

Das Magnetsystem von ANKA

M. Pont, FGS

Einleitung

Magnete werden in allen ringförmigen Teilchenbeschleunigern eingesetzt. Sie führen den Elektronenstrahl entsprechend der Lorentzkraft auf einer kreisrunden Bahn und fokussieren den Strahl sowohl räumlich als auch hinsichtlich des Impulses oder der Energie.

Man unterscheidet vier Arten von Magneten: Dipolmagnete, Quadrupolmagnete, Sextupolmagnete und Korrekturmagnete. Die Grundlagen dieser Magnete werden im Folgenden beschrieben [1].

Dipolmagnete

Dipolmagnete sind die Grundform der Magnete. Wie der Name bereits sagt, verfügen diese Ma-

gnete über zwei Pole, die ein gleichmäßiges Magnetfeld in vertikaler Richtung quer zum Elektronenstrahl erzeugen. Die Teilchen werden so entlang eines Kreisbogens und, bei Vorhandensein mehrerer Dipolmagneten, auf einer kompletten Kreisbahn geführt.

Der Querschnitt eines typischen Dipolmagneten ist in Abb. 1 gezeigt. Der Teilchenstrahl befindet sich im Raum zwischen den von dem C-förmigen Joch gebildeten zwei Polen. Dieses besteht aus qualitativ hochwertigem magnetischen Stahl. Das erforderliche Magnetfeld wird durch den in den beiden Spulen um die Pole fließenden elektrischen Strom erzeugt. Die offene Struktur ist notwendig, damit sich die vom Elektronenstrahl erzeugte Synchro-

tronstrahlung radial nach außen hin ausbreiten kann.

Das von einem solchen Dipolmagneten erzeugte magnetische Feld lässt sich mit folgender Gleichung beschreiben:

$$B = \frac{\mu_0 2N I}{g} \quad (1)$$

Hierbei ist μ_0 die Permeabilität im Vakuum, N die Anzahl der Windungen pro Spule, I der Strom durch die Windungen, und g der Abstand zwischen den Polen (diese Größe wird auch oft als gap "g" bezeichnet).

Quadrupolmagnete

Der Quadrupolmagnet (s. Skizze in Abb. 2) dient der Fokussierung des Elektronenstrahls und damit der Begrenzung seiner physikali-

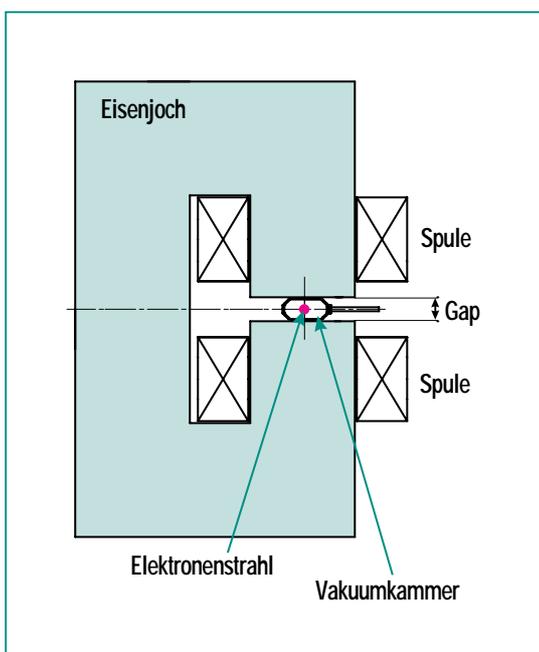


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Dipolmagneten. Eingezeichnet sind das Eisenjoch, die Spulen mit den Windungen, das „gap“ g, die Vakuummkammer und der Elektronenstrahl.

