

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE

FZR-308

Januar 2001

ISSN 1437-322X

Archiv-Ex.:



Horst Tyrroff, Wolfgang Neumann und Bernd Richter

**Strahlkopplung von Tandetron-Beschleuniger
und Ionenimplanter zur Durchführung
von Mehrstrahlexperimenten im
Forschungszentrum Rossendorf**

Statusbericht

Teil 1: Ionenoptik, Mechanik, Vakuumtechnik, Aufbau und Test

Herausgeber:
FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF
Postfach 51 01 19
D-01314 Dresden
Telefon +49 351 26 00
Telefax +49 351 2 69 04 61
<http://www.fz-rossendorf.de/>

Als Manuskript gedruckt
Alle Rechte beim Herausgeber

Horst Tyrroff, Wolfgang Neumann und Bernd Richter

**Strahlkopplung von Tandetron-Beschleuniger
und Ionenimplanter zur Durchführung
von Mehrstrahlexperimenten im
Forschungszentrum Rossendorf**

Statusbericht

Teil 1: Ionenoptik, Mechanik, Vakuumtechnik, Aufbau und Test

Inhalt

Zusammenfassung

- 1 Experimente an Mehrstrahlanlagen
- 2 Basisparameter der Rossendorfer Zweistrahanlage
- 3 Ergebnis der ionenoptischen Optimierung
 - 3.1 Führung des Hochenergiestrahls
 - 3.2 Führung des Niederenergiestrahls
- 4 Strahlwobbelung
- 5 Vakuumtechnische Auslegung
- 6 Konstruktive Lösung
- 7 Steuerung des Systems
- 8 Aufbau und Test der Zweistrahanlage
 - 8.1 Vermessung
 - 8.2 Montage
 - 8.3 Test
 - 8.3.1 Vakuum
 - 8.3.2 Anhebung und Zwischenbild des Hochenergiestrahls
 - 8.3.3 Linseneinstellung und Transmission für den Hochenergiestrahl
 - 8.3.4 Einstellung der Ablenkmagneten für unterschiedliche Ionenarten
 - 8.3.5 Elektrostatische Ablenkung des Hochenergiestrahls
 - 8.3.6 Übertragung des Niederenergiestrahls
- 9 Abschließende Bemerkungen

Referenzen

Anlagen:

- Files zur ionenoptischen Optimierung
- Korrektormagnet
- Magnete und Linsen
- Nomogramme
- Technische Zeichnungen
- Vermessung der Labors im Haus 97

Zusammenfassung

Im Sommer 1999 wurde im Forschungszentrum eine Zweistrahlführung in Betrieb genommen. Dieses System gestattet, Ionenarten aus unterschiedlichen Beschleunigern gleichzeitig in die Experimentierstationen zu lenken. In der **Doppelimplantationsstation** wird die Zweistrahlführung zur Synthese neuartiger Materialien genutzt. In der **Analysestation** wird die Zweistrahlführung in Kombination mit einem magnetischen Browne-Buechner-Spektrometer eingesetzt, um komplexe und hochgenaue Materialanalysen durchzuführen. Das System überträgt Ionen des gesamten Teilchen- und Energiespektrums von 3-MV-Tandetron-Beschleuniger und 500-kV-Ionenimplanter mit minimalen Intensitätsverlusten zu den Experimenten. Steuerung und Kontrolle von Beschleunigern, Strahlführung und Experiment erfolgen in einem hierarchischen Rechnernetz. Die hier beschriebene Zweistrahlanlage ist Teil eines Projekts zur umfassenden Kopplung von Basisgeräten des Forschungszentrums.

Summary

A Dual Beam Transport System has been put into operation at the Forschungszentrum Rossendorf during summer '99. The aim of the system is to direct ion beams of different accelerators onto targets of experimental setups coincidentally. At the **Double Implantation Setup** the new beamlines are used to synthesize novel materials at target surfaces. At the **Analysis Setup** the new beamlines are used in combination with a magnetic Browne-Buechner-Spectrometer for complex and high precision analysis of material compositions. The Dual Beam Transport System transfers particles of the complete species and energy range of the 3 MV Tandetron Accelerator and the 500 kV Ion Implanter without significant losses to the experiments. The whole facility is controlled by a server client PC network comprising accelerators, beamlines and experiments. This facility is part of a beam coupling project of basic equipment at the Research Centre.

1 Experimente an Mehrstrahlanlagen

Das Vorhaben, Rossendorfer Hoch- und Niederenergiebeschleuniger untereinander sowie mit einem Durchstrahlungsmikroskop zu koppeln, wurde 1997 vorgestellt [BFGT97]. Anordnungen dieser Art gestatten beispielsweise, ionenstrahlbeeinflusste Materialveränderungen in situ unter Nutzung eines zweiten Strahls zu analysieren [HeTy96]. Diese sogenannten Mehrstrahlanlagen rationalisieren nicht nur die ionengestützte Materialforschung sondern ermöglichen die unmittelbare oder sequentielle Verfolgung des Modifikationsprozesses, ohne daß Oberflächenveränderungen beim Transfer der Proben von der

Bestrahlungseinheit zur Meßstation den untersuchten Prozeß überdecken können.

Weltweit verfügt eine Reihe von Forschungseinrichtungen über Mehrstrahlanlagen dieser Art. Im Oak Ridge National Laboratory [LABPCM89], im Argonne National Laboratory [AllOh92], [AllRy97], [MTASS97] oder im Japan Atomic Energy Research Institute [jae97] wird beispielsweise die Oberflächenkorrosion in Fusions- oder Kernreaktoren bzw. die Materialveränderung bei der Implantation von Dotierstoffen unter Einsatz von Mehrstrahlanlagen untersucht.

Die Entwicklungsziele für die Rossendorfer Zweistrahlanlage wurden wesentlich durch zwei Experimentprojekte bestimmt.

In der Doppelimplantationsstation treffen Nieder- und Hochenergiestrahl auf ein Siliziumtarget. Der Winkel zwischen den Strahlen, die Strahldivergenz sowie die Orientierung der Kristallebenen zu den Strahlen werden so variiert,

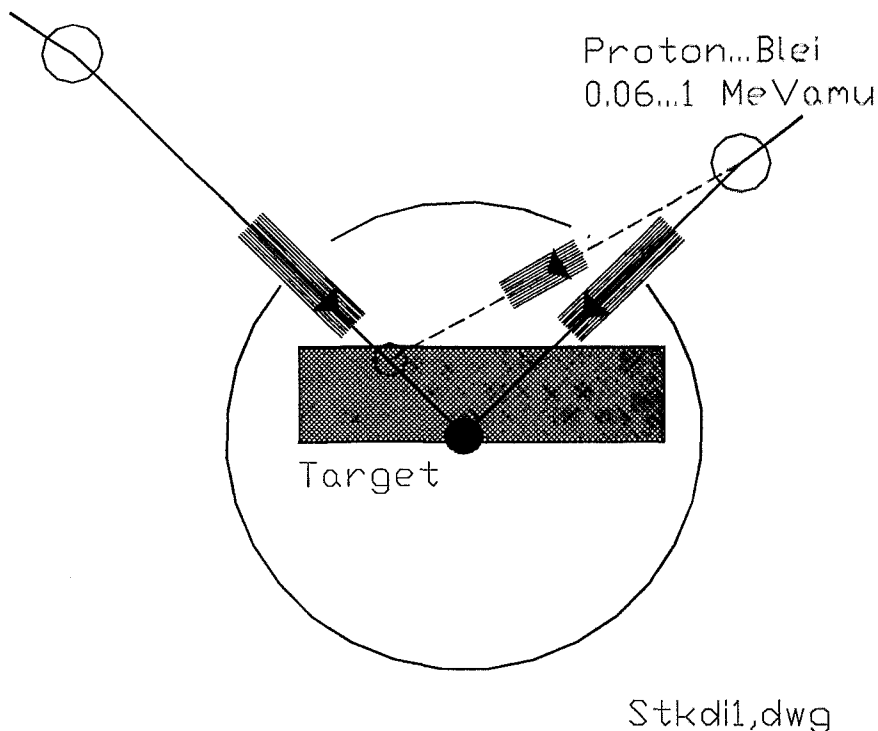


Abb.1 Doppelimplantationsstation

daß die gleichzeitige (Doppel-) Implantation sowohl in zwei Kanalrichtungen des Siliziumkristalls als auch außerhalb derselben erfolgen kann. Damit wird ein sehr weiter Bereich von Form und Tiefe der Dotierungsprofile sowie die gleichzeitige Dotierung mit unterschiedlichen Stoffen realisierbar. Weiterhin kann während der Dotierung mit Hilfe des zweiten Ionenstrahls ein zusätzlicher lokalisierter Wärmeeintrag oder eine gezielte Defekterzeugung durchgeführt werden (s. Abb. 1) [Ka96, Ka97, Ka00, Kö99].

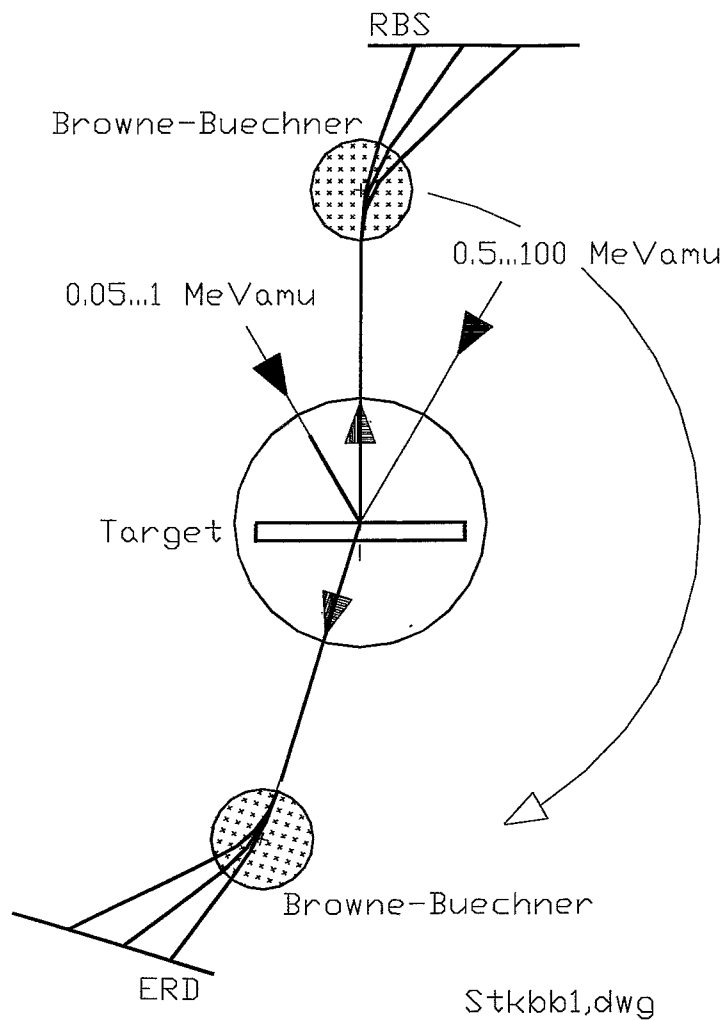


Abb.2 Analysestation

In der Analysestation wird ein hochauflösendes Browne-Buechner-Magnetspektrometer [BroBue56] eingesetzt und in Strahlrichtung wahlweise hinter oder vor dem Target aufgestellt. Mit dieser Anordnung werden die Vorwärtsstreuung an leichten bzw. die Rückwärtsstreuung an schweren Beimischungen im Target unter Verwendung des Hoch- oder des Niederenergiestrahls benutzt, um Tiefenprofile dieser Beimischungen zu bestimmen. Durch die magnetische Spektrometrierung der gestreuten Ionen wird die Nachweisempfindlichkeit der Analyse wesentlich gesteigert. Das Target und die Strahlführungen zum Target sind ortsfest. Unterschiedliche Analysemodi werden realisiert, indem das Browne-Buechner-Spektrometer gemäß Abb. 2 an unterschiedlichen Orten in Stellung gebracht wird [GHJKKT99].

2 Entwicklungsziele

Zur Durchführung dieser und ähnlicher Experimente wurden an der Rossendorfer Anlage folgende Entwicklungsziele realisiert :

1. Die Anlage überträgt Energie- und Teilchenspektrum der Beschleuniger verlustarm zu den Targetstationen. Die Ionenspektren umfassen die Elemente Wasserstoff bis Wismut im Energiebereich 0.05 bis 1 MeV \times amu (Implanter) sowie die Elemente Wasserstoff bis Gold im Energiebereich 0.5 bis 100 MeV \times amu (Tandatron-Beschleuniger).
2. In der Doppelimplantationskammer schneiden sich Hoch- und Niederenergiestrahl unter 45°. Beide Strahlen können im gesamten Energiebereich so über das Target gewobbelt werden, daß auf einer Fläche von 1 cm² die Dosisverteilung homogenisiert wird und der Neutralteilchenstrahl nicht auf das Target gelangt. Mit Hilfe eines Goniometers und von Strahlableitern kann wahlweise kanalisiert oder in Random-Richtung implantiert werden.
3. Die Analysestation ist so aufgebaut, daß der Browne-Buechner-Analyser entweder vor- oder rückwärtsgestreute Ionen aufnehmen kann. Das Strahlführungssystem erlaubt die Durchführung von Experimenten mit minimaler Emittanz, ggf. auch bei verringerter Strahlintensität.
4. In beiden Strahlführungen befinden sich magnetische bzw. elektrostatische Strahlagekorrektoren sowie Monitore, die die Ionen in der Nähe der Strahlachse zu führen gestatten und darüberhinaus gewährleisten, daß die Targets mittig getroffen werden.
5. In der Strahlführung ist ein Druck im unteren 10⁻⁵ pa Bereich ausreichend. Entsprechende Druckreduzierstufen sind realisiert, um in der Analysestation Experimente bei Drucken $\leq 10^{-7}$ pa durchführen zu können.
6. Kontrolle und Steuerung der Zweistrahlanlage sind als offenes System ausgelegt, in das die Steuerung der Beschleuniger, der Experimente sowie der beschriebenen und ggf. weitere Mehrstrahlführungen einbezogen werden können.
7. Die Strahlachse des Hochenergiestrahls wird um 300 mm angehoben, um ein einheitliches Niveau der beschriebenen sowie weiterer Experimentierstationen etwa im Zusammenhang mit dem Tandem-Beschleuniger zu gewährleisten.
8. Die Durchführung von Einzelstrahlexperimenten an den bisher genutzten Rossendorfer Strahlführungen ist weiterhin uneingeschränkt möglich.

3 Ergebnisse der ionenoptischen Optimierung

500 kV Implanter, Tandetron Beschleuniger und Experimentstationen in der Rossendorfer Zweistrahlanlage wurden gemäß Abb. 3 angeordnet. Die Abbildung zeigt neben den Standorten der Beschleuniger und der Anordnung der

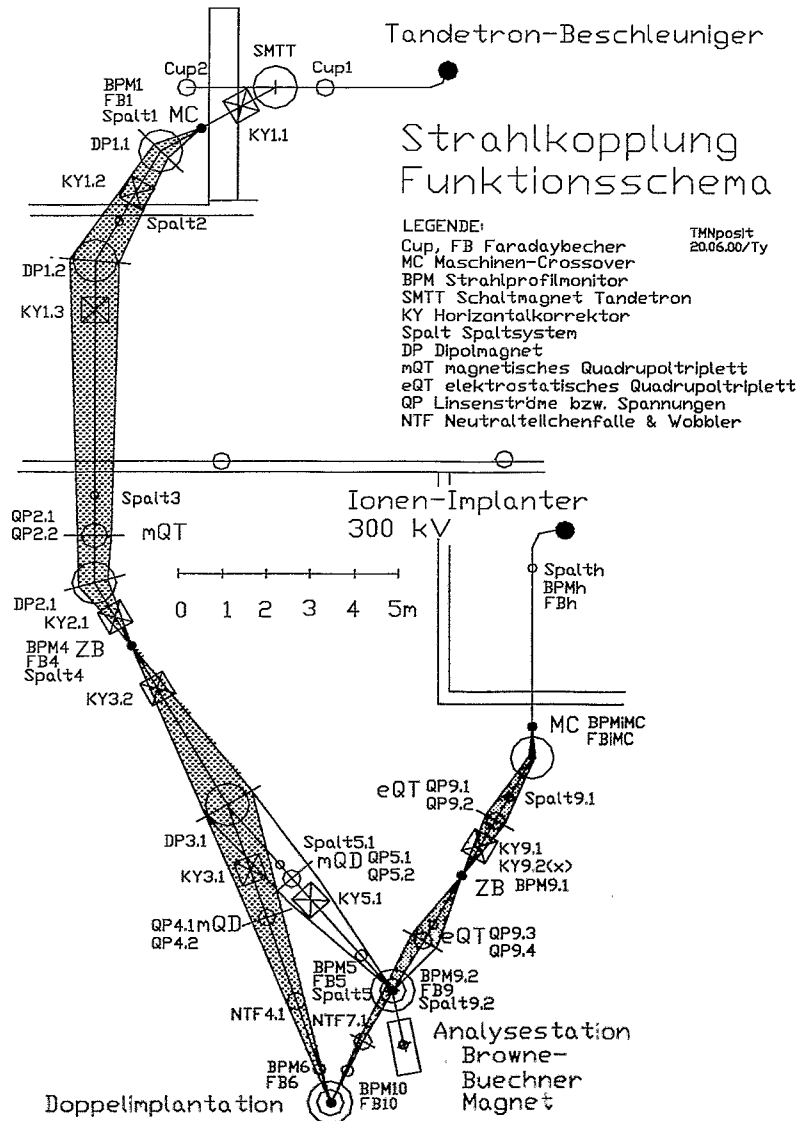


Abb. 3 Schema der Rossendorfer Zweistrahlordnung

Targetstationen auch die wichtigsten ionenoptischen Elemente und die ungefähre Form der Strahlenveloppen.

