

BestMasters

Paul Schütze

Transversale Strahldynamik bei der Erzeugung kohärenter Synchrotronstrahlung



Springer Spektrum

BestMasters

Mit „BestMasters“ zeichnet Springer die besten Masterarbeiten aus, die an renommierten Hochschulen in Deutschland, Österreich und der Schweiz entstanden sind. Die mit Höchstnote ausgezeichneten Arbeiten wurden durch Gutachter zur Veröffentlichung empfohlen und behandeln aktuelle Themen aus unterschiedlichen Fachgebieten der Naturwissenschaften, Psychologie, Technik und Wirtschaftswissenschaften.

Die Reihe wendet sich an Praktiker und Wissenschaftler gleichermaßen und soll insbesondere auch Nachwuchswissenschaftlern Orientierung geben.

Springer awards „BestMasters“ to the best master's theses which have been completed at renowned Universities in Germany, Austria, and Switzerland.

The studies received highest marks and were recommended for publication by supervisors. They address current issues from various fields of research in natural sciences, psychology, technology, and economics.

The series addresses practitioners as well as scientists and, in particular, offers guidance for early stage researchers.

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13198>

Paul Schütze

Transversale Strahldynamik bei der Erzeugung kohärenter Synchrotronstrahlung

 Springer Spektrum

Paul Schütze
Hamburg, Deutschland

Masterarbeit Karlsruher Institut für Technologie, 2015.

u.d.T. Paul Schütze: „Untersuchung der transversalen Strahldynamik bei der Erzeugung kohärenter Synchrotronstrahlung“

BestMasters

ISBN 978-3-658-20385-6

ISBN 978-3-658-20386-3 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-20386-3>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen der Beschleunigerphysik	5
2.1	Beschleunigung geladener Teilchen	5
2.2	Das Synchrotron	7
2.3	Strahldynamik	8
2.3.1	Transversale Strahldynamik	9
2.3.2	Longitudinale Strahldynamik	13
2.4	Synchrotronstrahlung	16
2.5	Kohärente Synchrotronstrahlung	19
2.6	Microbunching-Instabilitäten	20
3	ANKA	23
3.1	Vorbeschleuniger	23
3.2	Speicherring	23
3.3	Kurzbunchbetrieb	25
3.4	Beamlines	28
3.4.1	Visible Light Diagnostics Beamline	28
3.4.2	Infrarot Beamlines	31
4	Untersuchung von transversalen und longitudinalen Effekten von Microbunching-Instabilitäten an ANKA	33
4.1	Messmethoden	33
4.1.1	THz-Signal	33
4.1.2	Bunch-By-Bunch Feedbacksystem	36
4.2	Ergebnisse	38

5	Aufbau eines Systems zur zeitaufgelösten Messung des horizontalen Strahlprofils	45
5.1	Funktionsweise und Aufbau	46
5.1.1	Optischer Aufbau	46
5.1.2	Galvanometrischer Spiegel	48
5.1.3	Fast Gated Intensified Camera	50
5.1.4	Steuerung des Experiments	53
5.2	Charakterisierung des Systems	57
5.2.1	Messung der optischen Gatebreite	58
5.2.2	Zeitliche Zuordnung der Synchrotronstrahlungspulse	59
5.3	Auswertung der Messdaten	63
6	Messungen der Strahlgröße und Strahlposition	67
6.1	Statische Messungen	67
6.1.1	Strahlgröße in Abhängigkeit des Strahlstroms	69
6.1.2	Strahlgröße in Abhängigkeit der Strahlenergie	73
6.1.3	Strahlgröße im Kurzbunchbetrieb	74
6.2	Erste dynamische Studien	76
6.2.1	Synchrotronoszillation	76
6.2.2	Grow-Damp Messungen	79
6.2.3	Ausblick auf weitere Studien	85
7	Zusammenfassung	97
	Abkürzungsverzeichnis	99
	Literaturverzeichnis	101

1 Einleitung

Mit dem Synchrotron wurde in den 1940er Jahren eine Form des Teilchenbeschleunigers entwickelt, die heute in vielen Gebieten der Wissenschaft Anwendung findet [1]. Die Anwendungsbereiche lassen sich grob in zwei Gruppen unterteilen: Zum einen ist es möglich, die beschleunigten Teilchen selbst als Produkt zu nutzen, wie es unter anderem in Experimenten der Hochenergiephysik und bei Anwendungen zu medizinischen Zwecken der Fall ist. Ein weiteres, großes Feld an Nutzungsmöglichkeiten für Teilchenbeschleuniger wird durch die Nutzung von Synchrotronstrahlung erschlossen. Diese elektromagnetische Strahlung entsteht bei der transversalen Beschleunigung von geladenen Teilchen, also in jedem Ringbeschleuniger. Das Synchrotron, als eine mögliche Form von Ringbeschleunigern, kann explizit auf deren Erzeugung hin ausgerichtet werden. Grund für die Vielfalt an Anwendungen der Synchrotronstrahlung sind unter anderem hohe Strahlungsintensitäten, die kurze Pulsdauer bei hoher Wiederholrate und das Abdecken eines breiten Bandes des elektromagnetischen Spektrums.

