

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

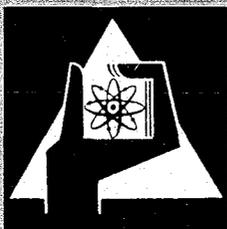
September 1968

KFK 769

Institut für Experimentelle Kernphysik

Die Entwicklung eines Systems von digitalisierten
Funkenkammern in Verbindung mit einem Prozessrechner

W. Schmidt-Parzefall



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE



Kernforschungszentrum Karlsruhe

September 1968

KFK 769

Institut für Experimentelle Kernphysik

Die Entwicklung eines Systems von digitalisierten
Funkenkammern in Verbindung mit einem Prozessrechner

W. Schmidt-Parzefall

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

Inhalt

	Seite
Einleitung	1
I. Die Digitalisierungsmethode	3
1. Vidikon	5
2. Akustisch	6
3. Ferritkernspeicher	8
4. Magnetostriktive Verzögerungsleitung	10
II. Der Aufbau der Funkenkammern	12
III. Der Hochspannungsimpulsgenerator	16
IV. Der Nachweis von zwei Koordinaten durch eine Funkenkammer	18
V. Die Ferritkern Matrix	21
VI. Die Auslese-Steuerung	28
VII. Der Rechner	31
VIII. Der Rechner-Anschluß	34
IX. Messungen	37
1. Nachweiswahrscheinlichkeit	38
2. Empfindliche Zeit	43
3. Funkenaufspaltung	46
4. Ortsauflösungsvermögen	48
X. Die Anwendung der Funkenkammern	51
XI. Zusammenfassung	58
Anhang	

EINLEITUNG

Auf dem Gebiet der Elementarteilchenphysik zählen Funkenkammern zu den wichtigsten Nachweisgeräten. Die Fähigkeit, selektiv nur nach dem Auftreten eines vorbestimmbaren Ereignisses ausgelöst werden zu können und auch ihr einfacher Aufbau sind Vorzüge, die die Funkenkammer vor der Blaskammer, dem anderen wichtigen Nachweisgerät für Teilchenspuren, auszeichnen.

Bisher wurden die Funken-Spuren fast ausschließlich photographisch registriert. Die Photographien werden auf Meßmaschinen zum Teil automatisch ausgemessen und die Funkenkoordinaten und Eichmarken auf Lochstreifen oder Magnetband übertragen. In dieser Form sind die Meßdaten dann zur Eingabe in einen digitalen Rechner geeignet und können dort endgültig ausgewertet werden. Das Ausmessen der Photographien ist langwierig und kann bei den meisten Experimenten erst viele Monate nach dem eigentlichen Datenerheben abgeschlossen werden.

Daraus folgte der Wunsch, die Funkenkoordinaten von der Funkenkammer direkt elektronisch in eine den digitalen Rechnern verständliche Form zu verwandeln. Ein schneller Prozeßrechner soll dann zur Datenerfassung dienen, die Rohdaten in komprimierter Form auf Magnetband schreiben und schon während des Experiments eine vorläufige Auswertung der Daten nach verschiedenen aktuellen Gesichtspunkten durchführen.

Mit diesem Konzept kann eine gegenüber dem photographischen Verfahren um 1 - 2 Größenordnungen erhöhte Datenrate erfaßt und verarbeitet werden. Dadurch werden neue experimentelle Möglichkeiten eröffnet, die es erlauben, Messungen mit erhöhter statistischer Genauigkeit auszuführen und seltenere oder von hohem Untergrund verdeckte Ereignisse zu beobachten.

In gewisser Hinsicht wird bei komplizierten Versuchen, bei denen der zu untersuchende Sachverhalt nur durch eine lange

Kette indirekter Indizienbeweise zugänglich ist, erst durch den Anschluß an einen Rechner ein wirkliches Experimentieren möglich, bei dem man die nächste Frage an die Apparatur - und letzten Endes an die Natur - von der Antwort auf die vorherige Frage abhängig machen kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein solches System von digitalisierten Funkenkammern und Prozeßrechnern entwickelt. Dabei entstand eine neuartige Form von Drahtfunkenkammern, mit der gegenüber konventionellen Funkenkammern erheblich verbesserte Nachweiseigenschaften erzielt werden konnten. Erstmals ist es außerdem gelungen, beide Funkenkoordinaten einer Funkenkammerebene - sowohl von der Erd- als auch von der Hochspannungselektrode - durch Ferrit-Speicherkerne zu digitalisieren und zu verarbeiten.

Ein erstes solches System konnte bei einem Elektronen-Streuxperiment am DESY erfolgreich eingesetzt werden. Ein zweites System für ein n-p-Streuxperiment bei CERN ist in Vorbereitung.

I. DIE DIGITALISIERUNGSMETHODE

Funkenkammern bestehen im Prinzip aus zwei parallelen Metallplatten, zwischen denen sich Edelgas befindet. Fliegt ein geladenes Teilchen durch das Gas, so hinterläßt es Ionen und freie Elektronen längs seiner Spur. Um diese nun sichtbar zu machen, legt man an eine der beiden Platten einen Hochspannungsimpuls, so daß die freien Elektronen in dem hohen elektrischen Feld beschleunigt werden, wieder ionisieren und so eine Lawine bilden, die schließlich zu einem Funkenschlag führt.

Die Ionen und freien Elektronen von Spuren, die nicht sichtbar gemacht werden sollen, werden durch ein schwaches, dauernd zwischen den Platten anliegendes elektrisches Feld abgesaugt.

Da der Funkendurchschlag am Ort des Teilchendurchgangs durch die Kammer erfolgt, ist eine Funkenkammer besonders dazu geeignet, die Bahn von geladenen Teilchen zu bestimmen.

Um die räumliche Koordination der Funken aus der Funkenkammer in digitale elektronische Form zu bringen, sind mehrere Verfahren vorgeschlagen und zum Teil auch angewandt worden.

Im März 1964 wurde auf der Konferenz "Informal Meeting on Filmless Spark Chambers and Associated Computer Use"¹⁾ ausführlich über die verschiedenen Möglichkeiten und ihre besonderen Vorzüge und Nachteile referiert, so daß hier auf die Erklärung der Details nicht eingegangen zu werden braucht.

Alle Digitalisierungsmethoden verwenden grundsätzlich dasselbe Verfahren. Indem wir es in seine einzelnen Schritte zerlegen, gewinnen wir die Gesichtspunkte, die für den Vergleich der einzelnen Methoden wichtig sind.

Alle Funken in den verschiedenen Funkenkammern entstehen fast gleichzeitig und brennen nur für eine Dauer von maximal $5 \cdot 10^{-8}$ Sekunden. Das bedeutet, daß die gesamte Information nur für eine sehr kurze Zeit verfügbar ist und während dieser Zeit von einem Speichermedium aufgenommen sein muß. Danach wird dieser Speicher sehr viel langsamer wieder abgefragt. Jedem unterschiedenen räumlichen Koordinatenpunkt in der Funkenkammer entspricht ein Speicherplatz. Beim Abfragen des Speichers wird jeder Speicherplatz mit einer Nummer versehen und geprüft, ob er gesetzt ist, ob also bei der zugehörigen Koordinate ein Funke aufgetreten ist. In diesem Falle wird dann die Nummer des Speicherplatzes in einen Rechner übertragen.

Alle wichtigen Merkmale einer Digitalisierungsmethode werden durch die Eigenschaften des gewählten Speichermediums bestimmt. Wie genau die Zuordnung von Speicherplatz und Funkenkoordinate ist und ob sie zeitlichen Schwankungen unterliegen kann, bestimmt das Ortsauflösungsvermögen des Systems. Wieviel Funkenenergie erforderlich ist, um einen Speicherplatz zu setzen, bestimmt die Arbeitsbedingungen der Funkenkammern selbst. Sehr kräftige Funken z.B. erzeugen weitere unerwünschte Satellitenfunken und bewirken eine längere Erholzeit der Kammer.

Die Höhe des Antwortsignals, das beim Abfragen des Speichers einen gesetzten von einem ungesetzten Speicherplatz unterscheidet, ist ein Maß für den Aufwand, der getrieben werden muß, um eine hinreichende Störsicherheit des Systems zu erhalten. Die Zeit, die zum Abfragen und Löschen des Speichers erforderlich ist, ist mitbestimmend für die Totzeit des Systems.

Im folgenden sollen die Eigenheiten der verschiedenen Methoden diskutiert werden.

1. Vidikon ²⁾

Die optische Kamera wird durch eine Fernsehkamera ersetzt. Als Zwischenspeicher dient hier eine dünne Schicht aus photoleitendem Material. Um das Bild zu digitalisieren, wird sie mit einem Elektronenstrahl abgetastet. Die erreichbare Auflösung wird durch die Ausdehnung des Elektronenstrahls und durch die Eigenschaften der Schicht bestimmt. Eine Unterscheidung von ca. 1000 Punkten längs einer Zeile dürfte zur Zeit die Grenze des Erreichbaren darstellen.

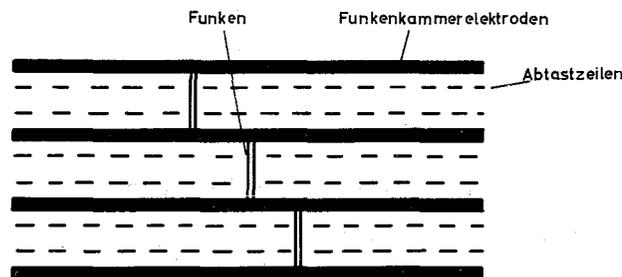


Abb. 1 Abtasten des Funkenkammerbildes durch eine Fernsehkamera

Das Antwortsignal, das beim Abtasten einer belichteten Stelle entsteht, ist sehr klein und leistungsschwach, ca. 1 mV. Das daraus resultierende geringe Signal-Rausch-Verhältnis kann dadurch verbessert werden, daß jede Funkenkammerebene mit mehreren Zeilen abgetastet wird.

Es ist unmöglich, den Elektronenstrahl mit Abweichungen des Nullpunkts und der Linearität von weniger als 1% vom Vollausschlag zu führen. Daher muß, dem Funkenkammerbild überlagert, jedenfalls von Zeit zu Zeit ein Eichraster aufgenommen werden, mit dessen Hilfe das Bild dann rechnerisch entzerrt wird.

Nach einmaligem Abtasten ist das Bild auf der lichtempfindlichen Schicht noch nicht vollständig gelöscht; es muß wenigstens noch ein zweites Mal mit defokussiertem Strahl abgetastet werden. Beim Digitalisieren benötigt man mindestens 20 ns pro Punkt, also 20 µs pro Zeile. Rechnet man z.B. 5 Zei-

len pro Funkenkammerebene, so kann ein Bild mit 100 Ebenen nach 10 ms abgefragt und nach weiteren 10 ms gelöscht sein.

Vidikonsysteme werden mit Vorteil bei Experimenten angewandt, bei denen sehr viele Funkenkammerebenen benötigt werden. (Reichweitemessung, Nachweis von neutralen Teilchen). Allerdings müssen dabei, wie beim photographischen System, die Funkenkammern in abgedunkelten Räumen stehen und die einzelnen perspektivischen Ansichten der Funkenkammern durch komplizierte Spiegelsysteme optisch zum Vidikon geführt werden.

2. Akustisch ³⁾

Um die Entfernung eines Gewitters festzustellen, zählen die Kinder, sobald sie den Blitz sehen, so lange, bis sie den Donner hören. Nichts anderes ist das akustische Verfahren. Ein solches System war auch das erste, mit dem wirklich physikalische Messungen durchgeführt werden konnten.

Beim akustischen System werden am Rand einer Funkenkammerebene Mikrophone angebracht. Die elektronische Verarbeitung

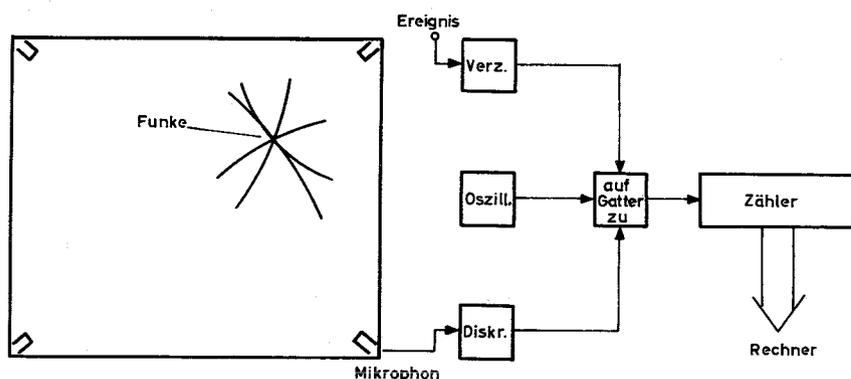


Abb. 2 Digitalisierung von akustischen Funkenkammern

ihrer Signale geschieht nach folgendem Prinzip: Die Impulse eines Oszillators laufen durch ein Gatter in einen Zähler, wo ihre Anzahl bestimmt wird. Normalerweise ist das Gatter geschlossen und der Zähler in Nullstellung. Um die durch den

Funken hervorgerufenen elektronischen Störungen abklingen zu lassen, wird erst nach einer konstanten Verzögerungszeit das Gatter geöffnet und durch das erste Signal vom Mikrophon wieder geschlossen. Der Zählerstand ist dann ein Maß für die Laufzeit des Schalls vom Funkenort bis zum Mikrophon. Diese gibt bei bekannter Schallgeschwindigkeit den Abstand zwischen Funken und Mikrophon an. Die anderen Mikrophone werden ebenfalls an Zähler angeschlossen. Der Funkenort ist dann der Schnittpunkt von Kreisen mit den gemessenen Abständen als Radien.

Direkt am Funkenort pflanzt sich die akustische Welle schneller als mit der gewöhnlichen Schallgeschwindigkeit fort. Die Größe dieser Nichtlinearität hängt von der jeweiligen Funkenintensität ab und muß gleichzeitig mitgemessen werden. Mit vier Mikrophenen pro Ebene kann ein Funke genau bestimmt werden. Für den Nachweis weiterer Funken benötigt man ebenfalls weitere Mikrophone und Zähler, um Vieldeutigkeiten zu vermeiden. Daher ist das akustische System nur dann günstig, wenn nur ein Funke in der Kammerebene nachgewiesen werden soll.

Die erreichbare Ortsauflösung beträgt 0,3 mm. Nach 3 ms ist der Schall 1m weit gelaufen. Für Kammern dieser Größe erfordert die Digitalisierung also etwa diese Zeit. Allerdings ist danach das Grollen des Donners noch lange nicht abeklungen; die Kammern sind erst nach etwa 50 ms wieder nachweisbereit.

Eine weitere Schwierigkeit, gegen die besondere Maßnahmen ergriffen werden müssen, ist das akustische Übersprechen benachbarter Kammerebenen aufeinander. Die eben besprochenen Verfahren verwenden als Funkenkammer-Elektroden parallele Metallplatten oder -folien. Bildet man eine Elektrode durch eine Schar paralleler Drähte aus, so kann man den Funkenort direkt digital messen, indem man die Nummern der befunkten Drähte feststellt. Zwei Methoden, die Drahtnummern zu registrieren, sind

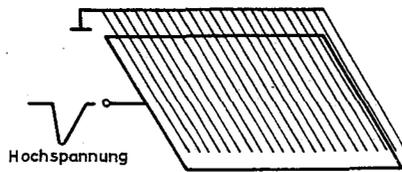


Abb. 3 Drahtfunkenkammer

bisher vorgeschlagen worden, die im folgenden dargestellt werden sollen.

3. Ferritkernspeicher ⁴⁾

Jeder Draht wird durch einen Ferritkern gefädelt, einem Ring aus magnetischem Material mit annähernd rechteckiger Hystereseschleife. Der Funkenstrom, der durch einen Kammerdraht zur Erde abfließt, magnetisiert den Ferritkern in einer bestimmten

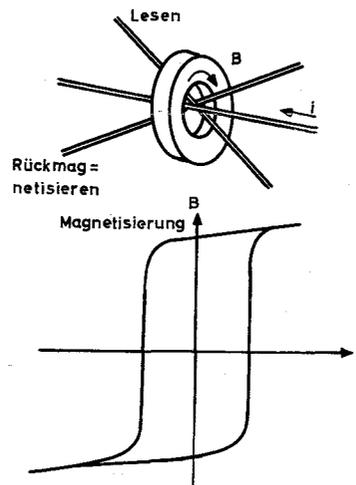


Abb. 4 Hystereseschleife eines Speicherkerns

Richtung. Zum Abfragen der Information wird durch eine zweite sogenannte Treibleitung ein Stromimpuls in entgegengesetzter Richtung geschickt. Wenn sich dabei die Magnetisierung des Kerns ändert, wenn dieser also vorher von einem Funken magnetisiert worden war, wird in einem dritten Draht, der sogenannten Leseleitung, ein Signal induziert. Die Nummer eines Kerns, der ein Antwort-Signal abgibt, stellt eine Funkenkoordinate dar.

Einzig bei diesem Verfahren liegt die Koordinaten-Information sofort in digitaler Form vor und wird durchweg digital verarbeitet. Die Meßgenauigkeit unterliegt keinen Nullpunkts- und Linearitätsschwankungen. Gruppen von 16 oder 32 Kernen werden gemeinsam abgefragt. Ein solcher Auslesezyklus dauert etwa 1 μ s. Damit beträgt die Auslesegeschwindigkeit 64 oder 32 μ s pro Meter Koordinatenlänge.

Da durch viele tausend Kerne je drei Drähte gefädelt werden müssen, lassen sich Ferritkernspeicher nur mit industriellen Fertigungsmethoden herstellen. Wenn ein Kernspeicher jedoch endgültig fertiggestellt ist und alle Fertigungsfehler berichtigt sind, ist er sehr betriebssicher. In großen digitalen Rechenanlagen werden bis zu 10^8 Ferritkerne als Speicherelemente verwendet.

Mit einem Ferritkernspeicher an einer Funkenkammer lassen sich beliebig viele Spuren gleichzeitig nachweisen. Ferritkerne sind jedoch empfindlich gegenüber äußeren Magnetfeldern. Ferritkernspeicher können daher nicht ohne umfangreiche Abschirmmaßnahmen in Magnetfeldern aufgestellt werden.

Das erreichbare Ortsauflösungsvermögen wird durch den Abstand der Drähte - gewöhnlich ca. 1 mm - bestimmt.

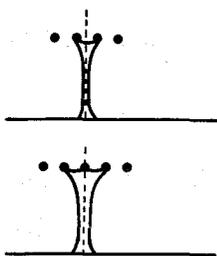


Abb. 5 Verzweigung eines Funkens auf mehrere Drähte

Je nach ihrer Intensität verzweigen sie sich aber auf mehrere Nachbardrähte. Da diese Verzweigung weitgehend symmetrisch ist, kann man bei optimalen Betriebsbedingungen der Kammer erreichen, daß ein Teilchen, das mitten zwischen zwei Drähten durch die Kammer geflogen ist, nahezu immer einen Funken erzeugt, der beide benachbarten Drähte berührt, während der Funke bei einem Teilchen, das durch einen Draht hindurchgeflogen ist, nur diesen einen oder gleich drei Drähte berührt. Durch Mittelwertbildung von aufeinanderfolgenden

Drahtnummern läßt sich bei 1 mm Drahtabstand eine Ortsauflösung von $\pm 0,3$ mm erzielen ⁵⁾.

Die Kosten für einen Ferritkernspeicher wachsen proportional zu der Kantenlänge der Funkenkammern. Daher ist ein solches System dann zu bevorzugen, wenn kleinere Kammern mit weniger als ca. 1 m Kantenlänge digitalisiert werden sollen, oder wenn es wichtig ist, viele gleichzeitige Spuren nachzuweisen.

4. Magnetostriktive Verzögerungsleitung ⁶⁾

Bei diesem Verfahren wird quer über die Funkenkammerdrähte ein Draht aus magnetostriktivem Material gelegt. Das Magnetfeld des Funkenstroms in einem Funkenkammerdraht bewirkt im magnetostriktiven Draht eine elastische Verformung. Diese Störung pflanzt sich mit Schallgeschwindigkeit darauf fort, wobei sie wiederum ein Magnetfeld mit sich führt. Dieses kann am Ende des magnetostriktiven Drahtes durch eine kleine Induktionsspule nachgewiesen werden. Die Laufzeit des magnetostriktiven Signals ist ein Maß für die räumliche Funkenkoordinate.

Der Digitalisierungsprozeß verläuft hier genau wie beim akustischen System, nur ist die Oszillatorfrequenz wegen der größeren Schallgeschwindigkeit im Draht höher. Für jeden nachzuweisenden Funken pro Funkenkammerebene muß ein eigener Zähler zur Verfügung stehen. Um Laufzeitschwankungen auszugleichen, müssen außerdem Eichmarken übertragen werden.

Die erreichbare Ortsauflösung ist vergleichbar mit der beim Ferritkernspeicher. Da die magnetostriktiven Signale aus der Empfängerspule sehr klein sind, ca. 1 mV, müssen besondere elektronische Maßnahmen ergriffen werden, um die Information störungsfrei zur Digitalisierungselektronik weiterzugeben.

Magnetostriktive Auslese ist in hohen Magnetfeldern nur bedingt möglich.

Die günstigsten Anwendungsmöglichkeiten für Funkenkammern mit magnetostruktivem Speicher sind große Funkenkammern (~ 1 m), in denen weniger Spuren gleichzeitig nachgewiesen werden sollen. Das magnetostruktive System zeichnet sich durch einen einfachen Aufbau unmittelbar an der Funkenkammer aus; die Zähler und die damit verbundene Verwaltungselektronik stellen jedoch einen erheblichen Kostenfaktor dar. Für jeden nachzuweisenden Funken und jede zu übertragende Eichmarke müssen für Elektronik mindestens ebenso große Mittel aufgewendet werden wie für einen Ferritkernspeicher mit 256 Kernen.

Neben den hier beschriebenen Methoden sind noch weitere Verfahren vorgeschlagen worden, die jedoch bisher keine breitere Anwendung finden konnten.

Entscheidend für die Wahl der hier verwendeten Methode war neben allgemeinen Gesichtspunkten das Experiment, das mit diesem System durchgeführt werden sollte.

Für das Elektronen-Streuxperiment am DESY wurde die Verwendung von acht Funkenkammerebenen mit Flächen zwischen $0,25 \cdot 0,5 \text{ m}^2$ und $0,75 \cdot 0,75 \text{ m}^2$ vorgesehen. Da am DESY als Elektronenbeschleuniger ein hoher Untergrund zu erwarten war, sollte das System viele Spuren gleichzeitig verarbeiten können. Außerdem sollte bei jedem Beschleunigungszyklus des Synchrotrons, also alle 20 ms ein Ereignis registriert werden können.

Diese Forderungen werden optimal erfüllt von Drahtfunkenkammern mit Ferritkernspeicher. Dieses System kann außerdem als einziges für sich in Anspruch nehmen, daß es durchweg digital ist und die Zuordnung einer Teilchenspur mit einer Koordinatennummer keinerlei Schwankungen unterliegt.