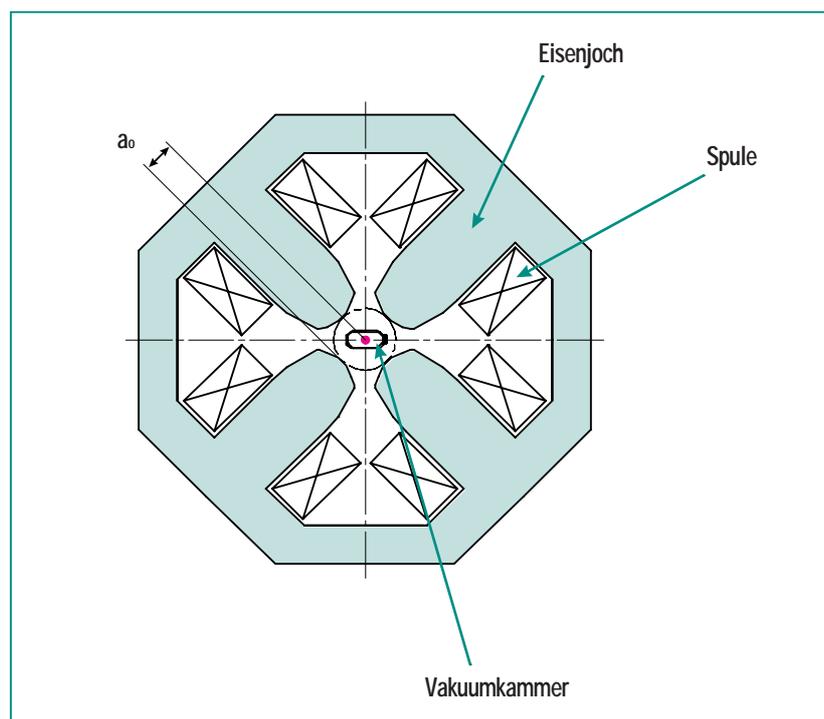


Abb. 2: Geometrischer Aufbau eines Quadrupolmagneten. Eingezeichnet sind das Eisenjoch, die Spulen mit den Windungen, der Polabstand „a₀“, die Vakuummkammer und der Elektronenstrahl.

schen Abmessungen sowohl in der horizontalen als auch in der vertikalen Ebene. Wie beim Dipolmagnet verläuft der Elektronenstrahl im Bereich zwischen den Polen. Ein Quadrupolmagnet besitzt vier Pole. Jeder Pol verfügt über eine entsprechende Erregerspule. Der von diesen Polen erzeugte magnetische Fluss hebt sich im Zentrum des Magneten vollständig auf, weshalb hier das Magnetfeld null ist. Ansonsten nimmt die magnetische Flussdichte in jeder Richtung linear mit dem sich vergrößernden Abstand vom Zentrum zu. Teilchen entlang der Mittelachse sind keinem magnetischen Feld und damit auch keiner Einwirkung des Quadrupolmagneten ausgesetzt. Vom Zentrum entfernt liegende Teilchen werden jedoch ähnlich der Brechung eines durch eine Linse verlaufenden Lichtstrahls in der Optik abgelenkt. Der Quadrupolmagnet ist daher ein Gradientenmagnet. Seine Stärke wird durch den Gradienten der magnetischen Flussdichte zwischen den Polen bestimmt. Der Gradient ist die den Quadrupol bestimmende Größe und er berechnet sich aus den technischen Daten des Quadrupols zu:

$$g \text{ [T/m]} = \frac{2\mu_0 N I}{a_0^2} \quad (2)$$

μ_0 , N und I haben dieselbe Bedeutung wie in Gleichung [1], a_0 ist der Abstand vom Mittelpunkt des Quadrupoles zu den Polen (siehe Abb. 2).

Aus physikalischen Gründen ist es nicht möglich mit einem Quadrupolfeld einen Elektronenstrahl sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung zu fokussieren. Ist der Magnet so ausgelegt,

dass er horizontal fokussiert, erfolgt eine Defokussierung in vertikaler Richtung und umgekehrt. Allerdings kann die richtige Kombination horizontal fokussierender und vertikal fokussierender Quadrupole an verschiedenen Positionen entlang des Beschleunigerumfangs eine Fokussierung des Elektronenstrahls in beiden Richtungen zur Folge haben. Es sind also mindestens zwei verschiedene Arten von Quadrupolmagneten erforderlich. In den meisten Synchrotronquellen werden allerdings viele verschiedene Arten von Quadrupolmagneten eingesetzt, um die erforderliche Elektronenstrahlform entlang des Beschleunigers zu erzeugen.

Sextupolmagnete

Die Fokussierung in den Quadrupolen hängt von der Energie der Elektronen ab, d. h. die Quadrupole haben sogenannte chromatische Effekte. Mit Hilfe von Sextupolmagneten wird die Änderung der Fokussierung mit dem Elektronenimpuls kontrolliert. Dieser Magnet ähnelt dem Quadrupolmagneten, verfügt allerdings über sechs statt vier Pole. Wie bei einem Quadrupolmagnet, ist im Zentrum ein magnetisches Feld von null vorhanden. Mit zunehmendem Abstand zum Zentrum ändert sich das Magnetfeld quadratisch dazu und somit wird der Sextupol durch den differentiellen Gradienten g' definiert. Dieser berechnet sich aus den technischen Daten zu:

$$g' = \frac{8 \cdot \mu_0 \cdot N \cdot I}{a_0^3} \quad (3)$$

μ_0 , N , I und a_0 haben dieselbe Bedeutung wie beim Quadrupol. In einem Beschleuniger müssen die

chromatischen Effekte in horizontaler und vertikaler Richtung kompensiert werden. Hierfür werden wiederum verschiedene Typen von Sextupolmagneten eingesetzt. In Abhängigkeit von ihrer Position im Beschleuniger variieren die Stärken und Polaritäten der Sextupole.

