

Die ELBE-Quelle in Rossendorf?

Ein Elektronenbeschleuniger zur Erzeugung elektromagnetischer Strahlung

Ulf Lehnert, Peter Michel, Jochen Teichert
Zentralabteilung Strahlungsquelle ELBE

Schon die alten Bauern wussten es. Denn schließlich waren sie es, die die Weisheit aufgestellt haben, dass nachts alle Katzen grau sind. Eine optimale Abbildung unserer Umgebung ist nur dann möglich, wenn genügend Licht vorhanden ist – elektromagnetische Strahlung eines ganz bestimmten Spektralbereichs. Nur so kann unser Auge seiner Arbeit nachgehen.

Die Untersuchung unbekannter Materie mit Hilfe elektromagnetischer Strahlung ist somit eine uralte Methode des Menschen. Wir beleuchten ein Objekt mit einem Lichtstrahl, um dessen Eigenschaften wie etwa die Farbe oder auch seine Form zu erkunden. Je nach seiner Beschaffenheit durchstrahlt das Licht das Objekt, wird gebeugt oder auch reflek-

tiert. Den reflektierten Teil des Lichtes fängt das Auge wieder auf. Somit erhält der Mensch ein Abbild des Objektes. Was uns mit dem Auge allerdings selten gelingt, ist, Informationen über den inneren Zustand von Objekten zu erhalten. Daher ist der Aufwand, den Forscher betreiben müssen, um Objekte zu untersuchen, um ein Vielfaches größer. Ihnen reicht es nicht aus, deren oberflächliche Beschaffenheit zu sehen, sie möchten etwas über ihren Aufbau erfahren. Denn nur wer die Beschaffenheit eines Materials, die Funktion biologischer Strukturen oder die Kräfte in Atomkernen genau kennt, kann Materialien gezielt verändern, medizinische Fortschritte erzielen oder die Frage klären, was die Welt im Innersten zusammenhält.



Forschungsobjekte können hinsichtlich ihrer Größe oder ihrer Struktur sehr unterschiedlich sein, und zudem kommt es darauf an, ganz bestimmte Eigenschaften gezielt und selektiv zu untersuchen. Hier stellt sich also die Frage, welches die für die jeweiligen Forschungsaufgaben am besten geeigneten Lichtquellen sind und welche Eigenschaften diese besitzen müssen.

Forschung mit Licht

Das uns umgebende Licht ist eine Mischung aus elektromagnetischen Wellen, und man kann es durch eine Reihe von Parametern wie die Wellenlänge, die Intensität, die Polarisation oder die Bündelung beschreiben. Betrachtet man nur die Wellenlängen des gesamten Spektralbereichs, so eröffnet sich dem Forscher ein enorm breites Feld physikalischer Phänomene, die sie damit untersuchen können. Das Spektrum reicht auf der langwelligen Seite von den uns allen bekannten Radiowellen bis zu den kurzwelligen und damit besonders hochenergetischen Gammastrahlen. Dazwischen liegen mehr als fünfzehn Größenordnungen und eine Vielzahl von Erscheinungen der uns umgebenden natürlichen und künstlichen Welt.

Um herauszufinden, welche Wellenlänge für die jeweilige Fragestellung die richtige ist, gibt es einen Schlüssel: Damit eine elektromagnetische Welle Informationen vom Forschungsobjekt entnehmen und forttragen kann, muss sie mit diesem in Wechselwirkung treten können.

Elektromagnetische Wellen können Atome oder Moleküle zu Schwingungen anregen. Die Art und Weise dieser Schwingungsanregungen, aber auch die Prozesse, wie die Atome und Moleküle wieder in den Ruhezustand zurückkehren, verraten uns vieles über die innere Struktur der Materie. Der Forscher hat also nichts anderes zu tun, als durch die Bestrahlung des Objektes mit elektromagnetischen Wellen bestimmter Parameter nach diesen Schwingungsanregungen zu suchen. Interessanterweise sind diese meist bei Wellenlängen zu finden, die mit der Dimension der zu erforschenden Struktur vergleichbar sind.

ELBE als Lichtquelle

Der Elektronenbeschleuniger ELBE (**E**lektronenbeschleuniger mit hoher **B**rillanz und geringer **E**mittanz) soll elektromagnetische Strahlung für Strukturuntersuchungen liefern. Um ein möglichst breites Forschungsspektrum abzudecken, erzeugt die Strahlungsquelle ELBE [1] intensive Strahlung ganz unterschiedlicher Wellenlängen dies- und jenseits des sichtbaren Lichtes.

