

Aktive Neutralteilchendiagnostik

am W VII

O. Vollmer  
A. Elsner  
J. Junker

IPP 4/172

November 1978



**MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK**

**8046 GARCHING BEI MÜNCHEN**

**MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK**  
**GARCHING BEI MÜNCHEN**

Aktive Neutralteilchendiagnostik

am W VII

O. Vollmer  
A. Elsner  
J. Junker

IPP 4/172

November 1978

*Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem  
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und der Europäischen Atomgemeinschaft über die  
Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt.*

Abstract:

Possibilities for neutral beam diagnostics with a vertical injection system on the stellarator W VII A are discussed. Using hitherto existing measurements, the neutral density at the plasma center is estimated for two hydrogen discharges by comparison of calculated and measured neutral particle fluxes.

## I. Einleitung

Am W VII Stellarator wurde 1977 ein Neutralteilcheninjektor mittlerer Leistung in Betrieb genommen. Es werden die Möglichkeiten der aktiven Teilchendiagnostik mit dem Neutralstrahl und die Ergebnisse der bisher durchgeführten Versuche diskutiert.

## II. Inbetriebnahme des Injektors

Die Ionenquelle des Injektors ist ein modifizierter Nachbau des Cleo-Injektors, der auch in den ersten Injektionsexperimenten an Dite verwendet wurde. (Teststandversuche mit der Ionenquelle und dem Injektions-system am W VII sind in (1) beschrieben.) Am W VII muß der Injektor in einem relativ hohen Magnetfeld betrieben werden ( $B \sim 1 \text{ kG}$ ). Da insbesondere die Plasmaquelle - ein modifiziertes Duopisatron - sehr empfindlich gegen äußere Magnetfelder ist, wurde die Quelle mit einer massiven magnetischen Abschirmung umgeben (Abb. 1). Es ergaben sich zwei Schwierigkeiten: Einmal änderte die Abschirmung das in der Quelle erzeugte Magnetfeld derart, daß nur noch ca. 30 % der am Teststand erreichten Leistung extrahiert werden konnte. Zum anderen brachte ein Betrieb der Quelle im Magnetfeld des W VII einen weiteren Leistungsverlust auf ca. 10 % der Teststandleistung. Messungen des in der Quelle erzeugten Magnetfeldes mit und ohne Abschirmung ergaben, daß die beobachteten Leistungsminderungen durch Feldverzerrungen in der Extraktionsebene von nur wenigen Gauss verursacht wurden. Um diese Feldänderungen zu korrigieren und die Abschirmung gegen das W VII-Magnetfeld zu verbessern, wurden drei Modifikationen an der Quelle vorgenommen (Abb. 2):

1. Die Plasmaquelle wurde um eine Ringelektrode gekürzt. Dadurch verkleinert sich der Abstand der felderzeugenden Spule der Quelle von der Extraktionsebene, was die Feldverzerrungen durch das äußere Feld vermindert.
2. Eine Zusatzspule beeinflußt das Magnetfeld in der Nähe der Extraktionsebene.
3. Ein zusätzlicher Abschirmzylinder aus hochpermeablem Material wurde eingebaut (gefertigt von Leybold-Heraeus aus Permenorm).

Mit diesen drei Modifikationen konnten - begrenzt durch die verfügbare H.V.-Versorgung - 9 A bei 28 kV extrahiert werden. (Damit wurden die am Teststand mit der Quelle erreichten Leistungen übertroffen.) Außerdem war der Einfluß des W VII-Magnetfeldes vernachlässigbar klein geworden. Im einzelnen wurde nicht untersucht, inwieweit die drei Modifikationen jeweils zur Verbesserung beigetragen haben; es zeigte sich jedoch, daß das Feld der Zusatzspule den Bereich für Magnetfeld, Bogen Spannung und Bogenstrom, in dem die Quelle ein rauschfreies Plasma erzeugt, wesentlich erweitert.

### III. Iontemperaturmessung

Der Vertikalinjektor bietet die Möglichkeit, zusammen mit einem Neutralteilchenanalysator (NPA) lokale Iontemperaturen und damit Iontemperaturprofile zu messen. Der injizierte Neutralstrahl erhöht lokal die Neutralteilchendichte im Plasma, so daß eine mit dem Injektionspuls zeitlich korrelierte Erhöhung des Flusses an Neutralteilchen im Analysator einem bestimmten Plasmavolumen zugeordnet werden kann (Abb. 3).

Bei ersten Versuchen (Aug. 1977) wurde der ausgeblendete Neutralstrahl für ca. 50 ms in die Plasmaentladung injiziert. Erführte bei einer Leistungsdichte von ca.  $1 \text{ kW/cm}^2$  im Strahlvolumen zu einer zusätzlichen Neutraldichte von  $10^8$  bis  $10^9$  Teilchen pro  $\text{cm}^3$ . Den zeitlichen Verlauf des registrierten Ladungsaustausch-Flusses über eine Plasmaentladung mit Neutralstrahlinjektion zeigt Abb. 4. Man erkennt deutlich die Erhöhung des Teilchenflusses während des Injektionspulses. Da der Neutralstrahl selbst schnell zu- und abgeschaltet wird (Anstieg  $\sim 2 \text{ ms}$ , Abfall  $\sim 0,1 \text{ ms}$ ), kann nur ein entsprechend schneller Anstieg bzw. Abfall des Signals dem relevanten Teilchenfluß aus dem Plasmazentrum zugeordnet werden. Demgegenüber müssen Flußänderungen im Verlaufe von mehreren Millisekunden eine Folge des strahlinduzierten Kaltgaszuflusses durch den Injektionsstutzen sein. Da der Strahl sich schneller ab- als zuschalten läßt und der Verunreinigungsanteil im Neutralstrahl im Verlauf des Injektionspulses abnehmen sollte, wurde der schnelle Flußabfall dem aktiven Flußsignal zugeordnet. Eine in dieser Weise ausgewertete Wasserstoff-Entladungsserie vom 3.8.1977 liefert das in Abb. 5 gezeigte "aktive" Energiespektrum. Das ebenfalls

eingezeichnete passive Spektrum entspricht bei Energien über ca. 0,5 keV einer Maxwell-Verteilung; dagegen sind dem aktiven Spektrum bei 1 keV und 2,5 keV ausgeprägte zusätzliche Flußkomponenten überlagert. Eine "aktive" Messung der Iontemperatur ist deshalb nicht möglich. Durch Variation der Beschleunigungsspannung konnte gezeigt werden, daß es sich um niederenergetische Komponenten des Neutralstrahls handelt, die im Plasmavolumen V (Abb. 3) ionisiert werden und anschließend reneutralisiert in den Analysator gelangen können. Das Massenspektrum des aus der brennenden Plasmaquelle ausströmenden Gases (Abb. 6) legt nahe, daß Molekülonen mit Massen  $A \approx 16 - 18$  beschleunigt werden, im Neutralisator dissoziieren und die niederenergetische Strahlkomponente bilden. Es gibt mehrere Möglichkeiten, diese störende Überlagerung des Spektrums abzuschwächen:

1. Eine Änderung der Beobachtungsrichtung des Analysators (reneutralisierte Strahlteilchen verlassen das Plasma in ihrer Gyrationsebene). Allerdings läßt sich der NPA in toroidaler Richtung nur um ca. 2 Grad schwenken.
2. Der Verunreinigungsanteil im Bogen-Plasma des Injektors nimmt mit einer Zeitkonstante von etwa einer Sekunde ab (Abb. 6). Daher sollte ein "Vorbrennen" des Bogenplasmas vor der Injektion auch die Verunreinigung im Neutralstrahl vermindern.
3. Umstellung des Injektors auf Betrieb mit Deuterium und Massanalyse des Wasserstoff-Flusses.

