

DESY-Doppelspeicherring (Doris) · DESY double storage ring (Doris)

K. Steffen Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), Hamburg

1. Übersicht

Die Planung für einen Elektron-Positron-Speicherring hoher Energie und Luminosität (vgl. Abschnitt 2) als Erweiterung der DESY-Beschleunigeranlagen geht mehrere Jahre zurück. 1966 war mit der Bestellung eines 400-MeV-Elektron-Positron-Linearbeschleunigers als neuem Injektor für das Synchrotron eine wesentliche Voraussetzung dazu gegeben. Die erste Ausarbeitung eines 3-GeV-Einzelspeicherrings erfolgte im selben Jahr, wurde aber sogleich durch den Vorschlag eines Doppelspeicherrings überholt. Das neue Konzept wurde 1967 von der DESY-Speicherringgruppe ausgearbeitet und beschrieben [1] und seither unter Beibehaltung seiner wesentlichen Merkmale im einzelnen weiterentwickelt [2, 3].

Fig. 1 zeigt eine Prinzipskizze der Anlage in Schrägsicht. Der gespeicherte Elektronen- und Positronenstrahl laufen jeder für sich in einem Ring von ovalem Grundriß gegenseitig um. Die beiden Ringe sind im gleichen Tunnelgebäude übereinander angeordnet und durchkreuzen sich senkrecht unter kleinem Winkel in zwei einander gegenüberliegenden Punkten. Der Einschub geschieht normalerweise bei 2 GeV über das Synchrotron, kann aber auch bei 400 MeV direkt vom Linearbeschleuniger erfolgen.

Der Lageplan (Fig. 2) gibt den Grundriß des Speicherringgebäudes mit den dazugehörigen Einschubkanälen wieder.

1. General description

Plans for an electron-positron storage ring of high energy and luminosity as an extension of the DESY accelerator facilities originated several years ago. In 1966 the ordering of a 400 MeV electron-positron linear accelerator as a new injector for the DESY synchrotron encouraged work in this direction. The first design of a 3 GeV single storage ring was made in the same year, but was soon outdated by the proposal for a double storage ring. The new concept was

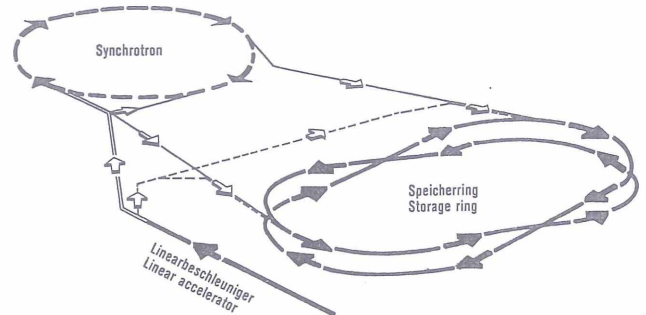


Fig. 1: Prinzipskizze des Strahlverlaufs im Doppelspeicherring und in den Einschubwegen