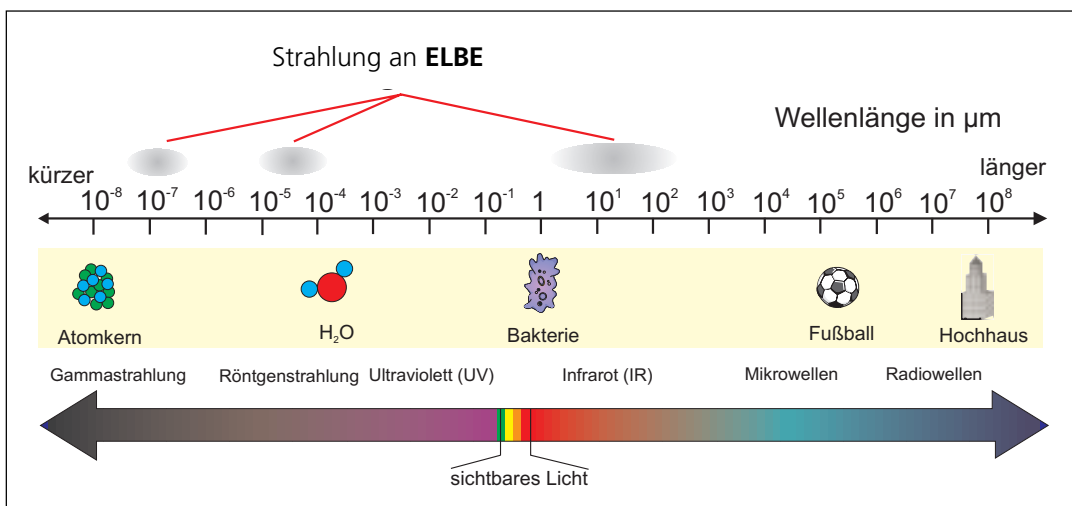
Für die Erforschung von Atomkernen – Atomkerne haben eine Ausdehnung von wenigen Femtometern (millionster Teil eines millionstel Millimeters) – produziert ELBE so genannte Bremsstrahlung. Diese sehr kurzwellige und energiereiche Strahlung regt Atomkerne zum Beispiel zu Deformationsschwingungen und Ro-

tationen an. Deren Untersuchung nennt man Kernspektroskopie. Sie erlaubt es, die inneren Kräfte und den Aufbau der Atomkerne zu bestimmen.

Die Welt der Atome – ihr Radius beträgt etwa 0,1 Nanometer (zehn millionstel Millimeter) – und damit die der atomaren Prozesse, erschließt sich mit Hilfe von Röntgenstrahlung. Dafür liefert ELBE einen gebündelten, intensiven und monochromatischen Röntgenstrahl zwischen einem zehntel und einem hundertstel Nanometer Wellenlänge. Röntgenstrahlung solcher Qualität kann mit herkömmlichen Röntgenapparaturen nicht erzeugt werden. Hier sind neuartige Forschungen auf biologischem und medizinischem Gebiet das Ziel.

Ein breiter Bereich von infrarotem Laserlicht mit Wellenlängen zwischen 3 und 150 Mikrometern (tausendstel Millimeter) liefern die an ELBE installierten Freielektronen-Laser (FEL). Diese Strahlung dient zur Untersuchung von Molekülen (Chemie, Biologie), aber auch von Materialien und Prozessen in der Festkörper-, insbesondere der Halbleiterphysik.

Durch kernphysikalische Prozesse beim Auftreffen von hochenergetischen Elektronen auf Atomkerne entstehen aber auch Teilchen wie Neutronen oder Positronen. Diese so genannten Sekundärteilchenstrahlen werden an ELBE ebenfalls erzeugt und stehen einem breiten Spektrum von Experimenten in der Grundlagen-, aber auch der Materialforschung zur Verfügung.



Das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung und die Wellenlängenbereiche der Strahlungsquelle ELBE.