Diese Anordnung im Zusammenhang mit den in den Tabellen 1, 2, und 3 angeführten, zugehörigen Betriebsparametern ist das Ergebnis einer iterativen Optimierung, die darauf abzielte, den naturgemäß divergierenden Ionenstrahl mittels Linsen und Ablenkern verlustfrei zu den Targetstationen transportieren zu können.

Grundlage dieser Optimierung ist:

- Die Beschleuniger mit ihren zugehörigen fokussierenden Elementen gestatten einen Strahlfokus, das sogenannte Maschinen-Crossover, mit (zumindest näherungsweise) bekannten linearen Abmessungen und Emittanzwerten an einer bestimmten Stelle der bereits vorhandenen Beschleunigerstrahlführungen zu erzeugen.
- Der Eingang in die neuen Strahlführungen wird in unmittelbare Nähe dieser Maschinen-Crossover gelegt. Aufstellorte und Stärken der verwendeten fokussierenden und ablenkenden Elemente wie Linsen und Dipolmagnete der Zweistrahlführung sind so optimiert, daß eine Übertragung der Maschinen-Crossover (ggf. mit Hilfe eines Zwischenbilds) für das gewünschte Energie- sowie Teilchenspektrum mit minimaler Strahlbescheidung zu den Targets der Experimente möglich ist. Die Brechkraft von Linsen und Magneten wird der Teilchenart und der Teilchenenergie so angepaßt, daß ortsfeste Zwischenbilder entstehen. Die Zwischenbilder werden zu Justage und Betriebskontrolle der Zweistrahlanlage benutzt.
- Die Emittanzintervalle, die den Optimierungsrechnungen zugrundegelegt wurden, basieren auf Werten, die für die eingesetzten Ionenquellen typisch sind. Sie werden durch die gewünschten Energieintervalle (s. Pkt. 3.1) beider Beschleuniger bestimmt.
- Nebenbedingung des Optimierungsalgorithmus sind räumliche Gegebenheiten sowie der Wunsch, möglichst wenige und einheitliche ionenoptische Elemente in der Anlage einzusetzen. Darüberhinaus sind zukünftige Erweiterungen des Systems, wie die Strahlführung zum Durchstrahlungsmikroskop im Keller des Labors oder der Anschluß des Gils-Spektrometers an den Strahl des Tandem-Beschleunigers möglich.
- Zur mathematischen Optimierung der Linsenstärken wurde der Code SYSFIT benutzt. SYSFIT ist für die Lösung von Entwicklungsarbeiten an den Elektrostatischen Beschleunigern in Rossendorf entwickelt worden [Fri86_1, Fri86_2]. Das Programm benutzt die Matrixtheorie [Dah73] der Ionenoptik in erster Näherung ohne Berücksichtigung von relativistischen Effekten und Raumladungseinflüssen. Die zitierte Version des Programms wurde so verändert [Mü98], daß die Rechenergebnisse mit Hilfe des Grafikprogramms Microsoft-ORIGIN visualisiert werden können.

3.1 Führung des Hochenergiestrahls

Im Abstand von 1 bis 2 m in Strahlrichtung nach dem Schaltmagnet des Tandetron-Beschleunigers befindet sich das Maschinen-Crossover mit Strahl-abmessungen von $x_0, y_0 = (1 \text{ bis } 2) \text{ mm}$. Ort und Größe des Crossovers können durch die Einstellung einer Quadrupollinse beeinflusst werden, die sich zwischen Beschleuniger und Schaltmagnet befindet (in Abb. 3 nicht dargestellt). Die Emittanz des Tandetronstrahls beträgt hier $\epsilon_{x0} = \epsilon_{y0} = (1 \text{ bis } 2) \times 10^{-6} \pi \times m \times \text{rad}$. Der Zahlenwert gilt für Terminalspannungen von 3 MV. Mit x und y werden hier die horizontale bzw. die vertikale Strahlausdehnung bezeichnet. Der Index 0 bezieht sich auf den Startpunkt der Strahlführung, das Maschinen-Crossover. Mit z wird die Vorwärtsrichtung des Strahls, beginnend am Maschinen-Crossover, bezeichnet.

Die Tandetronstrahlführung ist bis zu den Targets T2 (Analysestation) und T3 (Doppelimplantation) für ein Masse-Energie-Produkt bis zu Werten von $100 \text{ MeV} \times \text{amu}$ ausgelegt. Dazu war der zum Tandetron gehörige Schaltmagnet durch einen neuen Magneten der Firma Danfysik (s. Anlage 'Magnete und Linsen') zu ersetzen. Der alte, zum Tandetron gehörige Schaltmagnet genügt diesen Anforderungen im 15° -Kanal, nicht aber im 30° -Kanal. Daher wird der alte Schaltmagnet (s. Abb. 3) an anderer Stelle der Zweistrahlführung wieder verwendet.

Auf der Strecke zwischen dem ersten und zweiten Ablenkmagnet wird die Differenz der Strahlhöhen von 300 mm zwischen dem Tandetron einerseits und Implanter sowie Tandem-Beschleuniger andererseits durch Verkippen der beiden Ablenkmagnete überwunden. Durch die Neigung der Magnete entsteht ein horizontales Ablenkdefizit von 0.5° pro Ablenkmagnet (s. Punkt 8.2 sowie Anlage 'Korrektormagnet'). Das Defizit wird mit Hilfe der Ablenkmagneten selbst korrigiert. Die hierdurch hervorgerufene zusätzliche Höhenabweichung wird mit je einem magnetischen Korrektorkompensiert.

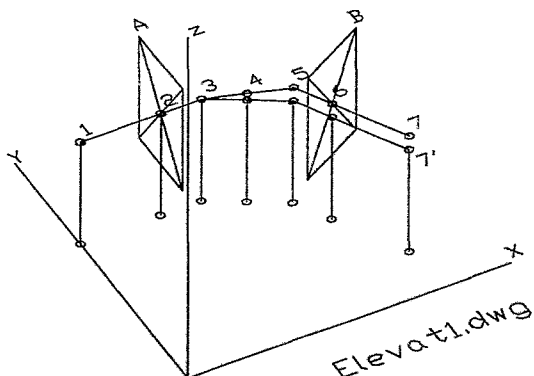


Abb. 4 Hebung des Hochenergiestrahls durch Verkippen zweier Ablenkmagnete (die Abschnitte 2, 3, 4 sowie 4, 5, 6 stellen je einen Ablenkmagneten dar).

Für Ablenkung und Formung des Hochenergiestrahls werden einheitliche, doppeltfokussierende 30°-Ablenkmagnete bzw. Schaltmagnete mit Ablenkwinkeln von $\pm 11^\circ$, $\pm 30^\circ$ sowie magnetische Quadrupollinsen (DANFYSIK) verwendet (s. Anlage 'Magnete und Linsen'). Ablenkradius bzw. Maximalerregung der Ablenkmagnete betragen $R=1000$ mm bzw. $B=1.45$ T. Zum Aufbau der magnetischen Linsen wurden zwei Typen von Quadrupolen eingesetzt, die zu Dupletts bzw. zu einem Tripletts zusammengesetzt wurden. Der maximale Gradient der magnetischen Quadrupole beträgt $G=14$ T/m. Mit den Magneten (im Fall der 30°-Ablenkung) und den Linsen können für Teilchen des Masse-Energie-Produkts von 100 MeV \times amu Brennweiten von etwa 3.5 m erhalten werden.

Zur Kontrolle der Strahlführung befindet sich an jedem Strahl-Crossover sowie zusätzlich vor dem zweiten Ablenkmagnet und vor dem magnetischen Quadrupoltriplett eine Diagnoseeinheit.

Im Ergebnis der mathematischen Optimierung kann der Strahl gemäß Abb. 3 nahezu verlustfrei vom Maschinen-Crossover durch die Luftspalte der ionenoptischen Elemente hindurch zu den Targetstationen übertragen werden, ohne daß die Grenzwerte der Linsenstärken überschritten werden.

Bei dieser Optimierung wurden Strahlverluste durch Wechselwirkung am Restgas vernachlässigt und angenommen, daß sich der gesamte Strahl innerhalb der im Maschinen-Crossover vorliegenden Emittanzellipse - also auch innerhalb der berechneten Strahlenvelope befindet.

Da die genaue Lage des Maschinen-Crossovers bei unterschiedlichen Ionenenergien nicht bekannt ist, wurde das System so ausgelegt, daß die Übertragung mit Sicherheit auch bei Variation der Lage des Maschinen-Crossovers um ± 0.4 m um die mutmaßliche Position $z=0$ noch funktioniert. Die folgende Abb. 5 zeigt die Anordnung der ionenoptisch relevanten Elemente der Strahlführung mit den Maßen, die in die Rechnungen mittels SYFIT eingegan-

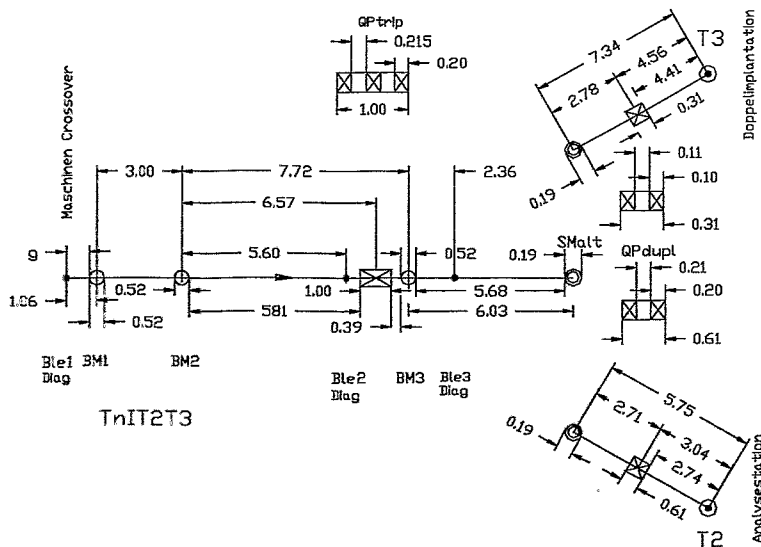


Abb. 5 Ioneneoptisch relevante Elemente der Hochenergiestrahlführung, Maße in m

gen sind. Die optimierten Strahlenveloppen in x- und y-Richtung vom Maschinen-Crossover bis zur Targetstation T2 (Analysesation) für unterschiedliche Ionenenergien werden in Abb. 6 dargestellt. Die Tabelle 1 enthält die Strahl- und Linsenparameter für die Beispiele aus Abb. 6.

Für einen Abstand des Maschinen-Crossovers bis zur Magnetfeldkante des ersten Ablenkmagneten BM1 von $G=0.8$ m (mutmaßliche Lage des Maschinen-Crossovers, s. Abb. 5) sowie zur Erzeugung eines Zwischenbilds am Ort der Blende3 ($z=14140$ mm) ergeben sich die Werte in der Tabelle 1.

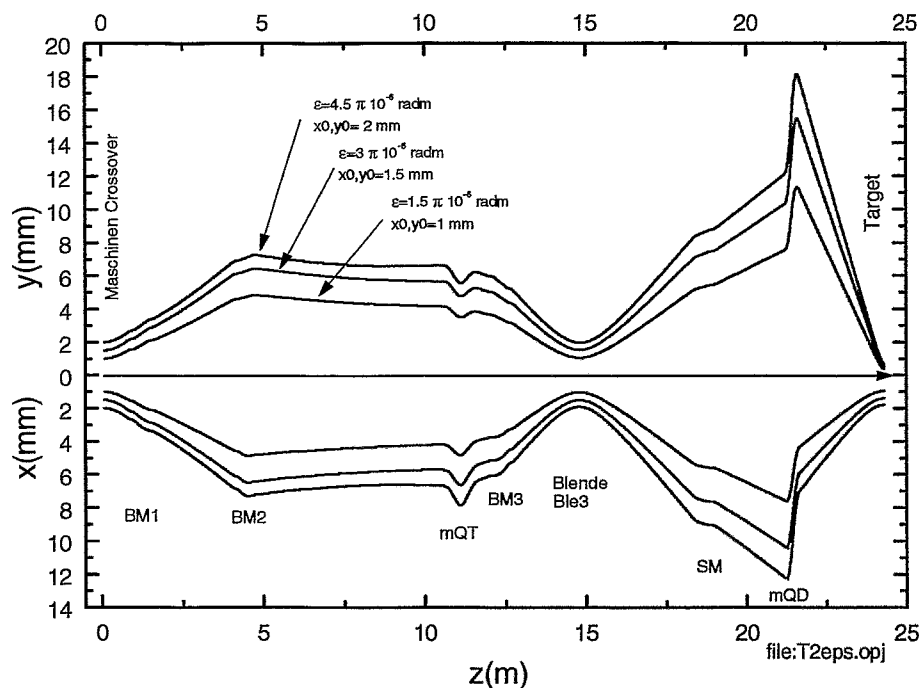


Abb.6 Strahlenveloppen der Hochenergiestrahlführung nach T2 (Analysesation)

$x_0=y_0$	ϵ_0	$\omega^2 t_1 = \omega^2 t_3$	$\omega^2 t_2$	$\omega^2 d_1$	$\omega^2 d_2$	x_e	y_e	$x\uparrow$	$y\uparrow$
Strahlradius am Crossover mm	Emittanz 10^{-6} π m \times rad	Triplet, Feldparameter m^{-2}	Triplet, Feldparameter m^{-2}	Duplett, Feldparameter m^{-2}	Duplett, Feldparameter m^{-2}	Strahlradius Target mm	Strahlradius Target mm	Größter Strahlradius im mQD mm	Größter Strahlradius im mQD mm
1	1.5	2.0	-4.0	-5.2	5.7	1.0	0.4	7.5	11
1.5	3	2.1	-4.1	-5.2	5.7	1.4	0.5	10	15
2	4.5	2.2	-4.3	-5.1	5.7	2.0	0.7	12	18

Tabelle 1

Ionenoptische Kenngrößen für die Strahlführung vom Maschinen-Crossover des Tandatron-Beschleunigers zum Target der Analysestation T2

Entsprechendes gilt für die Strahlenvelope vom Maschinen-Crossover bis zur Targetstation T3 (Doppelimplantation) für unterschiedliche Ionenenergien (s. Abb. 7). Die Tabelle 2. enthält die entsprechenden Strahl- und Linsenparameter für die Beispiele aus Abb.7. Auch hier entsteht das Zwischenbild an der Stelle $z=14140$ mm.