Fig. 1: Beam paths in the double storage ring and injection channels, schematic

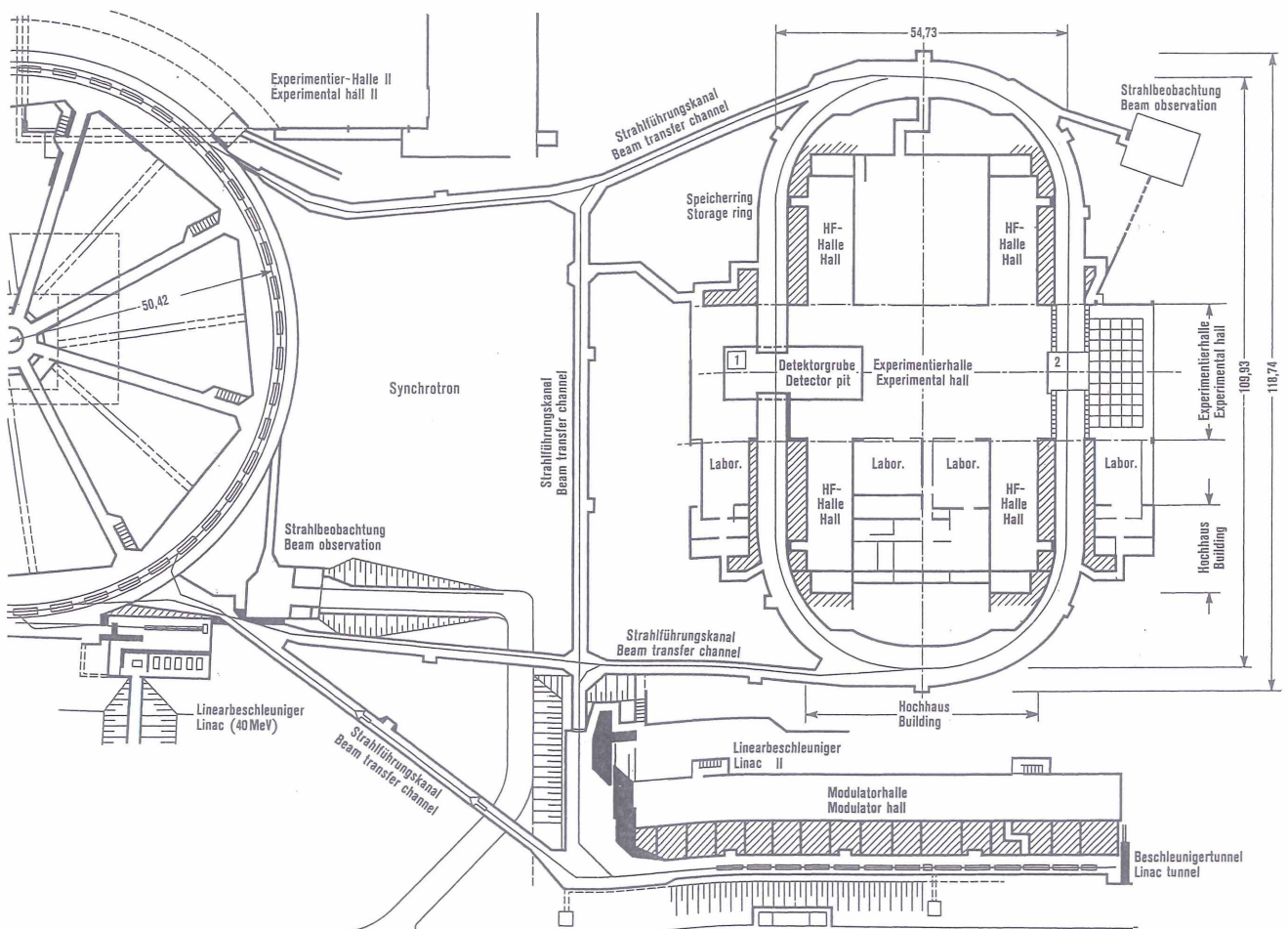


Fig. 2: Lageplan mit Grundriß des Speicherringgebäudes und Einschubwegen

Fig. 2: Site layout with plan view of storage ring building and beam transfer channels

Das Ringoval hat eine Länge von 110 m und eine Breite von 55 m. Es wird quer von einer langen Experimentierhalle überspannt, in der die beiden Wechselwirkungszonen liegen. Vier Seitenhallen im Innern des Ringovals dienen zur Aufnahme der Hochfrequenzsender. Dazwischen liegen die Betriebs- und Versorgungsräume und ein Laborgebäude.

Zur Zeit sind wesentliche Komponenten für den Speicherring bestellt, und die Errichtung der Gebäude hat begonnen. Die Fertigstellung der Anlage ist für Ende 1973 geplant.

