



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

Institut für Plasmaphysik
Association EURATOM-KFA

**Ein hochauflösendes System zur analogen
Aufzeichnung und digitalen Verarbeitung
von Meßwerten in der Fusionsforschung**

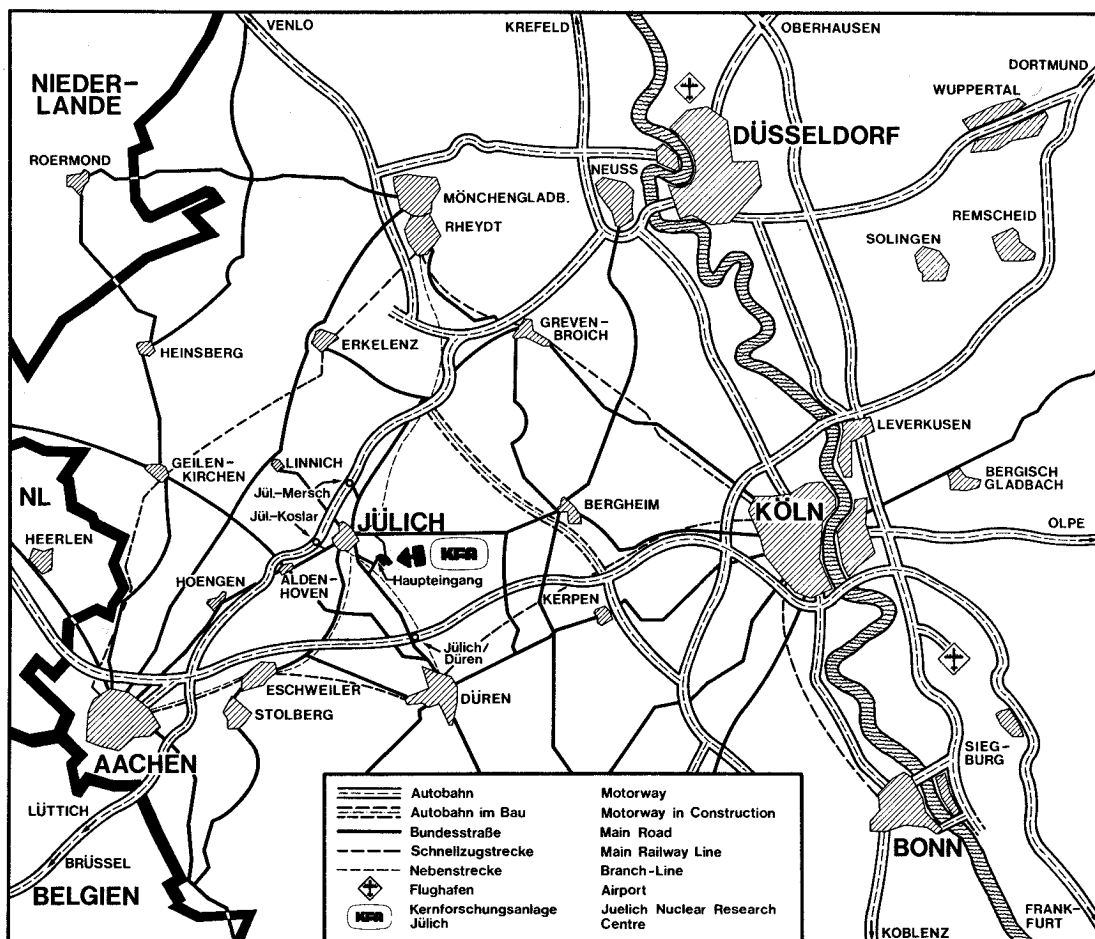
von

M. Korten, M. Lochter, W.R. Lange

Jül - 1909

April 1984

ISSN 0366 - 0885



Als Manuskript gedruckt

Berichte der Kernforschungsanlage Jülich - Nr. 1909

Institut für Plasmaphysik Association EURATOM-KFA Jül - 1909

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)

Telefon: (0 24 61) 610 · Telex: 8 33 556 kf d

Korrekturblatt

Seite 8

2. Zeile

statt: Randzone die Wand
Randzone und die Wand

Seite 25

7. Zeile

statt: fünf aufeinanderfolgende..... als auch
fünf aufeinanderfolgende Mark-Amplituden
= 1, acht aufeinanderfolgende Mark-Amplituden
= Position-Identifizier) als auch

Ein hochauflösendes System zur analogen Aufzeichnung und digitalen Verarbeitung von Meßwerten in der Fusionsforschung

von

**M. Korten, M. Lochter
W. R. Lange***

*** Lange Electronic GmbH
D-8037 Neu-Esting**

Rep 169603

Unter gleichem Titel wurde ein Vortrag gehalten bei der:
Europäischen Konferenz und Fachausstellung '84
für technisches Messen und Telemetrie
European Telemetry Conference (ETC), 21.-24. Mai 1984,
Böblingen, Federal Republic of Germany

Zusammenfassung

Bei Großexperimenten zur Untersuchung von Fragen zur kontrollierten Kernfusion treten vielfältige physikalisch-technische Meßprobleme auf, die wegen ihrer Komplexität und ihres Umfanges nur mit Hilfe rechnergestützter elektronischer Systeme bearbeitet werden können. Die überwiegende Anzahl der Meßgrößen werden durch on-line Datenerfassungssysteme digitalisiert und für die weitere Verarbeitung auch digital gespeichert. Bei hoher zeitlicher Auflösung und langen Aufzeichnungsdauern stellen die dabei anfallenden großen Datenmengen jedoch ein quantitatives Problem dar. Ein kostengünstiger Ausweg bietet sich hier durch die Möglichkeit der analogen Aufzeichnung, wenn es möglich ist, nach beendeter Aufzeichnung interessierende Teilbereiche des analogen Speichermediums aufzusuchen und sie gezielt der digitalen Weiterverarbeitung zugänglich zu machen. Für spezielle Meßaufgaben am Fusionsexperiment TEXTOR der KFA Jülich wird eine analoge Speichereinheit verwendet, die ähnlich wie ein "Fahrtenschreiber" in 8 Kanälen analoge Meßwerte mit einer zeitlichen Auflösung von 100 kHz über einige Experimentiertage analog aufzeichnen kann und die Möglichkeit bietet, vor der digitalen Weiterverarbeitung interessierende Ereignisse wieder aufzufinden und mit gleicher Genauigkeit mit Hilfe des Rechners zu analysieren. Das hierfür eingesetzte analoge Bandgerät läßt sich über das TEXTOR Rechnersystem von einem Terminal fernsteuern, die erfaßten Daten können dann in graphischer Form auf dem Bildschirm dargestellt und in reduzierter Form zur weiteren Verarbeitung digital gespeichert werden. Es wird das Gesamtsystem beschrieben bestehend aus der Bandmaschine mit Analogmeßverstärkern, Zeitcode-Generator/-Leser, Band-Steuer und Sucheinheit mit Rechnerinterface und dem digitalen Datenerfassungs- und verarbeitungssystem. Erfahrungen im Betrieb werden erläutert und anhand von Meßbeispielen aus der Sicht des Benutzers dargestellt.

ABSTRACT

A SYSTEM WITH HIGH RESOLUTION FOR ANALOGUE RECORDING AND DIGITAL PROCESSING OF MEASURED VALUES IN FUSION RESEARCH

On the way of the development of a fusion power reactor, the research facility TEXTOR is a large scale physical experiment to investigate the parameters of a fusion plasma and the physical and technical aspects of plasma containment, especially in the field of plasma-wall interaction. Complexity and amount of physical and technical data to be recorded during TEXTOR operation require support of a powerful computer system for data aquisition, analysis, storage and display. Most of the physical quantities are recorded digitally and stored online on the computer's mass storage devices for further processing.

In addition to the scientific objectives, monitoring and maintenance, interface problems and machine faults rise complex measurement problems for the manyfold technical components of the device. Here, a high temporal resolution of the order 100 kHz sampling rate is required over a period of 4 sec for several parallel signal channels, which would cause a large amount of data to be stored and processed using pure digital recording methods. However, it is in the nature of the problem that only small but previously unknown parts of the information are of relevance. An inexpensive way of combining a high resolution long range recording with moderate overhead for digital processing and storage was found by using a hybrid system of an analogue tape recorder combined with a computerized digital acquisition and processing system.

In a first phase, the signals are recorded offline over the full range of TEXTOR discharges selecting the appropriate recording tapespeed. A tape search unit allows for flexible control of the tape recorder for precise access to the recorded data. In parallel, there is an online digital recording of the monitor signals, however, with considerably less time resolution.

Upon evidence of, i.e. machine faults, the digital signals are used to preselect the relevant intervals to be retrieved for detailed processing. The output signals of the tape recorder are fed into the analog-to-digital converters of the data acquisition system, where they are processed and displayed with the requested resolution.

This paper describes the complete recording and processing system consisting of the tape recorder, the time code generator, the tape search control unit and the digital data acquisition and computer system. We describe the operational experience obtained so far and display typical examples.

I N H A L T

1.0	EINLEITUNG	7
1.1	Ziele der Fusionsforschung	7
1.2	Beschreibung von TEXTOR	8
1.2.1	Wirkungsweise des Poloidalfeldsystemes	8
2.0	DATENERFASSUNG BEI TEXTOR	10
2.1	Überblick	10
2.2	Diagnostikdatenerfassung	11
2.3	Spezielle Probleme Hochauflösender Datenerfassung	13
3.0	MAGNETBANDAUFZEICHNUNG	13
3.1	Gerätekonfiguration	13
3.1.1	Bandmaschine	15
3.1.2	Zeitcodesystem	15
3.1.2.1	Zeitcodegenerator/Leser	15
3.1.2.2	Bandsteuereinheit	16
3.1.3	Kabeladaptereinheit	16
3.2	Arbeitsweise bei Aufzeichnung und Wiedergabe	16
3.2.1	Aufzeichnung	17
3.2.1.1	Handaufzeichnung	17
3.2.1.2	Aufzeichnung unter Rechnerkontrolle	18
3.2.2	Wiedergabe	19
3.2.2.1	Wiedergabe mit Handsteuerung	19
3.2.2.2	Wiedergabe unter Rechnerkontrolle	20
3.2.3	Auswertung von Meßdaten	20
3.2.3.1	Die Schnittstelle Bandsucheinheit, Bandgerät, Rechnersystem	21
3.2.4	Genauigkeiten	23
3.2.4.1	Fehlerabschätzung für Zeitcode	24
3.3	Meßbeispiel	26
3.3.1	Meßaufgabe	26
3.3.2	Aufzeichnung	26
3.3.3	Wiedergabe und Auswertung	27
4.0	LITERATURVERZEICHNIS	31
5.0	BILDVERZEICHNIS	33

1.0 EINLEITUNG

1.1 Ziele der Fusionsforschung

Die Bemühungen zur Sicherstellung des technischen Energieangebotes haben dazu geführt, daß schon seit vielen Jahren auch in der Bundesrepublik Deutschland Forschungsarbeiten zur kontrollierten Kernfusion durchgeführt werden. Dabei handelt es sich um die Aufgabe, die bei der Verschmelzung leichter Atomkerne freiwerdende Energie technisch nutzbar zu machen, indem Fusionsprozesse, wie sie auf der Sonne stattfinden, auf der Erde nachgebildet werden.

Nach einer Phase langwieriger Untersuchungen verschiedener Konzepte zur Einschließung heißer Plasmen¹⁾, dem "Brennstoff" künftiger Fusionsreaktoren, haben sich die "Tokamak"-Anlagen²⁾ zum quasi-stationären Einschluß unter den anderen hervorgehoben. Auch die Versuchsanlage TEXTOR³⁾, die im Institut für Plasmaphysik der Kernforschungsanlage Jülich betrieben wird, ist ein Tokamak /1/. An TEXTOR sollen im Rahmen des europäischen Forschungsprogrammes Fragen und Probleme zur Plasma-Wand-Wechselwirkung untersucht werden, deren Kenntnisse zum Bau eines Fusionsreaktors unumgänglich sind /2,3/. Denn selbst bei bestmöglicher Einschließung heißer Plasmen werden energiereiche Teilchen des Plasmas quer zum Magnetfeld zu den Gefäßwänden transportiert und beschädigen dort in Verbindung mit Neutronenbeschuß und elektromagnetischer Strahlung die Oberfläche. Andererseits aber verunreinigt abgetragenes Wandmaterial das Plasma. Bei Überschreiten eines kritischen Wertes der Verunreinigungskonzentration ist eine Zündung der thermonuklearen Reaktion nicht mehr möglich. Ein Reaktor würde erlöschen.

- 1) Plasma ist ein vollständig ionisiertes Gas, ein Reaktor wird mit einem Gemisch aus Deuterium und Tritium arbeiten.
- 2) Die erste Anlage dieser Art wurde in der UDSSR gebaut und "TOKAMAK" (großer Strom) genannt.
- 3) Torus Experiment for Technology Oriented Research

Ziel der Forschungsarbeiten an TEXTOR ist es deshalb, Plasma-randzone die Wand so zu gestalten und zu beeinflussen, daß die im Plasma umgesetzte Heizleistung ohne Beschädigung der Wand ausgekoppelt werden kann, und daß der Zustrom schädlicher Verunreinigungen auf die für einen Fusionsreaktor zulässigen Werte begrenzt wird.

1.2 Beschreibung von TEXTOR

In Bild 1 ist der - für alle Tokamaks typische - Aufbau von TEXTOR zu sehen. Das torusförmige Plasma wird von einem Vakuumgefäß aus Edelstahl umgeben. Die vielen Stützen am Gefäß dienen der diagnostischen Beobachtung des Plasmas und dessen Randschicht sowie als Pumpstützen für 4 Vakuumpumpen. 16 Toroidalfeldspulen umfassen das Gefäß, dem kleinen Umfang folgend, und erzeugen ein Führungsfeld in toroidaler Richtung bis zu 2.6 Tesla.

Beherrscht wird das Bild von den 6 Rückschlußjochen des Transformators, der zusammen mit den Poloidalfeldspulen, die parallel zum großen Torusumfang verlaufen, einen Plasmastrom erzeugt und aufrecht erhält. Auf Notwendigkeit und Arbeitsweise des Poloidalfeldsystems soll im folgenden etwas näher eingegangen werden, weil das in Absatz 3.3 beschriebene Meßbeispiel elektrische Signale aus einer Energieversorgung des Poloidalfeldsystemes darstellt.

1.2.1 Wirkungsweise des Poloidalfeldsystemes

Zur Aufrechterhaltung und Stabilisierung des Plasmastromes ($I_p = 500 \text{ kA}$) ist ein von außen aufzubringendes Gleichgewichtsfeld erforderlich, an welches hohe Anforderungen bezüglich seiner Geometrie und seiner Dynamik gestellt werden. Diese Anforderungen führen bei TEXTOR zu einem Spulensystem, welches aus mehreren Spulenpaaren besteht, die symmetrisch zur Äquatorebene der Maschine angeordnet sind. Es sind dies im Einzelnen (siehe Bild 1):

- Heizspulen auf dem Eisenkern (H)
- Vertikalfeldspulen (V) außerhalb der Toroidalfeldspulen
- Korrekturfeldspulen (KZ, KR) innerhalb der Toroidalfeldspulen in Gefäßnähe.

Das Hauptvertikalfeld wird durch die H- und V-Spulen erzeugt, beträgt maximal 130 mTesla und kann mit Ausregelzeiten im Bereich von einigen 10 msec geregelt werden. Die Korrekturspulensysteme korrigieren die Plasmalage in horizontaler (KZ) und in vertikaler (KR) Richtung und sind in der Lage, durch ihre speziellen Stromversorgungen in der Zeit von < 5 ms einen Feldhub von ± 10 mTesla (KZ) mit Totzeiten 250 μ sec zu erzeugen. Schnelle Plasmaauslenkungen (Zeiten < 2 ms) werden durch passive Stabilisierung des Stahlgefäßes und der Korrekturspulen in vertretbaren Grenzen (± 0.5) cm gehalten. Dies ist gerade bei Untersuchungen von Fragen der Plasma-Wand-Wechselwirkung besonders wichtig, weil nur bei hinreichend kleinen Auslenkungen unerwünschte Wandberührungen vermieden und definierte Abstände Plasma/Wand eingehalten werden können.

