

EUR 511.d

REPRINT

ASSOZIIERUNG
EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT - EURATOM
INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK, GARCHING BEI MÜNCHEN

DIE ZEITLICHE ÄNDERUNG
DER RADIALEN
ELEKTRONENDICHTEVERTEILUNG
BEIM THETA-PINCH

von

F.P. KÜPPER

1964



Vertrag Nr. 003-61-1 FUAD

Sonderdruck aus
ZEITSCHRIFT FÜR NATURFORSCHUNG
Band 18a, Heft 8/9 - 1963

HINWEIS

Das vorliegende Dokument ist im Rahmen des Forschungsprogramms der Kommission der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM) ausgearbeitet worden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Euratomkommission, ihre Vertragspartner und alle in deren Namen handelnden Personen:

- 1^o — keine Gewähr dafür übernehmen, dass die in diesem Dokument enthaltenen Informationen richtig und vollständig sind oder dass die Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden und Verfahren nicht gegen gewerbliche Schutzrechte verstößt;
- 2^o — keine Haftung für die Schäden übernehmen, die infolge der Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden oder Verfahren entstehen könnten.

This reprint is intended for restricted distribution only. It reproduces, by kind permission of the publisher, an article from "ZEITSCHRIFT FÜR NATURFORSCHUNG", Band 18a, Heft 8/9 - 1963, 895-900. For further copies please apply to Verlag der Zeitschrift für Naturforschung — Tübingen (Deutschland).

Dieser Sonderdruck ist für eine beschränkte Verteilung bestimmt. Die Wiedergabe des vorliegenden in „ZEITSCHRIFT FÜR NATURFORSCHUNG“, Band 18a, Heft 8/9 - 1963, 895-900 erschienenen Aufsatzes erfolgt mit freundlicher Genehmigung des Herausgebers. Bestellungen weiterer Exemplare sind an Verlag der Zeitschrift für Naturforschung — Tübingen (Deutschland), zu richten.

Ce tiré-à-part est exclusivement destiné à une diffusion restreinte. Il reprend, avec l'aimable autorisation de l'éditeur, un article publié dans «ZEITSCHRIFT FÜR NATURFORSCHUNG», Band 18a, Heft 8/9 - 1963, 895-900. Tout autre exemplaire de cet article doit être demandé à Verlag der Zeitschrift für Naturforschung — Tübingen (Deutschland).

Questo estratto è destinato esclusivamente ad una diffusione limitata. Esso è stato riprodotto, per gentile concessione dell'Editore, da «ZEITSCHRIFT FÜR NATURFORSCHUNG», Band 18a, Heft 8/9 - 1963, 895-900. Ulteriori copie dell'articolo debbono essere richieste a Verlag der Zeitschrift für Naturforschung — Tübingen (Deutschland).

Deze overdruk is slechts voor beperkte verspreiding bestemd. Het artikel is met welwillende toestemming van de uitgever overgenomen uit „ZEITSCHRIFT FÜR NATURFORSCHUNG“, Band 18a, Heft 8/9 - 1963, 895-900. Meer exemplaren kunnen besteld worden bij Verlag der Zeitschrift für Naturforschung — Tübingen (Deutschland).

EUR 511.d

REPRINT

DIE ZEITLICHE ÄNDERUNG DER RADIALEN ELEKTRONENDICHTE-
VERTEILUNG BEIM THETA-PINCH von F.P. KÜPPER.

Assoziierung Europäische Atomgemeinschaft - EURATOM.
Institut für Plasmaphysik, Garching bei München.
Vertrag Nr. 003-61-1 FUAD.
Sonderdruck aus „Zeitschrift für Naturforschung“
Band 18a, Heft 8/9 - 1963, Seiten 895-900.

