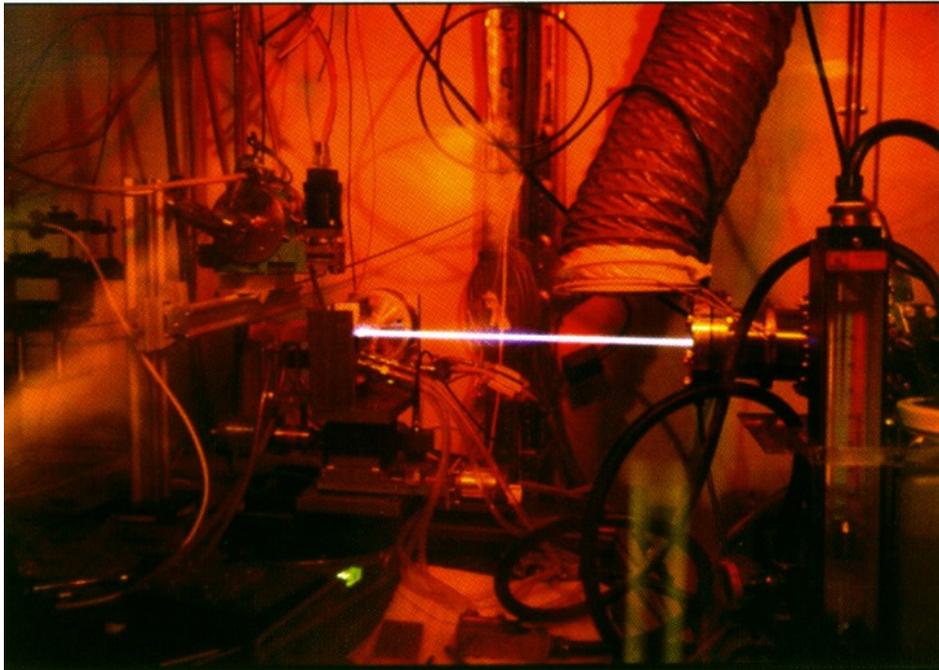


SYNCHROTRONSTRAHLUNG

Von ihrer Erzeugung in Beschleunigeranlagen
bis hin zur praktischen Anwendung



FACHBEREICH SARBEIT aus PHYSIK

Verfasst von: Gritschacher Simon

Klasse: 8.B

Schuljahr: 2005 / 06

Betreuer: Prof. Mag. Josef Gröchenig

Eingereicht am: 24.02.2006

Bundesgymnasium Porcia Spittal a.d. Drau

VORWORT

Synchrotronstrahlung entsteht als „Nebenprodukt“ durch die Beschleunigung hochenergetischer Teilchen in entsprechenden Beschleunigungsanlagen. Zuerst als „lästiger Nebeneffekt“ abgetan, hat sich die Synchrotronstrahlung in den letzten Jahrzehnten als ein wesentliches, nunmehr unverzichtbares Forschungsinstrument bewiesen. So erfuhren Teilchenbeschleuniger als Strahlungsquellen ab den Fünfzigern eine äußerst rasante Entwicklung und sind mittlerweile unabdingbare Instrumente zur Forschung nicht nur in der Physik, sondern auch in der Chemie, der Halbleiter- und Nanotechnologie, den Material- und Umweltwissenschaften sowie der Medizin geworden.

Einige der stärksten Quellen für Synchrotronstrahlung befinden sich in Hamburg am **Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY**, das u.a. im Rahmen des Hamburg-Projekts der achten Klassen des Bundesgymnasiums Porcia alljährlich besucht wird. Dieses Erlebnis war auch für die Themenwahl meiner Fachbereichsarbeit entscheidend. So hatte ich schon vorher, aufgrund meines Interesses, die Auswahl auf den Themenbereich der Beschleunigungsphysik beschränkt. Da sich dieses Gebiet jedoch als viel zu umfangreich erwies, wählte ich letztlich den Fachbereich „Synchrotronstrahlung“.

Die vorliegende Arbeit ist in mehrere Hauptteile gegliedert, wobei der erste Teil die physikalischen Grundlagen zum Verständnis der Arbeit in möglichst kurzer Form erläutert. Weitere verwendete Fachbegriffe, die kursiv gedruckt sind, finden sich mit kurzer Erklärung im Glossar am Ende der Arbeit. Der zweite Teil beschäftigt sich mit der Charakteristik der Strahlung. Nach dem dritten Teil, der einige Grundlagen der Beschleunigungsphysik sowie die Erzeugung der Synchrotronstrahlung erklärt, folgen die Anwendungen und Anwendungsverfahren als vierter und letzter Hauptteil. Da das gewählte Thema dennoch relativ umfangreich ist, mussten bei der Erstellung der Arbeit einige Einschränkungen gemacht werden. So wird ein Teil der Anwendungen der Synchrotronstrahlung nur im Überblick besprochen, während der eigentliche Stellenwert dieser Strahlungsform anhand eines medizinischen Beispiels, der „Intravenösen Koronarangiographie“, gezeigt wird.

Gritschacher Simon, im Februar 2006

INHALTSVERZEICHNIS

1. VORAUSSETZUNGEN	5
1.1 ELEKTROMAGNETISCHE WELLEN.....	5
1.2 BEUGUNG, KOHÄRENZ UND INTERFERENZ	6
1.3 LORENTZ-KRAFT.....	7
1.4 ENERGIEEINHEITEN	8
2. SYNCHROTRONSTRAHLUNG	9
2.1 ENTSTEHUNG	9
2.2 WINKELVERTEILUNG.....	11
2.3 SPEKTRUM	13
2.4 KRITISCHE WELLENLÄNGE	15
2.5 PHOTONENFLUSS UND BRILLANZ	16
2.6 POLARISATION.....	18
2.7 STRAHLUNGSENERGIE.....	18
3. STRAHLUNGSQUELLEN	21
3.1 HISTORISCHE ENTWICKLUNG.....	21
3.2 AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE	23
3.2.1 TEILCHENQUELLEN	24
3.2.2 MAGNETSYSTEM.....	25
3.2.3 BESCHLEUNIGUNGSSYSTEM.....	29
3.2.4 STRAHLROHRE.....	31
3.2.5 HASYLAB / DORIS III.....	34
4. ANWENDUNGEN UND ANWENDUNGSVERFAHREN	37
4.1 RÖNTGENBEUGUNG UND KLEINWINKELSTREUUNG.....	37
4.2 ABBILDENDE DIFFRAKTOMETRIE	39
4.3 RÖNTGENFLUORESZENZANALYSE.....	40
4.4 EXAFS (EXTENDED X-RAY ABSORPTION FINE STRUCTURE)	41
4.5 ANWENDUNG IN DER GEOPHYSIK.....	42
4.6 RÖNTGENLITHOGRAFIE	43

4.7 MIKROTOMOGRAPHIE.....	43
4.8 INTRAVENÖSE KORONARANGIOGRAPHIE	44
4.9 WEITERE ANWENDUNGSVERFAHREN.....	48
4.10 FEL (DER FREIE-ELEKTRONEN-LASER).....	48
5. AUSBLICK	50
5.1 XFEL (X-RAY FREE-ELECTRON-LASER)	50
5.2 MEINUNG EINES FORSCHERS.....	50
6. GLOSSAR.....	56
NACHWORT.....	57
LITERATURVERZEICHNIS	58
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	60
PROTOKOLL	62

1. VORAUSSETZUNGEN

1.1 ELEKTROMAGNETISCHE WELLEN

Breitet sich eine Schwingung im Raum aus, so spricht man von einer Welle. Sie wird durch die zeitlich und räumlich periodische Änderung einer physikalischen Größe beschrieben. Erfolgt die Schwingung in Ausbreitungsrichtung der Welle, so spricht man von longitudinalen, bei einer Schwingungsrichtung normal zur Ausbreitungsrichtung von transversalen Wellen.

Die aufeinander folgenden, gleichen Raumzustände einer Welle bezeichnet man als Phasen. Betrachtet man zu einem bestimmten Zeitpunkt ihre räumliche Verteilung, so wird der zwischen ihnen bestehende Abstand als Wellenlänge λ bezeichnet. Die Zeitdifferenz zwischen zwei aufeinander folgenden Raumzuständen ist die Schwingungsdauer T . Der Kehrwert der Schwingungsdauer ist die Frequenz f , welche in Hertz [Hz], d.h. Schwingungen pro Sekunde, angegeben wird. Die maximale Auslenkung einer Schwingung ist ihre Amplitude.¹

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist über die folgende Beziehung mit der Wellenlänge und der Frequenz verknüpft:

Ausbreitungsgeschwindigkeit = Wellenlänge * Frequenz

$$c = \lambda \cdot f$$

Elektromagnetische Wellen sind Transversalwellen. In ihrem Falle ist die sich ändernde physikalische Größe die elektrische und magnetische Feldstärke an einem bestimmten Punkt des Raumes. Dabei schwingt das magnetische Feld immer normal zum elektrischen Feld. Elektromagnetische Wellen entstehen immer dann, wenn Ladungsträger beschleunigt werden, wie das z.B. bei Sendeantennen der Fall ist, wenn Elektronen in der Antenne zu Schwingungen angeregt werden, aber auch auf Kreisbahnen in einem Teilchenbeschleuniger – im letzteren Fall spricht man von Synchrotronstrahlung. Anders als Wasser- oder Schallwellen benötigen

¹ Vgl. GÖBEL, Rudolf (Hg.): Wissensspeicher Physik, Berlin 1996, 1. Aufl., S. 118 f.

elektromagnetische Wellen kein Medium zur Ausbreitung, weshalb sie sich auch im Vakuum mit der Lichtgeschwindigkeit $c = 299792458 \text{ m/s}$ ausbreiten.

Das elektromagnetische *Spektrum* umfasst alle Wellenlängen, von den Radiowellen ($\lambda > 10^3 \text{ m}$) im langwelligen bis hin zur Gammastrahlung ($\lambda < 10^{-12} \text{ m}$) im kurzwelligen Bereich.² Quellen für Synchrotronstrahlung liefern ein kontinuierliches Spektrum³, d.h. es gibt keine bestimmte Wellenlänge, die nicht emittiert wird und es umfasst dabei den Bereich vom tiefen Infrarot ($\lambda \approx 10^{-3} \text{ m}$), über das sichtbare Licht ($\lambda \approx 3,8 \cdot 10^{-7} - 7,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$) bis hin zur „weichen“ und schließlich „harten“ Röntgenstrahlung ($\lambda \approx 10^{-10} \text{ m}$).

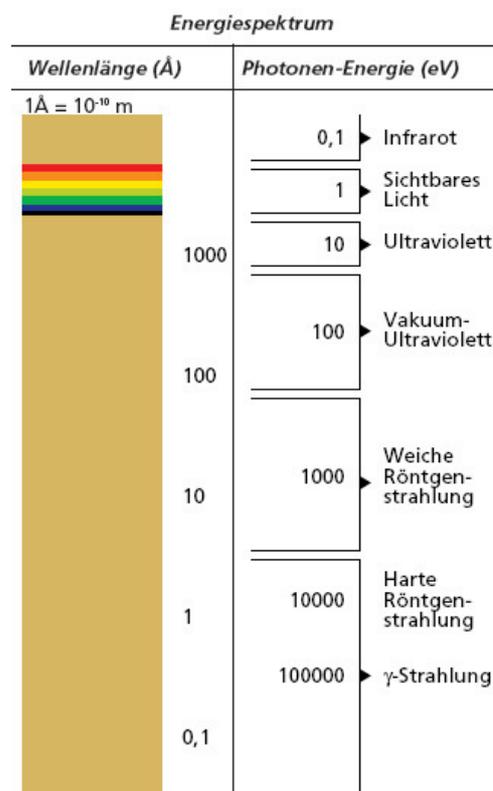


Abb. 1: Energiespektrum der Synchrotronstrahlung

1.2 BEUGUNG, KOHÄRENZ UND INTERFERENZ

Trifft eine Welle auf ein Hindernis (z.B. einen Spalt), das in der Größenordnung ihrer Wellenlänge liegt, so wird sie gebeugt, d.h. in ihrer Richtung abgelenkt. Bei der Beugung an einem Doppel- oder Mehrfachspalt oder an einem ähnlichen Hindernis kann es dahinter zu einer Überlagerung (Interferenz) der Wellen kommen. Angenommen an einem Punkt hinter dem Hindernis trifft ein Wellental auf einen Wellenberg, so löschen sich die beiden Wellen in diesem Punkt aus – man spricht von **destruktiver Interferenz**. Andernfalls kommt es nur zur Abschwächung oder auch zur Verstärkung der Wellen. Im letzteren Fall spricht man von **konstruktiver Interferenz**. Die Voraussetzung für konstruktive bzw. destruktive Interferenz ist jedoch die **Kohärenz** der Wellen. Sind Wellenzüge kohärent, so haben sie eine

² GOBRECHT, Heinrich u.a.: Elektrizität und Magnetismus, Berlin 1987, 7. Aufl., (= Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 2), S. 507 f.

³ Siehe Kapitel 2.3 Spektrum, S. 13.

konstante Phasenbeziehung zueinander, d.h. der zeitliche Abstand der Wellenberge zweier verschiedener Wellen bleibt gleich.

Das Phänomen der Interferenz lässt sich bei allen Wellen beobachten, also auch bei elektromagnetischen Wellen. Kommt es hier zu Interferenz, so lassen sich mit entsprechenden Apparaturen Minima (destruktive Bereiche) und Maxima (konstruktive Bereiche) feststellen. Bei sichtbarem Licht zeigen sich diese als ein Muster aus dunklen und hellen Bereichen. Ein solches Beugungsmuster lässt Rückschlüsse auf die Größe und Beschaffenheit des Hindernisses zu.

1.3 LORENTZ-KRAFT

Bewegen sich Ladungsträger in einem Magnetfeld, so wirkt auf sie eine Kraft, die sog. Lorentz-Kraft. Ihr Betrag errechnet sich nach der Formel:

$$F = B \cdot Q \cdot v \cdot \sin \alpha$$

wobei B die Magnetfeldstärke gemessen in Tesla [T], Q die Ladung der Teilchen gemessen in Coulomb [C], v ihre Geschwindigkeit in [m/s] und α den Winkel zwischen Feldlinien und Geschwindigkeitsvektor der Teilchen gemessen in Grad bezeichnet.

Ist $\alpha = 0^\circ$, ist also die Flugrichtung des Ladungsträgers parallel zu den Feldlinien, so ist $\sin \alpha = 0$ und es tritt keine Kraftwirkung auf. Die Maximalkraft erhält man bei $\alpha = 90^\circ$ ($\sin \alpha = 1$), also wenn sich die Teilchen normal zu den Feldlinien bewegen. Aufgrund dessen sind Magneten in Beschleunigern stets so ausgerichtet, dass sie ein Feld normal zur Teilchenbahn erzeugen. Für diesen Spezialfall kann man die Richtung der Lorentz-Kraft leicht mit der „Rechte-Hand-Regel“⁴ ermitteln. Die Kraft führt schließlich zu einer Beschleunigung, der Zentripetalbeschleunigung des Teilchens, da sie die Richtung seines Geschwindigkeitsvektors verändert.

⁴ Die „Rechte-Hand-Regel“ gilt nur für positive Ladungsträger. Für Elektronen muss die linke Hand in derselben Weise verwendet werden. Vgl. KOCH, Stephan W. (Übersetzungsherausgeber): Physik, Weinheim 2003, 6. Aufl., S. 53.

1.4 ENERGIEEINHEITEN

In der Teilchenphysik wird statt der gebräuchlichen Einheit Joule fast ausschließlich das Elektronenvolt [eV] als Energieeinheit verwendet, da es sich aufgrund seiner Definition in vielen Berechnungen als praktisch erwiesen hat:

„Ein Elektronenvolt (eV) ist definiert als die Arbeit, die erforderlich ist, um eine einzelne Elementarladung e – wie die des Elektrons (...) – durch eine Potentialdifferenz von einem Volt zu bewegen.“⁵

Da die Arbeit das Produkt aus der Potentialdifferenz (elektrische Spannung) U gemessen in Volt [$V = J / C$] und der Ladung q ($= e$) gemessen in Coulomb [C] ist, folgt für das Elektronenvolt gemäß obiger Definition:

$$\left[1eV = e \cdot 1V = 1,60 \cdot 10^{-19} C \cdot \frac{1J}{C} = 1,60 \cdot 10^{-19} J \right]$$

⁵ KOCH, Physik, S. 699.

2. SYNCHROTRONSTRAHLUNG

2.1 ENTSTEHUNG

Der deutsche Physiker und Nobelpreisträger Heinrich Hertz stellte 1888 experimentell fest, dass beschleunigte Ladungsträger jeglicher Art zur Emission von elektromagnetischen Wellen angeregt werden.⁶ Damit lässt sich auch die Entstehung der Synchrotronstrahlung erklären. Wie im nächsten Kapitel ausführlich besprochen, werden Teilchenbeschleuniger dazu benutzt sie zu erzeugen. Die Magnetfelder, sog. Dipolfelder, haben aufgrund der Lorentz-Kraft eine Kreisbewegung des sich durch das Feld bewegenden Elektrons zur Folge. Da eine Kreisbewegung eine stetige Richtungsänderung der Flugbahn des Teilchens bedeutet, wirken eine Zentripetal- sowie Zentrifugalkraft, die sich gegenseitig das Gleichgewicht halten. Auch diese Beschleunigung, die keine Änderung des Betrags der Geschwindigkeit zur Folge hat, führt nach den Gesetzen der klassischen Elektrodynamik zur Abstrahlung von Energie in Form von elektromagnetischen Wellen.

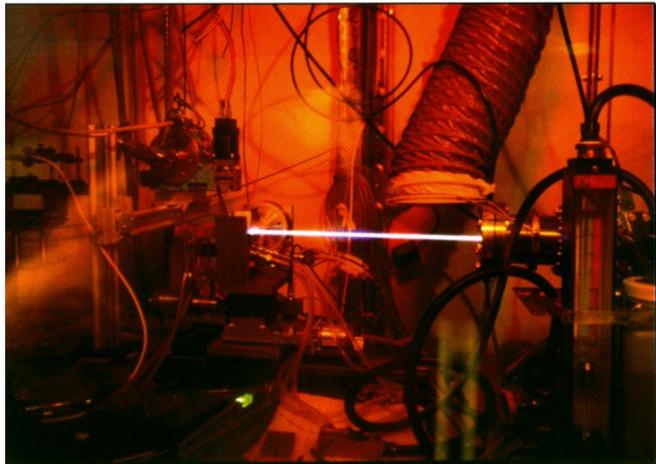


Abb. 2: Der stark gebündelte, sichtbare Teil des Synchrotronlichts

Teilchenbeschleuniger zählen zu den **irdischen Quellen** für Synchrotronstrahlung. Dazu gehört unter anderem auch die sog. Bremsstrahlung, die entsteht, wenn geladene Teilchen mit hoher Geschwindigkeit auf ein bestimmtes Material geschossen und so in kurzer Zeit sehr stark abgebremst werden. Weiters entsteht Strahlung, wenn Elektronen, die in einen Einkristall eingeschossen wurden, durch die

⁶ Die genauen physikalischen Prozesse, die dabei eine Rolle spielen, werden durch die Maxwellschen Gleichungen beschrieben. Vgl. Hamburger Synchrotron-Strahlungslabor HASYLAB (Hg.): Informationsbroschüre des HASYLAB, Hamburg 2000, S. 6.

darin wirkende elektrische Kraft abgelenkt werden. In diesem Fall spricht man von Channeling-Elektronen.⁷

Neben den genannten irdischen Quellen gibt es noch eine Reihe **extraterrestrischer Strahlungsquellen**. Dazu gehören in erster Linie *kosmische Körper*, wie Neutronensterne, Schwarze Löcher und Quasare, die ähnlich wie die Erde von einem Magnetfeld umgeben sind. Elektronen aus ionisierter Materie kreisen mit hoher Energie um diese stellaren Körper und werden in ihren extrem starken Magnetfeldern abgelenkt. Dies hat die Emission von Synchrotronstrahlung zur Folge, wobei man vermutet, dass sie den überwiegenden Teil der aus dem All eintreffenden, niederfrequenten Radiostrahlung ausmacht.⁸

Der Begriff Synchrotronstrahlung ist im Bezug auf extraterrestrische Quellen nicht völlig gerechtfertigt, da diese im Speziellen nur die in Beschleunigern auftretende Strahlungsform bezeichnet. Dennoch hat sich dieser Begriff im allgemeinen Sprachgebrauch durchgesetzt.