Die Stromversorgungen zur Beeinflussung der Plasmalage bei TEXTOR sind als zwangskommutierte Thyristorbrücken aufgebaut, die aus einem Gleichspannungszwischenkreis gespeist werden. Dieser sog. 4-Quadranten-Steller hat durch die gegebenen Ein- und Ausschaltverzugszeiten beim Zusammenwirken der einzelnen Leistungsbaulemente und durch die Wahl des speziellen Steuerverfahrens ein transientes Spannungsschaltverhalten (Taktfrequenz bis zu 2 kHz), das die Grenzen der dynamischen Stromverstellung in der Last (Korrekturfeldspulen) vorgibt. Auf die Wirkungsweise der 4-Q-Steller soll hier nicht näher eingegangen werden. /4,5/

Alle Magnetfeldspulen und die dazugehörigen Energieversorgungen sind bei TEXTOR so ausgelegt, daß ein Plasma für mehrere Sekunden erzeugt und aufrechterhalten werden kann. Die maximale Repetitionszeit der sog. Plasmaentladungen beträgt 5 Minuten, sodaß etwa 80 Entladungen (sog. "Schüsse") an einem normalen Arbeitstag möglich sind.

Bild 2 zeigt eine Gesamtansicht der TEXTOR-Maschine. Im Zuge des Forschungsprogrammes wurde inzwischen - ähnlich wie in der Halle eines Forschungsreaktors - der hier noch freie Raum um TEXTOR zunehmend mit Meßapparaturen und anderen Zusatzgeräten völlig belegt.

2.0 DATENERFASSUNG BEI TEXTOR

2.1 Überblick

Steuerung und Datenerfassung werden an der Anlage TEXTOR unter Rechnerkontrolle durchgeführt. Das Gesamtsystem gliedert sich in drei Gruppen (Bild 3) und zwar:

- Fernbedienung und Anzeige
- die Ablaufsteuerung
- und die Diagnostik Datenerfassung und Verarbeitung.

Die Gruppe Fernbedienung und Anzeige stellt ein leistungsfähiges Instrument zur Anzeige und Veränderung von Systemgrößen des Experimentes TEXTOR auf Rechnerbasis dar. Eingaben über "touchpanels" und Ausgaben über Farbbildschirme ermöglichen eine komfortable Einstellung von z. B. Temperaturen, Strom-, Spannungs-, Feldstärken und Füllgasdrücken. Die Erfassung und Speicherung dieser Daten dient der Dokumentation und ist die Voraussetzung für eine rechnergeführte Systemüberwachung. Sollwerte können vor der TEXTOR Entladung eingegeben und die Zustände nach dieser abgefragt werden.

Die Ablaufsteuerung umfaßt Verriegelungen und starre Ablaufkontrollen der einzelnen Anlagensubsysteme, wie z. B. das Vakuumsystem oder die Systeme zur Erzeugung der Magnetfelder. Dies gilt sowohl lokal als auch auf systematischer Ebene, wenn alle vorab eingestellten Parameter unabhängig voneinander wirksam werden.

Die Datenerfassung und -verarbeitung Diagnostik umfaßt alle die Meßsysteme, die, vom gegebenen Maschinenzustand ausgehend, zur Lösung wissenschaftlicher Fragestellungen

eingesetzt werden /8,9/. Auf Grund der wechselnden Anforderungen in diesem Bereich ist diese Gruppe als offenes und dezentrales System konzipiert. Jedes der angeschlossenen diagnostischen Subsysteme kann unabhängig voneinander bei Nutzung zentraler Rechnerresourcen über interaktive Terminals gesteuert und bedient werden. Das System Diagnostik Datenverarbeitung ist die zentrale Anlaufstelle zur Abspeicherung und Archivierung aller Daten, die zur Bewertung des Fusionsplasmas von Wichtigkeit sein können. Über eine Rechnerkopplung erhält der Diagnostikrechner entladungsbezogene Steuerungs- und Statusinformationen vom System Fernbedienung und Anzeige. Sie werden zusammen mit allen "Schuß"-bezogenen Rohdaten der Diagnostik für die Auswertung verwendet, die sich jedoch auf dieser Anlage im Schwerpunkt auf die nach einer Entladung unbedingt notwendigen Rechenprozesse beschränkt.

Für weiterführende Auswertung der Daten, z. B. den Anschluß großer Plasmamodellcodes, und zur Archivierung im Rahmen eines Datenbanksystems werden die Daten an das Großrechner-system der KFA übertragen.

2.2 Diagnostikdatenerfassung

Das System der Diagnostik Datenerfassung und -verarbeitung besteht aus den einzelnen Rechnereinheiten und den Schnittstellen zur Prozessperipherie. Als Knotenpunkt für alle angeschlossenen Terminals ist der Zentralrechner Diagnostik die Schnittstelle des Gesamtsystems zum Benutzer. Es ist ein Rechner vom Typ VAX 11/780 mit einem Hauptspeicher von 4 Megabyte und einem Gleitkommarechenwerk. Als Peripherie steht ein Magnetbandgerät sowie 2 Stapelplattenlaufwerke mit einer Kapazität von je 300 Mbyte zur Verfügung. Das unter VAX/VMS betriebene System bietet den Benutzern eine Vielzahl von Dienstprogrammen, die ihn bei der Ansteuerung seiner Meßsysteme und der nachfolgenden Datenerfassung unterstützen.

Für die Auswertung bieten Bibliotheken von Hilfsroutinen dem Benutzer individuelle Gestaltungsmöglichkeiten bei den fast ausschließlich in der Sprache FORTRAN geschriebenen Programmen.

Dem Rechner VAX 11/780 vorgelagert sind mehrere Minirechner vom Typ PDP 11, die als front-end Rechner für die Prozessperipherie dienen. Es sind dies ein PDP 11/44, ein PDP 11/45 und mehrere LSI 11/23 Systeme, die je nach Auslastung oder spezieller Aufgabenstellung Teilgebiete der diagnostischen Prozesswelt anschließen. Diese Rechner führen die prozessbezogenen Echtzeitaufgaben durch und sind mit dem Hauptrechner über eine schnelle synchron serielle Schnittstelle verbunden, die mit Hilfe des Kopplungssystems DECNET den Informationsaustausch gewährleistet. Entsprechend ihren Aufgaben verfügen diese Rechner nur über wenig rechnerbezogene Peripherie.

Die Prozessperipherie ist neben einem kleineren Teil, der über die V24 Norm und der Terminalschnittstelle zugänglich ist, nach der CAMAC-Norm ausgeführt. Die CAMAC-Norm wurde in Zusammenarbeit mehrerer europäischer Kernforschungszentren als universelles Schnittstellensystem zwischen beliebigen Prozessen und beliebigen Rechnern geschaffen /10/ CAMAC ist ein modulares System aus einfachen Funktionseinheiten, die zur Verwirklichung komplexer Funktionen zusammengefügt werden können. Die Funktionseinheiten werden als Einschübe eines normierten 19" Überrahmens eingesetzt, indem sie über den CAMAC Datenweg der sog. Rahmensteuerung zugänglich sind. Der vertikale Datenweg umfaßt alle angeschlossenen Rahmensteuerungen und führt sie einem übergeordneten Steuergerät zu, welches die Schnittstelle zum Rechner bildet.

An der Anlage TEXTOR, wo diese einzelnen Rahmensteuerungen über Distanzen von bis zu 100 Metern in elektrisch störbehafteter Umgebung verteilt sind, wird zu deren Ankopplung an die übergeordnete Steuerung die serielle synchrone Übertragungsart gewählt, die die Verwendung von Glasfaserkabeln als Übertragungsmedium erlaubt. Auf diese Weise lassen sich nicht nur Störeinflüsse wirksam unterdrücken, sondern auch Potentialunterschiede zwischen den einzelnen Subsystemen und den zu ihnen gehörenden Rahmensteuerungen ausgleichen (Bild 4).

2.3 Spezielle Probleme hochauflösender Datenerfassung

Die digitale Aufzeichnung und Abspeicherung von Meßdaten stellt bei hoher zeitlicher Auflösung und langen Aufzeichnungsdauern ein quantitatives Problem dar. Bei einer gewünschten Zeitauflösung von 10 Mikrosekunden, bei 4 Sekunden Aufzeichnungszeit und 8 parallelen Datenkanälen ergibt sich eine Informationsmenge von 3.2 Megadaten. Bei ca. 100 Entladungen der Anlage TEXTOR pro Tag ergibt sich also eine Datenmenge, die sich mit rein digitaler Technik nur mit vergleichsweise hohem Aufwand an Rechnerkapazität und Speicherressourcen in vertretbarer Zeit beherrschen läßt. Andere preiswerte Aufzeichnungsmethoden sind entweder von der Speicherkapazität begrenzt, wie Transientenrekorder und Oszillographen, oder haben nicht die gewünschte zeitliche Auflösung, wie z. B. Linienschreiber.

Wenn jedoch in der Regel nur ein kleiner Teil der Informationsmenge von Interesse ist, und damit auf einen hohen Grad der Verfügbarkeit für die Daten als Ganzes verzichtet werden kann, andererseits aber dieser Teil nicht vorherbestimmbar ist, dann bietet die analoge Aufzeichnungsart über ein analoges Magnetbandgerät Vorteile.

Hier werden die zu erfassenden Signale zwar mit hoher Rate aufgezeichnet, von Interesse sind jedoch nur die seltenen Phasen, die z. B. ein Fehlverhalten der angeschlossenen Maschinenteile beschreiben. Dies bedeutet, daß nach einer groben Übersicht die detaillierte Auswertung auf Teilinformationen beschränkt wird, die dann aber in hoher Güte vorliegen müssen. Bei einer Aufzeichnungsgeschwindigkeit von 60 ips lassen sich auf einem Magnetband von 300 Metern Länge ca. 170 Entladungen des Experimentes TEXTOR unterbringen.

3.0 MAGNETBANDAUFEICHNUNG

3.1 Gerätekonfiguration

Bei der Auswahl der einzelnen Geräte zu einer in sich geschlossenen Konfiguration wurde von folgenden Anforderungen und Ausgangsvoraussetzungen ausgegangen:

Anforderungen:

- Aufzeichnen von analogen Daten (10 V bipolar) bis zu 100 kHz in 8 Kanälen
- Automatische Aufzeichnung mittels Steuerung durch das TEXTOR-Timingsystem
- Rechnersteuerung bei der Aufzeichnung und Wiedergabe, aber auch Handsteuerung
- Wiederauffinden und Korrelieren der einzelnen Daten mit einer Genauigkeit von min. 20 usec bezogen auf das Zeitsystem von TEXTOR
- Fahrbarer Aufbau zum Einsatz der Einheit an verschiedenen Orten

Ausgangsvoraussetzungen:

- TEXTOR wird in allen Abläufen von einem eigenen Zeitsystem gesteuert /6/. Eine direkte Übernahme der Zeitinformation in das zur Bandmaschine gehörige Zeitcodesystem wäre nur unter Einsatz von sehr hohen Mitteln zu verwirklichen gewesen.
- Das TEXTOR-Datenerfassungssystem sollte zur digitalen Aufzeichnung und Verarbeitung (z. B. analoge Darstellung) der analog gespeicherten Daten Verwendung finden.

Bild 6 zeigt ein Blockschaltbild der verwendeten Geräte für Aufzeichnung und Wiedergabe. Die im folgenden beschriebenen Geräte sind in einem fahrbaren Schrank fest installiert, sodaß die Magnetbandaufzeichnungseinheit an verschiedenen Orten für unterschiedliche Meßaufgaben eingesetzt werden kann.

Bild 7 zeigt eine Fotografie der gesamten Anlage. Die Geräte zur digitalen Aufzeichnung im TEXTOR - Datenverarbeitungssystem (CAMAC-Crate) können bei Bedarf im oberen Teil des Schrankes montiert werden. Dadurch wird allerdings die Bewegungsfreiheit der Anlage eingeschränkt, weil das CAMAC-Crate mit dem Glasfaserübertragungsring des Rechners verbunden werden muß (siehe Bild 5).

3.1.1 Bandmaschine

Die verwendete Bandmaschine (SABRE 80) ist eine Breitbandmaschine mit 14 Kanälen. Die Maschine ist mit einem 2-Ebenen-Bandantrieb ausgerüstet, sodaß beide Spulen auf einer Achse hintereinander angeordnet sind. Es können Spulen bis zu 14" Durchmesser verwendet werden. Die Breite des Magnetbandes ist 1 ". Es stehen 8 Bandgeschwindigkeiten von 15/16 inch pro Sekunde bis 120 ips (jeweils verdoppelt) zur Verfügung.

Zur Aufnahme und Wiedergabe wurden 3 Direkt-Kanäle (Bandbreite 0.2 - 300 kHz im Intermediateband bei 120 ips) und 6 FM-Kanäle (Bandbreite DC - 80 kHz bei 120 ips im IRIG Wideband Group 1) mit den dazugehörigen Aufnahme- und Wiedergabe-elektroniken installiert.

3.1.2 Zeitcodesystem

Das Zeitcodesystem besteht aus einem Zeitcodegenerator/Leser und einem Bandsteuergerät.

3.1.2.1 Zeitcodegenerator/Leser

Verwendet wurde ein Gerät der Marke DATUM Model 9310. Dieses Gerät kann IRIG-Zeitcodes generieren und lesen. Es ist als 19"-Einschub gefertigt. Alle Anschlüsse sind auf der Rückseite vorgesehen; die notwendigen Bedien- und Anzeigeelemente auf der Vorderseite. Zwei Zeitcodes sind wählbar: IRIG A (Trägerfrequenz 10 kHz, Auflösung 100 μ sec)

IRIG G (Trägerfrequenz 100 kHz, Auflösung 10 μ sec)

Nähere Angaben über standardisierte Zeitcodes sind in /7/ und in Absatz 3.2.4 zu finden.

Das Model 9310 arbeitet als Generator mit einem 1 MHz-Oszillator. Die Anzeigeelemente auf der Frontplatte zeigen 3-stellig "Tage" und je 2-stellig "Stunden" "Minuten" und "Sekunden". Der Zeitcodegenerator wird bei der Aufzeichnung vom TEXTOR-Timingsystem gestartet und gestoppt. Die 3-stellige Information "Tage" wird als "Versuchsnummer" verwendet und bei jedem Stop-Signal des Timingsystemes um "1" erhöht. Damit ist eine automatische Versuchsnummerncodierung

möglich. Die Verbindung zur Bandmaschine erfolgt über je eine Leitung zum Schreiben und Lesen auf einen Direkt-Kanal. Eine Verbindung zur Bandsteuereinheit ermöglicht die Weitergabe der vom Band gelesenen Zeitinformation.

3.1.2.2 Bandsteuereinheit

Verwendet wurde ein Gerät der Marke DATUM Modell 9241. Die Bandsteuer- und Sucheinheit übernimmt die notwendigen Steuerfunktionen zur Aufzeichnung der Daten und zum automatischen Suchen und Positionieren des Datenbandes nach einer eingestellten START- und STOP-Zeit. Das Gerät ist Rechnerschnittstelle für die gesamte Magnetbänderfassungseinheit. Der Betrieb von Hand ist über entsprechende Bedienungstasten an der Frontplatte ebenfalls möglich. Die Einstellungen der START- und STOP-Zeiten sind möglich an zwei unterschiedlichen Rastenschaltern von 100 μ sec bis 999 Tage, wobei die Information "Tage" wie oben beschrieben, als 3-stellige Versuchsnummer verwendet wird. Das Gerät ist als 19"-Einschub gefertigt; alle Anschlüsse sind auf der Rückseite vorgesehen, die Bedienelemente auf der Vorderseite.

3.1.3 Kabeladaptereinheit

Die Adaptereinheit dient als Benutzerschnittstelle für alle Meßsignale und Timingsignale. Sie enthält die entsprechenden Ein- und Ausgangsbuchsen und paßt die verschiedenen Stecker und Buchsen der Einzelgeräte auf die bei TEXTOR eingeführte Norm an. Außerdem enthält sie Abschirm- und Siebelemente zur Störunterdrückung. Die Verbindung zu den Einzelgeräten erfolgt von der Rückseite aus.