II. DER AUFBAU DER FUNKENKAMMERN

Ein minimal ionisierendes Teilchen hinterläßt im Gasraum einer Funkenkammerebene im Mittel nur etwa 10 - 20 freie Elektronen. Andererseits sind einzelne Elektronen - durch Licht oder thermische Emission aus den Elektroden ausgelöst - praktisch immer vorhanden. Das Ideal, aus einer Ansammlung von 10 Elektronen immer einen Funken zu erzeugen, aus einem einzelnen Elektron jedoch nie, kann wegen der statistischen Fluktuationen beim Vervielfachen durch eine Lawine nicht verwirklicht werden. Man muß daher stets einen Kompromiß zwischen hoher Nachweiswahrscheinlichkeit und geringer Anzahl von willkürlichen Funken schließen. Bei optischen Funkenkammern wird diese Schwierigkeit gewöhnlich durch Verwendung mehrerer hintereinanderstehender Funkenkammerebenen umgangen, wo sich die fehlenden Funken leicht ergänzen und zusätzliche aussondern lassen. Bei digitalisierten Funkenkammern kann dieses Verfahren der Überbestimmung wegen des damit verbundenen Aufwands nur in beschränktem Umfang angewandt werden. Bevor man mit der Digitalisierung beginnen konnte, mußten daher zunächst Drahtfunkenkammern mit optimalen Nachweiseigenschaften entwickelt werden.

Der Aufbau der Funkenkammern wird entscheidend durch die Beschaffenheit der Elektroden bestimmt.

Hier gibt es mehrere Möglichkeiten:

1. Glatte gespannte Drähte

Eine Schwierigkeit stellt die hierbei erforderliche hohe Drahtspannung dar: bis zu 1 kp pro Draht. Daher benötigt man sehr stabile, massive Rahmen.

2. Gewellte Drähte

Wellige Drähte besitzen eine größere Elastizität und erlauben Spannungen von nur etwa 40 p pro Draht. Bei größeren Wellen-Amplituden sind allerdings Unregelmäßigkeiten bei der Funkenbil-

dung zu befürchten.

3. Bedruckte Folien

Ähnlich wie bei der Technik der gedruckten Schaltungen werden aus einer Kupferfolie, die auf eine Kunststoffolie geklebt ist, Leiterbahnen herausgeätzt. Man braucht hier die Drähte nicht einzeln zu spannen, sondern erhält eine Elektrode mit vielen parallelen Leitern sofort aus einem Stück. Hierbei treten jedoch Schwierigkeiten mit der Maßhaltigkeit auf, da der Leiterabstand von der Folienspannung abhängt. Außerdem ist es unmöglich, Folien von 1 m^2 Fläche fehlerfrei herzustellen. Es bedarf umfangreicher Test- und Reparaturarbeiten, um alle Leiterunterbrechungen und -verbindungen zu beseitigen, bevor eine Folie weiterverarbeitet werden kann. Besonders interessant ist diese Methode für die Herstellung zylindrischer Kammern.

Wir haben uns für glatte gespannte Drähte entschieden, da nur hierbei exakt definierte elektrische Felder in der Kammer erzeugt werden.

Die Drähte aus Kupferbronze werden auf einer eigens dafür konstruierten Wickelmaschine über kräftige Rohre mit 1 mm Ganghöhen-Gewinde gewickelt. Sodann werden sie über die Fließgrenze hinaus gespannt. Dadurch erhalten alle Drähte eine nahezu gleichgroße Spannung. Die beiden Drahtebenen werden senkrecht zueinander angeordnet. Der äußerste Draht auf jeder Seite besitzt einen den anderen Drähten gegenüber verdoppelten Radius. Dadurch kann die Feldstärkenzunahme in Drahtnähe, die an den Rändern auftritt, ausreichend kompensiert werden, um Randfunken zu vermeiden.

Zur Befestigung der Drähte dient ein Rahmen aus Glas. In Form von Spiegelglas ist es - präziser als andere Werkstoffe - plan und mit konstanter Dicke lieferbar. Der Rahmen ist aus einzel-

nen rechteckigen Glasplatten mit Araldit zusammengeklebt. Abb. 6 zeigt das mechanische Grundgerüst. Ein Fensterrahmen-Profil aus Aluminium umgibt den Glasrahmen und dient zum Schutz und zur Halterung der Kammer.

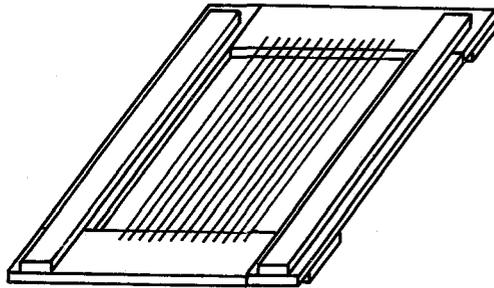


Abb. 6 Das mechanische Grundgerüst einer Funkenkammer

Zwei weitere Rahmen aus Plexiglas, die oben und unten auf den Glasrahmen geklebt werden, dienen zur Befestigung der Abdeckfolien. Da diese nicht hinreichend verklebbar sind, mußten sie zwischen einen Rahmen und eine weitere Rahmenschicht eingeklebt werden. Der Rahmen enthält weiterhin die Gaszuführungen, trägt Winkelstücke der Aufpreßvorrichtung zum Anschluß der Ferritkernmatrizen und enthält Gewindebohrungen, die zum Anflanschen von Heliumsäcken zwischen den Kammern vorgesehen sind.

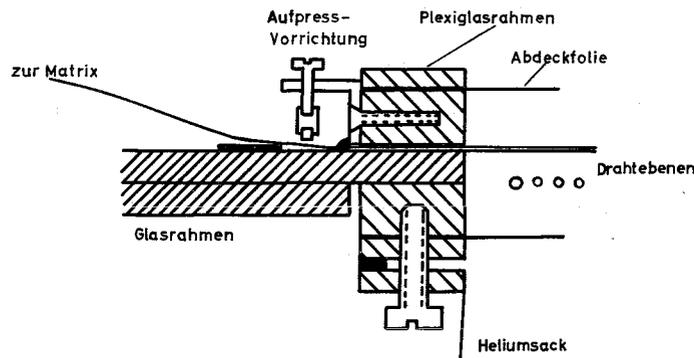


Abb. 7 Schnitt durch den Rahmen einer Funkenkammer

Die Abdeckfolie soll die Verunreinigung des Füllgases mit Bestandteilen der Luft verhindern und dabei möglichst dünn sein. Besondere Vorkehrungen müssen gegen das Eindringen von Wasserdampf aus der Luft getroffen werden. Am wirksamsten hierfür sind Folien aus Fluor-Kohlenstoff-Verbindungen, in denen Wasser nur in sehr geringem Maße gelöst wird. Als ausreichend hat sich auch Polyäthylen erwiesen. Zur Verwendung kam eine Verbundfolie aus 30 μ Polyäthylen und 12 μ Hostaphan⁺), wobei das außen befindliche Hostaphan zur Steigerung der mechanischen Festigkeit dient.

Nach dieser Methode hergestellte Funkenkammern haben sich schon in größeren Stückzahlen hervorragend bewährt, sowohl bezüglich der geringen mechanischen Toleranzen als auch der damit verbundenen guten und homogenen Nachweiseigenschaften.

⁺) Hostaphan PE, Fa. Kalle, Wiesbaden

III. DER HOCHSPANNUNGSIMPULSGENERATOR

Außer dem Aufbau der Funkenkammer selbst ist ein leistungsfähiger Hochspannungsimpulsgenerator von entscheidender Wichtigkeit für gute Nachweiseigenschaften der Funkenkammern. Zwei Forderungen muß der Hochspannungsimpuls genügen: Er muß möglichst bald nach dem auslösenden Ereignis angelegt werden, damit wenige Untergrund-Teilchen, die noch in der Zwischenzeit durch die Kammern fliegen können, nachgewiesen werden. Er muß weiterhin eine steile Anstiegsflanke besitzen, damit die Ionen und freien Elektronen nicht wie durch ein Reinigungsfeld ohne Vervielfachung aus der Kammer abgesaugt werden. Neben einer Spannungsverstärkung um einen Faktor 10^4 ist eine Leistungsverstärkung um einen Faktor 10^9 erforderlich. Der Ausgangsimpuls hat bei 6 kV in 5Ω kurzzeitig 7,2 MW aufzubringen, eine Leistung, die nur mit Funkenstrecken oder Thyratrons geschaltet werden kann. Funkenstrecken korrodieren und müssen nach ca. 10^6 Schaltvorgängen erneuert werden. Gewöhnliche Thyratrons haben eine zu große Verzögerungszeit.

Hier wurde ein neuartiges Thyratron⁺⁾ verwendet, das über der Kathode ein Hilfsgitter besitzt, wobei zwischen beiden eine dauernde Entladung brennt. Dadurch steht immer genügend leitendes Plasma zur Verfügung, um einen schnellen Einschaltvorgang zu ermöglichen. Das Thyratron wird über einen Kathodenfolger durch einen zehnstufigen Marx-Generator mit Lawinentransistoren angesteuert. Der Marx-Generator erreicht eine Leistungsverstärkung von 10^5 in 25 ns, der Kathodenfolger einen Faktor 10 in 2 ns und endlich das Thyratron einen Faktor 10^3 in 55 ns. Mithin beträgt die Gesamtverzögerung 82 ns. Durch einen Hochspannungsimpulsgenerator können mehrere Funkenkammern ausgelöst werden. Die Summe ihrer Eigenkapazitäten darf bis zu 12 nF betragen.

⁺⁾ CX 1154 English Electric

Bei diesem Generator konnten die sonst nur mit einer Funkenstrecke erreichbare kurze Verzögerungszeit und die einem Thyatron eigene lange Lebensdauer miteinander vereint werden.

IV. DER NACHWEIS VON ZWEI KOORDINATEN DURCH EINE FUNKENKAMMER

Bei Drahtfunkenkammern mit Ferritkernspeicher war es bisher nicht möglich, beide Funkenkoordinaten aus nur einer Funkenkammer mit gekreuzten Drahtebenen nachzuweisen. Auf der Hochspannungselektrode sind dem eigentlichen Funkenstrom durch den Hochspannungsimpuls Umladeströme überlagert, die abgetrennt werden müssen.

Der gleichzeitige Nachweis von beiden Koordinaten bietet jedoch eine Reihe von Vorteilen: Man benötigt nur die Hälfte an Funkenkammern; das bedeutet verringerten Aufwand zu ihrer Herstellung und weniger Materie, die durch Kleinwinkelstreuung die Bahn des nachzuweisenden Teilchens verfälscht. Die Wahrscheinlichkeit, für ein hindurchgegangenes Teilchen in einer Funkenkammer auch einen Funken zu erhalten, ist etwas kleiner als eins. Wenn man verlangen muß, daß die beiden Koordinaten unabhängig voneinander in zwei Kammern gleichzeitig nachgewiesen werden, ist hierfür die Nachweiswahrscheinlichkeit nur das Quadrat der Nachweiswahrscheinlichkeit für einen einzelnen Funken. Der gleichzeitige Nachweis beider Koordinaten liefert also eine erhöhte Nachweiswahrscheinlichkeit.

Wenn durch eine Funkenkammer mehrere Spuren gehen, entstehen Vieldeutigkeiten in der Zuordnung von einzelnen Koordinaten zu räumlichen Koordinaten-Paaren. Diese können bei gleichzeitiger Messung beider Koordinaten in manchen Fällen beseitigt werden.

Eine Reihe von Problemen stehen diesen Vorzügen gegenüber. Sie konnten mit dieser Arbeit erstmalig gelöst werden; Zwischenergebnisse sind in ⁸⁾ veröffentlicht worden.

Die Auslese von Ferritkernen auf der Hochspannungsseite hat zur Anwendung einer unkonventionellen Methode geführt, den Hochspannungsimpuls an die Kammer zu koppeln. Es ist nämlich

nicht möglich, den Hochspannungsimpuls durch die Ferritkerne hindurch an die Kammer zu legen, ohne die Kerne zu magnetisieren. Zwar fließt beim Aufladen auch ein Strom durch die Kerne auf der Erdseite, um das Feld innerhalb der Kammer aufzubauen, daß der Strom auf die Hochspannungsseite aber größer ist, läßt sich leicht verstehen. Die Hochspannungsseite baut zusätzlich auch außerhalb der Kammer ein Feld auf und strahlt dabei außerdem durch den schnellen Anstieg der Hochspannung noch nennenswert Energie ab. Also mußte eine neuartige Anordnung der Kerne gefunden werden, bei der sie von der Hochspannungszuführung getrennt angebracht sind.

Eine weitere Schwierigkeit liegt in der Tatsache, daß die kurzzeitig auf Hochspannung liegenden Funkenkammer-Drähte in den Kernen gegen die auf Erdpotential befindlichen Auslesedrähte isoliert werden müssen. Da die Kerne einen Innendurchmesser von nur 0,8 mm besitzen, durch den drei Drähte gebracht werden müssen, können diese nicht mit einer hinreichend dicken Teflon- oder Kunstharzschicht versehen werden, um eine ausreichende, beim Flechten unverletzliche Isolation zu gewährleisten.

Sehr gut bewährt hat es sich dagegen, die Kerne in ein Ölbad zu bringen. Diese Methode hat sich als ein sicherer Schutz gegen Durchschläge erwiesen.

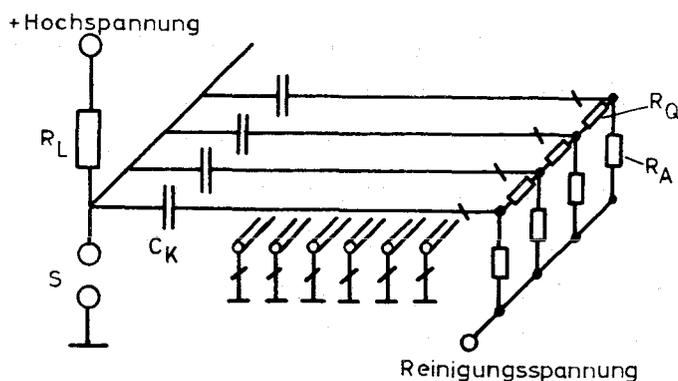


Abb. 8 Ankoppelung der Hochspannung und Anordnung der Ferritkerne zum Nachweis beider Funkenkoordinaten

Die Abb. 8 zeigt schematisch die Ankoppelung der Hochspannung und die Anordnung der Ferritkerne. Die Koppelkondensatoren C_k sind normalerweise über den Ladewiderstand R_l und die Abklingwiderstände R_A aufgeladen. Beim Schließen des Hochspannungsschalters S wird ein Hochspannungssprung auf die Drähte gekoppelt. Die Kerne sind an der anderen Seite angeordnet, so daß nicht der Ladestrom sondern nur der durch die Abklingwiderstände begrenzte Abklingstrom durch sie hindurchfließt, wodurch ihre Magnetisierung nicht geändert wird.

Wenn ein Funke auf einen Hochspannungsdraht schlägt, so entlädt sich zwar sein eigener Koppelkondensator, ohne daß die Ladung durch den zugehörigen Ferritkern fließt; über die Querwiderstände fließt jedoch Ladung von den benachbarten Drähten in umgekehrter Richtung zum Funken, und dieser Strom führt zu einer zuverlässigen Magnetisierung des Kerns und damit zu einer Speicherung der Koordinateninformation. Glücklicherweise lassen sich diese vielen zusätzlichen Bauelemente in kompakter Form realisieren ⁷⁾. Die Koppelkondensatoren wurden durch eine 100 μ dicke Hostaphanfolie als Dielektrikum und darüber eine 4 cm breite Aluminiumfolie hergestellt und auf die Drähte geklebt. Die Widerstände stellt eine Widerstandsschicht aus Hydrokollag⁺) dar, die über die Drähte gestrichen wird.

Diese Methode, den Hochspannungsimpuls anzukoppeln, besitzt weitere Vorzüge. Da der Funkenstrom durch die Querwiderstände fließen muß, wird er begrenzt. Dadurch steht auch für mehrere gleichzeitige Funken ausreichend Ladung zur Verfügung. Außerdem wirkt die Widerstandsschicht als eine Art "Wellensumpf", der unerwünschte elektromagnetische Hohlraumswingungen in der Funkenkammer bedämpft. Aus diesem Grunde wur-

⁺) Firma Riedel de Haen, Rethen, Hann.

de eine solche Widerstandsschicht auch an den geerdeten Funkenkammerdrähten angebracht.

Ein sicheres Zusammenarbeiten mehrerer Ferritkernspeicher auf Hochspannungs- und Erdseiten ist mit dem konventionellen Ausleseverfahren ⁸⁾ der Kerne nicht möglich. Bei diesem werden die Lesedrähte der Ferritkernmatrizen durch eine große Zahl von Kernen an mehreren Funkenkammern hindurchgeführt. Da auf den Hochspannungsseiten durch den Hochspannungsimpuls auf die Leseleitungen an jeder Funkenkammerseite unterschiedliche Spannungen gekoppelt werden, entstehen auf den Leseleitungen Ausgleichströme, die die Kerne zu setzen oder zu löschen vermögen und damit die Funkeninformation zerstören.

Die Ferritkerne wurden daher auf einzelnen Matrizen angeordnet, wobei die durch die Kerne gefädelten Auslesedrähte vollständig von denen auf anderen Matrizen entkoppelt sind. Dieses Verfahren führte außerdem zu einer völligen Überwindung der beträchtlichen Störsignal- und Erdprobleme, die dem konventionellen Ausleseverfahren anhaften.

Durch alle diese Maßnahmen an Funkenkammern und Ferritkernspeicher konnte ein sicherer Nachweis von beiden Funkenkoordinaten erreicht werden.

V. DIE FERRITKERN MATRIX

Der Ferritkernspeicher wurde modular aufgebaut. Eine Einheit ist eine Matrix mit 256 Kernen und stellt also für ebensoviele Drähte einen Speicher dar. Je nachdem ob die Matrix auf Erd- oder Hochspannungsseite verwendet werden soll, muß sie leicht modifiziert werden, da die Funkenstromrichtung in beiden Fällen entgegengesetzt ist. Darüberhinaus sind die Matrizen beliebig austauschbar.

Als Speicherkern wurde der Typ FXC 6D5 von Valvo gewählt. Er hat einen Innendurchmesser von 0,8 mm und einen Außendurchmesser von 1,2 mm. Kleinere Kerne sind schwierig zu flechten, und die Hochspannungsisolation der Drähte in ihrem Inneren ist nicht gewährleistet. Größere Kerne besitzen größere Schaltzeiten, sie verlangen eine größere Funkenladung, um gesetzt zu werden und erlauben nur eine geringere Auslesegeschwindigkeit. Unter den Kernen ihrer Größenklasse zeichnen sich die hier gewählten durch einen geringen Ladungsbedarf zur Ummagnetisierung aus.

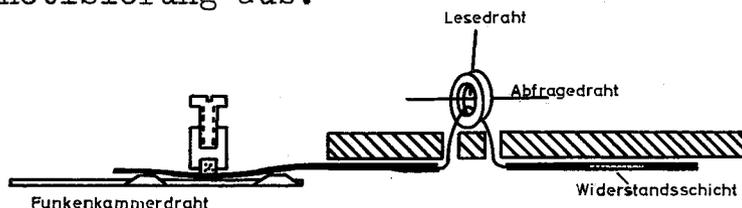


Abb. 9 Weg des Funkenstroms durch die Ferritkernspeicher Matrix

Die Abb. 9 zeigt schematisch den Weg, den der Funkenstrom von einem Funkenkammerdraht aus durch die Matrix nimmt. Ausgeätzte vergoldete Leiterstreifen auf einer Epoxydharz-Glasgewebefolie werden auf die Funkenkammerdrähte gepreßt. Der Ferritkern befindet sich auf einer kurzen Drahtschleife, die durch Löcher in der Grundplatte gesteckt und mit beiden Enden auf einen Leiterstreifen angelötet wird. Die Kerne und die Auslesedrähte sind auf der anderen Seite der Grundplatte angebracht, damit sie mit den Hochspannung führenden Drähten eine möglichst kleine Wechselwirkungszone bilden, wo eine schädliche Koppel-

kapazität entsteht.

Der weitere Aufbau der Matrix dient zum Auslesen der Information aus den Ferritkernen. Hierzu führt durch einen Ferritkern ein sogenannter Abfragedraht und ein Lesedraht. Zum Auslesen wird durch den Abfragedraht ein Stromstoß von etwa 0,7 A in der zum Funkenstrom entgegengesetzten Richtung geschickt. War der Kern durch einen Funken magnetisiert, so wird jetzt durch die Flußänderung im Kern in der Leseleitung eine Spannung, das sogenannte Lesesignal, induziert. Die Impulsformen

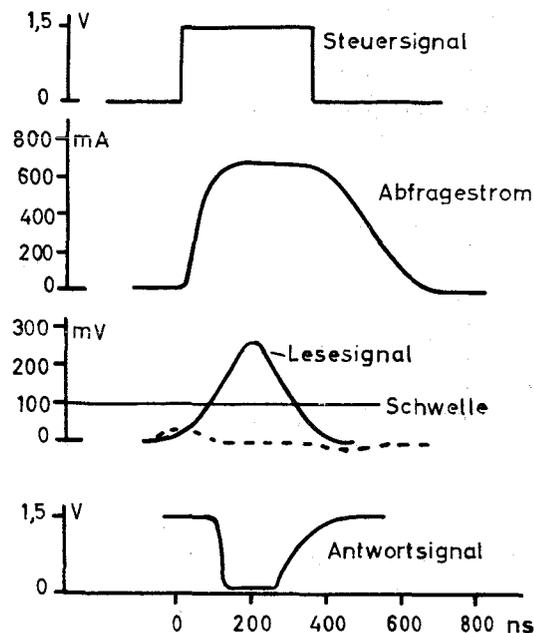


Abb. 10 Signalfolge beim Rückmagnetisieren der Speicherkerne

werden von Abb. 12 wiedergegeben. Gestrichelt eingetragen ist ein mögliches Störsignal, das von der direkten Lufttransformator-Kopplung des Abfragestroms auf den Lesedraht herrührt. Dieses läßt sich dadurch vermeiden bzw. kompensieren, daß Abfrage- und Lesedraht senkrecht zueinander oder bifilar geführt werden.

Die angegebene Lesesignalform gibt ein Kern ab, wenn er beim Abfragen von einem gesättigten in den entgegengesetzten ge-

sättigten Magnetisierungszustand übergeht.

Zum Nachweis eines Funkens muß das Lesesignal die vorgegebene Schwelle übersteigen. Diese konnte durch zweifache Kompensation der Störsignale und optimale Anpassung der Leseverstärker an die Ausgangsimpedanz der Kerne so niedrig gewählt werden, daß schon das Signal von Kernen, die vom Funken nur in den unmagnetischen Zustand gebracht worden sind, zum Nachweis ausreicht. In die Nähe des unmagnetisierten Zustands kommt

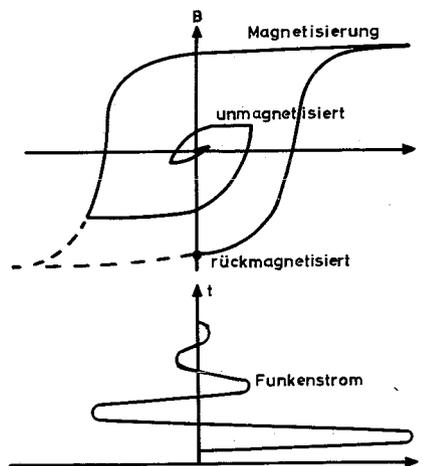


Abb. 1 Löschen der Magnetisierung bei abklingenden Stromschwingungen

ein Kern, wenn er abklingenden Stromschwingungen ausgesetzt war. Abb. 11 zeigt ein Beispiel für den Hystereseweg, den der Kern bei abklingenden Funkenstromschwingungen durchläuft. Da sowohl schwingende als auch schwächere Funken bei diesem System hinreichend hohe Lesesignale bewirken, ließ sich erreichen, daß die Funkennachweiswahrscheinlichkeit weder auf der Erd- noch auf der Hochspannungsseite durch die Digitalisierung herabgesetzt wird. Sie hängt allein von den Vorgängen im Gasraum der Funkenkammer ab.

