*Aminosäuren*

zusammengesetzt. Mit den »XFEL-Röntgenlaserblitzen lassen sich Proteine auf vielfältig neue Weise untersuchen.

Quadrupolmagnet

Ein Quadrupolmagnet ist ein Gerät, bei dem zwei magnetische Nord- und zwei magnetische Südpole abwechselnd um eine Achse angeordnet sind. In »Teilchenbeschleunigern werden solche Magnete eingesetzt, um den »Teilchenstrahl zu bündeln. Dies ist auch beim »XFEL-Beschleuniger der Fall.

Quantentheorie

Die Quantentheorie ist eine fundamentale Beschreibungssprache der Physik, die aus unserer Alltagsperspektive zuweilen widersprüchlich klingt, aber sehr gut funktioniert. Der Quantentheorie zufolge lassen sich beispielsweise einige Eigenschaften von Licht nur verstehen, wenn man es als aus Teilchen (»Photonen) zusammengesetzt betrachtet. Andere Eigenschaften wiederum lassen sich nur mit dem Modell der »Welle erklären.

Radiowellen

Radiowellen bilden einen Teil des »elektromagnetischen Spektrums. Zu ihnen zählen alle »elektromagnetischen Wellen mit »Wellenlängen, die größer als ein Meter sind. Radiowellen werden beispielsweise in der Funk- und Nachrichtentechnik zur drahtlosen Übermittlung von Daten verwendet.

Reinheit

Bei der Produktion der »XFEL-Beschleunigerelemente gilt es, Verschmutzungen zu vermeiden. Daher erfolgen viele der Produktionsschritte in staubfreien Umgebungen wie etwa »Reinräumen.

Reinraum

Reinräume sind Räume, die mit Hilfe technischen Aufwandes möglichst »staubfrei gehalten werden. In solchen Reinräumen werden beispielsweise die Bauteile des »XFEL zusammengesetzt.

Resonanz

Als Resonanz bezeichnet man das starke Mitschwingen eines Systems, das durch einen äußeren Einfluss periodisch erregt wird. Ein System, das in Resonanz gebracht werden kann, wird als »Resonator bezeichnet. Resonatoren spielen bei der »Beschleunigung von Teilchen eine wichtige Rolle.

Resonator

Ein Resonator ist ein System, das zu bestimmten, besonders stark ausgeprägten Schwingungen angeregt werden kann. Die »XFEL-Beschleunigerelemente sind Resonatoren. In ihnen schwingt ein elektromagnetisches Feld, mit dem »Elektronen beschleunigt werden.

Röntgen, Wilhelm Conrad

Deutscher Physiker (1845-1923), der 1896 die »Röntgenstrahlung entdeckte. Für diesen Fund erhielt er 1901 den ersten Physik-Nobelpreis der Weltgeschichte.

Röntgenlaser

Ein Röntgenlaser ist ein Gerät, mit dem »laserlichtartige »Röntgenstrahlung erzeugt werden

kann. Der »XFEL ist ein Röntgenlaser.

Röntgenröhre

Eine Röntgenröhre ist ein Gerät, mit dem auf herkömmliche Weise »Röntgenstrahlung erzeugt werden kann. In Röntgenröhren werden schnelle »Elektronen auf ein Kupfer- oder Wolframblech geschossen. Die Teilchen werden in dem Blech stark abgebremst und strahlen Röntgenlicht ab. Im Gegensatz zu den »XFEL-Röntgenlaserblitzen schwingt diese Strahlung nicht »laserlichtartig und hat auch eine geringere »Intensität.

Röntgenstrahlung

Röntgenstrahlung ist ein Teil des »elektromagnetischen Spektrums. Zur Röntgenstrahlung gehören »elektromagnetische Wellen mit »Wellenlängen zwischen etwa 10 milliardstel Metern und einem billionstel Meter. Röntgenstrahlung kann zum Teil Materie durchdringen, was beispielsweise in der Medizin zur Aufnahme von Röntgenbildern genutzt wird.