Synchrotronstrahlung unterscheidet sich also bezüglich ihrer Entstehung nicht von anderer elektromagnetischer Strahlung. Somit stellt sich die Frage, was diese vor allen anderen Strahlungsformen auszeichnet. Sie weist Besonderheiten in vielerlei Hinsicht auf:

- scharfe Bündelung → hohe Ortsauflösung
- kontinuierliches Spektrum
- hoher Photonenfluss → hohe Intensität
- hoher Polarisationsgrad
- kohärente Strahlung⁹
- hohe Strahlungsenergie und hohe Energieauflösung
- extrem kurze Strahlungsblitze → hohe Zeitauflösung¹⁰

⁷ Vgl. MESCHÉDE, Dieter (Hg.): Gerthsen Physik, Berlin Heidelberg 2004, 22. Aufl., S. 588.

⁸ Vgl. UNIVERSITÄT FREIBURG (09.09.2005): Einführung in die Astronomie und Astrophysik II, URL: http://www.kis.uni-freiburg.de/~ovdluhe/Lehre/Einfuehrung/Einf_3_1.pdf.

⁹ Siehe Kap. 3.2.2 Magnetsystem, Wiggler und Undulatoren, S. 27.

¹⁰ Siehe Kap. 3.2.3 Beschleunigungssystem, S. 29.

Im Folgenden werden diese Charakteristika der Synchrotronstrahlung genauer besprochen. Sie beziehen sich jedoch nur auf die in Ablenkmagneten¹¹ emittierte Strahlung, im Unterschied zur sog. Undulatorstrahlung, die nur in speziellen Magneten¹² ausgesendet wird und beispielsweise vom FEL¹³ erzeugt wird.

2.2 WINKELVERTEILUNG¹⁴

Für den nichtrelativistischen Fall, d.h. das Teilchen bewegt sich mit einer Geschwindigkeit, die weit unterhalb der des Lichts liegt ($v \ll c$), wird die Synchrotronstrahlung isotrop, d.h. in alle Richtungen (mit Ausnahme in Richtung der Beschleunigung) gleich stark abgestrahlt. Es entsteht ein reifenförmiges Abstrahlungsmuster, das der von Heinrich Hertz entdeckten Dipolstrahlung (eines oszillierenden [schwingenden] *Hertzschen Dipols*) gleicht. Die Frequenz der Dipolstrahlung ist gleich der Schwingungsfrequenz des Dipols. Da die Teilchenbewegung ebenfalls als eine Schwingung mit der Dauer eines vollständigen Umlaufs aufgefasst werden kann, gleicht die Frequenz der abgestrahlten Wellen der Umlauffrequenz (Zahl der Umläufe pro Sekunde) des Teilchens.¹⁵

Bewegt sich der Ladungsträger jedoch mit annähernd Lichtgeschwindigkeit ($v \approx c$), so kommt es aufgrund *relativistischer Effekte* nicht mehr zu einer isotropen Emission, sondern zur Abstrahlung der elektromagnetischen Wellen innerhalb eines sehr schmalen Kegels tangential zur Flugbahn in Vorwärtsrichtung. Der Strahl weitet sich somit auf, wobei die unterschiedlichen Wellenlängen der Strahlung unterschiedlich stark divergieren, d.h. sich verschieden stark aufweiten. Der Öffnungswinkel des Kegels bleibt jedoch aufgrund der hohen Geschwindigkeit und der damit verbundenen Effekte extrem klein.

Die Fachliteratur bietet eine Reihe von Formeln, mit denen die horizontale und vertikale Strahldivergenz für jeden Wellenlängenbereich exakt berechnet werden kann. Prinzipiell lässt sich sagen, dass sich der Tangens des Öffnungswinkels 2α

¹¹ Siehe Kap. 3.2.2 Magnetsystem, Dipolmagneten, S. 25.

¹² Ebd., Wiggler und Undulatoren, S. 27.

¹³ Siehe Kap. 4.10 FEL (Der Freie-Elektronen-Laser), S. 48.

¹⁴ Vgl. MESCHÉDE, Gerthsen Physik, S. 586 f.; RAITH, Wilhelm (Hg.): Teilchen, Berlin 1992, (= Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 4), S. 236 f.; WILLE, Klaus: Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, Stuttgart 1996, S. 40 ff.

¹⁵ Siehe Kap. 2.3 Spektrum, S. 13.

des Strahlkegels dem Kehrwert des relativistischen Faktors γ annähert.¹⁶ Der Wert γ beschreibt dabei das Verhältnis der kinetischen Teilchenenergie (Bewegungsenergie) zu deren *Ruhenergie*. Da es sich um einen sehr kleinen Winkel 2α handelt, kann man in guter Näherung schreiben:

$$\tan(2\alpha) \approx 2\alpha \approx \frac{2}{\gamma} = 2 \cdot \frac{m_0 \cdot c^2}{E}$$

Dabei ist $m_0 \cdot c^2$ die Ruhenergie des Teilchens und E seine Bewegungsenergie jeweils gemessen in [eV].

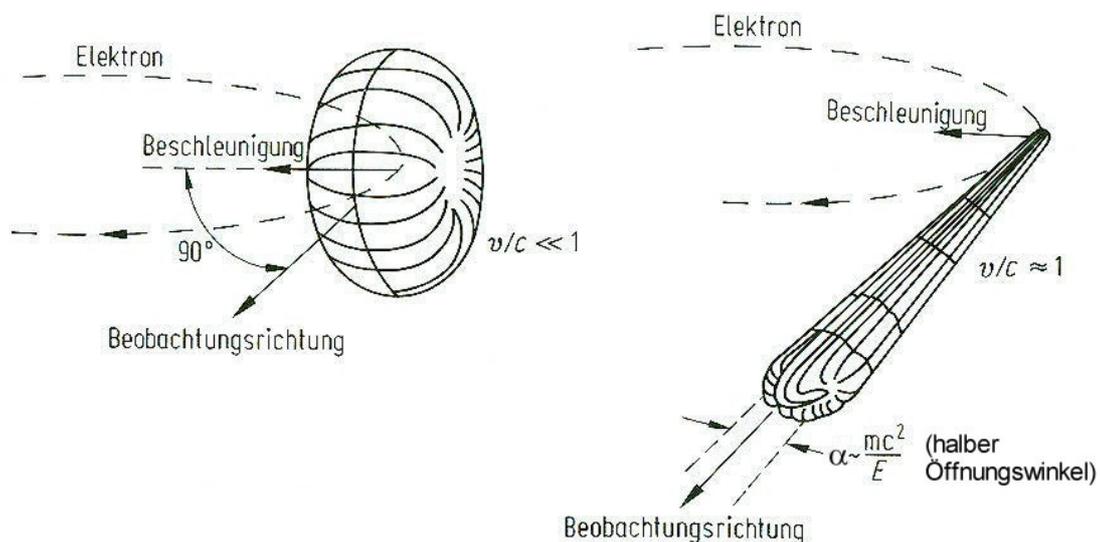


Abb. 3: Strahlungscharakteristik eines nichtrelativistisch ($v \ll c$, links) und eines relativistisch ($v \approx c$, rechts) beschleunigten Elektrons

Im Speicherring DORIS III¹⁷ (**Double Ring Store**) am DESY in Hamburg laufen Positronen mit einer Ruhenergie von etwa 0.511 MeV und einer kinetischen Energie von 4.45 GeV um. Mit diesen Werten errechnet sich die Divergenz der von ihnen in den Ablenkmagneten emittierten Synchrotronstrahlung zu:

$$2\alpha \approx \frac{2}{\gamma} = 2 \cdot \frac{m_0 \cdot c^2}{E} = 2 \cdot \frac{5,11 \cdot 10^5}{4,45 \cdot 10^9} \approx 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$$

¹⁶ Der (ungewöhnliche) Öffnungswinkel 2α folgt aus der Herleitung. Vgl. angeführte Quellen.

¹⁷ Siehe Kap. 3.2.5 HASYLAB / DORIS III, S. 34.

Mit diesem extrem kleinen Öffnungswinkel ist die Synchrotronstrahlung fast so stark gebündelt wie ein Laserstrahl. Bei einer Divergenz von $2,3 \cdot 10^{-4}$ rad (Winkeleinheit für das sog. Bogenmaß¹⁸) weitet sich der Strahl pro Meter Flugstrecke nur um ca. zwei Zehntelmillimeter auf! Dabei kann die Bündelung jedoch nur in der vertikalen Ebene genutzt werden, da durch den längeren Aufenthalt des Teilchens im Ablenkmagneten Synchrotronstrahlung in einen vergleichsweise breiten, horizontalen Strahlungsfächer emittiert wird.

Diese besondere Winkelverteilung ist auch die Voraussetzung für eine **hohe Ortsauflösung** des Strahls, d.h. er kann mit Hilfe einiger optischer Komponenten (Spiegel, Linsen, Zonenplatten¹⁹ etc.) auf ganz bestimmte Bereiche der Probe fokussiert werden. Derzeit kann eine Ortsauflösung im Bereich von etwa 20 nm erreicht werden, womit man auch äußerst kleine Proben effizient untersuchen kann.²⁰

2.3 SPEKTRUM²¹

Ein Elektron emittiert Strahlung innerhalb eines Kegels, der einen Beobachter in einer gewissen Zeitspanne, der Pulsdauer Δt , überstreicht. Vom Punkt A der Umlaufbahn des Elektrons gelangt erstmals Strahlung zum Beobachter. Der Puls endet, nachdem das Elektron den Punkt B erreicht hat. Dies ist der Fall, wenn es einen Kreisbogen mit dem Zentriwinkel 2α zurückgelegt hat. Die Pulsdauer ist die Zeitspanne vom ersten Aussenden eines Photons im Punkt A bis zum Aussenden des letzten Photons im Punkt B, wobei das erste die Strecke AB zusätzlich zurücklegen muss. Damit ist die Pulsdauer die Differenz der Flugdauer des Elektrons und der des Photons von A nach B:

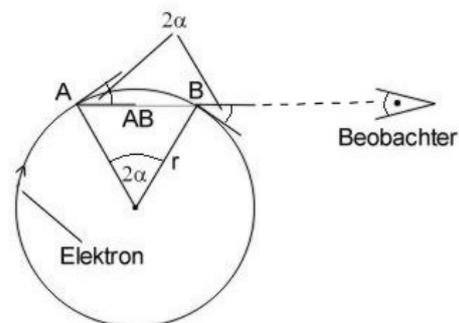


Abb. 4: Strahlungsblitz eines beschleunigten Elektrons

¹⁸ Die Annäherung $\tan(2\alpha) \approx 2\alpha$ gilt nur für Winkel im Bogenmaß. $1 \text{ rad} \approx 57,29^\circ$.

¹⁹ Optisches Bauteil zur Fokussierung von weicher Röntgenstrahlung mithilfe der Beugung.

²⁰ Vgl. 5. Komitee für Forschung mit Synchrotronstrahlung 1999-2002 KFS (Hg.): Forschung mit Synchrotronstrahlung in Deutschland. Status und Perspektiven, 2001, S. 52.

²¹ Vgl. MESCHÉDE, Gerthsen Physik, S. 146, S. 586 f.; RAITH, Teilchen, S. 237; WILLE, Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, S. 42 ff. Aus Platzgründen sei für nähere Ausführungen auf die angeführten Quellen verwiesen.

$$t_e = \frac{2r\pi}{v} \quad \text{und} \quad t_p = \frac{2r \sin \alpha}{c}$$

$$\text{mit } v \approx c \quad \text{und}^{22} \quad \sin \alpha \approx \alpha - \frac{\alpha^3}{3!}$$

$$\Delta t = \frac{2r\alpha}{c} - \frac{2r \sin \alpha}{c} = \frac{2r}{c} \cdot (\alpha - \sin \alpha) \approx \frac{2r}{c} \cdot \left(\frac{\alpha^3}{3!} \right) = \frac{r\alpha^3}{3c}$$

Dieser Strahlungspuls kehrt mit der Umlauffrequenz des Elektrons wieder und somit wäre die abgestrahlte Kreisfrequenz ($\omega = 2\pi \cdot f$) gleich der des Teilchens. Der französische Mathematiker und Physiker Jean Baptiste Joseph Fourier erkannte, dass man jede beliebige periodische Bewegung (Schwingung) in eine Summe von einzelnen Sinusschwingungen zerlegen kann, deren Frequenzen jeweils ein ganzzahliges Vielfaches der Grundfrequenz (Umlauffrequenz) sind. Dieses Verfahren nennt man Fourier-Analyse und die zusätzlichen Schwingungen Oberschwingungen. Auch durch sie wird elektromagnetische Strahlung emittiert. Es müssten also im erhaltenen Spektrum neben der Grundfrequenz auch Oberfrequenzen (jedoch mit abnehmender Intensität) auftauchen und diskrete Linien erzeugen. Aufgrund der leichten Abweichungen der Elektronen von ihrer exakten Bahn verschieben sich die Oberschwingungen jedoch und die erwarteten Spektrallinien erscheinen „verschmiert“ – man erhält ein kontinuierliches Spektrum. Dabei ist die maximale, abgestrahlte Kreisfrequenz nach Fourier:

$$\omega_{\max} = \frac{1}{\Delta t} \approx \frac{3c}{r\alpha^3}$$

$$\text{mit } \alpha \approx \frac{m_0 c^2}{E} \quad \text{erhält man}$$

$$\omega_{\max} \approx \frac{3cE^3}{r \cdot (m_0 c^2)^3} \quad \left[s^{-1} = \frac{(m/s) \cdot eV^3}{m \cdot eV^3} \right]$$

²² Potenzreihenentwicklung der Sinusfunktion. Vgl. KOCH, Physik, S. 1359.

Damit strahlt ein Elektron mit einer Ruhenergie von 0.511 MeV, einer Bewegungsenergie von 4,5 GeV in einem Synchrotron mit dem typischen Ablenkungsradius von 20 m eine unglaubliche, maximale Frequenz ab:

$$f_{\max} = \frac{\omega_{\max}}{2\pi} \approx \frac{3 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot (4,5 \cdot 10^9)^3}{20 \cdot (5,11 \cdot 10^5)^3 \cdot 2\pi} = 4,89 \cdot 10^{18} \text{ Hz}$$

Das entspricht einer Wellenlänge von 0,06 nm, also harter Röntgenstrahlung! Natürlich muss man bedenken, dass die Intensität bei einer derartig hohen Frequenz bereits dementsprechend abgenommen hat.²³

2.4 KRITISCHE WELLENLÄNGE²⁴

Ein wichtiger Parameter zur Beschreibung der Synchrotronstrahlung und ihrer Quellen ist die kritische Wellenlänge λ_c . Man beobachtet, dass sowohl oberhalb als auch unterhalb dieser Marke dieselbe Strahlungsleistung emittiert wird. Oberhalb dieser Grenze ist die Strahlung zwar weitaus energiereicher als unterhalb, jedoch nimmt die Zahl der emittierten Photonen stark ab.²⁵

Die kritische Wellenlänge für Elektronen und Positronen errechnet sich nach der Formel:

$$\lambda_c = \frac{1,864353}{B \cdot E^2} \quad \left[nm = \frac{1,864353}{T \cdot GeV^2} \right]$$

Dabei ist B das Magnetfeld eines Dipols und E die kinetische Energie des Teilchens. Im Hamburger Beschleunigerring PETRA II²⁶ (**P**ositron-**E**lectron **T**andem **R**ing **A**ccelerator) beträgt die maximale Beschleunigungsenergie 12 GeV, das Magnetfeld eines Dipols 0.20877 T. Also ist die kritische Wellenlänge:

²³ Siehe Kap. 2.5 Photonenfluss und Brillanz, S.16.

²⁴ Vgl. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH FZK (Hg.): Synchrotronstrahlung für Forschung und Entwicklung, (= FZK Nachrichten, Jahrgang 32 4/2000), S. 264 f.; WILLE, Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, S. 45 f. Alle verwendeten Formeln wurden der HASYLAB - Homepage entnommen; siehe Literaturverzeichnis.

²⁵ Siehe Abb. 5, S. 17.

²⁶ Siehe Kap. 3.2.5 HASYLAB / DORIS III, S. 34.

$$\lambda_c = \frac{1,864353}{0,20877 \cdot 12^2} = 0,062 \text{ nm}$$

Dieser Wert liegt bereits im Bereich der harten Röntgenstrahlung.

In einigen Fällen wird anstatt der kritischen Wellenlänge die kritische Photonenenergie angegeben. Jeder Wellenlänge bzw. jeder Frequenz ist über $E = h \cdot f$ (dabei ist h die *Plancksche Konstante* und f die Frequenz) eine bestimmte Photonenenergie zuzuordnen. Eine Umrechnung und die Wahl praktischer Einheiten ergibt:²⁷

$$E_c = \frac{1239,842}{\lambda_c} \quad \left[\text{eV} = \frac{1239,842}{\text{nm}} \right]$$

2.5 PHOTONENFLUSS UND BRILLANZ

Ein weiteres für den Experimentator wichtiges Maß für die Qualität der Synchrotronstrahlung und ihrer Quelle ist der Photonenfluss. Dieser gibt die Anzahl der Photonen pro Sekunde, Raumwinkel und 0,1 % Bandbreite an.²⁸ Die Bandbreite steht dabei für einen schmalen Energiebereich (Wellenlängenbereich), innerhalb dessen die Photonen registriert werden. Der Raumwinkel wird in mrad^2 angegeben. So, wie ein voller Kreis einen Winkel von 2π rad besitzt, hat eine volle Kugel einen Raumwinkel von $4\pi^2$ rad^2 .

Bezieht man nun den Photonenfluss zusätzlich auf den Querschnitt, also auf die Divergenz (Aufweitung) des Teilchenstrahls (= *Emittanz*), so erhält man die Brillanz. Sie ist damit sowohl ein Maß für die Intensität und Bündelung der Synchrotronstrahlung als auch für die Qualität des Teilchenstrahls. Den höchsten Photonenfluss und damit die höchste Brillanz verzeichnet man bei ca. 80 % der kritischen Photonenenergie. Als Faustregel gilt, dass Photonenenergien bis zum Vierfachen der kritischen Energie sinnvoll genutzt werden können.²⁹ Das bedeutet, dass man jederzeit bestrebt ist, eine möglichst hohe kritische Energie zu erhalten,

²⁷ Diese Formel gilt ausschließlich für Elektronen und Positronen.

²⁸ Manchmal bezieht man die Zahl der Photonen nicht auf den Raumwinkel, sondern nur auf den horizontalen bzw. vertikalen Öffnungswinkel der Strahlung.