Korrekturmagnete

Korrekturmagnete werden auch als Steuermagnete bezeichnet. Gewöhnlich handelt es sich um kleine Dipolmagnete, mit deren Hilfe der Elektronenstrahl abgelenkt werden kann. Bei der Verwendung von vielen Korrekturmagneten und kleinen Ablenkungen (oft spricht man auch von "kicks") wird eine minimale Abweichung der tatsächlichen von der idealen Bahn im Beschleuniger erreicht.

Bei ANKA eingesetzte Magnete

Die im ANKA-Speicherring [2] verwendeten Magnete sind in Tab. 1 aufgeführt. Das Magnetensystem von ANKA besteht aus 16 Dipolmagneten, 40 Quadrupolmagneten, zwei Arten von Sextupolmagneten und zwei von Korrekturmagneten. Physikalisch werden zwei Typen von Quadrupolmagneten, nämlich Q320 und Q390, unterschieden. Sie unterscheiden sich in ihrer Länge und der Anzahl ihrer Wicklungen, was einen unterschiedlichen maximalen Magnetgradienten zur Folge hat. Beide Typen der Sextupolmagneten unterscheiden sich ebenfalls in der Anzahl ihrer Wicklungen.

Magnettyp	Bezeichnung	Anzahl	Maximale Stärke (B ₀ , g und g')
Dipolmagnet	BEN	16	1,5 T
Quadrupolmagnet	Q320	32	18,1 T/m
Quadrupolmagnet	Q390	8	17,9 T/m
Sextupolmagnet	SH	8	551 T/m ²
Sextupolmagnet	SV	16	482 T/m ²
Korrekturmagnet	CORRH	28	0,066 T
Korrekturmagnet	CORRV	16	0,060 T

Tab. 1: Bei ANKA eingesetzte Magnete.

Parameter	Einheit	Wert
Anzahl der Magnete		16
Nominales Magnetfeld	T	1,50
Effektive Magnetlänge	mm	2183,1
„gap“	mm	41
Jochlänge	mm	2130
Anzahl der Windungen pro Spule		40
Leiterquerschnitt	mm ²	15 x 15
Kühlkanaldurchmesser	mm	7
Anzahl der A-Windungen	A-Windungen	27500
Stromstärke	A	687,5
Verlustleistung	W	18800
Anzahl der Kreisläufe		4
Wasserdurchsatz	l/min	4,70

Tab. 2: Parameter der Dipolmagnete.

Parameter	Einheit	Q320	Q390
Anzahl der Magnete		32	8
Nominaler Feldgradient	T/m	18,10	17,85
Effektive Magnetlänge	mm	320	390
Nominaler integraler Gradient	T	5,79	6,96
Öffnungsradius	mm	35	35
Jochlänge	mm	285	355
Anzahl der Wicklungen pro Spule		26	30
Leiterquerschnitt	mm ²	10x10	10x10
Kühlkanaldurchmesser	mm	4	4
Anzahl der A-Windungen	A-Windungen	9412	9000
Stromstärke	A	362	300
Verlustleistung	W	2725	2367
Anzahl der Kühlkanäle		2	2
Wasserdurchsatz	l/min	1,2	1,1

Tab. 3: Parameter der Quadrupolmagnete.

Auslegung der Magnete

Da die Elektronen mehrere Stunden lang im Speicherring zirkulieren, muss die Magnetfeldqualität hohen Anforderungen genügen. So ist beispielsweise für den Dipolmagnet ein innerhalb von wenigen Zehntausendstel gleichmäßiges Magnetfeld im Bereich des umlaufenden Strahles erforderlich. Um die notwendige Feldqualität zu erzielen, die mit Hilfe von numerischen Simulationen bestimmt wird, bekommen die Magnetpole eine besondere Form. Mit Ausnahme einiger sehr einfacher Fälle gibt es keine analytische Lösungen für die Form der Magnetpole. Bei ANKA erfolgte die Auslegung der Magnetpole mit Hilfe des zweidimensionalen magnetostatischen Finite-Elemente-Programms POISSON [3].

Die Dipol-, Quadrupol- und Sextupolmagnete müssen gekühlt werden, um eine Überhitzung der Spulen zu verhindern. So wird zum Beispiel in den Dipolmagneten eine Leistung von 18,8 kW verbraucht (siehe Tab. 2). Als Kühlmittel wird demineralisiertes Wasser verwendet. Die Magnete wurden so ausgelegt, dass sie einem maximalen Temperaturunterschied von 15 Grad zwischen Wasserzulauf und Wasserablauf standhalten.