SASE-Effekt

Die Abkürzung SASE steht für (selbstverstärkte spontane Emission). Bei diesem Phänomen entsteht in einem »Undulator »laserlichtartige Strahlung, indem »Elektronen-»Teilchenpakete mit der spontan abgegebenen Strahlung wechselwirken und sich derart gruppieren (), dass sich der Effekt positiv verstärkt. Damit der SASE-Prozess einsetzt, sind extrem dicht gebündelte Elektronen-Pakete vonnöten, die beim »XFEL besondere Anforderungen an den »XFEL-Beschleuniger stellen. Alternativ zum SASE-Effekt kann bei einem »FEL auch das zum Einsatz kommen.

Scrollpumpe

Eine Scrollpumpe ist eine »Vakuumpumpe, in der sich zwei ineinander gesteckte Spiralzylinder befinden. Einer ist drehbar, aber die Achse liegt nicht in der Mitte der Pumpenkammer, sondern etwas daneben. Bei der Drehung des einen Spiralzylinders in der Kammer entstehen Bereiche, die sich abwechselnd vergrößern und verkleinern. Auf diese Weise wird Gas in die Pumpe gesaugt, eingeschlossen, verdichtet und ausgestoßen.

Seeding

Werden die »Elektronen in einem »FEL mit Hilfe von (konventionell erzeugtem) »Laserlicht kleinstgruppiert (»Microbunching), so spricht man von Seeding.

Sextupolmagnet

Ein Sextupolmagnet ist ein Gerät, bei dem drei magnetische Nord- und drei magnetische Südpole abwechselnd um eine Achse angeordnet sind. In »Teilchenbeschleunigern werden solche Magnete eingesetzt, um den »Teilchenstrahl zu bündeln. Dies ist auch beim »XFEL-Beschleuniger der Fall.

Sichtbares Licht

Sichtbares Licht bildet einen Teil des »elektromagnetischen Spektrums. Es umfasst »elektromagnetische Wellen mit »Wellenlängen zwischen 400 und 750 milliardstel Metern. Es ist der Bereich, der von unseren Augen wahrgenommen werden kann, in ihm sind alle Farben des Regenbogens enthalten.

Spezielle Relativitätstheorie

Die Spezielle Relativitätstheorie geht davon aus, dass die »Lichtgeschwindigkeit immer konstant

ist, auch wenn sich der Geschwindigkeitsmesser bezüglich der Lichtquelle bewegt. Daraus folgen zahlreiche verblüffende Eigenschaften von Raum und Zeit. Auch viele der Phänomene am »XFEL wie etwa die Entstehung der »Röntgenlaserblitze lassen sich nur mit Hilfe der Relativitätstheorie verstehen. Sie wurde von Albert »Einstein aufgestellt.

Spontane Emission

»Atome und »Moleküle, die über überschüssige »Energie verfügen, können diese in Form von »Strahlung wie etwa »sichtbarem Licht abgeben. Wenn dieser Vorgang von sich aus erfolgt, spricht man von spontaner Emission (im Gegensatz zu »stimulierter Emission).

Sprungtemperatur

Die Sprungtemperatur ist eine Eigenschaft eines Materials, bei dem »Supraleitung auftritt. Sie gibt die »Temperatur an, unterhalb derer das Material seinen elektrischen Widerstand verliert.

Staubigkeit

Die Staubigkeit ist ein Maß für die »Reinheit eines Raumes. Sie gibt die Zahl der Staubteilchen pro Kubikfuß Luft an (dabei handelt es sich um einen Würfel mit einer Seitenlänge von gut 30 Zentimetern). Mitgezählt werden dabei alle Partikel, die mindestens die Hälfte eines tausendstel Millimeters (= 0,5 Mikrometer) groß sind.