Zunächst wurde die Vorbrennzeit der Plasmaquelle von 20 msec auf 4 Sekunden verlängert. Das auf diese Weise gemessene aktive Spektrum (Abb. 7) zeigt, daß der Einfluß der Beam-Komponente auf das Spektrum wesentlich kleiner geworden ist. Insbesondere bei Energien unter 1 keV erscheint das Spektrum brauchbar. (Bei Energien über 1,5 keV sind die Neutralflüsse so klein, daß sich nur noch obere Flußgrenzen angeben lassen.) Um aus dem niederenergetischen Teil des "aktiven" Spektrums die zentrale Iontemperatur zu entnehmen, muß man bei der Liniendichte der vorliegenden Entladung die Reionisation der aus dem Plasmazentrum kommenden Teilchen berücksichtigen. Es wurde deshalb die Energieabhängigkeit des aktiven Teilchenflusses numerisch berechnet. Verwendet wurde dazu das gemessene Elektronen-Dichteprofil und ein der Elektronendichte proportionales Iontemperaturprofil, wobei

die zentrale Iontemperatur der passiven Messung entnommen ist (Abb. 8). Die damit unter Mitnahme der Neutralteilchenabsorption durch Ladungsaustausch, Ionen- und Elektronenstoßionisation berechnete Energieabhängigkeit des Neutralteilchenflusses zeigt Abb. 7. (Der absolute Teilchenfluß ist an die Messung angepaßt.) Man sieht, daß die aktiv gemessene Energieverteilung mit der Rechnung - und damit auch mit der passiv gemessenen Iontemperatur - konsistent ist. Für eine unabhängige, zuverlässige Messung der zentralen Iontemperatur müßte jedoch ein größerer Energiebereich des Spektrums auswertbar sein. Die dazu nötige stärkere Unterdrückung der Verunreinigungslinien sollte sich erreichen lassen, wenn Beam- und Plasmateilchen unterscheidbar sind.

#### IV. Messung der zentralen Neutralgasdichte

Die Neutralstrahldiagnostik erlaubt es,  $n_0(o)$  in einfacher Weise abzuschätzen, ohne die absolute Empfindlichkeit des Analysators zu kennen. Nimmt man an, daß Ionen mit hohen Energien ( $E > T_i(o)$ ) im wesentlichen aus dem Plasmazentrum und damit aus dem von Neutralstrahl erreichten Volumen  $V$  (Abb. 3) stammen, dann ergibt sich  $n_0(o)$  in erster Näherung aus dem Verhältnis von strahlinduziertem und passivem Neutralteilchenfluß. Zu einer genaueren Messung von  $n_0(o)$  muß man allerdings berücksichtigen, daß je nach Teilchenenergie - abhängig vom Iontemperaturprofil - die Volumina, die zum aktiven und passiven Signal beitragen, jeweils unterschiedlich sind.

Um für die beiden ausgewerteten Entladungen  $n_0(o)$  abzuschätzen, muß man davon ausgehen, daß die berechneten und angepaßten aktiven Spektren (Abb. 5 und Abb. 7) dem wahren aktiven Teilchenfluß entsprechen; eine Annahme, die für die Entladung vom 3.8.1978 (Abb. 7) problematisch ist, da hier zur Anpassung der Absolutflüsse nur der relativ kleine Energiebereich um ca. 1,5 keV geeignet ist. Um  $n_0(o)$  zu erhalten, wurden auch die passiven Neutralteilchenflüsse numerisch berechnet und die dabei vorzugebenden Neutralteilchenprofile so lange variiert, bis sich die gemessenen Intensitätsverhältnisse und Energieabhängigkeiten der aktiven und passiven Messung reproduzierten. Auf diese Weise ermittelte Neutralgasprofile sind in Abb. 8 angegeben.

(Die gestrichelt gezeichneten Randwerte des Neutralgasprofils beeinflussen die gerechneten Flüsse nur für kleine Energien und sind für die Abschätzung von  $n_0(o)$  unwesentlich.) Als Ergebnis entnimmt man für die zentralen Neutralgasdichten:

$$n_0(o) \approx 2 \times 10^8 \pm 50 \% \text{ (3.8.77 Schuss Nr. 7468 - 7506)}$$
$$n_0(o) \approx 8 \times 10^7 \pm 50 \% \text{ (6.3.78 Schuss Nr. 0305 - 0326)}$$

Die Unsicherheit dieser Abschätzung resultiert im wesentlichen daraus, daß man die zur Berechnung des Neutralteilchenflusses verwendeten Profile nicht genau kennt. Insbesondere ist das verwendete Ionentemperaturprofil recht willkürlich. Um den Einfluß dieses Profils abzugrenzen, wurde das für die Entladung am 6.3.1978 angenommene Ionentemperaturprofil variiert (punktierte Profile Abb. 8b). Dabei führt das verbreiterte Profil zu einem um ca. 50 % kleineren Wert für die zentrale Neutralgasdichte, während das schmalere Profil einen um ca. 50 % erhöhten Wert ergibt. Für eine der beiden Entladungsserien (Nr. 7468 - 7506) wurde  $n_0(o)$  auch über den absoluten Neutralteilchenfluß eine untere Grenze für die zentrale Neutralgasdichte unter den folgenden Annahmen abgeschätzt:  $T_i(r) = \text{const}$ ,  $n_i(r) = n_e(r)$ ,  $n_i(r) \cdot n_0(r) = \text{const}$  für  $(r) < 5 \text{ cm}$ . Damit ergibt sich  $n_0(o) > 8.5 \cdot 10^7$ .

Ein Schwenken des NPA bietet prinzipiell mehrere Möglichkeiten. Man kann  $n_i(r)$  bestimmen und daraus auch  $n_0(r)$ . Allerdings benötigt man dazu  $T_i(r)$  und es erscheint fraglich, ob man bei rein radialer Beobachtung  $T_i(r)$  messen kann.