²⁹ Vgl. FZK, Synchrotronstrahlung für Forschung und Entwicklung, S. 264 ff.

die ja sowohl von der Teilchenenergie als auch von der Magnetfeldstärke der Ablenkmagneten abhängt. Soll die Brillanz noch mehr gesteigert werden, so verwendet man spezielle Magneten, wie Wiggler und Undulatoren. Die Brillanz einer Synchrotronstrahlungsquelle kann bis um einen Faktor 10^8 größer sein als die einer typischen Laborquelle.³⁰ Die Vorteile hoher Brillanz zeigen sich bei den Experimenten. Hoher Photonenfluss bedeutet hohe Intensität, auch auf sehr kleine Proben und innerhalb eines sehr schmalen Wellenlängenbereichs.

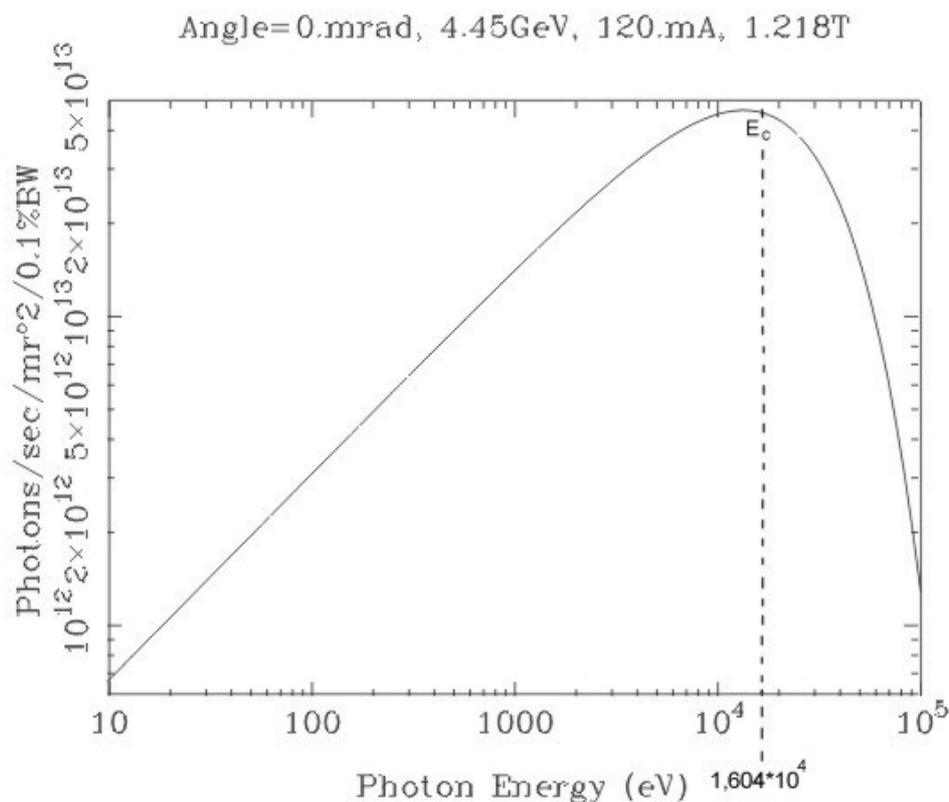


Abb. 5: Logarithmische Skala mit dem Energiespektrum eines Ablenkmagneten von DORIS III, bei einer Beschleunigungsenergie von 4,45 GeV, einem Strahlstrom von 120 mA und einem Dipolfeld von 1,218 T. Der Photonenfluss ist senkrecht aufgetragen.

Die in Synchrotrons emittierte Strahlung weist außerdem eine **hohe Energieauflösung** auf, d.h. das Energieband, mit dem experimentiert wird, lässt sich relativ genau aus dem gesamten Spektrum auswählen. Das höchste derzeit erzielte Auflösungsvermögen liegt bei weniger als 1 meV im UV-Bereich.³¹

³⁰ Siehe Kap. 5.2 Meinung eines Forschers, S. 50.

³¹ Vgl. KFS, Forschung mit Synchrotronstrahlung in Deutschland, S. 51 f.

2.6 POLARISATION

Die Wellenzüge einer Transversalwelle können in beliebig vielen Richtungen normal zur Ausbreitungsrichtung stehen. Schwingen jedoch alle Wellenzüge nur noch in einer einzigen Ebene, so spricht man von linear polarisierter Strahlung. Da die Synchrotronstrahlung fast ausschließlich in der Bewegungsebene der Teilchen emittiert wird, ist sie beinahe vollständig linear polarisiert. Dabei ist der Grad der Polarisation vom vertikalen Winkel zur Bewegungsebene abhängig. Oberhalb bzw. unterhalb dieser Ebene nimmt die zirkulare Polarisation zu. Unter diesem Begriff versteht man die Drehung der Schwingungsebene der Welle um die Achse ihrer Ausbreitungsrichtung. Das wird u.a. durch astronomische Beobachtungen bestätigt. Eine kosmische Strahlungsquelle ist der Krebs-Nebel, ein Überrest einer Supernovaexplosion. Beobachtet man diesen interstellaren Nebel durch einen Polarisationsfilter³², v.a. im Wellenlängenbereich der Radiostrahlung, so verändert sich dessen Helligkeit bei Drehung des Filters erheblich. Das lässt uns darauf schließen, dass Teile der von ihm emittierten Strahlung durch die Beschleunigung von geladenen Teilchen in dessen Magnetfeld entstanden sind.³³

Vorteile polarisierter Strahlung ergeben sich wiederum bei ihren Anwendungen. So lassen sich beispielsweise durch einen geeigneten Versuchsaufbau, mithilfe von Polarisationsfiltern, störende Untergrundsignale vermeiden.³⁴ Darüber hinaus eignet sich polarisierte Strahlung hervorragend zur Untersuchung magnetischer Eigenschaften bestimmter Materialien.

2.7 STRAHLUNGSENERGIE³⁵

Bei jeder Ablenkung in einem Dipol verlieren die umlaufenden Teilchen durch Emission von Strahlung Bewegungsenergie, die durch Hochfrequenzsysteme³⁶ kompensiert wird.

³² Ein Polarisationsfilter ist nur für Strahlung einer bestimmten Schwingungsebene durchlässig.

³³ Vgl. HECHT, Eugene: Optik, Oldenbourg 1999, 2. Aufl., S. 54 ff.

³⁴ Vgl. HASYLAB, Informationsbroschüre des HASYLAB, S. 33.

³⁵ Für eine mathematische Darstellung des Kapitels sei verwiesen auf: WILLE, Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, S. 36 ff.

³⁶ Siehe Kap. 3.2.3 Beschleunigungssystem, S. 29.

Die Energie, die ein Elektron pro Umlauf in Form von Photonen (mit jeweils unterschiedlichen Energien) abgibt, errechnet sich nach der Formel:

$$\Delta E_{ph} = \frac{4\pi \cdot r_e \cdot E^4}{3 \cdot E_0^3 \cdot r}$$

wobei r_e der Elektronenradius, E die Teilchenenergie, E_0 die Ruhenergie der Teilchen, also $m_0 \cdot c^2$, m_0 die Ruhmasse der Teilchen und r der Radius der Teilchenbahn im Ablenkmagneten ist. Diese Formel leitet sich von der Strahlungsleistung eines Hertzschen Dipols ab. Wird diese lorentztransformiert, d.h. in den relativistischen Fall überführt, erhält man die Formel für die Strahlungsleistung eines relativistisch beschleunigten Ladungsträgers. Berücksichtigt man dann noch die Zeit, in der sich das Teilchen im Ablenkmagneten aufhält, so kann man daraus den Energieverlust des Teilchens pro Umlauf errechnen. Dabei nimmt man an, dass die Zahl der vom Teilchen emittierten Photonen während des Durchgangs durch den Magneten konstant bleibt.

Aus der Formel lässt sich erkennen, dass der Energieverlust mit der dritten Potenz der Ruhenergie und damit der Masse abnimmt. Aus diesem Grund bevorzugt man in den Strahlungsquellen Elektronen sowie ihre Antiteilchen, die Positronen, die mit ihrer weitaus geringeren Masse als Protonen eine höhere Strahlungsenergie liefern. Weiters zeigt die Formel, dass die Photonenenergie proportional zur vierten Potenz der Teilchenenergie und umgekehrt proportional zum Bahnradius ist, weshalb man hohe Beschleunigungsenergien, die aufgrund der begrenzten Magnetfeldstärken in Speicherringen zu einem größeren Umfang der Anlage führen, bevorzugt.

Setzt man in obige Gleichung die bekannten Werte für Elektronen ein und wählt man praktische Einheiten, so erhält man die für Elektronen sowie Positronen gültige Formel:

$$\Delta E_{ph} = 88462,70 \cdot \frac{E^4}{r} \quad \left[eV = \frac{GeV^4}{m} \right]$$

Im Beschleunigerring DORIS III werden Positronen auf eine Endenergie von 4.45 GeV beschleunigt und sie durchlaufen dabei Ablenkmagneten, die sie jeweils auf

eine Bahn mit dem Radius 12.1849 m zwingen. Die dabei von einem Positron emittierte Synchrotronstrahlungsenergie beträgt der Gleichung zufolge:

$$\Delta E_{ph} = 88462,70 \cdot \frac{4,45^4}{12,1849} \approx 2846939 \text{ eV} \approx 2,847 \text{ MeV}$$

Will man die vom gesamten Teilchenstrom abgestrahlte Energie berechnen, so muss man den oben erhaltenen Wert mit der Anzahl der Teilchen multiplizieren. Berücksichtigt man schließlich noch die Zeit, in der Photonen emittiert werden, so erhält man die pro Umlauf abgestrahlte Leistung.

Der Vergleich einer klassischen Röntgenröhre, wie sie derzeit noch beispielsweise in der Medizin Anwendung findet, mit einer Synchrotronstrahlungsquelle ist nur sehr schwer möglich. Bei medizinischen Anwendungen liefert die Röntgenquelle nur Strahlung mit einer wohl definierten Wellenlänge, während man in Synchrotrons ein äußerst breites Strahlungsspektrum erhält. Damit bezieht sich die Leistung einer Röntgenröhre, die maximal bei etwa 100 kW liegt³⁷, nur auf diese bestimmte Wellenlänge, während die Leistung einer Synchrotronstrahlungsquelle, die bei jedem Teilchenumlauf bis zu 500 kW betragen kann, auf alle Wellenlängen vom Infrarot bis zur Röntgenstrahlung aufgeteilt ist. Außerdem ist die Abstrahlcharakteristik, d.h. die räumliche Verteilung der Strahlung, einer Röntgenröhre grundverschieden. Somit müsste man, um einen halbwegs vernünftigen Vergleich herstellen zu können, die Photonenzahl, Photonenenergie, Raumwinkel, Divergenz, die Größe der bestrahlten Probe und vieles mehr berücksichtigen. Ein generell gültiger Vergleich ist damit nahezu nicht möglich.³⁸

³⁷ Vgl. OnVista Media GmbH (03.01.2006): Aufbau und Funktion einer Röntgenröhre, URL: http://www.onmeda.de/lexika/strahlenmedizin/roentgenstrahlung_und_roentgenroehre.html.

³⁸ Siehe Abb. 6, S. 22.

3. STRAHLUNGSQUELLEN

3.1 HISTORISCHE ENTWICKLUNG³⁹

Bereits 1944 wurde die Existenz der Synchrotronstrahlung in großen Beschleunigeranlagen von den beiden sowjetischen Theoretikern Ivanenko und Pomeranchuk vorhergesagt.⁴⁰ Drei Jahre später, im Jahre 1947 beobachtete der amerikanische Techniker Floyd Haber an einem Elektronenbeschleuniger einen hellen gebündelten Lichtstrahl. Kurz darauf begann der Ringkanal des Beschleunigers zuerst rötlich und dann blauweiß zu leuchten. Dies gilt als der erste Beweis für die Existenz dieser Strahlung, die von da an Synchrotronstrahlung genannt wurde, weil es sich bei jenem Beschleunigertyp um ein Synchrotron (Kreisbeschleuniger) handelte.⁴¹

Zuerst galt sie als „lästiger Nebeneffekt“, weil die beschleunigten Teilchen dadurch Energie verlieren und so ihre maximale Beschleunigungsenergie erheblich begrenzt wird. Doch bereits in den Fünfzigern wurde das wissenschaftliche Potential dieser extrem intensiven und gebündelten Strahlung erkannt, sodass sie bis in die späten Sechziger von einigen Forschern parasitär genutzt wurde, d.h. es wurde die bei der Beschleunigung für Teilchenkollisionen anfallende Synchrotronstrahlung für Forschungszwecke verwendet. Man spricht bei dieser Art der Nutzung von Strahlungsquellen **erster Generation**. Zu dieser gehörten u.a. die Beschleuniger SPEAR (**S**tanford **P**ositron-**E**lectron **A**ccelerating **R**ing) sowie DORIS am DESY in Hamburg.

Dabei waren die Forscher jedoch sehr von den Betriebsbedingungen der vorrangigen Kollisionsexperimente abhängig. Aus diesem Grund und weil die Zahl der Interessenten stark anstieg, entschloss man sich 1966 zum Bau der ersten dezidierten Synchrotronstrahlungsquelle und läutete damit das Zeitalter der Quellen **zweiter Generation** ein, die ausschließlich für Strahlungsexperimente erbaut wurden.

³⁹ Vgl. WILLE, Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, S. 46 ff.; KFS, Forschung mit Synchrotronstrahlung in Deutschland, S. 3 f., S. 45.

⁴⁰ Vgl. HASYLAB, Informationsbroschüre des HASYLAB, S. 7.

⁴¹ Vgl. MESCHÉDE, Gerthsen Physik, S. 586.

Da in Synchrotrons die Elektronen mit niedriger Energie eingeschossen und auf höhere Energien beschleunigt werden, ändert sich auch dementsprechend das Energiespektrum der in den Ablenkmagneten emittierten Synchrotronstrahlung, weshalb ihre volle Intensität nur während der kurzen Dauer der Maximalenergie der Teilchen verfügbar ist. Deshalb und weil der Strahl durch geringe Magnetfeldschwankungen in Synchrotrons einigermaßen instabil ist, begann man mit dem Bau von sog. Speicherringanlagen. In ihnen sollten die Teilchen stundenlang bei konstanter Energie umlaufen und so über einen langen Zeitraum einen sehr stabilen Strahl für Forschungszwecke liefern. Dabei sei erwähnt, dass Speicherringe gar keine Ringe im wörtlichen Sinne sind. Sie sind vielmehr Polygone (Vielecke), in denen gerade Beschleunigungsstrecken durch eine Vielzahl von Magneten, die den Teilchenstrahl um einen bestimmten Winkel ablenken, zu einer geschlossenen Bahn verbunden sind. Der erste nur für Strahlungsexperimente genutzte Speicherring TANTALUS wurde 1968 unter der Leitung von Ednor Rowe gebaut. Weitere Strahlungsquellen zweiter Generation sind DORIS II in Hamburg (1991 mit sieben Wiggeln/Undulatoren bestückt und zu DORIS III umgebaut), ANKA (Ångströmquelle Karlsruhe) und die SRS (Synchrotron Radiation Source) in Daresbury (UK).

Um schließlich Synchrotronstrahlung noch höherer Qualität zu erzeugen, wurden Spezialmagneten, wie Wiggler und Undulatoren, entwickelt. Ihr Einbau war jedoch bei den bestehenden Anlagen fast oder gar nicht mehr möglich, da dafür lange gerade Strecken im Beschleunigerring notwendig sind. Dies führte in den Neunzigern zum Bau von Speicherringen **dritter Generation**, die speziell für den Einbau dieser Magneten konzipiert waren. Dazu zählen in erster Linie die gemeinsame europäische

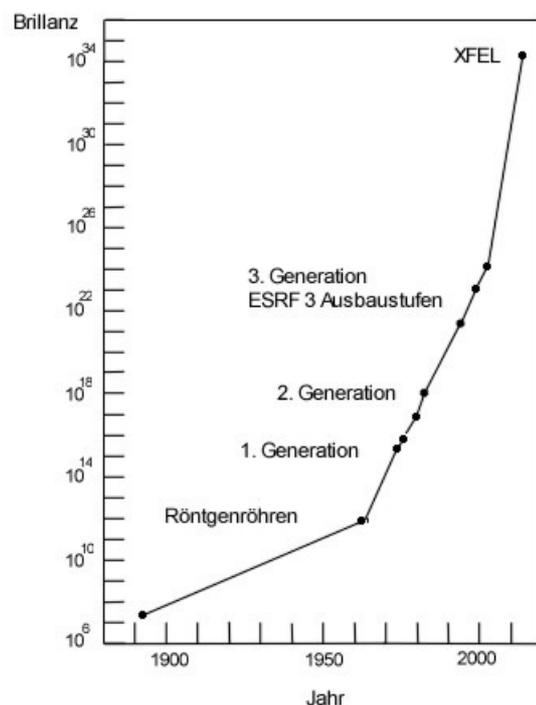


Abb. 6: Steigerung der Brillanz

Strahlungsquelle ESRF (**E**uropean **S**ynchrotron **R**adiation **F**acility) in Grenoble (F), das BESSY II in Berlin, DELTA in Dortmund, PETRA II in Hamburg und die SLS (**S**ynchrotron-**L**ichtquelle **S**chweiz) in Villigen (CH).

Die Forschung mit Synchrotronstrahlung hat somit in den letzten Jahrzehnten eine äußerst rasante Entwicklung erfahren. Das zeigt sich am deutlichsten an der Steigerung der Brillanz. Sie ist in den letzten 35 Jahren um insgesamt 12 Größenordnungen gestiegen.

3.2 AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE

Zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung sind dafür geeignete Beschleunigeranlagen notwendig. Sie haben im Prinzip alle denselben Aufbau und bestehen grob gesehen aus einer Teilchenquelle, die den nötigen *Strahlstrom* liefert, einem Synchrotron, das die Teilchen auf fast⁴² Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und letztlich dem Speicherring, in dem die Teilchen stundenlang für entsprechende Forschungszwecke umlaufen.

Die Edelstahlrohre, die den Beschleunigerring bilden, sind fast vollständig evakuiert. Sie haben einen Durchmesser von etwa fünf Zentimetern und in ihrem Inneren, einem Ultrahochvakuum, das sich durch extrem leistungsfähige Vakuumpumpen erzeugen lässt, herrscht nur noch ein Druck in der Größenordnung von 10^{-9} mbar. Das entspricht einem Milliardstel unseres normalen Luftdruckes. Dadurch wird garantiert, dass der Teilchenstrahl an keinen Restgasmolekülen mehr gestreut werden kann, was u.a. für die Qualität der Synchrotronstrahlung ausschlaggebend ist.⁴³ Weiters ist ein hochpräzises Magnetsystem sowohl im Synchrotron als auch im Speicherring dafür verantwortlich, dass die Teilchen exakt auf ihrer berechneten Kreisbahn gehalten werden. Darüber hinaus koordiniert und überwacht ein kompliziertes Computersystem alle Vorgänge in der Beschleunigungsanlage.

⁴² Bei einer Bewegungsenergie von 4,5 GeV beträgt die Geschwindigkeit der Elektronen:

$$v = \sqrt{1 - \frac{E_0^2}{E^2}} \cdot c = 0,999999993553 c, \text{ also } 99,9999993553 \% \text{ der Lichtgeschwindigkeit.}$$

⁴³ Vgl. FZK, Synchrotronstrahlung für Forschung und Entwicklung, S. 285.