Stimulierte Emission

»Atome und »Moleküle, die über überschüssige »Energie verfügen, können diese in Form von »elektromagnetischer Strahlung wie etwa »sichtbarem Licht abgeben. Wenn dieser Vorgang durch Auftreffen von elektromagnetischer Strahlung ausgelöst wird, spricht man von stimulierter Emission (im Gegensatz zu »spontaner Emission). Stimulierte Emission spielt bei der Erzeugung von »Laserlicht eine bedeutende Rolle.

Strahlrohr

Das Strahlrohr ist ein zentraler Bestandteil von »Teilchenbeschleunigern, auch dem des »XFEL. In ihm verlaufen die zu beschleunigenden Teilchen. Damit diese auf ihrem Weg durch das Strahlrohr mit wenig Fremdteilchen wie Luftmolekülen zusammenstoßen, herrscht im Strahlrohr in der Regel ein möglichst gutes »Vakuum.

Strahlung

Als Strahlung wird hier ein Bündel sich ausbreitender »elektromagnetischer Wellen oder Teilchen verstanden.

Supraleitung

Als Supraleitung bezeichnet man das Phänomen, dass bestimmte Materialien bei tiefen »Temperaturen ihren elektrischen Widerstand verlieren; in ihnen kann elektrischer Strom dann völlig verlustfrei fließen. In modernen »Teilchenbeschleunigern kommen häufig supraleitende Bauteile zum Einsatz. Dies ist auch bei den »XFEL-Beschleunigerelementen der Fall.

Synchrotronstrahlung

Zwingt man elektrisch geladene Teilchen auf eine gekrümmte Bahn, so geben sie »elektromagnetische Strahlung ab, so genannte Synchrotronstrahlung. Diese zeichnet sich durch eine besonders hohe »Intensität aus. Der Name kommt von einem kreisförmigen »Teilchenbeschleunigertyp, dem Synchrotron, an dem diese Strahlung beim Betrieb erstmals angefallen ist.

Teilchenbeschleuniger

Teilchenbeschleuniger werden genutzt, um geladene Teilchen auf hohe »Energien zu bringen. Beim »XFEL müssen »Elektronen zunächst beschleunigt werden, bevor sie die »Röntgenlaserblitze aussenden können. Außer zur Erzeugung von »elektromagnetischer Strahlung hoher »Intensität kommen Teilchenbeschleuniger auch in der Teilchenphysik zum Einsatz, um die Natur des Allerkleinsten zu untersuchen.

Teilchenpaket

Teilchen durchlaufen einen »Teilchenbeschleuniger selten alleine, sondern meist in Teilchenpaketen. Auch die »Elektronen im »XFEL sind zu solchen Teilchenpaketen gebündelt. Sie bestehen aus jeweils über 6 Milliarden Elektronen.

Teilchenstrahl

Die Teilchen, die gegebenenfalls in Form von »Teilchenpaketen in einem »Teilchenbeschleuniger auf hohe »Energien gebracht werden, bilden einen Teilchenstrahl. An die Eigenschaften des »XFEL-Teilchenstrahls werden hohe Anforderungen gestellt, um die erwünschte Qualität der »XFEL-Röntgenlaserblitze zu erreichen.

Temperatur

Die Temperatur gibt an, wie viel Wärmeenergie durchschnittlich in einer Sache steckt. Sie kann mit Hilfe der »Celsius- oder »Kelvinskala gemessen werden.

Testanlage

An einer Testanlage bei »DESY in Hamburg entwickelte und erprobte ein internationales Forscherteam - die "TESLA Collaboration" - von 1992 bis 2004 die Beschleunigertechnologie für den internationalen Linearcollider ILC und zugleich ebenfalls auf dieser Technologie basierende »Freie-Elektronen-Laser. Die ursprünglich 100 m lange Testanlage wurde mittlerweile auf insgesamt 260 m verlängert und zum Freie-Elektronen-Laser »VUV-FEL ausgebaut.

Titansublimationspumpe

Eine Titansublimationspumpe ist eine »Vakuumpumpe, bei der Gasmoleküle mit Hilfe verdampfenden Titans chemisch gebunden werden und auf diese Weise dem Inneren der Pumpe entzogen werden.