3.2 Arbeitsweise bei Aufzeichnung und Wiedergabe

Zur Handhabung der Magnetbandaufzeichnung ist die Hand- als auch die Fernsteuerung möglich. Bei Handsteuerung gibt es keine logische Verbindung zwischen dem Aufzeichnungssystem

und dem rechnergeführten Auswertesystem. Es ist als Vorteil anzusehen, daß die Aufzeichnung offline stattfinden kann, ein Rechneranschluß also erst später zum Zwecke der Auswertung erforderlich ist. Dennoch kann der Rechner als Fernbedienung für den Einsatz der Bandmaschine in radioaktiven Kontrollbereichen (TEXTOR-Bunker) und zur Protokollführung eingesetzt werden.

3.2.1 Aufzeichnung

Der zeitliche Ablauf der Aufzeichnung eines Versuches (sog. "Schuß" von 4 sec. Dauer) ist aus dem Timingdiagramm in Bild 8 ersichtlich. Zur Verdeutlichung des Ablaufes bei der Aufzeichnung sowohl unter Rechnerkontrolle als auch von Hand dient das Ablaufdiagramm in Bild 9.

3.2.1.1 Handaufzeichnung

Zunächst ist in die Bandmaschine ein Band einzulegen und, wenn es zum Teil schon bespielt ist, hinter die letzte Aufzeichnung zu positionieren. Diese Stelle kann entsprechend dem Ablaufdiagramm der Wiedergabe (Bild 10) gesucht und gefunden werden. Am Bandgerät ist die gewünschte Aufnahmegeschwindigkeit vorzuwählen.

Am Zeitcodegenerator sind folgende Einstellungen vorzunehmen:

- Nullstellen aller Zeiten
- Setzen der nächstfolgenden Schußnummer
- Schalter in "Generate-Mode"
- Vorwählen des gewünschten Zeitcodes (IRIG A oder IRIG G)

An der Bandsteuereinheit sind die folgenden Einstellungen vorzunehmen:

- Schalter auf "Local"
- Schalter auf "Time"
- Vorwahl der START-Zeit
- Vorwahl der STOP-Zeit
- Setzen von "Auto Record" und "Stop"

Nach diesen Manipulationen ist das System zur Aufzeichnung bereit und wird zur weiteren automatischen Aufzeichnung vom TEXTOR-Timingsystem synchron zum Experimentablauf gesteuert. Dabei ist der zeitliche Ablauf wie folgt:

Zu einem Zeitpunkt T_1 (wird von TEXTOR vorgegeben und liegt bei 7 sec. vor dem Schuß) erhält der Zeitcodegenerator einen Triggerimpuls und wird gestartet. Die Bandsteuereinheit hat als Beginn der Aufzeichnung (FWD-REC-Befehl an Bandmaschine) die Zeit T_2 fest eingestellt (100 msec). Zum Zeitpunkt T_3 hat die Bandmaschine ihre Sollgeschwindigkeit erreicht (Aufleuchten des "Phaselock"LED an der Bandmaschine). Diese Zeit $T_3 - T_2$ ist variabel und hängt u. a. vom erreichten Wickeldurchmesser und - natürlich - von der eingestellten Bandgeschwindigkeit ab. Durch einfache Versuche vor dem eigentlichen Einsatz kann sichergestellt werden, daß T_3 immer vor T_4 , dem eigentlichen "Schuß" liegt. T_5 ist der Zeitpunkt am Ende des Experimentes, zu dem keine weiteren Daten erwartet werden, die aufgezeichnet werden sollen. T_6 wird am Bandsteuergerät als "Ende der Aufzeichnung" eingestellt (Stop Befehl an Bandmaschine). Um Verschwendung von Bandaufnahmekapazität zu verringern, kann T_6 beliebig nahe an T_5 gelegt werden. Zum Zeitpunkt T_7 erhält das Zeitcodesystem einen weiteren Triggerimpuls vom TEXTOR-Timingsystem (der Zeitcodegenerator wird angehalten, die Zeitinformation auf "0" gesetzt und die Versuchsnummer um "1" erhöht); die Bandsteuereinheit geht wieder in den "Auto Record"-Mode über, sodaß bei einer neuen Zeit T_2 die Bandmaschine wieder starten kann.

3.2.1.2 Aufzeichnen unter Rechnerkontrolle

Alle im vorhergehenden Absatz erwähnten Operationen mit Ausnahme der folgenden können auch vom Rechner über die oben beschriebene Schnittstelle ausgeführt werden:

- Band einlegen
- Bandsteuereinheit auf "Remote" schalten

Während eines Versuches können jederzeit die aktuelle Zeit, die Versuchsnummer und der Status des Zeitcodesystems vom Rechner abgefragt werden. Außerdem kann der Rechner während der Aufzeichnung die Protokollführung über den Bandinhalt übernehmen und z. B. eine Liste mit Angabe der Schußnummer und evtl. spezifizierter Versuchszeiten ausgeben.

3.2.2 Wiedergabe

Die Wiedergabe aufgezeichneter Signale kann sowohl mit Rechnersteuerung als auch durch manuelle Einstellung der dazu notwendigen Parameter erfolgen. Zur Veranschaulichung der verschiedenen Operationen bei der Wiedergabe dient das Ablaufdiagramm in Bild 10 und das Timing-Diagramm aus Bild 8. Aufgrund des o.g. Protokolls lassen sich einzelne Bandstellen auswerten; dazu verfährt man wie folgt:

3.2.2.1 Wiedergabe mit Handsteuerung

Bei der Bandmaschine ist das entsprechende Band einzulegen und dann ggfs. anhand einer Buchführung über den Bandlängenzähler in die Nähe der interessierenden Stelle zu fahren. Dies ist insbesondere wichtig, wenn auf dem Band mehrmals die gleiche Schußnummer vorhanden ist. Die gewünschte Wiedergabegeschwindigkeit ist vorzuwählen. Am Zeitcodeleser sind folgende Einstellungen vorzunehmen:

- Einschalten des "Translate"-Mode
- "Error Frame Bypass" entsprechend der Bandgeschwindigkeit einstellen
- Einstellen der "Search"- und "Playback"-Filter entsprechend IRIG-Code und Bandgeschwindigkeit

An der Bandsteuereinheit sind die folgenden Einstellungen vorzunehmen:

- Schalter auf "local"
- Schalter auf "Norm" (Gerät verarbeitet nur dann Schußnummer und Zeitinformation)
- Vorwahl der Versuchsnummer

- Vorwahl der START-Zeit
- Vorwahl der STOP-Zeit

Des weiteren wird angegeben, ob nur diese Stelle aufgesucht werden soll (Positionierung für spätere Auswertung: "Search to Start"), die Bandstelle einmal ("Single Cycle") oder beliebig oft ("Recycle") abgespielt werden soll.

Durch Drücken der "Start"-Taste bei beiden Betriebsarten wird der Such- und Wiedergabemodus eingeleitet. Das Bandgerät wird im "Fast Reversed"- und "Fast Forward"- Mode vor die auszuwertende Stelle gefahren und dann im "Forward"-Mode abgespielt. Bei Erreichen der START-Zeit wird ein "Start-Time-Found"-Trigger an das aufzeichnende Gerät (z. B. ADC des TEXTOR-Datenerfassungssystems) ausgegeben. An der Bandsteuereinheit leuchtet das "Interval"-Lämpchen bis zum Erreichen der eingestellten STOP-Zeit auf. Bei dieser Zeit wird das Band gestoppt, die Wiedergabe ist beendet. Bei Wahl des "Recycle"-Mode wiederholt sich der Vorgang beliebig oft.

3.2.2.2 Wiedergabe unter Rechnerkontrolle

Alle im vorausgehenden Kapitel beschriebenen Operationen zur Wiedergabe lassen sich auch über einen Rechner steuern. Natürlich ist dann auch die Umschaltung von Aufzeichnung auf Wiedergabe jederzeit möglich, sodaß bei laufender TEXTOR-Anlage nach einem interessierenden Ereignis sofort die Auswertung der aufgezeichneten Daten dieses Ereignisses erfolgen kann, ohne den Betrieb der Anlage zu unterbrechen. Voraussetzung dafür ist natürlich auch, daß die Wiedergabekanäle der Bandmaschine mit dem ADC zur Aufzeichnung immer verbunden sind.

Der Ablauf ist dann wie in Absatz 3.2.2.1 beschrieben und wie in Bild 10 dargestellt.

3.2.3 Auswertung von Meßdaten

Die Auswertung der auf Magnetband aufgezeichneten Daten kann auf verschiedene Weise erfolgen und hängt mit davon ab, welches Wiedergabegerät verwendet wird. Wurden z. B. Daten mit hoher zeitlicher Auflösung (große Bandgeschwindigkeit)

aufgezeichnet, dann lassen sie sich nur abschnittsweise mit der gleichen Auflösung wiedergeben, weil im allgemeinen die Speicherkapazitäten der Wiedergabegeräte um Größenordnungen zu klein sind, um die Gesamtzeitdauer aufzunehmen. Ebenso muß bei digitaler Speicherung die Amplitudenauflösung der Wiedergabegeräte hinreichend genau sein. Eine Genauigkeit von 10 bit ist für die verwendeten Aufnahme- und Wiedergabe-elektroniken der Bandmaschine angemessen. Natürlich können auch Linienschreiber für die Wiedergabe verwendet werden. Ihre "Speichergröße" hängt ähnlich wie beim Magnetband von der Länge des Registrierpapiers ab.

Eine vollständige Auswertung eines Signales von z. B. 4 sec. Dauer und 10 kHz Bandbreite (siehe Meßbeispiel TEXTOR) ist aber nicht sinnvoll. Man würde dazu das Band um einen Faktor 100 langsamer als die Aufzeichnungsgeschwindigkeit abspielen, um so eine zeitliche Dehnung zu erreichen, die der zeitlichen Auflösung von >100 Hz des Linienschreibers entspricht. Bei einer Schreibgeschwindigkeit von 250 mm/sec würde dann eine Papierlänge von 100 m benötigt (und auszuwerten sein).

3.2.3.1 Die Schnittstell Bandsucheinheit, Bandgerät, Rechnersystem

Das zur Bandansteuerung, zur digitalen Erfassung und Zwischenspeicherung der Daten verwendete System besteht aus einem CAMAC Überrahmen (Bild 5) und, als allgemeiner Systembestandteil, der Rahmensteuerung und dem optoelektronischen Wandlermodul zum Anschluß der Glasfaserverbindung an das übergeordnete Steuergerät. Ein weiterer Teil besteht aus den Timingmodulen, die den Empfang systemweiter oder lokaler Zeitcodes gewährleisten und über die individuelle Einstellung von Verzögerungen und Pulsbreiten die Ablaufsteuerung des einzelnen Meßsystems ermöglichen. Speziell für die Ansteuerung des analogen Bandspeicherungssystems ist ein 16 bit Ein/Ausgaberegister (Typ Kinetic Systems 3061-E1B) eingesetzt. Das Gerät wurde ausgewählt, weil es zusätzliche Handshake Leitungen anbietet, die ein geeignetes Übertragungsprotokoll zur angeschlossenen und in ihren Schnittstelleneigenschaften fest vorgegebenen Bandsucheinheit

realisierbar macht. Die Ansteuerung geschieht durch Ausgabe eines 16 bit Datenwortes an die Bandsucheinheit, indem im Ein-/Ausgaberegister über die CAMAC Systemsteuerung ein 16 bit Wort aufgesetzt und dann über ein weiteres CAMAC Kommando ein Strobesignal übertragen wird. Ein Quittungssignal der Bandsucheinheit macht den Weg für ein weiteres Steuerkommando frei.

Die eigentliche Datenerfassung wird über die CAMAC Module vom Typ LeCroy 8212/8800 durchgeführt. Das System besteht aus dem "Datenlogger" mit 32 differentiellen hochohmigen Eingängen für Spannungen im Bereich ± 10 Volt, der die anliegenden Analogspannungen mit einer Auflösung von 12 bit bei maximalen Abtastraten von 40 kHz in digitale Werte umwandelt. Die angeschlossenen 4 Speichermodule ergeben einen Zwischenspeicher von insgesamt 128 Kiloworten. Dies ermöglicht es, bei 4 Eingangskanälen und 40 kHz Abtastrate bis zu 812 Millisekunden aufzuzeichnen. Andere Abtastraten und Kanalzahlen sind vorwählbar, wobei Abtastrate, Speichergröße und vorgewählte Kanalzahl in einem festen Verhältnis zueinander stehen.

Der Analog-digital-Wandler (ADC) wird zunächst über ein Rechnerkommando initialisiert, wodurch er in den Modus der kontinuierlichen Aufzeichnung mit zyklischer Speicherbelegung übergeht. Auf einen Stoppuls hin, der durch das Erreichen der gewünschten Stelle auf dem Band gekennzeichnet wird, schaltet das Gerät in die Posttriggerphase um und stellt nach Ablauf einer vorgegebenen Zeit die weitere Wandlung ein.

Im Folgenden werden die Zwischenspeicher vom Rechner her ausgelesen und damit die Daten für die weitere Auswertung verfügbar. Mit Hilfe einer für das TEXTOR System entwickelten graphischen Software können die Signale nun in flexibler Form auf den interaktiven Bildschirmgeräten (TEKTRONIX Typ 4025) dargestellt und untersucht werden.

3.2.4 Genauigkeiten

Bei Erreichen der "Start"- bzw. der "Stop"-Zeit gibt das Zeitcodesystem verschiedene Signale ab (z. B. Puls- Pegel-änderung, Relais-Umschaltung, Interrupt). Diese Signale sollen als Trigger für den Beginn bzw. das Ende der Auswertung dienen. Eine Abschätzung der Genauigkeit dieser Pulse ist in der Regel von sehr großer Wichtigkeit.

Die bei TEXTOR erzielten Genauigkeiten des gesamten Systems bei Aufzeichnung und Wiedergabe (Bandmaschine, Zeitcode-generator/Leser, ADC, Plot) wurden experimentell ermittelt und stellen sich wie folgt dar:

1. Der Frequenzgang der FM- und Direktkanäle wurde vermessen (siehe auch Bild 11). Es zeigten sich keine Abweichungen zu den vom Hersteller angegebenen Werten. Bei einer Bandgeschwindigkeit von 60 ips ergab er sich bei den

- Direktkanälen zu 0.2 - 300 kHz und bei den
- FM-Kanälen von DC - 40 kHz

Dabei wurde eine Abweichung von 3 dB zugrunde gelegt.

2. Der Zeitversatz der Bandspuren, hervorgerufen durch die mechanische Anordnung der Tonköpfe, war zwischen allen FM-Kanälen und zwischen allen DIR-Kanälen kleiner als 1 μ sec. Zwischen DIR- und FM-Kanälen ergab sich der Versatz zu weniger als 30 μ sec. Da dieser Versatz mechanisch bedingt ist und in der Regel konstant bleibt, fällt er für die Genauigkeitsbetrachtungen nicht ins Gewicht, weil man ihn bei der Auswertung berücksichtigen kann.
3. Die Wiederauffindbarkeit der Signale ergab sich zu besser als 20 μ sec bei einer Abtastrate des Analogsignals von 20 kHz und 10-maligem Abspielen.

Dies ist für die Anforderungen bei TEXTOR ausreichend. Ein gewisser Zeitanteil davon muß sicher dem TEXTOR-Timingsystem zugeschrieben werden, welches zwar bei Zeiten < 1 sec eine Genauigkeit von ca. 2 μ sec aufweist, bei größeren Zeitbereichen aber größere Abweichungen erzeugt /6/.

3.2.4.1 Fehlerabschätzung für Zeitcode

Ein IRIG-Zeitcode besteht aus einer amplitudenmodulierten Trägerfrequenz, die z. B. bei IRIG A 10 kHz und bei IRIG G 100 kHz beträgt. IRIG-Zeitcodes beinhalten eine absolute und eine inkrementale Zeitinformation. Die absolute Zeitinformation (Auflösung 0.1 sec bei IRIG A und 0.01 sec bei IRIG G) ist BCD-codiert im Code enthalten, die inkrementale Information liegt in der Trägerfrequenz.

Ein Fehler in der absoluten Information kann für diese Betrachtung unberücksichtigt bleiben, weil

- der Zeicodeleser absolute Fehler im Code gleich erkennt.
- der zeitcodeleser eine sog. "ERROR FRAME BYPASS"-Logik enthält, durch die eine (einstellbare) Anzahl von Fehlern für die Weiterverarbeitung in Anzeige und digitalen Ausgängen überbrückt wird.