#### V. Absorption des Neutralstrahls im Plasma

Der gesamte Neutralstrahl, der durch ein als Lochblende ausgebildetes Kalorimeter in den Torus eintritt, kann ein weiteres Kalorimeter über den Torus erreichen (Abb. 3). Die Temperaturerhöhung des oberen Kalorimeters infolge eines Neutralstrahlpulses mit und ohne Plasma liefert deshalb die vom Plasma absorbierte Strahlleistung. Dabei erlaubt das untere Kalorimeter eine Normierung der Strahlenergie, so daß der Einfluß von Leistungsschwankungen des Injektors eliminiert wird. Diese kalorimetrische Absorptionsmessung hat gegenüber Anordnungen, die mit wesentlich kleineren Strahlleistungen arbeiten



(z.B. am TFR (2)), den Vorteil, daß man nicht auf einen elektrischen Teilchennachweis - etwa mit Faradaycup oder Channeltron - angewiesen ist, sondern die Temperaturerhöhungen an den Kalorimetern nach der Plasmaentladung messen kann. Allerdings ist pro Entladung nur eine über die Pulsdauer des Neutralstrahls integrierende Messung möglich. Absorptionsmessungen lassen sich in zweifacher Hinsicht auswerten:

### 1. Ionendichte

Die Leistungsabsorption berechnet sich aus den Ratenkoeffizienten für Ladungsaustausch, Protonen- und Elektronenionisation. Da der Ladungsaustausch viel wahrscheinlicher als Elektronenionisation ist, liefert die Absorptionsmessung im wesentlichen die Protonendichte und hängt nur wenig von der Plasmatemperatur ab.

Absorptionsmessungen am TFR zeigen deutliche Abweichungen zwischen gerechneter und beobachteter Strahlabsorption(2). Zur Interpretation der geplanten Heizexperimente am W VII ist es jedoch wichtig, die Absorption des Heizstrahles zu kennen, da sie wesentlich die in das Plasma eingekoppelte Leistung bestimmt. Hier kann eine unabhängige Absorptionsmessung hilfreich sein, da Vertikalinjektor und Heizinjektoren Neutralstrahlen ähnlicher Energie- und Strahlzusammensetzung liefern (insbesondere sollte ein elektrostatischer 3-Kanal-Analysator, der bis zum Beginn der Heizexperimente installiert ist, auch eine energieaufgelöste Absorptionsmessung erlauben).

### 2. Messung von $Z_{\text{eff}}$

Infolge der großen Ladungsaustausch-Querschnitte für schwerere Ionen in höheren Ladungszuständen können Verunreinigungen die Beamabsorption merklich beeinflussen. Prinzipiell liefert deshalb ein Vergleich Strahlabsorption - Liniendichte der Elektroden zusammen mit spektroskopischen Daten eine Aussage über  $Z_{\text{eff}}$ . Allerdings ergeben sich kleine Differenzen der Absorption, die mit unabhängigen Methoden gemessen wird, und es ist fraglich, ob die erreichte Genauigkeit für eine Messung von  $Z_{\text{eff}}$  ausreicht. (Ein  $\Delta Z_{\text{eff}} = 3$ , verursacht durch  $O^{6+}$ -Ionen, ändert die Strahlabsorption um  $\sim 10\%$ .)

Eine andere Möglichkeit,  $Z_{\text{eff}}$  zu bestimmen, bietet die Messung der Energieabhängigkeit der Absorptionsquerschnitte für die Beamkomponenten mit  $E$ ,  $E/2$ ,  $E/3$  mit dem erwähnten 3-Kanal-Analysator.

Gemessen wurde die Beamabsorption am W VII für eine Serie am 6.3.1978. In Abb. 10 sind Mikrowellendichte und die der Beamabsorption entsprechende Protonendichte ( $Z_{\text{eff}} = 1$ ) verglichen. Allerdings basiert die angegebene Protonendichte nur auf einem "Referenzschuß" ohne Plasma (mit Feld und Gas). So ist es nicht sinnvoll, aus der Differenz der beiden Liniendichten ein  $Z_{\text{eff}}$  abzuleiten. Die relative Variation der Absorption im Laufe der Serie überschreitet den erwarteten Meßfehler. Weitere Versuche sind vorgesehen bei Liniendichten über  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , die die Absorptionsmessung in ihren günstigsten Bereich bringen (Abb. 9).

Herrn Speth, unter dessen Leitung der Injektor gebaut und am W VII installiert wurde, sei für die Hilfe bei der Inbetriebnahme der Ionenquelle gedankt.

Herr Probst hat die erwähnten Modifikationen des Injektors durchgeführt und durch sorgfältige Wartung und Instandhaltung den Betrieb am W VII ermöglicht.

Literatur:

- (1) J. Bäumlér, J. Junker, W. Melkus, W. Ott, F. Probst, E. Speth,  
Proceedings of the 9th Symposium on Fusion Technology,  
Garmisch-Partenkirchen 1976, 801.
- (2) EQUIPE TFR, Nuclear Fusion 18 (1978), 647.
- (3) S. Rehker, E. Speth, IPP 2/217, 1974.
- (4) D.A. Aldcroft et al., J. of Phys. E. Sci. Instr. Vol. 9 (1976),  
102.