In einem Theta-Pinch wurde mit einem Mach-Zehnder-Interferometer die Radialsymmetrie der Elektronendichteverteilung in Abhängigkeit von der Zeit gemessen. In einer Zeitspanne von 400 nsec während einer Entladung stellte ein Bildwandler drei Bilder her. (Belichtungszeit jeweils 10 nsec). Bis zu 100 nsec nach der ersten Kompression zeigen die Versuchsergebnisse bei eingefrorenen parallelen und antiparallelen Magnetfeldern verschiedene Dichte-

EUR 511.d

REPRINT

THE ELECTRON DENSITY DISTRIBUTION IN THE THETA-PINCH
AS A FUNCTION OF TIME by F.P. KÜPPER.

Association European Atomic Energy Community - EURATOM.
Institut für Plasmaphysik, Garching bei München.
Contract No. 003-61-1 FUAD.
Reprinted from "Zeitschrift für Naturforschung"
Vol. 18a, No. 8/9 - 1963, pages 895-900.

In a θ -pinch the radial symmetry of the electron density distribution as a function of time has been measured by a Mach-Zehnder interferometer. In a time interval of 400 nsec during a discharge an image converter made three pictures (exposure times of 10 nsec each). Up to 100 nsec after the first compression, the experimental results show different density distributions for the

EUR 511.d

REPRINT

THE ELECTRON DENSITY DISTRIBUTION IN THE THETA-PINCH
AS A FUNCTION OF TIME by F.P. KÜPPER.

Association European Atomic Energy Community - EURATOM.
Institut für Plasmaphysik, Garching bei München.
Contract No. 003-61-1 FUAD.
Reprinted from "Zeitschrift für Naturforschung"
Vol. 18a, No. 8/9 - 1963, pages 895-900.

In a θ -pinch the radial symmetry of the electron density distribution as a function of time has been measured by a Mach-Zehnder interferometer. In a time interval of 400 nsec during a discharge an image converter made three pictures (exposure times of 10 nsec each). Up to 100 nsec after the first compression, the experimental results show different density distributions for the

EUR 511.d

REPRINT

THE ELECTRON DENSITY DISTRIBUTION IN THE THETA-PINCH
AS A FUNCTION OF TIME by F.P. KÜPPER.

Association European Atomic Energy Community - EURATOM.
Institut für Plasmaphysik, Garching bei München.
Contract No. 003-61-1 FUAD.
Reprinted from "Zeitschrift für Naturforschung"
Vol. 18a, No. 8/9 - 1963, pages 895-900.

In a θ -pinch the radial symmetry of the electron density distribution as a function of time has been measured by a Mach-Zehnder interferometer. In a time interval of 400 nsec during a discharge an image converter made three pictures (exposure times of 10 nsec each). Up to 100 nsec after the first compression, the experimental results show different density distributions for the

verteilungen. Eine vollständige Radialsymmetrie der Elektronendichteverteilung wurde nicht festgestellt.

Es wird eine weitere interferometrische Methode zur Messung der Radialsymmetrie der Elektronenverteilung durch Beobachtung der Interferenzstreifen n-ter Ordnung beschrieben.

cases of trapped parallel and antiparallel magnetic fields. Complete radial symmetry of the electron density distribution was not found.

Another interferometric method for measuring the radial symmetry of the electron distribution by observing "zero order" fringes is described.

cases of trapped parallel and antiparallel magnetic fields. Complete radial symmetry of the electron density distribution was not found.

Another interferometric method for measuring the radial symmetry of the electron distribution by observing "zero order" fringes is described.

cases of trapped parallel and antiparallel magnetic fields. Complete radial symmetry of the electron density distribution was not found.

Another interferometric method for measuring the radial symmetry of the electron distribution by observing "zero order" fringes is described.

