

Menzel

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

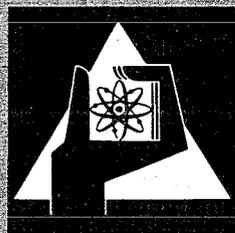
Dezember 1972

KFK 1593
EUR 4729 d

Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

Prinzip und Realisierbarkeit einer rechnergestützten
Core-Überwachung für den SNR

M. Audoux



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 1593

EUR 4729 d

Institut für Reaktorentwicklung

Projekt Schneller Brüter

Prinzip und Realisierbarkeit
einer rechnergestützten Core-Überwachung
für den SNR

M. Audoux

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

Zusammenfassung

Die Überwachung von einzelnen Brennelementen eines schnellen natriumgekühlten Reaktors erfordert den Einsatz einer In-Core-Instrumentierung und die Verarbeitung vieler Signale, die zu einer frühzeitigen Detektion der Kühlungsstörungen dienen sollten. Die Anzahl der Meßsignale erreicht eine auf diesem Gebiet bis jetzt unbekannte Höhe und die Detektion von örtlichen Störungen erfordert die Differenzierung zwischen Grenzwerten und Betriebstemperatur, die nur um einige Grade voneinander liegen sollen. Da die Meßfühler stark beansprucht werden, ist mit einer relativ hohen Ausfallrate zu rechnen. Die Anwendung konventioneller logischer Schaltungen kann eine ausreichende Diskriminierung zwischen deterministischen Vorgängen (z.B. die Struktur eines Fehlerbaumes) und probabilistischen Ereignissen, wie der Ausfall eines Meßfühlers, nicht gewährleisten.

Diese Betrachtungen führen zu der Entwicklung einer neuen Lösung, die die verdächtigen Brennelemente in einer ersten Phase aussortieren soll. Die Sortierung erfolgt durch gruppenweise Zusammenfassung von Meßsignalen mit der Besonderheit, daß die Verknüpfung von Meßsignalen nicht einen logischen (wie im gegenwärtigen Stand der Technik), sondern einen flexibleren Wichtungsvorgang darstellt, wo die Sicherheitskriterien, die Redundanz der Instrumentierung, die Glaubwürdigkeit der Signale und die Vorgeschichte der Meßfühler berücksichtigt werden. Dieses Sortierverfahren wird besonders schnell vorgenommen werden, so daß innerhalb eines Erfassungszyklus viel Zeit übrig bleibt, um die Untersuchungen einer Minderheit sorgfältig zu prüfen. Diese Untersuchungen betreffen nicht einen Wert, sondern eine Folge von Meßpunkten und sind in Prioritätenklassen eingeteilt. Verschiedene Algorithmen werden für die Stetigkeitskontrolle, die Ermittlung besonderer kritischer Profile, die Prüfung der Koinzidenz eingesetzt. Die Flexibilität des Konzepts ist im Zusammenhang mit der spezifischen Instrumentierung des SNR besonders erklärt und zeigt, daß die Entwicklung einer solchen Lösung die Zahl der unbegründeten Abschaltungen reduzieren könnte.

Das Konzept baut auf den Methoden der Informatik auf und das letzte Kapitel behandelt die Realisierbarkeit der Lösung und gibt praktische Hinweise für die Implementierung des Verfahrens.

Abstract

Principles and feasibility of a Computer aided safety control of the SNR core

The detection of disturbances in the cooling channels of a sodium cooled fast breeder requires the use of an in-core instrumentation and the processing of the outcoming signals. The number of these signals is especially large and the detection of the disturbance requires a discrimination between temperature thresholds and operating temperatures which are just a few degrees apart. The operating conditions of the sensing elements are so severe that a substantial percentage of detector failures has to be taken into account. The use of customary logical circuits does not allow to separate the deterministic character which must lead to the identification of a cooling disturbance from stochastic events like the decalibration of a thermocouple. These considerations have led to propose another solution where a first step sorts the apparently disturbed sub-assemblies by using a special grouping technique. The sorting operation involves a specific combination of the signals which is not based on the classical use of logical functions but on a more flexible method where different numerical weighting factors can be applied to include the safety criteria, the redundancy of the instrumentation, the credibility of the signal and the background of the detectors. The sorting process can be so fast that most of the cycle time is left to perform some detailed investigations on a minority of suspicious cases. These detailed investigations are divided according to their priority and use algorithms which are applied not on single values but on sequences of points. The process can formulate better diagnostics by verifying the steadiness of the signals, by classifying the critical profiles and by checking the coincidence of such profiles. The application of the method is given for the fast breeder SNR 300 and shows that a reduction of the false scram signals could be achieved by using such a method.