2. Wesentliche Entwurfsmerkmale

Das gewählte Speicherringkonzept resultiert aus der Forderung nach hoher Luminosität, d. h. nach großem gespeichertem Strom bei kleinem Strahlquerschnitt [4] im Wechselwirkungspunkt. Um Ströme von einigen Ampere stabil zu speichern, wird eine genaue Kenntnis des Strahlverhaltens als Funktion der Speicherringparameter notwendig sein. Dies erfordert eine große Flexibilität sowohl in der Einstellung des Speicherrings als auch in der Möglichkeit, gezielte Gegenmaßnahmen gegen einzelne Instabilitätseffekte vorzunehmen. Hier liegt der wesentliche Vorteil des Doppelspeicherrings gegenüber dem Einzelring: Die beiden Strahlen werden weitgehend getrennt voneinander geführt und lassen sich daher unabhängig messen und beeinflussen.

Im Hinblick auf die gewünschte Flexibilität ist die Strahlführungsoptik einigermaßen komplex: Strahlablenkung und -fokussierung sind voneinander getrennt, und die Veränderung der Optik erfolgt durch unabhängiges Verstellen von 15 verschiedenen Erregerströmen in den verschiedenen Quadrupolmagneten. Die Zahl der vertikalen und horizontalen Betatronschwingungen, die Strahlabmessungen im Wechselwirkungspunkt, die natürliche Strahlhöhe und das Dämpfungsverhalten können auf diese Weise in weiten Grenzen variiert werden. Die Einstellung dieser optischen Hauptparameter wird – neben anderen Aufgaben – von einem Steuerungsrechner durchgeführt.

Der Strahlquerschnitt im Wechselwirkungspunkt ist um mehr als einen Faktor 100 kleiner als in der normalen Ringstruktur. Durch zwei Quadrupoldoublets großer Apertur werden die Strahlen an diesem Punkt auf eine enge Taille fokussiert. Der freie Abstand zwischen den Doublets beträgt 5 m und steht für den Einbau der experimentellen Meßeinrichtungen zur Verfügung. Außerhalb schließt sich an das Doublet eine Folge von 3 vertikalen Doppelablenkmagneten an, in denen die beiden Strahlen senkrecht voneinander getrennt und im Abstand von 80 cm wieder parallel gerichtet werden. Insgesamt hat das Kreuzungsstück eine Länge von 40 m. Ein gerades Stück von weiteren 10 m an jedem Ende dient zur Aufnahme der Hochfrequenz-Beschleunigungseinheiten und einer Folge von Quadrupolmagneten zur optischen Anpassung zwischen dem Kreuzungsstück und dem halbkreisförmigen Ringteil.

Die wesentliche Funktion der Kreisquadranten ist die Strahlumlenkung; sie sind entsprechend kompakt ausgelegt und aus drei mechanisch identischen Magnetperioden aufgebaut. In der Mitte jeder Periode befindet sich ein aus Fertigungsgründen zweigeteilter, etwa 6,5 m langer Ablenkmagnet. Der Zwischenraum bis zum nächsten Ablenkmagnet hat etwa die gleiche Länge und enthält drei Quadrupolmagnete, zwischen denen Einbaustücke für Vakuumteile, Strahlmeßgeräte und Korrektorelemente zur Verfügung stehen.

Unter den Korrektorelementen befinden sich um 45° gedrehte Quadrupolmagnete zur Kopplung der horizontalen und vertikalen Betatronschwingungen, Hochfrequenz-Quadrupole zur Entkopplung der Betatronschwingungen aufeinanderfolgender Bunche [5], Sextupolmagnete zur Kompensation der Energieabhängigkeit der Betatronfrequenz und Oktupolmagnete

worked out and described by the DESY storage ring group in 1967 [1] and, while maintaining its essential features, has since been further developed in detail [2, 3].

Fig. 1 shows a schematic diagram of the beam paths in prospective view. The electron and the positron beam are orbiting in opposite directions in a separate ring of oval shape each. The two rings are housed in the same tunnel building, one above the other, and intersect vertically at a small angle in two opposite points. Injection is normally done at 2 GeV from the synchrotron; it can, however, also be done directly from the 400 MeV linear accelerator.