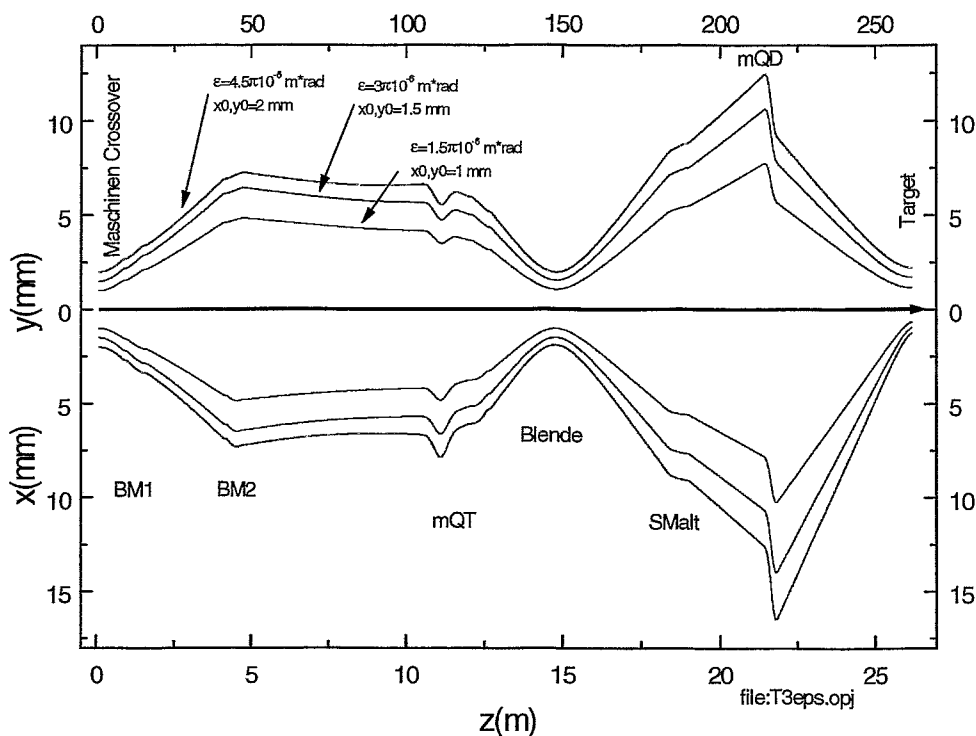


Abb. 7 Strahlenvelope der Hochenergiestrahlführung nach T3 (Doppelimplantation)

$x_0=y_0$	ϵ_0	$\frac{\omega^2 t_1}{\omega^2 t_3}$	$\omega^2 t_2$	$\omega^2 d_1$	$\omega^2 d_2$	x_e	y_e	$x \uparrow$	$y \uparrow$
Strahlradius am Crossover mm	Emittanz $10^{-6} \pi \text{ m}^2 \text{ rad}$	Triplet, Feldparameter m^2	Triplet, Feldparameter m^2	Duplett, Feldparameter m^2	Duplett, Feldparameter m^2	Strahlradius Target mm	Strahlradius Target mm	Größter Strahlradius im mQD mm	Größter Strahlradius im mQD mm
1	1.5	2.0	-4.0	11.4	-11.7	0.7	1.2	10	8
1.5	3	2.1	-4.1	11.4	-11.6	1.0	1.7	14	11
2	4.5	2.2	-4.3	11.3	-11.6	1.2	2.3	16	12.5

Tabelle 2

Ionenoptische Kenngrößen des Tandetron-Beschleunigers zum Target der Doppelimplantationsstation T3.

Die Beispiele für $\epsilon_0 = 1.5, 3$ und $4.5 \times \pi \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ rad}$ sind relevant für Terminalspannungen $U_T = 3, 0.9$ und 0.3 MV. Die Emittanzwerte ergeben sich aus der

Terminalspannung unter der Voraussetzung, daß der Strahlradius am Maschinen-Crossover wie in den Tabellen 1 und 2 mit abnehmender Terminalspannung zunimmt und die normierte Emittanz $\varepsilon_0 \times (U_T \times (q+1))^{1/2}$ in der Zweistrahlführung eine Erhaltungsgröße ist. Der Gradient $g = \delta B_y / \delta x$ in (T/m) eines magnetischen Quadrupols ist bestimmt durch:

$$g = 2\mu_0 NI/a^2 = 2.51 \times 10^{-6} \frac{NI}{a^2} \quad (3.1)$$

und der Feldparameter ω^2 in (m^{-2}) durch:

$$\omega^2 = \frac{2}{a^2} \mu_0 NI \sqrt{\frac{q^2}{2mW}} = 1.75 \times 10^{-5} \frac{NI}{a^2} \sqrt{\frac{1}{WA}} n = 6.93g \frac{n}{\sqrt{WA}} \quad (3.2)$$

hier sind:

$q = ne$ Ladung und m Masse des Ions, e und μ_0 die bekannten Naturkonstanten, a Aperturradius des Quadrupols, NI Amperewindungszahl pro Pol, W Teilchenenergie in MeV, A und n Massenzahl und Ladungszustand des Teilchens [Gro86, Fri86_1, Will92]. Mit den Quadrupolkennzahlen Amperewindungszahl $NI = 97 \times 24 AW$ und Aperturdurchmesser $2a = 40$ mm (s. Anlage 'Magnete und Linsen') ergibt sich der maximale Gradient der magnetischen Danfysikquadrupole zu $g = 15$ T/m.

Die Quadrupolströme in Abhängigkeit der optimierten Feldparameter aus den Tabellen 1 und 2 für unterschiedliche Teilchen (Ladungszustand n , Energie W und Massenzahl A) bestimmen sich zu:

$$I = 0.234 \omega^2 \frac{\sqrt{WA}}{n} \quad (3.3)$$

Dabei wird berücksichtigt, daß alle verwendeten Quadrupole 97 Windungen pro Pol besitzen. Damit ergeben sich als Maximalwerte der Stromstärken: für das Quadrupolduplett aus Tabelle 1 $I_{max} = 12$ bzw. 13 A und für das Quadrupolduplett aus Tabelle 2 $I_{max} = 27.5$ A.

Aus dem Maximalwert des Gradienten ergibt sich unter Nutzung dieser Zusammenhänge auch, daß die Strahlführung zum Transport von n -fach geladenen Teilchen mit einem Masse-Energieprodukt von $100 \text{ MeV} \times amu$ so ausgelegt werden muß, daß die Feldparameter den Wert $\omega^2 = 10.4/n$ nicht überschreiten. Diese Bedingung ist immer erfüllt bis auf das magnetische Quadrupolduplett in der Strahlführung zur Doppelimplantationskammer (s. Tab.2). Der benötigte Feldparameter liegt hier etwa 10% über dem möglichen Maximalwert. Mit dieser Anordnung funktioniert die Hochenergiestrahlführung zur Doppelimplantation daher nur bis zu einem Masse-Energieprodukt von 90

MeV \times amu. Vergrößert man allerdings den Abstand zwischen den Quadrupolen in der zugehörigen Linse, kann die Brechkraft des Dupletts erhöht werden, und die Abbildung des Maschinen-Crossovers auf das Target ohne Überschreitung des Grenzwerts ermöglicht werden. Diese Maßnahme ist leicht durchführbar, denn die Konstruktion der Vakuumkammer (s. Anlage 'Technische Zeichnungen') für die magnetischen Linsen erlaubt die Vergrößerung des Abstands in einfacher Weise.

3.2 Führung des Niederenergiestrahls

Die Niederenergiestrahlführung (vergleiche die Abbildungen 3, 11, und 14) wurde für ein Masse-Energie-Produkt bis zu Werten von 1 MeV \times amu ausgelegt. Der Implanterstrahl wird von seinem Maschinen-Crossover, das sich etwa 0.25 m vor dem Eintritt in den Implanterschaltmagneten befindet, mit Hilfe eines elektrostatischen Quadrupoltripletts QThv (Teil einer nicht mehr genutzten Einstrahlführung des Implanters) in die Analysestation übertragen. Zur Durchführung von Doppelimplantationen wird der Strahl unter Verwendung eines weiteren elektrostatischen Quadrupoltripletts QTnec (s. Anlage 'Magnete und Linsen') durch die Analysestation in die Doppelimplantationsstation geleitet. Die Brennweiten der beiden Tripletts betragen 1.5 bzw. 1.8 m bei Betriebsspannungen von ± 3.5 kV bzw. ± 8.5 kV bei einer Beschleunigungsspannung von 300 kV.

Strahlwobbelung und Neutralteilchenunterdrückung des Niederenergiestrahls befinden sich im Strahlpfad unmittelbar vor der Doppelimplantationskammer.

Da der Niederenergiestrahls nur etwa 1/10 der Energie des Hochenergiestrahls besitzt, muß die Führung des Implanterstrahls zu den Experimentierstationen entsprechend kürzer ausgeführt werden. Die Längskomponente der Ionengeschwindigkeit skaliert mit der Wurzel aus der Energie. Querkomponente der Ionengeschwindigkeit und Strahlaperturen von Hoch- und Niederenergiestrahls sind vergleichbar. Deshalb beträgt die Länge der Implanterstrahlführung nur etwa ein Drittel der Tandetronstrahlführung (vergl. Abb. 3).

Die reduzierte Emittanz für die eingesetzten Ionenquellen beträgt $\epsilon_n = (1.5 \text{ bis } 2.5) \times \pi \times 10^{-6} \text{ rad} \times \text{m} (\text{MeV})^{1/2}$ [Sid70, Kir74]. Das entspricht $\epsilon_{n0} = \epsilon_{y0} = (3 \text{ bis } 5) \times \pi \times 10^{-6} \text{ grad} \times \text{m}$ bei Beschleunigungsspannungen von 300 kV. Die laterale Ausdehnung des Implanter Maschinen-Crossovers wird zu $x_0, y_0 = 1 \text{ bis } 2.5 \text{ mm}$ in Abhängigkeit der Beschleunigungsspannung abgeschätzt. Dieser Schätzung liegt die Abmessung des Strahlflecks zugrunde, den die Quadrupollinse des Implanters mit der Vergrößerung $M=2$ an der Standard-Implantationsstation aus dem Maschinen-Crossover (s. Abb. 14) erzeugt.

Auf diesen Werten beruht die Optimierung der Implanterstrahlführung zu den Targets von Analysestation und Doppelimplantation. Anordnung und Abmessungen der ionenoptisch relevanten Elemente der Niederenergiestrahlführung sind in Abb. 8 dargestellt.

Eine differenzielle Druckstufe zwischen Strahlführung und Analysestation ermöglicht einerseits die notwendige Absenkung des Arbeitsdruckes in Targetnähe in den Bereich von 10^{-7} pa, erfordert andererseits allerdings die Positionierung der Strahldiagnostik im Abstand von über einem Meter vor dem Target. D.h., die für die Diagnostikposition im praktischen Betrieb gefundenen Betriebsparameter müssen nachgestellt werden, wenn der Strahl an das Target weitergegeben wird.

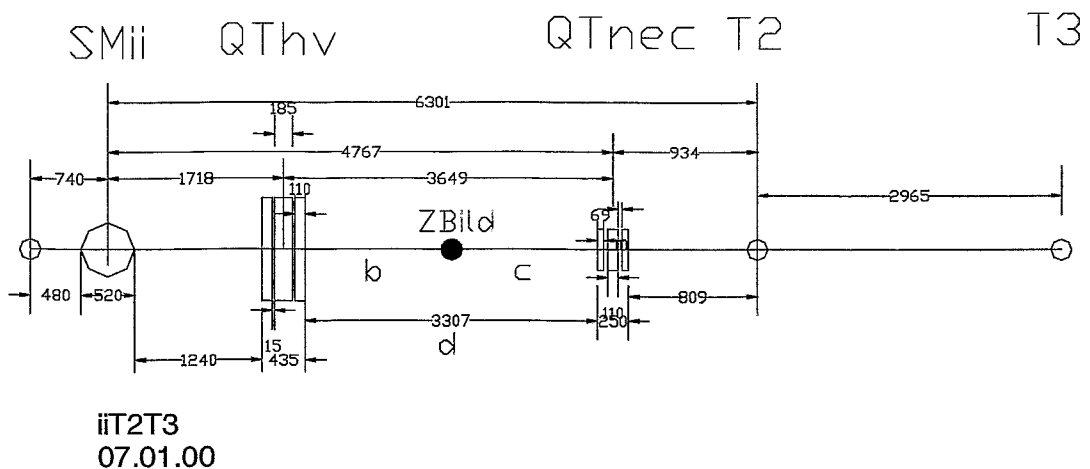


Abb. 8 Ionoptisch relevante Elemente der Niederenergiestrahlführung.

Um den Strahl auf das Target der Doppelimplantationskammer (T3) zu übertragen, kann mit dem ersten Triplet ein Zwischenbild (ZBild in Abb. 8) erzeugt werden, das mit einem Strahlprofilmonitor kontrolliert wird. Dieses Zwischenbild wird mit Hilfe des zweiten elektrostatischen Quadrupoltripletts QTnec (s. Anlage 'Magnete und Linsen') auf das Target der Doppelimplantation übertragen.

Auch in diesem Fall müssen bei der Strahlübergabe von der Diagnose- in die Targetkammer die Linsenparameter nachgestellt werden – wie generell auch im Fall der Hochenergiestrahlführung. Die Strahlveloppen in x- und y-Richtung vom Maschinen-Crossover bis zu den Targetstationen T2 und T3 für unterschiedliche Ionenenergien sind in Abb. 9 dargestellt.

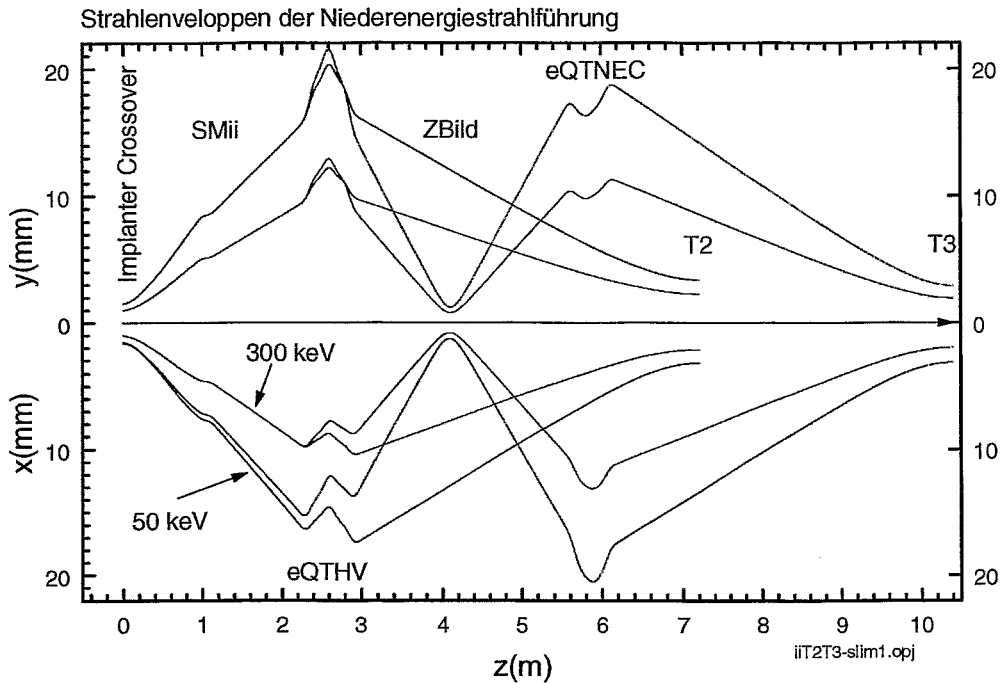


Abb.9 Strahlveloppen der Niederenergiestrahlführung nach T2 und T3

Die Tabelle 3 enthält die Strahl- und Linsenparameter für die Beispiele aus Abb.9.

$x_0=y_0$	ϵ_0	$\omega^2 t_{11}$ $= \omega^2 t_{31}$	$\omega^2 t_{21}$	$\omega^2 t_{12}$ $= \omega^2 t_{32}$	$\omega^2 t_2$	x_e	y_e	$x \uparrow$	$y \uparrow$
Strahlradius MaCrossOv mm	Ermittanz $10^6 \text{ rmm} \times \text{rad}$	1.Triplett,Feld- parameter m^2	1.Triplett,Feld- parameter m^2	2.Triplett ,Feld- parameter m^2	2.Triplett,Feld- parameter m^2	Strahlradius Target mm	Strahlradius Target mm	Größter Strahl- radius im eQT mm	Größter Strahl- radius im eQT mm
1	5	-18.0	20.6			2.1	2.3	10.5	12
1.5	12.5	-18.1	20.6			3.2	3.4	12	11.3

Dieser Teil der Tabelle 3 bezieht sich auf die Strahlführung bis zur Analysestation.

1	5	-25.3	28	41.26	-50	2.0	1.9	13	11
1.5	12.5	-25.3	28	41.3	-50.1	3.1	3.0	17	14

Dieser Teil der Tabelle 3 bezieht sich auf die Strahlführung bis zur Doppelimplantation.

Die Beispiele für die beiden Emittanzwerte $(5 \text{ bzw. } 12.5) \times 10^{-6} \pi \text{ m} \times \text{rad}$ entsprechen Ionenenergien von 300 bzw. 50 keV. Der Feldparameter ω^2 für einen elektrostatischen Quadrupol bestimmt sich nach [Fri86_1] zu :

$$\omega^2 = U / (a^2 \times \underline{U}) \quad (3.4)$$

U ist die Spannung am Quadrupol in kV, a ist der Aperturradius des Quadrupols in Metern und \underline{U} ist die Beschleunigungsspannung der Teilchen in kV. Der Aperturradius des HV-Triplets beträgt $a_{\text{HV}} = 0.0207 \text{ m}$, der des NEC-Triplets $a_{\text{NEC}} = 0.025 \text{ m}$ (s. Anlage 'Magnete und Linsen'). Für $\underline{U} = 300 \text{ kV}$, ergibt sich mit den Werten für den Feldparameter aus der Tabelle 3 ein Bereich von Spannungen an den Triplets: $U = (\pm 2.3 \text{ bis } \pm 3.6) \text{ kV}$ für das HV-Triplett und $U = (\pm 7.7 \text{ bis } \pm 9.3) \text{ kV}$ für das NEC-Triplett.

In der Anlage 'Files zur Ionenoptischen Optimierung' sind neben dem exe-File des SYSFIT-Codes ausgewählte Ein- und Ausgangsfiles für die Optimierungsrechnungen zusammengestellt. Das Ausgangsfile sysgrf dient als Eingangsfile für die Visualisierung der Strahlenveloppen mittels Microsoft-ORIGIN.