3.2.1 TEILCHENQUELLEN

Die Erzeugung des Elektronenstrahls erfolgt fast immer mit thermischen *Kathoden*. Werden hohe Strahlströme gefordert, verwendet man großflächige runde oder sphärische Kathoden.

Am einfachsten wird der Elektronenstrahl erzeugt, indem eine im Vakuum befindliche Kathode elektrisch mit einem Glühdraht (Filament) aufgeheizt wird, bis die gewünschte Zahl von Elektronen aufgrund der Erwärmung aus dem Kathodenmaterial (z.B. BaO = Bariumoxid)⁴⁴ ausgetreten ist. Diese Kathode ist von einer negativ geladenen Spule umgeben, die aufgrund ihrer abstoßenden Wirkung auf Elektronen diese in einem bestimmten Punkt fokussiert. In geringem Abstand dazu befindet sich eine *Anode*, deren Ringform einen Durchgang für den von ihr beschleunigten Elektronenstrahl bietet.

Besonders hohe Strahlströme lassen sich durch eine Wechselspannung und mit Transformatoren erreichen. Die nötige Hochleistung wird durch Strompulse erzeugt. Dadurch jedoch wird auch der Elektronenstrahl gepulst emittiert – mit einer durchschnittlichen Impulslänge von einigen Mikrosekunden.⁴⁵

Werden Positronen benötigt, so wird der Elektronenstrahl auf ein sog. Konversionstarget⁴⁶ gelenkt, wo es zu physikalischen Prozessen kommt, bei denen Positronen entstehen. Man nennt diesen Vorgang Paarbildung. Aus reiner Energie kann ein Teilchen-Antiteilchen-Paar entstehen. Umgekehrt können diese aber auch bei einer Kollision zu reiner Energie zerstrahlen.

⁴⁴ Vgl. FZK, Synchrotronstrahlung für Forschung und Entwicklung, S. 272.

⁴⁵ Vgl. WILLE, Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, S. 154 f.

⁴⁶ Vgl. Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY (03.01.2006): LINAC II & PIA, URL: http://min.desy.de/linaciipia/index_ger.html.

3.2.2 MAGNETSYSTEM

Für die Teilchenstrahlführung (Strahloptik) in Synchrotronstrahlungsquellen wird eine Vielzahl von Magneten eingesetzt. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Ablenkkraft eines Magnetfeldes von 1 T der eines elektrischen Feldes von ungefähr $3 \cdot 10^8$ V / m entspricht, was weit außerhalb der technischen Realisierbarkeit liegt.

Magnetfelder lenken den im Beschleuniger oder im Speicherring umlaufenden Teilchenstrahl aufgrund der Lorentzkraft in die gewünschte Richtung. Durch unterschiedlichen Aufbau, Anordnung und Stärke der Magneten (auch je nach Quelle verschieden) lassen sich die unterschiedlichsten Effekte erzielen.

- DIPOLMAGNETEN⁴⁷

Ein Dipolmagnet besitzt zwei Pole, die ein vertikales, homogenes („gleichmäßiges“) Magnetfeld senkrecht zur Bahn des Teilchenstrahls erzeugen. Dieses Feld bewirkt aufgrund der Lorentzkraft eine Ablenkung des Teilchenstrahls entlang eines Kreisbogens, weshalb Dipole auch als „Ablenkmagneten“ bezeichnet werden. In einem Beschleunigerring werden viele derartige Magneten eingesetzt, die zusammen eine vollständige Kreisbewegung der Teilchen zur Folge haben.

Ihr Bahnradius hängt von der Energie der einzelnen Teilchen ab. Um den Radius, der ja mit zunehmender Teilchenenergie größer wird, und damit die Sollbahn konstant zu halten, wird in Kreisbeschleunigern das Dipolfeld synchron mit der Teilchenenergie erhöht, weshalb man diesen Beschleunigertyp auch Synchrotron nennt.

Die Ablenkung der Ladungsträger in Dipolmagneten führt zur Emission von Synchrotronstrahlung in einem relativ breiten Strahlungsfächer, weshalb auch die offene Struktur des Magnets – ein C-förmiges Eisenjoch - erforderlich ist.

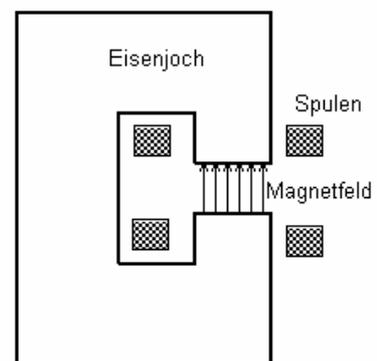


Abb. 7: Querschnitt durch einen Dipolmagneten. Die Elektronenbahn zeigt in die Papierebene hinein.

⁴⁷ Vgl. FZK, Synchrotronstrahlung für Forschung und Entwicklung, S. 290.

- QUADRUPOLMAGNETEN⁴⁸

In einem Speicherring legen Teilchen bei ihren unzähligen Umläufen enorme Wegstrecken von einigen Millionen bis zu mehreren Milliarden Kilometer zurück. Durch die unvermeidliche Strahldivergenz, die zum Teil durch Magnetfeldschwankungen und Restgasmoleküle hervorgerufen wird, vergrößert sich der Querschnitt des Teilchenstrahls ständig, d.h. die einzelnen Teilchen entfernen sich immer mehr von ihrer Sollbahn, bis sie auf die Wand der Vakuumkammer des Speicherrings treffen.

Diesem Effekt wirkt man mit sog. Quadrupolfeldern entgegen, die durch Quadrupolmagneten erzeugt werden, welche den Teilchenstrahl ähnlich einer optischen Linse fokussieren.

Quadrupols bestehen aus vier hyperbolischen Polschuhen, welche mit abwechselnder Polarität (Nord- bzw. Südpol) um die Vakuumkammer angeordnet sind. Die magnetische Feldstärke hebt sich im Zentrum des Magneten vollständig auf, steigt jedoch in jeder Richtung mit zunehmendem Abstand von der Mitte linear an. Aufgrund der Geometrie des Magneten fokussiert dieser nur in einer Richtung und defokussiert in der Senkrechten dazu. Eine vollständige

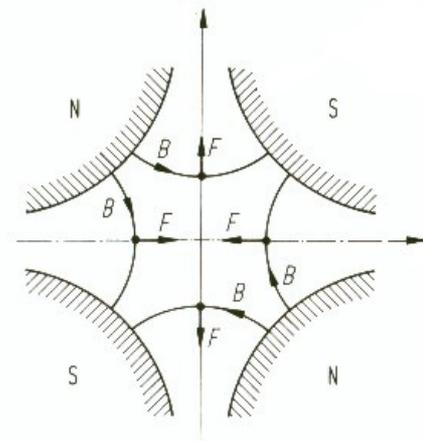


Abb. 8: Querschnitt durch einen Quadrupol. Die Elektronenbahn zeigt in die Papierebene hinein.

Fokussierung in beiden Ebenen – sowohl horizontal als auch vertikal – lässt sich jedoch durch eine gewisse Anordnung von Quadrupols mit verschiedenen *Feldgradienten* („alternating gradients“) erreichen. Aus diesem Grund wird in Beschleunigern eine Vielzahl unterschiedlicher Quadrupolmagneten eingesetzt.

⁴⁸ Vgl. RAITH, Teilchen, S. 526 f.; FZK, Synchrotronstrahlung für Forschung und Entwicklung, S. 290 f.

- WEITERE MAGNETEN⁴⁹

Bei Dipolmagneten und Quadrupolmagneten treten aus verschiedenen Gründen kleine Abweichungen ihrer optimalen Wirkung auf. Diese werden beispielsweise durch Sextupolmagneten kompensiert. Deren Störeffekte ihrerseits werden wiederum durch Korrekturmagnete, die Felder von weniger als 0,1 T erzeugen, korrigiert.

Außerdem sind zur Strahloptik auch gepulste Magneten (Kicker und Septum) erforderlich, die zum Überleiten der Teilchen von einem in einen anderen Ring (Teilchentransfer) benutzt werden. Ihre Felder dürfen beim neuerlichen Umlauf der Teilchen nicht mehr vorhanden sein, da sie deren Bahn in unerwünschter Weise beeinflussen würden.

- WIGGLER UND UNDULATOREN⁵⁰

Die in Ablenkmagneten emittierte Synchrotronstrahlung verteilt sich auf einen vergleichsweise breiten Strahlungsfächer, womit trotz kleinen vertikalen Öffnungswinkels ein großer Teil der Intensität verloren geht. Um einen höheren Photonenfluss und damit eine höhere Brillanz und Intensität erreichen zu können, muss die Synchrotronstrahlung auch horizontal stark gebündelt werden. Dies lässt sich mit Wigglern und Undulatoren (zusammen oft als „Insertion Devices“ bezeichnet) erreichen.

Diese speziellen Ablenkmagneten bestehen aus einer Reihe hintereinander geschalteter, abwechselnd gepolter Magneten, die die Elektronen bzw. Positronen ähnlich einem Slalomkurs um die kreisförmige Sollbahn oszillieren lassen. Prinzipiell besteht im Aufbau zwischen Wigglern und Undulatoren kein Unterschied, jedoch in den Eigenschaften der in ihnen emittierten Strahlung. Ein Wiggler führt lediglich zu einer horizontalen Bündelung der Synchrotronstrahlung, weshalb der Photonenfluss und damit die Intensität im gesamten Spektralbereich um bis zu zehn Größenordnungen gesteigert werden kann. Dabei verhält sich die Intensität proportional zur Anzahl der Perioden und damit zur Länge des Wigglermagneten.

⁴⁹ Vgl. FZK, Synchrotronstrahlung für Forschung und Entwicklung, S. 291, S. 298.

⁵⁰ Ebd., S. 266; KFS, Forschung mit Synchrotronstrahlung in Deutschland, S. 6, S. 47, S. 53.

Da Undulatoren generell schwächer als Wiggler sind, kommt es bei ihnen als Folge der extremen Bündelung noch zusätzlich zu konstruktiven Interferenzeffekten, wodurch die Intensität der emittierten Strahlung gegenüber dem Wiggler noch um bis zu vier Zehnerpotenzen erhöht werden kann. Sie nimmt anders als beim Wiggler proportional zum Quadrat der Anzahl der Perioden zu.

Darüber hinaus entsteht aufgrund der Überlagerung zusätzlich kohärente, monochromatische (einfarbige) Strahlung⁵¹, welche oftmals die gewöhnliche Synchrotronstrahlung an Intensität weit übertrifft. Dabei ist der Strahl jedoch nicht von sich aus kohärent, wie das beispielsweise beim Laser der Fall ist, sondern man erhält kohärente

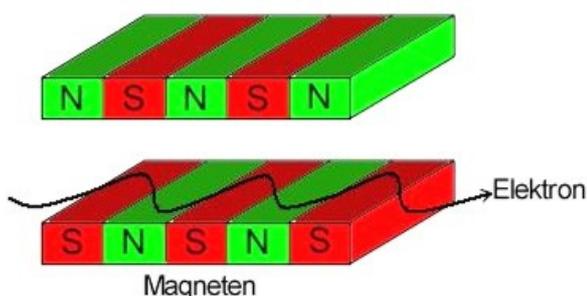


Abb. 9: Aufbau eines Wigglers und Undulators

Strahlung, indem ein etwa zehn Mikrometer breites Bündel aus dem Strahl ausgeblendet wird. Diese beiden Eigenschaften (Monochromie und Kohärenz) erklären, warum Undulatoren vorwiegend beim FEL zum Einsatz kommen.

- SUPRALEITENDE MAGNETEN

Heutzutage werden zur Erhöhung der Magnetfeldstärken oft supraleitende Magneten eingesetzt, die um einige Tesla stärkere Felder erzeugen können.

Die maximale Feldstärke der als Elektromagneten eingesetzten Kupferspulen beträgt etwa zwei Tesla. Vor allem aber in Wigglern und Undulatoren, wo die Teilchen schnell hintereinander stark abgelenkt werden müssen, sind Felder bis zu fünf Tesla notwendig.⁵² Der dafür benötigte Strom führt aber aufgrund des ohmschen Widerstandes zu sehr hohen Temperaturen, durch die trotz intensiver Kühlung die Spule Schaden nehmen könnte.

Eine Alternative bieten Supraleiter. Supraleitend bezeichnet man ein Material dann, wenn es bei einer sehr tiefen Temperatur (Sprungtemperatur T_c) seinen ohmschen Widerstand völlig verliert. Das Metall mit der höchsten Sprungtemperatur

⁵¹ Siehe Kap. 4.10 FEL (Der Freie-Elektronen-Laser), S. 48.

⁵² Vgl. WILLE, Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, S. 68.

($T_c \approx -264 \text{ °C}$) ist Niob bzw. eine Niob-Titan-Legierung, welche deshalb üblicherweise in Beschleunigern Verwendung finden. Es gibt zwar Keramiken und andere Stoffe, die eine weitaus höhere Sprungtemperatur besitzen, die aber für den Einsatz in Beschleunigern nicht geeignet sind (Probleme bei der Verarbeitung, hohe Kosten).⁵³ Die Kühlung der Supraleiter erfolgt üblicherweise mit flüssigem Helium. Schließlich kann in der Spule ein fast beliebig hoher Strom ohne ohmsche Verluste zirkulieren, was ein entsprechend hohes Magnetfeld zur Folge hat.

3.2.3 BESCHLEUNIGUNGSSYSTEM⁵⁴

Da die Teilchen bei ihren Umläufen in Ablenkmagneten Synchrotronstrahlung emittieren, verlieren sie kontinuierlich an Bewegungsenergie und werden langsamer. Um dem entgegenzuwirken und die Ladungsträger im Speicherring auf konstanter Geschwindigkeit zu halten sowie zu ihrer Beschleunigung im Synchrotron, werden sog. Hochfrequenzsysteme (HF-Systeme) eingesetzt.

Deren Kernstück sind Hohlraumresonatoren („Cavities“). Dies sind zylinderförmige Hohlkörper aus besonders leitfähigem Material (hauptsächlich Kupfer oder supraleitendes Niob), in denen bei entsprechender Anregung durch eine angelegte Wechselspannung, ein longitudinales, elektromagnetisches Wechselfeld schwingt. Seine Frequenz ist gleich der Eigenfrequenz des Resonators, die durch dessen Geometrie festgelegt ist. Es bildet sich somit eine Art *stehende Welle* aus. In den meisten Fällen beträgt die Frequenz der Wechselspannung zur Beschleunigung von Elektronen und ihren Antiteilchen einige hundert MHz.

In diesen Hohlraumresonatoren werden die Ladungsträger somit vom elektromagnetischen Wechselfeld beschleunigt. Dazu muss das Feld jedoch mit den Umläufen der Teilchen synchronisiert sein, d.h. es muss bei jedem Durchlauf ein sie beschleunigendes Feld bestehen. Das bedeutet jedoch, dass die Beschleunigungsfrequenz, die gleich der Umlauffrequenz der Teilchen sein soll, dauernd auf ihre zunehmende Geschwindigkeit abgestimmt werden muss. Um dies

⁵³ Vgl. Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY (22.09.2005): Das europäische Röntgenlaserprojekt XFEL, URL: <http://xfelinfo.desy.de/de/supraleitung-niob/2>.

⁵⁴ Vgl. WILLE, Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, S. 201; FZK, Synchrotronstrahlung für Forschung und Entwicklung, S. 280 f.; RAITH, Teilchen, S. 529 ff.; BRÖCKER, Bernhard: Atomphysik. Tafeln und Texte, München 1985, (= dtv – Atlas), 3. Aufl., S. 197.

zu vermeiden, werden sie bereits vor ihrem Einschuss in das Synchrotron auf eine Energie von mindestens zwei Megaelektronenvolt beschleunigt. Damit haben sie beinahe ihre Höchstgeschwindigkeit erreicht und die Frequenz des Resonators braucht nicht mehr erheblich verändert werden.

Ein weiteres Problem ergibt sich, wenn nicht alle Teilchen denselben Impuls besitzen. Sie haben dann aufgrund der verschiedenen Bahnradien andere Umlaufzeiten. Teilchen, die den erforderlichen Sollimpuls besitzen, durchqueren das Wechselfeld in einer Phase, in der sie durch die entsprechende HF-Spannung um genau den Betrag beschleunigt werden, um den sie sich durch die Emission von Strahlung während des Umlaufs verlangsamt haben. Diese Phase entspricht etwa zwei Drittel der Spitzenspannung. Teilchen mit einem kleineren Impuls erhalten hingegen einen größeren Energiezuwachs, da sie das Feld bei einer größeren Spannung passieren. Das bedeutet, ihr Impuls nähert sich dem Sollimpuls an. Genau umgekehrt verhält es sich bei Teilchen mit einem größeren Impuls. Sie werden entsprechend weniger beschleunigt. Das führt letztendlich zu longitudinalen Schwingungen um den Sollimpuls, den sog. Synchrotronschwingungen. Teilchen, deren Impuls sehr stark von der Norm abweicht, werden abgebremst. Dies hat die Aufteilung des kontinuierlichen Teilchenstrahls in mehrere Pakete („bunches“) zur Folge. Ihre Ausdehnung „schrumpft“ bis zu einer bestimmten Grenze, die durch die Anlagenparameter und Naturgesetze festgelegt ist und bei der schließlich alle „bunches“ mit dem Wechselfeld synchronisiert sind. Diesen Vorgang nennt man Phasenfokussierung; den letztlich erreichten Zustand Phasenstabilität.

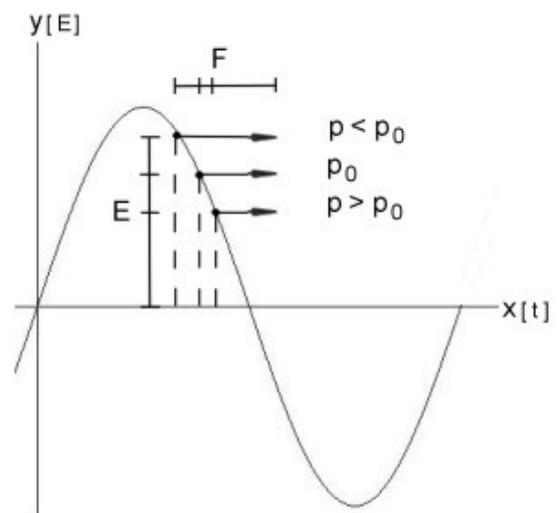


Abb. 10: Elektrisches Feld in einem Resonator. Das Teilchen mit dem zu kleinen Impuls p wird stärker, das mit dem zu großen Impuls schwächer beschleunigt. Das Teilchen mit dem Sollimpuls p_0 wird mit der passenden Energie nachbeschleunigt.

Diese Diskontinuität führt schließlich auch zur Abstrahlung der Synchrotronstrahlung in kurzen, den Teilchenpaketen entsprechenden Pulsen. Das ist die Voraussetzung

für die **hohe Zeitauflösung**, die derzeit bei entsprechend hoher Intensität nur mit Synchrotronstrahlung erreicht werden kann. So können Forscher unter idealen Bedingungen Strahlungsblitze im Bereich von etwa 50 ps erzeugen.⁵⁵

3.2.4 STRAHLROHRE

Um mit der Synchrotronstrahlung experimentieren zu können, muss sie aus dem Beschleunigerring durch eine geeignete Vorrichtung zum Experimentierplatz in die Probenkammer geleitet werden. Das geschieht durch sog. Strahlrohre („Beamlines“). Diese evakuierten Edelstahlrohre mit einer durchschnittlichen Länge von etwa 35 m beinhalten eine Reihe optischer Komponenten, die die Strahlung in einer für das jeweilige Experiment geforderten Weise modulieren, d.h. sie beeinflussen den Strahl um einen möglichst guten Kompromiss zwischen den Forderungen, wie hohe Flussdichte, hohe Energieauflösung und geringe Divergenz, zu erzielen.⁵⁶ Die wichtigsten optischen Komponenten sollen im Folgenden kurz erklärt werden.