Turbomolekularpumpe

Eine Turbomolekularpumpe ist eine »Vakuumpumpe, die wie ein Ventilator oder eine Flugzeugturbine funktioniert und auf diese Weise Gasmoleküle aus dem Inneren eines Behältnisses saugt. Dieser Pumpentyp wird verwendet, um einen bereits vorevakuierten Behälter noch stärker zu entleeren.

Ultraviolettstrahlung

Ultraviolettstrahlung bildet einen Teil des »elektromagnetischen Spektrums. Darunter fallen »elektromagnetische Wellen mit »Wellenlängen zwischen 10 und 400 milliardstel Metern. Der Ultraviolettanteil der Sonnenstrahlung bräunt die menschliche Haut.

Undulator

Ein Undulator ist eine Magnetstruktur, in der »Elektronen auf Slalomkurs und damit zur

Erzeugung von hochintensiver »*elektromagnetischer Strahlung* gebracht werden. Auch beim »XFEL kommen Undulatoren zum Einsatz (»XFEL-Undulatoren).

Vakuum

Theoretisch ist Vakuum, wo rein gar nichts ist. Pragmatisch und nach DIN-Norm fällt hingegen bereits alles unter Vakuum, was einen Druck unterhalb des Atmosphärendrucks hat. Im »Strahlrohr des »XFEL herrscht ein Vakuum, das mit Hilfe von »Vakuumpumpen erzeugt wird.

Vakuum-Ultraviolettstrahlung

Unter Vakuum-Ultraviolettstrahlung versteht man einen Bereich im »*elektromagnetischen Spektrum* zwischen »*Ultraviolett-* und »*Röntgenstrahlung*. Er ist nicht genau definiert, liegt aber bei »*Wellenlängen* zwischen rund 200 und ein bis zehn milliardstel Metern. Der »VUV-FEL bei »DESY erzeugt Strahlung in diesem Bereich.

Vakuumpumpe

Vakuumpumpen sind Geräte, mit denen der Druck in Behältern abgesenkt werden kann, so dass ein »*Vakuum* entsteht. Beim XFEL kommen verschiedenen Typen zum Einsatz (»*Titansublimationspumpe*, »*Turbomolekularpumpe*, »*Ionengeretterpumpe*, »*Scrollpumpe*).

VUV-FEL

VUV-FEL ist der Name, den die XFEL-Pilotanlage »FLASH bis April 2006 trug.

Welle

Eine Welle ist eine regelmäßige Veränderung in einem Medium. Beispiele sind Wasserwellen oder »*elektromagnetische Wellen*. Wellen können anhand ihrer »*Amplitude*, »*Wellenlänge*, »*Frequenz* und »*Phase* beschrieben werden.

Welle-Teilchen-Dualismus

Das Verhalten von Objekten aus der Quantenwelt lässt sich in manchen Fällen nur beschreiben, indem man sie als Welle betrachtet, in anderen Situationen verhalten sich diese Objekte wie Teilchen. Dies ist beispielsweise beim Licht der Fall. Die »*Quantentheorie* beschreibt dieses Phänomen als Welle-Teilchen-Dualismus.

Wellenlänge

Die Wellenlänge ist eine Eigenschaft einer »*Welle*. Sie gibt den Abstand zwischen zwei Wellenbergen einer Welle an und wird in Metern gemessen. Die Wellenlängen von »*sichtbarem Licht* beispielsweise liegen zwischen 400 und 750 milliardstel Metern. Der »XFEL wird »*elektromagnetische Wellen* mit Wellenlängen zwischen knapp 0,1 und 6 milliardstel Metern erzeugen.

Wellenpaket

Der Begriff des Wellenpakets wird hier verwendet, um räumlich begrenzte »*Wellen* einer festen »*Wellenlänge* zu beschreiben.