Auslegung der Dipolmagnete

Die Dipolmagnete (siehe Abb. 1) wurden für ein maximales magnetisches Feld von 1,5 T ausgelegt. Die Auslegungsparameter des Dipolmagneten sind in Tab. 2 zusammengestellt.

Auslegung der Quadrupolmagnete

Die Quadrupolmagnete wurden für einen maximalen Magnetfeldgradienten von 20 T/m entworfen. Die Auslegung erfolgte mit Hilfe des zweidimensionalen Codes POISSON. Das Joch besteht aus identischen Vierteln. Beide Quadrupoltypen verwenden den gleichen Querschnitt. Sie haben jedoch einen unterschiedlichen Energiestrom und Windungszahl. Die wichtigsten Parameter dieser Magnete sind in Tab. 3 zusammengefasst.

Auslegung der Sextupolmagnete

Die Sextupolmagnete wurden für einen maximalen magnetischen differentiellen Gradienten von 700 T/m² ausgelegt, obwohl sie bei sehr viel geringerer Stärke eingesetzt werden. Beide Sextupoltypen nutzen den gleichen Querschnitt, haben jedoch unterschiedliche Erregung und Windungszahl. Die Parameter dieser Magnete gehen aus Tab. 4 hervor.

Auslegung der Korrekturmagnete

Es wurden zwei Typen von Korrekturmagneten verwendet. Ein Typ erzeugt ein vertikales Magnetfeld, mit dessen Hilfe die Bahn in der horizontalen Ebene korrigiert wird. Der zweite Typ von Korrekturmagneten wirkt in vertikaler Richtung. Tab. 5 zeigt die wichtigsten Parameter der Korrekturmagnete. Die Stärke der Magnete ist so ausgelegt, um auf die Elektronenbahn bei 2,5 GeV einen Kick von 1 mrad zu übertragen.

Bau der Magnete

Die Magnete wurden aus lamelliertem Stahl gebaut. Die Dicke der Lamellen betrug 1 mm. Für die Herstellung des Dipoljoches wurden die einzelnen Lamellen übereinander angeordnet, gepresst und an den Ecken und Außenseiten zu einem starren Block miteinander verschweißt. Auch das Joch der Quadrupol- und Sextupolmagnete wurde entsprechend hergestellt. Zur Verbindung dieser Lamellen wurde dann allerdings ein Klebeverfahren eingesetzt. Der für die Spulen verwendete elektrische

Leiter besteht aus Cu. Er ist hohl und kann daher mit Hilfe von Wasser gekühlt werden. Bei dem Ablenk magnet, Quadrupol und Sextupol führen die elektrischen Verlustleistungen zu einer Erwärmung der Spulen und somit hat der Cu-Leiter der Windungen einen Kühlkanal. Bei nominaler Last ergibt sich bei einer Druckdifferenz von 10 bar eine Temperaturerhöhung zwischen Eingang und Ausgang von 15° Celsius. Die Eingangstemperatur ist 19° Celsius. Die Magnete sind mit einem Wasserschalter und thermischen Schaltern ausgestattet. Auf diese

Parameter	Einheit	SH	SV
Anzahl der Magnete		8	16
Nominaler Feldgradient	T/m ²	551,10	481,7
Effektive Magnetlänge	mm	145	145
Nominaler integraler Gradient	T/m	79,9	69,8
Öffnungsradius	mm	37,5	37,5
Jochlänge	mm	120	120
Windungen pro Spule		20	18
Leiterquerschnitt	mm ²	7 x 7	7 x 7
Kühlkanaldurchmesser	mm	3	3
Anzahl der A-Windungen	A-Windungen	4000	3420
Stromstärke	A	200	190
Verlustleistung	W	1020	827
Anzahl der Kühlkanäle		2	2
Wasserdurchsatz	l/min	0,5	0,4

Tab. 4: Parameter der in ANKA eingesetzten Sextupolmagnete.

Parameter	Einheit	CORR H	CORR V
Anzahl der Magnete		28	16
Nominales Magnetfeld	T	0,066	0,060
Effektive Magnetlänge	mm	108	108
Jochlänge	mm	100	100
Anzahl der Spulen		1	2
Anzahl der Windungen pro Spule		2300	1890
Leiterquerschnitt	mm ²	1	1,96
Anzahl der A-Wicklungen	A-Wicklungen	2300	3780
Stromstärke	A	1	2
Verlustleistung	W	14,9	58,8

Tab. 5: Parameter der Korrekturmagnete.

Weise wird ein Brand der Spulen bei einem Ausfall der Kühlung vermieden. Die Korrekturmagnete bestehen aus Hartstahl anstelle von laminiertem Stahl. Sie werden außerdem nicht mit Wasser gekühlt, da ihre Verlustleistung sehr gering ist.