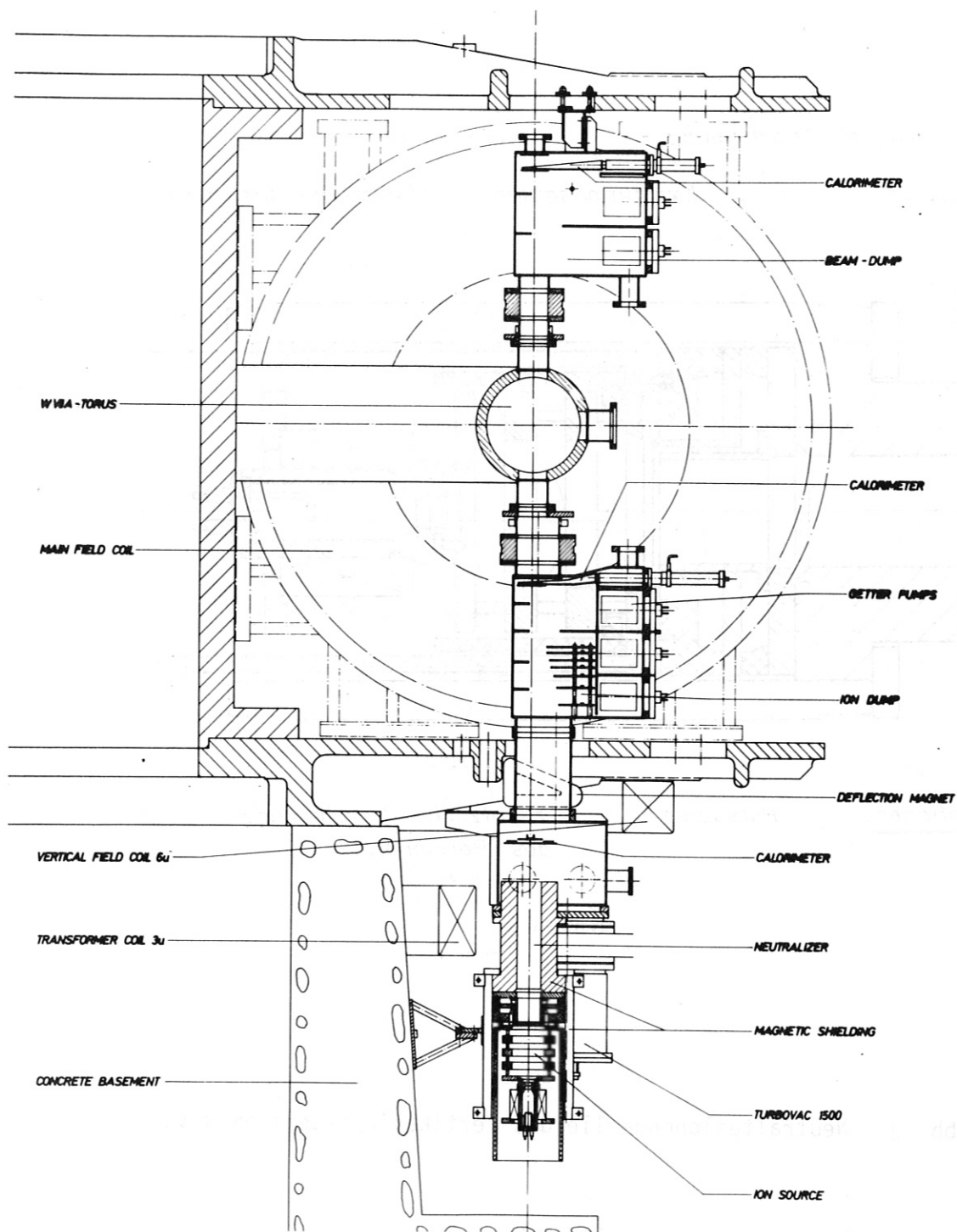


Abb. 1 Vertikalinjektor am W VII

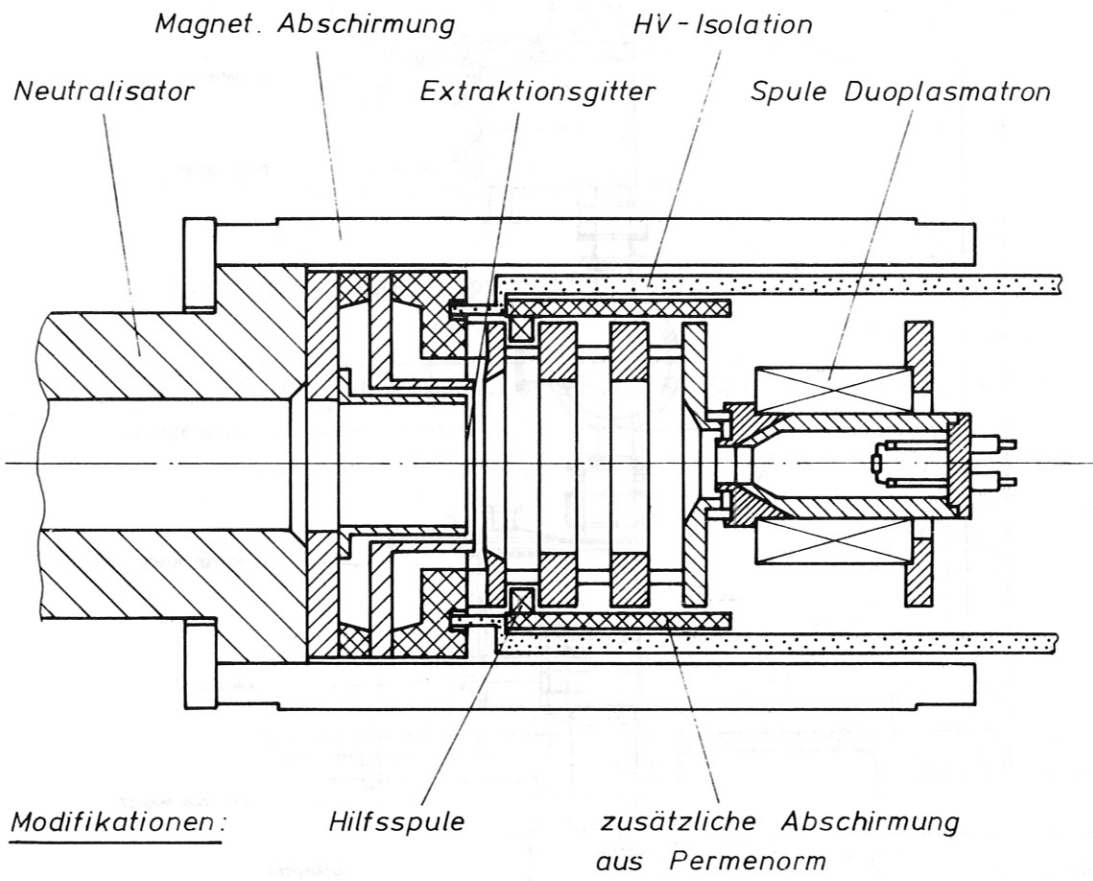


Abb. 2 Neutralteilchenquelle des Vertikalinjektors am W VII.

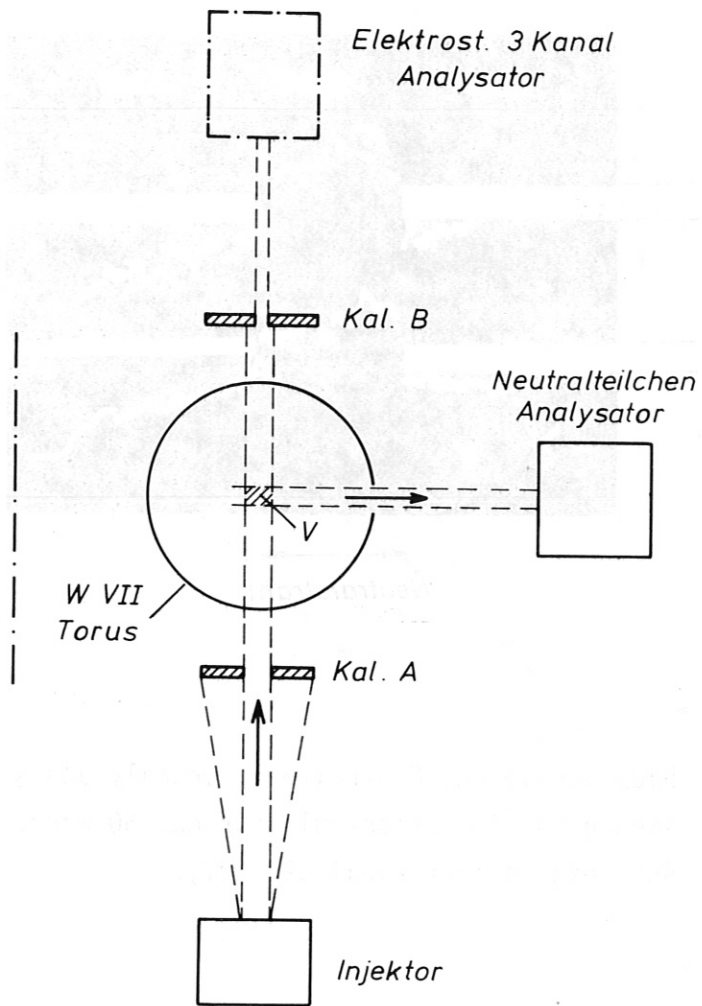


Abb. 3 Anordnung zur aktiven Neutralteilchendiagnostik am W VII.  
 (Der elektrostatische Analysator befindet sich im Aufbau).