Die bei dieser Betrachtung auftretenden Fehler im inkrementalen Teil des Codes können sein:

- durch Drop-Outs bzw. Fehler des Generators erzeugt
- durch den Aufbau des Codes erzeugt
- Rauschen

Relevant für die jedem Code innewohnenden spezifischen Fehler kann nur der durch den Aufbau des Zeitcodes und die Art der Aufbereitung im Zeitcodeleser sein. Das Lesen eines Zeitcodes geschieht wie folgt (siehe auch Bild 12):

Eine Komparatorschaltung wandelt die Trägerfrequenz in eine Rechteckkurve um. Dies geschieht jeweils beim Nulldurchgang

der Trägerfrequenz. Das dadurch gewonnene Signal wird als Z_a bezeichnet. Die großen Amplituden (Mark-Amplituden) werden durch eine weitere Komparatorschaltung abgetastet und daraus eine Rechteckkurve gewonnen, die mit Z_c bezeichnet wird. Aus diesen beiden Rechteckfunktionen wird sowohl die absolute Information (zwei aufeinanderfolgende Mark-Amplituden = 0, fünf aufeinanderfolgende Mark-Amplituden = Position-Identifizier) als auch die inkrementale Information (Z_a bei IRIG A z. B. 10 kpps) gewonnen.

Die zeitliche Zuordnung der Mark- zu den Space-Amplituden ist zwar wichtig für die absolute Information, da der Zeitcodeleser aber diesen zeitlichen Bezug sowieso herstellt, kann dies bei der Fehlerabschätzung außer Betracht bleiben.

Der Hauptfehler beim Lesen des Zeitcodes liegt in der Genauigkeit der Rückgewinnung von Z_a aus der Trägerfrequenz. Bedingt durch die Komparatorhysterese ist ein exaktes Erfassen des Nulldurchganges nur durch einen sehr hohen Schaltungsaufwand (Kompensation der Hysteresis) möglich. In der Regel wird dieser Aufwand nicht getrieben, weil er für 99 % aller Anwendungen nicht nötig ist. Die Hysterese errechnet sich nach der Formel

$$\Delta U = \frac{R_1}{R_p} \cdot (U_{max} - U_{min})$$

Bei $R_1 = 2.2 \text{ k}\Omega$, $R_p = 100 \text{ k}\Omega$, $U_{max} = 10 \text{ V}$ und $U_{min} = 0.2 \text{ V}$ ergibt sich ein Wert von 0.216 V oder $\pm 0.1 \text{ V}$.

Im normalen Betrieb ergeben sich folgende Werte:

Space-Amplitude $\pm 0.5 \text{ V}$, Mark-Amplitude $\pm 1.5 \text{ V}$.

Daraus ergibt sich ein Schaltzeitpunkt T_k von ca. 12 grd. nach ca. 3.33 usec und ein Schaltzeitpunkt T_g von ca. 4 grd. nach 1.11 usec. Dies ergibt für den Zeitcode IRIG A eine Ungenauigkeit bzw. ein Jitter von 2.2 usec und für IRIG G 0.22 usec.

Eine weitere Fehlerquelle ist, wie schon erwähnt, das Rauschen. Da jedoch der Zeitcodeleser mit Tiefpassfiltern bzw. mit hochwertigen Bandpassfiltern betrieben wird, ist ein Rauschen im Vergleich zur Hysterese nennenswerten Größe gerade bei Anwendungen, die höchste Anforderungen an die Präzision des Zeitcodes stellen, praktisch auszuschließen. Ggfs. muß man durch exakte Messungen des Rauschens eine gezielte Fehlereingrenzung vornehmen.

3.3 Meßbeispiel

3.3.1 Meßaufgabe

Bei Plasmaentladungen können zeitlich nicht vorhersehbar und während der Gesamtschußdauer mehrmals verschiedene Instabilitäten auftreten, die u. a. zu sog. Disruptionen führen, welche dann ihrerseits häufig zum Stromabbruch und damit zum Ende der Entladung führen. Diese Disruptionen mit Stromabriß sind sowohl elektrisch als auch mechanisch gesehen die größten Belastungen der TEXTOR-Anlage. So treten z. B. Umfangsspannungen am Plasma auf, die um ein Vielfaches höher sind als die Zündspannung, und die über den Transformator in die Poloidalfeldsysteme gekoppelt werden. Obwohl alle Anlagenteile für solche Disruptionsspannungen ausgelegt sind, können die hohen Spannungsamplituden verbunden mit großen zeitlichen Änderungen zu Fehlern in den Energieversorgungen führen.

Die Meßaufgabe bestand nun darin, bei der Inbetriebnahme und über längere Betriebsperioden der TEXTOR-Anlage die Rück- und Auswirkungen von z. B. Plasmadisruptionen auf die Energieversorgungen der Korrekturfeldspulensysteme, die 4-Q-Steller, zu untersuchen. Dazu war es erforderlich, während vieler TEXTOR-Entladungen verschiedene elektrische Größen mit hoher zeitlicher Auflösung zu messen und ggfs. auszuwerten.

3.3.2 Aufzeichnung

Zur Analyse bei der o. g. Problemstellung wurden mit der Magnetbandaufzeichnungseinheit 7 elektrische Signale des KZ-Stellers aufgezeichnet (Bilder 14 - 16). Die Ausgangsspannung U_1 wurde, weil größere zeitliche Auflösung von Interesse war, neben einem FM- auch über einen Direktkanal aufgezeichnet. Alle anderen Kanäle waren FM-Kanäle. Die Bandmaschine lief - gewissermaßen als Fahrtenschreiber - mit einer Aufnahmegeschwindigkeit von 60 ips über mehrer Experimentiertage im "AUTO-RECORD"-Mode; dabei wurde sie synchron zu den TEXTOR-Schüssen vom TEXTOR-Timingsystem gesteuert.

Damit war die Aufzeichnung automatisiert und - bis auf das Einlegen neuer Bänder - ohne weitere Eingriffe des Benutzers möglich. Bei 60 ips ist die Bandbreite der DIR-Kanäle 0.2 - 300 kHz, die der FM-Kanäle DC - 40 kHz. Die Aufzeichnungszeit war wie im Timing-Diagramm (Bild 8) gezeigt, auf 4.5 sec eingestellt.

3.3.3 Wiedergabe und Auswertung

Zur Auswertung wurde das TEXTOR-Datenverarbeitungssystem verwendet. Der Benutzer hat dabei über ein Graphik-Terminal Zugriff zum Rechnersystem und somit die Möglichkeit, die auf Magnetband aufgezeichneten Daten graphisch als Zeitfunktionen darzustellen. Die Bilder 13 - 16 sind Verkleinerungen (Faktor 2 in der Fläche) der von einem angeschlossenen Kopierer ausgegebenen Plots.

Das Problem bestand nun darin, aus der großen Menge aufgezeichneter Daten bestimmte Stellen (Disruptionen) herauszufinden und so aufzubereiten, daß mit ausreichender Zeitauflösung interessierende Einzelheiten dargestellt werden konnten. Dazu waren andere Signale hilfreich, die - ohne große zeitliche Auflösung - mit dem Datenverarbeitungs- und Erfassungssystem aufgenommen wurden, aber dennoch die interessierenden Ereignisse deutlich zeigten und zeitlich eingrenzen ließen. Bei der Auswertung der 4-Q-Meßwerte wurde folgendermaßen vorgegangen:

Plotten von Umfangsspannung und Plasmastrom über den gesamten Zeitbereich der Aufzeichnungsdauer (Bild 13a). Diese beiden Signale wurden neben anderen über einen 32-Kanal ADC mit einer Samplerate von 1 kHz in einem 128 K-Memory gespeichert, sodaß eine Gesamtmeßzeit von 4 sec zur Verfügung stand.

Mittels der TEXTOR-Standard-Plot-Software wurde der interessierende Zeitbereich um einen Faktor 10 gedehnt (Bild 13b) dabei lassen sich die Zeitpunkte Beginn und Ende der

Disruption bestimmen. (In diesem Beispiel hat die Disruption zum Stromabriß bei 400 ms geführt). In der Zeit zwischen 280 und 400 ms müssen auch Rückwirkungen bei den KZ-Signalen zu finden sein, die mit der Bandmaschine aufgezeichnet wurden.

Bild 14a bestätigt das; hier wurde zur Verdeutlichung nochmal der gesamte Zeitbereich wie bei Ip/Ur geplottet. Die Sample-rate beträgt $SR = 1 \text{ kHz}$ und die Bandgeschwindigkeit $V = 60 \text{ ips} = \text{Aufnahmegeschwindigkeit}$. Die so abgespeicherte Information ist aber für eine genauere Auswertung nicht zu verwenden, weil die SR für die Dynamik der aufgenommenen Signale viel zu klein ist. Bild 14b ist eine Zeitdehnung der Information aus Bild 14a um den Faktor 5. Im Vergleich zu dem folgenden Bild (15a) wird deutlich, daß die SR zu klein sein muß, dadurch entsteht Fehlinformation, die im Allgemeinen mit "Aliasing" bezeichnet wird.

Bild 15a zeigt den gleichen Zeitausschnitt, der aber mit $SR = 20 \text{ kHz}$ abgetastet wurde. Die Wiedergabegeschwindigkeit des Bandes war unverändert $V = 60 \text{ ips}$. Aus dem Plot läßt sich "erahnen", daß wesentlich höhere Zeitauflösung möglich ist, die aber nur zum Teil durch Plotvergrößerung gewonnen werden kann. Wesentlich mehr ist zu erreichen durch langsames Abspielen des Magnetbandes, wie in Bild 15b dargestellt. Der Zeitbereich von 290 - 390 ms wurde bei einer 8-fach reduzierten Bandgeschwindigkeit von $V = 7.5 \text{ ips}$ digitalisiert; der Start-Trigger liegt bei $t = 290 \text{ ms}$, die Gesamtaufzeichnungsdauer des ADC (800 ms) stellt sich entsprechend reduziert zu $t_{ges} = 100 \text{ ms}$ dar.

Eine nochmalige Dehnung (Bild 16a) durch Geschwindigkeitsreduktion um den Faktor 4 ($V = 1 \frac{7}{8} \text{ ips}$) führt zu einer Gesamtaufzeichnungsdauer im ADC von 25 ms. Der Start-Trigger liegt bei $t = 290 \text{ ms}$. Die effektive SR für die Signale ist $32 * 20 \text{ kHz} = 640 \text{ kHz}$.

Schließlich wird mit einer Plotvergrößerung um den Faktor 100 (Bild 16b) ein Spannungspike, der mit einem DIR-Kanal aufgezeichnet wurde (Kanal 7) in seiner Struktur sichtbar

gemacht. Obwohl man dabei an die Grenzen der Auflösung kommt, läßt sich das Signal noch qualitativ auswerten. Die hochfrequente Spannung kann in den KZ-Stellern zu transienten Überspannungen führen, deren Analyse in der Aufgabenstellung vorgegeben war.

Eine Verbesserung der zeitlichen Auflösung ist unter folgenden Voraussetzungen möglich:

1. Signal mit $SR = 40 \text{ kHz}$ digitalisieren. Dies ist für die gleiche Zeitdauer $t_{\text{ges}} = 25 \text{ ms}$ möglich, wenn nur 4 Kanäle abgespeichert werden. Oder Möglichkeit:
2. Aufzeichnung mit verdoppelter Bandgeschwindigkeit
 $V = 120 \text{ ips}$.

Bei Wahl beider Möglichkeiten würde die effektive Samplerate um einen Faktor 4 erhöht; damit ergäbe sich eine $SR = 2.56 \text{ Mhz}$. Die Amplitudenauflösung ist durch Plotvergrößerung möglich; auf die Darstellung wurde hier verzichtet, um alle Kanäle übersichtlich in einer Graphik darzustellen.

Die Autoren haben sich bei den Mitarbeitern des Zentralinstitutes für Elektronik (ZEL) und des Institutes für Plasmaphysik (IPP) zu bedanken und tun dies sehr gerne. Insbesondere bei:

Herrn Dipl.-Ing. A. Seeger (ZEL) für mancherlei Anregung und sachliche Diskussion bei der Definition des Meßsystems anhand seiner speziellen Meßprobleme.

Herrn Dipl.-Ing. W. Schalt (ZEL) und seinem Mitarbeiter P. Birx für die Inbetriebnahme des Systems und für Messungen zur Feststellung seiner Arbeitsbereiche.

Frau R. Klein (IPP) für die wertvolle Mitarbeit bei der Erstellung der Erfassungs- und Auswertesoftware.

Herrn H. Lambertz (IPP) für die sorgfältige Durchführungen vieler Messungen und Hilfe bei deren Auswertung.

Nicht zuletzt natürlich auch bei Frl. H. Harperscheidt und Frau M. Hecht, die diesen Bericht geschrieben und bei der Anfertigung der Bilder mitgewirkt haben.

4. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Conrads, H., et. al.:
"TEXTOR", Proceedings 10th Symposium on Fusion
Technology, Padova, Italia, September 1978, A-1

- /2/ TEXTOR, Kurzbeschreibung
Herausgeber: Institut für Plasamphysik der
Kernforschungsanlage Jülich GmbH, 5170 Jülich,
Januar 1981

- /3/ Wolf G.H., Conrads, H.:
"Ein Prüfstand für die Fusionsforschung: TEXTOR" Bild
der Wissenschaft, Jahrgang 18, Heft 12, Dezember 1981,
S.46 - 57

- /4/ Seeger, A., Schalt W.:
"A Fast Response Unit For Vertical Plasma Position
Control in TEXTOR", Proceedings 10th SOFT, Padua, 9.78

- /5/ Seeger, A., Schalt, W., Lochter, M.:
"Über Die Dynamik Der Schnellen 4-Quadranten
Gleichstromsteller Zur Horizontalen Und Vertikalen
Beeinflussung Der Plasmalage Eines Tokamaks"
Interner Bericht, KFA 1980

- /6/ Sauer, M.:
"TEXTOR-Timingsystem" Kernforschungsanlage Jülich GmbH,
Zentrallabor für Elektronik, Interner Bericht KFA-ZEL-IB
501182

- /7/ Lange, W.R.:
"Die Besonderen Möglichkeiten Von Zeitcodes Bei Der
Meßwertaufzeichnung", Vortragsband zur 4. Telemetrie
Konferenz, Garmisch Partenkirchen, 1978, S. 62 - 69

/8/ Korten, M.:

"Retrieval and Handling of Online Acquired Data from the Tokamak Experiment TEXTOR", Proceedings of the 10th Symposium on Fusion Engineering, Philadelphia, USA, 1983

/9/ Korten, M.:

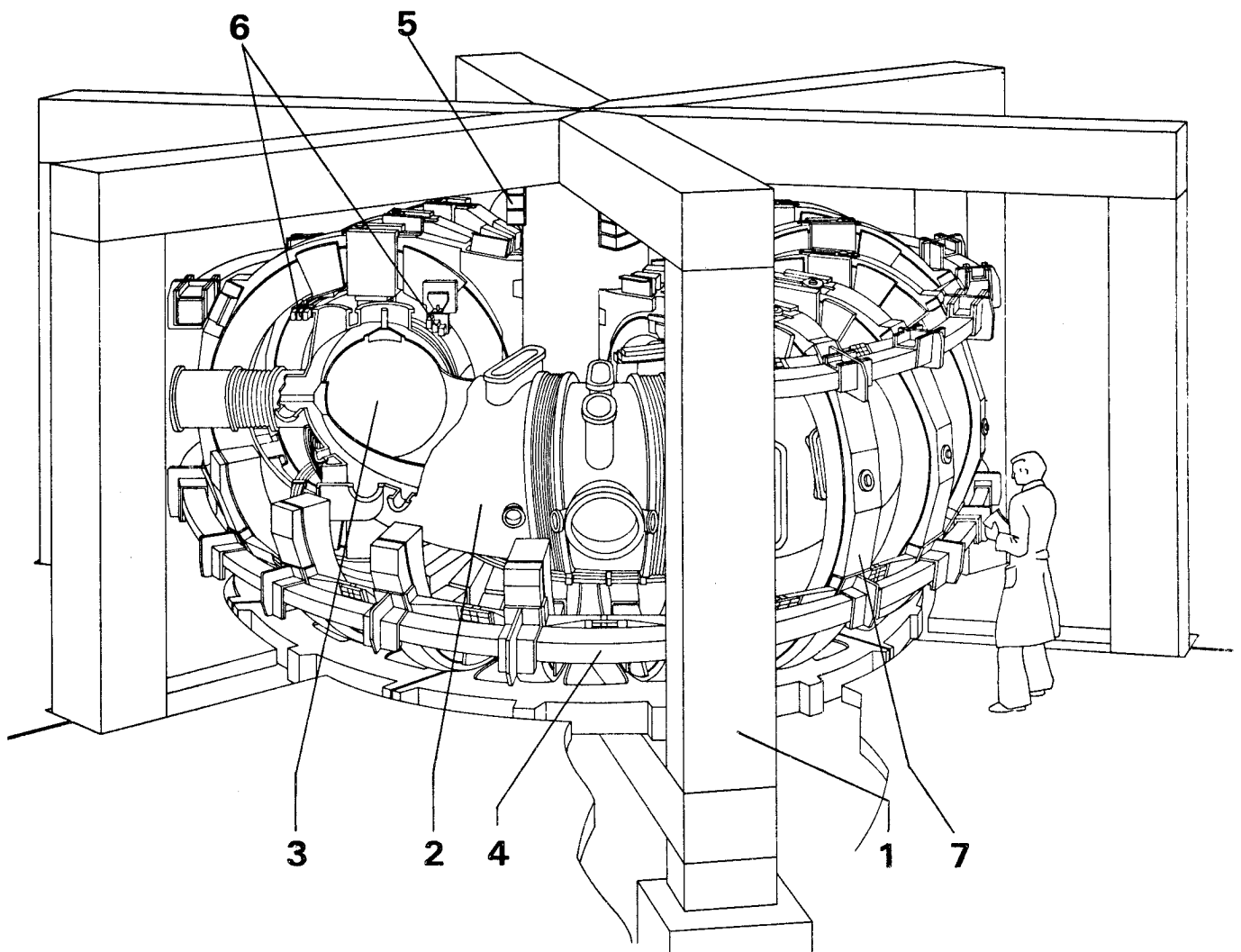
"The TEXTOR Data Acquisition System: Development Status and First Experience", Proceedings of the 12th Symposium on Fusion Technology, Jülich, 1982

/10/ Ottens, J.G.:

"CAMAC - Ein System Rechnergeführter Elektronik. Beschreibung Der Gleichbleibenden Systemteile", Report KFK 1402, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1971

5. BILDVERZEICHNIS

- 1 Prinzipbild TEXTOR
- 2 Ansicht von TEXTOR
- 3 Blockschaltbild des TEXTOR-Datenerfassungs-
und Verarbeitungssystems
- 4 Schematische Darstellung der CAMAC-Schnittstelle
Rechner/Bandeinheit
- 5 Ansicht CAMAC-Crate
- 6 Blockschaltbild: Magnetbandaufzeichnung und Wieder-
gabe
- 7 Ansicht der Magnetbandaufzeichnung und
Wiedergabe
- 8 Timing-Diagramm
- 9 Ablaufdiagramm Aufzeichnung
- 10 Ablaufdiagramm Wiedergabe
- 11 Frequenzgang der Magnetband-Kanäle
- 12 Fehler bei IRIG-Zeitcode
- 12a Typischer modulierter Zeitcode
- 12b Fehler durch Comparator-Hysterese
- 13 Meßbeispiel Teil 1
- 13a Ausgangsdaten
- 13b Zeitdehnung im Plot (Faktor 10)
- 14 Meßbeispiel Teil 2
- 14a Gesamtaufzeichnung MB
- 14b Zeitdehnung durch plot (Faktor 5)
- 15 Meßbeispiel Teil 3
- 15a Ausschnitt MB-Aufzeichnung
- 15b Zeitdehnung durch Geschwindigkeitsreduktion
(Faktor 8)
- 16 Meßbeispiel Teil 4
- 16a Zeitdehnung durch Geschwindigkeitsreduktion
($t_{ges} = 25 \text{ msec}$)
- 16b Zeitdehnung durch Plot (Faktor 100,
 $t_{ges} = 250 \text{ } \mu\text{sec}$)



- 1 Eisenkern des Transformators
- 2 Vakuumgefäß mit Stützen
- 3 Plasma
- 4 Vertikalfeldspulen
- 5 H-Spulen
- 6 Korrekturfeldspulen
- 7 Toroidalfeldspulen

Bild 1 Prinzipbild TEXTOR

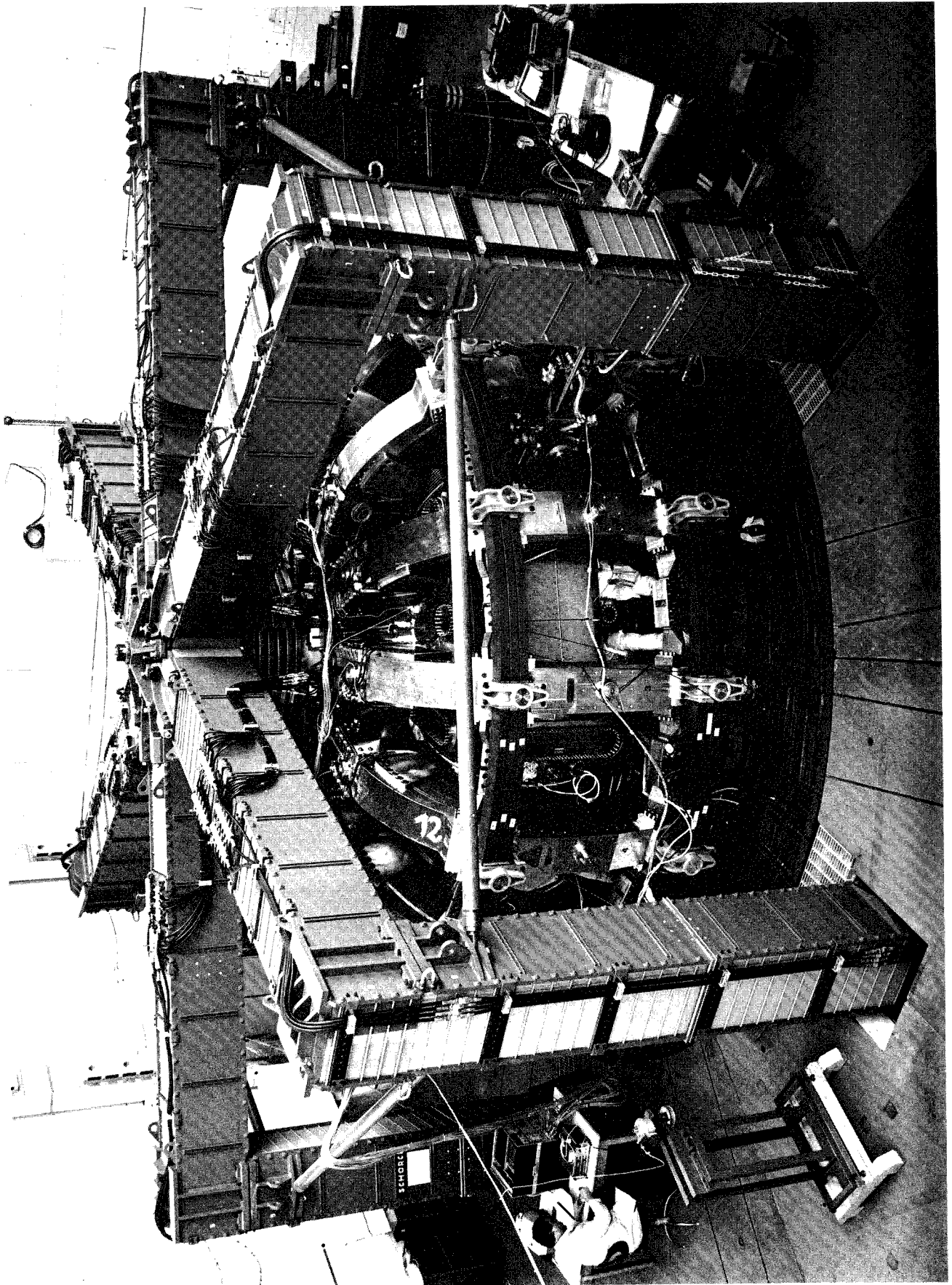


Bild 2 Ansicht von TEXTOR

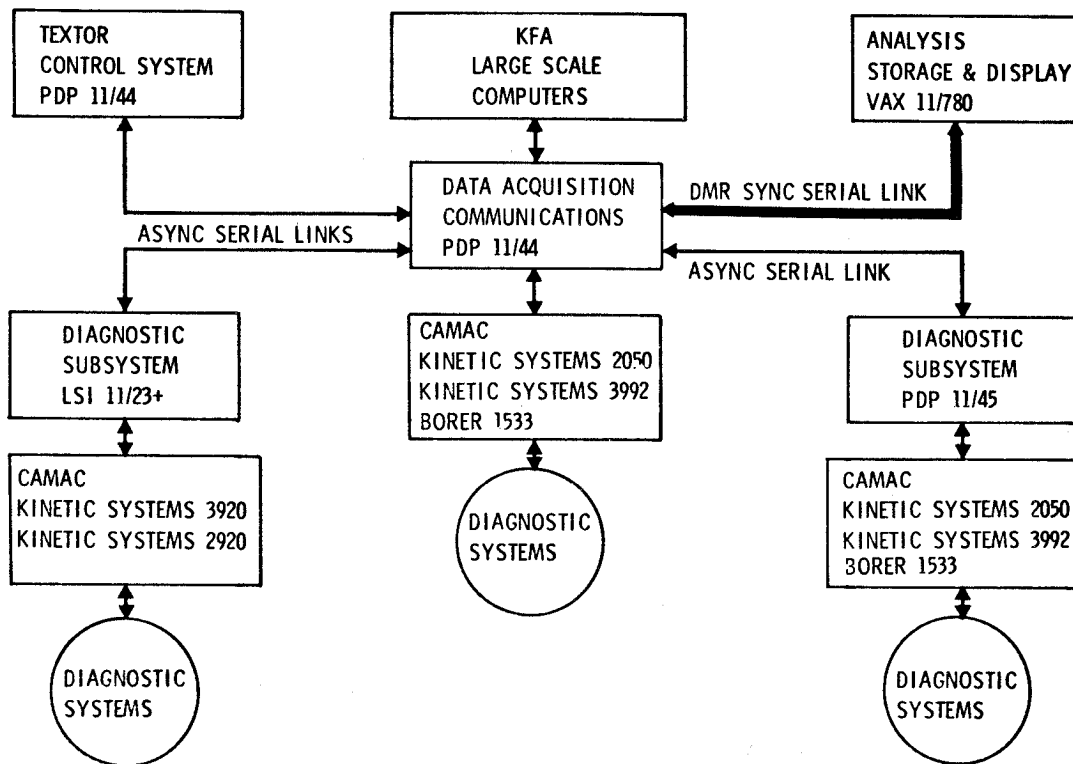


Bild 3 Blockschaltbild des TEXTOR - Datenerfassungs - und Verarbeitungssystems

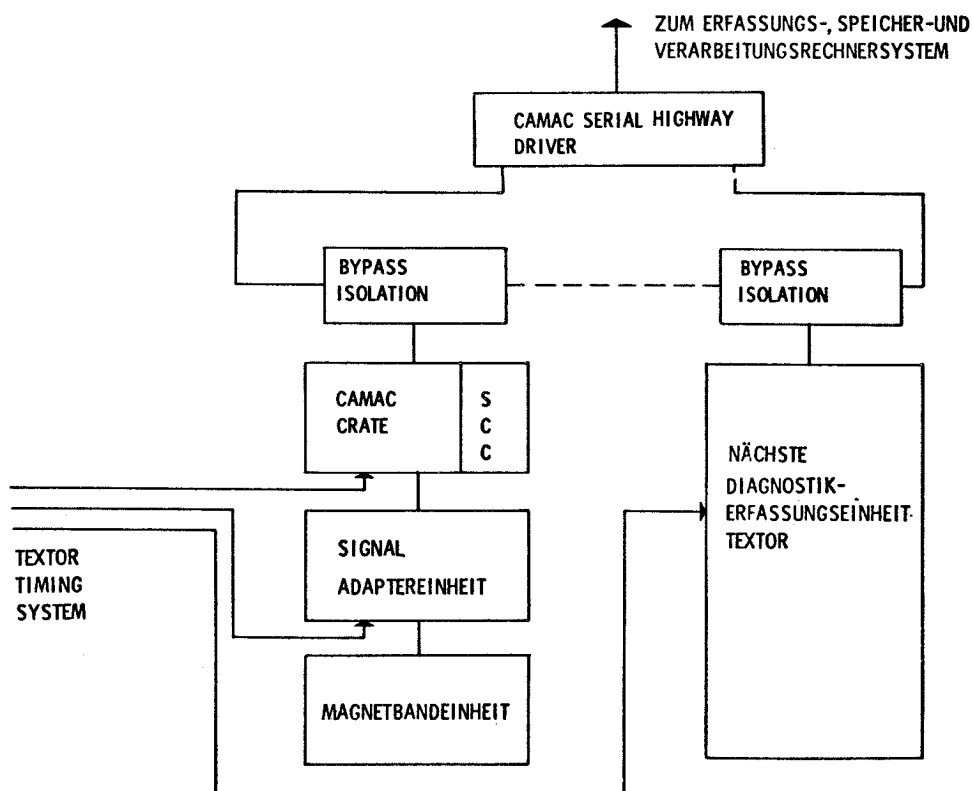
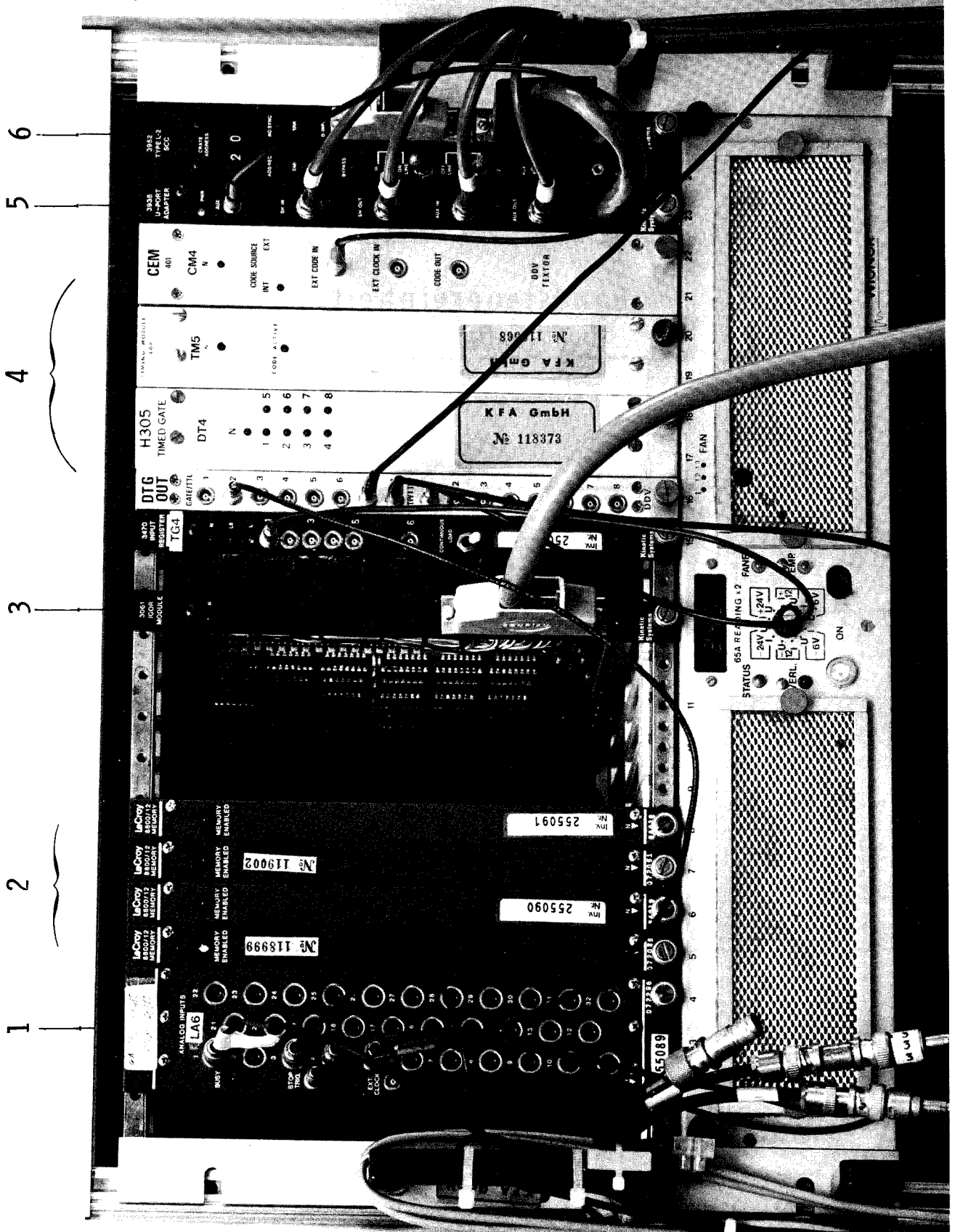