Magnetische Messungen

Wie bei der Auslegung der Magnete berichtet, müssen die Magnetfelder in dem Ablenkmagneten bestimmte Homogenitätskriterien erfüllen. Diese müssen experimentell bestimmt werden, um später über ein Modell das Verhalten des Elektronenstrahles beschreiben zu können. Die magnetischen Messungen an den Dipol-

magneten wurden mit Hilfe einer Hall-Sonde vorgenommen. Sie wurde mit einem NMR-System auf einen Wert von besser als $\pm 0,1$ T kalibriert. Sie wurde auf einer Bank montiert die es erlaubt, in drei Richtungen Bewegungen [4] durchzuführen und zwar mit einer Genauigkeit von 5 μm bei einer Auflösung von 1 μm .

Für die Charakterisierung der Quadrupol- und Sextupolmagnete wurde ein rotierendes Spulensystem verwendet [5]. Hierbei rotiert eine Spulenschleife um die Mittelachse des Magneten und es wird die induzierte Spannung als Funktion des Rotationswinkels ermittelt. Die Fourier-Analyse dieser Spannung gibt den integralen Gradient der Quadrupol- und

Sextupolmagnete sowie den Betrag der höheren Multipolfelder wieder. Das System verfügt über eine relative Genauigkeit von besser als $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ für die wichtigste Harmonische im Verhältnis zur Hauptkomponente.

Prototypen

Für jeden Magnettyp wurde ein Prototyp gebaut, um die Daten zur elektrischen Versorgung, Kühlung und Feldhomogenität zu ermitteln. Die Prototypen der Quadrupol- und Sextupolmagnete wurden im März 1998 und die des Dipolmagneten im Juli 1998 geliefert. Die magnetische Vermessung der Magnete [6, 7] zeigt, dass deren Spezifikationen weitgehend erfüllt wurden. Die Magnete wurden daher mit nur geringfügigen Modifikationen gegenüber den Prototypen gebaut. Die wichtigsten Ergebnisse der Messungen, die für die Dipol-, Quadrupol- und Sextupolmagnete erzielt wurden, sollen im folgenden dargestellt werden.

Abb. 3 zeigt die für den Prototypen des Dipolmagneten ermittelte magnetische Flussdichte als Funktion des Erregerstroms. Am Anfang ist ein linearer Zusammenhang zwischen Energiestrom und magnetischer Flussdichte gegeben; bei höheren Erregerströmen tritt eine Sättigung auf. Das nominale Magnetfeld ($B_0 = 1,5$ T) wird bei einem Strom erreicht, der 7 % über dem für einen idealen Magneten erwarteten Wert liegt. Dies stimmt mit den Berechnungen nach POISSON überein.

Abb. 4 zeigt den typischen Feldverlauf in transversaler Richtung bei verschiedenen Stromstärken.

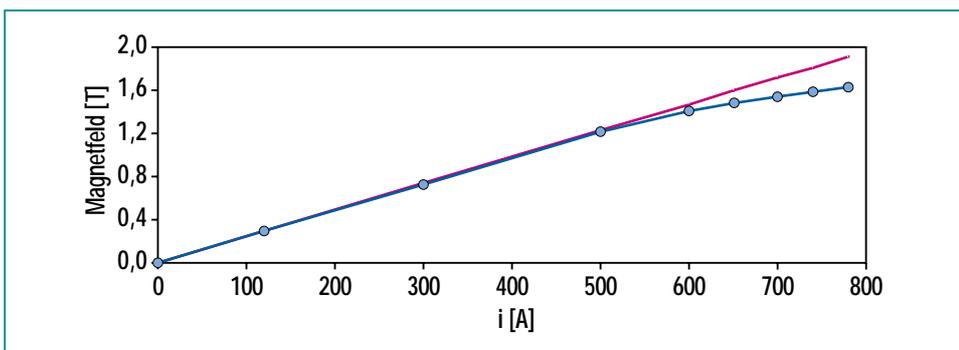


Abb. 3: Magnetfeld eines typischen Dipolmagneten als Funktion der Stromstärke. Die gerade Linie zeigt das Verhalten eines idealen Magneten. Die Linie mit den ausgefüllten Punkten zeigt die für den Magneten ermittelten Messwerte.