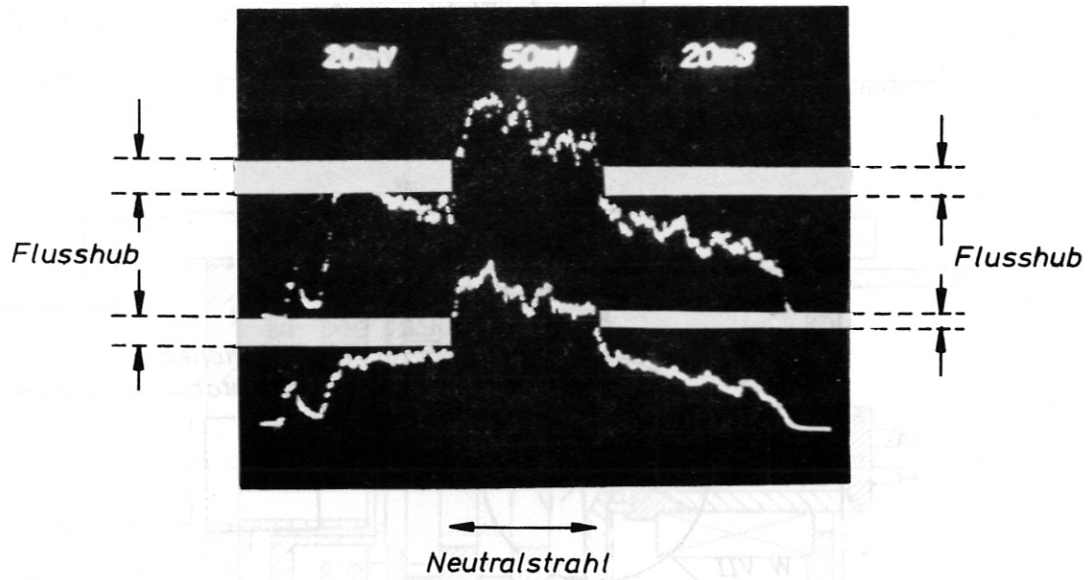


Abb. 4 Flußsignale des Neutralteilchenanalysators für eine Entladung mit Injektionspuls für ca. 50 msec. (Oberer Kanal: 460 eV; unterer Kanal 620 eV).

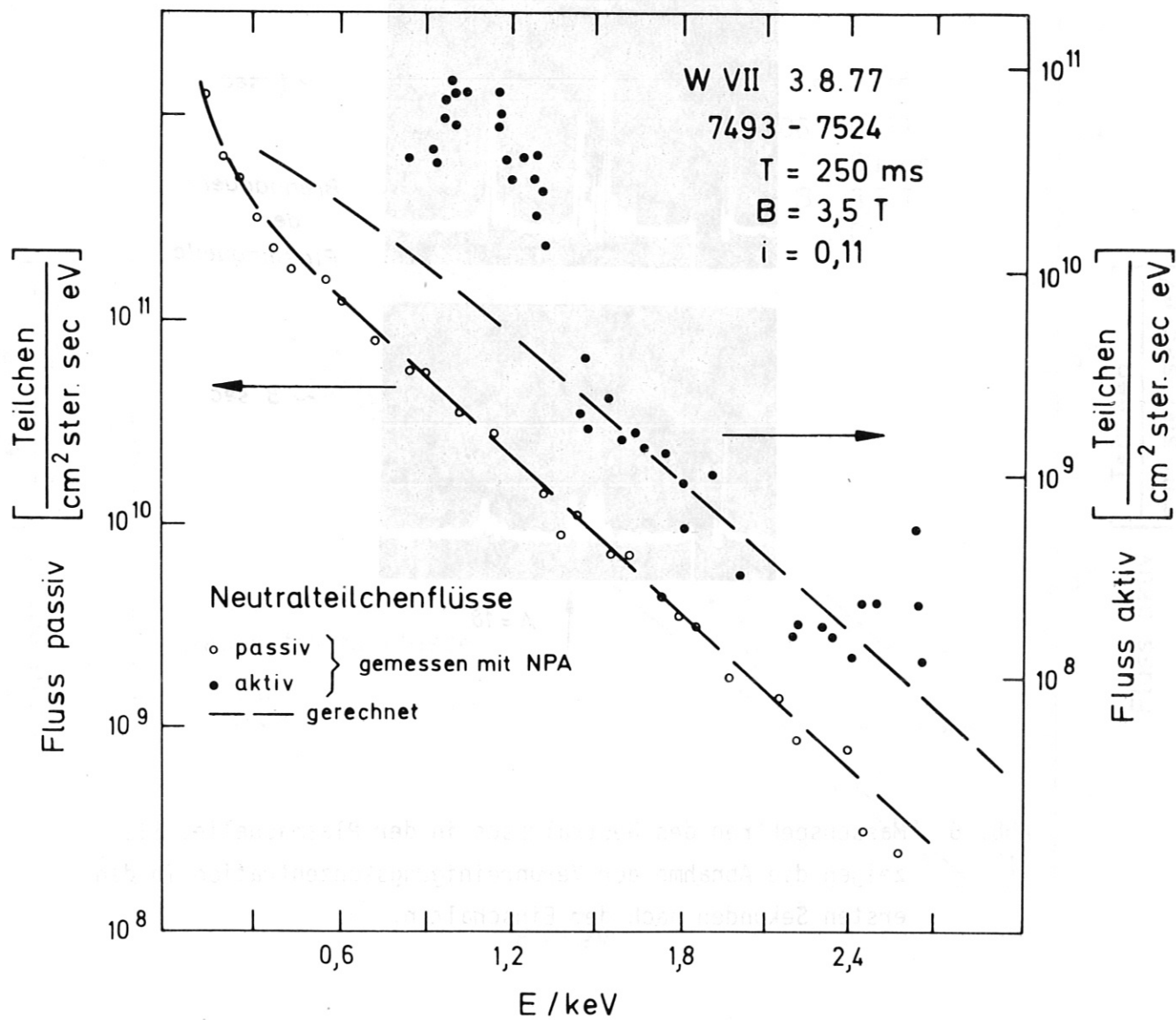


Abb. 5 Aktive und passive Flüsse von Ladungsaustauschneutralen. Die gerechneten Flüsse ergeben sich mit den Profilen in Abb. 8a (Vorbrennzeit des Bogens 0,02 sec).



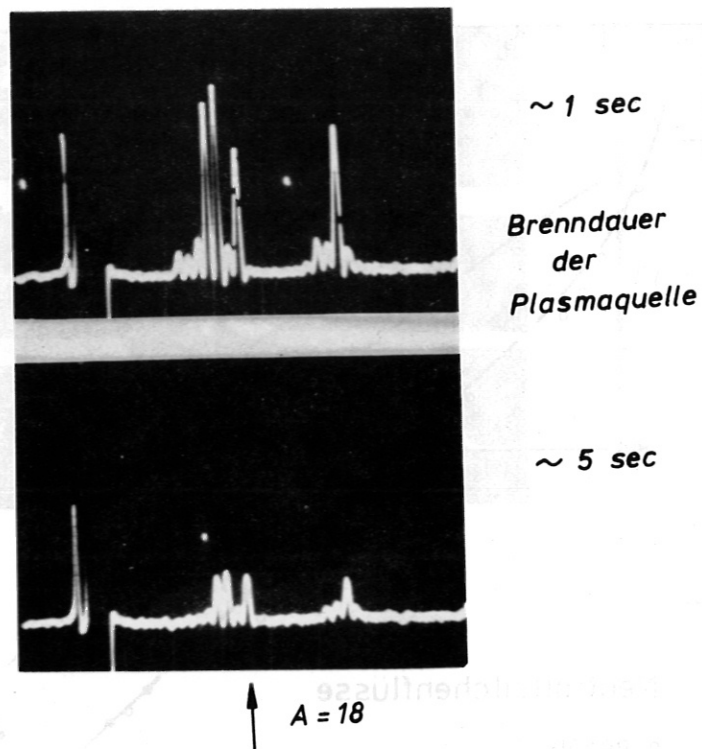


Abb. 6 Massenspektren des Neutralgases in der Plasmaquelle. Sie zeigen die Abnahme der Verunreinigungskonzentration in den ersten Sekunden nach dem Einschalten.