The concept uses the methods of computing sciences and requires the use of some computing equipment. This last aspect which concerns the practicability of the proposed solution was given a special attention and the different implications on the hardware as well as on the software design are described in the final part of the report.

Résumé

Principe et possibilité de réalisation d'un système de surveillance assisté par ordinateur du coeur SNR

La surveillance des éléments de combustible d'un réacteur surrégénérateur refroidi au sodium nécessite l'emploi d'une instrumentation placée dans le coeur du réacteur et le traitement des signaux émanant d'une telle instrumentation en vue de détecter les anomalies de fonctionnement des canaux de refroidissement. Le nombre de ces signaux est particulièrement élevé et la détection des perturbations exige de différencier des seuils de température très voisins des températures de fonctionnement. Il faut ajouter que les conditions d'utilisation des capteurs sont extrêmement sévères et qu'elles causeront un pourcentage non négligeable de défaillances. L'emploi de circuits logiques conventionnels ne permet pas de réaliser une bonne discrimination entre les relations déterministes (principe de causalité) exigées pour formuler un diagnostic et les phénomènes aléatoires tels que le bruit d'un signal ou la décalibration d'un capteur. Ces considérations ont conduit à proposer une autre solution où les éléments de combustible qui semblent douteux sont d'abord triés. Le tri est basé non pas sur l'utilisation des circuits logiques mais sur une méthode de groupement très flexible qui permet au moyen de pondérations numériques de tenir compte des critères de sûreté, de la redondance des instruments, de la crédibilité des signaux et des antécédents des capteurs. La rapidité de ce procédé est telle que la plus grande fraction d'un cycle de mesure peut être réservée à des examens détaillés qui ne concernent qu'une minorité d'éléments. Le traitement détaillé de ces éléments porte sur une suite de points et non sur une seule valeur instantanée et s'effectue d'après un ordre prioritaire. Des algorithmes établissent des profils de signaux en vérifiant si les caractéristiques sont stationnaires et établissent un diagnostic en tenant compte des profils critiques et des coïncidences entre ces profils. La flexibilité du concept est expliquée en prenant le réacteur SNR 300 comme exemple et les avantages du procédé doivent se traduire par une diminution du nombre d'arrêts injustifiés de la centrale et par la possibilité d'effectuer une détection précoce des perturbations. Le procédé fait appel à l'informatique et le rapport indique pour finir que la solution proposée est réalisable en montrant différentes façons d'utiliser les moyens techniques actuels.

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
E i n l e i t u n g	1
1. Coreüberwachung und Störfalldiagnose	2
1.1 Kurze Beschreibung der Störfälle	2
1.1.1 Die lokalen Kühlungsstörungen innerhalb eines Brennstoffbündels	3
1.1.2 Die integralen Kühlungsstörungen in einem Brennelement	3
1.1.3 Das Bersten von Hüllrohren im Spaltgasbereich	3
1.2 Instrumentierung für die Störfalldiagnose	3
1.2.1 Thermoelemente	4
1.2.2 Durchflußmesser	5
1.2.3 Rauschdetektoren	5
1.2.4 Schalldetektoren	5
1.2.5 Die Hüllschadendetektoren	6
1.3 Verknüpfung der Instrumentierung mit dem Sicherheitssystem	6
2. Vorgeschlagene Lösung	9
2.1 Annahmen und Voraussetzungen	9
2.2 Organisation der Grenzwerte	11
2.3 Bilanz eines Brennelementes	13
2.3.1 Status Index	13
2.3.2 Ermittlung des Meßfühlerindex	14
2.3.3 Zuteilung des Brennelementindex	15
2.3.4 Ermittlung der Prioritäten	16
2.4 Diagnose	16
2.4.1 Stetigkeitskontrolle	17
2.4.2 Rauschanalyse	19
2.5 Flexibilität des Verfahrens	20
3. Realisierbarkeit	22
3.1 Erfassung der Meßwerte	22