4 Strahlwobbelung

Zur Homogenisierung der Ionendosis in der Doppelimplantationsstation wird das klassische System aus drei elektrostatischen Plattenkondensatoren benutzt. Die beiden ersten in Strahlrichtung durchlaufenen Plattenpaare sind orthogonal zueinander angeordnet und mit Sägezahnspannungen beaufschlagt. Hiermit wird der beim Eintritt in das System fokussierte Strahl auseinandergezogen. Bis auf einen Randstreifen von etwa zwei Strahlbreiten des fokussierten Strahls kann eine homogene Strahldichte dann erhalten werden, wenn das Verhältnis der x- und y-Wobbelfrequenzen angenähert irrational und die Zahl der Rasterungen über die Probe hinreichend groß ist [RyRu78]. Das dritte Plattenpaar (Falle für Neutralteilchen) wird mit einer Gleichspannung beaufschlagt, die dafür sorgt, daß Neutralteilchen nicht auf das Target gelangen. Erstes und drittes Plattenpaar werden vertikal angeordnet. Mit Hilfe der Formel [Mie70]:

$$\tan \alpha = D/L = Ulq / 2U_0 d(q+1) \quad (4.1)$$

werden Ablenkwinkel α oder Ablenkamplitude D im Abstand L von der Mitte des jeweiligen Kondensators für alle drei Plattenpaare unter Verwendung der Ablenkspannungen U sowie der Plattenparameter (Länge l und Abstand d) bestimmt. Die Bedeutung der Zeichen geht aus der Abb. 10 hervor. Bei Tandembeschleunigern ist in der angegebenen Weise der Ladungszustand q zu

berücksichtigen.

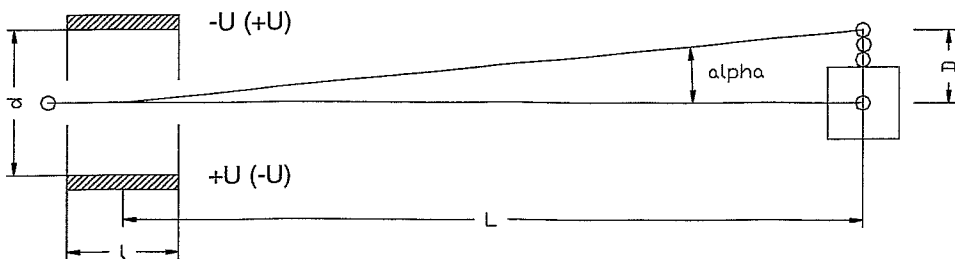


Abb.10 Ionenstrahlablenkung

Erfolgt die Beschleunigung ohne Umladung, wie bei dem eingesetzten 500 kV-Implanter, gilt der fett gedruckte Anteil der Formel, U_0 ist die gesamte Beschleunigungsspannung.

Im Hochenergiezweig wurde ein zum 500 kV Implanter gehöriges Wobbelsystem [HV] wiederverwendet. Der Plattenabstand der Falle wurde von ursprünglich 80 auf 42 mm reduziert und die Mittelachse dieses Plattenpaares entsprechend dem hier geringeren Ablenkwinkel (0.5°) eingestellt. Im Implanterzweig wird ein von DANFYSIK geliefertes System eingesetzt (s. Anlage 'Magnete und Linsen').

Zur Berechnung der notwendigen Ablenkspannungen wurde davon ausgegangen, daß der Strahldurchmesser bei Eintritt in das jeweilige Wobbelsystem 5 mm für den Hochenergiestrahle und 10 mm für den Niederenergiestrahle nicht überschreitet und eine Targetfläche von 1 cm^2 homogen implantiert werden soll. In der folgenden Tabelle 4 sind die Werte für beide Wobbelsysteme zusammengestellt.

Hochenergiestrahle	Horizontal	Vertikal	Falle
l(mm)	550	800	300
d (mm)	47	47	42
U (kV)	± 3.6	± 3.0	± 9.9
D (mm)	± 20	± 20	(-22)
L(mm)	3800	3100	2500
$\alpha(^{\circ})$			0.5
Niederenergiestrahle	Horizontal	Vertikal	Falle
l(mm)	180	250	300
L(mm)	2193	1930	1604
d (mm)	30	30	40
U (kV)	± 1.5	± 1.23	+5.4
D (mm)	± 30	± 30	(+98)
$\alpha(^{\circ})$			3.5

Tabelle 4

Daten der Wobbelsysteme. Die Maße sind der Zeichnung C-8-06-044 (High Voltage), der Zeichnung Electrostatic beam scanning device No 18561 (Danfysik) sowie der Abb. 11 entnommen.

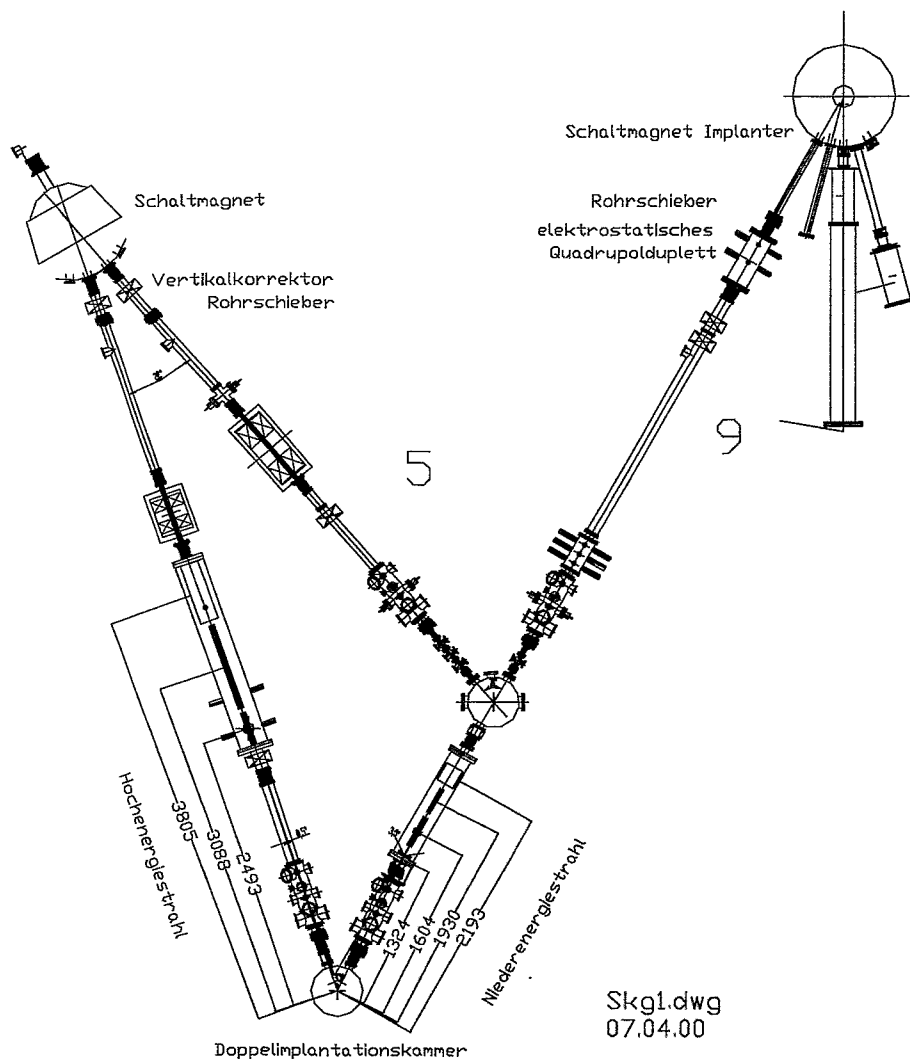


Abb. 11 Strahlwobbeleinrichtungen für die Doppelimplantation

Die Berechnung der notwendigen maximalen Wobbelamplituden erfolgt für eine Terminalspeisung des Tandatronbeschleunigers von 3 MV, für den Ladungszustand $q=3$ und für eine Beschleunigungsspannung des Implanters von 330 kV. Die Versorgungseinheiten für die Wobbelplatten arbeiten im Gegentakt und die Mittenspannung kann mit einem zusätzlichen Gleichspannungsbetrag abweichend vom Wert 0 eingestellt werden.

5 Vakuumtechnische Auslegung

Das Vakuumsystem der Zweistrahlführung besteht aus 8 Abschnitten mit Rohrlängen zwischen 5 und 10 m, die voneinander durch Rohrschieber getrennt werden können und mit je einer Turbomolekularpumpe evakuiert werden. Die Struktur des Vakuumsystems (s. Abb.12) entspricht etwa der ionenoptischen Struktur.

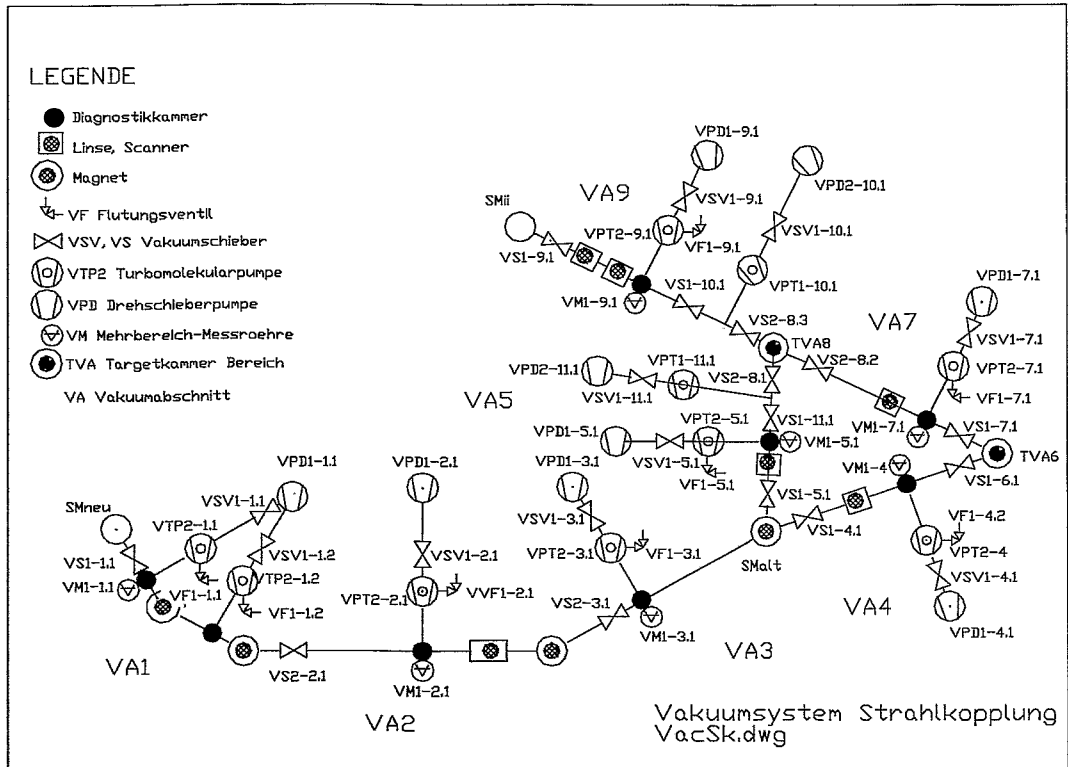


Abb. 12 Struktur des Vakuumsystems der Zweistrahlanlage

Die Dimensionierung des Vakuumsystems geht von folgender Abschätzung aus (s. linker Teil der Abb. 13): an beiden Seiten der Turbomolekularpumpe (Saugleistung S) schließt sich das Strahlrohr der Länge $L/2$ an. Das Zwischen-

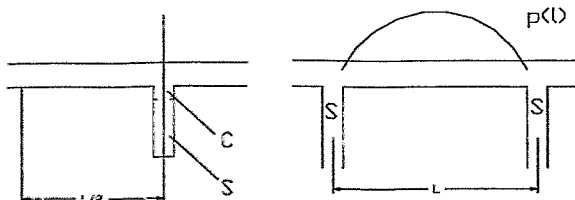


Abb. 13
Evakuierung von
Rohrleitungssystemen

stück (Leitfähigkeit C) reduziert die Saugleistung auf einen Effektivwert von [HVD]:

$$S_e = S/(1+S/C) \quad (5.1)$$

Verwendet man ein Äquivalent der Pumpe 361C (Leybold, S=340 l/s, ϕ 100) und ein Zwischenstück (ϕ 100) der Bauhöhe 15 mm, erhält man C=10⁴ l/s und S_e = 328 l/s. Der Druck beträgt dann nach einer Stunde Evakuierungszeit:

$$p = (Q_1+Q_2+Q_3)/S_e = (1.4...2) \times 10^{-4} \text{ pa} \quad (5.2)$$

$$(Q_1+Q_2+Q_3) = (3...6 + 1 + 0.6) \times 10^{-2} \text{ pa} \times \text{l/s} \quad (5.2a)$$

mit $Q_1 = F \times q_1 = (1...2) \times \pi \times 10^{-2} \text{ pa} \times \text{l/s}$: Gasabgaberate des Strahlrohrs (Länge 5...10 m, ϕ 100), $F = (0.5...1) \times 3.14 \times 10^4 \text{ cm}^2$: Rohrrinnenfläche, $q_1 = 1.9 \times 10^{-6} \text{ pa} \times \text{l/scm}^2$ spezifische Gasabgaberate von V2A nach einer Stunde Evakuierungszeit. Weiters ist $Q_2 = 10^{-2} \text{ pa} \times \text{l/s}$ die Leckrate des Teilstücks gem. Abb. 13 sowie $Q_3 = 6 \times 10^{-3} \text{ pa} \times \text{l/s}$ die Gasabgaberate von 7 Vitondichtungen, ϕ 100 nach einer Stunde Evakuierungszeit.

Nach einer Evakuierungszeit von zehn Stunden ist die Gasabgaberate auf <1/10 des Ausgangswerts zurückgegangen. Damit können Enddrücke von etwa $4 \times 10^{-5} \text{ pa}$ (vergl. Punkt 8.3) bei Rohrlängen L zwischen 5 und 10 m erreicht werden.

Zur Abschätzung des Druckanstiegs im Strahlrohr zwischen zwei Pumpen gehen wir vom rechten Teil der Abb. 13 aus. Nimmt man an, daß an den Abgängen S dieser Struktur die effektive Saugleistung S (l/s) vorliegt, daß die Abgänge sich im Abstand L (m) wiederholen und daß die Gasabgaberate q ($\text{pa} \times \text{l/scm}^2$) gleichmäßig auf die gesamte Oberfläche F (cm^2) des Strahlrohrs verteilt ist, stellt sich eine parabolische Druckverteilung zwischen den Abgängen ein. Der mittlere Druck im Strahlrohr ist dann [Piv93]:

$$p_{av} = 2AqL/S \quad (5.3)$$

mit $A = F/L$ (cm^2/m). Der Maximaldruck ergibt sich gemäß

$$P_{max} = Aq(L^2/8w + L/S) \quad (5.4)$$

mit $w = LC$, der spezifischen und C (l/s) der Leitfähigkeit der Verbindungsrohre.

In der folgenden Tabelle 5 sind die Druckwerte bei unterschiedlichen Abständen L für ein ϕ 100 V2A-Rohr ($q = 1.9 \times 10^{-6} \text{ pa} \times \text{l/scm}^2$ nach einer Stunde) und für eine effektive Saugleistung von 328 l/s berechnet. Dabei sind die Anteile von Leckrate sowie Gasabgabe der Vitondichtungen (s. Formel 2a) nicht berücksichtigt.

Für den Fall $L = 5$ m beträgt die Leitfähigkeit des Strahlrohrs $C = 22$ l/s [HVD].

L (m)	1	5	10	20
P_{av} (pa)	3.6×10^{-5}	1.8×10^{-4}	3.6×10^{-4}	1.8×10^{-3}

Tabelle 5

Mittlerer Druck in einem Strahlrohr (ϕ 100) bei unterschiedlichen Abständen zwischen den Pumpstationen

Man erhält damit gem. Formel 5.4 einen Maximaldruck von $P_{max} = 2.6 \times 10^{-4}$ pa. Berücksichtigt man Leckrate und Gasabgabe der Dichtringe, erhält man für das fettgedruckte Beispiel aus der Tabelle $p_{av} = 2.7 \times 10^{-4}$ pa.

Die Strahlführung wurde in ISO-K-Norm mit glaskugelgestrahlten V2A Rohren, vorwiegend ϕ 100 ausgeführt. Es werden Turbomolekularpumpen des Typs 361C (luftgekühlt, keramikgelagert und damit lageunabhängig einbaubar) von LEYBOLD mit einer Saugleistung von 340 l/s und Vorvakuumpumpen des Typs Trivac D 15 E verwendet. Der Abstand der Turbopumpen wurde in Abhängigkeit der ionenoptischen und räumlichen Gegebenheiten zwischen 5 und 10 m gewählt. Die Targetstationen wurden mit eigenen Pumpstationen und für die Analysestation in CF-Norm aufgebaut. Zur Trennung der Vakuumsegmente wurden pneumatisch betriebene VATSchieber aus Aluminium eingesetzt.