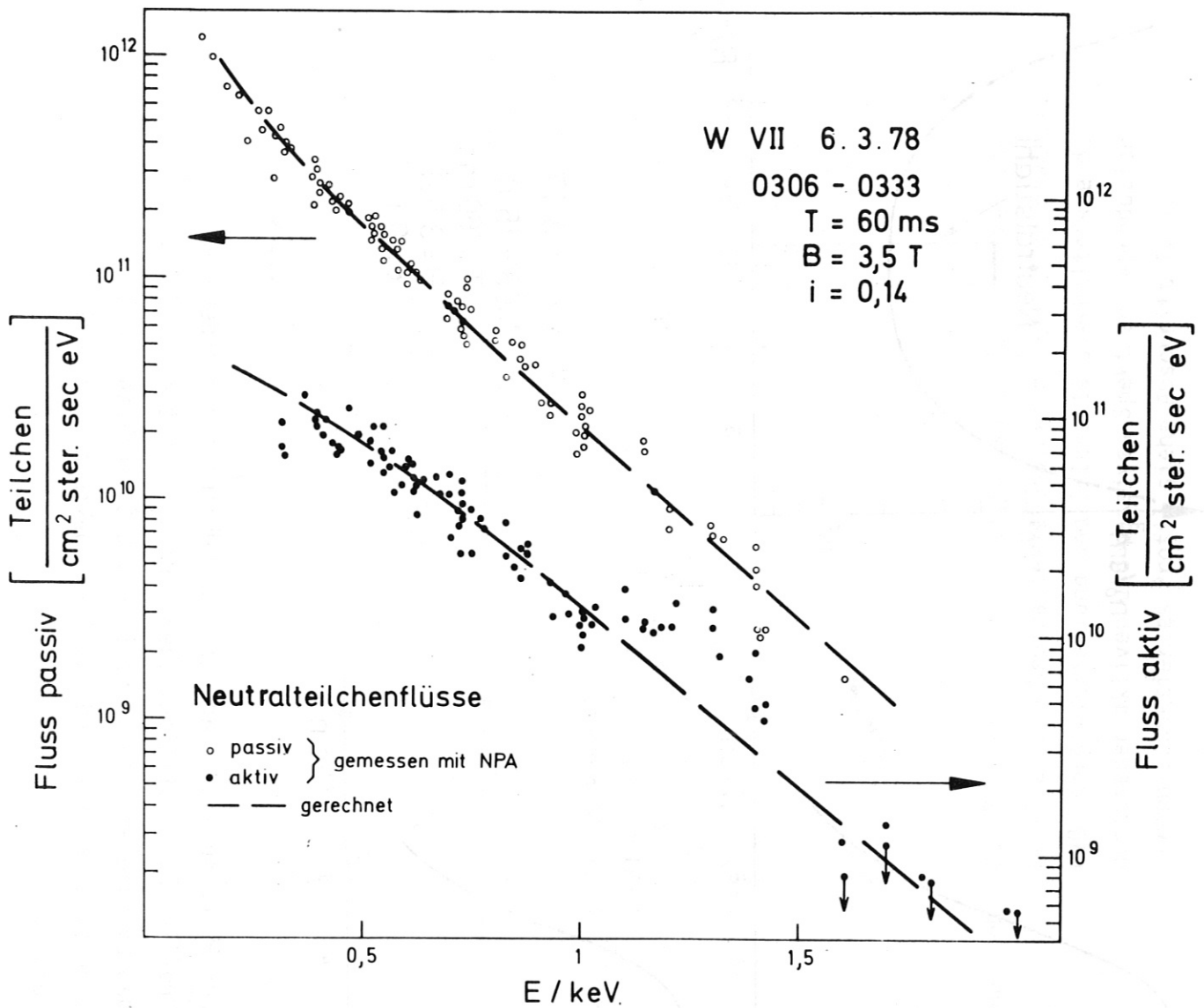


Abb. 7 Aktive und passive Flüsse von Ladungsaustauschneutralen einer Wasserstoffentladung. Die gerechneten Flüsse ergeben sich mit den Profilen der Abb. 8b (Vorbrennzeit des Bogens 4 sec).