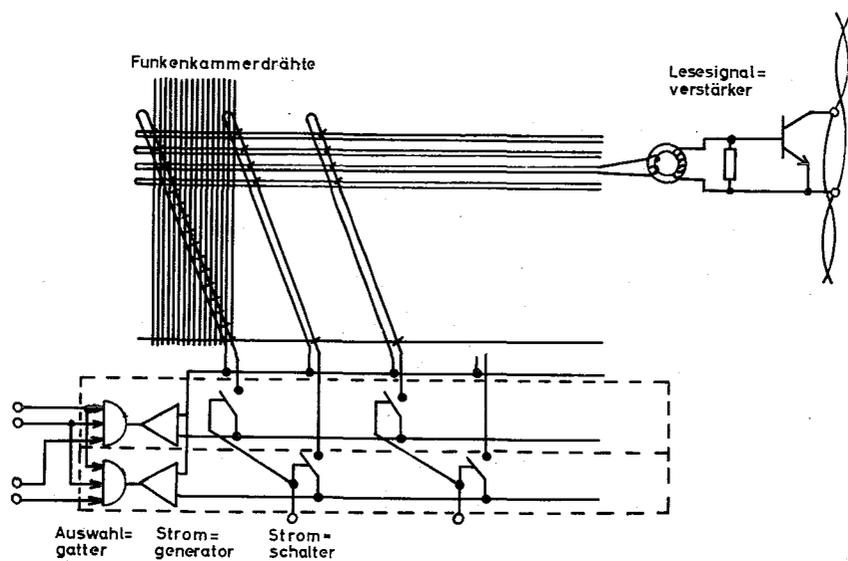


Abb. 12 Elektronischer Aufbau der Speicherkern Matrix

Die Abb. 12 zeigt die Anordnung der Kerne auf Funkenkammer-Abfrage- und Lesedrähten. Je eine Gruppe von 16 aufeinanderfolgenden Kernen befindet sich auf einem Abfragedraht. Eine Matrix besteht aus 16 solcher Gruppen. 16 Leseleitungen bilden die Zeilen der Matrix.

Das Auslesen der Matrizen wird von einer Auslese-Logik-Einheit gesteuert. Dabei wird ein Rückmagnetisierungsstromstoß der Reihe nach durch jede Abfrageleitung geschickt. Die dadurch von gesetzten Kernen auf der Leseleitung induzierten Lesesignale werden verstärkt, diskriminiert und als logische Normsignale auf dem sogenannten Datenkabel zur Auslese-Steuerung übertragen. Dort wird festgestellt, ob ein oder mehrere Lesesignale angekommen sind und gegebenenfalls die Nummer jedes dazugehörigen Kernes generiert und zur Übertragung in den Rechner bereitgestellt. Dann wird die nächste Gruppe ausgelesen.

Die Nummer eines Kernes wird durch eine Zahl mit drei hexadezimalen Stellen dargestellt: Die führende Stelle ist die

Nummer der Matrix, in der sich der Kern befindet. Die nächste Stelle ist die Nummer der Gruppe innerhalb der Matrix, und die letzte Stelle ist die Nummer der Zeile innerhalb der Gruppe, die den Kern trägt. Während die letzte Stelle einer Kernnummer erst nach dem Abfragen einer Gruppe ermittelt wird, müssen die Nummern der beiden führenden Stellen schon vor jedem neuen Abfragezyklus in der Steuer-Einheit gebildet und zur Matrix gesendet werden; denn diese beiden Stellen bestimmen die Treiberstufe der Abfrageleitung, die als nächste ausgewählt und aktiviert werden soll. Diese Nummern werden in verschlüsselter Form durch das sogenannte Adresskabel zu den Treiberstufen auf den Matrizen übertragen. Eine Treiberstufe ist auf einer Elektronik-Karte aufgebaut. Sie besteht aus einem Gatter, das zur Auswahl der Matrixnummer und einer geraden oder ungeraden Gruppennummer dient. Sind die Auswahlbedingungen erfüllt, so wird in dem nachgeschalteten Stromgenerator der Rückmagnetisierungsstromstoß erzeugt. Über einen ausgewählten leitenden Stromschalter - die übrigen sieben Stromschalter müssen gesperrt sein - wird der Stromstoß auf eine der Abfrageleitungen geschickt. Die Auswahl dieses einen Stromschalters erfolgt ebenfalls über das Adresskabel. Die beiden auf einer Matrix befindlichen Treiberstufen arbeiten abwechselnd.

Acht voneinander unabhängige Leseverstärker befinden sich auf einer Elektronik-Karte. Sie bestehen aus einem Transformator und einem Transistor. Der Transformator erhöht die Spannung des Lesesignals um einen Faktor 6,7. Der Ausgangswiderstand eines Kerns für das Lesesignal ist etwa 25Ω , d.h. der Kern kann etwa 10 mA liefern. Hinter dem Transformator stehen dann noch 1,3 mA zur Verfügung, genug, um einen Transistor bis zur Sättigung aufzusteuern. Dazu muß das Lesesignal jedoch eine Spannung von mindestens 0,7 V erreichen. Schon mit einem Transistor mit steiler Kennlinie läßt sich auf diese Weise eine gute Diskriminator- und Impulsformerwirkung erzielen.

Die Abb. 13 zeigt, wie die Leseverstärker der einzelnen Matrizen auf das gemeinsame Datenkabel geschaltet sind. Das Kabel besteht aus paarweisen verdrehten Leitern. Alle Leseleitungen

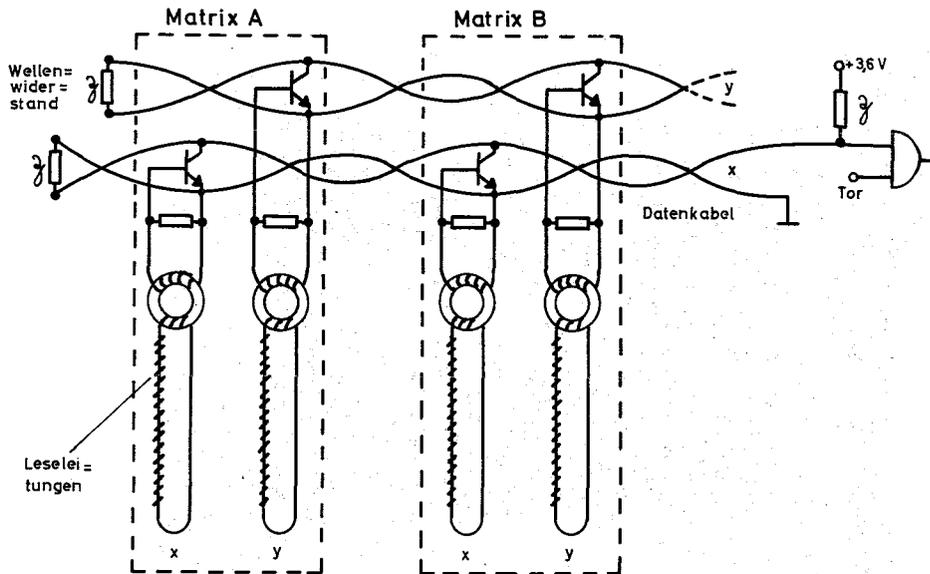


Abb. 13 Mehrere Matrizen auf ein Datenkabel zusammengeschaltet

auf verschiedenen Matrizen mit der gleichen Zeilennummer sind auf dieselbe Paarleitung im Datenkabel geführt. Normalerweise wird der aktive Leiter des Paares über die Abschlußwiderstände auf einer Spannung von 1,5 V gehalten. Beim Übertragen eines Lesesignales schaltet der Transistor des Leseverstärkers die Spannung nach 0,3 V. Diese Pegeländerung kann direkt von integrierten monolithischen Logikbausteinen aufgenommen und weiterverarbeitet werden, keine weiteren Verstärker oder Impulsformer sind erforderlich.

Die genauen elektronischen Schaltungen können dem Anhang entnommen werden.

Besondere Vorzüge des hier entwickelten Auslesesystems sind, daß die Matrizen direkt von den Signalpegeln monolithischer Logikbausteine angesteuert werden können und auch ebensolche Pegel abgeben.

Datentransfer von und zu den Matrizen kann über paarig verdrehte Litze erfolgen.

Jede beliebige Konfiguration von gesetzten Kernen kann nachgewiesen werden, auch wenn die Kerne nur teilweise ummagnetisiert waren.

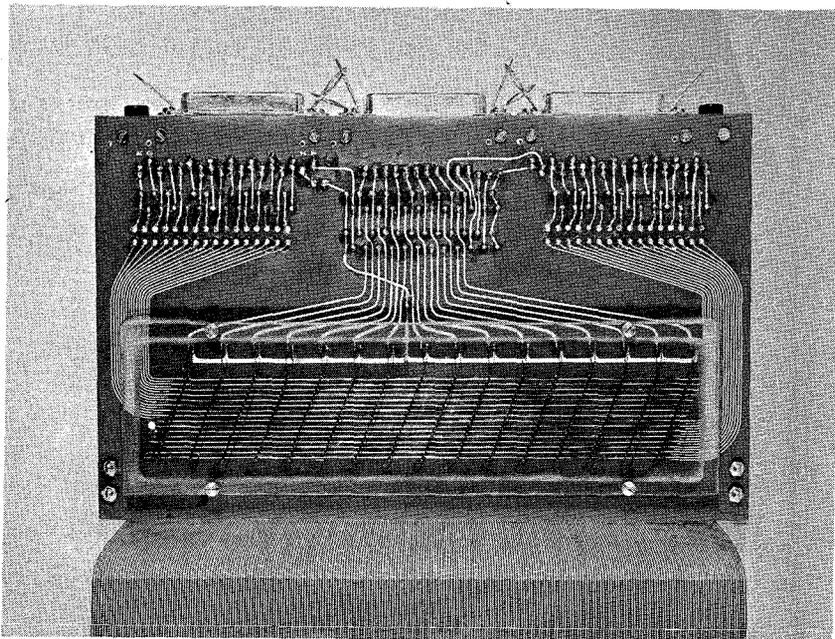
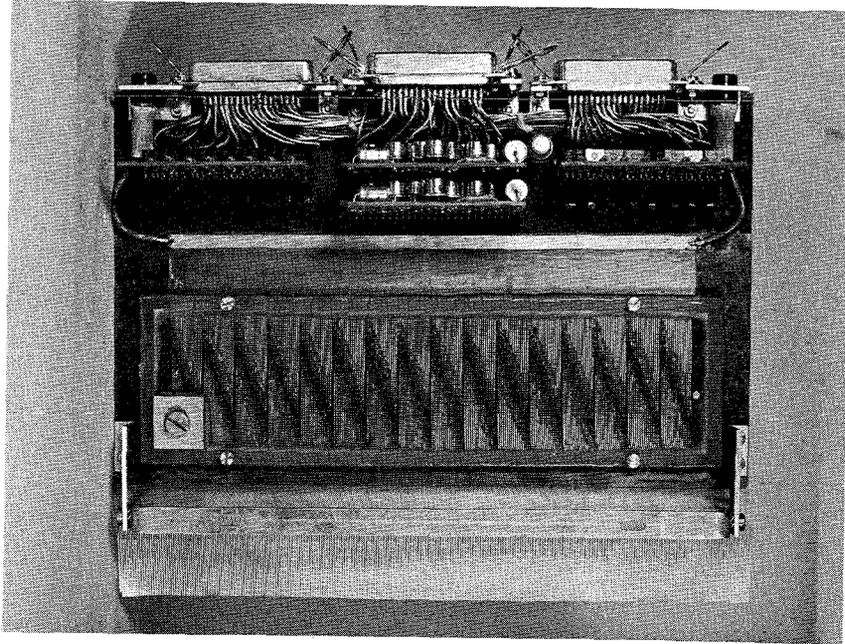


Abb. 14 Ferritkernspeicher Matrix ^{+)'}

^{+)'} gefertigt von Fa. Nothnagel, Karlsruhe

VI. DIE AUSLESE-STEUERUNG

Die grundsätzliche Funktion der Auslese-Steuerungseinheit ist bereits im vorigen Kapitel beschrieben worden; hier soll nun detaillierter auf ihre Wirkungsweise eingegangen werden.

Der Auslesevorgang beginnt mit einem Startimpuls, der gleichzeitig mit oder nach dem Hochspannungsimpuls in die Auslesesteuerung gegeben wird. Daraufhin werden durch eine monostabile Kippstufe für $10 \mu\text{s}$ alle Zähler und Register in Nullstellung gehalten, bis die Störungen, die durch den Hochspannungsimpuls entstehen, abgeklungen sind. Dann wird der Zählerstand von Gruppen- und Matrixzähler - am Anfang beide mit Null - über eine Verschlüsselungseinheit auf das Adresskabel zu den Matrizen gegeben. Damit wird die Gruppe Null auf der Matrix Null rückmagnetisiert. Die dabei auftretenden Lesesignale werden vom Datenkabel in ein Register übernommen. Jede Zeile führt auf eine Speicherstelle in diesem Register. Diese Stelle wird durch die Ankunft eines Lesesignals von der zugehörigen Zeile in die Stellung "1" gebracht, sonst verbleibt sie auf "0".

Nach dem Rückmagnetisieren fragt die Steuerlogik ein 16-fach-Gatter am Register ab, welches angibt, ob überhaupt eine der Stellen eine "1" trägt, oder ob das gesamte Register = 0 ist. Im letzteren Falle war kein gesetzter Kern in der abgefragten Gruppe. Der Gruppenzähler wird daher um eine Einheit weitergeschaltet und die nächste Gruppe über die Verschlüsselungseinheit adressiert und rückmagnetisiert. Danach wird wieder festgestellt, ob das Register = 0 ist. Wenn ja, wird wiederum die nächste Gruppe ausgelesen; wenn nein, so muß nunmehr die Stelle bestimmt werden, die ein "1" trägt, damit neben den Gruppen- und Matrix-Nummern, die in den entsprechenden Zählern schon vorhanden sind, auch die Zeilennummer zur Darstellung der vollständigen Kernnummer zur Verfügung steht.

Zu diesem Zweck ist das Register als sogenanntes Schieberegister ausgebildet. Durch einen Schiebeimpuls wird das gesamte "0"- und "1"-Muster im Register um eine Stelle in Richtung zur Stelle 0 hin verschoben. Der frühere Inhalt der Stelle 0 geht verloren, und in die Stelle 15 wird eine "0" eingefügt.

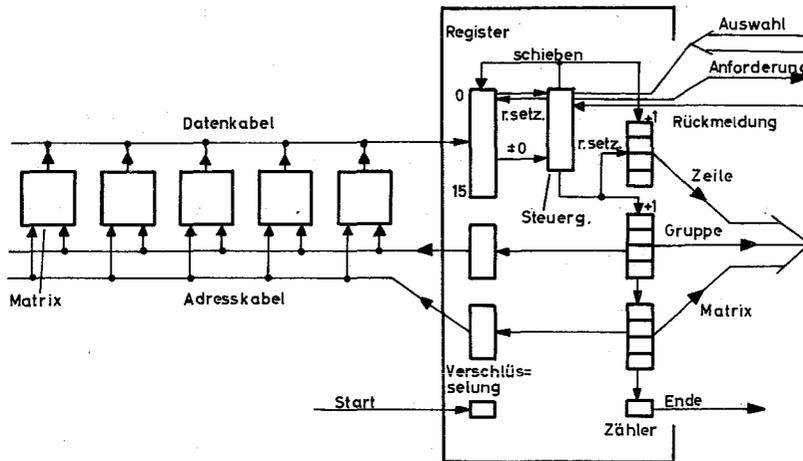


Abb. 15 Die Ferritkern Auslese-Steuerung

eingetragen. Um nun die Zeilennummer des Kerns oder damit gleichbedeutend die Stellennummer einer "1" im Register festzustellen, werden soviele Verschiebungen ausgeführt, bis eine "1" in der Stelle 0 erscheint. Die Anzahl der dazu erforderlichen Verschiebungen - auch null Verschiebungen sind möglich -, wird gleichzeitig im Zeilenzähler gezählt. Dieser enthält dann die Zeilennummer des Kerns; das heißt, immer, wenn die Stelle 0 des Registers eine "1" trägt, ist die vollständige Nummer eines gesetzten Kerns in den entsprechenden Zählern vorhanden und muß nun in den Rechner übertragen werden. Die Stelle 0 des Registers liefert daher gleichzeitig die Übertragungsanforderung an den Rechner. Solange die Stelle 0 des Registers eine "1" trägt, steht die Abfragesteuerung still und wartet auf ein Rückmeldungssignal vom Rechner, welches anzeigt, daß die Übertragung beendet ist. Durch das Rück-

meldungssignal wird die Stelle 0 des Registers dann in die "0"-Stellung zurückgesetzt.

Daraufhin kann der Auslese-Vorgang weiter ablaufen: Falls das Register insgesamt nun immer noch $\neq 0$ ist, werden weitere Verschiebungen ausgeführt und ihre Anzahl zum Stand des Zeilenzählers addiert, bis wieder eine "1" in der Stelle 0 des Registers erscheint und eine weitere Übertragung zum Rechner stattfindet. Ist das Register nach einem Übertragen und Rücksetzen der Stelle 0 schließlich insgesamt = 0, wird der Zeilenzähler gelöscht, der Gruppenzähler um 1 erhöht und die nächste Gruppe ausgelesen. Der Überlauf des Gruppenzählers nach 16 Gruppen erhöht den Matrixzähler um 1, und nach maximal 16 Matrizen setzt der Überlauf des Matrixzählers die Ende-Anzeige. Daraus wird eine Programmunterbrechung im Rechner hergeleitet und die Datenerfassung der Funkenkoordinaten beendet.

Die zum Auslesen der Kerne erforderliche Zeit setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen.

1. Anfangs-Wartezeit von 10 μs .
2. Die Zeit zum Rückmagnetisieren einer Gruppe; sie beträgt 1 μs , also insgesamt 256 μs .
3. Die Zeit zum Verschieben der Register; sie beträgt 0,25 μs pro Stelle.
4. Die Zeit zur Übertragung in den Rechner; sie beträgt im Mittel 2 μs pro Koordinate.

Somit können z.B. 50 statistisch verteilte Koordinaten innerhalb von 466 μs ausgelesen werden.

Die logische Schaltung der Auslese-Steuerung ist in allen Einzelheiten im Anhang angegeben.

VII. DER RECHNER

Der Prozeß-Rechner stellt einen wesentlichen Bestandteil des Funkenkammersystems dar. Er vollführt vier wichtige Grundfunktionen:

1. Erfassung der Daten
2. Auswertung
3. Anzeige von Ergebnissen
4. Archivierung der Daten.

Zu diesen Zwecken mußte eine Rechenanlage⁺⁾ beschafft werden, deren Grundzüge hier kurz charakterisiert werden sollen.

Die Zentraleinheit besitzt eine Wortlänge von 16 bit. Diese gestattet es, Zahlen im Bereich von $\pm 32\ 000$ darzustellen und ebensoviele Speicherplätze zu adressieren. Um schnellen Datentransfer zu ermöglichen, ist eine kurze Kernspeicherzykluszeit wichtig; sie beträgt $1,1\ \mu\text{s}$. Die arithmetischen Operationen können ebenfalls schnell ausgeführt werden: Addition und Subtraktion in $2,2\ \mu\text{s}$, Multiplikation in $7\ \mu\text{s}$ und Division in $9\ \mu\text{s}$. Ein Prozeßrechner zeichnet sich dadurch aus, daß er mit hoher Geschwindigkeit Daten von geringer Genauigkeit (kurze Wortlänge) übertragen und verarbeiten kann. Ein weiteres Merkmal ist die Unterbrechbarkeit durch äußere Bedingungen. Sechzehn unabhängige Programmanfänge, die durch elektronische Unterbrechungssignale automatisch begonnen werden können, sind im Rechner vorhanden. Ein Organisationsprogramm sorgt dafür, daß diese einzelnen Programme, nach Prioritäten geordnet, ineinander verschachtelt im Rechner ablaufen können. Alle Ein- und Ausgabe-Operationen, also auch die Datenerfassung, Anzeige und Archivierung, können in dieses Organisations-Programm eingefügt werden.

Die Abb. 16 zeigt schematisch die Konfiguration der Rechenanlage.

⁺⁾ Control Data 1700

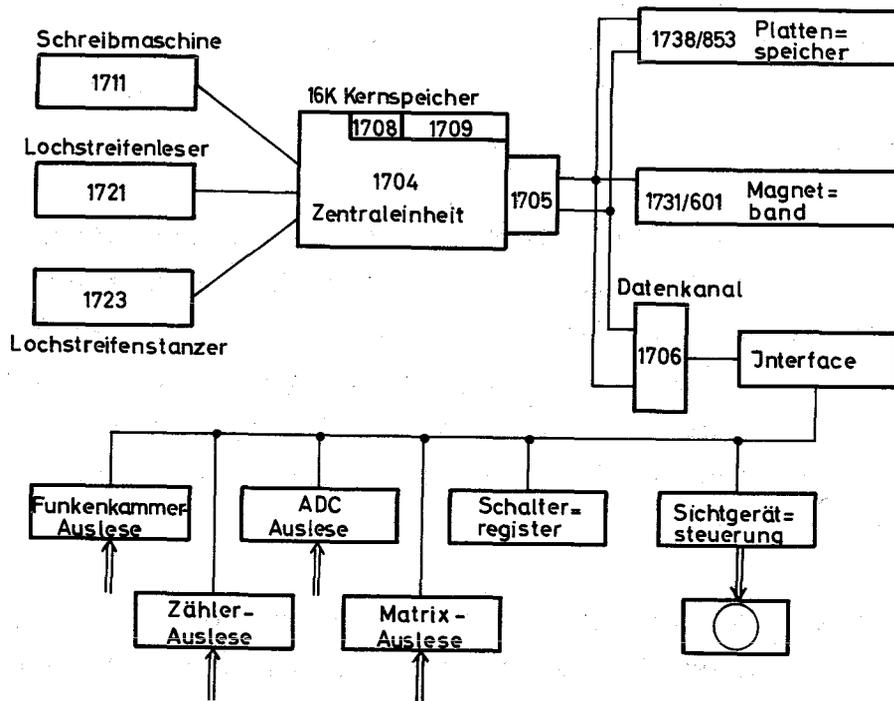


Abb. 16 Die Konfiguration von Rechenanlage und Meßgeräten

Die Datenerfassung wird durch ein Unterbrechungssignal eingeleitet, das nach dem Auftreten eines nachgewiesenen Ereignisses in den Rechner gesandt wird. Das Datenerfassungsprogramm adressiert nacheinander die einzelnen Daten tragenden Einheiten und überträgt über einen automatischen Datenkanal mit direktem Speicherzugriff die Meßdaten wie Funkenkoordinaten und Zählerstände. Da die Anzahl der Funken bei jedem Ereignis verschieden ist, zeigt die Funkenauslese durch ein weiteres Unterbrechungssignal das Ende des Auslesevorgangs an. Alle anderen Einheiten liefern bei jedem Ereignis eine konstante Anzahl von Zahlen. Die so aufgenommenen Rohdaten werden in einem Datenblock zusammengefaßt und auf den Plattenspeicher übertragen. 10^4 Ereignisse können darauf Platz finden. Da die Datenerfassung weitgehend automatisch erfolgt, kann zur gleichen Zeit - z.B. während der Suche der Ferritkernauslese-Steuerung nach einem gesetzten Kern - auch noch

ein anderes Programm ablaufen. In der Pause zwischen zwei Ereignissen wird der Datenkanal zur Ausgabe eines vom Auswerteprogramm vorgeschriebenen Anzeige-Blockes auf ein Oszillographen-Sichtgerät verwendet.