Der supraleitende Generator

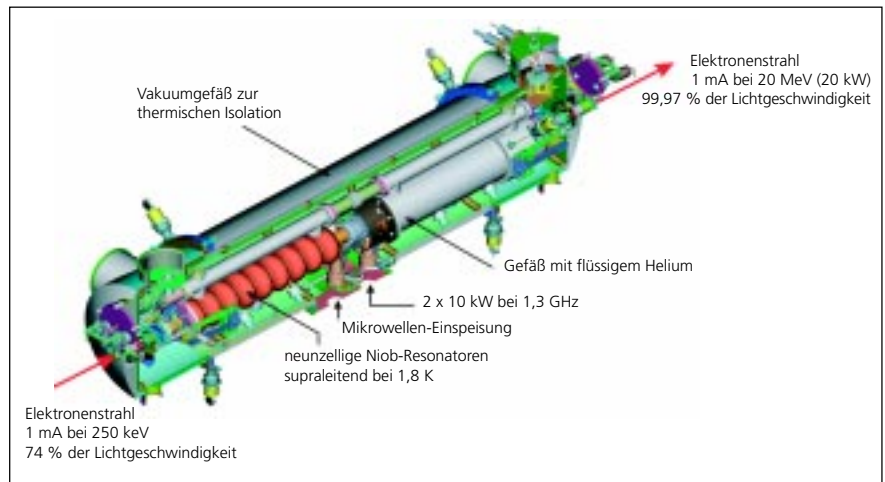
ELBE beschleunigt Elektronen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit. Die Energie der hochbeschleunigten Elektronen wird in Strahlung konvertiert. Je nach der zu erzeugenden Wellenlänge verwenden wir unterschiedliche Konversionsprozesse. Dabei ist zu beachten, dass sich eine Reihe von Eigenschaften des Elektronenstrahls, wie zum Beispiel die Intensität, die Divergenz oder auch die Zeitstruktur, direkt vom Elektronenstrahl auf den elektromagnetischen Sekundärstrahl übertragen.

Die in ELBE beschleunigten Elektronen werden zunächst in einer thermischen Kathode erzeugt und in einem elektrostatischen Feld mit 250 000 Volt vorbebeschleunigt. Ein elektronisch gepulstes Gitter am Anfang der Beschleunigungsstrecke entlässt im 13-Megahertz-Takt Elektronenpakete, die jeweils etwa eine Nanosekunde (milliardstel Sekunde) lang sind.

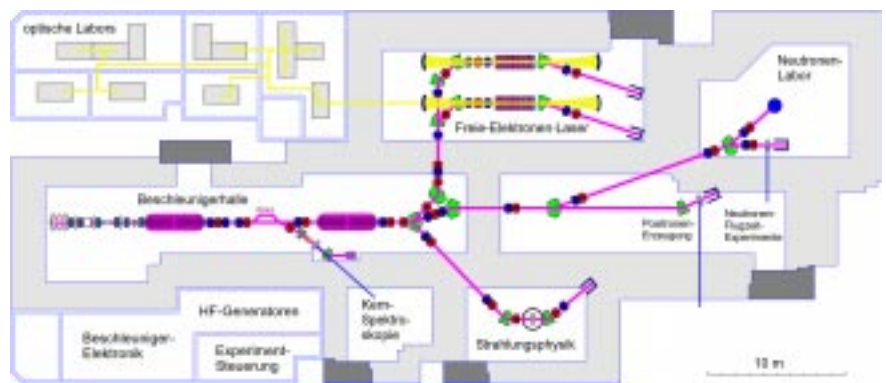
Mit Hilfe so genannter Buncher werden diese Pakete dann komprimiert. Das geschieht, indem die Elektronen im vorderen Teil des Paketes etwas abgebremst und die im hinteren Teil beschleunigt werden. Nach einer bestimmten Flugstrecke befinden sich alle Elektronen nahezu gleichauf, und die Pulslängen betragen nur noch wenige Picosekunden (tausendster Teil einer milliardstel Sekunde).

Jetzt befinden sich die Pakete bereits am Eingang des zweistufigen Hochfrequenzbeschleunigers [2]. Die erste Stufe beschleunigt die Elektronen auf zwanzig, die zweite Stufe auf vierzig Mega-Elektronenvolt (MeV).

Das beschleunigende Feld wird in so genannten Resonatoren als stehende elektromagnetische Welle erzeugt, die die Elektronen mit einer elektrischen Feldstärke von mehr als zehn Megavolt pro Meter beschleunigt. Die Resonatoren bestehen aus Niob und werden durch Kühlung mit flüssigem Helium bei etwa zwei Kelvin supraleitend gehalten. (Ihre Güte ist mit größer als 10^{10} enorm hoch.) Ohne Widerstandsverluste in den Resonatoren kann die eingekoppelte Hochfrequenzleistung nahezu verlustfrei auf den Elektronenstrahl übertragen werden. Nur mit Hilfe dieser supraleitenden Technologie ist es heutzutage möglich, derarti-



Die Beschleunigerstufen von ELBE enthalten jeweils zwei neunzellige Niob-Resonatoren, die durch Kühlung mit flüssigem Helium im supraleitenden Zustand gehalten werden.