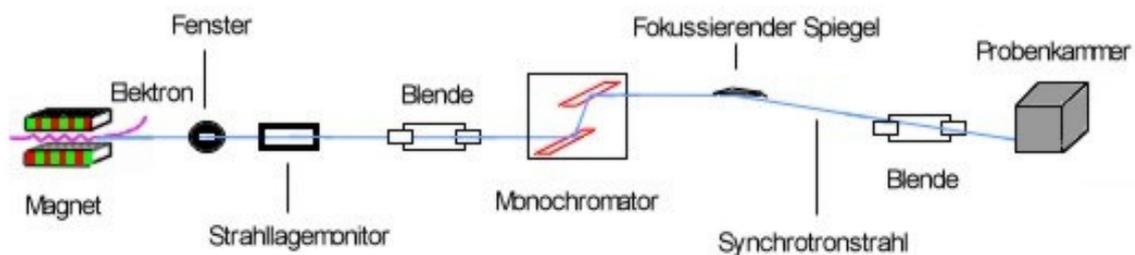


Abb. 11: Schematischer Aufbau eines (typischen) Strahlrohrs mit seinen wichtigsten Komponenten. Ein Strahlagemonitor dient zur Überwachung und Korrektur der Strahlage.

⁵⁵ Vgl. KFS, Forschung mit Synchrotronstrahlung in Deutschland, S. 52 f.

⁵⁶ Vgl. FZK, Synchrotronstrahlung für Forschung und Entwicklung, S. 311 f.

- SPIEGEL⁵⁷

Da Synchrotronstrahlung normalerweise einen hohen Anteil an intensiver Röntgenstrahlung enthält, die bestimmten optischen Bauteilen schaden könnte, wird diese durch einen Röntgenspiegel aus dem Strahl gefiltert. Dieser Spiegel reflektiert nur Photonen (auch Röntgenphotonen) mit einer Energie unterhalb der sog. material- (z.B. Rhodium oder Siliziumdioxid) und winkelabhängigen Abschneideenergie. Diese stellt gleichsam eine Energiekante (Grenze) im elektromagnetischen Spektrum dar. Alle anderen Photonen, wie beispielsweise hochenergetische Röntgenquanten, durchdringen den Spiegel, da sie von der Materie kaum beeinflusst werden. Diese können somit für andere Experimente genutzt werden.

Ein anderer Spiegel wiederum ist aufgrund seiner Krümmung zur vertikalen Fokussierung des Synchrotronstrahls ausgelegt. Die Krümmung dieses Ellipsoid-Spiegels ist mit bloßem Auge nicht erkennbar. Der Krümmungs- oder Biegeradius liegt bei etwa ein bis zwei Kilometern. Dieser Spiegel lenkt den Strahl in die Probenkammer, in der das eigentliche Experiment stattfindet. Will man Röntgenstrahlen auf bestimmte Bereiche der Probe fokussieren, so setzt man Zonenplatten ein, da sie herkömmliche optische Linsen ungehindert durchdringen würden.

- MONOCHROMATOREN⁵⁸

Da für ein bestimmtes Experiment meistens eine genau definierte Wellenlänge der Strahlung erforderlich ist, muss diese aus dem kontinuierlichen Spektrum herausgefiltert werden. Dazu werden Monochromatoren eingesetzt.

Eine mögliche Form ist der **Gittermonochromator**. In eine Oberfläche werden extrem schmale, parallele Rillen eingeritzt – man spricht von einem optischen Gitter. An ihm wird die Synchrotronstrahlung gebeugt, und zwar verschiedene Wellenlängen unterschiedlich stark. Das hat die Auffächerung der Strahlung in seine verschiedenen Spektralfarben zur Folge, aus der anschließend durch eine **Blende** – eine Platte mit

⁵⁷ Vgl. FZK, Synchrotronstrahlung für Forschung und Entwicklung, S. 312 f.; Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY (Hg.): Licht der Zukunft, CD-Rom, Hamburg 2000.

⁵⁸ Vgl. FZK, Synchrotronstrahlung für Forschung und Entwicklung, S. 313; DESY, Licht der Zukunft, CD-Rom.

einem schmalen Spalt in der Mitte – die gewünschte „Farbe“ herausgenommen wird. Die verschiedenen Wellenlängen erhält man durch Drehung bzw. durch Austausch des Gitters. Da die Methode des Gittermonochromators jedoch die Qualität des Strahls negativ beeinflusst, bevorzugt man **Doppelkristallmonochromatoren**. Sie sind aus zwei parallel zueinander angeordneten Einkristallen (üblicherweise Silizium) aufgebaut. Unter einem bestimmten Einfallswinkel α (Glanzwinkel) wird auch nur eine ganz bestimmte Wellenlänge λ , die die Bragg'sche Beziehung erfüllt, reflektiert. Diese lautet:⁵⁹

$$k \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \alpha$$

Dabei ist k eine beliebige natürliche Zahl und d der sog. Netzebenenabstand. Das Kristallgitter ist aus unzähligen parallelen Ebenen (den Netzebenen) aufgebaut, an denen der Lichtstrahl reflektiert wird. Kommt es an mehreren Ebenen zur Reflexion, so weisen die Phasen der Wellen bestimmte Gangunterschiede auf, die in den meisten Fällen zu destruktiver Interferenz führen. Nur bei einer ganz bestimmten Wellenlänge λ kommt es zu

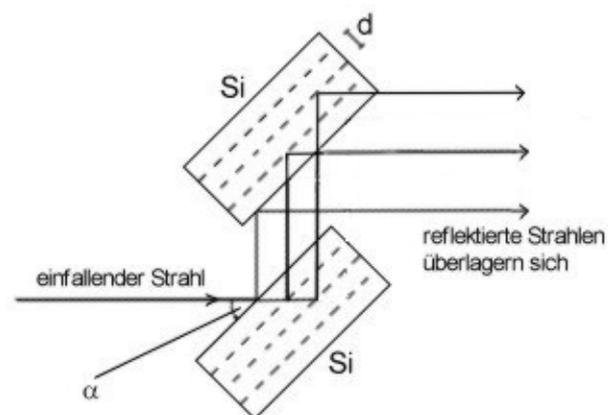


Abb. 12: Funktionsprinzip eines Doppelkristallmonochromators. Es kommt bereits nach der ersten Reflexion zu Interferenz.

konstruktiver Interferenz und die Strahlung wird vom Kristall reflektiert. Sie trifft anschließend unter demselben Winkel auf den zweiten Einkristall, der den Strahl wieder in die ursprüngliche Richtung lenkt. Dabei kann dieser ebenfalls gekrümmt sein, was zusätzlich zur Fokussierung der Strahlung führt.

- FENSTER

Das Fenster bildet die direkte Verbindung zwischen Strahlrohr und Beschleunigerring. Es ist lediglich ein Fenster aus transmissionsfähigem Material,

⁵⁹ Vgl. WEIDL, Erhard: Physik. Relativitätstheorie, Atom- und Kernphysik, München 1999, (= mentor Abiturhilfe), S. 29 f.

das von fast der gesamten Synchrotronstrahlung durchdrungen wird, wobei es dennoch den evakuierten Raum des Beschleunigerrings von dem des Strahlrohrs trennt.

Der Dauerbetrieb der Strahlungsquellen führt unweigerlich zur Erhitzung der optischen Komponenten, weshalb ein effektives Kühlsystem unverzichtbar ist. Ebenfalls unverzichtbar sind Strahlabsorber sowie Beton- und Bleiwände entlang des Strahlrohrs. Die elektronisch gesicherte Tür in den Beschleunigungstunnel sorgt für einen Notstopp aller Maschinen, wenn sie während des Betriebs geöffnet wird, um die größtmögliche Sicherheit für die Experimentatoren zu gewährleisten.

3.2.5 HASYLAB / DORIS III

Das 1980 eröffnete HASYLAB (**H**amburger **S**ynchrotronstrahlung**l**abor) ist eine Einrichtung zur experimentellen Forschung mit Synchrotronstrahlung. Das Gebäude grenzt an die dritte Ausbaustufe des Speicherrings DORIS , also DORIS III⁶⁰, die seit 1993 ausschließlich als Synchrotronstrahlungsquelle dient. Dieser Speicherring wird, wie auch PETRA II⁶¹ und in weiterer Folge HERA, von LINAC II, einem Linearbeschleuniger, mit Elektronen bzw. Positronen gespeist. Die dort aus der 28 cm² großen Kathode austretenden 3 µs langen Teilchenstimpulse (bis zu 6 A Strahlstrom) werden elektrostatisch auf 150 keV beschleunigt. Werden Positronen benötigt, so wird der Elektronenstrahl auf ein Wolfram-Target (Konversionstarget) gelenkt. Anschließend wird der Teilchenstrahl durch HF-Systeme auf eine Energie von 450 MeV beschleunigt und in PIA (**P**ositronen **I**ntensitäts-**A**kkumulator)⁶² eingeschossen, wo die Positronen akkumuliert („angehäuft“) werden. Dort werden zwei HF-Systeme mit 10,4 MHz bzw. 125 MHz betrieben, die dem Teilchenstrahl eine neue Struktur (in Form von „bunches“) aufprägen. Hierauf wird der Teilchentransfer in den nächsten Vorbeschleuniger, das Synchrotron DESY II⁶³, durch gepulste Magneten eingeleitet.⁶⁴

⁶⁰ Umfang: 298,2 m.

⁶¹ PETRA II dient sowohl als Vorbeschleuniger für den Elektronen-Positronen-Kollisionsring HERA, als auch als Synchrotronstrahlungsquelle des HASYLAB. Umfang: 2304 m.

⁶² Umfang: 29 m.

⁶³ Umfang: 293 m. Maximale Beschleunigungsenergie: 8 GeV.

⁶⁴ Vgl. DESY (03.01.2006): LINAC II & PIA, URL: http://min.desy.de/linaciipia/index_ger.html.

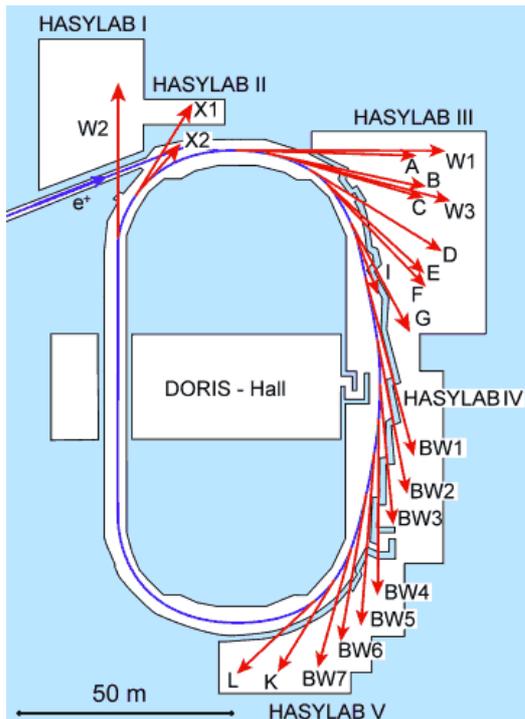


Abb. 13: Die 21 Beamlines von DORIS III im HASYLAB

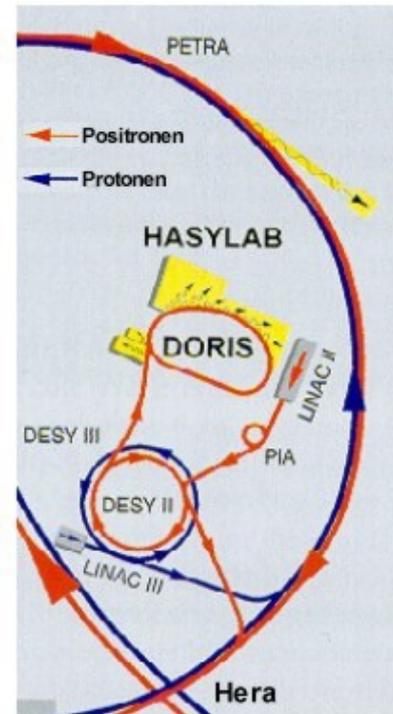


Abb. 14: Lageplan von DORIS III und PETRA II

DESY II beschleunigt die Positronen weiter und garantiert somit, dass sie bei der Injektion (Einschuss) in DORIS III ihre Höchstgeschwindigkeit beinahe erreicht haben. Dadurch ergeben sich keine Probleme bezüglich der Frequenzmodulation der Resonatoren. Diese arbeiten bei einer Frequenz von etwa 500 MHz und sorgen für die Nachbeschleunigung der bereits zu Paketen verdichteten Positronen. Die Anzahl der „bunches“ kann dabei reguliert werden. Bei Tests läuft nur ein einziges, etwa stecknadelgroßes Paket um. Ansonsten verwendet man zwei oder fünf „bunches“, deren Abstand ebenfalls reguliert werden kann. Dieser gibt auch die Zeitstruktur der Strahlung, also den zeitlichen Abstand der Strahlungsblitze, an. Bei einem Paket beträgt er



Abb. 15: Beschleunigertunnel von DORIS III. Ganz vorne im Bild ist der Beschleunigungsring zu sehen, dahinter die von Folie geschützten Resonatoren. Ganz hinten sind die Dipolmagnete (blau) zu erkennen.

964 ns, bei zwei 480 ns, bei drei 192 ns.⁶⁵

Die emittierte Synchrotronstrahlung, wird schließlich mit 21 Strahlrohren (elf von Ablenkmagneten und zehn von Insertion Devices), die den Speicherring tangential verlassen, an die Messplätze geführt. Dabei bietet eine Beamline Strahlung für zwei Experimentierplätze. Insgesamt werden an diesen 42 Plätzen etwa 80 verschiedene Instrumente im Wechsel betrieben. Es experimentieren rund 1900 Wissenschaftler aus 31 Nationen (an DORIS III und PETRA II) acht bis zehn Monate im Jahr.⁶⁶

⁶⁵ Vgl. HASYLAB (08.09.2005): Parameters of DORIS III, URL: <http://www-hasyllab.desy.de/facility/doris/parameters.htm>.

⁶⁶ Vgl. DESY (Hg.): Wer wir sind, was wir tun. DESY kurz gefasst, Informationsschrift, Hamburg 2004.

4. ANWENDUNGEN UND ANWENDUNGSVERFAHREN

Alle Experimente werden in der Experimentierhalle der Strahlungsquelle in sog. Experimentierhütten aufgebaut. Die eigentliche Wechselwirkung des Probenmaterials mit der Strahlung findet in der evakuierten Probenkammer statt, an der auch alle Messinstrumente, wie Detektoren, installiert sind.



Abb. 16: Probenkammer an einer Beamline im HASYLAB

4.1 RÖNTGENBEUGUNG⁶⁷ UND KLEINWINKELSTREUUNG⁶⁸

Will man atomare Strukturen von der Größenordnung eines Kristalls untersuchen, so kann man dies beispielsweise mit einem Elektronenmikroskop machen, wobei jedoch die Probe entsprechend präpariert werden muss und damit zerstört wird. Eine Alternative ist die Röntgenbeugung. Da der Kristall ein optisches Gitter ist, also eine Vielzahl von Spalten aufweist, die in der Größenordnung der Wellenlänge der Röntgenstrahlung liegen, kommt es bei Bestrahlung durch dieses extrem kurzwellige „Licht“ zu Interferenzerscheinungen. Das mit einem Detektor aufgenommene Beugungsmuster wird anschließend ausgewertet und man kann die atomare Kristallstruktur darstellen. Der Vorzug dieser Methode ist, dass sie auf die Probe nicht destruktiv wirkt, das Material also erhalten bleibt.

Ursprünglich verwendete man für solche Untersuchungen einfache Röntgenröhren. Um jedoch ein viel deutlicheres Bild zu erhalten, ist eine Intensität der Röntgenstrahlung nötig, wie sie nur von Synchrotrons erzeugt wird. Außerdem ist das Ausmaß des Beugungseffekts auch entscheidend davon abhängig, wie genau die Wellenlänge der Strahlung für die entsprechende Kristallstruktur gewählt wird. Für unterschiedliche Proben ist also Röntgenstrahlung von unterschiedlicher

⁶⁷ Vgl. HASYLAB, Informationsbroschüre des HASYLAB, S. 18 f.

⁶⁸ Ebd., S. 34 f.

Wellenlänge nötig. Die einzige durchstimmbare, kohärente Strahlungsquelle für den Röntgenbereich ist ein Synchrotron.

Das Verfahren der Röntgenbeugung findet Anwendung in der Halbleiterherstellung. So lässt sich die Dicke einer aufgedampften Kristallschicht mit dieser Methode messen und auch die durch das Aufdampfen entstehenden Verspannungen des Materials können mit Hilfe der Röntgenbeugung untersucht werden. Ebenso lassen sich in der Nanoelektronik kleinste Halbleiterkristallite, sog. Quantenpunkte, darstellen, die zukünftig eine wichtige Rolle bei der Entwicklung von noch leistungsfähigeren Computern spielen werden.

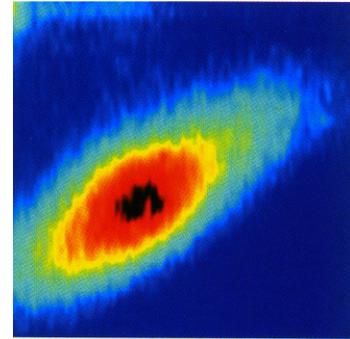


Abb. 17:
Röntgenbeugungsbild
eines Quantenpunkts

Mit der Methode der **Röntgenkleinwinkelstreuung** SAXS (**S**mall-**A**ngle **X**-Ray **S**cattering) lassen sich auch Strukturen in mittlerer Größenordnung, wie Emulsionen (fein in einer Flüssigkeit verteilte Fettröpfchen), untersuchen. Von Kleinwinkelstreuung spricht man bei einer Ablenkung des Röntgenstrahls (Primärstrahl) um Winkel kleiner als zwei Grad.⁶⁹ Diese abgelenkte Sekundärstrahlung, die ebenfalls Beugungsmuster hervorruft, darf sich jedoch nicht mit dem Primärstrahl überlagern, da es sonst zu einer Verfälschung der Messergebnisse kommt. Deshalb muss der Primärstrahl einen möglichst kleinen Querschnitt aufweisen, wie dies bei Synchrotronstrahlung der Fall ist.

SAXS kann künftig bei der Entwicklung besserer Hautcremes (Emulsionen), aber auch bei der Untersuchung der Oberfläche von Halbleitermaterialien oder sonstigen Bauteilen helfen. So kann man zum Beispiel das wechselnde Verhalten von Stoffen unter bestimmten Belastungen beobachten.

⁶⁹ Vgl. UNIVERSITÄT STUTTGART (11.01.2006): Strukturaufklärung an amorphen Systemen, URL: http://www.ipc.uni-stuttgart.de/bertagnolli/akbertagnolli2_d.html.