Der nutzbare Bereich des Spektrums der Synchrotronstrahlung reicht, abhängig von der Teilchenenergie, von langwelliger Strahlung im Infrarotbereich bis hin zur kurzwelligen, harten Röntgenstrahlung. Die Emission der Strahlung durch die Elektronen geschieht in der Regel inkohärent, da die im Ring befindlichen Elektronen elektromagnetische Wellen in gleicher Phase, aber an unterschiedlichen Positionen emittieren. Betrachtet man jedoch Wellenlängen, die oberhalb der Länge der Elektronenpakete (engl.: *bunches*) liegen, so werden die elektromagnetischen Wellen von allen Elektronen annähernd am selben Ort emittiert. Es kommt zur konstruktiven Überlagerung der Wellen und somit zu einer Verstärkung der Strahlungsleistung um einen Faktor, der der Elektronenanzahl in den Paketen entspricht. Dieser Effekt der kohärenten Synchrotronstrahlung (engl.: *coherent synchrotron radiation*, CSR) konnte im Jahr 1989 zum ersten Mal nachgewiesen werden und ermöglicht seither an Synchrotronstrahlungsquellen die Nutzung von hochintensiver, langwelliger Strahlung im Bereich der Mikrowellen- und Terahertzstrahlung [2].

An der ANgströmquelle KARlsruhe (ANKA) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wird unter anderem zur Erzeugung von CSR regelmäßig der sogenannte Kurzbunchbetrieb durchgeführt, bei welchem die Länge der Bunche im Vergleich zur üblichen Nutzung stark reduziert wird [3]. So wird der Bereich der kohärent emittierten elektromagnetischen Strahlung bis hin zu Frequenzen von einigen hundert Gigahertz erweitert. Die Erzeugung von CSR und die starke Kompression der Bunche führt jedoch zu einem instabilen Verhalten der Elektronen: Es werden periodische Ausbrüche der Strahlung im THz-Bereich beobachtet, die auf die Ausbildung von kurzlebigen Substrukturen in der Ladungsverteilung innerhalb der Bunche zurückzuführen sind [4].

Um die stabile Erzeugung von CSR für größer werdende Bereiche des Spektrums möglich zu machen, ist es notwendig, ein immer besseres Verständnis für die im Kurzbunchbetrieb auftretenden Instabilitäten zu entwickeln. Hierzu wurden an ANKA in den vergangenen Jahren diverse Studien durchgeführt [4, 5, 6]. Die vorliegende Arbeit ist ebenfalls in den Rahmen der Untersuchungen dieser Instabilitäten einzuordnen. Sie hat zum Ziel, einen besseren Einblick in deren Auswirkungen auf die Strahldynamik zu ermöglichen.

Die Schwerpunkte dieser Arbeit liegen zum einen auf Messungen zum besseren Verständnis der Strahldynamik im Kurzbunchbetrieb mit bereits vorhandener Diagnostik, zum anderen auf der Inbetriebnahme eines eigens hierfür geplanten experimentellen Aufbaus. Sie ist daher wie folgt gegliedert: Zunächst wird in Kapitel 2 auf die für diese Arbeit entscheidenden Grundlagen der Beschleunigerphysik eingegangen. Hierzu werden die Beschleunigung von geladenen Teilchen, die Strahldynamik in Speicherringen sowie die Erzeugung von inkohärenter und kohärenter Synchrotronstrahlung und die zu untersuchenden Instabilitäten thematisiert. Kapitel 3 gibt mit der Vorstellung der Synchrotronstrahlungsquelle ANKA, des Kurzbunchbetriebs und der verwendeten Messstationen eine Übersicht über die Rahmenbedingungen dieser Arbeit. In Kapitel 4 werden Messungen der Strahllage während des Kurzbunchbetriebs vorgestellt und diskutiert, während der Aufbau des Experiments zur gleichzeitigen Messung der Strahlposition und -größe sowie die Charakterisierung des Systems in Kapitel 5 erläutert wird. Die mit einem im Vergleich zu Kapitel 5 leicht abgewandeltem Aufbau durchgeführten Messungen der Strahlgröße an ANKA sind in Abschnitt 6.1 dargestellt, Abschnitt 6.2 zeigt schließlich erste Studien unter Verwendung des vollständigen

Aufbaus. Zuletzt wird ein Ausblick auf dessen weitere Einsatzmöglichkeiten als Instrument der Strahldiagnose gegeben.

2 Grundlagen der Beschleunigerphysik

Die Beschleunigung geladener Teilchen findet in der heutigen Zeit vielfältige Anwendungen, von der Erzeugung von Synchrotronstrahlung über Experimente zur Teilchenphysik bis hin zu medizinischen Behandlungen. In diesem Kapitel sollen die Grundlagen der Beschleunigerphysik im Vordergrund stehen, die für die Erzeugung von Synchrotronstrahlung entscheidend sind. Darüber hinaus wird ein Überblick über die Dynamik von Elektronen in Speicherringen gegeben.

2.1 Beschleunigung geladener Teilchen

Die Beschleunigung geladener Teilchen¹ basiert stets auf deren Wechselwirkung mit elektromagnetischen Feldern. Diese wird beschrieben durch die Lorentzkraft [7]:

$$\vec{F} = e \left(\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E} \right) \quad (2.1)$$

Der durch ein magnetisches Feld \vec{B} entstehende Anteil der Lorentzkraft wirkt senkrecht zum Feld und zu der Geschwindigkeit des Teilchens und verursacht somit eine Ablenkung. Der Anteil der Kraft, der aus einem elektrischen Feld \vec{E} resultiert, bewirkt eine Beschleunigung entlang des Feldes. Die Energieänderung ΔE ist dann gegeben durch das Integral der Kraft über eine zurückgelegte Wegstrecke $d\vec{r}$:

$$\Delta E = \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{F} \, d\vec{r} = e \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \left(\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E} \right) \, d\vec{r} \quad (2.2)$$

Mit $d\vec{r} = \vec{v} \, dt$ und $(\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{v} = 0$, ergibt sich

$$\Delta E = e \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{E} \, d\vec{r} = eV \quad (2.3)$$

¹ Sofern nicht anders erwähnt, wird im Folgenden auf Elektronen Bezug genommen. Daher wird als Ladung die Elementarladung e angenommen.