Vom Ausgang des Beschleunigers wird der Elektronenstrahl mit einem System von Ablenkmagneten und magnetischen Linsen zu den jeweiligen Strahlungserzeugern transportiert.

ge Teilchenbeschleuniger kontinuierlich (cw-Mode) zu betreiben. Anderenfalls müsste der Strahl zur Abkühlung regelmäßig unterbrochen werden.

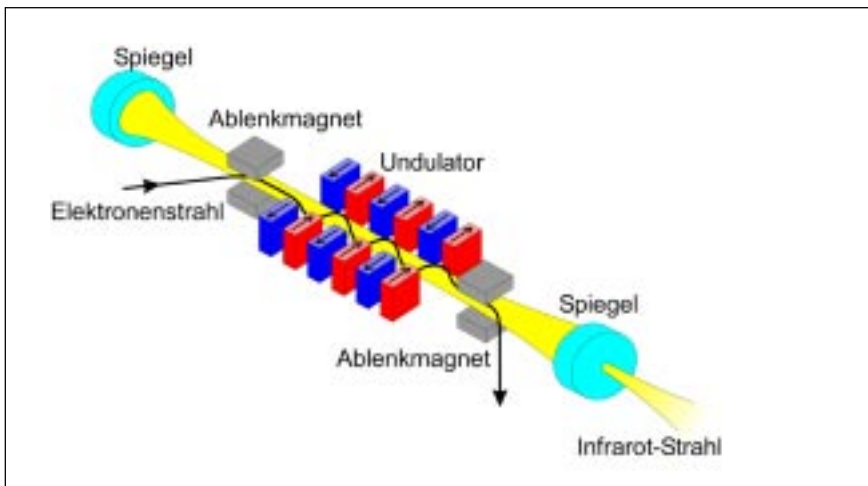
Elektronen erzeugen Licht

Immer, wenn geladene Teilchen beschleunigt, zum Beispiel aus einer geraden Bahn abgelenkt werden, emittieren sie elektromagnetische Wellen. Diesen Effekt nutzen wir bei ELBE auf verschiedene Weise, um die Strahlung für unsere Experimente zu erzeugen. Das wohl offensichtlichste Beispiel sind die Freie-Elektronen-Laser (FEL) [2], die hochintensive Infrarot-Strahlung produzieren. Bei diesem Laser leiten wir den Elektronenstrahl in so genannte Undulatoren. Sie bestehen aus einer Reihe von Magneten, die beidseitig des Strahlrohres angebracht sind. Dabei sind

benachbarte Magnete immer entgegengesetzt gepolt, das heißt, Nord- und Südpol wechseln sich ab – es entsteht ein wechselseitig gepoltes Magnetfeld.

Geladene Teilchen werden von einem Magnetfeld abgelenkt. Gelangen die Elektronen in den Undulator, beschreiben sie eine wellenförmige Bahn. Dadurch emittieren sie Strahlung, die aufgrund der Größe der Wellenbewegung und der Elektronenenergie im Infrarotbereich liegt. Da sich der Abstand der Magnete und damit die Stärke des Magnetfeldes variieren lässt, kann man die Wellenlänge des Infrarotlichtes einstellen.

Die entstehende Infrarot-Strahlung trifft auf einen Spiegel und läuft auf dem Strahlweg durch den Undulator zurück. Nun trifft sie auf einen zweiten Spiegel, wird dort ebenfalls reflektiert und gelangt – genau gleichzeitig mit dem nächsten Elektronenpuls – wieder in den Undulator.



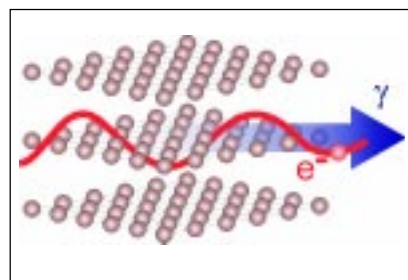
Bei einem Freie-Elektronen-Laser zwingt ein Undulator die Elektronen auf eine wellenförmige Bahn. Dabei wird die Energie des Elektronenstrahls auf den optischen Strahl übertragen.