The site layout (Fig. 2) gives the plan view of the storage ring building and the beam transfer channels. The oval ring is 110 m long and 55 m wide. A common high bay for experiments covers both interaction regions. Four side wings for radiofrequency transmitters as well as supply, operations and laboratory buildings are situated within the ring oval. At present, several main components for the storage ring are on order; constructing of the building was started. The storage ring is planned to be completed by the end of 1973.

2. Basic design features

The design concept chosen stems from requiring a high luminosity, i.e., a large stored current together with a small beam cross section [4] at the interaction point. In order to stably store currents of several amperes, it will be necessary to obtain a detailed knowledge of beam behaviour as a function of storage ring parameters. This calls for flexibility in controlling the storage ring as well as in counteracting certain instability effects. Here lies the main advantage of the double storage ring over the single ring: both beams are guided separately over the major portion of the ring and can thus be independently measured and influenced.

Due to the flexibility required, the beam transport optics is rather complex: beam deflection and focusing are done separately, and the optics is varied by independently controlling 15 different excitation currents in the various quadrupole magnets. The number of vertical and horizontal betatron oscillations, the beam dimensions at the interaction point, the natural beam height and the damping characteristics can thus be changed within wide limits. The control of these principal optical parameters will—among other tasks—be done by a process control computer.

The beam cross section in the interaction point is by more than a factor 100 smaller than in the normal ring structure. Two large aperture quadrupole doublets focus the beam into a small waist at this point. The free spacing between the doublets is 5 m and is available for the installation of experimental measuring equipment. Outside, the doublet is followed by a sequence of 3 vertical double bending magnets which vertically separate the two beams and, at a spacing of 80 cm, bend them parallel again. The overall length of the crossing section is 40 m. An additional straight length of 10 m at each end serves for installation of the radiofrequency accelerating units and of a sequence of quadrupole magnets for optical matching between the crossing section and the semi-circular ring part.

The main function of the circular quadrants is to bend the beams; they are, therefore, designed rather compact and are composed of three mechanically identical magnet periods. In the centre of each period is a bending magnet about 6,5 m long which, for mechanical reasons, is subdivided in two units. The spacing to the next bending magnet is of about the same length; it contains three quadrupole magnets, having room for installation of vacuum parts, beam detectors and correction elements in between.

zum Erzeugen einer Amplitudenabhängigkeit der Betatronfrequenz zur Bedämpfung kohärenter Betatronschwingungen. Der Einschub in den Speicherring erfolgt jeweils zwischen den beiden Kreisquadranten des oberen Halbring. In dem 5 m langen geraden Stück wird der Strahl durch einen Magneten mit dünner Stromschiene dicht an die Apertur herangeführt und parallel dazu eingeschossen. Gleichzeitig wird während des Einschubpulses der gespeicherte Strahl durch zwei gepulste Magnete von innen an die Stromschiene herangeschoben, so daß die eingeschossenen Teilchen mit möglichst kleiner Amplitude um den gespeicherten Strahl oszillieren. Ein Einschubpuls erstreckt sich normalerweise über einen Umlauf, d. h. eine Ringfüllung des Synchrotrons, und der nächste Puls wird eingeschossen, wenn die Betatronschwingung der Teilchen vom vorhergehenden Puls durch Dämpfung genügend abgeklungen ist.

3. Einige technische Probleme

Alle Strahlführungsmagnete im Speicherring sind Gleichstrommagnete und werden aus massivem Eisen hergestellt. Bei langsamer Energieänderung des gespeicherten Strahls werden alle Magnetströme proportional herauf- oder hinuntergefahren, und die dabei auftretenden Feldabweichungen von Magnet zu Magnet müssen möglichst klein sein. Es wird daher ein sehr reines Eisen mit einem Kohlenstoffgehalt unter 0,02 % verwendet, das eine kleine Koerzitivfeldstärke und eine hohe Gleichmäßigkeit in der Magnetisierung gewährleistet.

