



GSI - 84 - 4
REPORT
APRIL 1984

VORBESCHLEUNIGUNG SCHWERER IONEN
BEI HOHEM STROM

P. Spädtke

GSI Darmstadt
Bibliothek

Inv.-Nr. R 4509, C1

Datum: 8.5.84

Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH
Planckstr. 1 · Postfach 110541 · D-6100 Darmstadt 11 · Germany

*VORBESCHLEUNIGUNG SCHWERER IONEN
BEI HOHEM STROM*

Peter Spädtke
GSI Darmstadt

EINLEITUNG

Für die Schwerionen-induzierte Trägheitsfusion wird eine hohe Leistungsdichte auf dem Target benötigt. Diese Anforderung läßt sich nur dann realisieren, wenn bereits am Anfang des Beschleunigers - unabhängig von dessen Typ - ein hochbrillianter Ionenstrahl zur Verfügung steht.

Ähnliche Anforderungen an die Brillianz werden bei der Injektion in ein Schwerionen-Synchrotron zu stellen sein.

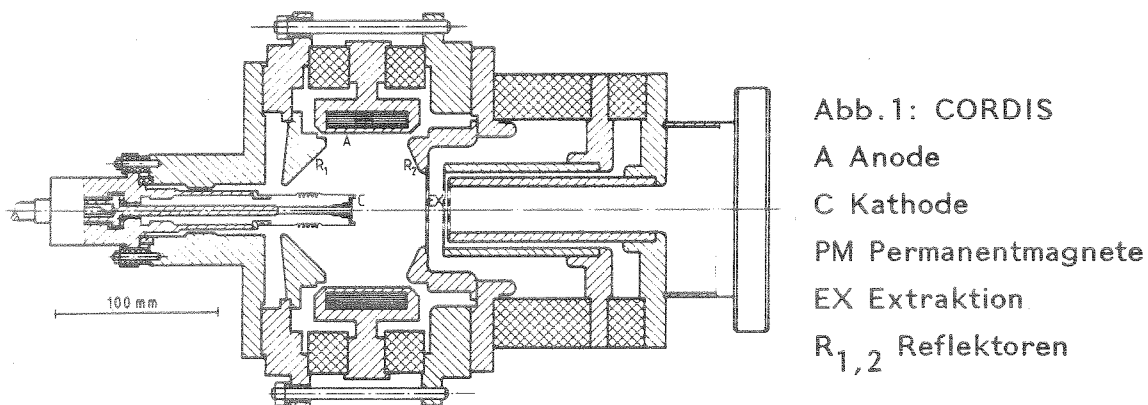
Aufgrund dieser Fragestellung wurden bei GSI Experimente gemacht, die die Möglichkeiten der bestehenden Injektoranlage bei Betrieb mit Hochstromquellen demonstrieren sollen.

DIE IONENQUELLE

Im Rahmen der Beschleunigerexperimente am UNILAC kam die Hochstromquelle CORDIS¹ zum ersten Mal als Betriebsquelle zum Einsatz und konnte hierbei ihre Zuverlässigkeit beweisen; während der gesamten Betriebszeit von ca. 80 Stunden war kein Quellenservice notwendig. Diese Quelle ist eine Weiterentwicklung des Prototyps der Hochstromquelle ELSIRE². Die wesentlichen Unterschiede sind:

- Ein besserer Plasmaeinschluß durch eine modifizierte Magnetanordnung und ein daraus resultierender verringerter Leistungsbedarf.
- Eine Vergrößerung des Durchmessers des Anodenraumes und damit der nutzbaren Extraktionsfläche.

Eine Prinzipskizze der Quelle ist in Abb.1 gezeigt.



Auf Grund der spezifischen Entladungsbedingungen der Quelle (magnetischer Multipol, Entladungsspannung abhängig von der Ionensorte = 40-150V für einfach geladene Ionen) steht ein äußerst homogenes und ruhiges Plasma hoher Dichte zur Verfügung. Die Stromdichte in der Extraktionsebene läßt sich in weiten Bereichen den Extraktionsbedingungen anpassen.