Bild 4 Schematische Darstellung der CAMAC - Schnittstelle Rechner / Bandeinheit



- | | |
|--------------------|-------------------------|
| 1 ADC | 4 Timing Module |
| 2 Memory | 5 Schnittstelle Rechner |
| 3 Schnittstelle BM | mit Glasfaserring |
| | 6 Crate-Controller |

Bild 5 Ansicht CAMAC - Crate

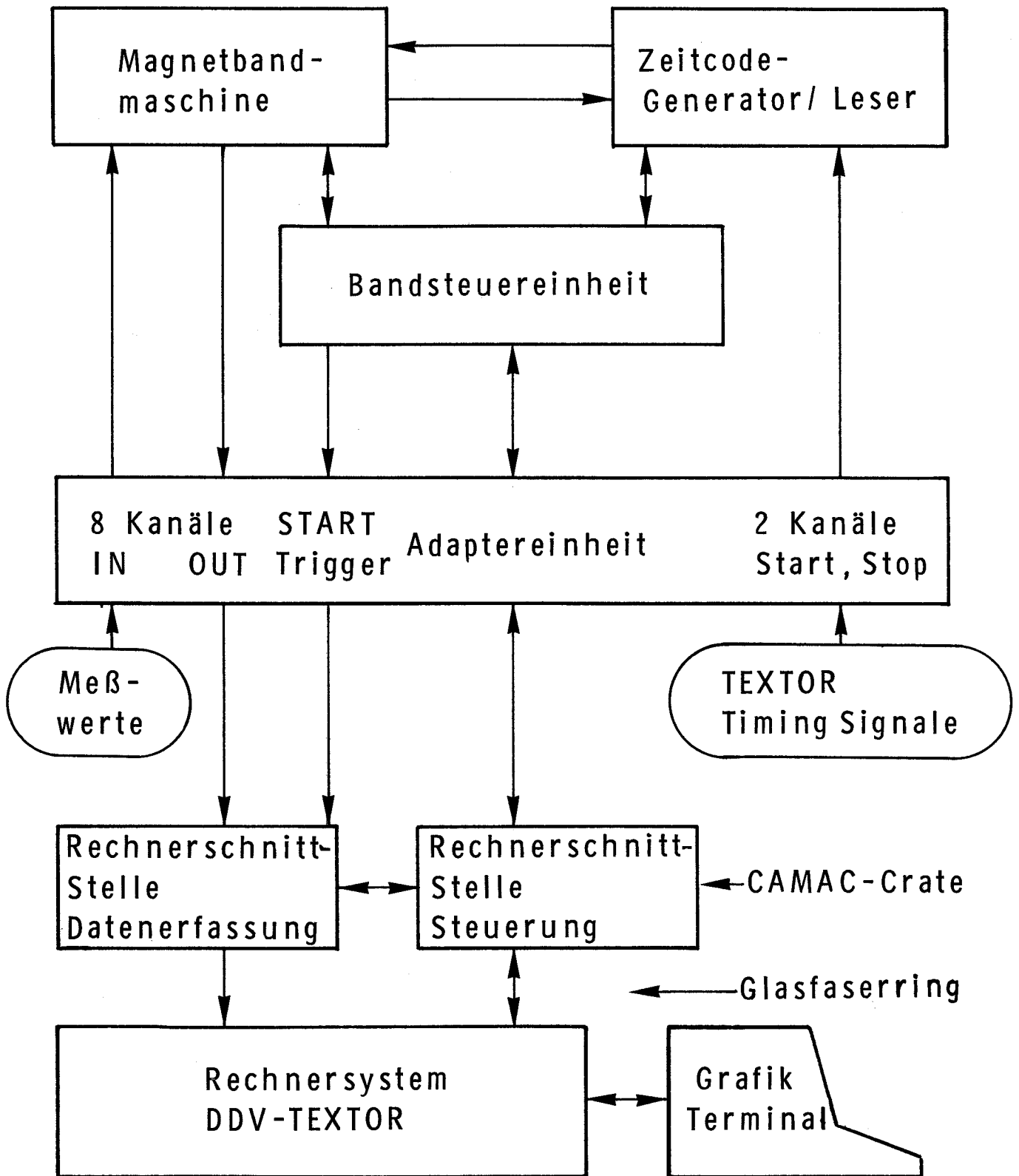
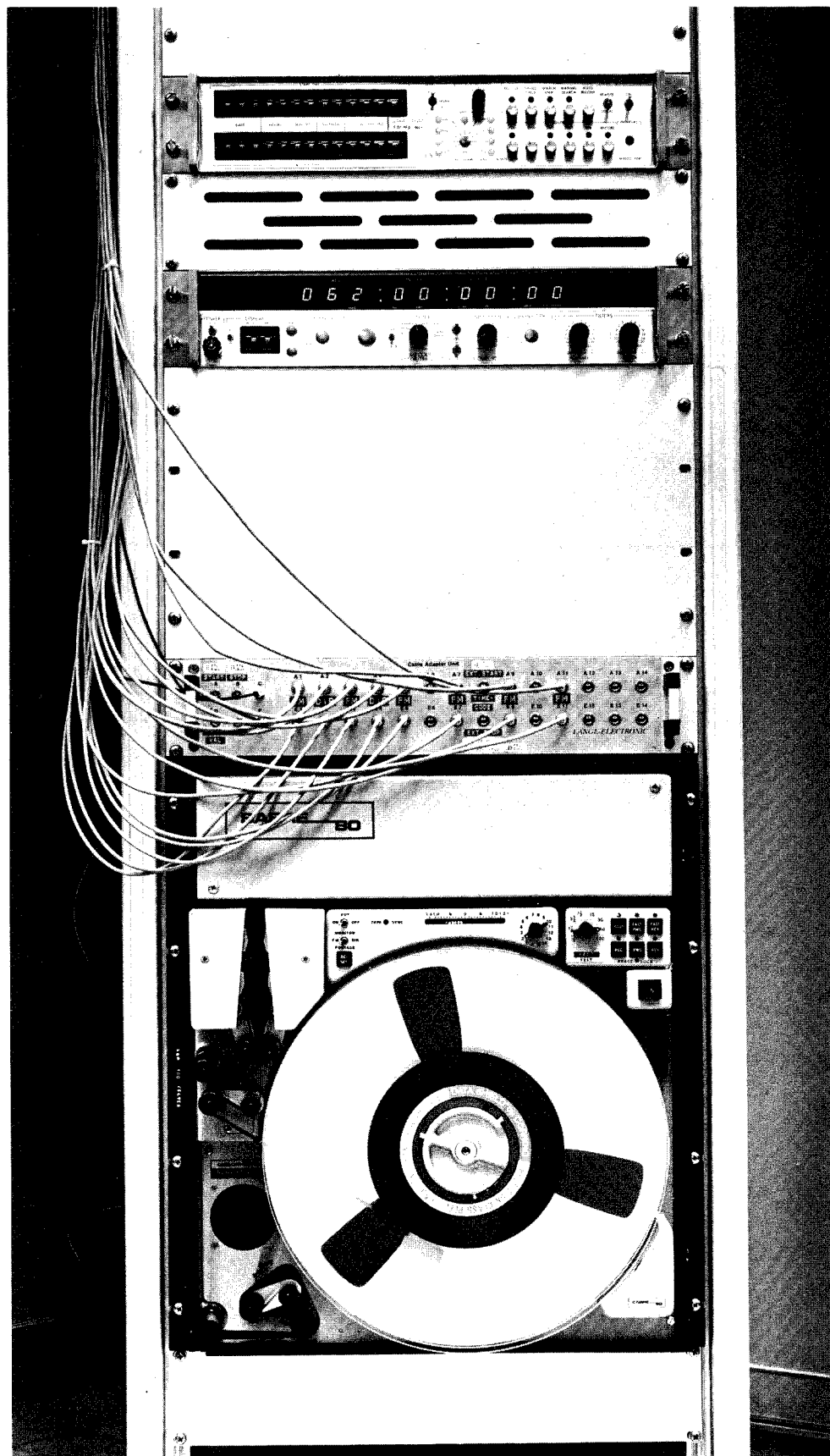


Bild 6 Blockschaltbild : Magnetbandaufzeichnung und Wiedergabe



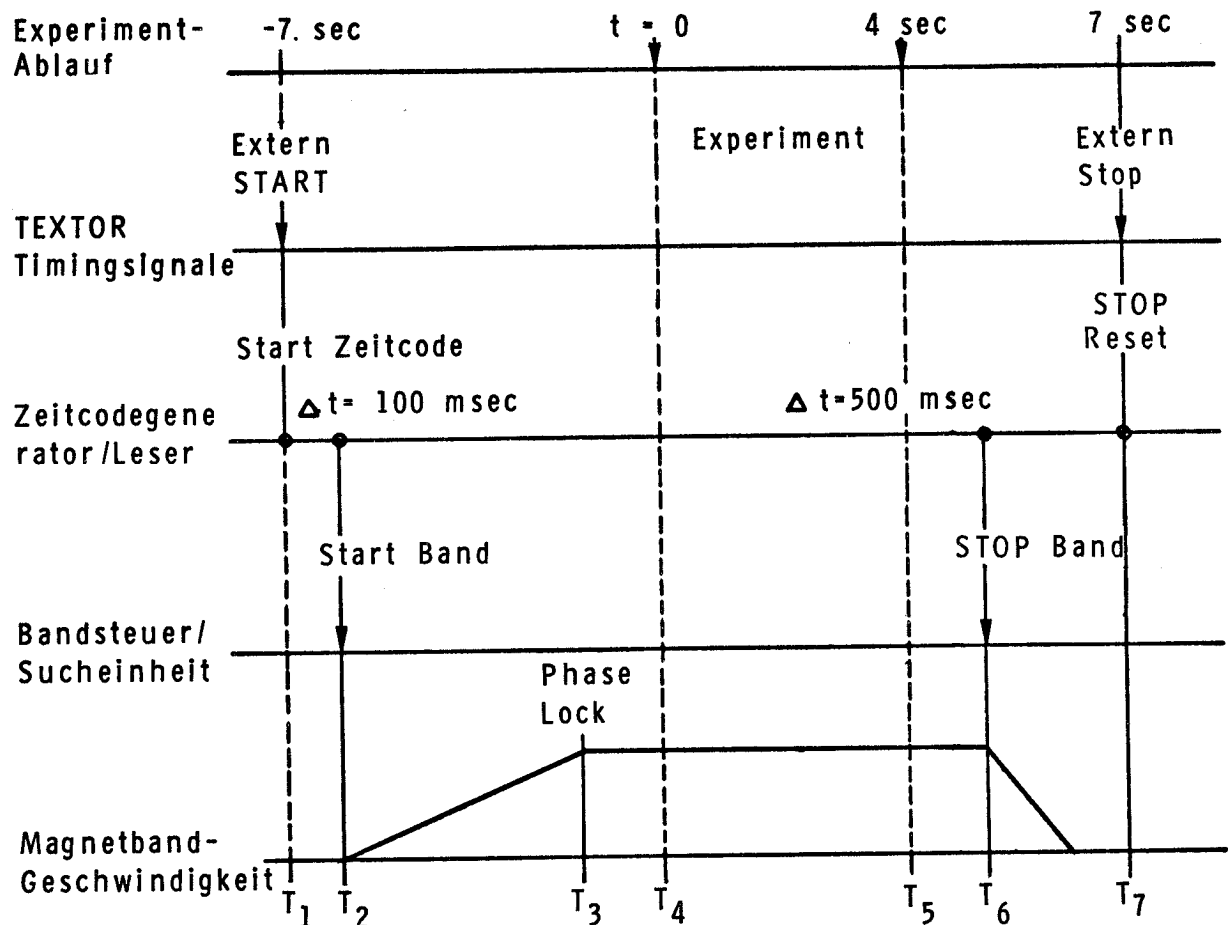
Bandsteuer
einheit

Zeitcode
Generator/
Leser

Adaptereinheit

Bandmaschine

Bild 7 Ansicht der Magnetbandaufzeichnungseinheit



LEGENDE:

- T_1 Externer Start des Generators durch Triggerimpuls des Timingsystemes
- T_2 Generatorzeit = Startzeit der Bandsteuereinheit Magnetband läuft ab
- T_3 Bandgeschwindigkeit erreicht
- T_4 Experiment beginnt
- T_5 Experiment beendet
- T_6 Generatorzeit = Stopzeit der Bandsteuereinheit Magnetband stoppt
- T_7 Externer Stoptrigger des Timingsystems Reset des Generators, Erhöhung Schußnummer