Wiggler

Ein Wiggler ist eine Magnetstruktur, in der »*Elektronen* auf Slalomkurs und damit zur Erzeugung von hochintensiver »*elektromagnetischer Strahlung* gebracht werden. Wiggler arbeiten ähnlich wie »*Undulatoren*, bei ihnen ist das Magnetfeld jedoch stärker. Dies führt zu einem weiter ausgedehnten Slalomkurs und damit zu Strahlung, die weiter aufgefächert ist und

mehr Farben enthält.

XFEL

Der Röntgenlaser XFEL ist als Projekt mit europäischer Beteiligung geplant. Dazu wird eine 3,4 Kilometer lange »Röntgenlaser-«Anlage gebaut. Mit ihr werden hochintensive »Röntgenlaserblitze erzeugt, die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern für ihre Forschungszwecke zur Verfügung stehen. Der XFEL ist auf drei »XFEL-Betriebsgeländen angesiedelt. Ab Ende 2013 soll mit seiner Inbetriebnahme begonnen werden.

XFEL-Anlage

Zur »XFEL-Anlage zählen alle Gebäude und technischen Einrichtungen, die zur Erzeugung und Nutzung der »XFEL-Röntgenlaserblitze errichtet werden, darunter die »XFEL-Kältehalle und die »XFEL-Tunnel, die »XFEL-Experimentierhallen sowie zahlreiche Versorgungsgebäude. Der größte Teil der Anlage verläuft unterirdisch in Tunneln. An einigen Stellen gibt es Zugangsgebäude. Die Spitzenleistung der Anlage wird das Zehnmilliardenfache moderner Röntgenquellen erreichen.

XFEL-Anwendungen

Der »XFEL wird Experimentierfelder erschließen, von denen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler bisher nur träumen durften. Heute können nur Standbilder von chemischen Reaktionen aufgenommen werden, mit den XFEL-Röntgenblitzen werden sie sich auch filmen lassen. Dann kann Biomolekülen bei der Arbeit zugeschaut und im Detail untersucht werden, wie sich »Atome und »Moleküle zu Werkstoffen formen.

XFEL-Anwendungen: Biomoleküle vermessen

Mit den »XFEL-Röntgenlaserblitzen können Forscherinnen und Forscher die Struktur von weit mehr »Biomolekülen entschlüsseln, als derzeit möglich ist. Denn die Blitze sind so intensiv, dass für die Aufnahme ein einzelnes Molekül ausreicht, wo vorher noch viele mühsam zu Kristallen zusammengefügt werden mussten. Detailreiche Aufnahmen von Biomolekülen sind von großer Bedeutung, um ihre Funktion in Zellen zu verstehen und beispielsweise neue Medikamente zu entwickeln.

XFEL-Anwendungen: Chemische Reaktionen filmen

Die »XFEL-Röntgenlaserblitze sind so kurz, dass sich damit chemische Reaktionen filmen lassen. Belichtungszeiten im Bereich von milliardstel Sekunden garantieren, dass nichts verwackelt. Genutzt werden können diese Aufnahmen, um die Prozesse in Brennstoff- und Solarzellen besser zu verstehen. Die Forscher können aber auch »Biomolekülen bei der Arbeit zuschauen oder im Detail untersuchen, wie sich »Atome und »Moleküle zu Werkstoffen formen.

XFEL-Anwendungen: Cluster untersuchen

»Cluster stellen das Bindeglied zwischen Atomen und großen Kristallen dar. In einem Cluster bilden einige Dutzend »Atome oder »Moleküle eine regelmäßige Anordnung. Die »XFEL-Röntgenlaserblitze helfen beim besseren Verständnis dieser Materieform.

XFEL-Anwendungen: Plasma erforschen

Mit den »XFEL-Röntgenlaserblitzen kann ein Zustand von Materie erzeugt und untersucht werden, der bei sehr hohen Temperaturen entsteht: Plasma. Diese Materieform ist maßgeblich an der Energieerzeugung in unserer Sonne beteiligt. Ein besseres Verständnis ist daher wichtig,

wenn man diese Prozesse auf der Erde nachahmen will. Die Untersuchung von Plasmen ist aber auch für die Herstellung von Computerchips und neuen Werkstoffen von großem Interesse.