DIE EXTRAKTION

Wegen der oben genannten Eigenschaften des Plasmas ist es möglich, je nach Anforderung (besonders hoher Strom, besonders hohe Brillianz³ oder ähnliche Randbedingungen) verschiedene Extraktionssysteme mit hohen Feldstärken anzuwenden. Folgende Systeme wurden während der Experimente eingesetzt:

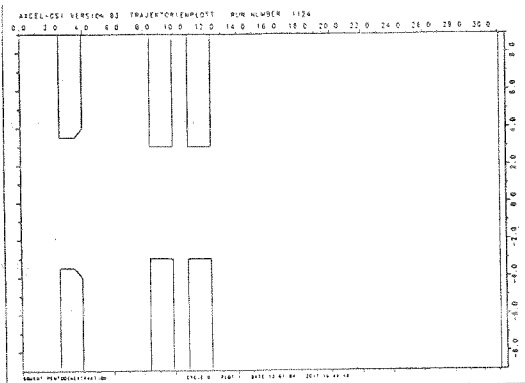


Abb.2 Triodensystem mit single-aperture (EX2)

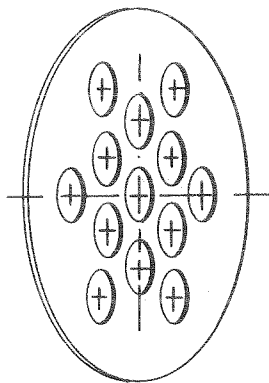


Abb.3 Lochanordnung bei multi-aperture (EX3)

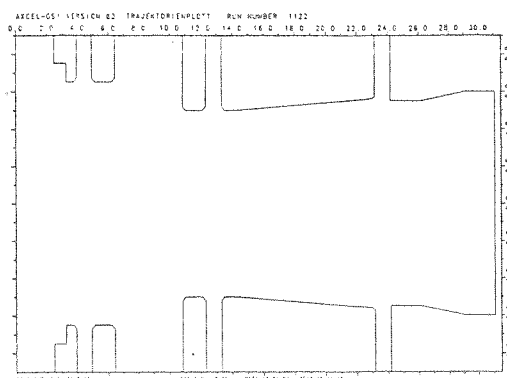


Abb.4 Pentodensystem mit single-aperture (EX4)

EMITTANZ DES IONENSTRAHLES

Die Emittanz des Ionenstrahles der aus der Hochstromquelle extrahiert wird, ist im wesentlichen bestimmt durch Extraktionsgeometrie und Plasmameniskus, der sich durch Stromdichte und Extraktionsspannung einstellt. Ionen- und Elektronentemperaturen spielen dagegen eine untergeordnete Rolle⁴. Dies wurde sowohl mit Messungen direkt hinter der Quelle als auch durch Computersimulation bestätigt. Bei diesen Simulationen wird die Stromdichte im Plasma solange variiert, bis die Emittanz am Ausgang des Extraktionssystems an die gegebene Akzeptanz angepaßt ist. Eine solche angepaßte Einstellung ist in Abb.5 gezeigt. In dieser Rechnung werden Ar^+ -Ionen mit 42kV aus dem Plasma extrahiert. Um die Raumladungskompensation im Strahl zu erhalten, ist die mittlere Elektrode auf negativem Potential (-2kV), um die Strahlelektronen zu reflektieren.

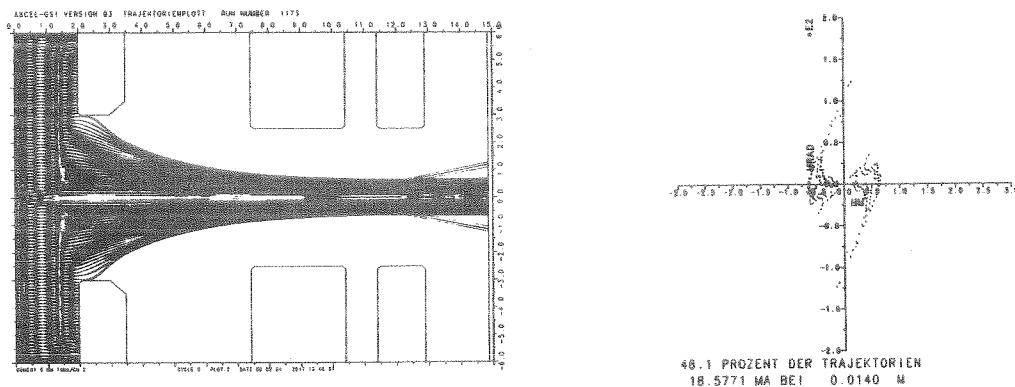


Abb.5: Simulation der Extraktion des Ionenstrahles. Darstellung durch Trajektorienplot und Emittanz.