Die zeitliche Änderung der radialen Elektronendichteverteilung beim Theta-Pinch*

Von FRANZ PETER KÜPPER

Aus dem Institut für Plasmaphysik, Garching bei München
(Z. Naturforschg. 18 a, 895—900 [1963]; eingegangen am 7. Juni 1963)

In a Θ -pinch the radial symmetry of the electron density distribution as a function of time has been measured by a MACH-ZEHNDER interferometer. In a time interval of 400 nsec during a discharge an image converter made three pictures (exposure times of 10 nsec each). Up to 100 nsec after the first compression, the experimental results show different density distributions for the cases of trapped parallel and antiparallel magnetic fields. Complete radial symmetry of the electron density distribution was not found.

Another interferometric method for measuring the radial symmetry of the electron distribution by observing "zero order" fringes is described.

Bei den bisherigen interferometrischen Untersuchungen an Theta-Pinch-Entladungen^{1, 2}, die mit Hilfe von Schmieraufnahmen gemacht worden sind, wird das Bild eines Spaltes zusammen mit den Interferenzstreifen mit einem Drehspiegel über eine Filmebene bewegt. Die Interferenzstreifen stehen senkrecht zum Spalt. Diese Aufnahmen gestatten die zeitliche Verfolgung der Interferenzstreifenverschiebung nur in der Spaltebene. Bei der Auswertung wird die Rotationssymmetrie der Elektronendichteverteilung vorausgesetzt.

In der vorliegenden Arbeit ist die zeitliche Änderung der Rotationssymmetrie der Elektronendichteverteilung über den gesamten Querschnitt eines Theta-Pinches untersucht worden. Die Daten der Anlage enthält Tab. 1. Die Ergebnisse werden u. a. zeigen, inwieweit die Annahme der Rotationssymmetrie der Elektronendichte, die z. B. von HAIN u. a.^{3, 4} und DÜCHS⁵ in ihren numerischen Behandlungen der Theta-Pinch-Entladung zugrunde gelegt ist, einem Theta-Pinch mit endlicher Spulenlänge (16 cm) und der üblichen massiven, in Z-Richtung geschlitzten Spule entspricht.

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

¹ R. D. MEDFORD, A. L. T. POWEL, A. G. HUNT u. K. G. WRIGHT, Proc. 5. Int. Conf. on Ionisation Phenomena in Gases, München 1961. North-Holland Publ. Comp., Amsterdam 1961, S. 2000 ff.

² E. FÜNFER, K. HAIN, H. HEROLD, P. IGENBERGS u. F. P. KÜPPER, Z. Naturforschg. 17 a, 967 [1962].

³ K. HAIN, G. HAIN, K. V. ROBERTS, S. J. ROBERTS u. W. KÖPPENDÖRFER, Z. Naturforschg. 15 a, 1039 [1960].

⁴ K. HAIN u. A. C. KOLB, Conf. on Nuclear Fusion, CN 10/129, Salzburg 1961.

⁵ D. DÜCHS, Physics Letters, im Druck.

Energie	7.5	kJ
Ladespannung	18	kV
Kapazität	46.4	μF
Gesamtinduktivität	28	mH
Max. Magnetfeldstärke	53	kG
Periodendauer	7.2	μsec
Spulenlänge	16	cm
Spulennendurchmesser	5.8	cm
Gefäßlänge	78	cm
Gefäßdurchmesser	4.5	cm
(dJ/dt) max.	$6.3 \cdot 10^{11}$	A/sec
Anfangsdruck	10^{-1}	Torr
Füllgas		H ₂

Tab. 1. Daten der Theta-Pinch-Anlage.

Die Interferenzstreifenverschiebung z als Funktion der Elektronendichte N_e ist für die gleichen Versuchsbedingungen hergeleitet² worden und lautet

$$zC = \int_0^L N_e(l) dl \text{ cm}^{-2}.$$

Für $\lambda = 5500 \text{ \AA}$ und $L = 16 \text{ cm}$ ergibt sich $C = 41,3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. Gemessen wird demnach ein Integral über die Elektronendichte $N_e(l)$, die über die Länge des Meßweges nicht als konstant angenommen werden kann. Das Integral $\int_0^L N_e(l) dl$ wird Flächendichte genannt. Der Einfluß angeregter Teilchen auf die Streifenverschiebung z ist für die gleiche Anlage bereits untersucht worden^{2, 6}. Daraus folgt, daß die Beiträge dieser Teilchen zur Streifenverschiebung unter der Fehlergrenze liegen.