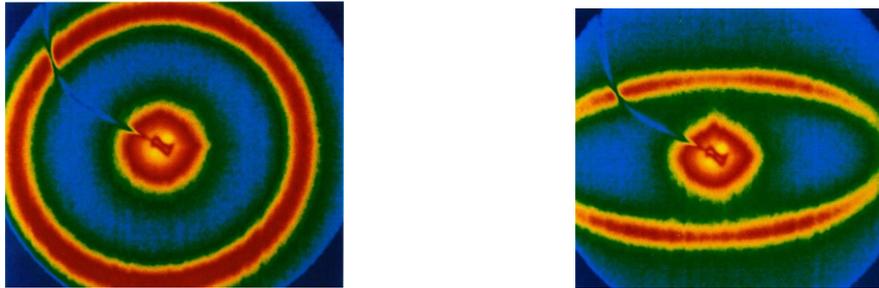


Abb. 18: Nichtbelastete (links) und belastete (rechts) Kunststoffprobe. Röntgenbeugungsbild, aufgenommen mit dem Verfahren der Röntgenkleinwinkelstreuung.

Oft sehen sich die Forscher mit dem Problem konfrontiert, dass ihre Proben nicht in kristalliner Form vorliegen und deshalb auch nicht mit der Methode der Röntgenbeugung untersucht werden können. Das ist zum Beispiel bei Makromolekülen (Riesenmolekülen), wie Proteinen, der Fall. Um solche Proben untersuchen zu können, muss man sie erst in kristalline Form bringen. Dieser Prozess der Kristallbildung aus bestimmten Lösungen (z.B. **Proteinkristallographie**⁷⁰) kann jedoch Tage dauern und man erhält letztlich doch nur sehr kleine Kristalle. Diese winzigen Proben können praktisch nur mit der intensiven und gebündelten Synchrotronstrahlung untersucht werden.

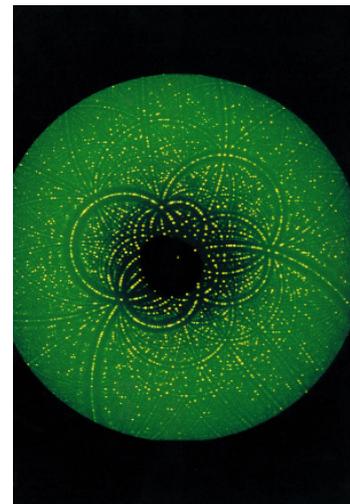


Abb. 19: Röntgenbeugungsbild eines Biomoleküls

4.2 ABBILDENDE DIFFRAKTOMETRIE⁷¹

Die abbildende Diffraktometrie ist der Röntgenbeugung sehr ähnlich. Ein Unterschied besteht darin, dass vor den Detektor noch zusätzlich eine sog. **Mikrokanal-Platte** vorgeschaltet ist. Das ist eine vier Millimeter dicke Bleiglasscheibe⁷² mit mehr als einer Million ca. einen Mikrometer dicken Röhrcchen, den Kapillaren. Jedes dieser Röhrcchen ist auf einen Punkt der Probe ausgerichtet. Da mit dieser Methode polykristalline Proben oder sogar Pulver untersucht werden, die eine Vielzahl von Beugungsmustern erzeugen, die sich ihrerseits wieder überlagern, kann man

⁷⁰ Vgl. HASYLAB, Informationsbroschüre des HASYLAB, S. 44 f.

⁷¹ Ebd., S. 24 f.

⁷² Bei Bleiglas wird das übliche Kalziumoxid durch Bleioxid ersetzt.

hinterher nicht mehr genau feststellen, von welchem Punkt der Probe ein bestimmtes Muster stammt. Deshalb benötigt man die Kapillaren, die Strahlung nur aus einer bestimmten Richtung durchlassen. Damit kann man mit einer sich dahinter befindlichen Digitalkamera das Bild auflösen und auswerten.

Mit der abbildenden Diffraktometrie lässt sich beispielsweise das Wachsen von Mikrokristalliten beobachten. Wird die Wendel einer Glühbirne aufgeheizt, so entstehen kleine Wolframkristalle am Glühfaden, die sich durch stetiges Wachsen miteinander verhaken können und so dem Glühfaden eine höhere Stabilität geben. Das Wachsen dieser Kristallite kann nach Auswertung der aufgenommenen Beugungsmuster beobachtet werden, was in der Herstellung von Glühbirnen eine entscheidende Rolle spielt. Außerdem kann mit diesem Verfahren der Verschleiß von Eisenbahnschienen und die Haltbarkeit von Schweißnähten genauer untersucht werden.

4.3 RÖNTGENFLUORESZENZANALYSE⁷³

Bei der Röntgenfluoreszenzanalyse wird die Probe mit „weißer“, d.h. polychromatischer, Röntgenstrahlung beleuchtet. Die Atome der Probe absorbieren einen für sie charakteristischen Teil des Röntgenspektrums, indem ein Elektron in ihrer Hülle auf ein höheres Energieniveau gehoben wird. Wenn dieses Elektron anschließend wieder auf das ursprüngliche Niveau fällt (Quantensprung), gibt es die absorbierte Energie als ein oder mehrere Photonen wieder ab, je nachdem ob und wie viele Energieniveaus sich dazwischen befinden. Dabei ist die Energie der Photonen elementspezifisch. Durch die Analyse des sog. Absorptionsspektrums der Probe kann man auf die darin vorhandenen Atomsorten schließen. Dabei ist die Intensität der Fluoreszenzstrahlung einer bestimmten Energie proportional zur

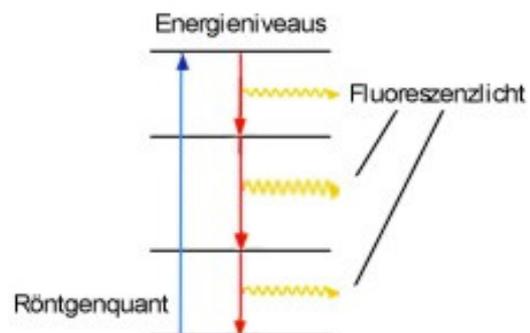


Abb. 20: Quantensprung eines Elektrons nach Anregung mit Synchrotronstrahlung

⁷³ Vgl. HASYLAB, Informationsbroschüre des HASYLAB, S. 32 f.

Anzahl der Atome eines bestimmten Elements. Es ist also eine qualitative und eine quantitative Untersuchung möglich. Die Nachweisgrenze der Röntgenfluoreszenzanalyse liegt bei etwa einem Mikrogramm eines untersuchten Stoffes pro Gramm Probenmaterial.⁷⁴

Für dieses Verfahren haben sich Speicherringe als optimale Strahlungsquellen bewährt, da durch die Intensität der ausgesandten Strahlung im gesamten Röntgenbereich die Probe in nur einem Messvorgang untersucht werden kann. Durch ihre scharfe Bündelung können auch kleinste Mengen analysiert werden. Störende Untergrundsignale (sonstiger Lichteinfall o.Ä.) lassen sich wegen des hohen Polarisationsgrades der Synchrotronstrahlung durch Vorschalten eines Polarisationsfilters vermeiden.

Anwendung findet dieses Verfahren bei der Untersuchung von Halbleiterbauelementen. Kleinste Verschmutzungen eines Halbleiterkristalls können festgestellt werden. Auch in der Archäologie und v.a. in der metallverarbeitenden Industrie hat sich die Röntgenfluoreszenzanalyse als effiziente Methode zur Spurensuche erwiesen.

4.4 EXAFS (Extended X-Ray Absorption Fine Structure)⁷⁵

Zur Strukturanalyse nicht-kristalliner Proben, die auch durch Kristallisationsvorgänge nicht in die benötigte Form gebracht werden können, muss man auf das EXAFS-Verfahren zurückgreifen.

Dabei wird gezielt ein bestimmtes Atom in der Probe mit einem Röntgenstrahl beschossen. Bei der passenden Energie der Röntgenstrahlung (Ionisationsenergie), kann ein Elektron durch die Absorption des Röntgenphotons aus dem Atom geschleudert und so das Atom ionisiert werden. Betrachtet man das freie gewordene Elektron quantenmechanisch, so kann man ihm eine bestimmte, energieabhängige Wellenlänge zuordnen und das Teilchen als Welle betrachten. Diese wird von den benachbarten Atomen in bestimmter Weise reflektiert und es kommt wiederum zu

⁷⁴ Vgl. WIKIPEDIA, Die freie Enzyklopädie (11.01.2006): Röntgenfluoreszenzanalyse, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/R%C3%B6ntgenfluoreszenzanalyse>.

⁷⁵ Vgl. HASYLAB, Informationsbroschüre des HASYLAB, S. 20 f.; UNIVERSITÄT STUTTGART (11.01.2006): Strukturaufklärung an amorphen Systemen, URL: http://www.ipc.uni-stuttgart.de/bertagnolli/akbertagnolli2_d.html.

Überlagerungseffekten – ein Beugungsmuster entsteht. Durch die Auswertung des Absorptionsspektrums und des Beugungsmusters kann man auf die Anzahl, Abstände (mit einer Genauigkeit von ca. 1 % und einem Maximum von sechs Ångström⁷⁶) und Art der benachbarten Atome schließen und so die Feinstruktur dieser Probe untersuchen. Um die richtige Ionisierungsenergie jedes Atoms und die nötige Intensität der Strahlung zu erhalten, und um diese gezielt auf einen bestimmten Punkt der Probe zu richten, ist eine durchstimmbare, hochintensive und stark gebündelte Röntgenquelle, wie eine Synchrotronstrahlungsquelle, nötig.

Mit EXAFS lassen sich winzige Mengen eines bestimmten Elements und dessen Bindungsform in Proben nachweisen. Außerdem findet dieses Verfahren Anwendung in der Katalysatorforschung, beispielsweise bei der Untersuchung der wabenförmigen atomaren Struktur eines Dieselkatalysators, um diesen künftig noch effizienter bauen zu können.

4.5 ANWENDUNG IN DER GEOPHYSIK⁷⁷

Die Untersuchung tiefer Erdschichten, wie dem Erdmantel, ist aufgrund der begrenzten Bohrtiefen nur schwer möglich. Wollen Geophysiker dennoch das Materialverhalten in derartigen Tiefen von bis zu einigen hundert Kilometern erforschen, so müssen die dort herrschenden extremen Bedingungen im Labor simuliert werden.

Durch speziell konstruierte Druckstempel kann eine Probe mit bis zum Millionenfachen des Atmosphärendrucks zusammengepresst werden. Um diese winzigen Materialmengen (von einigen Kubikmikrometern) untersuchen zu können, ist die extrem intensive und gebündelte Synchrotronstrahlung nötig. Neben der Strukturanalyse durch Röntgenbeugung, können mit Röntgenabsorption (EXAFS) chemische Eigenschaften und mit Röntgenfluoreszenz die vorhandenen Mengen verschiedener Stoffe bestimmt werden. Zukünftig sollen noch größere Drücke simuliert werden, die sich nur durch Schockwellen erzeugen lassen. Das sind äußerst starke Wellen, die sich mit Schallgeschwindigkeit im betroffenen Medium

⁷⁶ [1 Å = 10⁻¹⁰ m].

⁷⁷ Vgl. HASYLAB, Informationsbroschüre des HASYLAB, S. 30 f.; KFS, Forschung mit Synchrotronstrahlung in Deutschland, S. 37.

ausbreiten und extreme Druck-, Dichte- und Temperaturänderungen zur Folge haben. Eine Schockwelle lässt sich im Labor, beispielsweise durch den Beschuss des Materials mit einem Laserstrahl, erzeugen. Da die Druckänderungen nur sehr kurz dauern und danach die Probe zerstört ist, ist man auf die hohe Zeitauflösung einer Synchrotronstrahlungsquelle angewiesen.

4.6 RÖNTGENLITHOGRAPHIE⁷⁸

Synchrotronstrahlung eignet sich zudem zur Herstellung von Mikro- und Nanobauteilen. Mit Hilfe der stark gebündelten, parallelen und intensiven Röntgenstrahlung eines Synchrotrons kann das Bild einer Maske in eine lichtempfindliche Polymerschicht eingebrannt werden und im Folgenden über eine Reihe von Entwicklungsschritten ein bestimmtes Bauteil hergestellt werden. Damit lassen sich Strukturen im Nanometerbereich erzeugen.



Abb. 21: Mit Synchrotronstrahlung hergestelltes Zahnrad aus Nickel

4.7 MIKROTOMOGRAPHIE⁷⁹

Bei der Mikrotomographie wird durch Drehung der Probe im „Röntgenlicht“⁸⁰ eine Vielzahl von Röntgenbildern aufgenommen. Diese entstehen, wenn die Röntgenstrahlung von den verschiedenen dichten Teilen der Probe unterschiedlich stark absorbiert wird. Es entsteht auf einem sich dahinter befindlichen Detektor eine Röntgenkontrastaufnahme, bestehend aus hellen und dunklen Bereichen. Wird die Probe im „Röntgenlicht“ gedreht, so entstehen mehrere aus unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommene Bilder, die computertechnisch zu einem dreidimensionalen Bild kombiniert werden können. Dies entspricht der allseits bekannten Computertomographie. Der Unterschied besteht jedoch darin, dass bei Synchrotronstrahlungsquellen die Wellenlänge der Röntgenstrahlung für jedes

⁷⁸ Vgl. KFS, Forschung mit Synchrotronstrahlung in Deutschland, S. 37 f.

⁷⁹ Vgl. HASYLAB, Informationsbroschüre des HASYLAB, S. 36 f.; HASYLAB (12.01.2006): Röntgen-Mikrotomographie, URL: <http://www.desy.de/f/jb99/desy99-102-111.pdf>, S. 106 ff.

⁸⁰ Als „Licht“ bezeichnet man strenggenommen nur den sichtbaren Anteil der elektromagnetischen Strahlung.

Material genau gewählt werden kann. Außerdem ist die Auflösung der Aufnahme durch die hohe Brillanz und Bündelung der Strahlung sehr hoch und die Belichtungszeit der Probe kann um einen Faktor 100 bis 1000 der üblichen Belichtungszeit reduziert werden. Weil mit Synchrotrons auch harte Röntgenstrahlung mit extrem kurzer Wellenlänge erzeugt werden kann, die auch sehr dichte Materialien, wie elektronische Bauteile, durchdringen kann, sind tomographische Aufnahmen, von beispielsweise Transistoren, möglich.

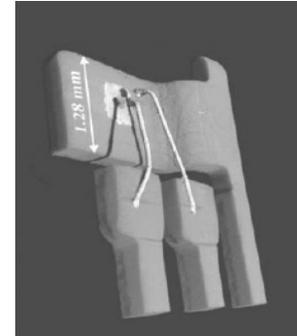


Abb. 22:
Mikrotomographische Aufnahme eines Transistors

Ist der Kontrastunterschied bei Röntgenbildern zu klein, lässt sich mit der kohärenten Strahlung eines Undulators auch eine sog. Phasenkontrastaufnahme erstellen. Dabei wird der einfallende, monochromatische Strahl mit einem Kristall in zwei Strahlen aufgeteilt. Einer durchdringt die Probe, wird abhängig von der Dichte des Probenmaterials abgebremst und interferiert anschließend mit dem anderen Strahl. Durch die unterschiedliche Laufzeit der beiden Strahlen kommt es beim Detektor zu einem Interferenzmuster, das Rückschlüsse auf die Dichteverteilung der Materie innerhalb der Probe erlaubt.

4.8 INTRAVENÖSE KORONARANGIOGRAPHIE⁸¹

Eine der häufigsten Todesursachen in der westlichen Welt ist der Herzinfarkt, ausgelöst durch Verengungen der Herzkranzgefäße (Koronargefäße). Zu ihrer Untersuchung wird dem Patienten ein Katheter durch die Beinarterie in die betroffene Region eingeführt, um das Kontrastmittel Jod für die folgende Röntgenuntersuchung einzuspritzen. Die gesundheitliche Gefahr bei dieser äußerst strapaziösen „**Selektiven Koronarangiographie**“ ist extrem hoch. So kommt es bei 1,5 % der Patienten zu Komplikationen und bei 0,1 % sogar zum Tod.

Aufgrund dessen hat man lange Zeit versucht eine weniger belastende Untersuchungsmethode zu entwickeln, was schließlich zur **Dichromographie** führte.

⁸¹ Vgl. DILL, T. u.a.: Radiation for health. Intravenous coronary angiography with synchrotron radiation, in: European Journal of Physics, Vol. 19, 1998, S. 500 ff.; Hamburger Synchrotron-Strahlungslabor HASYLAB (Hg.): Research at HASYLAB. Examples, Hamburg 2001, S. 67 ff.

Die Idee dieses Verfahrens entwickelte bereits Jacobson 1953. Dichromographie ist eine Form der „**Digitalen Subtraktionsangiographie**“. Dabei macht man sich eine spezielle Eigenschaft des Kontrastmittels Jod zu Nutze. Dieser Stoff ändert nämlich sein Absorptionsverhalten bei einer bestimmten Photonenenergie, der sog. K-Kante, sprunghaft. Unterhalb dieser Energie, die bei 33,17 keV liegt, werden relativ wenig Röntgenphotonen absorbiert, darüber umso mehr. Nun werden zwei Aufnahmen des Herzens gemacht, eine knapp oberhalb, die andere knapp unterhalb dieser Grenze.

Dabei ist der entstehende Kontrastunterschied beim Jod etwa 10000 mal größer als beim umliegenden Gewebe, denn Knochen, Organe und Wasser haben in diesem Energiebereich keine K-Kante. Außerdem kann die Menge des benötigten Kontrastmittels erheblich reduziert werden. Deshalb muss kein Katheter gelegt werden und das Jod kann direkt in die Armvene (intravenös) des Patienten

eingespritzt werden. Durch den Blutkreislauf ist das Mittel bereits um den Faktor 40 abgeschwächt, wenn es das Herz erreicht.

Werden nun die beiden entstandenen Bilder computertechnisch subtrahiert, so kann der Kontrast des Jods um ein Vielfaches hervorgehoben werden. Dabei sollte die Bandbreite der Energie der Röntgenstrahlen 250 eV nicht überschreiten, da die gesamte Energiedifferenz der Strahlen nur etwa 300 eV beträgt. Es sind also zwei monochromatische Strahlen von exakt definierter Wellenlänge und hoher Intensität notwendig, wie man sie nur in Synchrotronstrahlungsquellen findet.

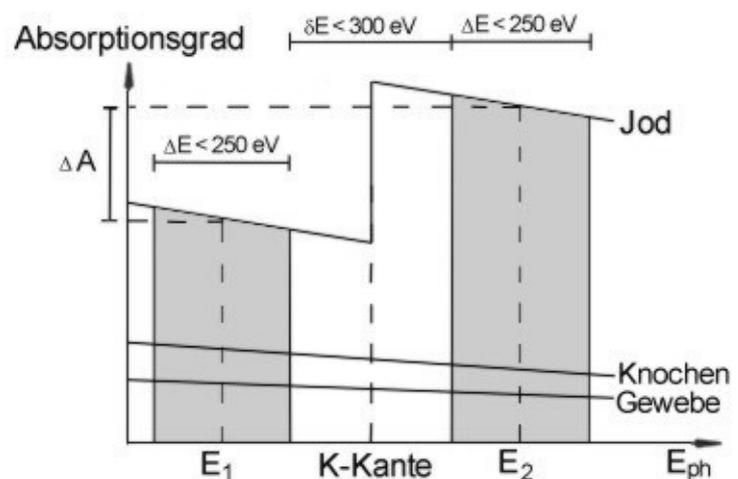


Abb. 23: Absorptionsverhalten von Knochen- und weichem Gewebe und vom Kontrastmittel Jod im Energiebereich seiner K-Kante. Der Absorptionsunterschied ΔA ist beim Jod extrem groß.