Um eine systematische Analyse des Speicherringverhaltens zu erleichtern, stand bei der Konstruktion der Magnete die Forderung nach hoher Feldlinearität im Vordergrund. Die Polkonturen werden mit einer Genauigkeit von wenigen Hundertstelmmillimetern gefertigt, und die Endfelder sind durch Polendabrundungen und magnetische Spiegelplatten linearisiert. Fig. 3 zeigt den Schnitt durch einen Doppelquadrupol (technische Daten siehe Tab. 1). Genau bearbeitet werden nur die hyperbelförmigen Polflächen. Jeweils vier Pole werden dann in einer Vorrichtung in ihrer genauen endgültigen Lage zusammengespant, an den Außenflächen gemeinsam bearbeitet und durch die vier Jochplatten miteinander verschraubt und verstiftet.

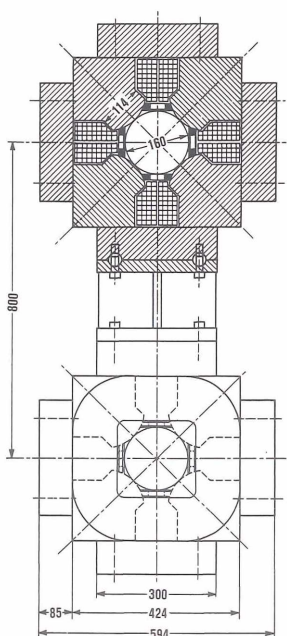


Fig. 3: Schnitt durch einen Doppel-Quadrupolmagneten
Fig. 3: Cross section of a double quadrupole magnet

Among the correction elements to be installed, we will have quadrupole magnets twisted by 45° for coupling the horizontal and vertical betatron oscillations, rf quadrupoles for decoupling the betatron frequencies of subsequent bunches [5], sextupole magnets for compensating the energy dependence of the betatron frequency, and octupole magnets for producing an amplitude dependence of betatron frequency which serves to damp coherent betatron oscillations. Injection into the storage ring is done between the two circular quadrants of each upper half ring. In the 5 m straight section, the beam is injected parallel and as close to the aperture as possible by means of a thin current sheet magnet. By two pulsed magnets, the stored beam is also moved toward the current sheet during the injection pulse in order to get only small oscillations of the injected particles about the stored beam. The injected pulse normally extends over one revolution, i.e., one fill of the synchrotron ring, and the next pulse is injected when the particles of the previous pulse have their betatron oscillation sufficiently reduced by damping.

3. Some technical problems

All beam transport magnets in the storage ring are dc magnets and are made of solid iron core blocks. When slowly changing the energy of the stored beams, all magnet currents will be increased or decreased proportionally, and the field deviations between magnets must then be as small as possible. Therefore, a very pure iron with a carbon content smaller than 0,02 % will be used, which assures a small coercive force and a small fluctuation in magnetization.

In order to facilitate a systematical analysis of storage ring behaviour, field linearity has been a main objective in the design of the magnets. The pole contours will be fabricated with an accuracy of a few hundredth of a millimetre, and the end fields are linearized by rounded pole ends and magnetic end guards. Fig. 3 shows the cross section of a double quadrupole (for technical data see Table 1). Only the hyperbolic pole surfaces require precision machining. The four poles are then clamped together in a jig in their precise final position and are commonly machined at their outer surfaces. By screwing on and dowelling the four yoke plates, the pole position is frozen before taking the jig out.

Tab. 1: Technische Daten des einzelnen Quadrupolmagneten
Table 1: Technical data of a single quadrupole magnet

Strahlenergie · Beam energy	GeV	3	4,5
Feldgradient · Field gradient	kT/cm	0,9	1,35
magnetische Länge · Magnetic length	mm	600	600
Stromstärke · Current	A	740	1110
Spannung · Voltage	V	38	57
Leistung · Power	kW	23	63
Masse · Weight	t	2,8	

Fig. 4 shows the double bending magnet and the vacuum chamber cross section. Table 2 summarizes some technical data. The relatively complicated shape of the vacuum chamber is a consequence of the high beam current. In the bending magnets, the beam emits, in forward direction, the so-called synchrotron radiation which has a spectrum reaching from the visible to the soft X-ray region. The continuously