Experimentelle Anordnung

Abb. 1 zeigt die wichtigsten Teile der optischen Anordnung. Eine Quecksilberhochdrucklampe liefert das Licht, das den Meß- und Vergleichsstrahlengang durchsetzt und dann zur Interferenz gebracht wird. Die Interferenzstreifen werden auf die Photokathode des Bildwandlers abgebildet. Dieser bildet in zeitlichen Abständen von 200 nsec an verschiedenen Orten seines

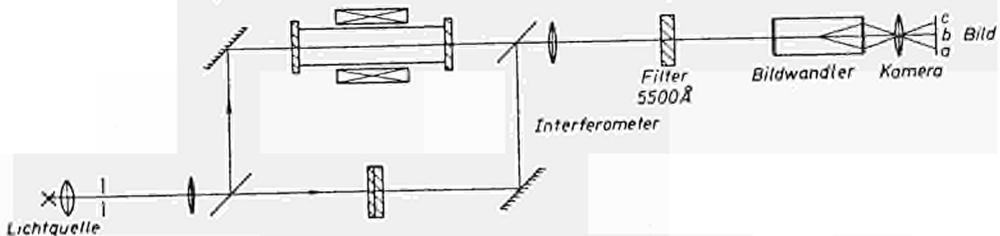


Abb. 1. Schema der optischen Anordnung.

Leuchtschirmes drei Interferenzstreifenverteilungen mit je 10 nsec Belichtungszeit ab. (Eine ausführliche Darstellung des Verfahrens siehe⁶.)

Versuchsergebnisse

Die zur Auswertung verwendeten Interferenzstreifenaufnahmen zeigen die Abb. 2 und 3. Die zugehörigen Auswertungen siehe Abb. 4 und 5. Jeweils links ist die Flächendichteverteilung im Entladungsrührquerschnitt eingetragen und rechts daneben zwei Schnitte in den angegebenen Richtungen α und β . – Der Nullpunkt für die Zeitangabe t ist die Zeit der ersten maximalen Kompression des Plasmas. Bei der Abb. 2 liegt der Zeitpunkt der ersten Aufnahme (2 a) vor der Entladung. Auf diese Weise erhält man ein System der unverschobenen Streifen, das bei der Auswertung als Nullpunkt verwendet werden kann. In Abb. 4 b sind in den Schnitten in α - und β -Richtung die maximalen Fehler eingezeichnet. Die Kreise geben die Ungenauigkeit in den Ortskoordinaten an. Die eingezeichneten Strecken bestimmen die Fehler der Flächendichtewerte.

Abb. 4 zeigt Auswertungen bei eingefangenen antiparallelen Magnetfeld. Man erkennt einen Plasmaschlauch, dessen Durchmesser in der α -Richtung größer ist als in der β -Richtung. Bei Abb. 4 b sind die Linien der höchsten Elektronendichte nicht ringförmig geschlossen. 240 nsec später, bei 4 c, sind nur noch geschlossene Linien gleicher Flächendichte zu beobachten. Die Aufnahmezeit von 4 c liegt 20 nsec vor der dritten maximalen Kompression. In der α - und β -Richtung ist die Kompression fast symmetrisch zur Achse des Entladungsgefäßes erfolgt.

Beim Vergleich der Elektronendichteverteilung im Rohrquerschnitt mit den ringförmigen Schnitten in α - und β -Richtung fällt auf, daß die Schnitte schein-

⁶ F. P. KÜPPER, Laborbericht IPP 1/10, Institut für Plasmaphysik, Garching bei München.