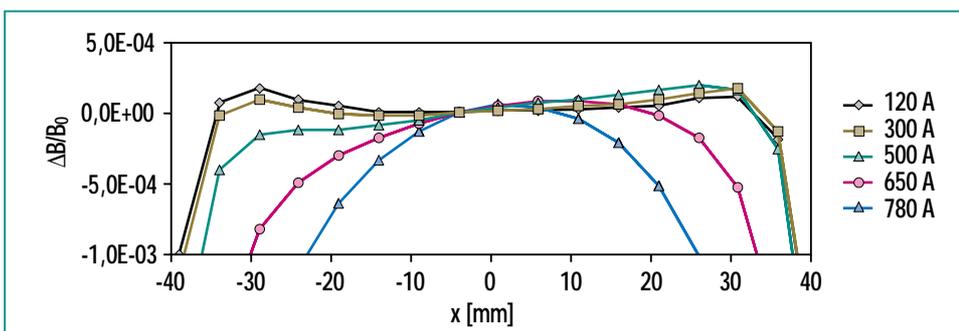


Abb. 4: Transversalfeld eines typischen Dipolmagneten bei verschiedenen Erregerströmen.

Die Feldhomogenität wurde hier als relative Differenz zwischen dem Magnetfeld $B(x)$ und dem Magnetfeld im geometrischen Zentrum des Magneten $B(x = 0)$ berechnet:

$$\frac{B(x) - B(x = 0)}{B(x = 0)} \quad (4)$$

Hier bezeichnet x die transversale Richtung auf der Ebene der Bahn. Bei kleinen Erregerströmen ergibt sich ein symmetrischer Feldverlauf. Mit steigendem Erregerstrom tritt eine Quadrupolkomponente auf.

Tab. 6 zeigt den integralen Gradienten für die beiden Typen der Quadrupolmagnete. Die Werte sind in guter Übereinstimmung mit den theoretischen Betrachtungen.

Der Sextupolmagnet vom Typ SH benötigt einen nominalen integralen Gradienten von 79,9 T/m. Dieser wird bei einer Stromstärke von 200 A erreicht. Andererseits benötigt der Sextupolmagnet vom Typ SV einen integralen Gradienten von 69,8 T/m, der bei einer Stromstärke von 190 A erreicht wird. Die Differenz vom Idealwert beträgt für beide Magnete etwa 1 %.

Die Messungen zum Elektrischen- und Kühlverhalten zeigten eine gute Übereinstimmung mit den Entwurfsberechnungen. Was die mechanischen Toleranzen betrifft, so wurden die Auslegungstoleranzen für die Dipolmagnete nicht vollständig erreicht, da die Abweichung des Gaps zwischen den Polen größer als erforderlich war. Bei der späteren Serienproduktion wurde diesem Aspekt große Aufmerksamkeit ge-

Stromstärke [A]	gL [T] für Q320	gL [T] für Q390
100	1,72	2,41
200	3,41	4,77
300	5,04	6,97
400	6,09	8,09

Tab. 6: Integraler Gradient der Quadrupolmagnete Q320 und Q390.

schenkt. Der Quadrupolmagnet vom Typ Q390 und die beiden Sextupolmagnete Sv und SH lagen innerhalb der festgelegten Toleranzen, allerdings war die Streuung der Polabstände für den Typ Q320 zu groß. Dies wurde auf einen Defekt des Stapelgeräts zurückgeführt. Ein zweiter Prototyp des Q320, der sich innerhalb der festgelegten Toleranzen befand, wurde dann Mitte Juni 1998 geliefert.

Serienproduktion der Magnete

Nach Abnahme der Prototypen wurde die Serienproduktion freigegeben. Die Produktion wurde streng überwacht. Bereits im Werk wurden vom ANKA-Personal Tests durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Magnete auch die festgelegten Toleranzen einhalten.

Im Dezember 1998 befanden sich bereits alle Quadrupol- und Sextupolmagnete bei ANKA. Der letzte Dipolmagnet traf im Mai 1999 ein. Die Korrekturmagnete wurden im Juli 1999 geliefert.

Sofort nach ihrem Eintreffen wurden die Magnete elektrischen, magnetischen und mechanischen Messungen unterworfen, um de-

ren Übereinstimmung mit den Spezifikationen zu überprüfen.

Was die mechanischen Toleranzen betrifft, so wurden die Auslegungstoleranzen bei den Dipolmagneten nicht vollständig erreicht. Die Abweichung des Gaps zwischen den Polen war größer als erforderlich. Außerdem lag die Länge der Magnete nicht im Toleranzbereich. Simulationen des Strahlverhaltens innerhalb des Magnetfeldes dieser Dipole zeigten allerdings, dass die Fehler durch den Einbau von Nebewiderständen in ausgewählte Magnete korrigiert werden könnte. Die Quadrupol- und Sextupolmagnete lagen innerhalb der festgelegten Toleranzbereiche.

Messungen der Serienmagnete [7]

Bei der Messung der in der Serienproduktion hergestellten Magnete ist von Bedeutung, wie weit die technischen Daten der verschiedenen Magnete voneinander abweichen. Absolute Genauigkeit ist dabei weniger wichtig als die Minimierung der Unterschiede zwischen den Magneten. Deshalb soll im vorliegenden Abschnitt ausschließlich auf die relative Abweichung zwischen den wichtigsten Parametern (Magnetfeld, Magnetgradient) bei den

verschiedenen Magneten eingegangen werden.