Tab. 2: Technische Daten für den einzelnen Ablenkmagneten
Table 2: Technical data of a single bending magnet

Strahlenenergie Beam energy	GeV	3	4,5
Feldstärke im Luftspalt · Field strength in air gap	kT	8,2	12,3
Magnetische Länge Magnetic length	mm	3190	3190
Stromstärke Current	A	1280	2000
Spannung · Voltage	V	23,5	36,6
Leistung · Power	kW	30	73
Masse (ohne Kammer) · Weight (without chamber)	t	11,5	

Fig. 4 zeigt den Doppelablenkmagneten mit einem Schnitt durch die Vakuumkammer. In Tab. 2 sind die technischen Daten zusammengestellt. Die relativ komplizierte Form der Vakuumkammer ist durch den hohen gespeicherten Strahlstrom bedingt. Der Strahl emittiert im Ablenkmagneten in Vorwärtsrichtung, die sogenannte Synchrotronstrahlung, deren Spektrum vom sichtbaren Licht bis zum weichen Röntgengebiet reicht. Die maximal abgestrahlte Dauerstrichleistung ist 600 kW pro Strahl. Diese Strahlung desorbiert Gasmoleküle an den Oberflächen und erzeugt damit einen Druckanstieg. Andererseits darf der Druck einige 10^{-9} Torr nicht überschreiten, damit die Strahllebensdauer nicht kleiner als einige Stunden wird. Der Kammerquerschnitt erstreckt sich von der Magnetapertur, wo der Strahl läuft, bis weit nach außerhalb, damit der Fächer der Synchrotronstrahlung ungehindert austreten und am Ende der Kammer in einem besonders stark abgepumpten Absorberkasten aufgefangen werden kann. Der Absorber selbst ist ein wassergekühlter Kupferklotz; die maximale Leistungsdichte an seiner Oberfläche beträgt 25 kW/cm^2 . Die Vakuumkammer ist aus rostfreiem Stahl und so konstruiert, daß sie im eingebauten Zustand bei 300°C ausgeheizt werden kann, um den Wasserdampf von den Oberflächen zu entfernen. Es ist ein technisches Problem, die Kammer so herzustellen, daß sie sich bei diesem Ausheizvorgang nicht wesentlich verzieht.

Die hohe Leistung, die der Strahl als Synchrotronstrahlung abstrahlt, muß ihm in Form von Hochfrequenzleistung laufend zugeführt werden. Dies geschieht in jedem Ring durch zwölf 500-MHz-Hochfrequenz-Resonatoren, von denen jeweils vier über ein verzweigtes Hohlleitersystem von einem 250-kW-Klystron gespeist werden. Die Resonatoren sind zylindrische Kupfer-Hohlkörper mit axialem, sinusförmig schwingendem elektrischen Feld; sie werden von dem gebündelten Strahl in solcher Phase durchlaufen, daß die dem Feld entnommene Leistung den Strahlungsverlust genau deckt. Die Herstellung dieser Kupferresonatoren ist nicht einfach, weil sie sehr maßhaltig und ultrahochvakuumtüchtig, also ausheizbar, sein müssen. Zur Zeit ist ein Prototyp in Arbeit, bei dem der ganze Hohlkörper im elektrolytischen Bad in einem Stück auf einen Aluminiumträger aufgekupfert wird. Dieser Vorgang wird einmal unterbrochen, um Kühlkanäle in das Kupfer einzufräsen und abzudecken. Nach Fertigstellung des etwa 2 cm starken Kupfermantels wird dann das Aluminium herausgelöst. – Ein weiterer Prototyp wird – einschließlich der Kühltaschen – aus rostfreiem Stahl geschweißt und danach innen auf das Fertigmaß bearbeitet und verkupfert.