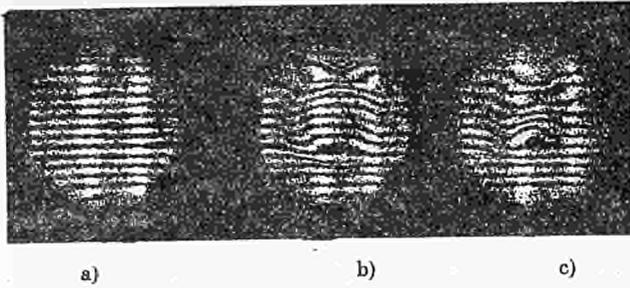


Abb. 2 a—c. Interferenzstreifenbilder einer Entladung mit eingefangenen antiparallelen Magnetfeldern.

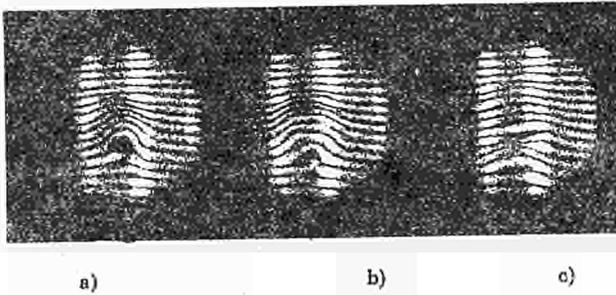


Abb. 3 a—c. Interferenzstreifenbilder einer Entladung mit eingefangenen parallelen Magnetfeldern.

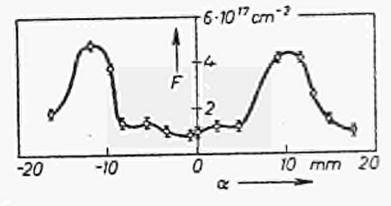
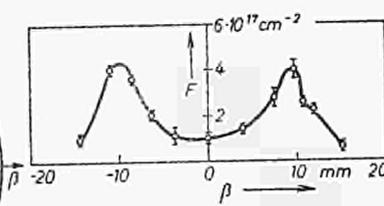
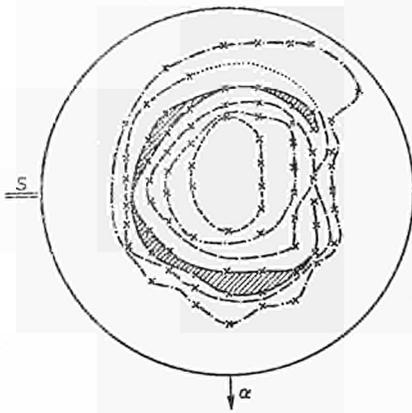


Abb. 4 b. Verlauf der Flächendichte $F = \int_0^l N_e(l) dl$; Auswertung der Aufnahme 2 b. B_z antiparallel; $t = +50 \text{ nsec}$; S = Spulenanschluß.

Kurve $F \geq$ 0,4 1,6 2,9 4,1 $\cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$

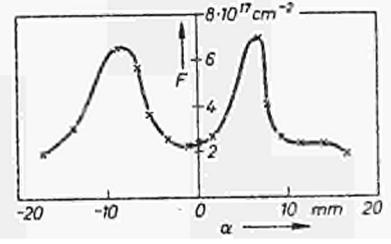
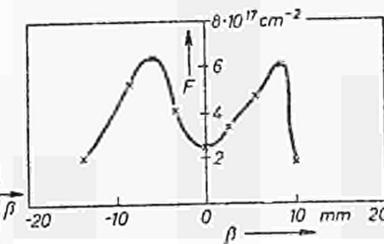
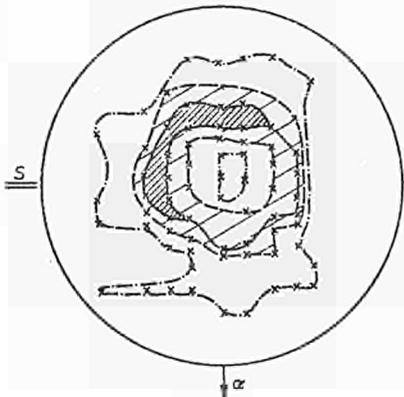


Abb. 4 c. Auswertung der Aufnahme 2 c, vgl. Abb. 4 b. $t = +290 \text{ nsec}$.