Mit niedrigster Priorität rechnet ein Auswerteprogramm; es hat Zugriff zu den Datenblöcken auf dem Plattenspeicher. Von der Programmbibliothek, die sich gleichfalls auf dem Plattenspeicher befindet, kann ein beliebiges, gerade aktuelles Auswerteprogramm in den Rechner geholt und ausgeführt werden. Danach kann es im Verlauf der Messung durch andere Auswerteprogramme abgelöst werden.

Zur Archivierung werden die Daten auf Magnetband aufgezeichnet. Die Magnetbänder lassen sich auch auf einer Groß-Rechanlage lesen und endgültig auswerten.

Die Programmierung der Anlage erfolgt über Lochstreifen. Eine Schreibmaschine dient zur Eingabe von Parametern und zur Ausgabe von Meldungen und Listen.

Durch diese Rechner-Konfiguration und Programm-Organisation⁺) ist ein flexibles Experimentieren mit den Daten möglich, da diese schon während der Messung mehreren Auswerte-Programmen bei veränderbaren Parametern zur Verfügung stehen.

⁺) Die Organisations- und Datenerfassungs-Programme wurden von J. Moritz geschrieben.

VIII. DER RECHNER-ANSCHLUSS

An den Rechner angeschlossen sind außer der Ferritkernauslese-Steuerung noch weitere Meßeinrichtungen, wie Zähler und Analog-Digital-Wandler. Zur schnellen Ausgabe von Auswertungsergebnissen dient weiterhin ein Oszillograph als Sichtgerät; über ein Schaltregister gesteuert, können hierfür verschiedene Anzeigeprogramme ausgewählt werden.

Alle diese Geräte wurden über ein hierfür entwickeltes Anschlußgerät (Interface) mit dem Rechner verbunden. Der Datentransfer zwischen den einzelnen Geräten und dem Interface geschieht auf Sammelleitungen, die durch die einzelnen Einheiten "hindurchgeschleift" werden. Jede Einheit kann von den Datenleitungen lesen, aber nur jeweils eine Einheit darf darauf schreiben. Auf einem zweiten sogenannten Adreßkabel wird daher in verschlüsselter Form die Nummer der Einheit ausgegeben, die mit dem Rechner Datentransfer ausführen soll. Auf dem Adreßkabel werden auch die zur Übertragung notwendigen Steuersignale geführt.

Das Interface übernimmt einige komplizierte Funktionen, die der Rechner bei der Datenübertragung von einem peripheren Gerät verlangt und erlaubt der Meß-Einheit ein möglichst einfaches logisches Verhalten.

Jeder Datentransfer muß durch eine programmierte Instruktion vom Rechner eingeleitet werden. Daraufhin meldet der Rechner dem ausgewählten peripheren Gerät "ich lese" oder "ich schreibe", und er verlangt innerhalb von 4 μ s eine Antwort, entweder "verstanden" oder "verworfen". Durch ein "verstanden" wird angegeben, daß der Datentransfer durchgeführt worden ist, durch ein "verworfen", daß er nicht zustandekam, weil noch keine neuen Daten für den Rechner bereitstehen, oder weil das Gerät noch nicht zur Aufnahme neuer Daten bereit ist. Falls jedoch innerhalb der vorgegebenen Zeit überhaupt keine Antwort vom peripheren Gerät erhalten wurde, muß der Rechner annehmen, daß eine Störung vorliegt und eine Fehlerdiagnose beginnen.

Dieses Frage- und Antwortspiel wird von dem Interface erledigt. Es ist insofern etwas anspruchsvoll, als zwar die Bedingung, ob ein Gerät zum Datentransfer bereit ist oder nicht, sich zu einem beliebigen Zeitpunkt ändern kann, die Entscheidung aber, ob mit "verstanden" oder "verworfen" geantwortet werden soll, nur zwischen zwei Antworten, nicht aber währenddessen, geändert werden darf.

Der Datentransfer zwischen einer Meßeinheit und dem Interface vollzieht sich folgendermaßen: Die Nummer der vom Rechner ausgewählten Meßeinheit wird im Interface gespeichert und zur Meßeinheit weitergegeben. Bei einer Ausgabe des Rechners speichert das Interface in einem Register das ausgegebene Datenwort und gibt auf einer Steuerleitung die "Ausgabe"-Anforderung. Diese bleibt solange bestehen, bis die Meßeinheit nach Übernahme der Daten ein "Rückmeldung"-Signal gegeben hat. Dieses beendet eine Ausgabe.

Zu einer Eingabeoperation wird nur die Nummer der ausgewählten Meßeinheit vom Interface ausgegeben. Daraufhin wartet das Interface, bis es von der Meßeinheit auf einer weiteren Steuerleitung eine "Eingabe"-Anforderung erhält, die die Meßeinheit zusammen mit den Daten auf die Leitungen schreibt. Bei der ersten Anfrage des Rechners, zu deren Beginn die "Eingabe"-Anforderung vorliegt, werden die Daten zum Rechner durchgeschaltet und von diesem mit "verstanden" beantwortet. Nun sendet das Interface zur Meßeinheit das Signal "Rückmeldung" und wartet, bis diese das Signal "Ausgabe" abschaltet. Dadurch wird eine Eingabe beendet.

Das Interface gibt somit einer Meßeinheit einen beliebig langen Zeitraum, um auf eine Übertragungsanforderung zu reagieren. Durch einen besonderen Funktionsbefehl des Rechners kann der damit verbundene Wartezustand des Interface jedoch durch das Programm beendet werden. Außer dem eigentlichen Datentransfer vermittelt das Interface noch die Programm-Unterbrechungssignale, die zur Datenerfassung erforderlich sind. Durch ein Unterbrechungssignal wird das gerade laufende Pro-

programm unterbrochen, und von einer vorgegebenen, zu dem Signaleingang gehörigen Zelle aus wird ein neues Programm angefangen. In dem Rechner sind 16 solcher Signaleingänge und Programmanfänge vorhanden, 4 davon können über das Interface angesprochen werden. Dieses besitzt hierzu ein Register mit vier Stellen. Sie können durch Impulse von den Meßeinheiten einzeln gesetzt und durch Funktionsbefehle vom Rechner auch einzeln wieder gelöscht werden.

Die genauen Schaltungen des Rechner-Anschluß-Gerätes sind im Anhang angegeben.

IX MESSUNGEN

Um die optimalen Betriebsbedingungen für die Funkenkammern herauszufinden, wurden einige Meßreihen durchgeführt⁺⁾ . Sie dienen zur Untersuchung des Einflusses, den die Zusammensetzung des Füllgases, die Impulsform des Hochspannungsimpulses⁺⁺⁾ und das Reinigungsfeld auf die Nachweiseigenschaften der Kammern ausübt. Diese Messungen wurden mit einer Funkenkammer in folgendem Versuchsaufbau ausgeführt: Eine Sr 90-Quelle

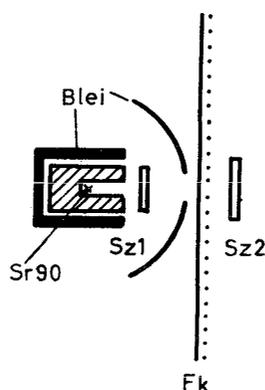


Abb. 17 Anordnung zur Messung der Funkenkammer-Eigenschaften

befindet sich in einem Gehäuse aus PVC, das mit Blei umgeben ist. Aus der Quelle fliegen Elektronen durch einen Szintillator von 1 mm Dicke, durchqueren die Funkenkammer und gelangen in einen dicken Szintillator. Durch eine Bleiblende wird verhindert, daß im ersten Szintillator zu stark gestreute Elektronen in die Funkenkammer fliegen. Eine Koinzidenz zwischen beiden Szintillatoren löst den Hochspannungsimpulsgenerator an der Funkenkammer aus.

⁺⁾ Die Rechenprogramme für diese Messungen sind von K.H. Schmidt geschrieben worden.

⁺⁺⁾ Die Messungen wurden mit einem von H. Klein entwickelten Hochspannungsimpulsgenerator durchgeführt.

Der Hochspannungsimpuls besitzt Exponential-Form, die Abklingzeit RC ist durch die Funkenkammerkapazität und einen Abklingwiderstand gegeben. Abb. 18 zeigt eine typische Impulsform.

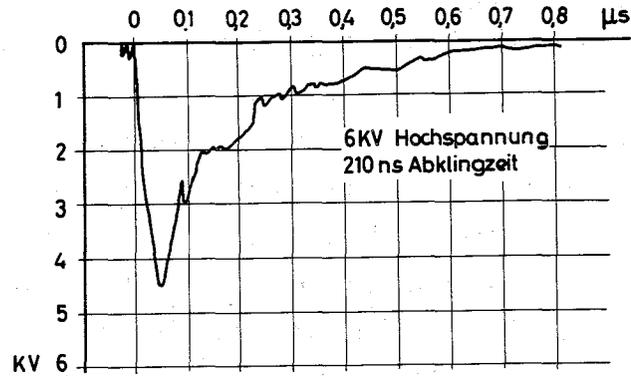


Abb. 18 Impulsform des Hochspannungsimpulses an der Funkenkammer gemessen

Der Impuls besitzt zwei Parameter: Impulshöhe und Abklingzeit. Da mehrere Kammern von demselben Hochspannungsschalter ausgelöst werden, kann die Impulshöhe nicht für jede Kammer einzeln optimiert werden; die Hochspannung wurde für alle Kammern auf 6 kV festgelegt. Diese Spannung kann wegen der begrenzten Durchschlagsfestigkeit des Folien-Koppelkondensators nicht überschritten werden. Eingestellt werden kann für jede Kammer die Abklingzeit des Hochspannungsimpulses durch Verändern des individuellen Abklingwiderstands. Bei den meisten Meßreihen wurden daher die Kammereigenschaften in Abhängigkeit von der Abklingzeit aufgenommen.

1. Nachweiswahrscheinlichkeit

Um eine hohe Nachweiswahrscheinlichkeit zu erreichen, ist es notwendig, daß die freien Elektronen auf einem kurzen Wegstück im Gasraum hoch vervielfacht werden, bevor sie an der Anode verloren gehen. Das wird durch eine hohe Spannung an der Kammer oder durch einen großen Townsend-Vervielfachungskoeffizienten des Füllgases erreicht. Da die Hochspannung

begrenzt ist, soll das Füllgas einen möglichst hohen Townsend-Vervielfachungs-Koeffizienten besitzen. Diese Bedingung ist für Edelgase durch Neon mit Argon-Zusatz am besten erfüllt ⁹⁾. Ein Zusatz von organischem Dampf bewirkt ebenfalls eine Erhöhung des Townsend-Vervielfachungs-Koeffizienten.

Bei steigender Konzentration von Gaszusätzen durchläuft der Vervielfachungskoeffizient ein Maximum und nimmt danach wieder ab. Die Lage des Maximums ist jedoch von der Vervielfachungsfeldstärke abhängig und mußte daher für die spezielle Form des hier angewendeten Hochspannungsimpulses durch eine Meßreihe bestimmt werden. Als Grund-Füllgas konnte aus preislichen Gründen kein reines Neon verwendet werden; es enthält eine Beimengung von 10% Helium⁺).

Die Abb. 19 - 24 zeigen die gemessene Nachweiswahrscheinlichkeit und die Wahrscheinlichkeit für willkürliche Funken bei verschiedenen Zusätzen über der Abklingzeit des Hochspannungsimpulses. Ein Zusatz von 5% Argon bewirkt eine effektive Herabsetzung der Betriebsspannung von 6 kV auf 5 kV, wie aus Abb. 20 ersichtlich ist.

Von den hier untersuchten Gasmischungen liefert nur eine einzige bei einer Nachweiswahrscheinlichkeit von mehr als 98,5% weniger als 0,5% willkürliche Funken. Diese Mischung - Ne 90 + 5% Ar - wurde daher für die weiteren Messungen verwendet. Es sind damit Nachweiswahrscheinlichkeiten von mehr als 99% erreichbar.

⁺) Qualität HE 10 Edelgas GmbH.

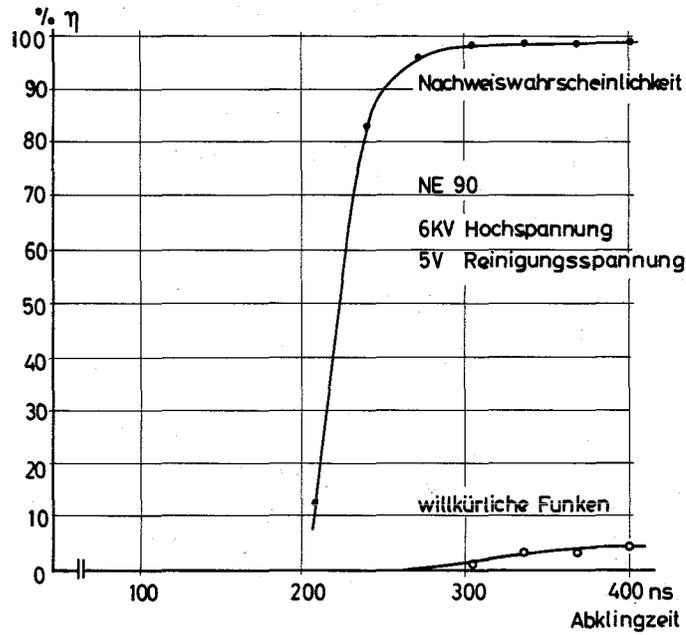


Abb. 19

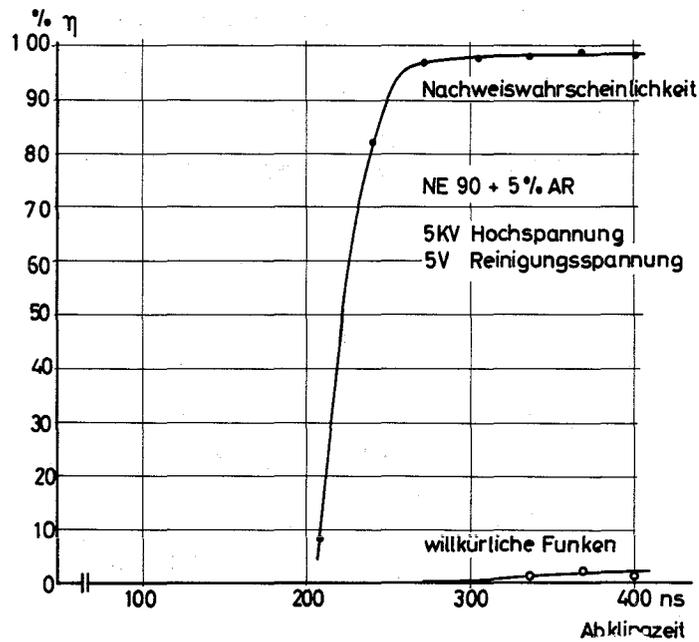


Abb. 20 Ein Zusatz von 5% Ar bewirkt eine Erniedrigung der erforderlichen Hochspannung um 17%

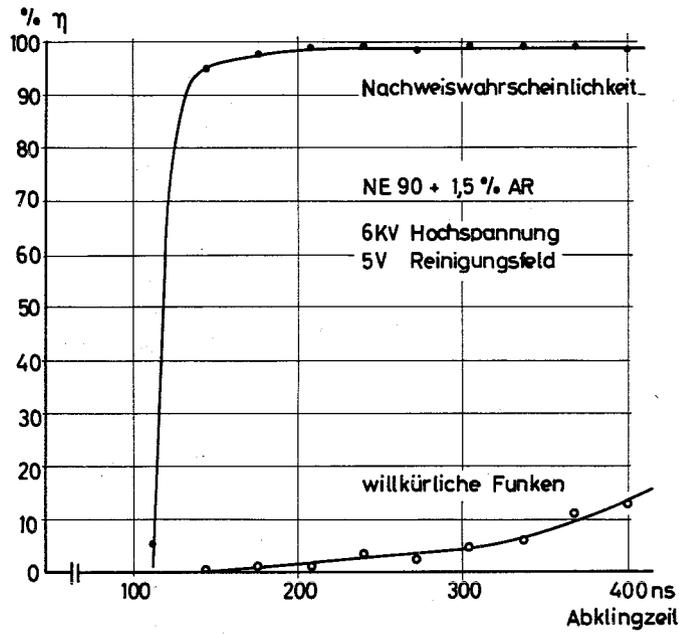


Abb. 21

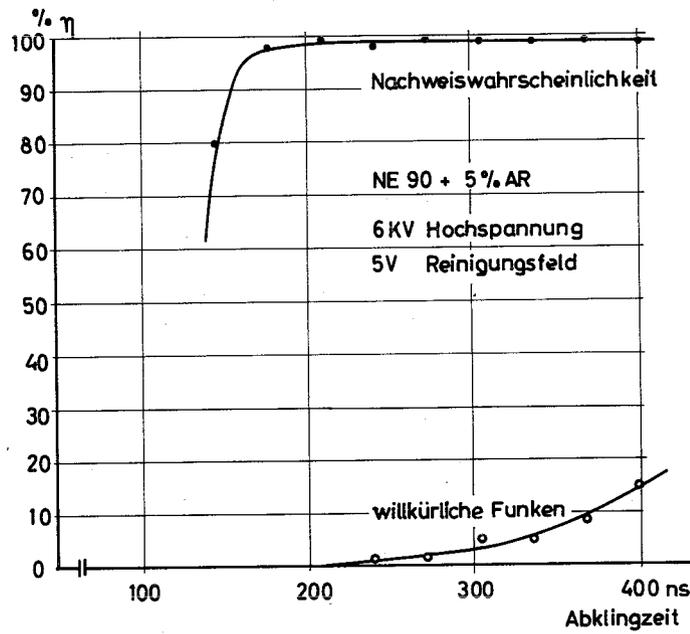


Abb. 22

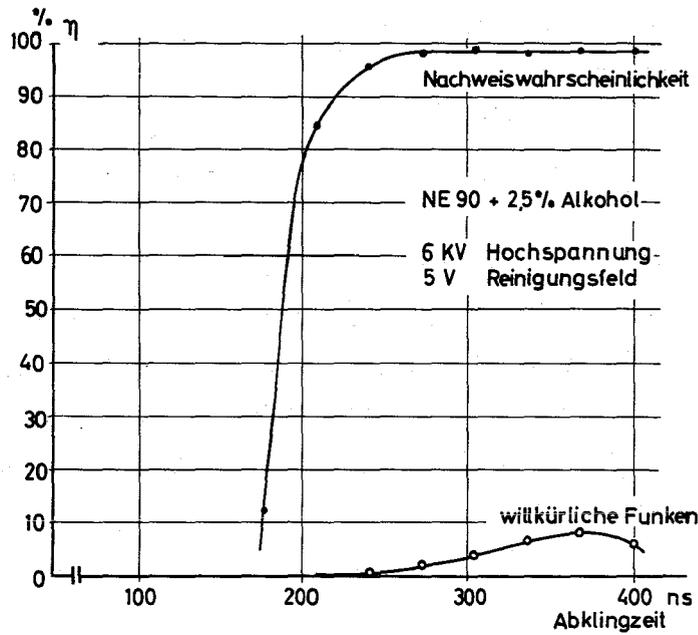


Abb. 23

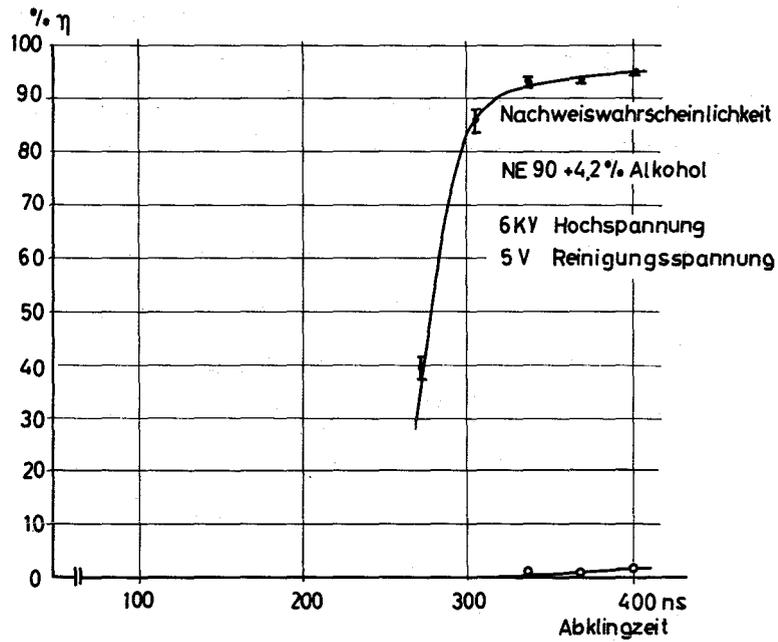


Abb. 24 Nachweiswahrscheinlichkeit und willkürliche Funken in Abhängigkeit von Gaszusätzen

2. Empfindliche Zeit

Neben Nachweiswahrscheinlichkeit und willkürlichem Nachweis besitzt das zeitliche Auflösungsvermögen einer Funkenkammer große Bedeutung. Außer den gesuchten Teilchen, auf deren Durchgang hin die Funkenkammer ausgelöst wurde, werden auch noch Teilchen nachgewiesen, die eine gewisse Zeitspanne vor oder nach dem gesuchten Teilchen die Kammer durchquert haben.

Die empfindliche Zeit hängt stark von der angelegten Reinigungsspannung ab. Sie wurde gemessen durch verzögertes Anlegen des Hochspannungsimpulses nach dem Teilchendurchgang. Die Abb. 25 und 26 zeigen die so erhaltenen Nachweiswahrscheinlichkeiten bei verschiedenen Reinigungsfeldern. Die empfindliche Zeit wird definiert durch

$$\tau = \int_0^{\infty} \eta \, dt$$

Negative Reinigungsspannungen - der Polarität des Hochspannungsimpulses gleichgerichtet - führen zu kürzeren empfindlichen Zeiten, erniedrigen aber gleichzeitig die Nachweiswahrscheinlichkeit zum frühest möglichen Auflöszeitpunkt schon zu stark, so daß sie nicht angewandt werden.