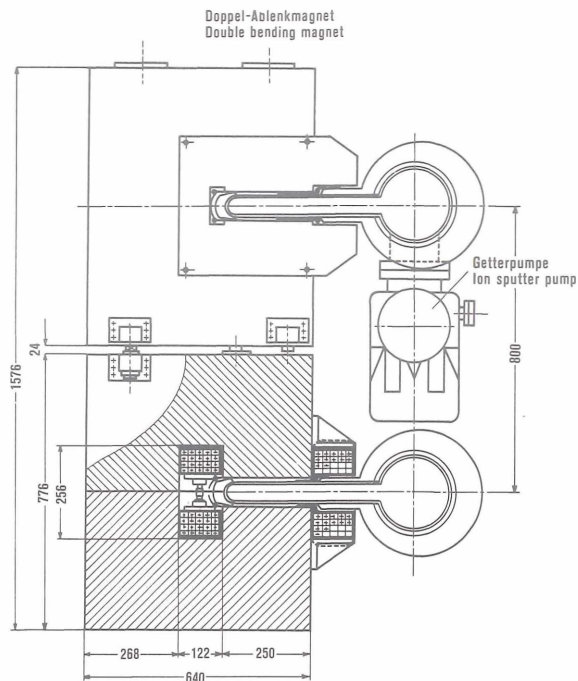


Fig. 4: Schnitt durch Doppel-Ablenkmagnet und Vakuumkammer
Fig. 4: Cross section of double bending magnet and vacuum chamber

radiated maximum power is 600 kW per beam. This radiation desorbs gas molecules from the surfaces and thus generates a pressure rise. The pressure, on the other hand, must not exceed a few times 10^{-9} Torr in order not to reduce the beam lifetime to less than a few hours. The chamber cross section reaches far out from the magnet aperture and thus allows the fan of synchrotron radiation to escape freely into an absorber box with extra pumping at the end of the chamber. The absorber is a water cooled copper block; the maximum power density on its surface is 25 kW/cm^2 . The vacuum chamber is made of stainless steel and can be baked in place up to a temperature of 300°C in order to remove water vapour from the surfaces. Since, during this process, it must maintain its shape, design and fabrication of the chamber present technical problems.

The high power emitted as synchrotron radiation must be continuously restored to the beam by a radiofrequency system. For this purpose, each ring has twelve 500 MHz rf resonators, and four of these each are fed by a 250 kW klystron transmitter. The resonators are cylindrical copper cavities with an axial, sinusoidally oscillating electric field; they are traversed by the bunched beam in such phase that the power taken out of the field exactly covers the radiation loss. Fabrication of these copper resonators is not easy since they have to be precise in their dimensions and suited to ultra-high vacuum requirements, which means they have to be bakeable. A prototype is being made at present by depositing the entire cavity in an electrolytic bath on an aluminium carrier. This process is once interrupted for milling cooling channels into the copper. After completion of a copper cavity, which has a wall thickness of about 2 cm, the aluminium carrier is removed by dissolving it. – A second prototype, including the cooling pockets, is being welded out of stainless steel and will afterwards be precision machined inside, and copper plated.

For obtaining a detailed insight into the storage ring behaviour, one not only needs flexibility in setting the parameters,

Der Schlüssel zum Verständnis des Speicherringverhaltens wird – neben der erwähnten Flexibilität in der Einstellung der Betriebsparameter – eine genaue Messung der Strahleigenschaften sein. Von besonderem Interesse sind die Stromstärke und die Längs- und Querabmessungen der Bunche, denn sie bestimmen die Luminosität. Der Strahlquerschnitt läßt sich durch optische Beobachtung über das Synchrotronlicht relativ leicht ermitteln. Die Messung der Bunchlänge ist wesentlich schwieriger, weil sie – bei einem Bunchabstand von 2 ns – nur etwa 100 ps beträgt und daher eine Auflösung von etwa 10 ps erfordert. Da diese Auflösung mit elektronischen Mitteln nicht zu erreichen ist, wird eine optische Methode entwickelt [6], bei der das Synchrotronlicht durch einen kurzzeitig und periodisch geöffneten »Schnellverschluß« abgetastet wird. Dieser »Schnellverschluß« ist eine Kerr-Zelle, die durch einen gepulsten Laser-Strahl geöffnet wird. Die Laserpulse haben eine Länge von etwa 5 ps und einen Abstand, der von 2 ns etwas abweicht, so daß der Sampling-Puls sich langsam über die Bunchlänge verschiebt.