Läßt man diese Emittanz ohne Einfluß äußerer Felder über eine Strecke von 0.5 m driften, erhält man die Emittanz in Abb.6. Diese Emittanzfigur stimmt exakt überein mit gemessenen Emittanzen (Abb.7).

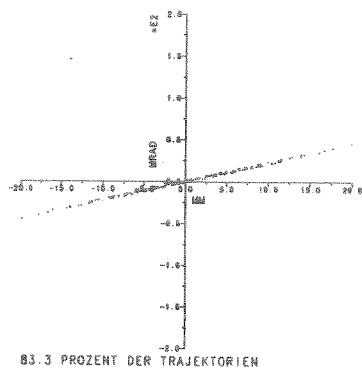


Abb.6: Emittanz aus Abb.5 nach einer Driftstrecke von 0.5 m ohne Raumladung gerechnet.

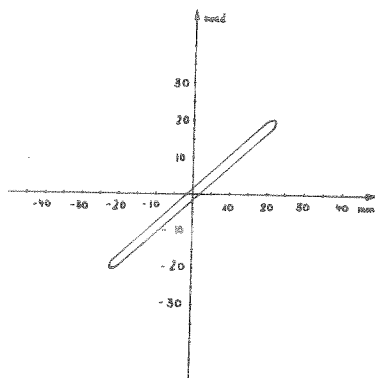


Abb.7: gemessene Emittanz 1.0 m hinter der Quelle.

TRANSPORT AUF HOHEM POTENTIAL

Zwischen Extraktor und Beschleunigungsrohr befindet sich nur eine Driftstrecke, um die Rotationssymmetrie des Strahles nicht durch Dipole oder Quadrupole zu stören. Dies würde aufgrund der dann ungleichmäßigen Strahldichtevertelung bei der Beschleunigung zu Bildfehlern führen. Die Driftlänge ergab sich auf Grund des mechanischen Aufbaus zu 0.5 m. Zwischen Extraktion und Beschleunigungsstrecke ist der

Strahl zu einem hohen Grad (>90 Prozent) raumladungskompensiert. Die Kompensationselektronen werden durch Stöße der Strahlionen mit den Restgasatomen gebildet. Durch ein Accel-Decel-System werden die Elektronen daran gehindert in die Quelle beschleunigt zu werden. Die Wirkung dieses Systems wird aus dem Potentialverlauf (Abb.8) verständlich.

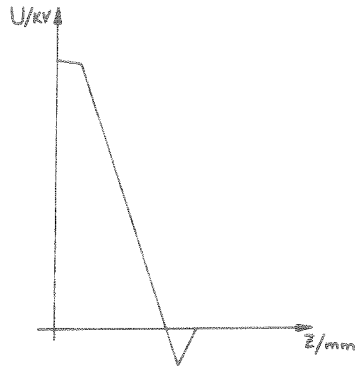


Abb.8: Potentialverlauf (schematisch) längs der Achse.

BESCHLEUNIGUNG

Für die zu beschleunigenden hohen Ionenströme ist wegen der hohen Raumladungskräfte eine single-gap Beschleunigungsstruktur^{5,6} besser geeignet als multi-gap Anordnungen. Auf Grund der Erfahrungen, die am 300kV-Beschleuniger⁶ gesammelt werden konnten, wurden bereits weitgehend mit Computer-code⁷ optimierte Geometrien eingesetzt. Der schematische Aufbau ist in Abb.9 skizziert. Wesentlich für eine aberrationsarme Abbildung ist die richtige Verteilungsfunktion der Raumladungsdichte am Eingang der Beschleunigungsstrecke. Die resultierende Potentialverteilung der Linse unter dem Einfluß der Raumladung sollte bei Eintritt in die Linse möglichst einer Kugeloberfläche angenähert sein. Die Wirkung einer nichthomogenen Raumladungsverteilung am Eingang des Beschleunigungsspalt es ist in Abb.10b gezeigt. Der von der Extraktion um 0.5 m transformierte Strahl hat am Ort der Elektrode auf hohem Potential, verglichen mit dem Aperturdurchmesser, eine schmale Dichteverteilung. Bei der Beschleunigung dieses Strahles entsteht ein

Hohlstrahl. Daß diese Bildfehler alleine von der Raumladung herrühren sieht man in Abb.10a. Dort wurde ohne Raumladung gerechnet. In Abb.10c wurde eine homogene Raumladungsverteilung angenommen. Der Ar^+ -Ionenstrahl mit 10 mA wird jeweils von 40kV auf 230kV beschleunigt.