Dipolmagnete

Abb. 5 zeigt die relative Differenz des mittleren integralen Feldes bei den Dipolmagneten:

$$\frac{B(x) - B(x=0)}{B(x=0)} \quad (4)$$

für alle Magnete bei nominaler Stromstärke. Die relative Differenz beträgt maximal $\pm 2 \cdot 10^{-3}$. Dies entspricht einer Abweichung von der vorgesehenen Ablenkung von $\pm 0,8$ mrad. Hierdurch werden Abweichungen des Elektronenstrahles vom Sollorbit durchgeführt. Diese werden jedoch mit den Korrekturmagneten weitgehend kompensiert.

Quadrupolmagnete

Abb. 6 zeigt die relative Differenz zwischen dem gemessenen integralen Gradienten und dem mittleren integralen Gradienten. Für die 32 Quadrupole vom Typ Q320 bleibt die Abweichung $\Delta g/g$ unter $\pm 5 \cdot 10^{-3}$. Diese 32 Quadrupole werden entsprechend der Magnetoptik weiter in vier Gruppen mit jeweils acht Magneten unter-

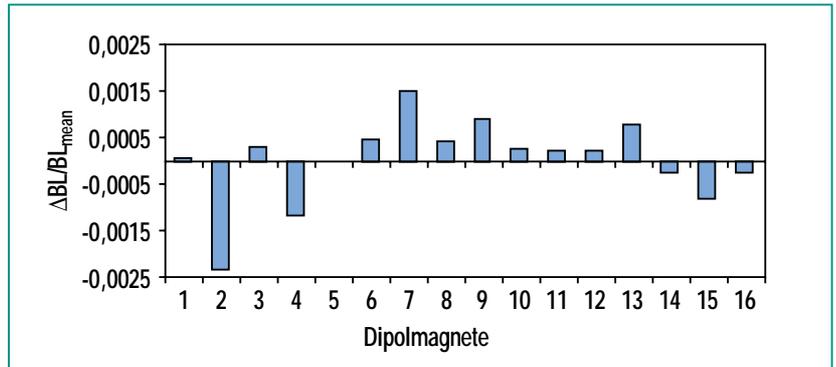


Abb. 5: Relative Abweichung vom mittleren Feldintegral für Dipolmagneten bei 650 A.

teilt. Abschließend liegt somit die relative Differenz zum Mittelwert für diese drei Gruppen unter $1 \cdot 10^{-3}$. Lediglich für eine Untergruppe der Magnete steigt der Wert auf $\pm 3 \cdot 10^{-3}$, was aber immer noch der Spezifikation entspricht. Für die Quadrupole ergibt sich eine relative Abweichung des gemessenen integralen Gradienten von unter $\pm 4 \cdot 10^{-3}$.

Sextupolmagnete

Abb. 7 zeigt die relative Abweichung von der mittleren integralen Sextupolkomponente für die Sextupolmagnete vom Typ SV bei 200 A. Ähnliche Ergebnisse wurden für SH beobachtet.

Korrekturmagnete

Nicht für alle Korrekturmagnete wurden Messungen durchgeführt. Für eine Auswahl von Magneten wurden ähnliche Messungen wie bei Dipolmagneten vorgenommen. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Entwurfsdaten.

Einbau der Magnete in den Speicherring

Im März 1999 wurde mit dem Einbau der Magnete in den Speicherring begonnen. Abb. 8 zeigt ein Foto während dieser Maßnahme. Die Magnete wurden dann verkabelt und der Anschluss der Kühl-