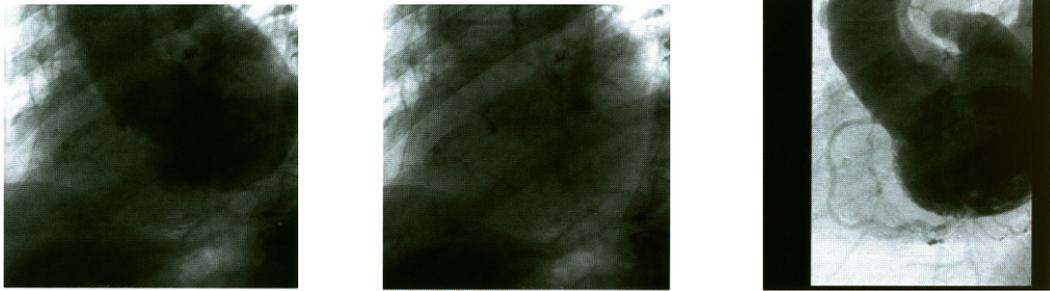


Abb. 24: Drei Aufnahmen derselben Koronararterie. Das Bild links zeigt die Röntgenaufnahme bei einer Energie knapp unterhalb, das mittlere Bild bei einer Energie knapp oberhalb der K-Kante. Das Bild rechts zeigt das Subtraktionsbild.

Im Jahre 1979 wurde die Arbeit zu diesem Verfahren erstmals am SSRL (**S**tanford **S**ynchrotron **R**adiation **L**aboratory) und am VEPP (Institute of Nuclear Physics), Novosibirsk (RUS), begonnen. Zwei Jahre später begann man am HASYLAB mit den Forschungen. Nach der technischen Entwicklung der Anlagen wurde ihre Sicherheit erst durch Tierversuche bestätigt. Die ersten Patienten am SSRL wurden von 1986 bis 1989 untersucht, am HASYLAB ab 1990. Dort wurde das System **NIKOS** (**N**icht-invasive **K**oronarangiographie mit **S**ynchrotronstrahlung) entwickelt. Diese Anlage gliedert sich in sechs Hauptteile:

- Wiggler mit Strahlrohr
- Monochromator
- Sicherheitssystem
- Scan-Vorrichtung
- Detektor
- Computersystem

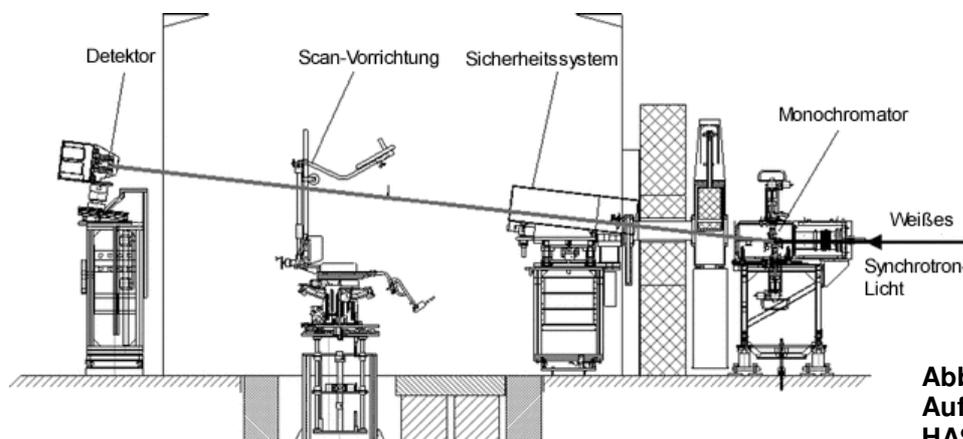


Abb. 25: Schematischer Aufbau der NIKOS-Anlage im HASYLAB

Das System wurde am Speicherring DORIS III an der Beamline des 2,4 m langen Wiggler W2 installiert, dem eine Blende folgt, die den Strahlungsfächer horizontal auf 1,7 mrad beschränkt. Anschließend filtern die Silizium-Kristalle zweier Doppelkristallmonochromatoren die gewünschten Strahlenergien aus der „weißen“ Synchrotronstrahlung heraus und fokussieren die Röntgenstrahlen aufgrund ihres Biegeradius von 10 m auf einen Punkt unmittelbar vor dem 3,5 m entfernten Patienten. Die Strahlen haben dort einen Durchmesser von 0,5 mm und bei einem Strahlstrom von 54 mA im Speicherring beträgt der Photonenfluss an diesem Punkt $2,7 \cdot 10^{11}$ Photonen pro Quadratmillimeter und Sekunde (bei 0,1 % Bandbreite). Das entspricht einer Energiedosis⁸² von 50 mGy pro Scan und 220 mGy für die gesamte Untersuchung. Das sind nur 50 % der Energiedosis der „Selektiven Koronarangiographie“.

Nachdem die Strahlen den Monochromator verlassen haben, passieren sie zunächst das Sicherheitssystem, in dem der Photonenfluss und damit die Energiedosis genau überwacht werden. Wird eine Dosis von über 64 Gy pro Sekunde gemessen, so wird der Strahl von drei Blenden innerhalb von 10 ms unterbrochen.

Die Scan-Vorrichtung mit dem Sitz des Patienten ist horizontal, vertikal und bezüglich des Einfallwinkels der Röntgenstrahlen verstellbar. Wie alle Systeme zur Dichromographie arbeitet auch NIKOS im Liniensystem, d.h. der Patient wird vom Strahl Linie für Linie abgetastet. Für eine Linie werden 0,8 ms, für das gesamte Bild 250 ms benötigt. Die Geschwindigkeit, mit der die Aufnahmen gemacht werden, ist nicht nur wegen der Reduzierung der Strahlenbelastung nötig, sondern auch aus dem Grund, weil die Aufnahme simultan, innerhalb der Zeitspanne eines Herzschlags erfolgen muss. Ansonsten könnte es zur Verfälschung der Messergebnisse kommen. Schließlich werden die Röntgenstrahlen von einem Detektor, einer Art Ionisationskammer, erfasst und vom Computersystem ausgewertet.

Insgesamt wurden in der Zeit von 1990 bis zum Abschluss der Forschungsarbeiten 1999 379 Patienten erfolgreich mit NIKOS untersucht.

⁸² Die Energiedosis wird in Gray [Gy = J/kg] angegeben.

4.9 WEITERE ANWENDUNGSVERFAHREN⁸³

Es gibt noch eine lange Reihe anderer Verfahren, deren Prinzipien jedoch hauptsächlich auf den oben genannten Methoden basieren. So lässt sich durch Lumineszenzspektroskopie, der Röntgenfluoreszenzanalyse sehr ähnlich, das „Leuchtverhalten“ bestimmter, beispielsweise in Leuchtröhren eingesetzter Stoffe, nach Anregung mit Synchrotronstrahlung untersuchen. Auch in der Clusterphysik hat sie sich als ein bedeutendes Untersuchungsinstrument erwiesen. Die Eigenschaften und das sonderbare Verhalten solcher symmetrischer „Haufen“ von Atomen lassen sich besonders durch den Einsatz dieser hochenergetischen Strahlung erforschen.

4.10 FEL (Der Freie-Elektronen-Laser)⁸⁴

Seit August 2005 steht den Forschern bei DESY der VUV-FEL (**V**acuum-**U**ltra-**V**iolett **F**ree-**E**lectron-**L**aser) zur Verfügung. Dieser 170 m lange Linearbeschleuniger beschleunigt „Elektronen-bunches“ mit ca. sechs Milliarden Teilchen pro Paket mit supraleitenden Resonatoren zuerst auf vier, dann auf 150, auf 400 und schließlich auf 1000 MeV (= 1 GeV). Da bei der linearen Beschleunigung nur wenig Strahlung emittiert wird, werden die Pakete mit einer Länge von 48 µm und einer Breite von 67 µm am Ende des Beschleunigers durch einen 30 m langen Undulator gelenkt. Dabei emittieren die Elektronenpakete Strahlungsblitze, die die vorauslaufenden Pakete einholen und sie ähnlich einem Resonator entweder beschleunigen oder abbremsen. Schließlich ist dem Elektronenstrahl eine Periode aufgeprägt, die gleich der zu erzeugenden Wellenlänge ist, was dazu führt, dass sich die emittierten Strahlungsblitze überlagern und verstärken. Dieses Prinzip wird SASE (**S**elf-**A**mplified **S**pontaneous **E**mission = Selbstverstärkende spontane Emission) genannt. Am Ende des Undulators erhält man schließlich einen Strahlungsblitz mit einer Energie von 192,8 eV und einer Wellenlänge von 6,4 nm. Die Spitzenleistung liegt bei 2,3 GW und die durchschnittliche Brillanz⁸⁵ bei 10^{23} .⁸⁶

⁸³ Vgl. HASYLAB, Informationsbroschüre des HASYLAB, S. 22 f., S. 38 f.

⁸⁴ Ebd., S.48 f.; HASYLAB (11.01.2006): Vacuum-Ultraviolet FEL, URL: <http://www-hasyllab.desy.de/facility/fel/vuv/main.htm>.

⁸⁵ In [Photonen/sec/mm²/mrad²/0,1%BW] . Siehe Kap. 2.5 Photonenfluss und Brillanz, S. 16.

⁸⁶ Trotz den geplanten 6 nm, erreicht man derzeit erst etwa 30 nm Wellenlänge.

Damit ist der VUV-FEL die bisher intensivste Strahlungsquelle im weichen Röntgen- und UV-Bereich. Man könnte diese Anlage auch als Quelle vierter Generation bezeichnen. Durch die hohe Zeitauflösung⁸⁷ und die vollständig kohärente Undulatorstrahlung, lassen sich nicht nur die bereits erwähnten Experimente verbessern, sondern auch beispielsweise chemische Reaktionen zeitabhängig aufzeichnen. Wegen der kurzen Dauer der Strahlungsblitze, in der bei chemischen Reaktionen die atomaren Veränderungen auftreten, lässt sich eine Vielzahl von Bildern des Vorgangs aufnehmen, ohne dass diese verschwommen sind. So kann schließlich eine Art Video erstellt werden, die den Reaktionsvorgang im Detail zeigt.

⁸⁷ Ein Strahlungsblitz dauert in etwa eine Billionstel Sekunde.

5. AUSBLICK

5.1 XFEL (X-Ray Free-Electron-Laser)⁸⁸

Ab dem Jahr 2006 soll auf dem DESY-Gelände ein weiterer Röntgenlaser entstehen: Der XFEL, ein Freier-Elektronen-Laser, der auch harte Röntgenstrahlung liefern wird, soll bis 2012 fertig gestellt und betriebsbereit sein.

Dieser neuartige Röntgenlaser wird ebenfalls nach dem SASE-Prinzip arbeiten, jedoch sollen die etwa 32500 Elektronenpakete auf eine Energie von ca. 20 GeV beschleunigt werden. Am Ende der Beschleunigungsphase werden sie einen 150 m langen Undulator passieren, in dem sie Strahlung mit einer Divergenz von nur 0,8 μ rad und einer durchschnittlichen Brillanz⁸⁹ von $4,9 \cdot 10^{25}$ emittieren werden. Die Wellenlänge der nur 100 fs langen Strahlungsblitze kann zwischen 0,1 nm und 0,5 nm variiert werden. Anschließend wird der Röntgenstrahl auf fünf Strahlrohre und zehn Messplätze verteilt, an denen die Experimente durchgeführt werden.

Wegen der extrem kurzen Pulsdauer von nur 100 fs können künftig chemische Reaktionen noch besser dargestellt und möglicherweise sogar lebende Zellen untersucht werden, denn diese nehmen während der kurzen Belichtungszeit keinen für das Experiment relevanten Schaden.

5.2 MEINUNG EINES FORSCHERS

Im Zuge meiner Recherchen hatte ich das Glück einen Experten für Synchrotronstrahlung kennenzulernen. Herr Dr. Julian Stangl, vom Institut für Halbleiter- und Festkörperphysik der Johannes-Kepler-Universität Linz, ist Nutzer von Synchrotronstrahlung und ließ mir nicht nur wertvolle Unterlagen zum Thema meiner Arbeit zukommen, sondern hat mir auch ermöglicht ein (schriftliches) Interview mit ihm durchzuführen.

⁸⁸ DESY (11.01.2006): Der VUV-FEL, URL: <http://xfelinfo.desy.de/xfel-pilotanlage/1/index.html>;
HASYLAB (11.01.2006): FEL Overview, URL: <http://www.hasylab.de/facility/fel/overview>.

⁸⁹ In [Photonen/sec/mm²/mrad²/0,1%BW] . Siehe Kap. 2.5 Photonenfluss und Brillanz, S. 16.

Interview mit Herrn Dr. Stangl vom 17.01.2006

Herr Dr. Stangl, inwieweit haben bzw. hatten Sie Umgang mit Synchrotronstrahlung?

Wir führen regelmäßig Messungen an Synchrotronstrahlungsquellen durch, typischerweise ca. 6-8 mal je eine Woche pro Jahr. In unserem Fall geht es darum, Verspannungen in einkristallinen Halbleiterschichten zu messen: Um schnellere Bauelemente zu entwickeln, werden heutzutage verschiedene Halbleitermaterialien kombiniert, indem dünne Schichten eines Halbleiters auf einem anderen Halbleiter abgeschieden werden. Diese dünnen Schichten haben Eigenschaften, die im Volumsmaterial nicht vorkommen. Da die verschiedenen Halbleiter verschiedene Atomabstände ihrer Kristallgitter aufweisen, kommt es in den dünnen Schichten zu Verspannungen, die wiederum die elektronischen Eigenschaften beeinflussen. Daher ist eine sorgfältige Charakterisierung der Verspannungen besonders wichtig und dafür ist Röntgenbeugung eine bestens geeignete Methode. Da die Schichten extrem dünn sein können (im Bereich von wenigen Atomlagen) und das Volumen an streuendem Material sehr klein ist, braucht man für die Untersuchungen hochintensive Röntgenquellen, wie sie an Synchrotronstrahlungsquellen zur Verfügung stehen.

Lässt sich der Stellenwert dieses „Instruments der Hochenergiephysik“ mit etwas anderem in der Physik vergleichen?

Diese Frage nach dem Stellenwert in der Physik ist schwierig. Vielleicht kann man sagen, dass Synchrotronstrahlungsquellen, neben Neutronenquellen, für den Bereich der Materialforschung das sind, was große Teilchenbeschleuniger im Bereich der Hochenergiephysik sind, oder Weltraumteleskope im Bereich der Astronomie. Neue Synchrotronstrahlungsquellen sind in der Regel so teuer, dass sie kaum mehr von Ländern finanziert werden, sondern von Staatengemeinschaften, und dementsprechend werden sie auch von Forschern aus aller Welt genutzt.

Worin sehen Sie den größten Unterschied zwischen einer „herkömmlichen“ Strahlungsquelle und einer Synchrotronstrahlungsquelle?

Das kommt auf den Blickwinkel an. Für einen Röntgenphysiker ist die Antwort: „In der Brillanz“: Verglichen mit einer Quelle im Labor hat man am Synchrotron in der Regel (das kommt auf die genutzte Wellenlänge und darauf an, wie monochromatisch der Strahl sein

muss, wie groß der Strahlquerschnitt sein darf etc.) zwischen einem Faktor 100 und einem Faktor 10^8 mehr an Intensität zur Verfügung. In unserem Fall haben wir am Synchrotron etwa um einem Faktor 10^4 bis 10^6 mehr „Saft“.

Ein weiterer Unterschied ist, dass man am Synchrotron die Wellenlänge kontinuierlich variieren kann, während man im Labor die charakteristische Strahlung des Anodenmaterials der Röhre nutzt – also bestenfalls zwischen vier oder fünf Wellenlängen auswählen kann.

Als Budgetbeauftragter im Wissenschaftsministerium oder einem anderen einschlägigen Gremium wäre die Antwort: „Der Preis...“.

Hat eine Synchrotronstrahlungsquelle neben der großen Zahl an Vorteilen auch Nachteile?

Neben bzw. wegen den Kosten haben Synchrotrons einen ganz entscheidenden Nachteil: es gibt zu wenige davon. Viele Dinge kann man überhaupt nur an Synchrotronquellen durchführen. Es geht dort nicht nur schneller oder besser als im Labor, es geht im Labor oft gar nicht. Daher möchten wesentlich mehr Forscher am Synchrotron messen, als Messzeit zur Verfügung steht. Der Prozess ist daher so, dass man meist zwei Mal pro Jahr Messzeit beantragen kann, d.h. man schreibt das Forschungsvorhaben auf und stellt einen Antrag, der von einem Gutachtergremium (...) beurteilt wird. Ist der Antrag überdurchschnittlich gut, bekommt man Messzeit, ansonsten muss man es ein halbes Jahr später erneut versuchen. Dadurch dauert es oft lange (...), bis man eine Idee zu einer Messung umsetzen kann.

Eine andere Art von Nachteilen ist (war) die erhöhte Strahlenbelastung. Nun, es besteht in den neuen Anlagen keine erhöhte Strahlenbelastung mehr (...), wie das vor 10 Jahren noch gelegentlich der Fall war. Es wird auch keine große Menge an strahlendem Material erzeugt. Teile des Beschleunigers werden im Betrieb „aktiviert“ und sind radioaktiv; wenn sie ausgebaut werden, müssen sie manchmal einige Zeit in abgeschirmten Bereichen stehengelassen werden, bis sie repariert oder entsorgt werden können. Die Halbwertszeiten sind aber meist im Bereich von Tagen.

Die Anlagen brauchen viel Energie – manche so viel wie eine kleine Stadt -, was man auch als Nachteil sehen könnte. Darüber hinaus halten die Proben manchmal die intensive Röntgenstrahlung nicht aus und degradieren [„verdampfen“] im Strahl.

Warum strebt man nach immer stärkeren Quellen?

Vielfach will man immer kleinere Proben untersuchen. Beispiele sind die Nanotechnologie oder die Strukturaufklärung von biologischen Makromolekülen (z.B. Proteinen). Aber auch

wenn die Proben „groß“ sind, sucht man oft nach der Streuung an Defekten, die extrem schwach ist. Daher gibt es immer den Bedarf nach noch stärkeren Quellen.

Kann man an eine Grenze gelangen, an der die Weiterentwicklung der Strahlungsquellen nicht mehr rentabel, nützlich oder gar nicht mehr möglich wäre?

Ich glaube nicht, dass es eine Grenze der Nützlichkeit gibt, obwohl die Entwicklungen zeigen, dass sich die Anwendungen mit der Quellenstärke ändern [z.B. beim XFEL].

Eine Grenze der Möglichkeit könnte es geben, aber ich denke nicht, dass diese in absehbarer Zukunft erreicht wird.

Die Frage der Rentabilität ist wesentlich schwieriger. An Synchrotrons wird zum Großteil Grundlagenforschung betrieben, die meist erst mit großer Nachlaufzeit von einigen Jahrzehnten zu einer „rentablen“ Anwendung führt, oft auch in ganz anderen Bereichen als ursprünglich vorhergesagt. In diesem Sinne ist es problematisch von Rentabilität zu sprechen. Auch wenn man zum Beispiel medizinische Anwendungen betrachtet, ist die Frage, wieviel Heilerfolg wieviel Investition wert ist, sehr problematisch. Die Frage ist daher eher eine der Finanzierbarkeit. Hier ist es wie überall in der Forschung: Es gibt immer jene, die von einer Sache überzeugt sind und für sie eintreten, und jene, die darauf hinweisen, dass die Mittel zur Finanzierung begrenzt sind. In Österreich ist es beispielsweise so, dass wir einen Beitrag von ca. 0,5 % zum ESRF Jahresbudget leisten und dafür die Möglichkeit haben dort Messzeiten zu beantragen (...). Außerdem ist Österreich Mitglied des Synchrotrons „ELETTRA“ in Triest.