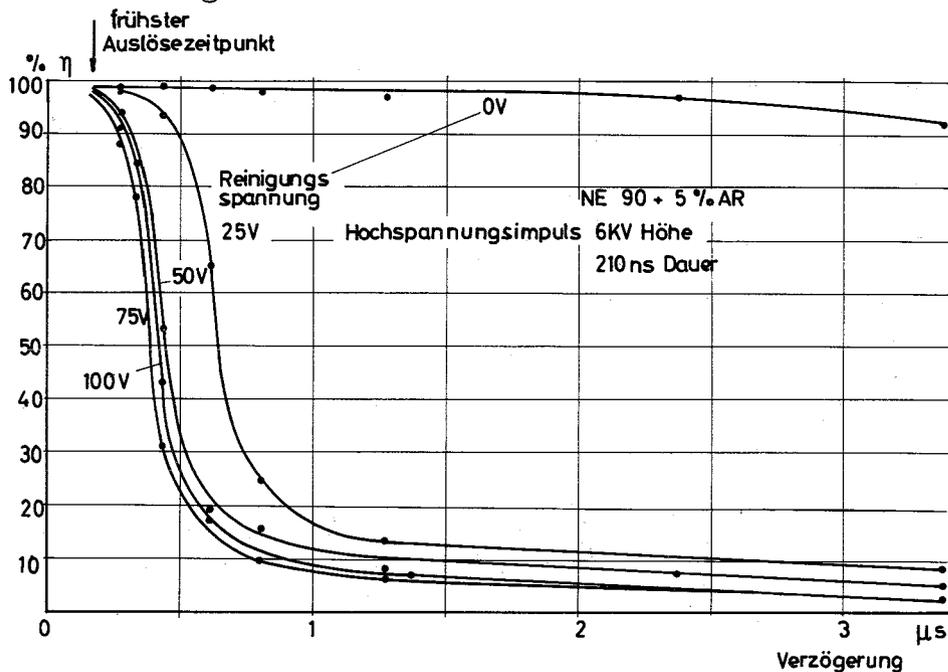


Abb. 25 Empfindliche Zeit. Nachweiswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Verzögerung des Hochspannungsimpulses bei positiven Reinigungsspannungen

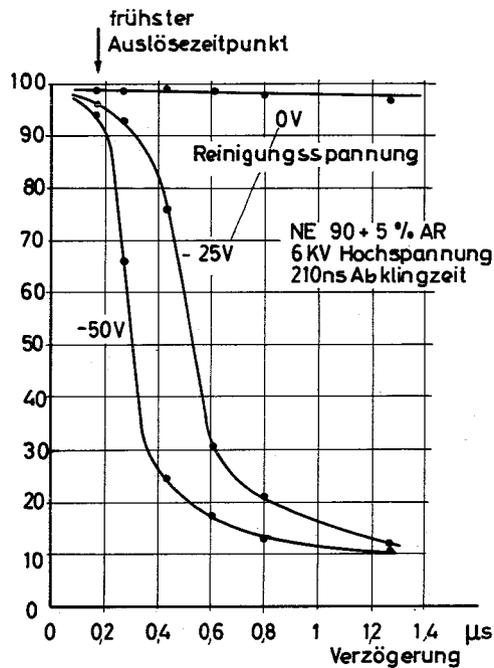


Abb. 26 Empfindliche Zeit. Nachweiswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Verzögerung des Hochspannungsimpulses bei negativen Reinigungsspannungen

Bei einer positiven Reinigungsspannung von 75 V erreicht die empfindliche Zeit ein Minimum

$$\tau = 550 \text{ ns}$$

für größere Reinigungsspannungen steigt sie wieder an. Dieser Sachverhalt wurde schon von mehreren Autoren beobachtet^{10,11)}. Er ist in Abb. 28 noch klarer dargestellt. Hier wurde die Nachweiswahrscheinlichkeit bei einer konstanten Verzögerung von 430 ns über der Reinigungsspannung aufgenommen. Das Auftreten eines Minimums in Nachweiswahrscheinlichkeit, bzw. empfindlicher Zeit entspricht einem Maximum in der Elektronen-Driftgeschwindigkeit. Ein solches entsteht durch Zusammenwirken von Füllgas und Gaszusatz¹²⁾.

Die Nachweiswahrscheinlichkeit geht für große Verzögerungszeiten nur langsam gegen Null (Abb. 25). Diese langen Ausläufer wirken sich jedoch bei dem Nachweis einer Teilchenspur

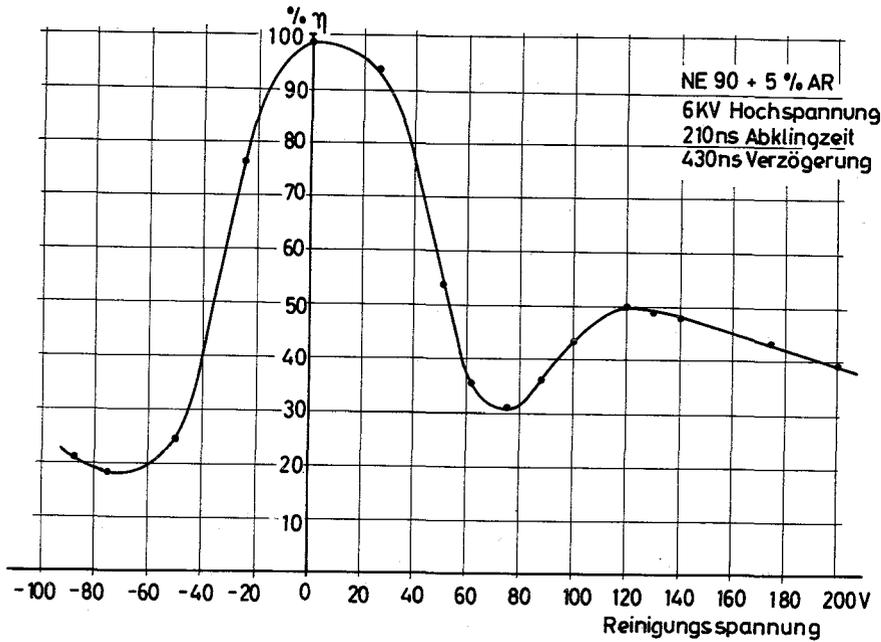


Abb. 27 Nachweiswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Reinigungsspannung

durch mehrere Funkenkammern praktisch nicht aus. Für den Fall, daß eine gerade Teilchenspür durch 4 Funkenkammern bestimmt wird, wobei eine Spür dadurch definiert wird, daß mindestens 3 Funken innerhalb enger Toleranzen auf einer Geraden liegen, bestimmt sich die Spür-Nachweiswahrscheinlichkeit η_s aus der Einzel-Nachweiswahrscheinlichkeit η_E durch

$$\eta_s = \eta_E^4 + 4 \eta_E^3 (1 - \eta_E)$$

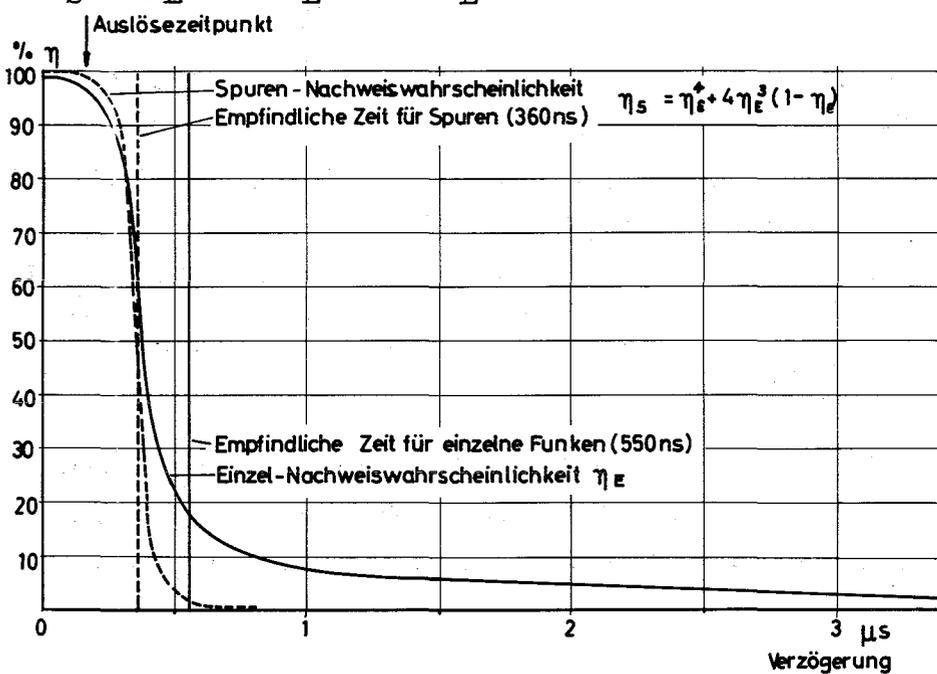
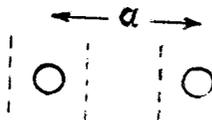


Abb. 28 Empfindliche Zeit für einzelne Funken und für Teilchen-Spür

Wie Abb. 28 zeigt, nähert sich diese Spuren-Nachweiswahrscheinlichkeit mehr der idealen Rechteckverteilung mit unverminderter Nachweiswahrscheinlichkeit für das gesuchte Teilchen, das um die unvermeidliche Auslöseverzögerung vor dem Hochspannungsimpuls die Kammer durchquert hat und mit kleiner Nachweiswahrscheinlichkeit für alle früheren Teilchen. Für den Nachweis von Spuren ergibt sich bei einer Nachweiswahrscheinlichkeit von über 99% eine empfindliche Zeit von 360 ns.

3. Funkenaufspaltung

Die Aufspaltung der Funken auf mehrere Drähte hängt eng mit dem erreichbaren Ortsauflösungsvermögen zusammen.



Sei a der Abstand zweier Drähte. Das optimal erreichbare Ortsauflösungsvermögen würde sich dann ergeben, wenn nach dem Durchqueren eines Teilchens im Abstand $\pm \frac{a}{4}$ von einem Draht der Funke einen, drei oder allgemein eine ungerade Anzahl von Drähten berührt und wenn nach dem Durchqueren eines Teilchens innerhalb $\pm \frac{a}{4}$ von der Mitte zwischen zwei Drähten der Funke zwei oder eine gerade Anzahl von Drähten trifft. Durch Mittelwertbildung benachbarter Drahtnummern ergäbe sich dann ein maximaler Meßfehler von $\pm \frac{a}{4}$.

Wenn eine große Zahl von Teilchen an beliebigen, statistisch verteilten Orten die Kammer durchquert, berühren in diesem Fall im Mittel ebensoviele Funken eine gerade wie eine ungerade Anzahl von Drähten. Die mittlere Anzahl von Drähten, die ein Funke berührt, ist eine Funktion von Hochspannungsimpulshöhe und -dauer. Darüberhinaus hängt sie auch von der Zusammensetzung des Füllgases und dem Reinigungsfeld ab.

Die Abb. 29 zeigt die Wahrscheinlichkeit für einen Funken, 0, 1, 2, 3, Drähte zu berühren, in Abhängigkeit von der Abklingzeit des Hochspannungsimpulses.

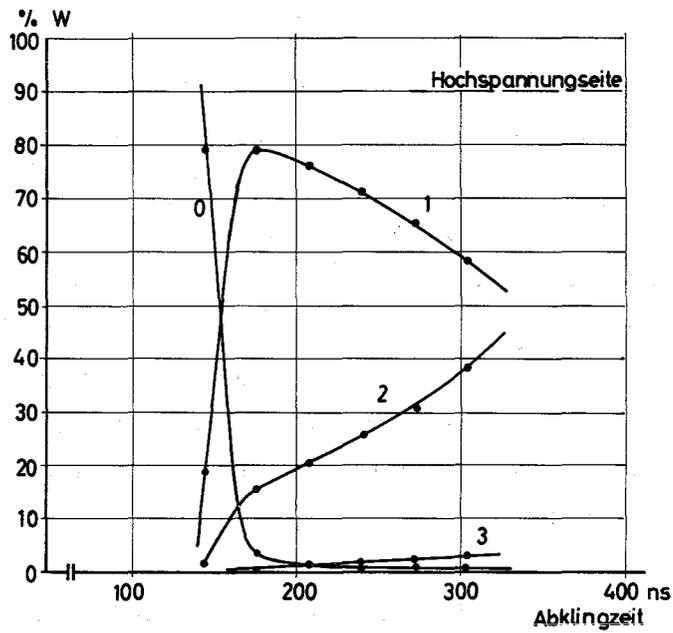
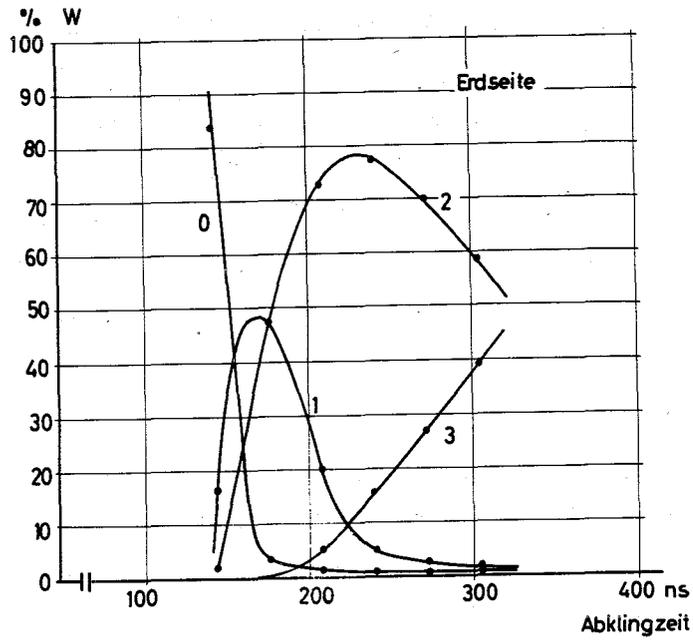


Abb. 29 Funkenverzweigung. Wahrscheinlichkeit für einen Funken, 0, 1, 2, 3, ... Drähte zu berühren bei NE 90 + 5% Ar, 6kV Hochspannung, 50 V Reinigungsspannung

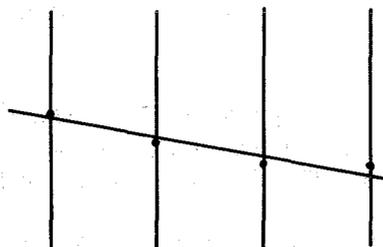
Anders als bei den Nachweiseigenschaften der Kammer, die für Erd- und Hochspannungsseite gleich sind, ergeben sich hier große Unterschiede zwischen beiden Elektroden. An der Hochspannungsseite (Kathode) sind die Funken erheblich schmaler und weniger aufgespalten als an der Erdseite (Anode). Die Wahrscheinlichkeit, 0 Drähte zu berühren, ist die umgekehrte Nachweiswahrscheinlichkeit. Als gerade Anzahl von Drähten kommen bei beiden Elektroden praktisch nur Paare vor, denn die Wahrscheinlichkeit für vier benachbarte Drähte ist vernachlässigbar klein.

Optimales Ortsauflösungsvermögen ergibt sich, wenn im Mittel ebensoviele gerade wie ungerade Anzahlen von Drähten berührt werden. Dieser Fall ist hier erfüllt, wenn Draht-Paare mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% berührt werden.

Auf der Erdseite tritt ein solcher Arbeitspunkt schon vor dem Erreichen der vollen Nachweiswahrscheinlichkeit auf. Ein weiterer optimaler Arbeitspunkt liegt hoch im Plateau der Nachweiswahrscheinlichkeit, etwa in demselben Bereich, in dem sich ein optimaler Arbeitspunkt für die Hochspannungsseite befindet. Auf der Erdseite treten dann fast ausschließlich Paare und Tripel, auf der Hochspannungsseite einzelne Drähte und Paare auf.

4. Das Ortsauflösungsvermögen

Da die Funkenkammern zur Bestimmung von Teilchenbahnen verwendet werden, ist eine genaue Kenntnis ihres Ortsauflösungsvermögens von besonderer Wichtigkeit. Die Messung wurde mit vier äquidistant aufgestellten Funkenkammern durchgeführt. Einzelne Elektronen mit einer Energie von ca. 2,5 GeV wurden hierfür durch die Funkenkammern geschickt.



Aus den Mittelwerten benachbarter Funkenkoordinaten, den Funkenschwerpunkten, bestimmt ein Rechenprogramm⁺⁾ die Gerade der kleinsten Abstandsquadrate. Durch diese Gerade wird die wirkliche Bahn des Teilchens mit größtmöglicher Genauigkeit beschrieben. Damit ist das Ortsauflösungsvermögen gegeben durch die Verteilung der Abstände zwischen den Durchstoßpunkten dieser Geraden und den zugehörigen Funkenschwerpunkten.

Die Häufigkeit von Abweichungen des Funkenschwerpunkts vom Teilchendurchstoßpunkt wird von den Abb. 30 und 31 für Erd- und Hochspannungsseite einer Funkenkammer dargestellt. Wie die halblogarithmische Auftragung zeigt, kann eine solche Verteilung bis zum Abfall auf 1% des Maximums mit guter Übereinstimmung durch eine Gaußverteilung angenähert werden.

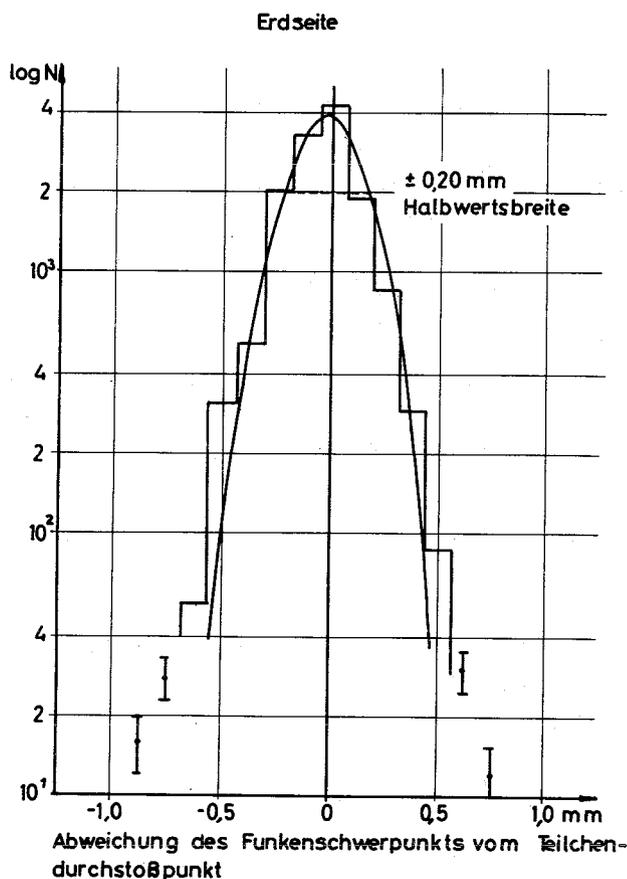


Abb. 30 Ortsauflösungsvermögen der Funkenkammer
Häufigkeit von Abweichungen des Funkenschwerpunkts vom Teilchendurchstoßpunkt

⁺⁾ Dieses Programm wurde von D. Wegener geschrieben.

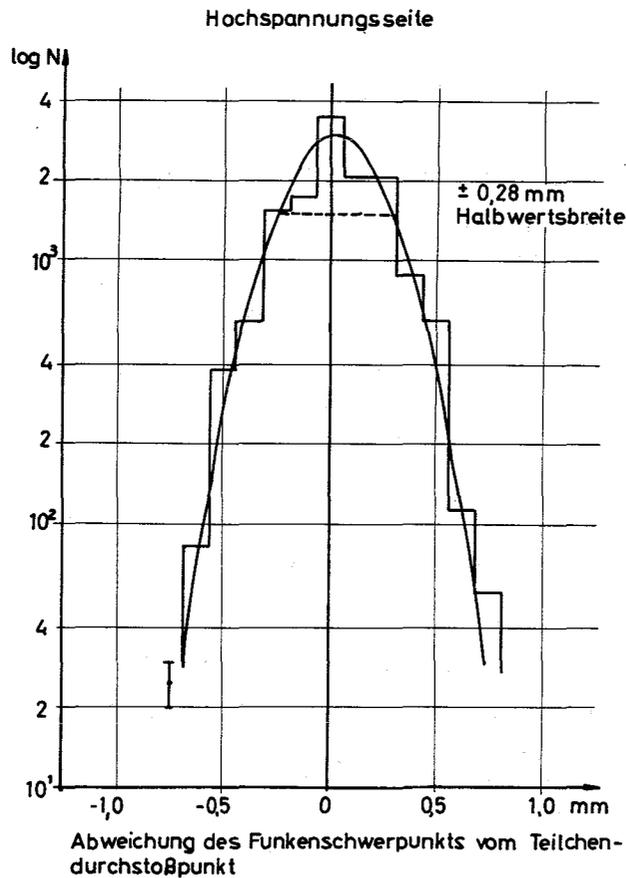


Abb. 31 Ortsauflösungsvermögen der Funkenkammer
Häufigkeit von Abweichungen des Funken-
schwerpunkts vom Teilchendurchstoßpunkt

Auf der Erdseite ergab sich eine Halbwertsbreite von $\pm 0,20$ mm, auf der Hochspannungsseite von $\pm 0,28$ mm für das Auflösungsvermögen. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß neben der Unschärfe durch unsymmetrische Funkenaufspaltung auch eine Verbreiterung durch Kleinwinkelstreuung der Elektronen an den Drähten der Kammern in den so gemessenen Verteilungen bereits enthalten ist.

Diese Meßkurven wurden bei nicht optimalen Funkenaufspaltungen aufgenommen. Auf der Erdseite berührten die Funken zu 72% eine gerade Anzahl von Drähten, auf der Hochspannungsseite waren es nur 24%. Obwohl die Abweichung vom Optimum bei 50% in beiden Fällen nahezu gleich ist, ergibt sich auf der Hochspannungsseite ein schlechteres Auflösungsvermögen. Anscheinend hängen bei dieser Elektrode die geringe Neigung zur Funkenaufspaltung und die geringere Symmetrie der Funken zur Teilchenbahn miteinander zusammen. Man wird daher die Teilchenkoordinaten, bei denen es auf höchste Genauigkeit ankommt, mit den Erdseiten der Funkenkammer messen.

X. DIE ANWENDUNG DER FUNKENKAMMERN

Wie schon oben erwähnt, ist die Entwicklung der digitalisierten Funkenkammern besonders im Hinblick auf ein bestimmtes Experiment durchgeführt worden, ein Experiment zur quasielastischen Elektron-Deuteron-Streuung am Deutschen Elektronen-Synchrotron in Hamburg. Ziel dieses Experiments ist vor allem die Messung des elektrischen Neutron-Formfaktors.

Hierzu muß der Wirkungsquerschnitt für die Streuung von Elektronen an Nukleonen bei verschiedenen Impulsüberträgen und unter verschiedenen Streuwinkeln bestimmt werden. Außerdem muß sichergestellt werden, daß hierfür nur elastische Reaktionen erfaßt werden. Da es kein Neutron-Target gibt, wird die Formfaktor-Bestimmung des Neutrons am Deuteron durchgeführt. Daraus entstehen prinzipielle Schwierigkeiten in der Auswertung, die darin liegen, daß das Neutron gebunden ist und nicht als freies Teilchen angesehen werden kann.

Um zu entscheiden, ob der Streuvorgang an einem Neutron oder Proton des Targets stattgefunden hat, muß das Rückstoß-Nukleon beobachtet werden. Da sich zum übertragenen Rückstoßimpuls der momentane Eigenimpuls des Nukleons im Deuteron hinzuaddiert, entsteht eine breite Winkelverteilung der Rückstoß-Nukleonen um die Richtung des Impulsübertrags. Aus demselben Grund ist auch der Impuls des gestreuten Elektrons bei einem vorgegebenen Streuwinkel nicht mehr scharf sondern um den Impuls für elastische Streuung verteilt. Man nennt diese Reaktion quasielastische Streuung.

Einem freien Teilchen am nächsten kommt das Nukleon, wenn sein momentaner Eigenimpuls Null ist. Dann befindet es sich, anschaulich gesprochen, am Umkehrpunkt seiner Bahn und besitzt von seinem Partner maximale Entfernung. In diesem Fall besitzt das gestreute Elektron den Impuls für elastische Streuung, und das Rückstoß-Nukleon fliegt in Richtung des Impulsübertrags. Zur Formfaktorbestimmung sollen daher nur solche Ereignisse herangezogen werden. Die Apparatur wird durch

Abb. 32 schematisch dargestellt.