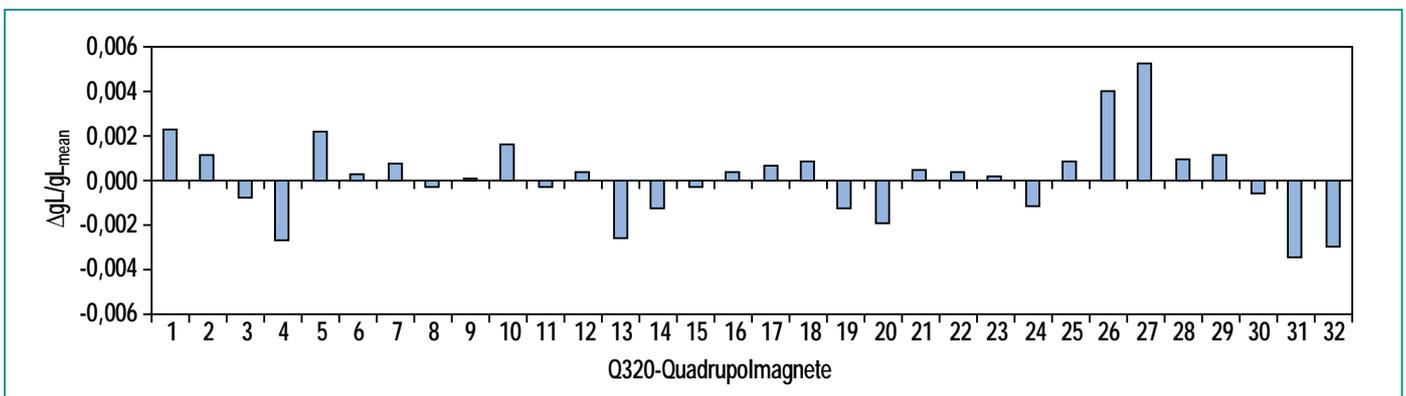


Abb. 6: Relative Abweichung vom mittleren integralen Gradienten für die Q320-Quadrupolmagnete bei 350 A Nominalstromstärke.

wasserversorgung wurde durchgeführt. Im Dezember 1999 waren alle Magnete in Betrieb.

Zusammenfassung

Zur Herstellung von Synchrotronstrahlung ist ein Strahl radial beschleunigter geladener Teilchen erforderlich, die mit relativistischer Geschwindigkeit auf einer Kreisbahn umlaufen. In ANKA handelt es sich bei diesen geladenen Teilchen um Elektronen, die mit Hilfe eines Magnetfelds entsprechend der Lorentzkraft abgelenkt werden. Die Ablenk- bzw. Dipolmagnete in einem Beschleuniger haben die Aufgabe, die Elektronen um exakt 360 Grad abzulenken, damit sie nach einem Umlauf wieder an den Ausgangspunkt zurückkommen. Da der Elektronenstrahl nicht punktförmig ist und die magnetischen Felder von den idealen Feldern abweichen, werden weitere magnetische Elemente benötigt, um den Strahl einzugrenzen und Verluste zu vermeiden. In ANKA werden zur Fokussierung des Elektronenstrahls 40 Quadrupolmagnete eingesetzt. Weitere 16 Sextupolmagnete dienen zur Korrektur hinsichtlich chromatischer Effekte der Quadrupole. 40 kleine Dipolmagnete (Korrekturmagnete) werden benötigt, um kleine Fehler in den Ablenkmagneten bzw. Fehlaufstellungen der Quadrupole zu korrigieren.

Im vorliegenden Beitrag sollen zunächst die erforderlichen Parameter der verschiedenen magnetischen Elemente, die bei ANKA eingesetzt werden, beschrieben werden. Im Weiteren wird dann auf deren Bau und Qualitätskontrolle eingegangen.

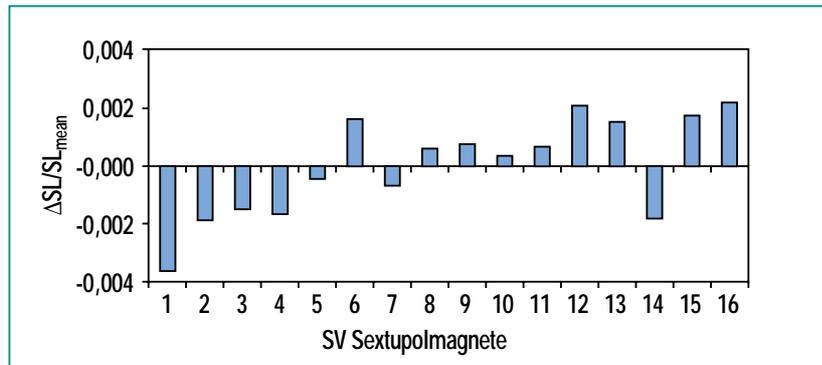


Abb. 7: Relative Abweichung von der mittleren integralen Sextupolkomponente.



Abb. 8: Einbau der Magnete in den Speicherring.

Literatur

- [1] H. Winick (ed.), *Synchrotron Radiation Sources, a primer*, World Scientific 1994
- [2] D.Einfeld et al., *European Particle Accelerator Conference 1996, Sitges (Spanien)*, S. 2179
- [3] *POISSON, User Manual LA-UR-96-1834*, Los Alamos 1996
- [4] *LLS measuring bench*, persönliche Mitteilung
- [5] *Danfysik Model 692 User Manual, Danfysik A/S, (DK)*
- [6] M.Pont, D.Einfeld, A.Krüssel, *Magnet prototypes for ANKA, European Particle Accelerator Conference 1998, Stockholm*
- [7] M.Pont, D.Einfeld, A.Krüssel, *Magnetic measurements of the ANKA storage ring magnets, Particle Accelerator Conference 1999, New York*