Bild 8 Timing - Diagramm

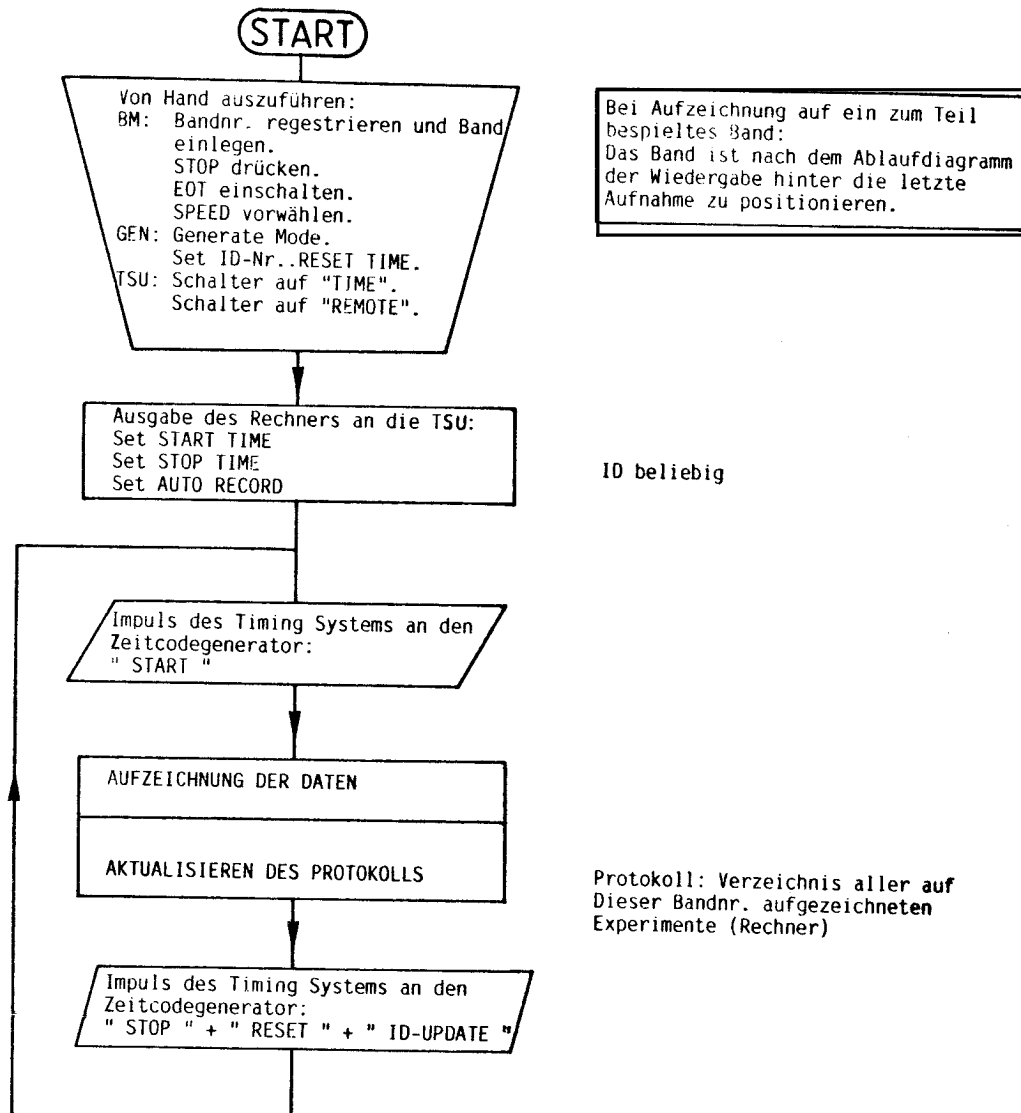


Bild 9 Ablaufdiagramm Aufzeichnung

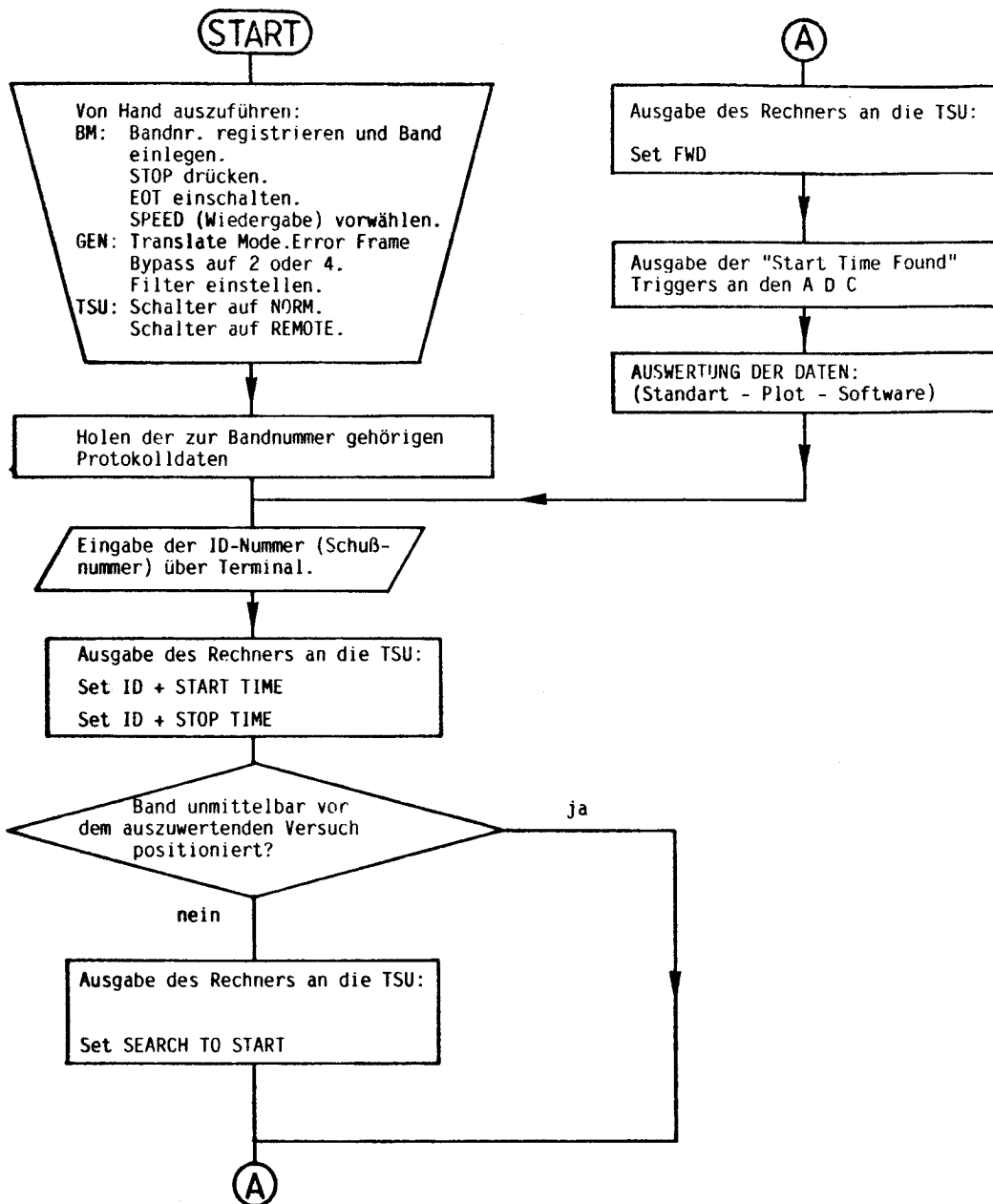


Bild 10 Ablaufdiagramm Wiedergabe

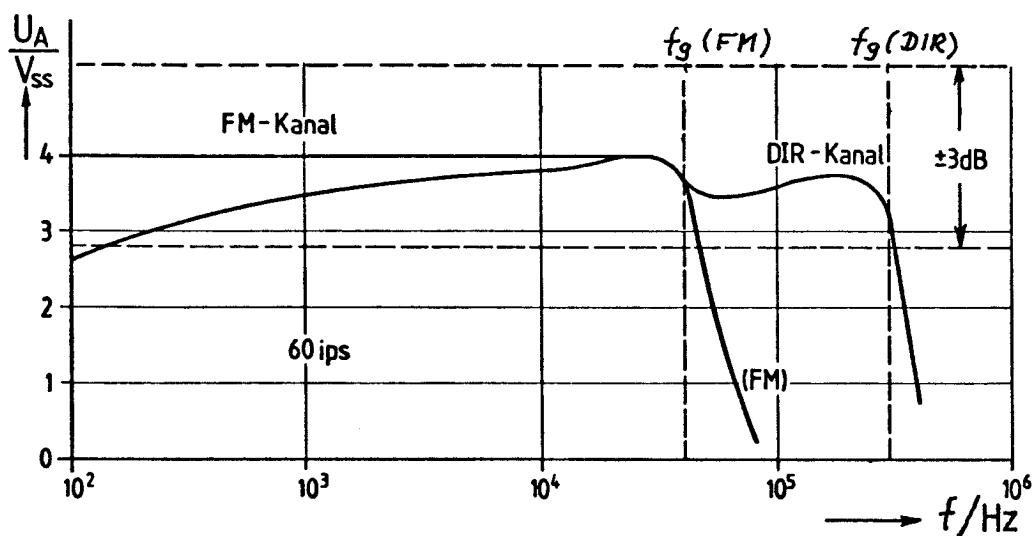
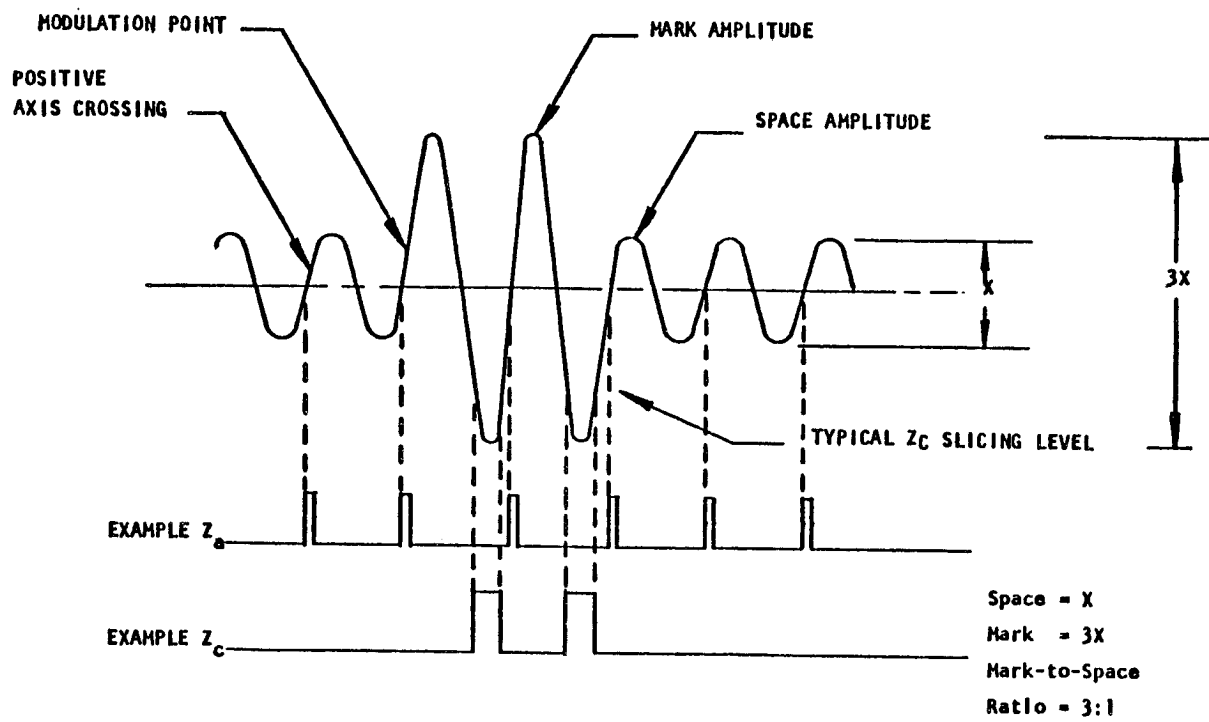
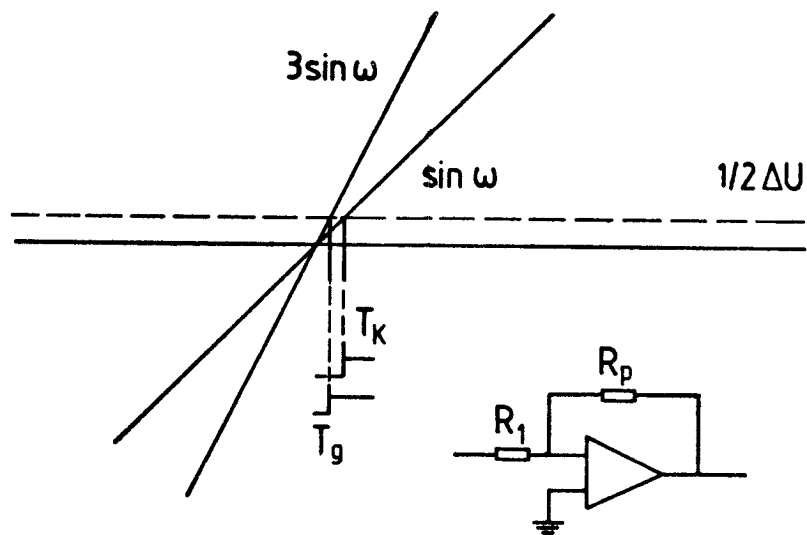