Kurve $F \geq$ 2,5 3,7 5,4 $\cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$

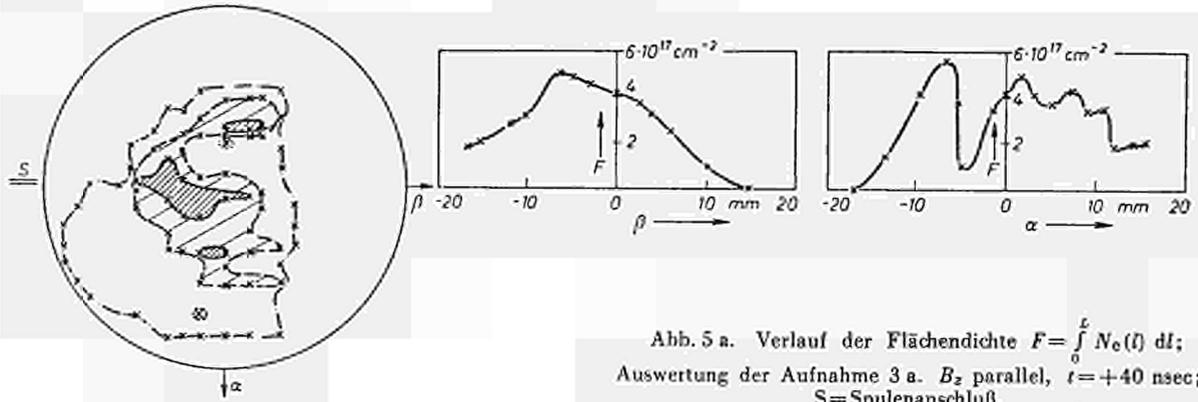


Abb. 5 a. Verlauf der Flächendichte $F = \int_0^L N_e(l) dl$; Auswertung der Aufnahme 3 a. B_z parallel, $t = +40$ nsec; S = Spulenanschluß.

Kurve	---	---	---	---	---
F	\cong 0,4	2,1	3,3	4,5	$\cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$

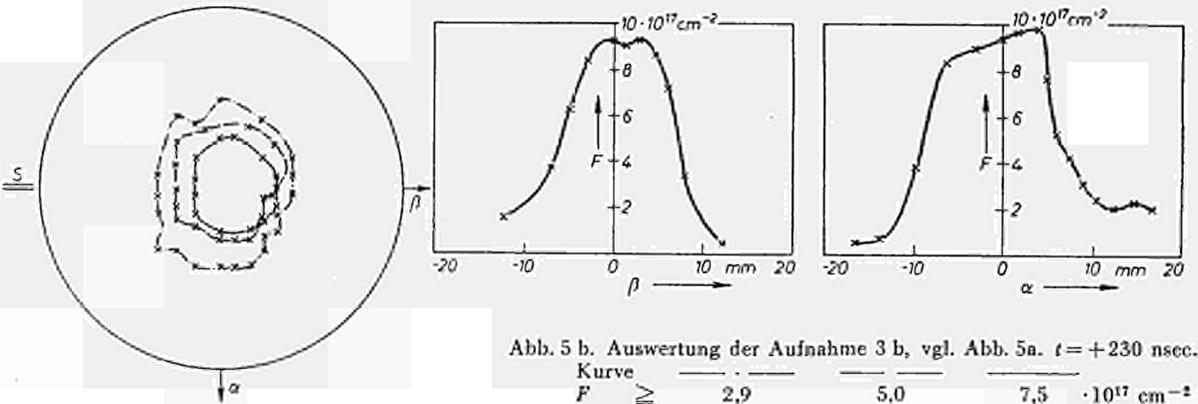


Abb. 5 b. Auswertung der Aufnahme 3 b, vgl. Abb. 5a. $t = +230$ nsec.