Zu einem Laser wird die ganze Anordnung dadurch, dass der Infrarotstrahl seinerseits auf den Elektronenstrahl zurückwirkt und ihn zu Pulsen moduliert, die kürzer sind als die Wellenlänge der Infrarotstrahlung. Dies geschieht, indem sich die Elektronen unter dem Einfluss des elektrischen Feldes des Lichtstrahls und des magnetischen Feldes des Undulators in der Periode der Lichtwellenlänge gruppieren. Die nun von diesen Mikropulsen im Undulator-Feld erzeugte Strahlung schwingt gleichphasig zum umlaufenden Licht und verstärkt dieses. Damit entsteht eine scharf gebündelte, schmalbandige und gleichphasig schwingende Lichtwelle.

Ein kleiner Teil der zwischen den Spiegeln umlaufenden und immer wieder verstärkten Strahlung wird durch ein Loch in einem der Spiegel ausgekoppelt und zu den Experimenten geführt.

Auf einer viel kleineren Größenskala nutzen wir denselben Effekt, um intensive, quasi-monochromatische Röntgenstrahlung zu erzeugen. Dazu wird der Elektronenstrahl so fokussiert, dass er unter

einem sehr kleinen Winkel genau entlang der Kristallachse durch einen dünnen Diamantkristall hindurch geschossen werden kann. Die Elektronen werden von den Kristallebenen reflektiert und können so zwischen zwei Ebenen eingefangen werden (Elektronen-Channeling) [3]. Da sie nun ebenfalls eine wellenförmige Bahn durch den Kristall beschreiben, emittieren sie wieder elektromagnetische Strahlung. Die Periode der Bewegung ist durch den Abstand der die Elektronen ablenkenden Kristallebenen bestimmt, sie ist deshalb



Die Oszillationsbewegung der Elektronen um die Gitterebenen eines Kristalls führen zur Emission eines gebündelten Röntgenstrahls.

wesentlich kleiner als beim FEL. Daher ist auch die resultierende Wellenlänge erheblich kürzer, sie liegt im Röntgenbereich. Aufgrund der extrem geringen Abstände zwischen den Kristallebenen ist der ganze Prozess durch quantenmechanische Effekte dominiert. Sie lassen nur ganz bestimmte Elektronenbahnen (in der Quantenmechanik als gebundene Zustände beschrieben) zu. Die Elektronen können von einem dieser Zustände in einen anderen wechseln, indem sie Röntgenlicht mit einer für den betreffenden Übergang spezifischen Wellenlänge emittieren. Über die Energie der Elektronen lassen sich diese Wellenlängen innerhalb eines bestimmten Bereiches kontinuierlich einstellen.

Indem wir den Elektronenstrahl in einem Festkörper stoppen, wird ein Teil seiner Energie bei den auftretenden Streu- und Abbremsvorgängen ebenfalls in Form elektromagnetischer Strahlung emittiert. Diese verteilt sich über ein breites Spektrum, wobei die höchsten auftretenden Photonenenergien der Energie der Elektronen selbst entsprechen. Bei ELBE reichen diese Energien bis in den Bereich der Gammastrahlung.

Werkzeug für die Forschung

ELBE im Forschungszentrum Rossendorf ist eine hochmoderne und leistungsfähige Quelle für elektromagnetische Strahlung unterschiedlicher Wellenlängenbereiche und Sekundärteilchen. Sie bildet als zentrales FZR-Forschungsinstrument eine Klammer zwischen den verschiedenen Forschungsrichtungen und Traditionen am Standort und wird auch durch Synergieeffekte zur weiteren Erhöhung des wissenschaftlichen Niveaus der Forschungsarbeiten im FZR beitragen.

Die Konzeption und der Aufbau der Strahlungsquelle ELBE wurden sehr erfolgreich von einer Projektgruppe unter der Leitung von Herrn Dr. Frank Gabriel durchgeführt. Die Autoren danken an dieser Stelle allen Beteiligten für die konstruktive und fruchtbare Zusammenarbeit.

Literatur

- [1] F. Gabriel et al., Nucl. Instr. And Meth. B 161-163 (2000) 1143.
- [2] K. Wille, Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, B.G. Teubner Stuttgart.
- [3] Allan H. Sorensen, Eric Uggerhoj, Der Channeling-Effekt in Kristallen, Spektrum der Wissenschaft, August 1989.