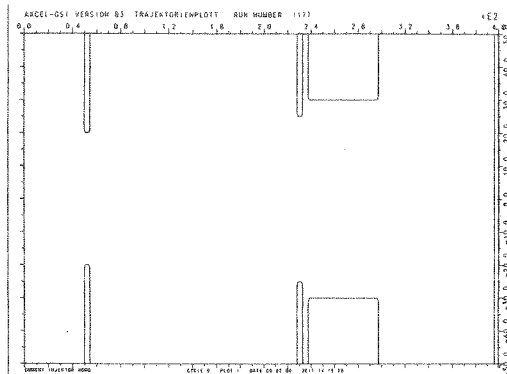


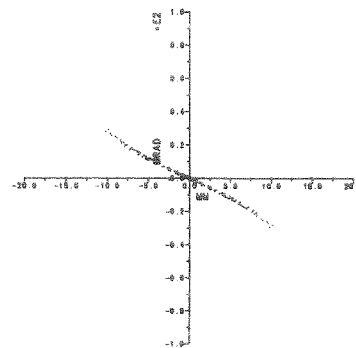
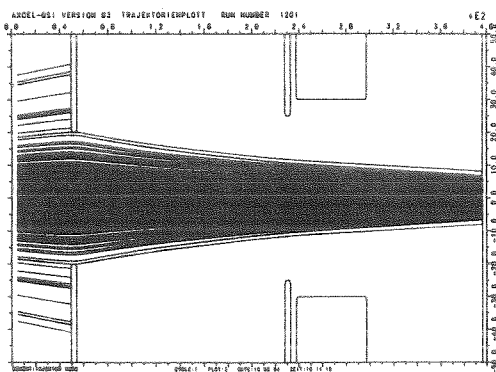
Abb.9 Beschleunigungsgeometrie (BE2).

Abb.10 Strahlverlauf im Beschleunigungsrohr bei unterschiedlichen Startbedingungen:

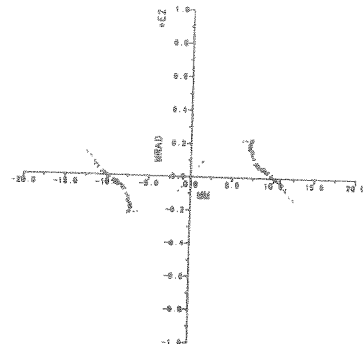
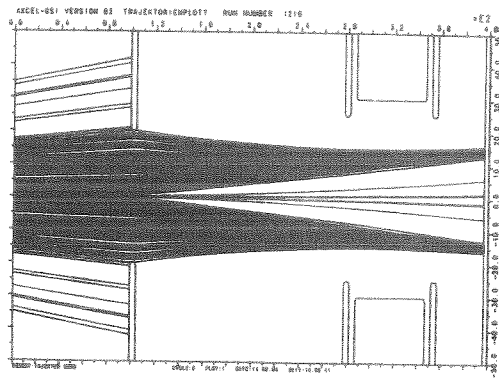
- a), b) Startemittanz aus Abb.6, c) homogene Dichte.
- a) ohne Raumladung, b, c) mit Raumladung.

Abb.11a-c Emittanz des Strahles am Ausgang des Beschleunigungsrohres für die in Abb.10 beschriebenen Fälle.

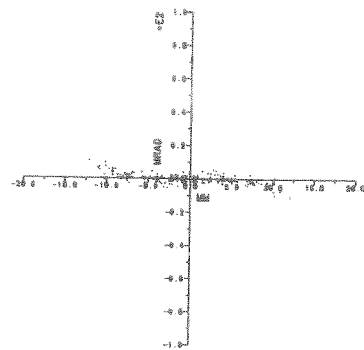
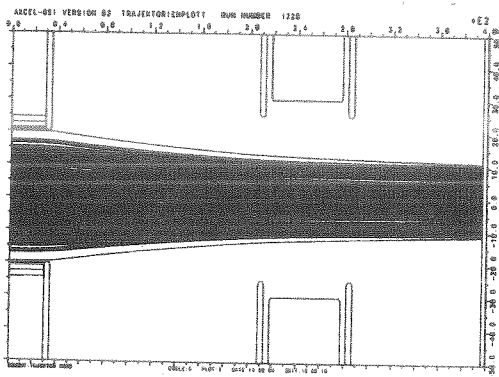
a)



b)



c)