Auf eine Trennung der Turbomolekularpumpen von der Strahlführung durch Rohrschieber wurde verzichtet. Im Havariefall wird die betroffene Turbomolekularpumpe automatisch durch ein unmittelbar an der Turbopumpe befindliches, pneumatisch gesteuertes Ventil von der Vorvakuumleitung getrennt.

6 Konstruktive Lösung

Basis der Konstruktion der Rossendorfer Zweistrahlanlage war die beschriebene ionenoptische und die vakuumtechnische Struktur des Systems. Räumliche Gegebenheiten wurden beachtet und eine vernünftige Handhabbarkeit des Systems ist gewährleistet.

Strukturelle Einheiten und experimentelle Endstationen sind abtrennbar. Das ermöglicht Erprobung und Betrieb von Teilabschnitten, ohne daß die Strahlführung außer Betrieb genommen werden muß. Die Strukturierung erlaubt auch die rationelle Kontrolle entscheidender Strahlparameter während der Experimente. Strahlparameter sind dabei Lage des Strahls in Bezug auf die vorgesehene Strahlachse, Lage und Ausdehnung der Crossover sowie die zeitliche Schwankung der genannten Größen.

Abb. 14 illustriert die konstruktive Auslegung der Zweistrahlanlage im neuen Anbau an das Gebäude des Tandembeschleunigers.

Eine detaillierte Darstellung der Anlage ist in der Zeichnung NEW00116 der Anlage ‚Technische Zeichnungen‘ gegeben.

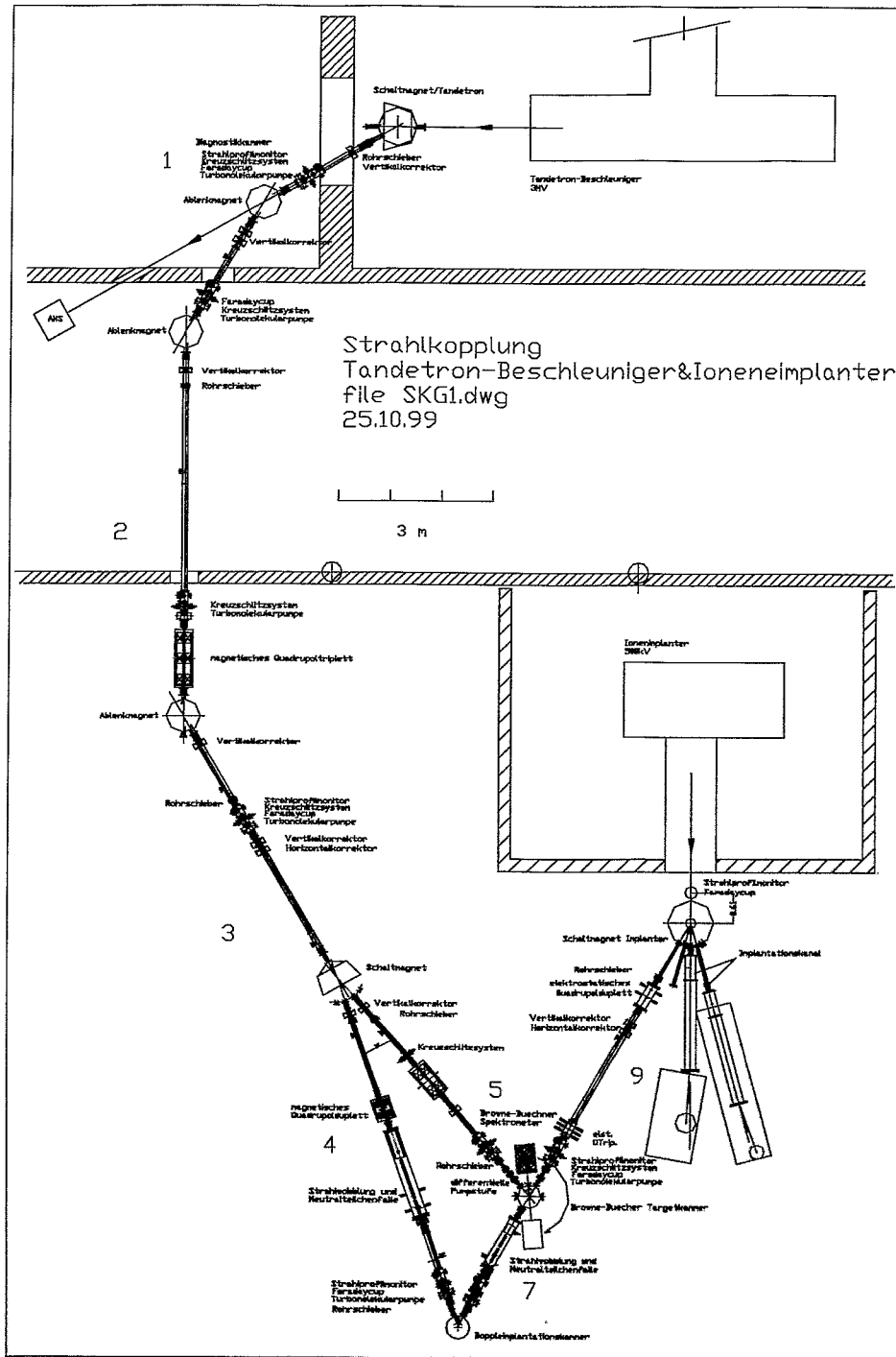


Abb. 14 Konstruktive Auslegung der Zweistrahlanlage

Zusätzlich zu den beschriebenen ionenoptischen Elementen enthält die Darstellung Korrektormagneten mit deren Hilfe der Strahl Lage in x- und y-Richtung an die vorgesehene Strahlachse angepaßt wird. Dargestellt sind auch die Vakuumgefäße mit ihren Flanschen, Rohrschiebern, Faltenbälgen und Diagnostikkammern. Es wurden weitgehend standardisierte Vakuumverbindungen der Firmen LEYBOLD und MDC Cabum verwendet. Rohre, Diagnostikkammern und Rohrstützen (Anlage ‚Technische Zeichnungen‘) wurden im Forschungszentrum hergestellt. Die Vakuumkammern der Ablenk- und Schaltmagneten sowie die zugehörigen Gestelle gehören zum Lieferumfang der Magnete. Es wurden X-Typ-Vakuumkammern für die Magnete eingesetzt. Das erleichtert die Justage der Anlage. Die Vakuumkammern der Magnetlinsen wurden im Forschungszentrum gefertigt. Sie besitzen einen Festflansch und einen abnehmbaren, elastisch gedichteten Flansch (s. Anlage ‚Technische Zeichnungen‘). Der Einbau der Kammern konnte daher ohne Demontage der Quadrupole erfolgen. Die Diagnoseeinheiten (s. Anlage ‚Technische Zeichnungen‘) enthalten (in Strahlrichtung aufgezählt): einen Strahlprofilmonitor, ein Kreuzschlitzsystem sowie einen pneumatisch verfahrbaren Faradaybecher, außerdem eine Vakuumpumpe und eine Druckmeßstelle.

Der Strahlprofilmonitor (Typ BPM81 der Firma NEC) funktioniert nach dem Rotating-Wire-Prinzip. Er erzeugt ein Stromsignal, das auf dem Bildschirm eines Speicheroszillografen die Stromdichteverteilung des Ionenstrahls in x- und y-Richtung sowie die Abweichung des Strahlschwerpunkts von der optischen Achse als stehendes Bild reproduziert. Die Bewegung der Sonde ist mit Hilfe von magnetischen Kontaktgebern kalibrierbar, der Monitor ist in beschränktem Maße zu quantitativen Messungen nutzbar. Das Kreuzschlitzsystem besitzt voneinander unabhängig verstellbare Tantalschneiden. Die durch den Strahl in die Schneiden eingebrachte Wärme wird zu Kühlkörpern nach außen fortgeleitet. Das Meßsystem wurde im Forschungszentrum entwickelt [NöRi88]. Es wird zu Justagezwecken sowie im Bedarfsfall zur Emittanzverbesserung verwendet. Der Faradaybecher (Typ FC 26 der Firma NEC) ist pneumatisch gesteuert, strahlungsgekühlt, für eine maximale Strahlleistung von 50 W ausgelegt. Er dient sowohl zur Ionenstrommessung als auch als Strahlverschluß. Die Diagnoseeinheit ist mit Justageöffnungen zur Einstellung der Nulllage der Schneiden des Kreuzschlitzsystems versehen und besitzt entsprechende Flansche für die Aufnahme der Turbomolekularpumpe und des Druckmeßkopfes sowie Reserveöffnungen – ggf. zur Aufnahme eines Quarzes zur visuellen Strahlbeobachtung.

Der spannungsfreie Aufbau der Systemkomponenten und deren mechanische Justage ist einerseits durch den Einbau einer Vielzahl von Wellbälgen und andererseits durch unterschiedliche mechanische Verstellmöglichkeiten möglich. Die Knickung der Niederenergie-Strahlführung im Zusammenhang mit der Unterdrückung des Neutralteilchenanteils vor der Doppelimplantationsstation wurde mit Hilfe eines speziellen Membranbalgs der Firma Knebel [Kne99] realisiert (s. Anlage ‚Technische Zeichnungen‘), an entsprechender Stelle der Hochenergiestrahlführung ist ein üblicher Wellbalg ausreichend.

Fertigungshinweise für die im Forschungszentrum hergestellten Komponenten finden sich auf den angeführten Zeichnungen in der Anlage ‚Technische Zeichnungen‘. Beschreibungen und Kenndaten kommerziell erworbener Komponenten finden sich in den Produktkatalogen der Firmen DANFYSIK, LEYBOLD, MDC, NEC und VAT.

7 Steuerung des Systems

Der modulare Aufbau der Zweistrahlanlage vereinfacht auch Steuerung und Kontrolle der Anordnung.

Es wurde ein modulares, skalierbares, flexibles und ausreichend reaktionsschnelles Steuerungs- und Überwachungssystem auf der Basis des industriellen Systems speicherprogrammierbarer Steuerungen SIMATIC S7 und der Software zur Prozeßführung WinCC (beide SIEMENS) entwickelt und aufgebaut. In Sonderfällen wurde das System durch eigenentwickelte und –produzierte Interfaces ergänzt.

Das Konzept des Steuerungs- und Überwachungssystems berücksichtigt, daß das Strahlführungssystem zukünftig weiterentwickelt wird. Deshalb wurde eine dezentralisierte Steuerung der Anlage realisiert, die den heterogenen Randbedingungen bei der Vernetzung der vorhandenen Beschleuniger mit den neu zu installierenden Anlagen in vereinheitlichter Weise entgegenkommt.

Die Bedienung der Anlage und die Visualisierung des Anlagenzustandes erfolgt über ein Netzwerk dezentralisierter PC's, die in einer Client-Server-Struktur die Parameter des Gesamtsystems zugänglich machen.

Elektrische Versorgung, Steuerung und Kontrolle der Strahlführung sind Inhalt eines weiteren Berichts [BürGläHer].

8 Aufbau und Test der Zweistrahlanlage

8.1 Vermessung

Vor dem Aufbau der Zweistrahlanlage (Abb. 14 bzw. Zeichnung NEW00116 in der Anlage ‚Technische Zeichnungen‘) führte die Firma PREUSS eine Vermessung der Laborräume im Haus 97 [IPRO96] durch, in der die Anlage aufgestellt ist. Im Ergebnis der Vermessung wurde ein Satz Vermessungsrisse (s. Anlage ‚Vermessung der Labors im Haus 97‘) erstellt, ein Koordinatensystem für die Aufstellung der Anlage festgelegt und dauerhafte Referenzmarken auf dieses Koordinatensystem in den Laborräumen angebracht. In das Koordinatensystem wurden relevante Punkte baulicher Einzelheiten sowie Brechpunkte und andere wichtige Koordinaten des Strahlführungssystems übertragen (s. Anlage ‚Vermessung der Labors im Haus 97‘). Die anlagebezogenen Koordinaten wurden schließlich in die Laborräume übertragen. Damit war eine Positionierung der ionenoptischen Elemente der Strahlführungen sowie die Ausführung von Mauer- und Deckendurchbrüchen möglich. Die Ungenauigkeit der Vermessung liegt bei ± 1 mm [Pre98], die physische Festlegung der anlagebezogenen Koordinaten im Labor hat einen geringfügig größeren Fehler.

In die Vermessung wurden auch Strahlführungen zum Durchstrahlungsmikroskop und zum Gilsspektrometer einbezogen, die in diesem Bericht nicht behandelt werden. Die ionenoptische Dimensionierung sowie ein Auslegungsvorschlag einschließlich Mittelabschätzung für die Strahlführung zum Mikroskop liegen vor [TyNeu98]. Die Auslegung der Strahlführung zum Gilsspektrometer ist abgeschlossen, der Aufbau ist weit fortgeschritten.

8.2 Aufbau und mechanische Justage der Anlage

Zuerst wurde der ursprüngliche Schaltmagnet des Tandetron-Beschleunigers (HIGH VOLTAGE Engineering) gegen den neuen, stärkeren Schaltmagneten (DANFYSIK) ausgetauscht. Die Vakuumkammer des High-Voltage-Schaltmagneten mit allen Verbindungen zu den Einstrahlexperimenten wurde erhalten. Zur Aufnahme der alten Kammer mußte der Luftspalt des neuen Magneten geringfügig vergrößert werden. Es wurde überprüft, daß die maximale Flußdichte des Schaltmagneten (1.45 T) mit der zugehörigen Stromversorgung auch nach der Vergrößerung des Luftspalts noch erreicht werden kann.

Nach der Übertragung der Brechpunkte der neuen Strahlführungen auf den Fußboden (Punkt 8.1) der Laborräume, wurde der Vertikalstrahl eines Meßlasers (AS115 der Firma RABO, Rabenau-Lübau) benutzt, um die Magneten in Position zu bringen. Da sich die Brech- und andere ionenoptisch wichtigen Punkte innerhalb der Kabelkanäle unter den Strahlführungen befinden, wurde eine flache, präzise Justagebrücke angefertigt und für die Positionierung aller

Magnete eingesetzt. Zwei Beine der Brücke wurden so auf zugehörige, im Fußboden dauerhaft eingebrachte und außerhalb der Kanäle liegende Buchsen (Referenzpunkte) geschraubt, daß die Achse des vertikalen Laserstrahls durch den Brechpunkt auf dem Fußboden und nach der Justage des Magneten auch durch den Brechpunkt des Magneten verläuft. Mit Hilfe einer Maschinenwasserwaage wurde die horizontale Lage des unteren Polschuhs der Magneten kontrolliert.

Beim Aufbau der geneigten Ablenkmagneten (Punkt 4) wurde ebenso vorgegangen. Die gewünschte Hebung der Strahlachse (300 mm) ergibt sich durch Drehen des unteren Magneten gegen den Uhrzeigersinn um die Achse des einlaufenden Strahls in der Ebene A in der Abb. 4. Der obere Magnet wird entsprechend um die Achse des auslaufenden Strahls in der Ebene B gedreht. Eine ordnungsgemäße Positionierung der Magnete kann nur erreicht werden, wenn die geradlinigen Teile der Strahlachsen (Abschnitt 1/2 zu Abschnitt 2/3 sowie Abschnitt 5/6 zu Abschnitt 6/7 sowie auch die geraden Rohrstücke zwischen den Magneten 3/4/5) beim Eindrehen der Magneten zueinander achsenzentriert bleiben. Quantitativ wird die Strahlhebung in der Anlage 'Korrektormagnet' behandelt. Das durch die Hebung der Strahlachse auftretende und errechnete Ablenkdefizit beider Magneten in der Horizontalen wurde beim Justagevorgang der Magneten mittels Laserstrahl kontrolliert. Dazu wurden die Ablenkkammern eingelegt und sauber zu den Polschuhen positioniert, ein Laserstrahl durch den Abschnitt 3/4 die Kammer auf den Ausgangsflansch (Schnittstelle 4) gerichtet und die Bewegung des Laserstrahlflecks auf einer halbdurchlässigen Zielscheibe am Ausgangsflansch beim Eindrehen des unteren Magneten verfolgt.

Die exakte Ausführung der Justage der gekippten Magneten erfolgte in mehreren Iterationen; zur praktischen Ausführung war zusätzlich zu dem erwähnten Meßlaser der erwähnte, einfache im Flansch der jeweiligen Ablenkkammer zentral und winkelgenau positionierter Laser notwendig.

Die ionenoptischen Mitten von Linsen, Diagnostikkammern und Experimentkammern sowie die Knickpunkte der Neutralteilchenfallen wurden mittels Lot auf die Sollstellen justiert.