XFEL-Beschleuniger

Im ersten Teil der »XFEL-Anlage werden »Elektronen auf hohe »Energien (20 Milliarden »Elektronenvolt) beschleunigt, bevor sie im anschließenden Teil zur Aussendung von »XFEL-Röntgenlaserblitzen gebracht werden.

XFEL-Beschleunigerelement

In den »XFEL-Beschleunigerelementen werden die »Elektronen beschleunigt. Es handelt sich dabei um metallische Hohlkörper, in denen »elektromagnetische Felder schwingen. Die Beschleunigerelemente des »XFEL bestehen aus »Niob und arbeiten supraleitend (»). Zusammen mit der Kühlung und den Versorgungsleitungen bilden die Elemente die »XFEL-Beschleunigermodule.

XFEL-Beschleunigermodul

Die »XFEL-Beschleunigerelemente samt Kühlung und Versorgung sind zu XFEL-Beschleunigermodulen zusammengefasst. In ihnen werden die »Elektronen vor der Erzeugung der »Röntgenlaserblitze beschleunigt.

XFEL-Beschleunigertunnel

Im »XFEL-Beschleunigertunnel werden »Elektronen zunächst auf hohe »Energien gebracht, bevor sie anschließend in »anderen Tunneln zur Lichtaussendung veranlasst werden.

XFEL-Betriebsgelände

Oberirdisch ist der »XFEL an drei Orten angesiedelt, den Betriebsgeländen »DESY-Bahrenfeld, »Osdorfer Born und »Schenefeld .

XFEL-Betriebsgelände „DESY-Bahrenfeld“

Das »XFEL-Betriebsgelände „DESY-Bahrenfeld“ bildet den Startpunkt der »XFEL-Anlage. Von hier aus wird sie mit »Elektronen, »Energie und Kälte versorgt. Dieser erste Teil befindet sich überwiegend auf dem »DESY-Gelände in Bahrenfeld.

XFEL-Betriebsgelände „Osdorfer Born“

Unter dem »XFEL-Betriebsgelände „Osdorfer Born“ endet der Beschleunigerteil des »XFEL. Hier werden die »Elektronen auf die »XFEL-Lichterzeugungstunnel verteilt. Auf dem Gelände befinden sich Verzweigungsbauwerke für den Tunnelzugang.

XFEL-Betriebsgelände „Schenefeld“

Das »XFEL-Betriebsgelände Schenefeld beherbergt das zentrale Forschungsgelände. Hier werden die »Elektronen zur Aussendung der »XFEL-Röntgenlaserblitze gebracht. Das Licht wird in »Experimentierhallen zu Forschungszwecken genutzt. Auf dem Forschungsgelände werden rund 350 Menschen ihrer Arbeit nachgehen.

XFEL-Blendensystem (Kollimator)

Das 330 Meter lange »XFEL-Blendensystem schließt sich an den »XFEL-Hauptbeschleuniger an. Hier werden alle »Elektronen herausgefiltert, die für die spätere Lichterzeugung unbrauchbar sind.

XFEL-Diagnosesektion

Die XFEL-Diagnosesektion ist ein Bestandteil des XFEL-Beschleunigers, in dem die Eigenschaften der »Elektronen-»Teilchenpakete vermessen werden, um diese in späteren Phasen optimieren zu können.

XFEL-Eingangsbauwerk

Das Eingangsbauwerk ist der Teil der »XFEL-Anlage. Hier werden die Versorgungsleitungen für »Energie und Kälte herabgeführt.

XFEL-Elektronenauffänger

In den Elektronenauffängern werden alle »Elektronen, die nicht weiter benötigt werden, sicher entsorgt. Dies geschieht nach der Lichterzeugung und in bestimmten Fällen auch unmittelbar nach der Beschleunigung. Die »Energie der »Elektronen wird dabei fast vollständig in Wärme umgewandelt.