TRANSPORT AUF ERDPOTENTIAL

Direkt hinter der erdseitigen Beschleunigungselektrode wird eine Schirmelektrode auf negativem Potential eingesetzt, um die Raumladungskompensation des Ionenstrahles strahlabwärts zu erhalten. Die Spannung an dieser Elektrode hängt neben der Geometrie auch von der Ladungsdichte im Strahl ab. 5kV bei einem Supressorrohr $\varnothing 60\text{mm} \times 60\text{mm}$ waren in allen Fällen ausreichend. Die Aufbauzeiten der Raumladungskompensation⁸ in der anschließenden Strahlstrecke sind bei einem Druck von $p \approx 10^{-5}$ mbar klein gegenüber den Pulslängen, die in der Größenordnung von ms liegen. Der für den Fall, daß die Aufbauzeit der Raumladungskompensation vergleichbar mit der Pulsdauer ist, typische schräge Pulsanstieg⁹ konnte bei den Versuchen nicht festgestellt werden (siehe Abb.12). Die Transportstrecke ist in Abb.13 abgebildet.

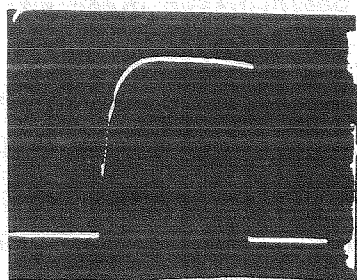


Abb.12: Typisches Signal vom Faraday-Becher: 12mA Ne^+ in FC2. Pulslänge 2.5ms.

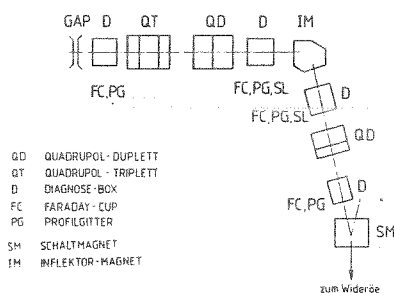


Abb.13: Transportstrecke auf Erdpotential.

OPERATING

Bei einer gegebenen Auslegung der Beschleunigungsstrecke existiert immer eine optimale Einstellung von Extraktionsspannung, Ionenstrom und Beschleunigungsspannung, die den aus der Quelle extrahierten Ionenstrom mit möglichst kleinen Brillanzverlusten in die Akzeptanz der nachfolgenden Strahlstrecke abbildet. Diese Parameter sind jedoch miteinander verkoppelt. So hängt zum Beispiel der aus der Ionenquelle extrahierte Strom unter anderem von der Extraktionsspannung ab, während die notwendige Strahlenergie durch die Sollenergie des Wideröe Tank 1 mit 11.7keV/amu gegeben ist. Damit ist die Beschleunigungsspannung bereits festgelegt und die Optimierung muß durch eine Geometrie Anpassung erfolgen. 'Fein-Tuning' während des Betriebes ist noch über Plasmamaparameter (Gasdruck, Entladungsspannung oder Kathodenemission) und dem Verhältnis Extraktionsspannung - Beschleunigungsspannung möglich. Diese Parameter beeinflussen ihrerseits jedoch wieder die Stromdichte.

Weiterhin wird durch Variation der Plasmamaparameter gleichzeitig die Ladungsverteilung beeinflußt. Höhere Ladungszustände werden dabei durch eine höhere Entladungsspannung und eine niedrige Neutralgasdichte gezüchtet. Die Stromdichte kann dann wieder mit der Elektronenemission angepaßt werden. Dieses Verhalten wurde im Experiment bestätigt.

MESSUNGEN

Folgende Elemente wurden beschleunigt: H, N, Ne und Ar. Für die jeweiligen Experimente kamen folgende Extraktionsgeometrien zum Einsatz:

Bez.	Typ	Loch- $\emptyset$ /mm	Abstand der Elektroden
EX1	Triode	$\emptyset 6/5/5$	d=4.5mm, 1mm
EX2	Triode	$\emptyset 7/5/5$	d=4.5mm, 1mm
EX3	Triode	$13 \cdot \emptyset 2.5/2.5/2.5$	d=4.5mm, 1mm
EX4	Pentode	$\emptyset 13/13/8/8/8$	d=1mm, 4.5mm, 1mm, 1mm

Jeweils angepaßt an die gewünschte Energie wurden zwei Beschleunigungsgeometrien eingesetzt:

Bez.	Blenden- $\emptyset$	Abstand der Elektroden
BE1	$\emptyset 40\text{mm}/50\text{mm}$	d=100mm
BE2	$\emptyset 40\text{mm}/50\text{mm}$	d=180mm

Folgende Ströme konnten in der Faraday-Tasse mit $\emptyset 30$ mm Apertur hinter dem 77.5° -Inflektormagneten gemessen werden (Strahlstrecke siehe Abb.13):

Extr.	Gap	Spannung/kV	Ion	FC1/mA	FC2/mA
EX1	BE1	26+134	N^+	12.0	5.0
EX2	BE1	32+117	Ne^+		8.0
EX3	BE2	25+200	Ne^+		10.0
EX3	BE2	37+210	Ne^+	22.0	20.0
EX3	BE2	30+210	Ne^{++}		1.2
EX4	BE2	43+190	Ne^+	30.0	12.0
EX4	BE2	45+160	H^+		5.5
EX3	BE2	25+190	Ar^+		16.0
EX3	BE2	25+190	Ar^{++}		3.0

ZUSAMMENFASSUNG

Die Transmission ist abhängig von der jeweiligen Anordnung, liegt jedoch typisch zwischen 0.7 bis 0.9. Die größten Verluste waren bei der Pentode festzustellen, was auf eine schlechte Abstimmung des damit erreichten hochbrillianten Strahles mit der Beschleunigungsgeometrie schließen läßt, während die beste Transmission mit der Triode und multi-aperture erreicht wurde.

Der Strahldurchmesser im Fokus (der ungefähr in der Mitte zwischen Beschleunigungsrohr und erstem Triplett liegt) war im Fall der Pentode ungefähr 30mm, während bei Trioden (auch bei multi-aperture) Durchmesser von $\approx 5\text{mm}$ typisch sind. Die Divergenzen nach der Beschleunigung sind in der Größenordnung $\leq 20\text{mrad}$. Dies entspricht Emittanzen von 100 bis 500mm mrad, wobei der zweite Wert größer als die Akzeptanz des nachfolgenden Strahlführungssystems ist. Da die Emittanzen, die direkt hinter der Quelle gemessen werden, weit unter diesen Werten liegen, liegt die Vermutung nahe, daß bei der Beschleunigung ein Emittanzwachstum auftritt.

Eine mögliche Erklärung hierfür ist eine Neuverteilung der Ionen im Strahl aufgrund nichtlinearer Raumladungskräfte. Diese Kraft kann nur in den nichtkompensierten Teilen des Strahles - also während der Beschleunigung - wirken.

Im Fall einer guten Anpassung läßt sich volle Transmission erreichen.

Die Raumladungskräfte bei der Dekompensation können zu extremer Fehlanpassung führen, wenn die Linsen nicht entsprechend korrigierend ausgelegt sind.

- ¹ R.Keller, P.Spädtke, F.Nöhmayer, Int. Ion Engineering Congr., Kyoto, 25 (1983)
- ² R.Keller, Nucl. Instr. Meth. 189, 97 (1981)
- ³ R.Keller, P.Spädtke, K.Hofmann, 'Optimization of a Single-Aperture Extraction System For High-Current Ion Sources', Ion Implantation: Equipment and Techniques, 69 (1983)
- ⁴ J.H.Whealton, J.C.Whitson, 'Space-Charge Ion Optics Including Extraction From A Plasma', Particle Accelerators, 10 (1980)
- ⁵ C.D.Curtis, 'Ion Source and Injector Development', Proc. Proton Linear Accelerator Conf., 179 (1976)
- ⁶ P.Spädtke, B.H.Wolf, 'HV-Geometries for High-Current Heavy Ion Acceleration and Beam Transport', Low Energy Ion Beams-3, Loughborough (1983)
- ⁷ P.Spädtke, 'AXCEL-GSI Interaktives Simulationsprogramm zur Berechnung von zweidimensionalen Potentialverteilungen elektrostatischer Anordnungen sowie von Ionenbahnen in elektrostatischen Feldern unter Berücksichtigung der Raumladung', GSI-Report 9 (1983)
- ⁸ P.Kreisler, H.Baumann, K.Bethge, 'Measurements of Space-Charge Compensation of Ion Beams', Low Energy Ion Beams-3, Loughborough (1983)
- ⁹ R.Keller, F.Nöhmayer, P.Spädtke, M.H.Schönenberg, 'High-Current Ion Sources Development', GSI Scientific Report, p.288 (1982)