Nachdem die ionenoptisch relevanten Teile der Strahlführungen einschließlich der Targetkammern aufgebaut und justiert waren, wurden die mitgelieferten Justagespitzen in den unteren Polschuhen der Magneten benutzt (je zwei in Flucht mit dem Knickpunkt), um den Justagezustand von Magneten und Experimentkammern in der horizontalen Ebene zu überprüfen und ggf. zu korrigieren. Daraufhin wurden die Vakuumkammern und Anbauaggregate wie Pumpen und Strahldiagnostikgeräte anmontiert. Kreuzspalte und Flanschzentren der Magnet-, Linsen- und Vakuumkammern wurden benutzt, um die Achsen- und Höhenlage derselben auf die Fluchtlinien zwischen den Knickpunkten und den Mitten der Experimentkammern einzustellen. Dabei wurde eine dünnwandige Messingröhre benutzt, um die Linsenammern genau zentrisch zu den Quadrupolachsen zu justieren. Im Endzustand haben alle Magnet- und Linsenammern etwa 1 mm Luft in den zugehörigen Magneten. Abb. 15 und 16 zeigen den Aufbau der ersten beiden Dipolmagneten und die Strahlanhebung.



Abb.15 Strahlanhebung, Dipolmagnet DP1.1

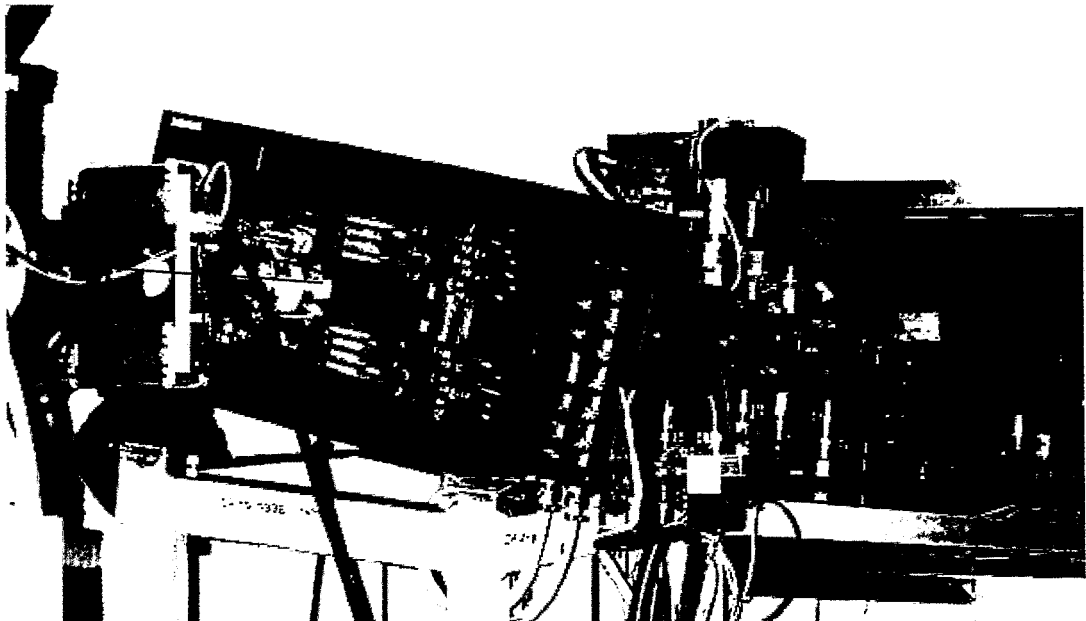
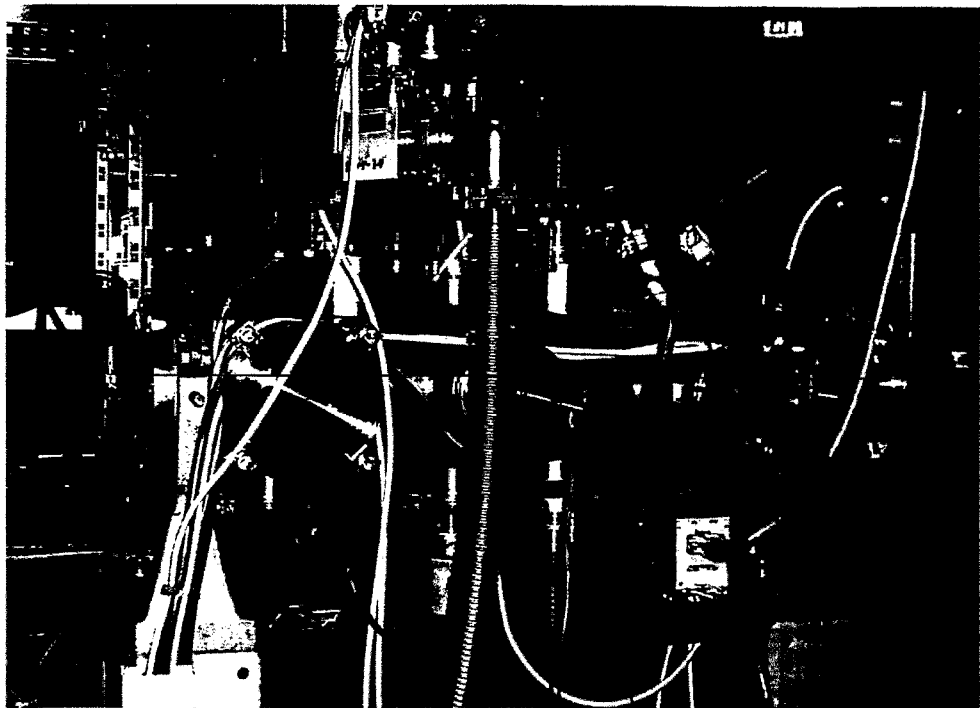


Abb. 16 Einlenken in die Horizontale, Dipolmagnet DP1.2



Abb. 17 Diagnosekammer, Tripletlinse und dritter Ablenkmagnet DP2.1 (oben)
Abb. 18 Diagnoseeinheit (unten)



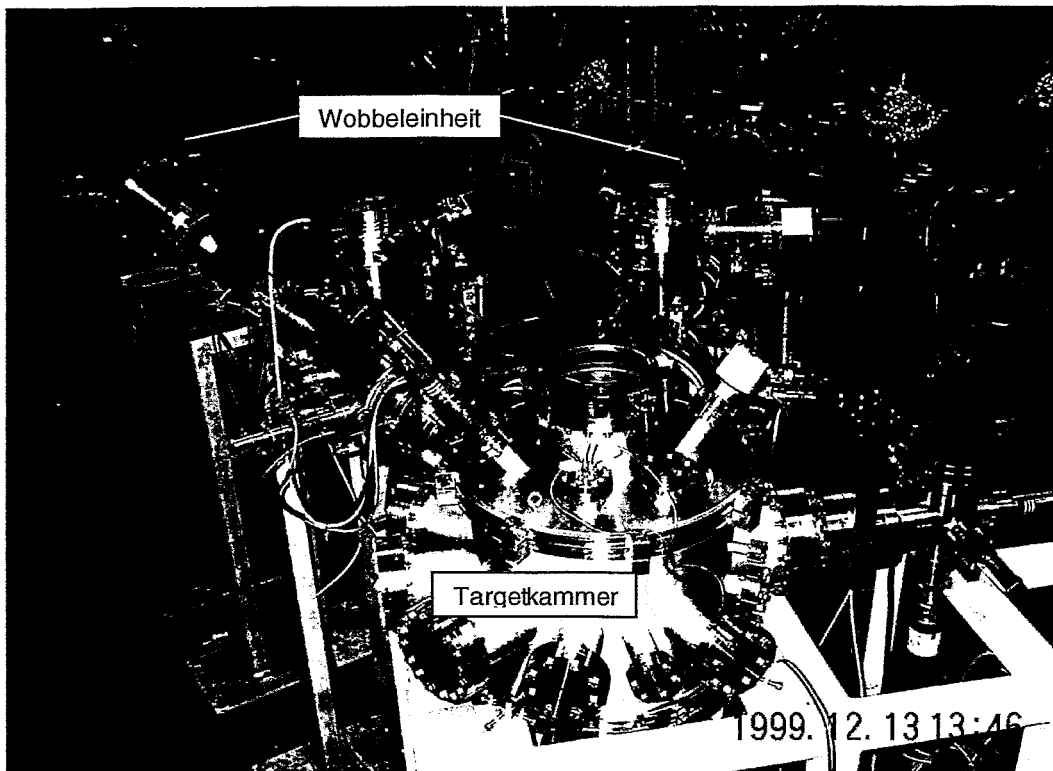


Abb. 19 Doppelimplantationsstation

Die Doppelimplantationsstation mit Teilen der Hoch- und der Niederenergiestrahlführung, insbesondere den Wobbelsystemen und Diagnoseeinheiten in jedem Strahlzweig zeigt die Abb. 19. Seitlich an der Targetkammer ist die Probenschleuse angeflanscht. Die Analysestation mit dem Browne-Buechner-Magnet, Teilen der Hoch- sowie der Niederenergiestrahlführung zeigt die Abbildung 20. In diesem Bild ist der Analysator so aufgestellt, daß im Target rückwärts gestreuten Teilchen untersucht werden können. Die Dispersionsebene des Analysators steht senkrecht. Die gesamte Analysatoreinheit ist auf Luftkissen montiert. Sollen vorwärts gestreute Teilchen untersucht werden, wird vorübergehend ein Teil der Niederenergiestrahlführung aufgetrennt und der Magnet um das Target geschwenkt (vergl. Abb. 2).

Die mechanische Justage der Zweistrahlanlage wurde beendet, als die Abweichungen von den mechanischen Vorgabewerten unter 0.5 mm lagen. Damit kann erwartet werden, daß die vorgesehenen Magnetkorrektoren gestatten, den Ionenstrahl mit ausreichender Genauigkeit in der Nähe der optischen Achse sowie auf die gewünschte Position der Targets zu transportieren.

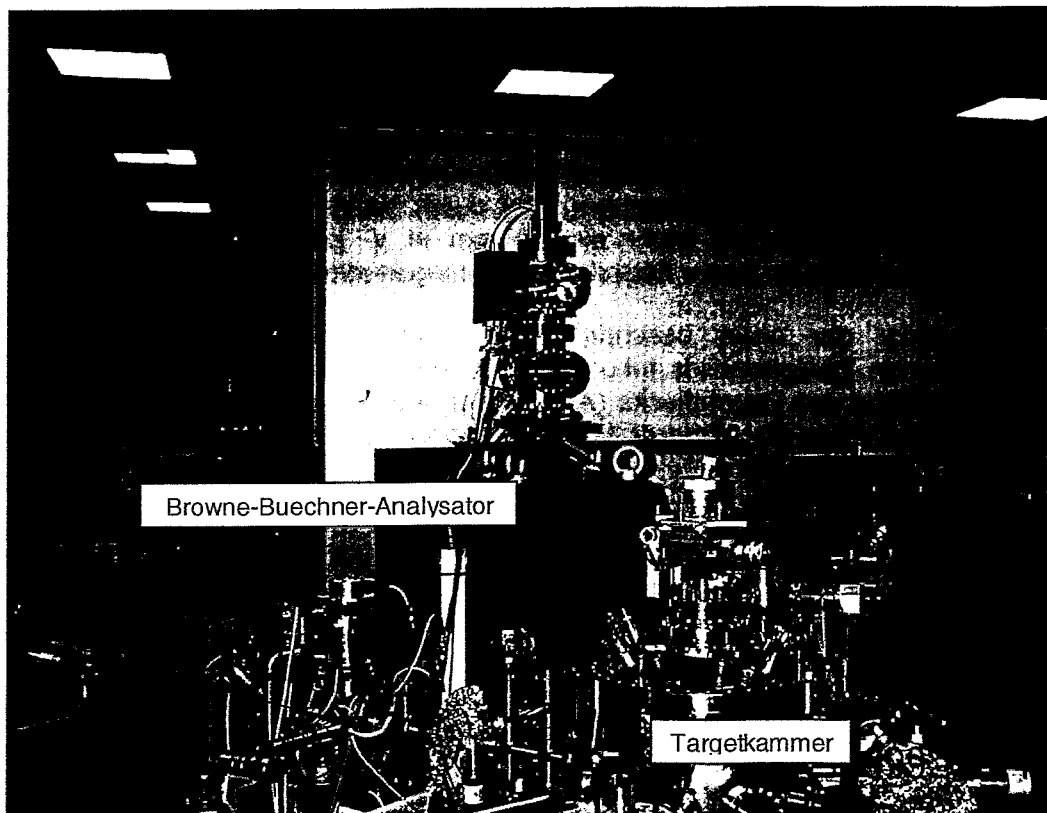


Abb. 20 Analysestation mit Browne-Buechner-Analysator

8.3 Test

8.3.1 Vakuum

Die Strahlführung wurde entsprechend ihrer vakuumtechnischen Struktur abschnittsweise montiert und getestet.

Bis auf den ersten Abschnitt VA1 (s. Abb. 12) wird in allen Vakuumsegmenten nach Belüftung des jeweiligen Abschnitts innerhalb von einer Stunde nach Einschalten der Pumpen ein Druckwert im Bereich 10^{-4} pa erreicht. Der Gleichgewichtsdruck liegt bei 1×10^{-5} und im Strahlbetrieb bei 2×10^{-5} pa (vergl. Punkt 5).

8.3.2 Hebung des Hochenergiestrahls und Erzeugung des Zwischenbilds

Im ersten Strahltest wurde die Strahlanhebung unter Verwendung eines Quarzfensters kurz nach dem zweiten Ablenkmagnet erprobt. Im zweiten

Strahltest wurde das Quartzfenster in der Nähe des Zwischenbildes des Hochenergiestrahls verwendet. In beiden Fällen wurden Si^{++} -Ionen mit einer Stromstärke von $2.5 \mu\text{A}$ bei Terminalspannung des Tandetrans von $U=2.5 \text{ MV}$ mit folgenden Ergebnissen benutzt:

Strahlhebung: unter Verwendung der vorgesehenen Korrektormagneten läßt sich ein nahezu runder Strahlfleck mit dem Durchmesser von etwa 15 mm am Ort der vorgesehenen Strahlachse erzeugen und durch Verstellen der Ablenkmagnete und der Korrektoren um mehr als 10 mm in x- oder y-Richtung aus der Strahlachse bewegen, bevor Strahlbeschneidungen eintreten.

Zwischenbild: der oben beschriebene Strahlfleck läßt sich am Ort des vorgesehenen Zwischenbilds fokussieren. Form und Größe des Zwischenbilds können anhand des Leuchtflecks (Abb. 21) abgeschätzt werden. Der Strahlfleck hat die Form einer stehenden Ellipse, die horizontale Ausdehnung des Flecks liegt bei einem Millimeter.

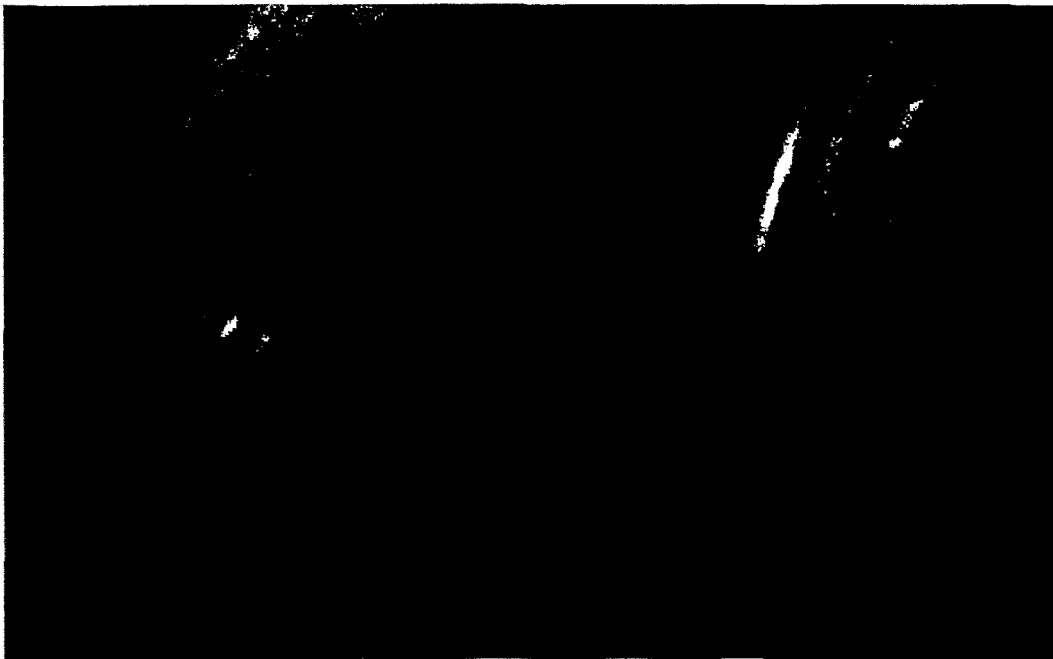


Abb. 21 Strahlfleck des Hochenergiestrahls in der Nähe des Zwischenbilds

8.3.3 Linseneinstellung und Transmission für den Hochenergiestrahl

Der erste Übertragungstest des Hochenergiestrahls in die Targetkammer der Analysestation wurde mit zweifachgeladenen Kohlenstoffionen bei einer Terminalspannung von 3 MV durchgeführt. Gemessen wurde der Ionenstrom im Faraday-Becher FB4 unmittelbar nach dem Zwischenbild sowie im Faraday-