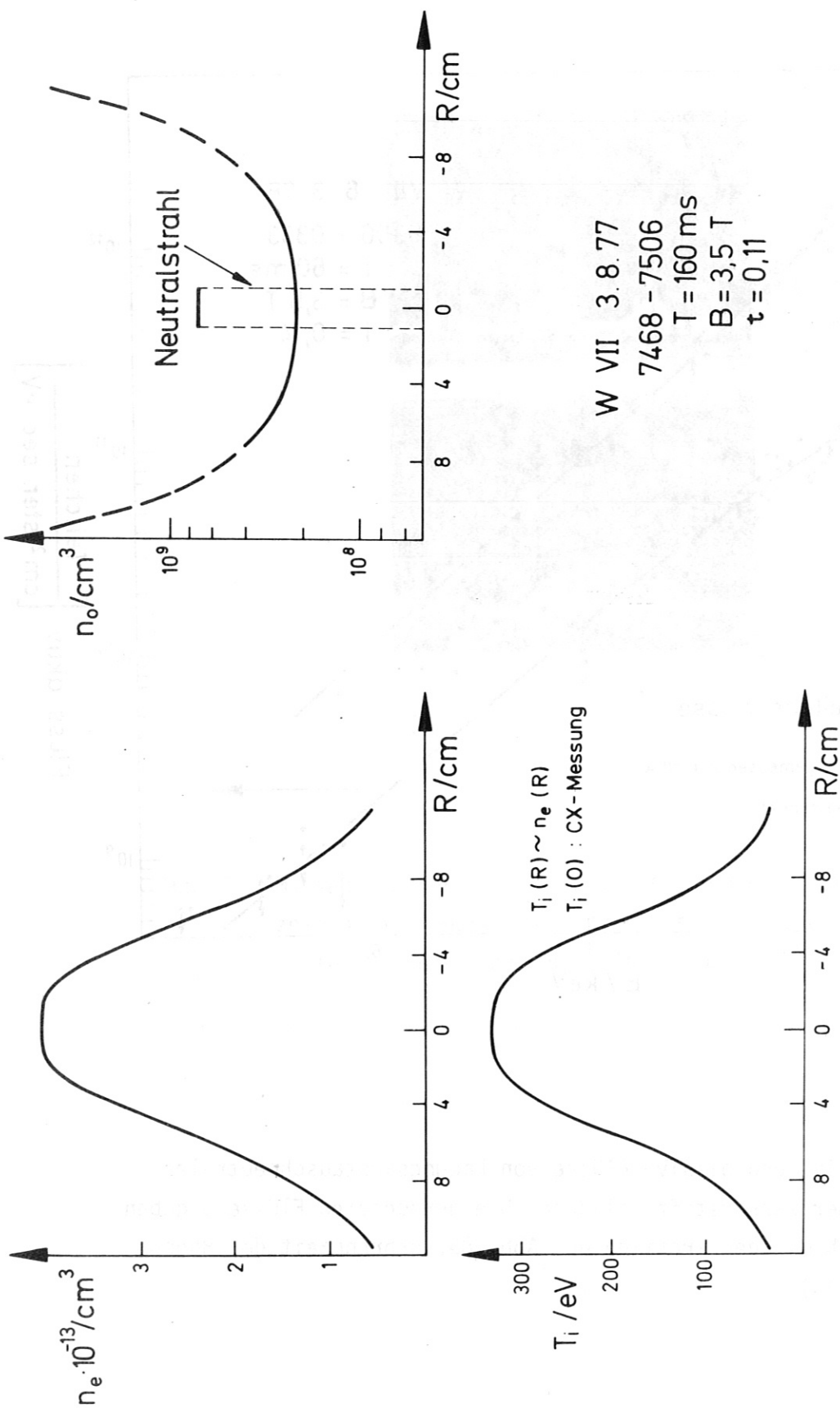
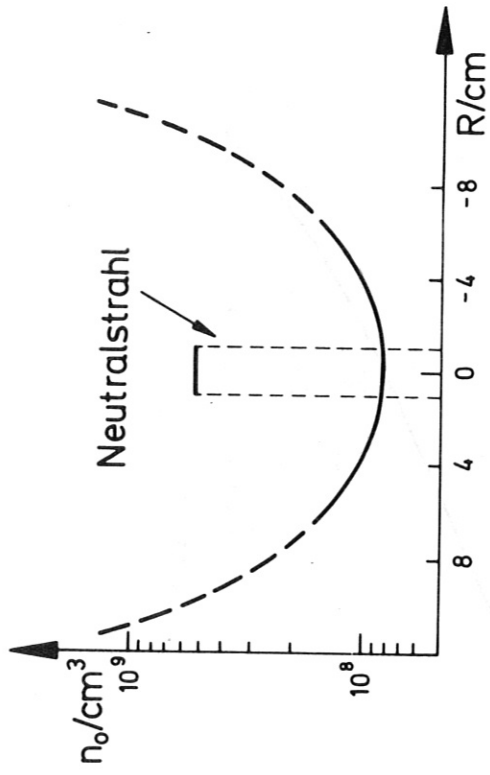


Abb. 8a Zur Berechnung der Ladungsaustauschflüsse verwendete Profile. Die Neutralteilchendicke  $n_0(R)$  ist so gewählt, daß Energieverteilung und Intensitätsverhältnisse der gemessenen aktiven und passiven Spektren reproduziert werden.



W VII 6.3.78  
 0305 - 0326  
 T = 60 ms  
 B = 3,5 T  
 t = 0,14

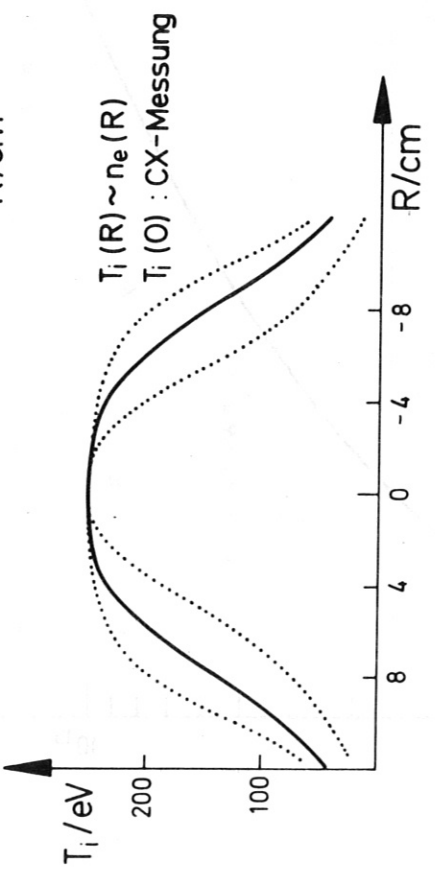
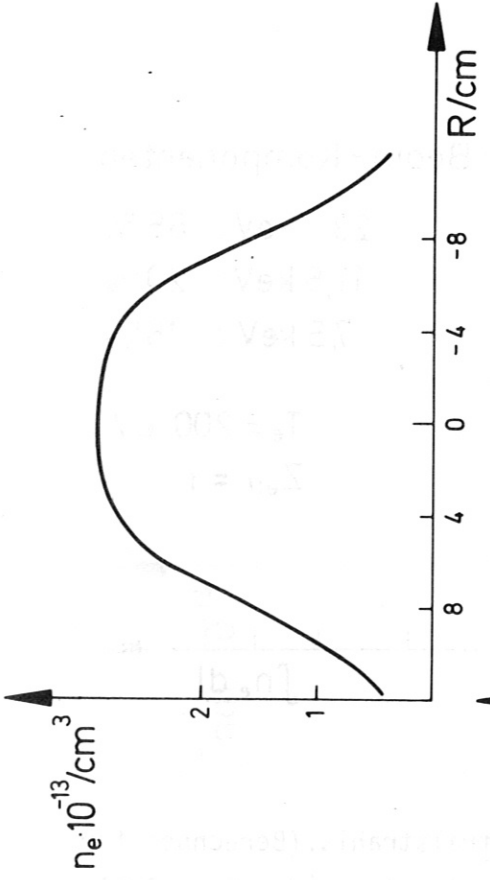


Abb. 8b Zur Berechnung der Ladungsaustauschflüsse verwendete Profile. Die Neutralteilchendicke  $n_0(R)$  ist so gewählt, daß Energieverteilung und Intensitätsverhältnisse der gemessenen aktiven und passiven Spektren reproduziert werden (punktierter Profil siehe Abschnitt IV.).