XFEL-Elektronenpaket-Kompressor

Der Elektronenpaket-Kompressor ist ein Bestandteil des »XFEL-Beschleunigers, in dem die »Elektronen-»Teilchenpakete verkürzt werden. Dadurch lassen sich die Eigenschaften der später erzeugten »XFEL-Röntgenlaserblitze optimieren.

XFEL-Elektronenquelle

In den beiden »XFEL-Elektronenquellen werden »Elektronen mit Hilfe eines konventionellen »Laserstrahls aus einer Metallplatte gelöst und in den »XFEL-Beschleuniger weitergeleitet. Beim »XFEL kommen zwei Elektronenquellen zum Einsatz, die beide einzeln genutzt werden können.

XFEL-Experimentierhallen

Die beiden Experimentierhallen bilden den Abschluss der »XFEL-Anlage. In ihnen wird mit den »XFEL-Röntgenlaserblitzen geforscht. Es sind zwei solche Hallen geplant, von denen die zweite allerdings erst später gebaut wird.

XFEL-Hauptbeschleuniger

Der XFEL-Hauptbeschleuniger ist ein Bestandteil der XFEL-Anlage. In ihm werden die »Elektronen von rund 500 Millionen auf 20 Milliarden »Elektronenvolt beschleunigt. Der Hauptbeschleuniger besteht aus 116 einzelnen »XFEL-Beschleunigermodulen.

XFEL-Injektorbereich

Im XFEL-Injektorbereich werden die »Elektronen bereitgestellt, die in den »XFEL-Tunneln beschleunigt und zur Lichtaussendung gebracht werden. Dies geschieht mit Hilfe der beiden »XFEL-Elektronenquellen.

XFEL-Klystron

Die XFEL-Klystrons erzeugen die »Mikrowellenstrahlung, mit denen die »Elektronen auf hohe »Energien beschleunigt werden. Jedes Klystron versorgt dabei vier der 116 »XFEL-Beschleunigungsmodule.

XFEL-Kältehalle

In der XFEL-Kältehalle wird Helium auf minus 271 Grad »Celsius gebracht, wobei es flüssig wird. Mit dem flüssigen Helium werden die »XFEL-Beschleunigerelemente gekühlt. Diese verlieren bei dieser »Temperatur ihren elektrischen Widerstand: Es kommt zur »Supraleitung.

XFEL-Lichterzeugungstunnel

In den XFEL-Lichterzeugungstunneln befinden sich Magnetanordnungen (so genannte »*Undulatoren*«), welche die »*Elektronen*« auf Slalomkurse und dadurch zur Aussendung der »*XFEL-Röntgenlaserblitze*« bringen.

XFEL-Modulatorhalle

In der »*XFEL-Modulatorhalle*« wird normale Wechselspannung aus dem Stromnetz in Pulse umgewandelt, die zur Beschleunigung der »*Elektronen*« im XFEL benötigt werden.

XFEL-Photonentunnel

In den »*Photonentunneln*« werden die »*XFEL-Röntgenlaserblitze*« zu den »*XFEL-Experimentierhallen*« geleitet. Über verschiedene Komponenten kann dabei auf die »*Intensität*« und beschränkt auch auf die »*Wellenlänge*« der »*elektromagnetischen Strahlung*« Einfluss genommen werden.

XFEL-Planfeststellungsverfahren

Ein Planfeststellungsverfahren fasst die vielen einzelnen öffentlich-rechtlichen Verfahren zusammen, die bei der Genehmigung von großen Bauprojekten wie Autobahnen, Schienenwegen und Flughäfen durchgeführt werden müssen. Es muss durch spezielle Rechtsvorschriften angeordnet werden. Auch für den XFEL gibt es ein Planfeststellungsverfahren, das durch den »*XFEL-Staatsvertrag*« festgelegt wurde. Es wurde am 27. April 2005 eingeleitet.