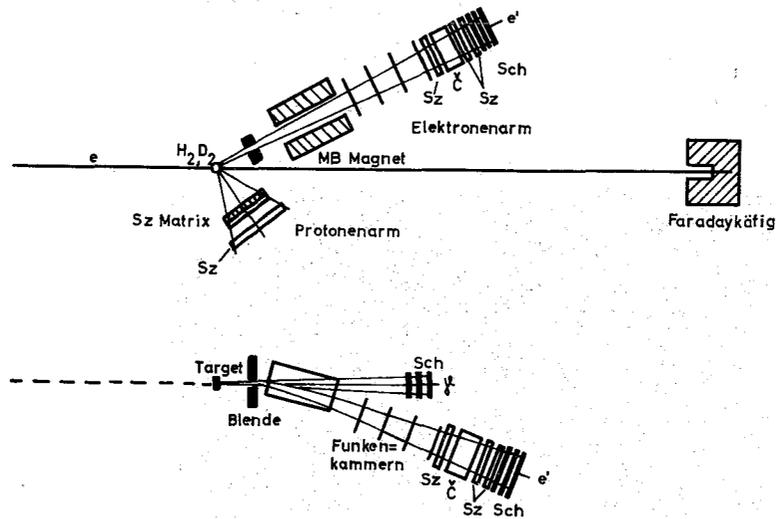


Abb. 32 Apparatur zur Elektron-Nukleon-Streuung am DESY, Hamburg

Sie besteht aus einem Elektronen- und einem Protonenarm, die jeder auf einer schwenkbaren Lafette aufgebaut sind. Mit dem Protonenarm wird das Rückstoß-Proton nachgewiesen, da die Registrierung des Neutrons nur mit geringer Nachweiswahrscheinlichkeit möglich ist. Alle Streuereignisse, bei denen kein schweres geladenes Teilchen in Koinzidenz mit dem gestreuten Elektron beobachtet wurde, werden als Streuereignisse am Neutron erklärt. Das setzt voraus, daß der Protonenarm einen hinreichend großen Raumwinkel überstreicht, damit möglichst keine Protonen verloren gehen. Andererseits entstehen durch den großen Raumwinkel erhebliche Schwierigkeiten durch den Teilchen-Untergrund, der den Primärstrahl begleitet und im Target entsteht. Es muß natürlich vermieden werden, daß ein zufälliges Untergrund-Teilchen ein Rückstoß-Proton vor-täuscht.

Wegen des hohen Untergrundes konnten auf dem Protonenarm nicht, wie ursprünglich vorgesehen, Funkenkammern verwendet werden. Die Winkelverteilung der Rückstoß-Protonen wird durch eine

12x12 Zählermatrix aus Szintillationszählern aufgenommen. Ein "Kleeblatt" aus 4 dicken Szintillationszählern trennt durch die Impulshöhe seines Ausgangssignals den niederenergetischen Untergrund von den Rückstoß-Protonen.

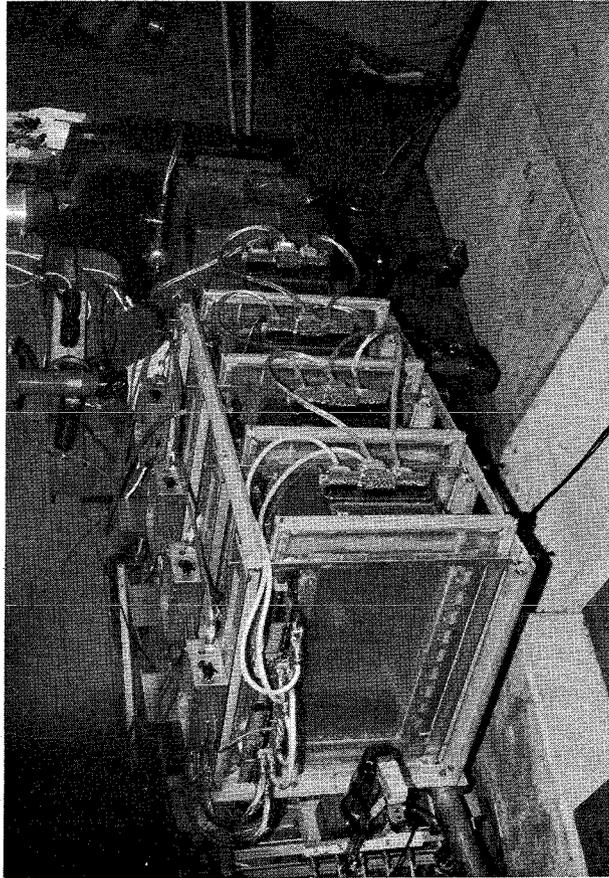


Abb. 33 Drahtfunkenkammern mit Ferritkernspeicher zusammen mit Auslösezähler auf der Elektronenlafette

Auf dem Elektronenarm fliegen die Teilchen durch einen Blei-Kollimator, durch einen Ablenkmagneten und die Drahtfunkenkammern in eine Zählerkombination. Diese dient dazu, spezifisch nur Elektronen nachzuweisen und besteht aus drei Szintillationszählern, einem gasgefüllten Cherenkowzähler und einem Schauerzähler, die in Koinzidenz geschaltet sind. Das Ansprechen dieser Zählerkombination definiert ein Streuereignis und löst die Funkenkammern aus.

Nach der Übertragung der Funkenkoordinaten in den Prozeßrechner können dort Streuwinkel und Impuls des gestreuten Elektrons errechnet werden. Hierzu bestimmt ein Rechenprogramm⁺ den Krümmungsradius der Teilchenbahn im Ablenkmagneten, wobei das Target als punktförmig angenommen werden muß. Die Abb. 34 und 35 zeigen zwei Impulsspektren, die auf diese Weise erhalten wurden, für Wasserstoff- und für Deuterium-Target.

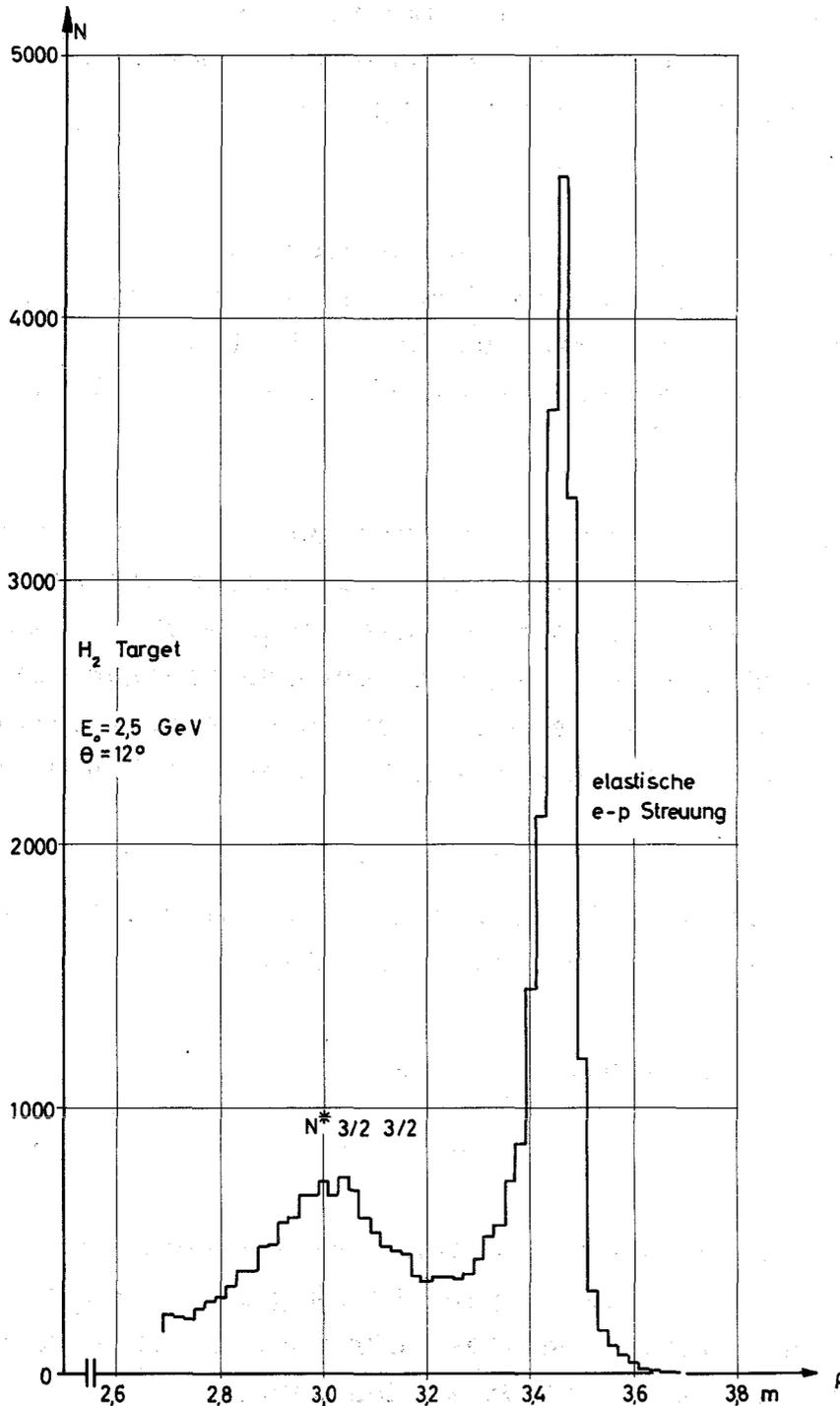


Abb. 34 Impuls-Spektrum der am Wasserstoff gestreuten Elektronen

⁺) Dieses Programm wurde von D. Wegener geschrieben.

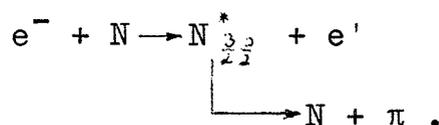
Bei der e-p-Streuung ergibt sich eine scharfe Linie für die elastisch gestreuten Elektronen. Die Linienbreite wird durch eine Überlagerung mehrerer Beiträge bestimmt:

1. Endlicher Öffnungswinkel des Spektrometers
2. Energieunschärfe des Primärstrahls
3. Endliche Ausdehnung des Primärstrahls
4. Kleinwinkelstreuung der gestreuten Elektronen
5. Auflösungsvermögen der Funkenkammern
6. Bremsstrahlung

Die ersten zwei Beiträge können durch Messung des Elektronen-Streuwinkels und der momentanen Energie des Primärstrahls zum Reaktionszeitpunkt rechnerisch berücksichtigt werden. Die Beiträge 3 - 5 könnten nur durch weiteren apparativen Aufwand verringert werden.

Die Bremsstrahlung, die von den Elektronen beim Streuprozess ausgesandt wird, führt zu einer unsymmetrischen Linienverbreiterung zu kleinen Impulsen hin, da die Energie des ausgesandten Bremsquants dem gestreuten Elektron verlorengegangen ist. In erster Näherung hat diese Verbreiterung die Gestalt einer Hyperbel. Sie ist im Impulsspektrum Abb. 36 deutlich ausgebildet.

Neben der elastischen Linie erscheint eine weitere breite Linie, die von der inelastischen Reaktion herrührt:



$N \begin{matrix} * \\ \frac{3}{2} \\ \frac{2}{2} \end{matrix}$ ist der erste angeregte Zustand des Nukleons. Es ist also mit dieser Apparatur möglich, gleichzeitig mit der elastischen auch inelastische Elektron-Nukleon-Streuung zu untersuchen, da ein großer Impulsbereich erfaßt werden kann.

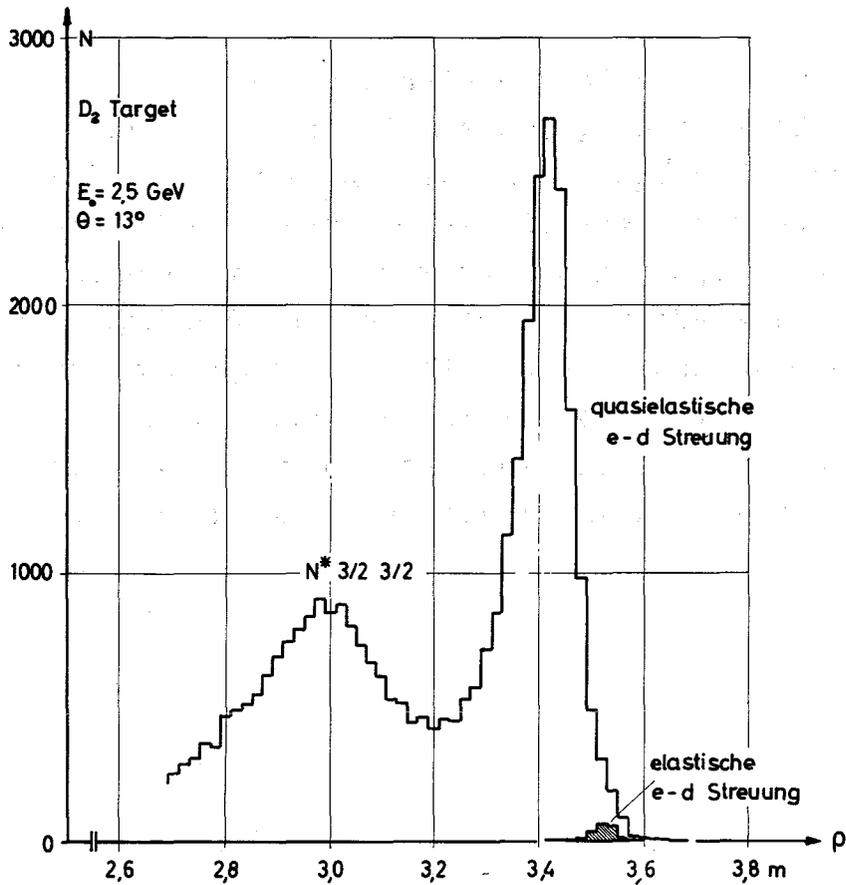


Abb. 35 Impuls-Spektrum der am Deuterium gestreuten Elektronen

Das Spektrum Abb. 35 mit Deuterium-Target besitzt, wie erwartet, eine breitere Impulsverteilung für die quasi-elastisch gestreuten Elektronen. Der Anteil der am gesamten Deuteron elastisch gestreuten Elektronen ist ebenfalls eingetragen.

Die Apparatur nimmt eine Zwischenstellung zwischen Blaskammer und konventioneller Zählerapparatur ein. Einerseits können mehrere verschiedenartige Reaktionen gleichzeitig beobachtet werden. Die Apparatur kann jedoch selektiv nur nach Eintritt einer vorherbestimmten Klasse von Ereignissen ausgelöst werden. Schon während des Experiments lassen sich Zwischenergebnisse, wie z.B. Spektren erhalten, die es dem Experimentator ermöglichen, den Fortgang des Experiments gezielt zu beeinflussen.

Da bei diesem Experiment alle Rohdaten unausgewertet auf Magnetband aufgezeichnet werden, stehen sie in dieser Form nach einem Meßlauf zur vollständigen Auswertung zur Verfügung. Ähnlich wie während des eigentlichen Datennnehmens kann auch später mit den Daten experimentiert werden. Bei jeweils veränderten Auswerteparametern ist es nun möglich, das Experiment mehrmals durch den Rechner wiederholen zu lassen und dabei die einander überlagerten physikalischen Reaktionen - wie hier inelastische, quasielastische und elastische Streuung - voneinander zu trennen und im einzelnen zu untersuchen.

XI. ZUSAMMENFASSUNG

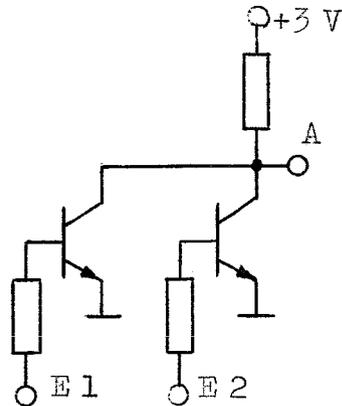
Es wurden digitalisierte Drahtfunkenkammern mit Ferritkernspeicher entwickelt. Die Nachweis- und Auflösungs-eigenschaften der Funkenkammern wurden gemessen und die Anwendung eines Systems von Funkenkammern und Prozeßrechner bei einem Experiment zur e-d-Streuung am DESY beschrieben.

Anhang A

Die logischen Schaltkreise

Die logischen Funktionen der Elektronik wurden mit integrierten monolithischen Bauelementen in RTL-Technik⁺⁾ aufgebaut. Das Grund-Gatter dieser Logik-Familie ist folgendermaßen geschaltet:

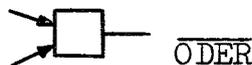
Zwei Transistoren werden über die Eingänge E1, E2 bei Eingangsspannungen kleiner als 0,7 V in den gesperrten und bei größeren in den leitfähigen Zustand gesteuert. Die Ausgangsspannung am gemeinsamen Kollektorwiderstand liegt im gesperrten Zustand je nach



Belastung zwischen 1,2 V und 2,5 V und im leitfähigen Zustand bei 0,2 V. Diese Spannungen sollen im folgenden mit 1 V, respektive 0 V bezeichnet werden. Dann ist die Wahrheitstabelle der Schaltung gegeben durch

E 1	E 2	A
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

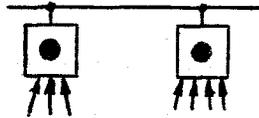
Durch die erste Zeile wird eine invertierte UND-Bedingung (\overline{UND}), durch die restlichen eine invertierte ODER-Bedingung (\overline{ODER}) dargestellt. An einen gemeinsamen Kollektorwiderstand können beliebig viele Transistoren geschaltet werden, so daß beliebig vielfache UND- oder ODER-Verknüpfungen möglich sind. Derselbe Schaltkreis wird durch zwei verschiedene Zeichen symbolisiert,



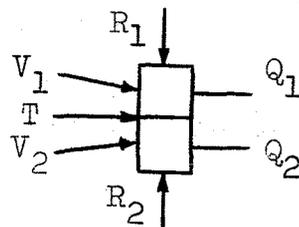
^{+) μL, SGS-Fairchild}

je nachdem, ob eine $\overline{\text{UND}}$ - oder eine $\overline{\text{ODER}}$ -Verknüpfung gemeint ist. Da es sich jedoch bei beiden Symbolen um denselben Schaltkreis handelt, ist diese Unterscheidung weitgehend willkürlich und nur zur besseren Lesbarkeit der Schaltungen eingeführt worden.

Wenn ein Gatter aus mehreren Bausteinen zusammengesetzt ist, werden die unvollständigen Einzelfunktionen durch einen Punkt gekennzeichnet:



Der als elektronisches Speicherelement vielseitig verwendbare JK-Flip Flop besitzt folgendes Symbol:



Normalerweise befinden sich Q_1 und Q_2 dauernd in einem Zustand mit $Q_1 = \overline{Q_2}$.

Der zu speichernde Zustand kann durch Eingangssignale auf zwei Arten herbeigeführt werden:

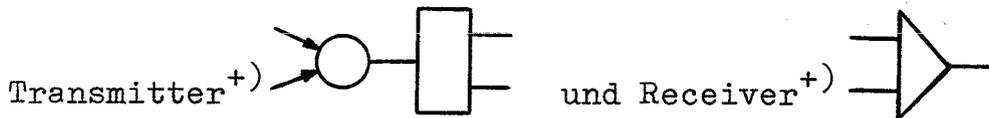
1. Asynchron

R_1	R_2	Q_1	Q_2
0	0	unverändert	
1	0	0	1
0	1	1	0
1	1	unbestimmt	

2. Synchron mit dem Wechsel des Eingangs T von 1 auf 0

V_1	V_2	Q_1	Q_2
0	0	$\overline{Q_1}$	$\overline{Q_2}$
1	0	1	0
0	1	0	1
1	1	unverändert	

Das Zeichen  symbolisiert einen invertierenden Leistungsverstärker, das Zeichen  einen nicht invertierenden (Emitterfolger).



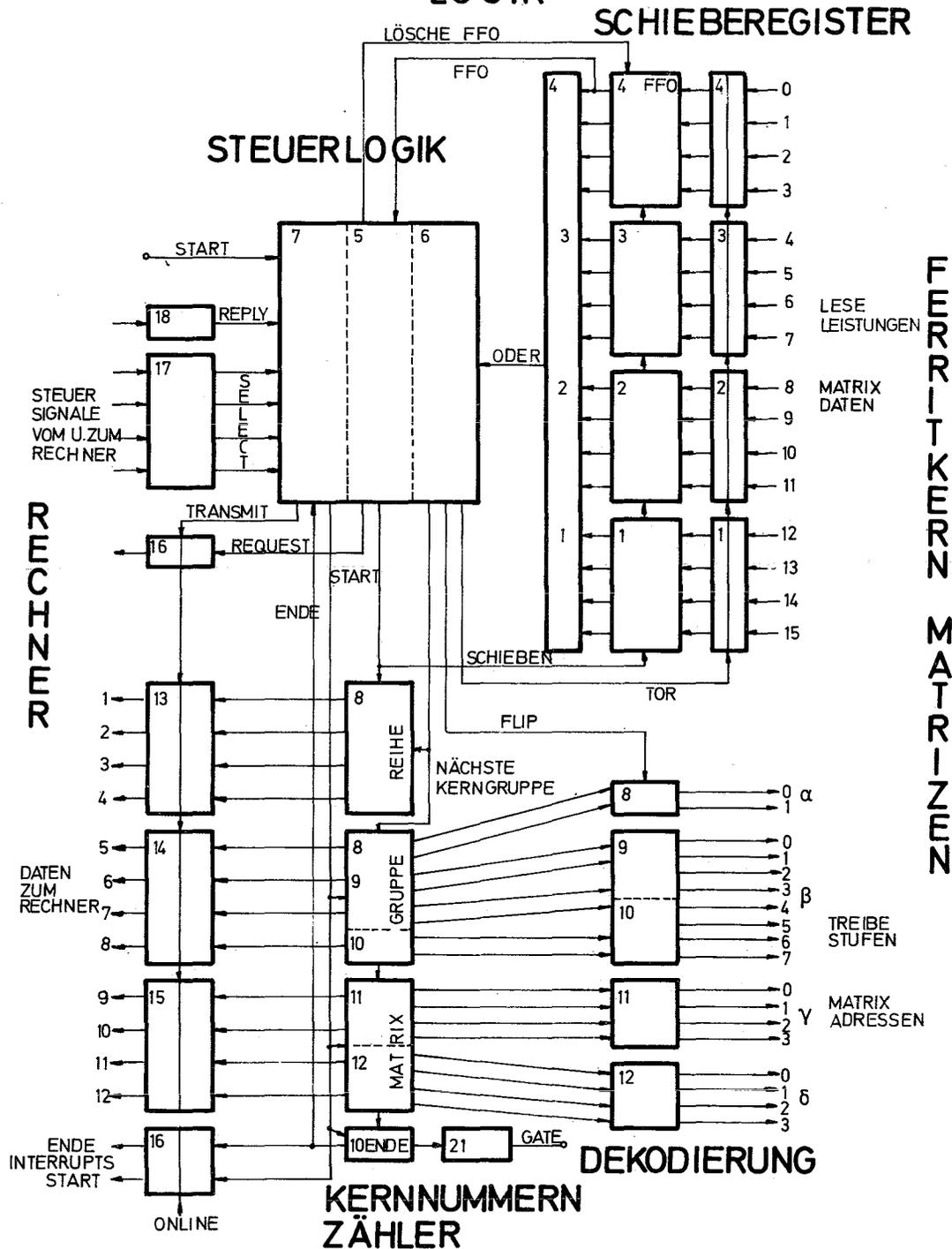
schreiben auf die Übertragungsleitungen und lesen von ihnen (siehe Anhang D) .