Kurve	---	---	---
F	\cong 2,9	5,0	7,5
			$\cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$

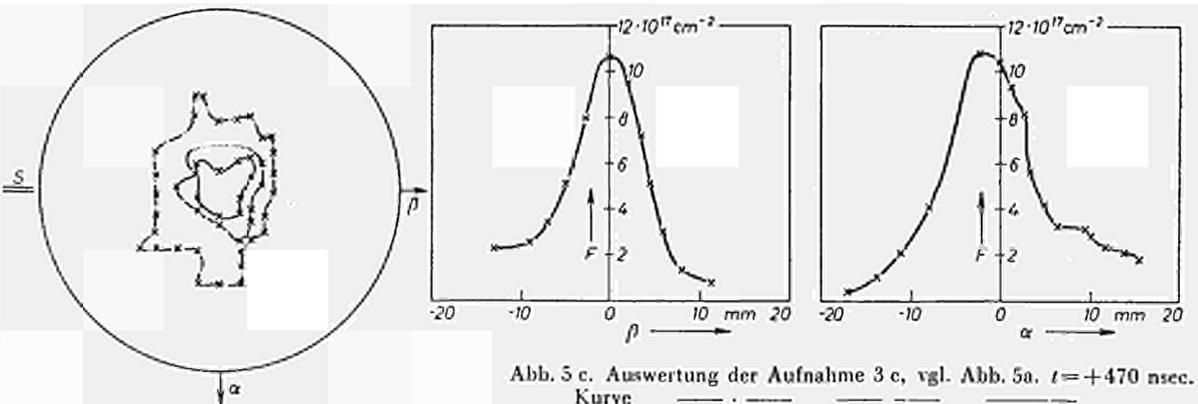


Abb. 5 c. Auswertung der Aufnahme 3 c, vgl. Abb. 5a. $t = +470$ nsec.

Kurve	---	---	---
F	\cong 2,9	5,4	7,9
			$\cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$

bar eine bessere Symmetrie zur Gefäßachse zeigen als die Dichteverteilung in der Querschnittfläche sie angibt. Diesen Eindruck verursachen die im Querschnitt eingetragenen Linien der niedrigsten Elektronendichte. Sie stellen aber Flächendichtewerte dar, die sich zu den maximalen Größen ungefähr wie 1 : 5 verhalten. Das heißt, diese Linien beschreiben nur das Verhalten eines kleinen Teils der Gesamtzahl der Elektronen.

Die Auswertungen der Aufnahmen mit parallel eingefangenen magnetischen Feldern zeigt Abb. 5. Die Auswertung 5 a weicht von allen übrigen ab. Zu diesem frühen Zeitpunkt der Entladung bestehen noch keine zusammenhängenden Gebiete der maximalen Elektronendichte. Die α - und β -Schnitte geben diese Verteilung nicht wieder. Zu diesen Zeitpunkten ist die Aussage von Schmieraufnahmen der Interferenzstreifenverschiebung fragwürdig. Im weiteren Verlauf der Entladung bildet sich aus den einzelnen Kanälen hoher Elektronendichte ein einziger Schlauch maximaler Dichte. Dies zeigen die Abb. 5 b und 5 c. Bei diesen beiden Auswertungen ist die Verteilung der Dichtegradienten in der α -Richtung ähnlich der Verteilung beim antiparallelen Feld.

Der Vergleich der Auswertungen 4 und 5 deutet in der Anfangsphase der Entladung auf eine bessere Rotationssymmetrie der Elektronendichteverteilung beim antiparallelen Feld. Das Symmetriezentrum liegt meist außerhalb der Mitte des Entladungs-

gefäßes. Aus Messungen der Elektronendichte in der α - und β -Ebene kann während der ersten 200 nsec nach der ersten maximalen Kompression nicht auf die quantitative Dichteverteilung im übrigen Gefäßquerschnitt geschlossen werden.