Nicht nur die Strahleigenschaften selbst, sondern auch die Lage des Strahls im Speicherring muß sorgfältig gemessen werden, denn sie wird von Fehlern im Feld oder in der Aufstellung der Magnete empfindlich beeinflußt. Dazu werden in jedem Ring an etwa 50 Stellen sogenannte Hochfrequenz-Schleifenmonitore eingebaut, die das vom Strahl erzeugte 1000-MHz-Hochfrequenzsignal empfangen. In jedem Monitor sind um den Strahl herum auf einem Keramikring 8 Empfangsschleifen angeordnet, deren Signale von der Strahllage abhängen und daher – nach geeigneter Übertragung und elektronischer Aufbereitung – die Ablagen des Strahls in horizontaler und vertikaler Richtung liefern. Aus diesen Ablagen werden vom Steuerungsrechner Magnetfeldkorrekturen ausgerechnet und eingestellt, die den Strahl wieder nahe an seine Sollage zurückführen.

Die Erfahrungen an den bestehenden Speicherringen lassen erwarten, daß in der Einfahrperiode eine Reihe von unvorhergesehenen Schwierigkeiten zu überwinden sein wird, bevor ein stabiler Betrieb bei hoher Luminosität möglich ist. Durch die Ausrichtung des Speicherringes auf gute Meß- und Einstellmöglichkeiten hoffen wir, diesen Weg wesentlich zu erleichtern.

(Eingegangen am 4. 8. 1970)

but also a precise measurement of beam properties. The beam current and the longitudinal and transverse dimensions of the bunches are of special interest since they determine the luminosity. The beam cross section can be determined rather easily by optical observation, using the synchrotron light. The measurement of bunch length is much more difficult since—at a bunch spacing of 2 ns—it is of the order of 100 ps and thus requires a resolution of about 10 ps. Since this resolution cannot be achieved by electronics, an optical method is under development [6] in which the synchrotron light is being sampled by a fast and periodically gated "beam shutter". This "beam shutter" is a Kerrcell which is opened by a pulsed laser beam. The laser pulses have a length of about 5 ps and a spacing which slightly differs from 2 ns so that the sampling pulse slowly moves over the length of the bunch.

Not only the properties of the beam itself, but also its position in the storage ring, must be carefully measured since this position is sensitively depending on errors in field and positioning of the magnets. For this purpose, so-called rf loop monitors are installed in about 50 places in each ring which receive the 1000 MHz radiofrequency signal generated by the beam. In each monitor, 8 loop receivers are arranged on a ceramic ring surrounding the beam. The loop signals depend on the beam position and—after being transmitted and electronically processed—indicate the vertical and horizontal deviations in beam position. From these deviations, the process control computer calculates and introduces magnetic field corrections which bring the beam closely back to its nominal position.

The experiences with existing storage rings make it most probable that during the breaking-in period a series of unforeseen difficulties will have to be overcome before a stable operation at high luminosity will be achieved. By aiming our design at a storage ring well equipped for beam measurement and control, we hope to greatly ease this development.

Literatur · References

- [1] Vorschlag zum Bau eines 3-GeV-Elektron-Positron-Doppelspeicherringes. DESY, September 1967
- [2] Steffen, K.: Interner Bericht DESY H/18 (1969)
- [3] Steffen, K.: Bericht DESY 70/24 (1970)
- [4] Robinson, K. W., und G. A. Voss: Report CEAL-1029 (1966)
- [5] Voss, G. A.: Private Mitteilung
- [6] Fischer, R., und R. Rossmanith: Interner Bericht DESY H 5/4 (1970)