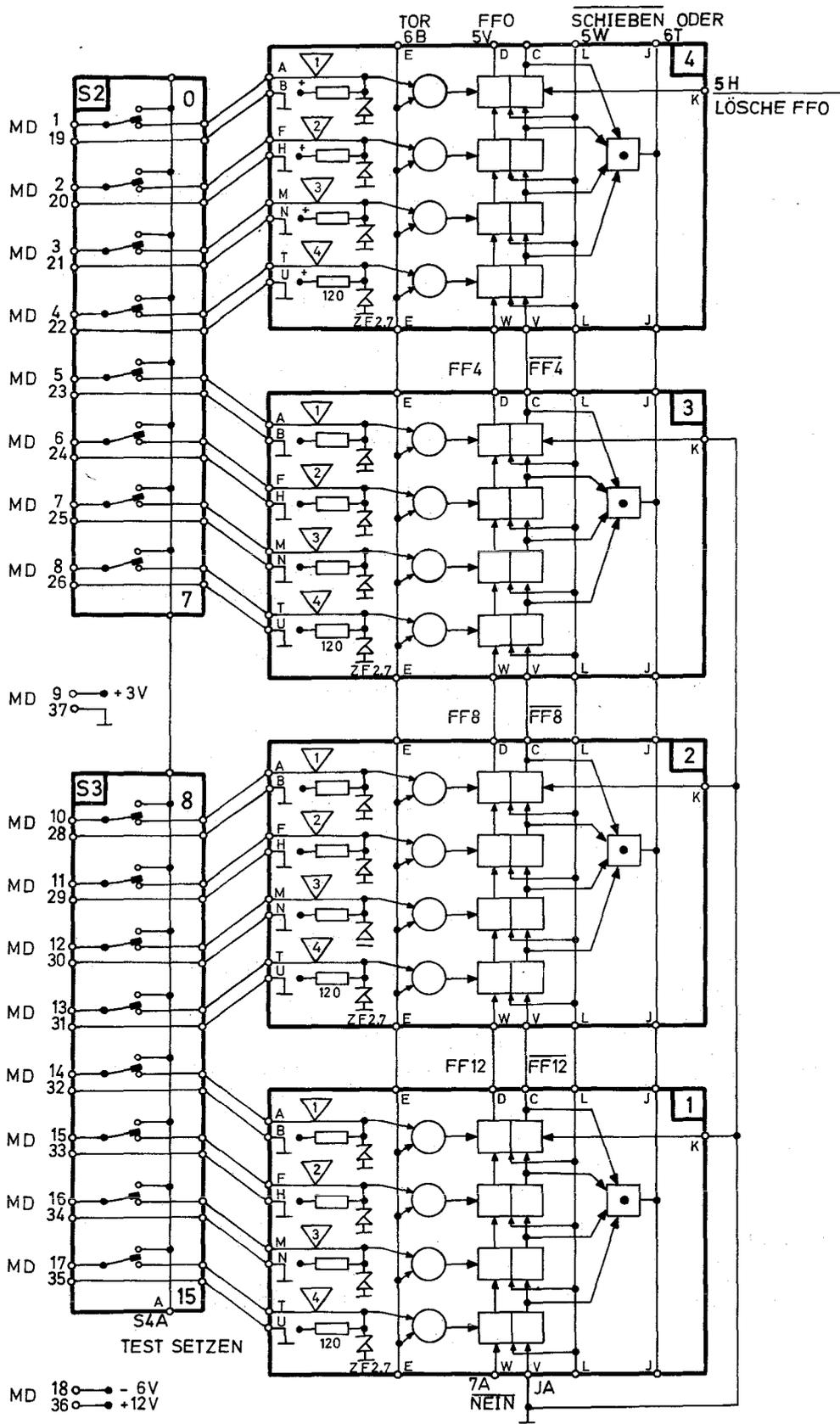
⁺) Entwickelt von J. Moritz

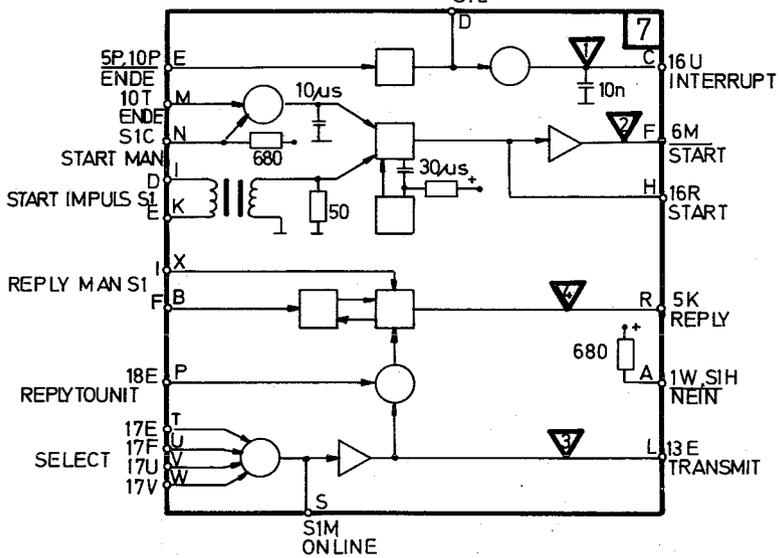
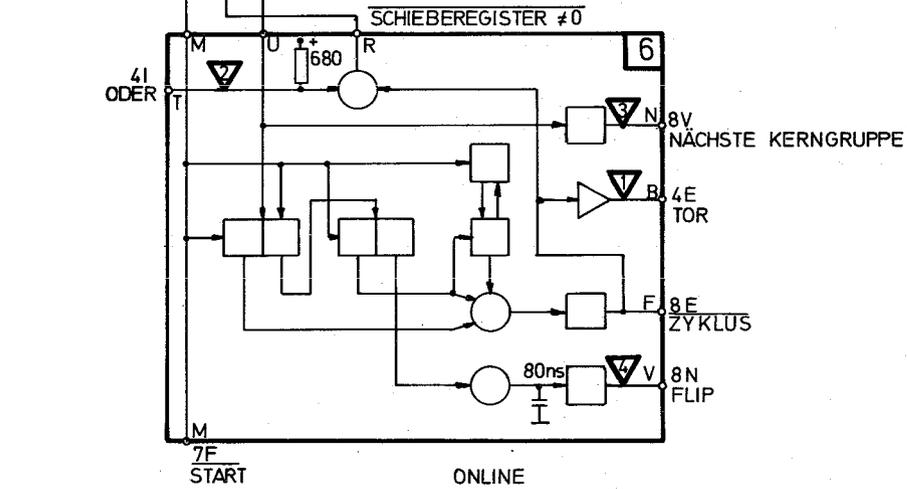
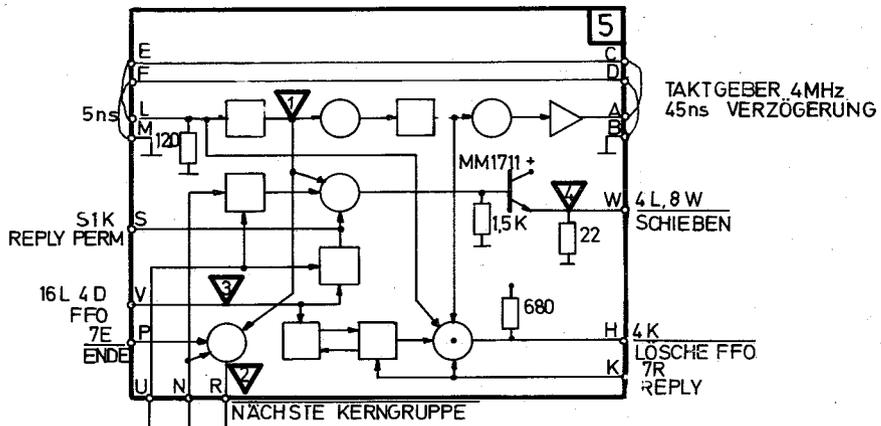
Anhang B

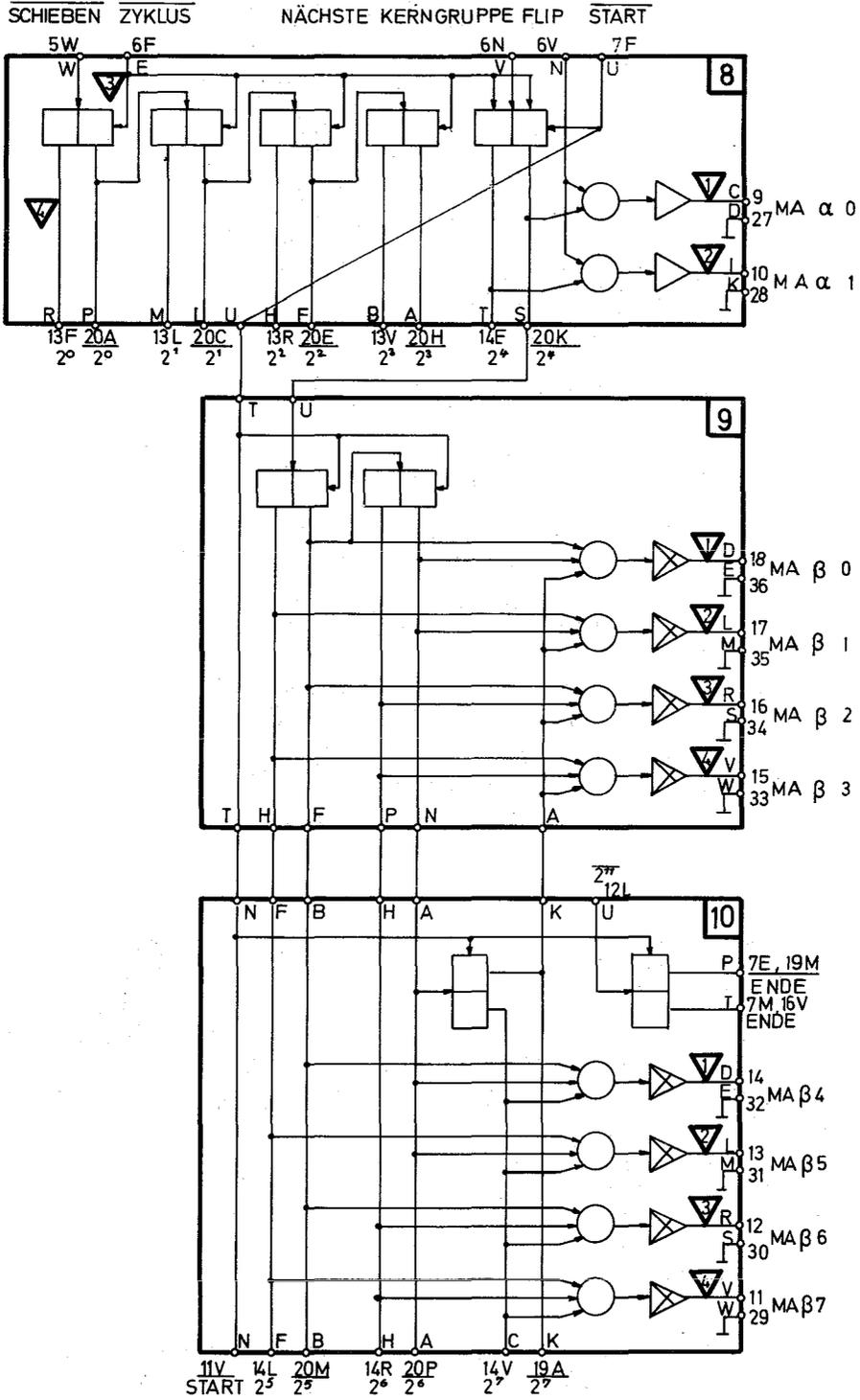
Schaltung von Ferritkern-Auslese-Logik und Ferritkern-Speicher-Matrix.

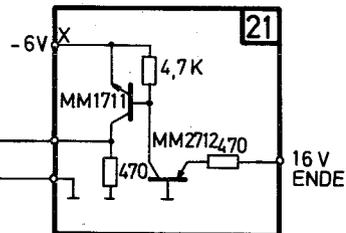
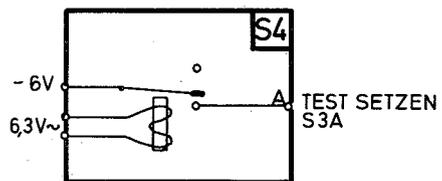
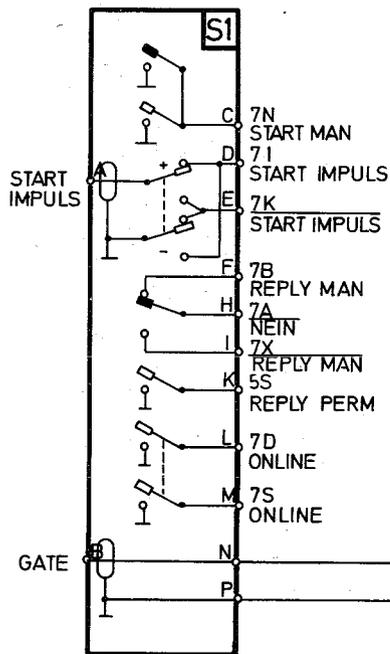
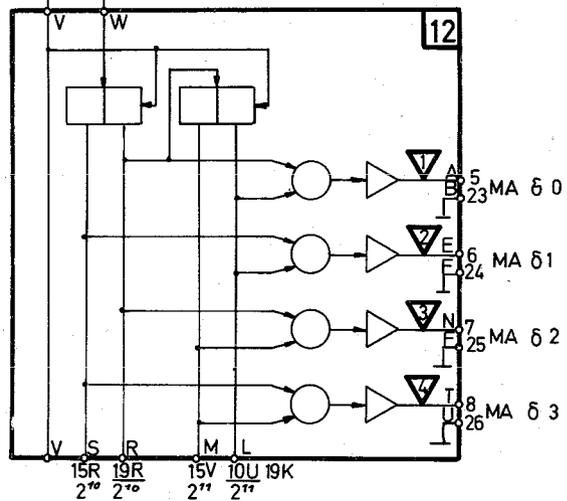
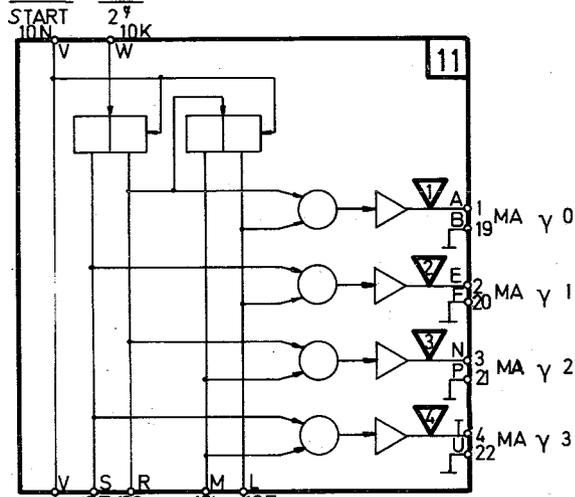
BLOCKSCHALTBILD DER FERRITKERN AUSLESE LOGIK

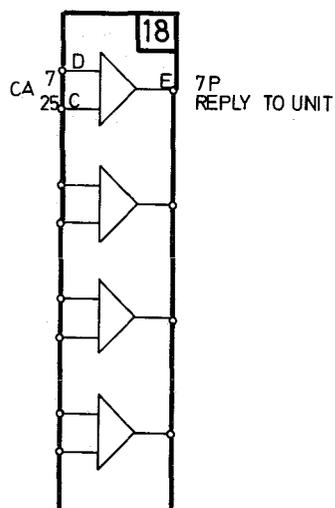
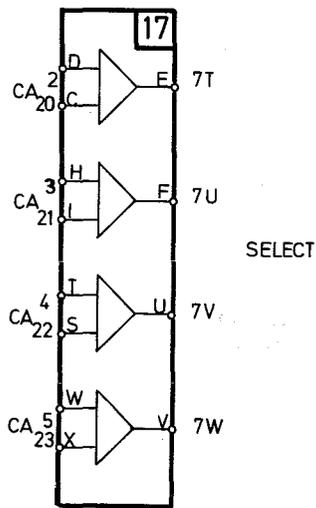
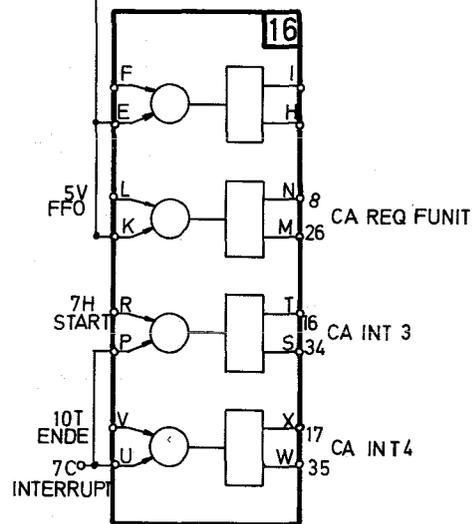
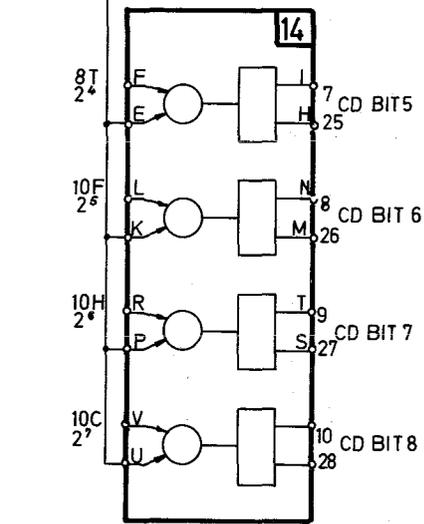
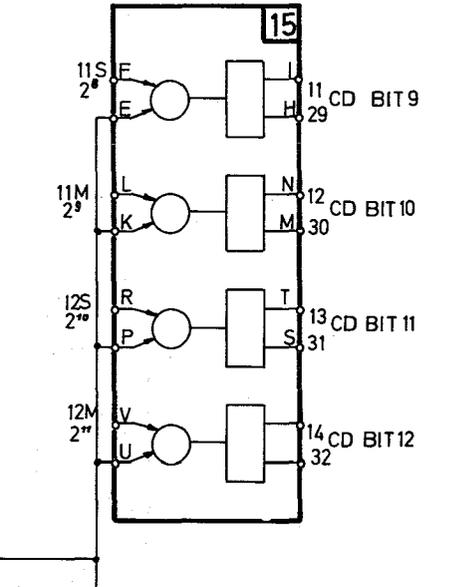
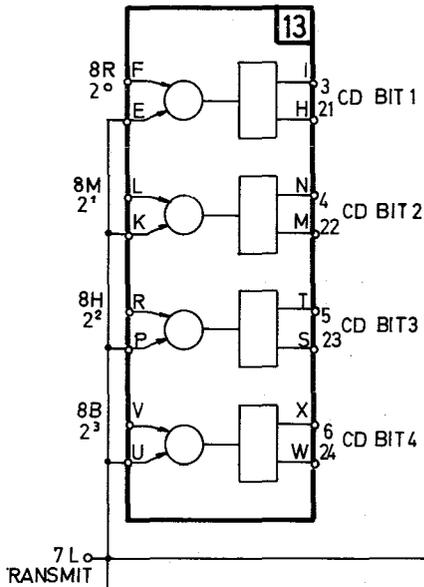