Bild 11 Frequenzgang der Magnetband - Kanäle

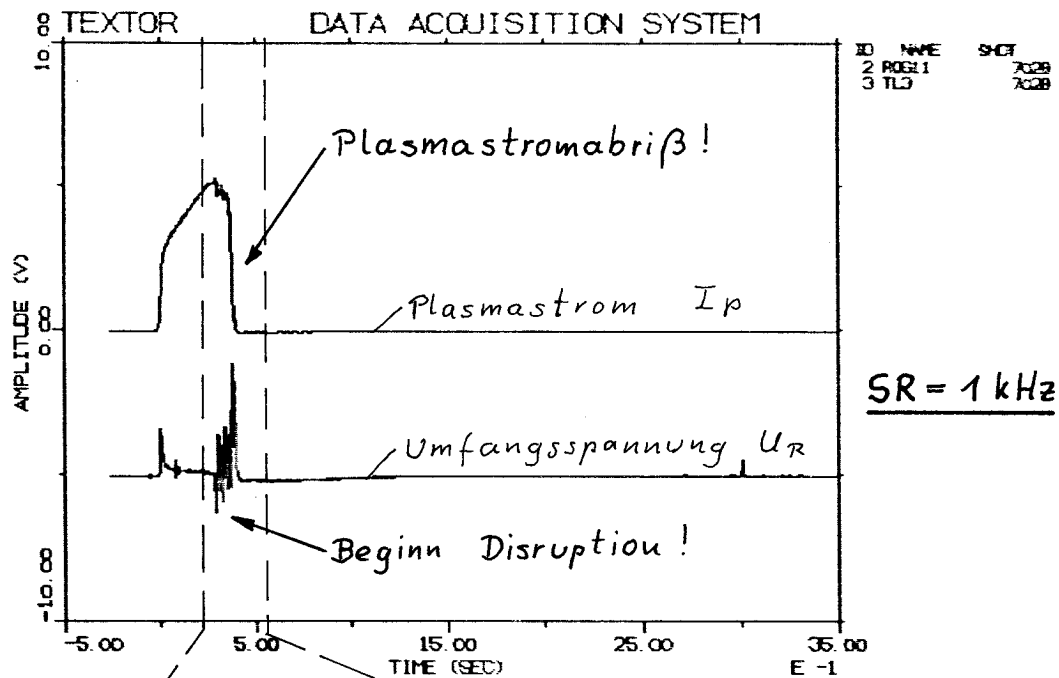


a) Typischer modulierter Zeitcode

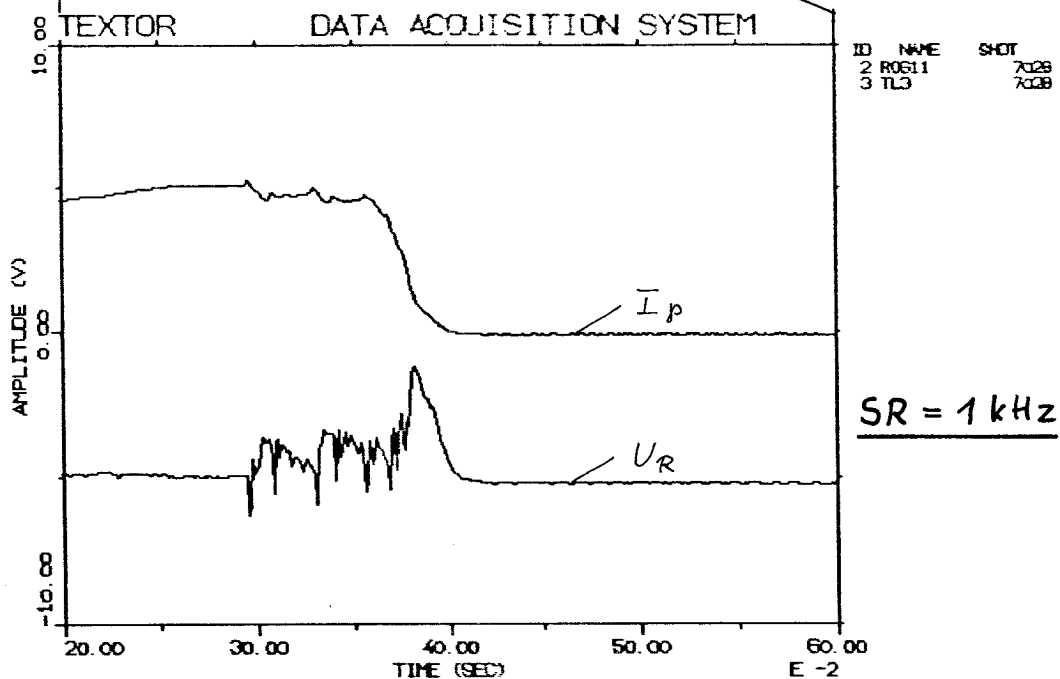


b) Fehler durch Comparator - Hysteresis

Bild 12 Fehler bei IRIG - Zeitcode

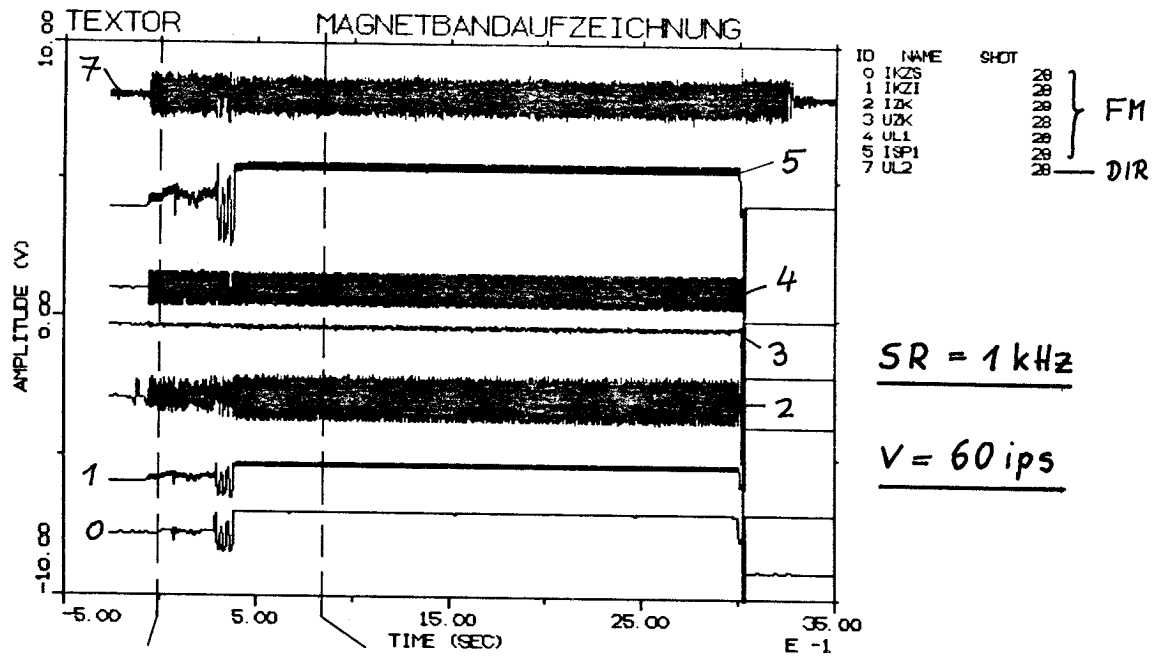


a) Ausgangsdaten

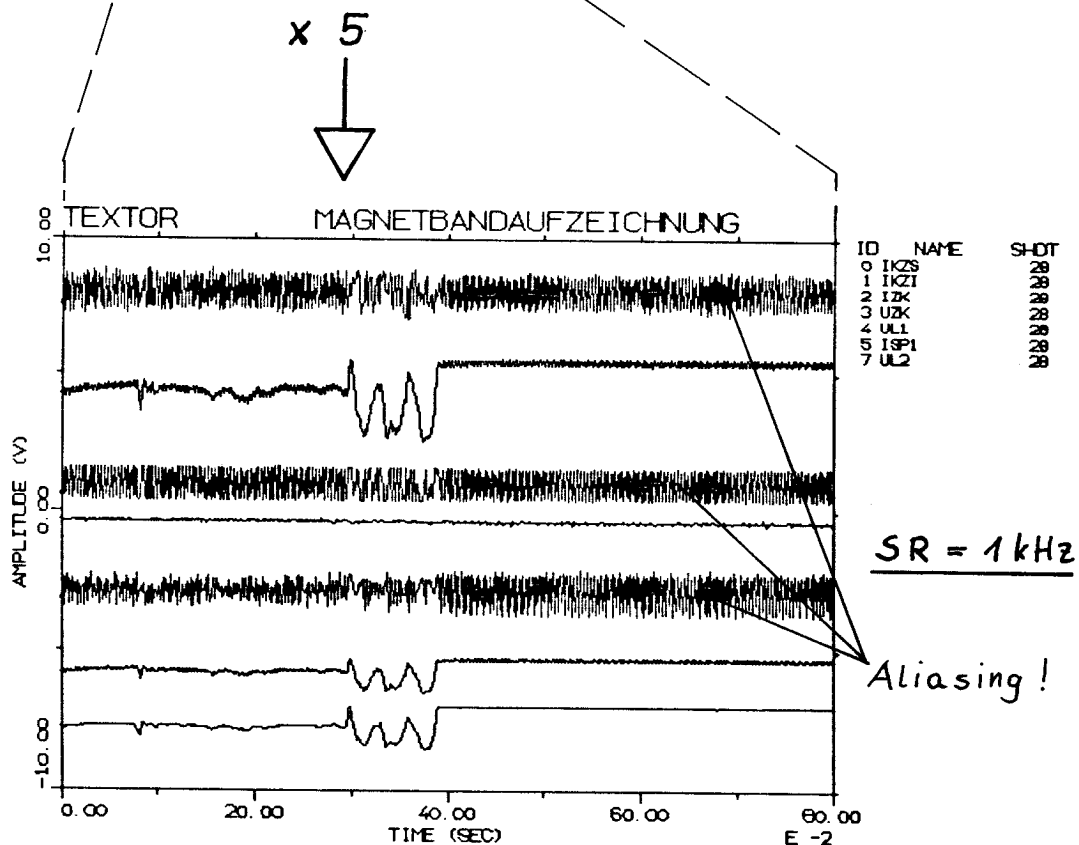


b) Zeitdehnung im Plot (Faktor 10)

Bild 13 Meßbeispiel Teil 1

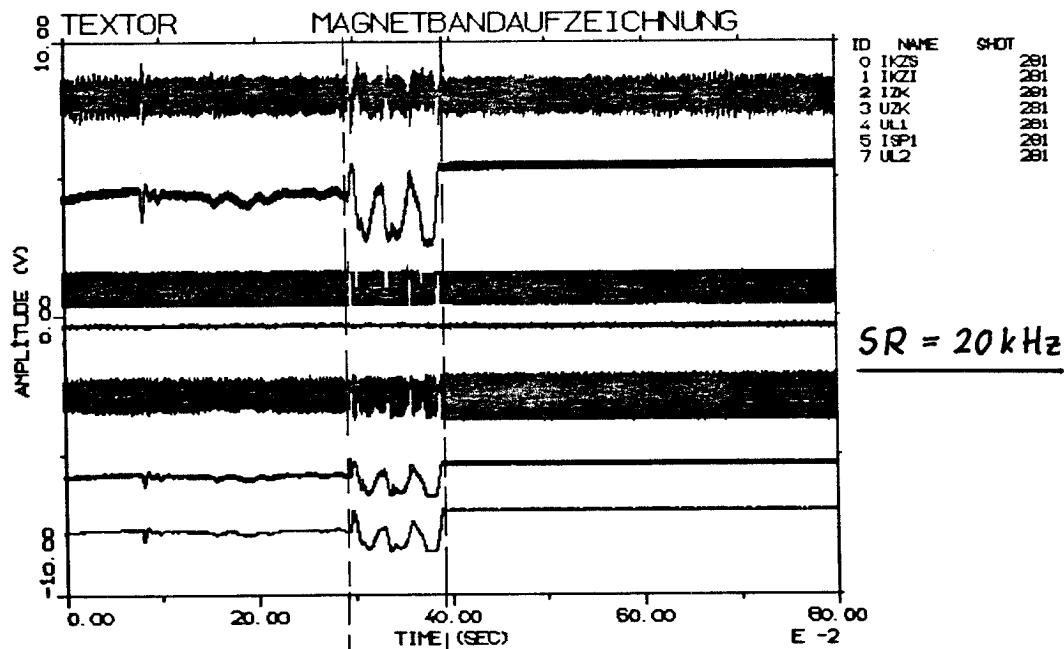


a) Gesamtaufzeichnung MB

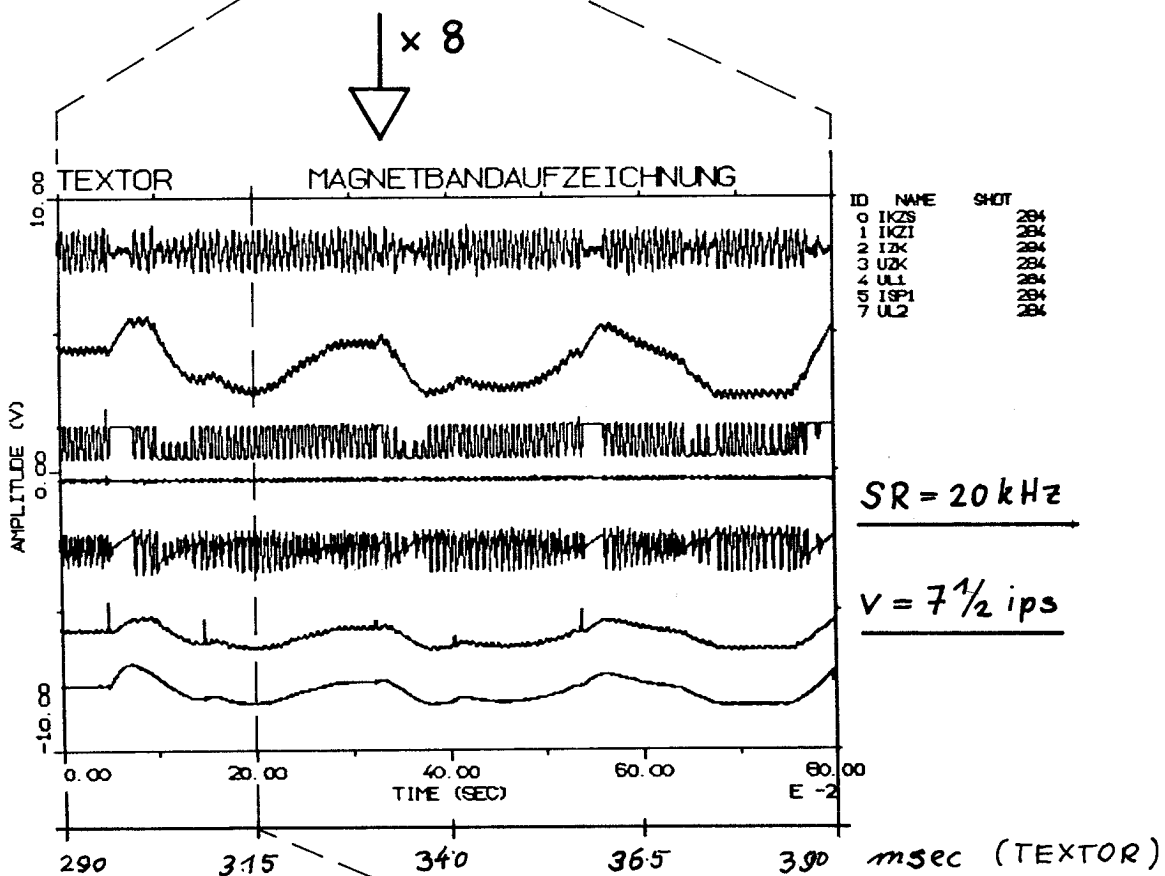


b) Zeitdehnung durch Plot (Faktor 5)

Bild 14 Meßbeispiel Teil 2

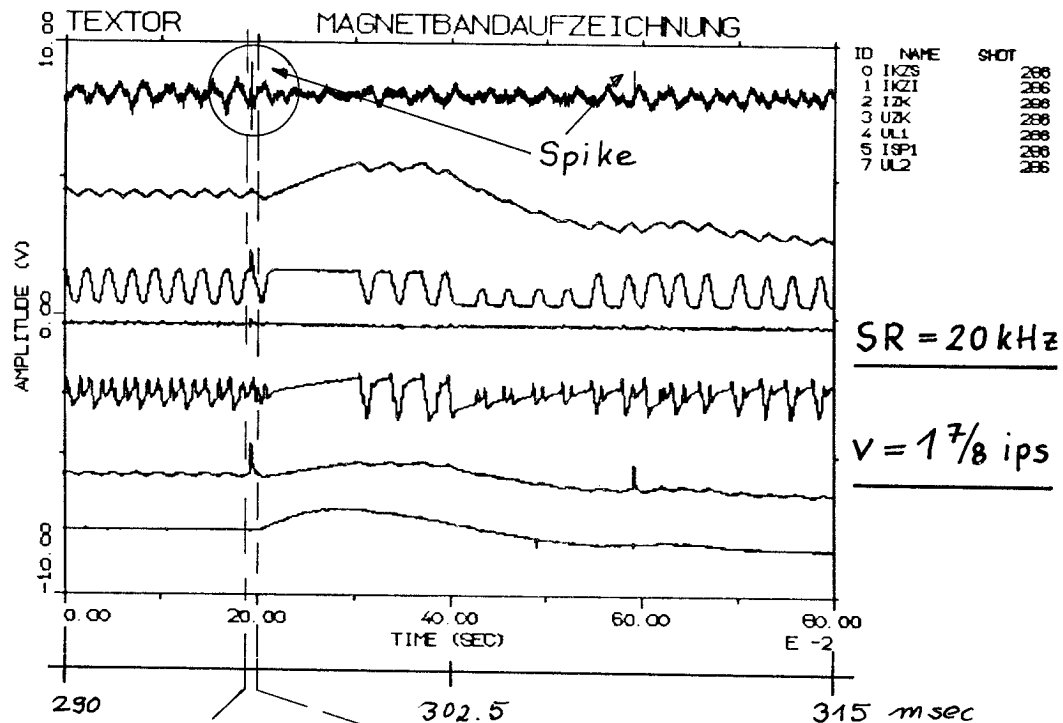


a) Ausschnitt MB - Aufzeichnung

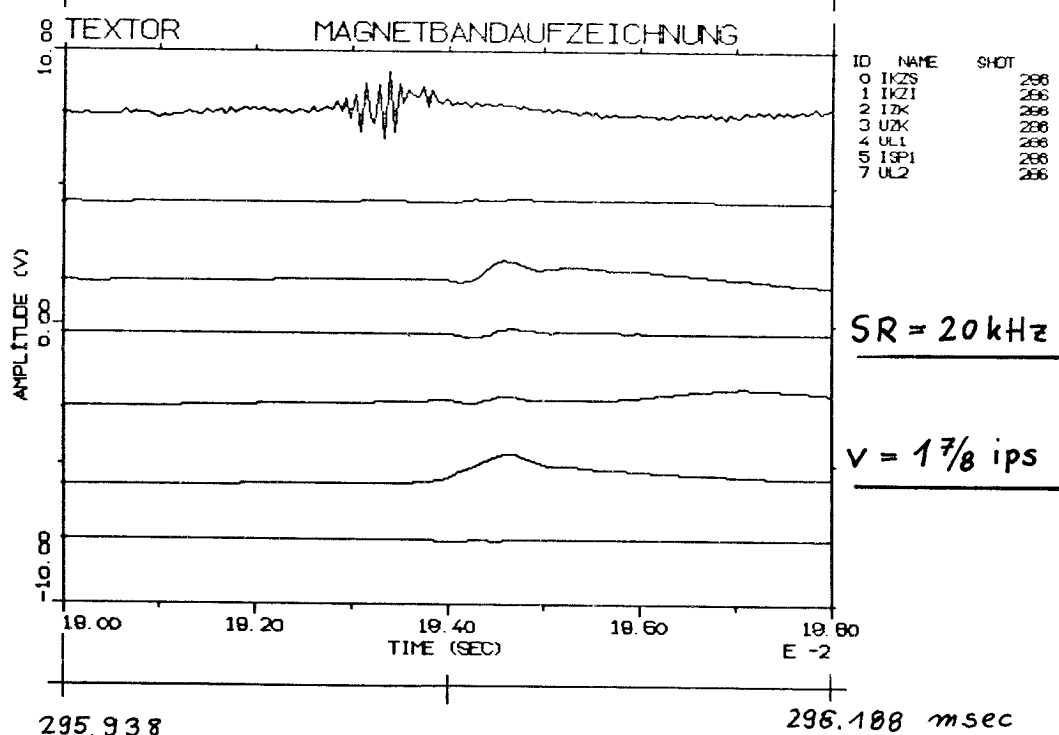


b) Zeitdehnung durch Geschwindigkeitsreduktion (Faktor 8)

Bild 15 Meßbeispiel Teil 3



a) Zeitdehnung durch Geschwindigkeits-
reduktion ($t_{ges} = 25$ msec)



b) Zeitdehnung durch Plot
(Faktor 100, $t_{ges} = 250 \mu\text{sec}$)

Bild 16 Meßbeispiel Teil 4