Becher FB5 vor dem Eintritt in die Targetkammer der Analysestation vom Zwischenbild bis zum Target sind in Abb. 23 dargestellt (vergl. auch Abb. 6). Im Kapitel 3 (s. Tabelle 1 und 2 sowie Abb. 5) wurden die Feldparameter der magnetischen Linsen zur Übertragung bis zu den Targets berechnet. Bei der experimentellen Prüfung dieser Rechnungen zeigte sich, daß die berechneten Feldparameter um bis 25% zu gering sind. Mit korrigierten Werten, die die magnetisch wirksamen, longitudinalen Längen von Linsen und Luftspalten

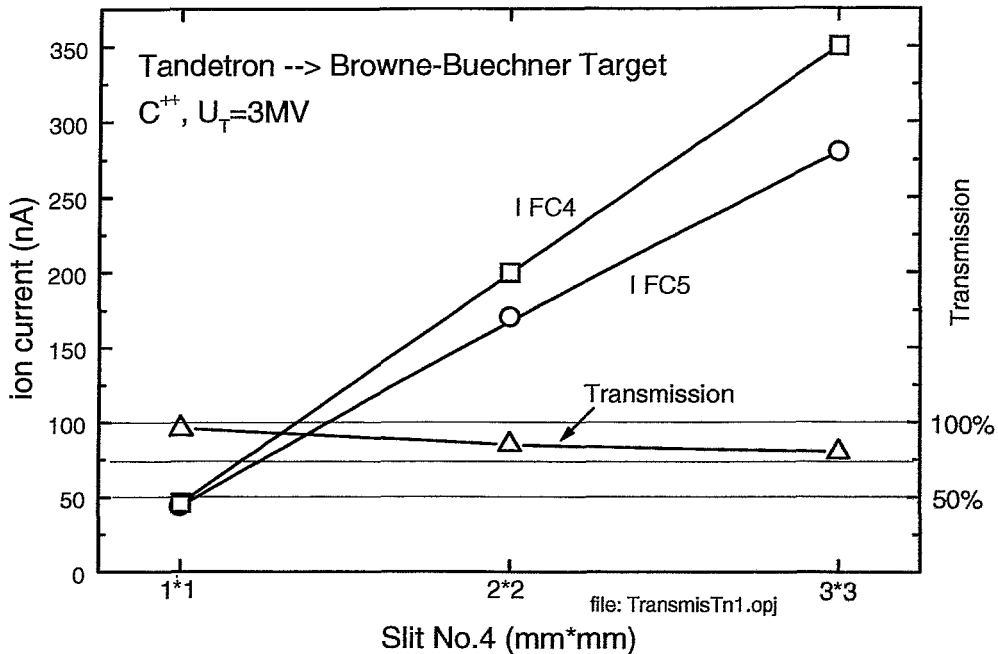


Abb. 23
Transmission in der Hochenergiestrahlführung vom Zwischenbild bis zu den Targetkammern für unterschiedliche Zwischenbildblenden

	Geometrisch		gemäß Kapitel 3		korrigiert	
	Linsen	Spalt(e)	Linsen	Spalt(e)	Linsen	Spalt(e)
Triplett	202	215	200	215	220	195
Duplett1	202	219	200	210	210	190
Duplett2	102	108	100	100	110	80

Tab. 6 Längen von Linsen und Luftspalten in mm

berücksichtigen, wurden Rechnung und Meßwerte in Übereinstimmung gebracht. Die experimentell bestimmten Linsenströme und die Abweichung vom Rechenwert sowie der übertragene Ionenstrom im Energieintervall von 0.6 bis 3 MeV sind in der folgenden Tabelle 7 enthalten. Zum Unterschied von Abb. 23 enthält die Tabelle 7 die Transmission der Strahlführung vom Maschinen-Crossover bis zu den Diagnoseeinheiten vor den Targetkammern. Die Verluste

innerhalb der Targetkammern können vernachlässigt werden, solange dort nicht weitere Blenden wirksam werden.

24,11.0 ¹² C ⁺ Energie (MeV)	IFB1 (μ A)	IFB2 (μ A)	IFB4 (μ A)	IFB5 (μ A) ->AN	IFB6 (μ A) ->DI	T%	Triplett		Duplett	
							I ₁ =I ₃ (A) I ₂ (A)	δ I(%)	I ₁ (A) I ₂ (A)	δ I(%)
0.6	5.0	3.8	3.0	-	2.1	46	1.28	8	9.90	3
							2.73	3	10.30	3
0.6	6.0	5.0	4.0	3.5	-	58	1.28	8	4.52	6
							2.73	3	5.86	2
1.5	5.3	5.3	4.0	3.3	-	62	2.45	4	8.90	8
							4.99	5	9.90	6
1.5	5.3	5.3	4.3	-	4.5	85	2.45	4	15.40	1
							4.99	5	15.98	1
3.0	2.5	2.4	2.6	2.3	-	92	3.22	1	23.06	6
							6.14	3	23.89	7
3.0	2.5	2.4	2.5	-	2.3	92	3.22	1	11.57	5
							6.14	3	14.10	6

Tabelle 7

Experimentelle Werte für Transmission T in %, Linsenströme und relative Abweichung

Im praktischen Strahlbetrieb wird selten scharf auf die Zwischenbildblende fokussiert. Dabei verringert sich zwar die Transmission, der auf dem Target verfügbare Ionenstrom ist jedoch weniger von zeitlichen Schwankungen der Betriebsparameter abhängig, die gesamte Anlage arbeitet stabiler.

Auf der Basis der effektiven Werte (Tab. 6) wurden für die magnetischen Linsen Nomogramme zur praktischen Handhabung erstellt (s. Anlage ‚Nomogramme‘) dargestellt.

8.3.4 Einstellung der Ablenkmagneten für unterschiedliche Ionenarten

Die Tabelle 8 enthält Energie E, Ladungs- q und Massenzahl A einer Reihe getesteter Ionenspezies sowie die zugehörigen Erregerströme der Magneten. Das Vorzeichen in der letzten Spalte kennzeichnet den jeweiligen Kanal.

E(MeV)	Q	A	IBM1 (A)	IBM2 (A)	ISM2 (A)
3.52	2	28	109.9	111.14	15.58+
2.02	1	1	31.06	31.137	4.134+
3.02	2	7	50.6	51.1	7.182-
3.02	2	7	50.59	51.084	7.179-
7.52	2	28	162.75	164.026	22.06+
7.52	2	28	162.47	164.22	22.236+
4.82	2	28	129.34	129.98	18.42+
2.42	2	28	90.912	91.59	12.458+
3.02	2	7	50.211	50.668	7.336-

Tabelle 8

Ablenkverhalten der Magneten in der Hochenergiestrahlführung

Unter der Voraussetzung, daß die Magneten im untersuchten Bereich noch nicht in der Sättigung betrieben werden und die Ionen sich auf der Sollbahn bewegen, gilt für den Erregerstrom I [Will92]:

$$I \approx B \approx (1/Rq) \times (A \times E)^{1/2} \quad (8)$$

Dabei sind B – Flußdichte und R - Sollbahnradius im Magneten. Dieser Zusammenhang ist auf der Basis der Meßwerte für die drei Ablenkmagneten der Hochenergiestrahlführung mit zugehöriger linearer Regression in der Anlage ‚Nomogramme‘ dargestellt. Das Nomogramm wird im Strahlbetrieb benutzt, um die Magneteinstellung für unterschiedliche Ionenarten vorauszuberechnen.

Die Erregerkurven für die Magneten sind in der Anlage ‚Magnete und Linsen‘ enthalten. Beispielsweise liegen die Flußdichten für die in der Tabelle angeführten Maximalwerte des Erregerstroms bei 1 T für die Ablenkmagneten bzw. 0.15 T für den Schaltmagneten.

8.3.5. Elektrostatische Ablenkung des Hochenergiestrahls

Der Einfluß der Wobbelspannung auf die Wobbelamplitude wurde für Si^{++} -Ionen bei Terminalspannungen zwischen 0.8 und 2.5 MV mit Hilfe des Strahlprofilmonitors untersucht. Durch die Überlagerung der Wobbelschwingung mit der Repetitionsrate des Speicheroszillografen entsteht ein Mehrfachbild der ungewobbelten Stromdichteverteilung auf dem Oszillografenschirm, das die Genauigkeit der Auswertung einschränkt. Eine Zusammenfassung der Testwerte für die Wobbelung in beide Richtungen ist in der Abbildung 24 als Verhältnis von Ablenkspannung zur Ionenenergie dargestellt.

Der gemäß Formel 6 im Kapitel 4 erwartete lineare Zusammenhang wird bestätigt. Da die Wobbelamplitude in der Targetebene noch etwa 50% größer ist, als in der Ebene des Strahlprofilmonitors, zeigen die Meßwerte, daß die Strahlwobbelung mit einer ausreichenden Reserve dimensioniert wurde (vergl. Kapitel 4).

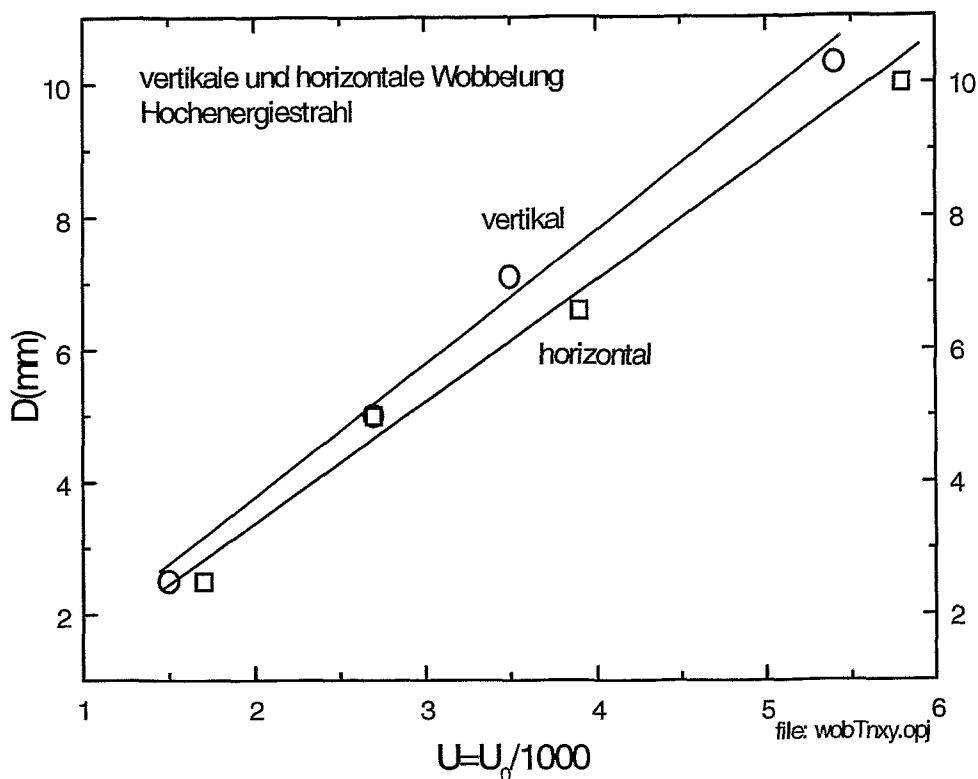


Abb. 24 Überprüfung der Wobbelung des Hochenergiestrahls. Zeichenerklärung s. Kap. 4

8.3.6 Übertragung des Niederenergiestrahls

Der in Kapitel 3.2 erwähnte Strahlprofilmonitor sowie eine Aperturblende wurden in die Niederenergiestrahlführung gemäß Abb. 3, 11, und 14 zusätzlich eingefügt. Dieser Aufbau sowie die zugehörigen ionenoptisch relevanten Abmessungen sind in Abb. 25 sowie Abb. 26 dargestellt. Abb. 25 enthält drei Varianten der Niederenergie-Strahlführung.

Der mittlere Strahl bezieht sich auf die Strahlführung ohne Zwischenbild zum Strahlprofilmonitor M2 (Strahl Diagnostik für Target T2). Der untere Strahl symbolisiert die Strahlführung mit Zwischenbild bei M1 zum Strahlprofilmonitor M3 (Strahl Diagnostik für Target T3). Der obere Strahl entspricht der Strahlführung ohne Zwischenbild nach M3. Diese Variante erfordert im Vergleich zur zweiten geringere Linsenspannungen,

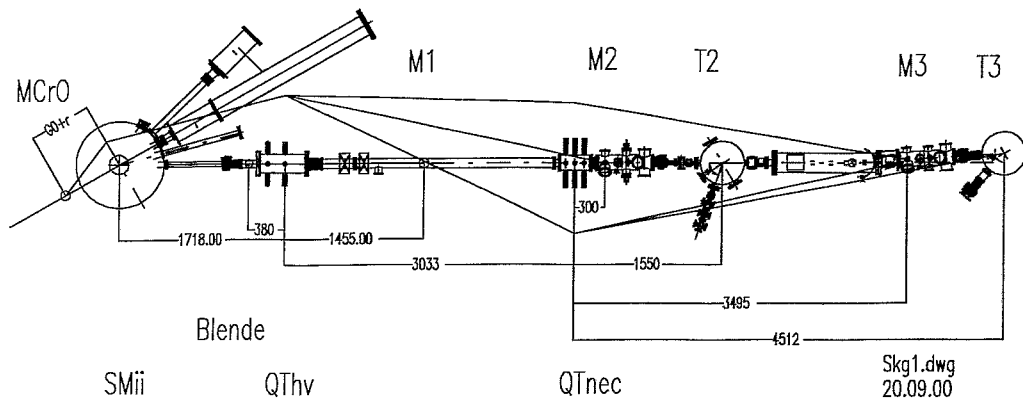


Abb. 25 Niederenergiestrahlführung

der Strahl kann ‚schlanker‘ gehalten werden, und damit ist eine bessere Transmission möglich. Die Zwischenbildvariante ermöglicht hingegen höhere Stromdichten am Target.

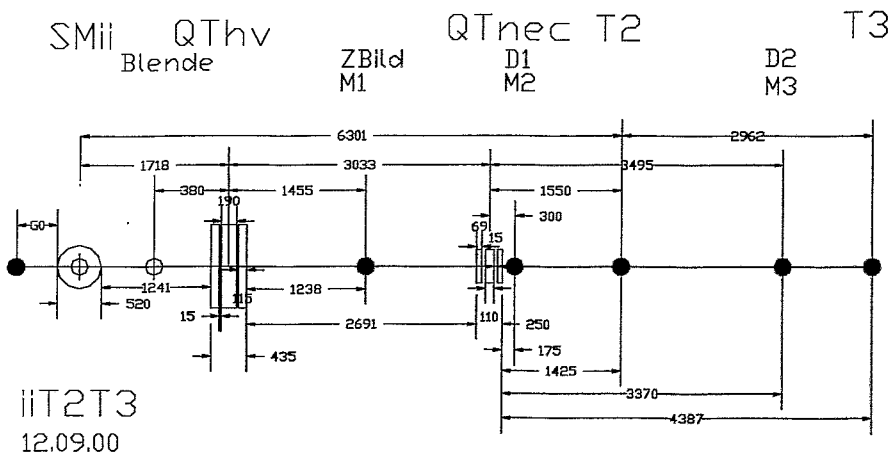


Abb. 26 Ionenoptisch relevante Größen der Niederenergiestrahlführung

Für zwei unterschiedliche Ionenenergien wurden die Werte der Linsenpannungen zur Erzeugung von Crossovers des Niederenergiestrahls an der Stelle der Strahlprofilmonitoren M1, M2, M3 (Abb. 26) sowie zugehörige Ionenströme gemessen. Dabei wurde festgestellt, daß die eigentlich energieunabhängigen Linsenstärken beider Quadrupoltripletts ω^2 mit zunehmender Energie verringert werden müssen, um das Maschinen-Crossover ordnungsgemäß zu übertragen.

Durch Umkehren des Ionenwegs wurde aus diesen Linsenspannungen die Lage des Maschinencrossovers G_0 in Abhängigkeit der Beschleunigungsspannung bestimmt und festgestellt, daß und wie sich die Lage des Maschinencrossovers mit der Beschleunigungsspannung ändert: $G_0=0.4$ m bei 230 kV und $G_0=1.2$ m bei 400 kV. Für die Dimensionierung der Niederenergiestrahlführung war in Kapitel 3.2 $G_0=const=0.8$ m angenommen worden.

Mit der energieabhängigen Lage des Maschinen-Crossovers wurden die Linsenparameter zur Übertragung des Maschinen-Crossovers zu den Targetstationen T2 und T3 in einer zweiten Näherung bestimmt. Dabei wird der Strahl allein mit dem ersten Triplet (hvQT) nach M1, M2 und T2 transportiert und zur Übertragung nach M3 und T3 sind beide Linsen in Betrieb. Die Linsenparameter für unterschiedliche Beschleunigungsspannungen sind in der Tabelle 9 und die zugehörigen Strahlenveloppen sind der in Abbildung 27 dargestellt.