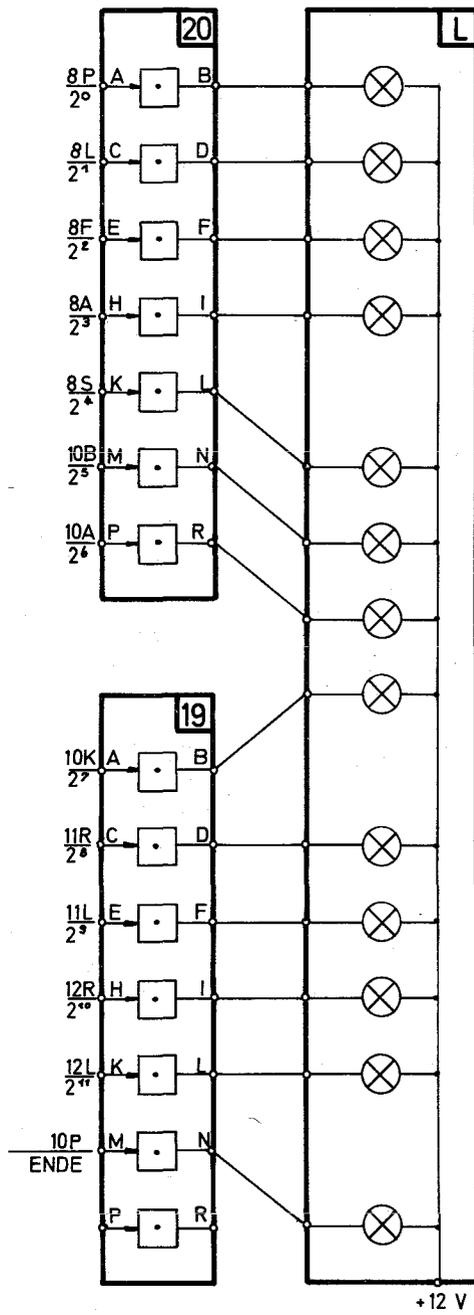


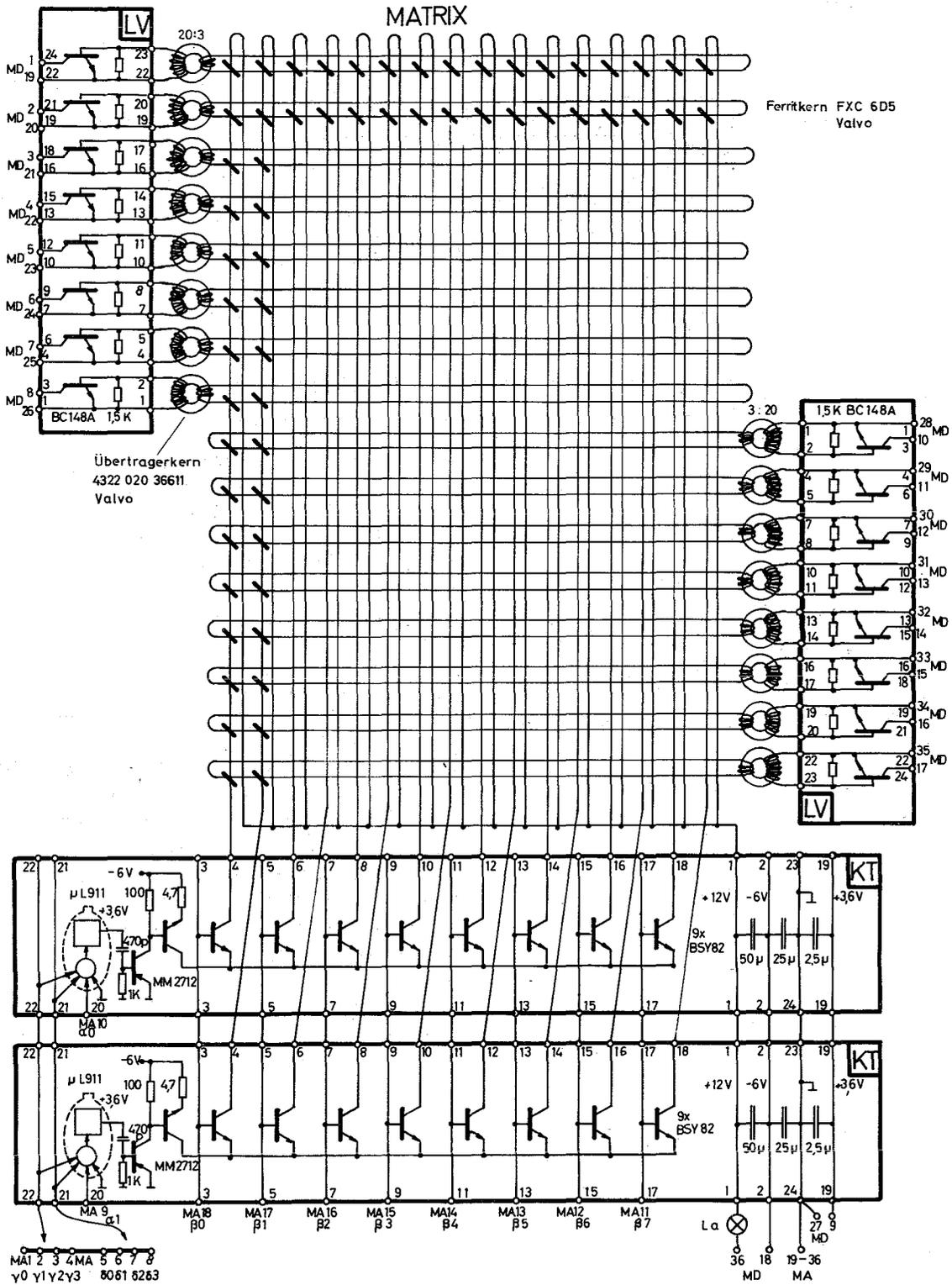






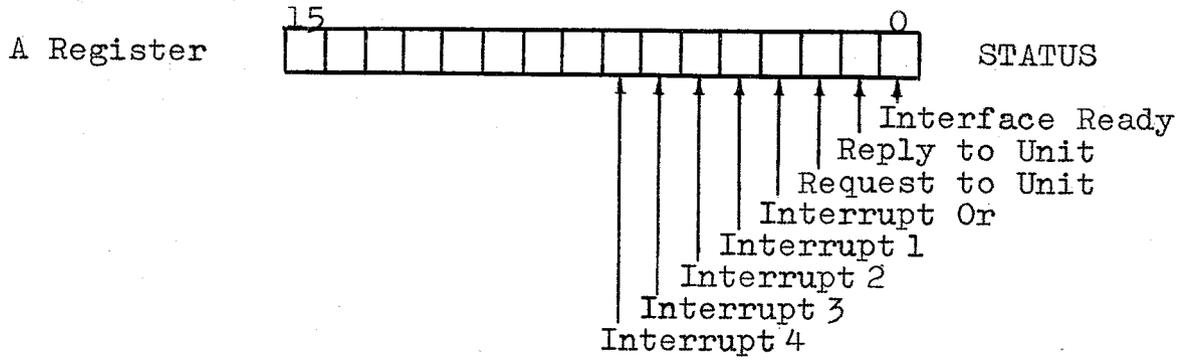
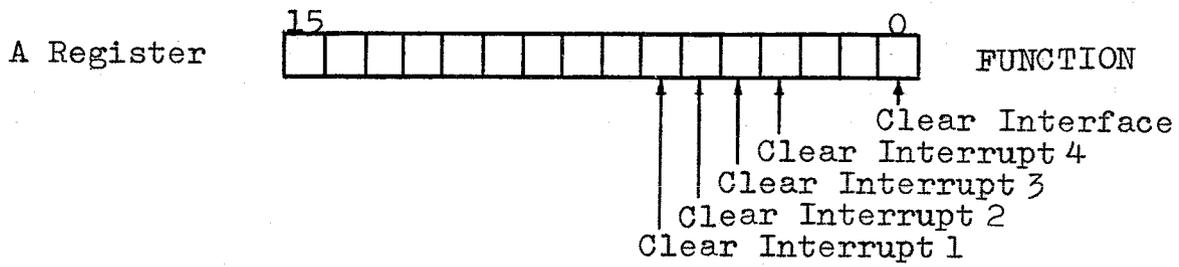
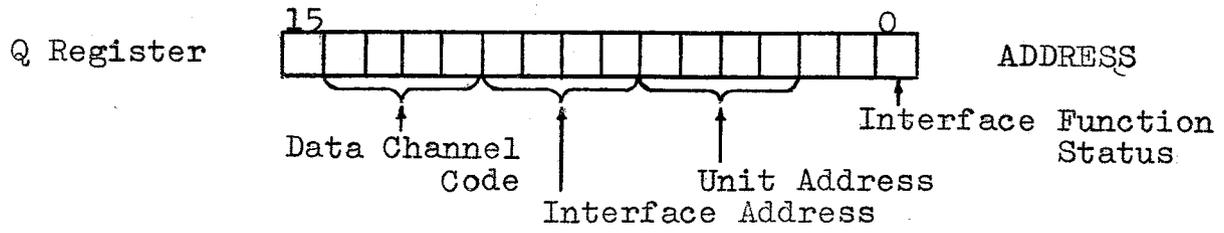






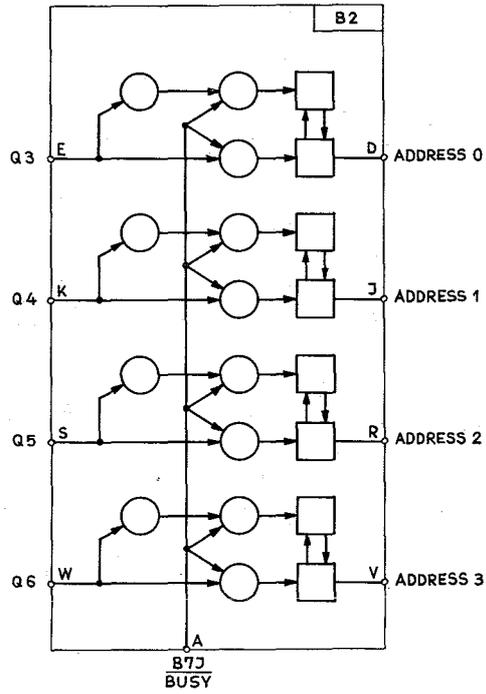
Das Computer Interface

1. Programmierung

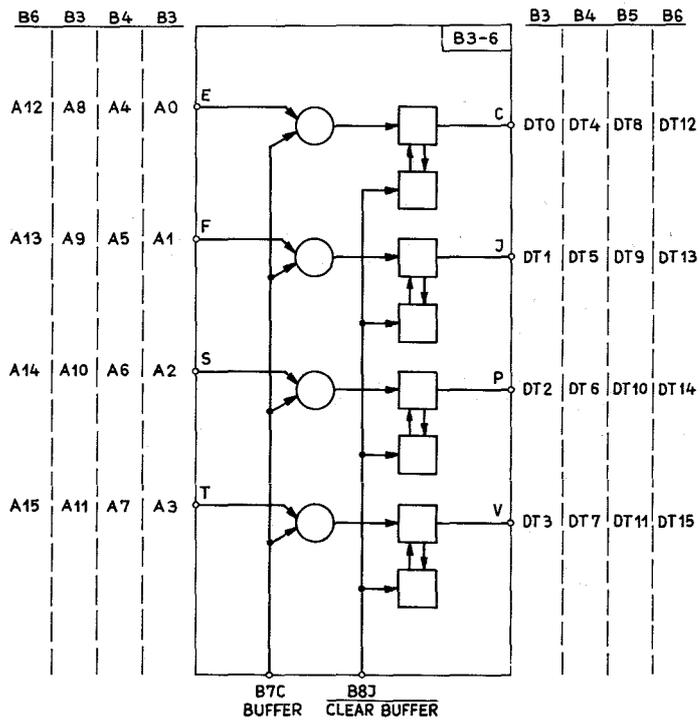


2. Schaltbilder

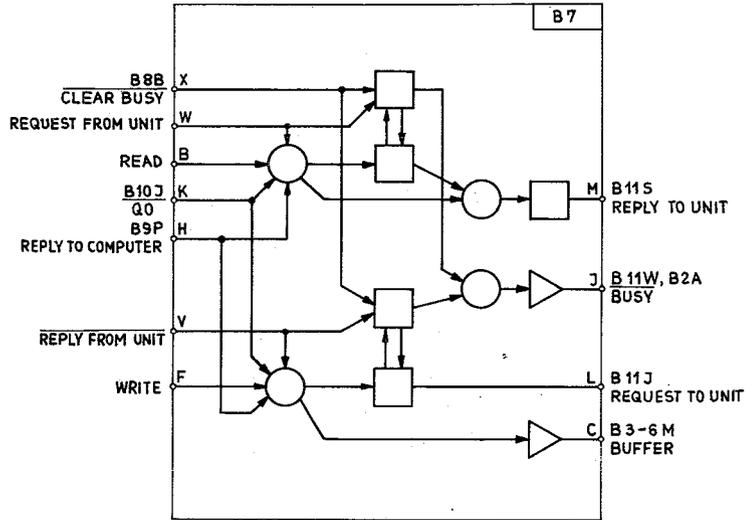
Unit Selection Buffer



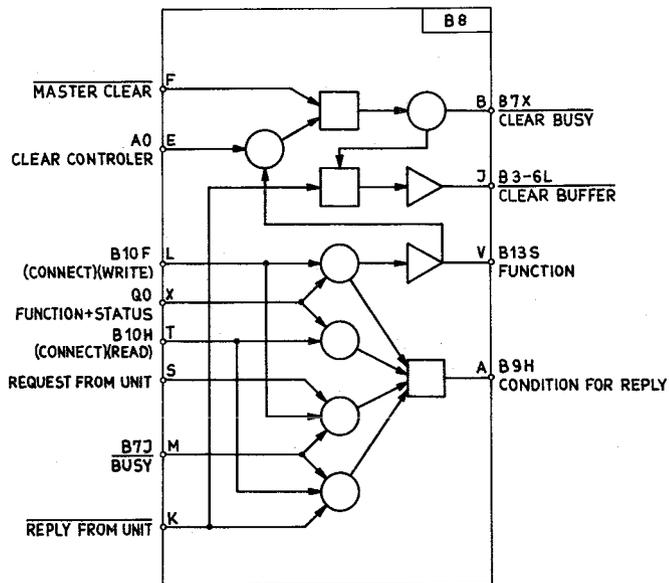
Data-Output-Buffer



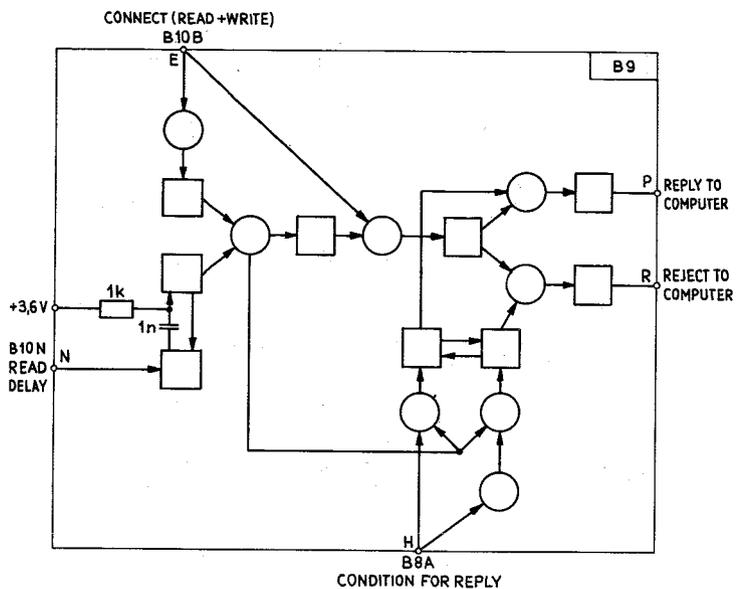
Request-Reply to Unit



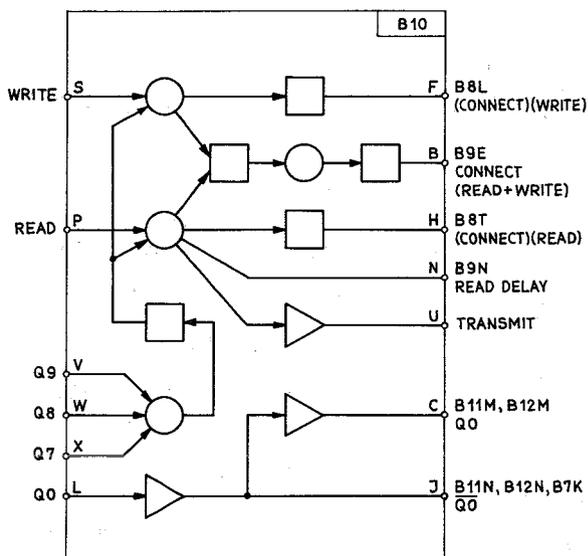
Reply and Clear Conditions



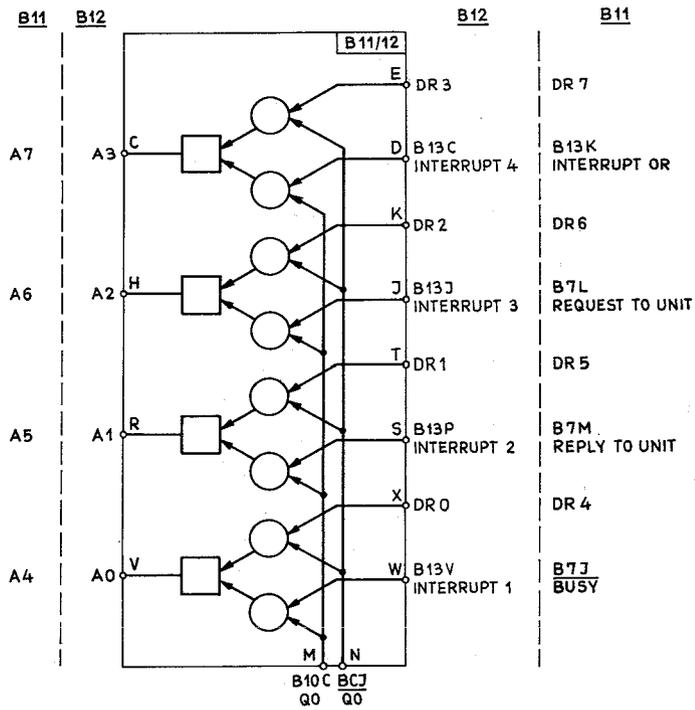
Reply - Reject - Switch



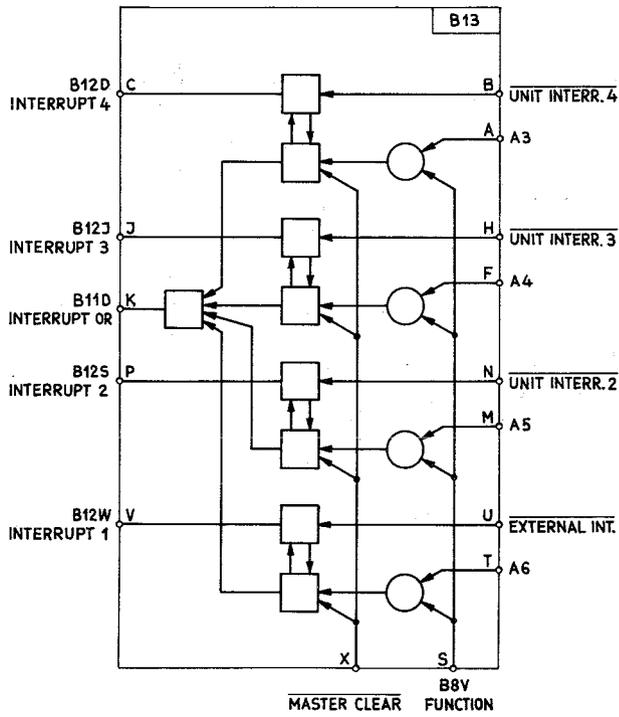
Connect



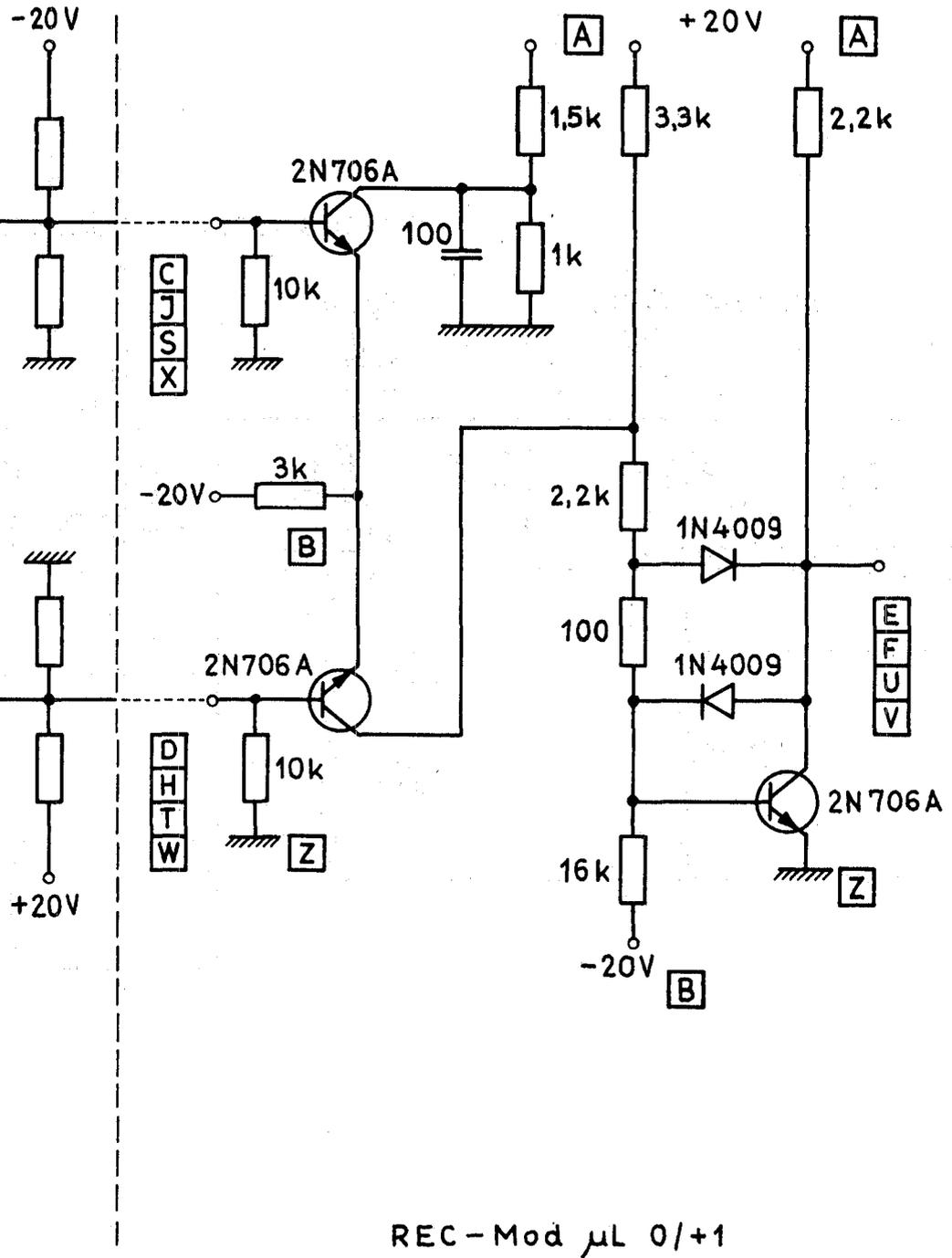
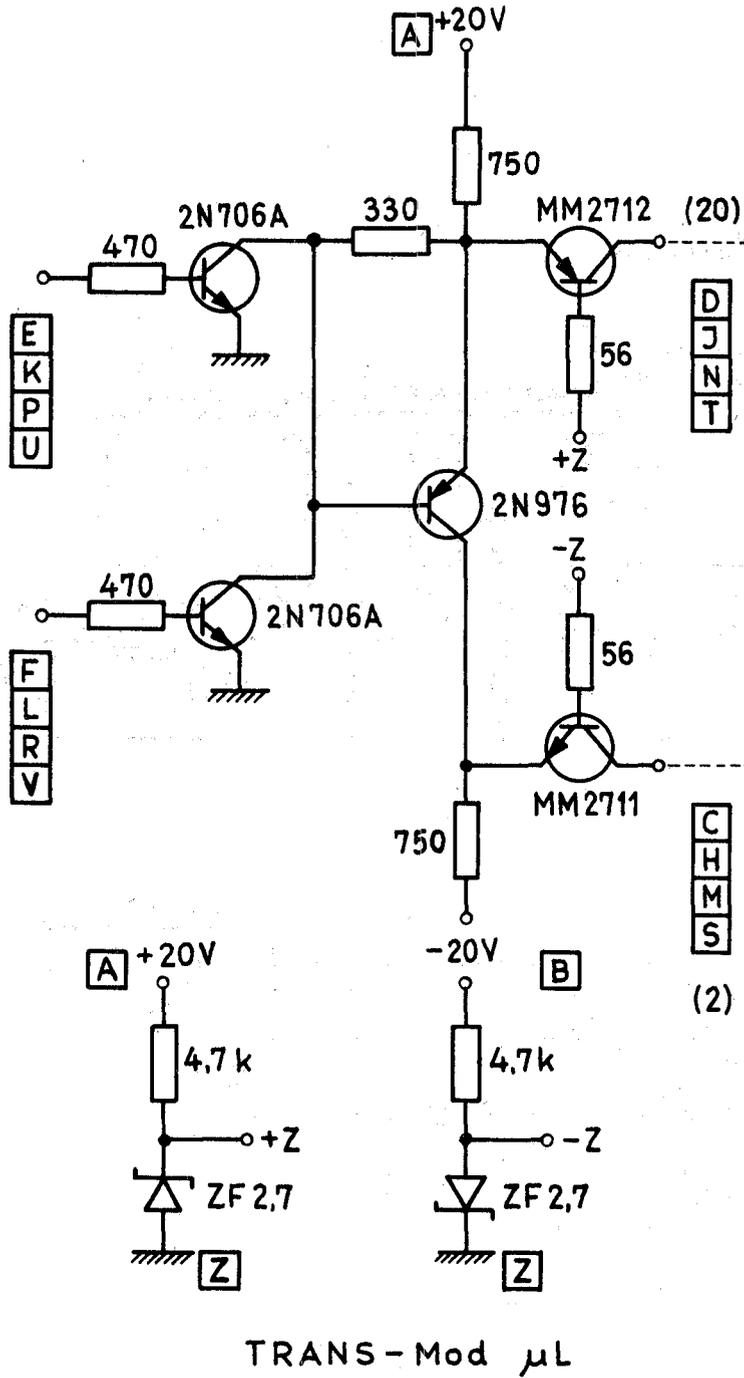
Data-Status-Switch



Interrupts



Transmitter und Receiver zur Datenübertragung mit dem Rechner



TRANS-Mod μ L

REC-Mod μ L 0/+1

LITERATUR

- 1) Proc. Informal Meeting on Filmless Spark Chamber Techniques and Associated Computer Use, CERN 64-30 (64)
- 2) H. Gelernter, Nuovo Cim. 22, 631, (61)
- 3) B.C. Maglic, F.A. Kirsten, NIM 17, 49, (62)
- 4) F. Krienen, NIM 16, 262, (62)
- 5) S. Galster et al., NIM 46, 291, (76)
- 6) G. Gianelli, NIM 31, 29, (64)
V. Perez-Mendez, J.M. Pfab, NIM 33, 141, (65)
- 7) J. Fischer, IEEE Trans. NS-12 no. 4 (1965) 37
- 8) W.A. Higinbotham, IEEE Trans. NS-12 no. 4 (1965) 199
- 9) J.M. Meek, J.D. Craggs, Electrical Breakdown of Gases, S 55, Oxford (53)
- 10) J.W. Cronin, G. Renninger, Proc. Berkeley 271 (60)
- 11) F. Schneider, K.H. Höhne, NIM 20, 152, (63)
- 12) W.K. Brown, T.H. Jensen, NIM 27, 259, (64)

Herrn Professor Dr. H. Schopper möchte ich für die Anregung dieser Arbeit, für stets förderndes Interesse und viele wertvolle Hinweise vielmals danken.

Den Mitgliedern der Experimentiergruppe zur Elektron-Nukleon-Streuung am DESY, S. Galster, G. Hartwig, H. Klein, J. Moritz, K.H. Schmidt und D. Wegener, schulde ich für vielfältige Unterstützung dieser Arbeit besonderen Dank.

Herrn P. Adler danke ich für unentbehrliche Mitarbeit bei Entwicklung und Bau der Funkenkammern und Elektronik.