Wodurch würde eine Grenze der Möglichkeit festgesetzt werden? Eher durch die technische Realisierbarkeit oder sogar durch Naturgesetze?

Die technische Realisierbarkeit kann bestimmt schwierig sein, allerdings ist das meist eher eine Frage der Leistbarkeit. Eine Grenze könnte man sich dahingehend vorstellen, dass zum Beispiel irgendwann Monochromatoren die intensiven Röntgenstrahlen nicht mehr überleben, sondern ionisiert werden. Aber mit solchen Aussagen muss man vorsichtig sein, es könnte ja jemandem ein anderes Verfahren zur Monochromatisierung einfallen (...).

In wieweit glauben Sie, wird der neue Röntgenlaser XFEL in Hamburg die Forschung mit Synchrotronstrahlung beeinflussen?

XFELs werden an einigen Orten gebaut, einer davon in Hamburg. Die Brillanz des XFEL wird nochmals um viele Größenordnungen über der von Synchrotrons der dritten Generation liegen. Allerdings ist die Strahlung beim XFEL in sehr kurze Pulse im Nanosekunden-Bereich konzentriert, sodass die mittlere Leistung gegenüber Synchrotrons „nur“ um wenige Größenordnungen steigt. Für zeitaufgelöste Experimente, die nur kurze Pulse benötigen, werden XFELs aber eine neue Ära einleiten. Allerdings gibt es zusätzliche Dinge zu beachten. In der Untersuchung von biologischen Makromolekülen etwa bedeutet der XFEL, dass man nur mehr ein Molekül braucht, um ein Beugungsbild zu erhalten, während man zur Zeit aus den Molekülen Kristalle züchten muss, was den Flaschenhals der Forschung auf diesem Gebiet darstellt. Allerdings wird das Molekül im Strahl völlig zerstört, da der Puls so intensiv ist, dass alle Bindungen des Molekül ionisiert werden. Ein Beugungsbild bekommt man nur, weil der Streuprozess schneller ist als die „Explosion“ des Moleküls. Das Streubild wird daher relativ schlecht sein und man muss viele Moleküle messen und den Mittelwert der Messungen bilden, um die gewünschte Information zu erhalten. Dadurch wird die Messung wohl kaum weniger lange dauern als jetzt, aber man muss, wie gesagt, keine Kristalle züchten und kann auch Moleküle vermessen, die sich (derzeit noch) nicht kristallisieren lassen. Damit wird sich das Gebiet der Proteinkristallographie wohl sehr verändern. Der XFEL wird aber zudem Dinge erlauben, die jetzt unmöglich sind: Beispielsweise Messungen an dynamischen Prozessen, die so schnell sind, dass man mit heutigen Quellen in einem kurzen Puls (...) einfach kein ausreichendes Streusignal erhalten kann.

Ist es denkbar, dass künftig kleinere Synchrotronstrahlungsquellen beispielsweise in Krankenhäusern oder anderen Einrichtungen praktische Anwendung finden?

Es gibt in der Tat Entwicklungen in Richtung von „Westentaschen-Synchrotrons“, die allerdings gar nicht wie ein Synchrotron (also mit einem Speicherring) funktionieren. Diese Geräte, die immerhin den Platz eines großen Labors benötigen, basieren auf einem sehr stark gepulsten Laser, der auf ein Metalltarget [Metallziel] gerichtet wird und dieses während der Pulse verdampft. Schließlich entsteht im Metallplasma intensive charakteristische Röntgenstrahlung. Die Anwendung dieser Anlagen wird aber eher im Bereich zeitaufgelöster Studien (im Bereich von 100 ns) liegen, weniger im Bereich der medizinischen Anwendungen. Man kann sich aber gut vorstellen, dass es zum Beispiel für medizinische Anwendungen optimierte Beamlines gibt. Es gibt auch mittlerweile einige kleinere, „billigere“

Synchrotrons (z.B. ANKA, SLS), da man für viele Materialforschungsprogramme nicht unbedingt die leistungsfähigsten Instrumente verwenden muss.

Kann man mit dem Bau einer Synchrotronstrahlungsquelle in Österreich rechnen?

Angesichts der Budgetlage in Österreich ist die Forschergemeinde schon froh, wenn Österreich die ESRF-Mitgliedschaft aufrecht erhält. Deshalb ist es eher unwahrscheinlich, dass Österreich sich ein eigenes Synchrotron leisten wird, obwohl es Pläne davon gibt. Ich persönlich halte es für sinnvoller, Forschungsmittel in Beamlines an hoch entwickelten, großen Synchrotrons (z.B. der ESRF) zu investieren, als ein eigenes „Sparsynchrotron“ zu realisieren.

Ich danke Ihnen herzlichst dafür, dass Sie sich Zeit genommen haben, meine Fragen so ausführlich zu beantworten.

Nicht nur das Interview, sondern die gesamte Arbeit hat meines Erachtens nach zumindest einen Einblick in das so weitläufige Thema „Synchrotronstrahlung“ gegeben. Vor dem Beginn der Arbeiten war mir keineswegs bewusst, wie aktuell und wichtig die Forschung auf diesem Gebiet gegenwärtig ist. So brachte mir die Beschäftigung mit diesem Thema viele neue Erfahrungen und lässt mich nun ein wenig mehr erahnen, welchen Stellenwert Forschung, nicht nur auf diesem Gebiet, sondern auch in allen anderen Bereichen der Wissenschaft, eigentlich besitzt.

6. GLOSSAR

Anode: Positiv geladenes Bauteil.

Emittanz⁹⁰: Maß für den Querschnitt des Teilchenstrahls in Abhängigkeit bestimmter Anlagenparameter.

Feldgradient: Maß für das Feld eines Magneten. Gibt Richtung und Wert der größten Änderung des Magnetfeldes in einem Punkt des Feldes an.

Hertzscher Dipol: Schwingen eine positive und eine negative Ladung um einen gemeinsamen Punkt, so ändert sich die Stärke des elektrischen und magnetischen Feldes in ihrer Umgebung periodisch und eine elektromagnetische Welle löst sich ab. Dieses System wird nach Heinrich Hertz als Hertzscher Dipol bezeichnet.

Kathode: Negativ geladenes Bauteil.

Kosmische Körper: Zu den kosmischen Körpern gehören u.a. Neutronensterne (Überreste implodierter Sterne), Schwarze Löcher (kollabierte Neutronensterne) und Quasare (= Quasistellare Radioquellen, Charakter noch nicht eindeutig geklärt).

Plancksche Konstante: Nach dem Physiker Max Planck benannte quantenmechanische Konstante. Wert⁹¹: $6,626 \cdot 10^{-34}$ [kg*m²/s]

Relativistischer Effekt: Beobachtbarer Effekt, der aus der Speziellen Relativitätstheorie Einsteins folgt. Tritt bei relativistisch ($v \approx c$) bewegten Körpern auf. Dazu zählen in erster Linie Zeitdehnung, Längenkontraktion und Massenzunahme.

Ruhenergie: Jeder Masse kann nach Einstein eine Ruhenergie von der Größe $m_0 \cdot c^2$ (m_0 = Masse des sich in Ruhe befindlichen Teilchens) zugeordnet werden.

Spektrum: Hier: Aufteilung der elektromagnetischen Strahlung in ihre verschiedenen Wellenlängen.

Stehende Welle⁹²: Zwei Wellen mit gleicher Amplitude und Frequenz laufen in entgegengesetzte Richtungen und überlagern sich. Anschließend werden sie an den Enden der Resonatoren in der Weise reflektiert, dass sich der oben beschriebene Vorgang wiederholt. Es entstehen somit Bereiche, in denen sich die Feldstärke nie ändert (Schwingungsknoten) und solche, in denen eine maximale Auslenkung auftritt (Schwingungsbäuche). Sind diese Bereiche ortsfest, so spricht man von einer stehenden Welle.

Strahlstrom: Maß für die Anzahl der Ladungsträger in einem Beschleunigerring.

⁹⁰ Vgl. FZK, Synchrotronstrahlung für Forschung und Entwicklung, S. 265 f.

⁹¹ Vgl. KOCH, Physik, S. 1354.

⁹² Ebd., S. 482 f.

NACHWORT

Die gesamte Fachbereichsarbeit wurde im Microsoft® Word XP verfasst. Alle Grafiken wurden mit Corel © Photo-Paint™ 8.0 bzw. mit Texas Instruments Derive™ 5 erstellt. Sonstige Bilder und Fotografien wurden z.T. mit Corel © Photo-Paint™ 8.0 bzw. mit Adobe® Photoshop® 7.0 bearbeitet.

Mein Dank gilt in erster Linie meiner Mutter für die Förderung meiner Interessen und meinem Physiklehrer Herrn Prof. Mag. Josef Gröchenig für die Betreuung der Fachbereichsarbeit.

Besonders danken möchte ich Herrn Dr. Julian Stangl von der Johannes Kepler Universität Linz sowohl für das Interview als auch für die Bereitstellung wertvoller Unterlagen sowie Herrn Prof. Dr. Urbaan Titulaer, ebenfalls von der Universität Linz. Großer Dank gebührt allen Mitarbeitern des DESY und des HASYLAB, v.a. Frau Veronika Werschner vom Büro für Öffentlichkeitsarbeit, Frau Outi Wulff für die vertrauensvolle Bereitstellung von Büchern aus dem DESY-Bibliotheksbestand, Frau Maja Stolper und Herrn Hartmut Preissner, ebenfalls von der DESY-Bibliothek und dem Bereichsreferenten für Forschung mit Synchrotronstrahlung Herrn Dr. Peter Gürtler. Großen Dank auch an Frau Dr. Christine Bohnet vom Forschungszentrum Rossendorf (Dresden) und an Frau Inge Arnold vom Büro für Öffentlichkeitsarbeit am Forschungszentrum Karlsruhe. Weiters danke ich Herrn Tullio Basaglia vom Informationsbüro am Forschungszentrum CERN (CH) sowie Frau Chantal Argoud von der ESRF in Grenoble.

LITERATURVERZEICHNIS

WILLE, Klaus: Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, Stuttgart 1996

RAITH, Wilhelm (Hg.): Teilchen, Berlin 1992, (= Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 4)

GORBECHT, Heinrich u.a.: Elektrizität und Magnetismus, Berlin 1987, 7. Aufl., (= Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 2)

KOCH, Stephan W. (Übersetzungsherausgeber): Physik, Weinheim 2003, 6. Aufl. der Originalausgabe

MESCHEDE, Dieter (Hg.): Gerthsen Physik, Berlin Heidelberg 2004, 22. Aufl.

BRÖCKER, Bernhard: Atomphysik. Tafeln und Texte, München 1985, (= dtv-Atlas), 3. Aufl.

HECHT, Eugene: Optik, Oldenbourg 1999, 2. Aufl.

GÖBEL, Rudolf (Hg.): Wissensspeicher Physik, Berlin 1996, 1. Aufl.

WEIDL, Erhard: Physik. Relativitätstheorie, Atom- und Kernphysik, München 1999, (= mentor Abiturhilfe)

5. Komitee für Forschung mit Synchrotronstrahlung 1999-2002 (Hg.): Forschung mit Synchrotronstrahlung in Deutschland. Status und Perspektiven, 2001

Hamburger Synchrotron-Strahlungslabor HASYLAB (Hg.): HASYLAB, Hamburg 2000

Hamburger Synchrotron-Strahlungslabor HASYLAB (Hg.): Research at HASYLAB. Examples, Hamburg 2001

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY (Hg.): Wer wir sind, was wir tun. DESY kurz gefasst, Informationsschrift, Hamburg 2004

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (Hg.): Synchrotronstrahlung für Forschung und Entwicklung, (= FZK Nachrichten, Jahrgang 32 4/2000)

DILL, T. u.a.: Radiation for health. Intravenous coronary angiography with synchrotron radiation, in: European Journal of Physics, Vol. 19, 1998, S. 500 ff.

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY (Hg.): Licht der Zukunft, CD-Rom, Hamburg 2000

Quellen aus dem Internet:

UNIVERSITÄT FREIBURG (09.09.2005): Einführung in die Astronomie und Astrophysik II, URL: http://www.kis.uni-freiburg.de/~ovdluhe/Lehre/Einfuehrung/Einf_3_1.pdf

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY (03.01.2006): LINAC II & PIA, URL: http://min.desy.de/linaciipia/index_ger.html

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY (22.09.2005): Das europäische Röntgenlaserprojekt XFEL, URL: <http://xfelinfo.desy.de/de/supraleitung-niob/2>

UNIVERSITÄT STUTTGART (11.01.2006): Strukturaufklärung an amorphen Systemen, URL: http://www.ipc.uni-stuttgart.de/bertagnolli/akbertagnolli2_d.html

Hamburger Synchrotron-Strahlungslabor HASYLAB (12.01.2006): Röntgen-Mikrotomographie, URL: <http://www.desy.de/f/jb99/desy99-102-111.pdf>

Hamburger Synchrotron-Strahlungslabor HASYLAB (11.01.2006): Vacuum-Ultraviolet FEL, URL: <http://www-hasylab.desy.de/facility/fel/vuv/main.htm>

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY (11.01.2006): Der VUV-FEL, URL: <http://xfelinfo.desy.de/xfel-pilotanlage/1/index.html>

Hamburger Synchrotron-Strahlungslabor HASYLAB (11.01.2006): FEL Overview, URL: <http://www.hasylab.de/facility/fel/overview>

OnVista Media GmbH (03.01.2006): Aufbau und Funktion einer Röntgenröhre, URL: http://www.onmeda.de/lexika/strahlenmedizin/roentgenstrahlung_undroentgenroehre.html

WIKIPEDIA, Die freie Enzyklopädie (11.01.2006): Röntgenfluoreszenzanalyse, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/R%C3%B6ntgenfluoreszenzanalyse>

Die Anlagenparameter von DORIS III bzw. PETRA II wurden den folgenden Internetseiten des HASYLAB entnommen (08.09.2005):

<http://www-hasylab.desy.de/facility/doris/parameters.htm>

<http://www-hasylab.desy.de/facility/petra/parameters.htm>

Alle verwendeten Formeln zur Beschreibung der Synchrotronstrahlung wurden der folgenden Internetseite des HASYLAB entnommen⁹³ (07.09.2005):

<http://www.hasylab.de/facility> → Formulas

⁹³ Ausgenommen Kap. 2.2 Winkelverteilung, S. 11 u. Kap. 2.3 Spektrum, S. 13.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNG	SEITE	QUELLE
Abb.1	6	DESY (03.12.2005): URL: http://www.desy.de/pr-info/ausstellungen/wander/pdfs/96-TD-S001-H.pdf
Abb.2	9	KFS, Forschung mit Synchrotronstrahlung in Deutschland, S.13
Abb.3	12	RAITH, Teilchen, S. 236
Abb.4	13	Selbst erstellt
Abb.5	17	Selbst erstellt auf: HASYLAB (12.01.2006): URL: http://www.hASYLAB.de/facility → Formulas → Bending magnet spectrum (calc.)
Abb.6	22	Selbst erstellt
Abb.7	25	Selbst erstellt
Abb.8	26	RAITH, Teilchen, S. 527
Abb.9	28	Selbst erstellt
Abb.10	30	Selbst erstellt
Abb.11	31	Selbst erstellt
Abb.12	33	Selbst erstellt
Abb.13	35	DESY (01.02.2006): URL: http://www.hASYLAB.de/facility → Exp. Stations
Abb.14	35	UNIVERSITÄT ERLANGEN (30.01.2006): URL: http://www.didaktik.physik.uni-erlangen.de/grundl_d_tph/exp_forsc/exp_forsc_03.html
Abb.15	35	Eigene Fotografie
Abb.16	37	Eigene Fotografie
Abb.17	38	HASYLAB, Informationsbroschüre des HASYLAB, S. 19
Abb.18	39	HASYLAB, Informationsbroschüre des HASYLAB, S. 35
Abb.19	39	DESY (01.02.2006): URL: http://www.desy.de/pr-info/desyhome/gfx/presse/fotos/hASYLAB
Abb.20	40	Selbst erstellt
Abb.21	43	KFS, Forschung mit Synchrotronstrahlung in Deutschland, S. 38
Abb.22	44	HASYLAB (12.01.2006): URL: http://www.desy.de/f/jb99/desy99-102-111.pdf , S. 108
Abb.23	45	Selbst erstellt
Abb.24	46	HASYLAB, Research at HASYLAB, S. 68
Abb.25	46	Crystallography Journals Online (01.02.2006): URL: http://journals.iucr.org/s/issues/2003/03/00/wl2007/wl2007fig2.html

Ich erkläre, dass ich die Fachbereichsarbeit ohne fremde Hilfe verfasst und dazu nur die angegebene Literatur verwendet habe. Außerdem habe ich die Arbeit einer Korrektur unterzogen und Tippfehler ausgebessert.

Kleblach-Lind, im Februar 2006

.....

PROTOKOLL

- Mai 2005:** Entschluss eine Fachbereichsarbeit zu schreiben und Festlegung des Themenbereichs
- 07.07.2005:** Erste Begutachtung der (Schul-)Literatur
- 22.09. – 23.09.2005:** Festlegung des Titels der FBA
- 26.09.2005:** Unterzeichnung des Anmeldeformulars
- 08.10. – 12.10.2005:** Erste Begutachtung der Literatur durch den betreuenden Lehrer
- 21.09.2005:** Grobe Festlegung des Inhalts der FBA
- 19.10.2005:** Schulbibliotheksbesuch
- 24.10.2005:** Abgabe einer ersten Gliederung der FBA
- 28.10.2005:** Abgabe der ersten Rohfassung (Kapitel 1, 2 und 3)
- 08.11.2005:** Besprechung der Fassung vom 28.10.2005
- 25.11.2005:** Schulbibliotheksbesuch
- 05.12. – 09.12.2005:** Reise nach Hamburg, Besuch des DESY und des HASYLAB
- 09.12.2005:** Abgabe einer weiteren Rohfassung
- 21.12.2005:** Besprechung der Fassung vom 09.12.2005
- 16.01.2006:** Kurzbesprechung der Fotografien und der Durchführung des Interviews
- 16.01. – 17.01.2006:** Durchführung des Interviews
- 20.01.2006:** Abgabe einer vollständigen Fassung
- 27.01.2006:** Besprechung der Fassung vom 20.01.2006
- 30.01.2006:** Abgabe der verbesserten Fassung vom 27.01.2006
- 01.02.2006:** Besprechung der Fassung vom 30.01.2006
- 02.02.2006:** Abgabe des Vorwortes, Glossars und der verwendeten Abbildungen, Kurzbesprechung
- 03.02.2006:** Erneute Besprechung der Fassung vom 30.01.2006, Besprechung des Vorwortes, des Glossars und der verwendeten Abbildungen
- 07.02.2006:** Abgabe der ersten Endfassung
- 13.02. u. 15.02. u. 18.02.2006:** Besprechungen der Fassung vom 07.02.2006
- 20.02.2006:** Kurzbesprechung der Fassung vom 07.02.2006
- 23.02.2006:** Druck der FBA