Aufnahmen „Nullter Ordnung“

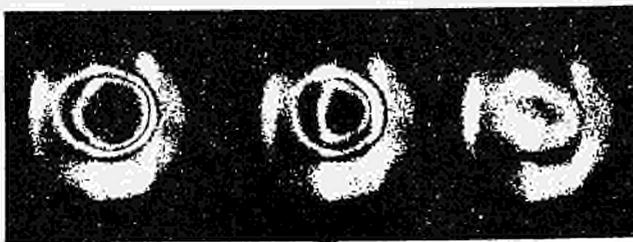
Die Bezeichnung „Nullter Ordnung“ weist auf die Einstellung des Interferometers bei diesen Aufnahmen hin. Alle Spiegel des Gerätes stehen zueinander parallel. Für die interferierenden Wellen tritt kein Phasenunterschied in Abhängigkeit vom Spiegeldurchmesser auf. Es interferieren nur zwei Phasenebenen konstanter Phasendifferenz $\Delta\varphi$. Sind die Lichtwege für den Vergleichsstrahl und den Meßstrahl (ohne Plasma) abgeglichen, ist $\Delta\varphi = 0$. Aufnahmen der Interferenzen bei dieser Einstellung des Interferometers werden als Aufnahmen „Nullter Ordnung“ bezeichnet. Die zu beobachtenden Interferenzstreifen sind Orte gleicher Elektronendichte. Die in dieser Arbeit vorgelegten Schwarz-Weiß-Aufnahmen (siehe Abb. 6 und 7) dienen nur zur Veranschaulichung der Methode und können zur Beurteilung der radialen Symmetrie der Elektronendichteverteilung verwendet werden. Der Spulenschlitz befindet sich bei diesen Aufnahmen auf der linken Seite jedes Bildes.

Abb. 6. Aufnahmen „Nullter Ordnung“ bei eingefangenen antiparallelen Magnetfeldern;

$$t_a = +40 \text{ nsec}, \quad t_b = +230 \text{ nsec}, \\ t_c = +470 \text{ nsec}.$$

Abb. 7. Aufnahmen „Nullter Ordnung“ bei eingefangenen parallelen Magnetfeldern;

$$t_a = -80 \text{ nsec}, \quad t_b = +110 \text{ nsec}, \\ t_c = +340 \text{ nsec}.$$



a)

b)

c)



a)

b)

c)

Die Aufnahmen der Abb. 6 zeigen die Elektronendichteverteilungen bei antiparallelen Magnetfeldern. Die kleineren Anstiege der Elektronendichte auf der Seite des Spulenanschlusses sind wie bei den Auswertungen in Abb. 4 gut zu erkennen. Die Abb. 7 stellt Dichteverteilungen bei parallelen Magnetfeldern zu Zeiten kurz vor und nach der ersten maximalen Kompression dar. Auch hierbei ist die Symmetrie der Elektronendichte im Vergleich zu Abb. 6 schlecht.

Bei der Beurteilung der Aufnahmen ist zu beachten, daß sie integrale Dichtewerte darstellen. Des-

wegen kann daraus nicht unbedingt auf eine gleiche Verteilung der Elektronendichte in der Spulenmitte geschlossen werden. Im Hinblick auf die Auswertungen in Abb. 4 und 5 b und die Aufnahme 6 erscheint die Voraussetzung der radialen Symmetrie der Elektronendichte als eine erfüllbare Bedingung.

Herrn Prof. Dr. A. SCHLÜTER und Herrn Prof. Dr. E. FÜNFER danke ich für die Anregung zu dieser Arbeit, sowie Herrn Dr. C. ANDELFINGER für seine vielfältige Unterstützung bei der Durchführung.

CDNA00511DEC