XFEL-Röntgenlaserblitz

Die »*XFEL-Anlage*« erzeugt Röntgenlaserblitze mit ganz besonderen Eigenschaften. Die Blitze haben so kurze »*Wellenlängen*«, dass selbst »*atomare*« Strukturen erkennbar werden. Die Blitze sind weniger als 100 milliardstel Sekunden lang und ermöglichen damit das Filmen chemischer Reaktionen. Zudem sind die Blitze »*laserlichtartig (kohärent)*«, wodurch sich dreidimensionale Aufnahmen aus der Nanowelt machen lassen.

XFEL-Sicherheit

Der »*XFEL*« kann ohne Risiken unter und in besiedeltem Gebiet betrieben werden. Von ihm geht keine Gefährdung für die Umwelt aus, auch nicht bei einer eventuellen Betriebsstörung.

XFEL-Staatsvertrag

Im »*XFEL-Staatsvertrag*« zwischen dem Land Schleswig-Holstein und der Freien und Hansestadt Hamburg wurden die planerischen Voraussetzungen für den Bau und Betrieb der »*XFEL-Anlage*« geschaffen. Geregelt wird unter anderem ein gemeinsames »*XFEL-Planfeststellungsverfahren*«. Der Staatsvertrag wurde am 28.9.2004 unterschrieben und ist seit dem 1.1.2005 rechtskräftig.

XFEL-Standort

Mit dem »*XFEL*« entsteht eine 3,4 Kilometer lange Forschungsanlage an der Grenze zwischen Hamburg und Schleswig-Holstein. Der Großteil der »*XFEL-Anlage*« befindet sich in den »*XFEL-Tunneln*« unter der Erde, zu denen Zugang über drei »*XFEL-Betriebsgelände*« besteht. Die Anlage beginnt auf dem »*XFEL-Betriebsgelände*« „Hamburg-Bahrenfeld“, verläuft dann unterirdisch in nordwestlicher Richtung, verzweigt sich auf dem »*XFEL-Betriebsgelände*« „Osdorfer Born“ und endet auf dem »*XFEL-Betriebsgelände*« „Schenefeld“.

XFEL-Tunnel

Der Großteil der »XFEL-Anlage« befindet sich in Tunneln unter der Erde. Die Tunnel liegen in ca. 6 bis 38 Metern Tiefe und haben Innendurchmesser von etwa 4,50 und 5,20 Metern. Zu den Tunneln zählen der »XFEL-Beschleunigertunnel«, die »XFEL-Lichterzeugungstunnel« und die »XFEL-Photonentunnel«.

XFEL-Undulator

In den »XFEL-Undulatoren« werden »Elektronen« auf einen Slalomkurs und damit zur Aussendung der »XFEL-Röntgenlaserblitze« gebracht. Die XFEL-Undulatoren sind bis zu 150 Meter lang.

XFEL-Vorbeschleuniger (Booster)

Der rund 50 Meter lange »XFEL-Vorbeschleuniger (Boosterbeschleuniger)« schließt sich direkt an die »XFEL-Elektronenquellen« an und beschleunigt die »Elektronen« auf etwa 500 Millionen »Elektronenvolt«. Danach werden die »Teilchenpakete« verkürzt und in den »XFEL-Hauptbeschleuniger« geleitet.

XFEL-Wasserkühler

Über die XFEL-Wasserkühler wird Wasser auf niedriger Temperatur gehalten, um damit zahlreiche Bestandteile der »XFEL-Anlage« zu kühlen. Auf den »XFEL-Betriebsgeländen« gibt es solche Kühler an verschiedenen Stellen.

Zehnerpotenzen

Zehnerpotenzen werden von Wissenschaftlern genutzt, um bequemer mit sehr großen und sehr kleinen Zahlen umgehen zu können. 10^n entspricht dabei einer 1 mit n Nullen. 10^{-n} entspricht dabei einer 0 gefolgt von einem Komma, (n-1) Nullen und dann einer 1. 10^4 ist also 10 000 und 10^{-4} entspricht 0,0004.