Ub(kV)		M1 HV	M2 HV	M3		T3	
				HV	NEC	HV	NEC
100	Uf(kV)	2.19		2.19	2.98	2.19	2.9
	Ua(kV)	0.13		0.13	0.28	0.13	0.26
230	Uf(kV)	2.6		2.6	6.85	2.6	6.6
	Ua(kV)	0.155		0.155	0.65	0.155	0.62
400	Uf(kV)	4.1		4.1	12	4.1	11.5
	Ua(kV)	0.28		0.28	1.15	0.28	1.1

Tabelle 9

Teil 1: Linsenspannungen Uf, Uk zur Übertragung des Maschinen-Crossovers nach M3, T3 mit Zwischenbild bei M1

Ub(kV)		M1 HV	M2 HV	M3		T3
				HV	NEC	
100	Uf(kV)	1.98	1.51	1.2	0.07	
	Ua(kV)	0.08	0.105	0.1	0.018	
230	Uf(kV)	2.71	2.08	1.7	0.2	
	Ua(kV)	0.11	0.14	0.175	0.12	
400	Uf(kV)	4.16	3.16	2.5	0.28	
	Ua(kV)	0.26	0.29	0.2	0.07	

Tabelle 9

Teil 2: wie oben, jedoch zur Übertragung nach M2, M3 ohne Zwischenbild

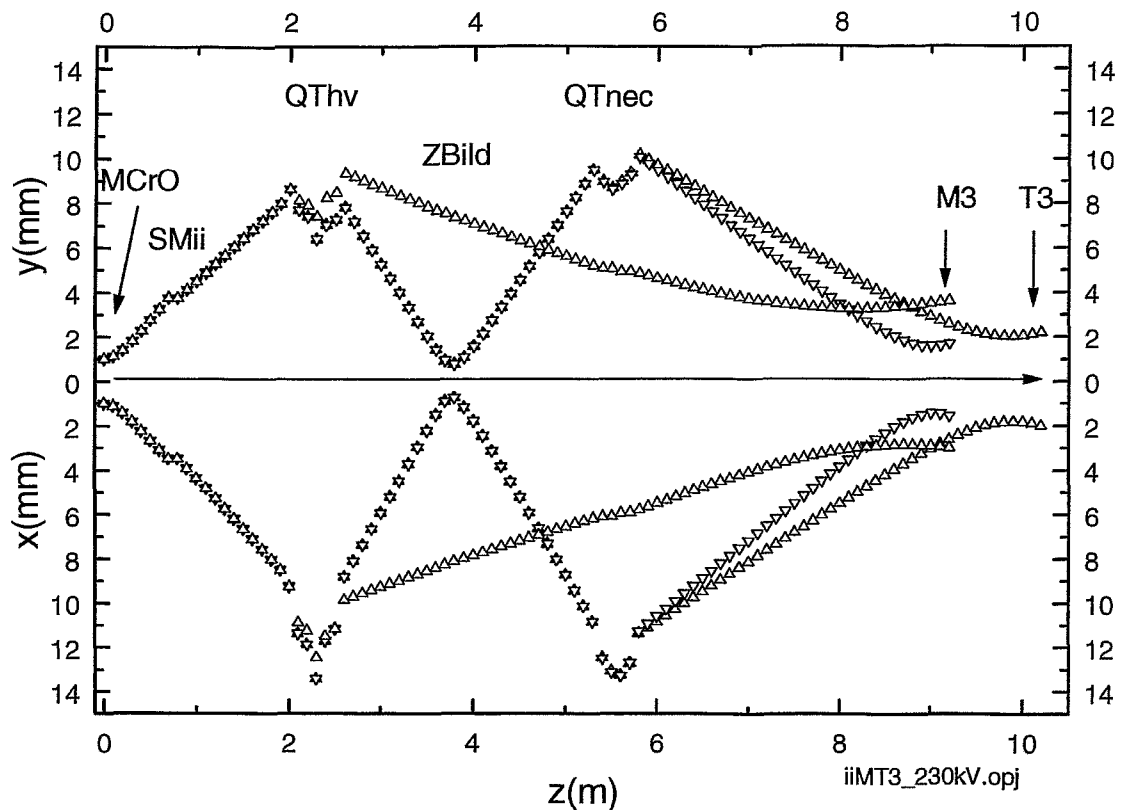


Abb. 23 Enveloppen des Niederenergiestrahls für verschieden Strahlführungsmodi

Diese Rechnungen wurden getestet und es ergaben sich Abweichungen zwischen den Rechen- und Meßwerten für die Linsenspannungen von $\delta U < 5\%$ für den Transport nach M1 und M2 sowie $\delta U < 10\%$ für den Transport nach M3. Es wurde bestätigt, daß die Halbwertsbreite des Ionenstrahls bei M3 für eine Beschleunigungsspannung von 400 kV bei Verwendung des Zwischenbilds 5 mm beträgt und ohne Zwischenbild nahezu doppelt so groß ist (vergl. Abb. 23). Das hat den erwähnten Einfluß auf die erreichbare Stromdichte am Target.

Beim Betrieb der Strahlführung muß berücksichtigt werden, daß die Spannungsversorgungen der Linsen für < 10 kV ausgelegt sind. Die erläuterten Varianten stellen daher Grenzsituationen für den Betrieb der Strahlführung dar. Die Einstellungen für die Linsen können innerhalb der Grenzwerte gewählt werden, um einen praktikablen Betrieb zu ermöglichen. Auf die Anfertigung von Nomogrammen für den Betrieb der elektrostatischen Linsen in Anlehnung an Kapitel 8.3.3 wurde hier verzichtet.

9 Abschließende Bemerkungen

Das System ist bisher weder vollständig untersucht worden noch ist sein Aufbau abgeschlossen. Experimente sowohl an der Doppelimplantations- als auch an der Analysestation laufen jedoch seit mehreren Monaten. Insbesondere wurde die Analysestation sowohl in Vorwärts- als auch in Rückwärtsrichtung eingesetzt.

Im Verlauf dieser Experimente sowie der beschriebenen Tests wurde die Funktionstüchtigkeit der Anlage und ihrer Steuerung für unterschiedliche Teilchen und Energien bestätigt.

Vorteilhaft für die Nutzung der Anlage waren folgende Verbesserungen, die im Laufe der Testperiode durchgeführt wurden:

1. An der Analysestation wurde eine Aperturblende unmittelbar vor dem magnetischen Duplett (in der Zeichnung New0016 schon enthalten) eingeführt. Hierdurch kann die häufig benötigte Emittanzreduzierung auf die Zwischenbildblende und die neue Blende verteilt werden. Das ermöglicht eine höhere Variabilität bei der Optimierung der Strahlparameter. Zur Realisierung der bestmöglichen Tiefenauflösungen wurde die Analysestation mit Durchmessern der Zwischenbildblende unter einem mm betrieben. Das laterale Strahlfleckmaß in der Vertikalen betrug dann am Target wenige Zehntel mm und die nutzbare, für die Experimente benötigte Stromstärke für Li-Ionen betrug 100 bis 50 nA.
2. Zur Durchführung von Doppelimplantationen war es notwendig, die Wobbelung von Hoch- und Niederenergiestrahl so zu synchronisieren, daß beide Strahlen auch während des Wobbelns gleichzeitig am gleichen Targetort eintreffen. Allerdings ist bei den gegebenen Stromdichten von $0.5 \mu\text{A}/\text{mm}^2$ eine ‚gleichzeitige‘ Doppelimplantation in den Bereich des lateralen Stragglings im Ionenkanal nicht zu erreichen (gleichzeitig heißt hier innerhalb der Flugzeit des Ions von der Oberfläche bis zum Ort seiner Deponierung im Festkörper).
3. Bei der Auslegung des Systems hatte sich ergeben, daß die Brechkraft des magnetischen Dupletts im Doppelimplantationszweig für Ionenspezies mit einem Masse-Energie-Produkte $> 90 \text{ MeVamu}$ nicht ganz ausreichen wird. Rechnungen haben bestätigt, daß durch Vergrößern der Luftspalte der Linse dieses Problem beseitigt werden kann (s. Punkt 3.1).
4. Bei den Tests des Niederenergiezweigs hat sich gezeigt, daß die Variante mit Zwischenbild am vorgesehenen Ort (Monitor) bei Maximalwerten der Teilchenenergie nicht perfekt funktioniert: es werden Linsenspannungen deutlich über dem möglichen Maximalwert von 10 kV benötigt. Außerdem ist der Strahl lateral so weit ausgedehnt, daß Aufladungen an den Ablenkplatten der Wobbeleinrichtung durch den Strahl zu Instabilitäten

beim Betrieb führen. Das hat allerdings keine große praktische Bedeutung. Bei Verringerung der Brechkraft der ersten elektrostatischen Linse wird auch für die zweite Linse eine geringere Brechkraft benötigt (vergl. Punkt 8.3.6). Auf jeden Fall kann der Niederenergiezweig ohne Einschränkungen in Übergangsmodi betrieben werden, bei denen das Zwischenbild in Richtung Target gegenüber dem Monitor verschoben ist.

5. Als Beschränkung für den praktischen Betrieb der Niederstrahlführung wirkt die von DANFYSIK vorgesehene Aufteilung des Spannungsvorrats an den Wobbelplatten in eine Wechsel- und eine Gleichspannungskomponente. Die Gleichspannungskomponente (Offset) wird vorteilhaft für zusätzliche Strahllagekorrekturen in y- und x-Richtung auf dem Target verwendet werden. Bei hohen Ionenenergien kann der Fall eintreten, daß wegen der hohen benötigten Wobbelspannung der verbleibende Anteil der Gleichspannung für Symmetriekorrekturen nicht mehr ausreicht. Zusätzliche magnetische Korrektoren in Strahlrichtung wurden nach dem zweiten elektrostatischen Triplet eingebaut und können die Situation verbessern.
7. Wir erwarten, daß im Verlauf der Experimente weitere Anforderungen zu Vervollkommnung und Weiterentwicklung der Einrichtung entstehen. Wie weit Grundzuverlässig und Flexibilität ausreichen, die wir der Anlage mitgegeben haben, wird daran gemessen werden können, ob und mit welchem Aufwand diesen zukünftigen Anforderungen entsprochen werden kann.

Der erreichte Status an der Rossendorfer Zweistrahlführung ist durch den Einsatz vieler Mitwirkender inner- und außerhalb des Forschungszentrums zustande gekommen. Wir danken allen, die uns unterstützt haben, insbesondere:

den Herren Dr. W. Bürger, Dr. M. Friedrich, W. Gläser und Sh. Turuc für den mutigen Anstoß zu den Arbeiten,

Herrn Prof. W. Möller für das Vertrauen, das er uns mit der Übertragung der Aufgabe zu Dimensionierung, Entwicklung, Errichtung und Erprobung der Anlage geschenkt hat sowie für die großzügige Förderung und Freiheit die wir bei der Lösung der Aufgaben hatten,

Herrn Prof. E. Wieser für die Unterstützung bei der Lösung übergreifender Probleme, wie der Koordinierung von Mittelverteilung und Beschaffung sowie der Abstimmung mit den Baufirmen,

Herrn Dr. R. Grötzschel, Herrn Dr. W. Skorupa, Herrn Dr. J. Kashny, Herrn Dr. O. Kruse und Herrn Ch. Klein für die fort dauernde und

befruchtende Rückkopplung zwischen ihren Experimentprojekten und unseren Möglichkeiten zur Realisierung der Anlage,

Herm Dr. M. Friedrich, Herm Sh. Turuc und der gesamten Betriebsmannschaft der Elektrostatischen Beschleuniger im Forschungszentrum für viele hilfreiche Diskussionen sowie für die tatkräftige Unterstützung beim Aufbau der Anlage,

den Herren Dr. W. Bürger, W. Gläser und F. Herbrand für die professionelle Ausführung von Anlagensteuerung und Kontrollsystem,

Herm J. Schneider für wertvolle praxisnahe Anregungen und die selbständige Montage der Niederenergiestrahlführung,

Herm P. Preuß für die präzise Einmessung der gesamten Anlage in das Labor,

Herm Dr. Gabriel, Leiter der Hauptabteilung Forschungs- und Informationstechnik sowie seinen Mitarbeitern den Herren R. Schlenk, H. Hauck, Th. Riedel, E. Mende und K. Gröbel für die hochqualifizierte und termintreue Unterstützung, die ganz wesentlich dazu beigetragen hat, daß die Anlage zuverlässig funktioniert,

und schließlich den Vertretern der Firmen DANFYSIK, NEC und LEYBOLD, die unseren häufig von den Firmenstandards abweichenden Vorstellungen zu Komponenten und Bauteilen stets entgegengekommen sind und die ihre Firmen durch Qualität der Produkte sowie Termintreue der Lieferung bestens empfehlen.

Referenzen

- [AllOhTa92]: Ch. W. Allen, S. Ohnuki, H. Takahashi, Trans. Mat. Res. Soc. Jpn., Vol 17 (1994) 93.
- [AllRy97]: Ch. W. Allen, E. A. Ryan, An Hitachi H-9000 for Argonne's HVEM-Tandem Facility: expanded Capability for in situ Ion ..., Mat. Sci. Division, Argonne National Laboratory; Argonne, IL 60439 USA (1997).
- [BFGT97]: W. Bürger, M. Friedrich, W. Gläser, S. Turuc, New Developments at the Rossendorf Electrostatic Accelerators, Proc. 31st Symp. of North Eastern Acceleration Personnel (1997) 31.
- [BroBue56]: C.P. Browne, W.W. Buechner, Rev. Sci. Instr. 27 11 (1956), 899.
- [BüGläHer]: W. Bürger, W. Gläser, F. Herbrand, Interner Bericht, in Arbeit.
- [Dah73]: P. Dahl, Introduction to Electron and Ion Optics, Academic Press (1973).
- [Fri86_1]: M. Friedrich, BROHR und SYSFIT, ZfK 577(1986).
- [Fri86_2]: M. Friedrich, Ionenoptische Untersuchungen am Rossendorfer Tandem-Beschleuniger, ZfK 593(1986).
- [GHJKKT99]: R. Grötzschel, F. Herrmann, B. Jainsch, Ch. Klein, O. Kruse, H. Tyrroff, Internal Report, The Rossendorf Dual-Beam Facility for RBS/Channeling and ERDA (1999).
- [Gro86]: J. Großer, Einführung in die Teilchenoptik, B. G. Teubner (1983).
- [HeTy96]: D. Henke and H. Tyrroff, Rev. Sci. Instrum. 67 (2) (1996) 1.
- [HV]: Techn. Dokumentation Beam Sweep With Steerer C-8-06-044 High Voltage Eng.
- [HVD]: Formeln und Zahlenwerte, Katalogteil Nr.15 "Berechnungsunterlagen" Hochvakuum Dresden.
- [IPRO96]: Ausbau Ionenstrahltechnik, Anbau Gebäude 97a, vom 18.01.1996, Zeichnungsnummern 101, 102.
- [jae97]: [<http://www.jaeri.go.jp>], Edition of the Outline of Japan Atomic Energy Research Institute FY (1997).
- [Ka96]: J. Kashny, Internal Report FZR, Double Implantation Chamber, 30.06.1996.
- [Ka97]: J. Kashny, Internal Technical Report FZR, Double Implantation Chamber-I, 20.04.1997.
- [Ka00]: J. Kashny, Internal Technical Report FZR, About Double Implantation, 16.05.2000.
- [KIR74]: L. Kiralyhidi, E. Pasztor, P. Riedl, KFKI 74-58, (1974).
- [Kne99]: Ing.Büro Knebel, Lingen-Ems.
- [Kö99]: R. Kögler, FZR, Doppelimplantationskammer (DIC) Experimentbeschreibung, Mitteilung vom 25.08.99.
- [LABPCM89]: M. B. Lewis, W. R. Allen, R. A. Buhl, N. H. Packan, S. W. Cook, L. K. Mansur, NIM B 43 (1989) 243.
- [Mie70]: G. Mierdel, Elektrophysik, VT, (1970) 282.
- [MTASS97]: A. Mücklich, H. Tyrroff, Ch. Allen, W. Skorupa, B. Schmidt, Rossendorf Annual Report (1997), 63.
- [Mü98]: Änderungen des Codes SYSFIT, Erhard Müller, FZR (1998).
- [NöRi88]: Fritz Nötzold und Bernd Richter, FZR (1998).
- [Piv93]: J. Pivarc, Main Features of an ECR Ion Source Vacuum S., Dubna E9-93-332, (1993).
- [Pre98] Mitteilung von Peter Preuß (1998).
- [RyRu78]: H. Ryssel, I. Ruge, Ionenimplantation, A V Geest und Portig K.-G.(1978).
- [SID70]: G. Sidenius, Proc. Int. Conf. on Electromagnetic Isotope Sep., Marburg, (1970), 423.
- [TyNeu98]: H. Tyrroff und W. Neumann, Statusbericht Strahlführung vom 500 kV Implantier zum Durchstrahlungsmikroskop 27.07.1998.
- [Will92]: K. Wille, Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, B. G. Teubner (1992).