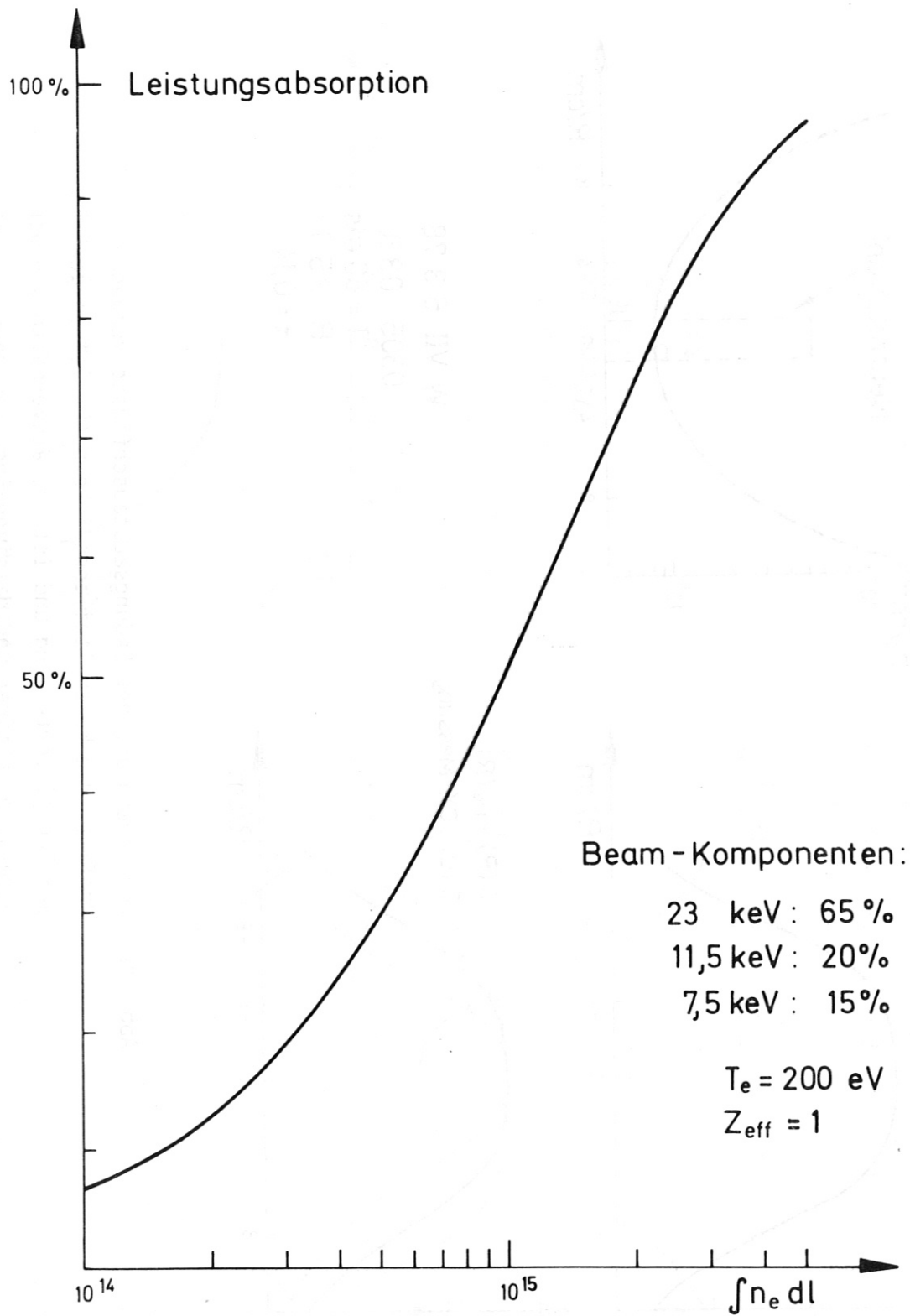


Abb. 9 Leistungsabsorption des Neutralstrahls. (Berechnet für eine Strahlzusammensetzung, wie sie an der Cleo-Quelle gemessen wurde (4) ).

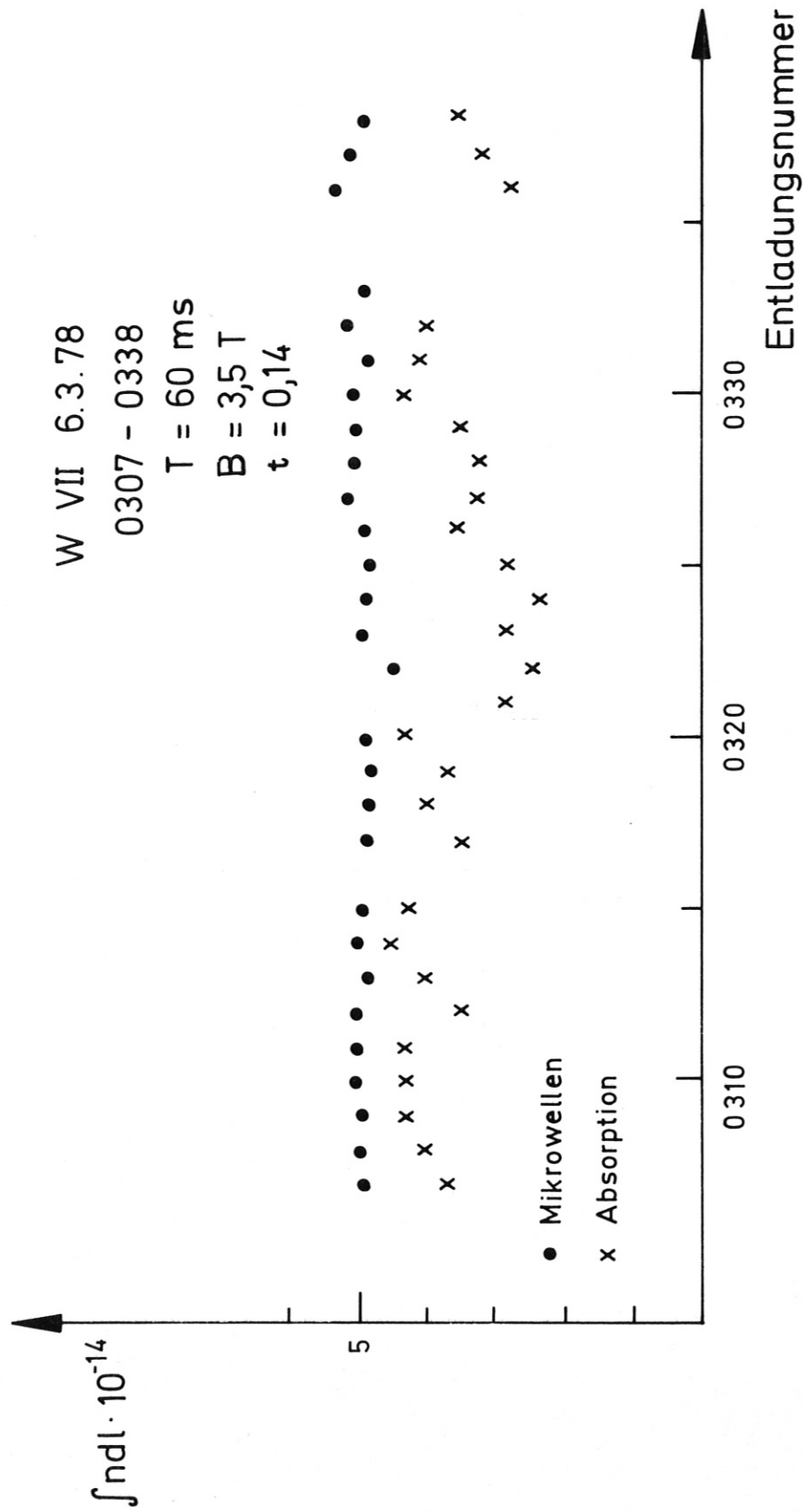


Abb. 10 Protonen-Liniendichte, die der kalorimetrisch gemessenen Neutralstrahlabsorption entspricht und Liniendichte der Elektronen (Mikrowellen) für eine Entladungsserie.