	<u>Seite</u>
3.1.1 Verstärkung des Meßsignals	22
3.1.2 Analog-Digital-Wandler (ADW)	23
3.2 Auslegung der Rechner	23
3.2.1 Verbindung von mehreren Rechnern	24
3.2.2 Organisation des Kernspeichers	25
3.3 Zusätzliche Einheiten	26
3.3.1 Der Direkt-Zugriff-Speicher	26
3.3.2 Die sequentielle Datenspeicherung	26
3.3.3 Fernschreiber	27
3.3.4 Schnelle Erfassung	27
3.4 Programmstruktur	27
3.5 Zuverlässigkeit des Systems	28
 Schlußfolgerung	 29
 Anhang 1 Statistische Verteilung	
Anhang 2 Berechnung der Ausführungszeiten des Sortier- algorithmus	

Einleitung

Die absolute Sicherheit großer technischer Anlagen stellt ein Fernziel dar, zu dessen Erreichung große Anstrengungen zu unternehmen sind. Die Verwirklichung einer Sicherheitsphilosophie sollte immer dem letzten Stand der Technik angepaßt sein; und dieses gilt besonders für Kernkraftwerke, bei denen die Benutzung von Spaltstoffen das Potential einer Gefährdung der Umgebung in sich birgt, und bei denen der technische Fortschritt immer größere Leistungsdichten und größere Gesamtleistungen ermöglicht.

Das Dilemma bei der Auslegung von Sicherheitseinrichtungen liegt manchmal daran, daß der Sicherheitsgrad eines Systems von den letzten technischen Entwicklungen viel profitieren könnte, daß aber die Anwendung von neuen Methoden abgelehnt oder verzögert wird, weil für die vorgeschlagenen Verfahren noch nicht über ausreichend langjährige Erprobung verfügt werden kann. Die Coreüberwachung eines schnellen natriumgekühlten Reaktors zeigt, daß versucht wird, ein höheres Maß an Sicherheit zu erreichen.

Die Überwachung von einzelnen Brennelementen wird bald für moderne Leistungsreaktoren eine Notwendigkeit werden und erfordert besondere technische Einrichtungen, die noch zu erforschen oder zu erproben sind. Die Anzahl der Meßsignale und damit der abschaltberechtigten Elemente erreicht eine auf diesem Gebiet bis jetzt unbekannte Höhe. Die Detektion von örtlichen Störungen erfordert die Differenzierung zwischen deterministischen Störfällen (z.B. Teilblockade) und probabilistisch gefärbten Ereignissen (Ausfall von Meßfühlern), die besonders wichtig sind, weil eine Verbesserung der Sicherheit nicht zu zahlreichen unbegründeten Abschaltungen führen sollte.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Konzept vorgeschlagen, das auf diese Punkte besonders Rücksicht nimmt, und bei dem der Einsatz der elektronischen Datenverarbeitung (EDV) eine flexiblere Verknüpfung der Meßwerte mit den Abschaltkriterien ermöglicht.

1. Coreüberwachung und Störfalldiagnose

1.1 Kurze Beschreibung der Störfälle

Die Coreüberwachung konzentriert sich auf Störungen, die nicht den ganzen Kern betreffen, sondern örtlich begrenzt, d.h. auf den Zustand einzelner Brennelemente oder Brennstäbe zurückzuführen sind. Die Detektion von örtlichen Störungen ist nicht neu, seit einigen Jahren werden z.B. die Schäden des Hüllmaterials von gasgekühlten Reaktoren durch Anwesenheit von mittels kleiner Ventile abgeleiteten Spaltgasen nachgewiesen.

Bei natriumgekühlten schnellen Reaktoren ist das Problem aus folgenden Gründen etwas schwieriger:

- Die Zeitkonstanten der Schadenverbreitung sind klein.
- Das Sieden des Natriums stellt eine besondere Gefahr dar.
- Die Natrium-Brennstoff-Reaktion kann weitere Schäden verursachen.
- Es ist gegenwärtig noch nicht eindeutig bewiesen, daß die örtlichen Störungen sich nicht so schnell ausbreiten können, daß eine sogenannte Propagation mit Bildung von "Totwasserzonen" sehr schnell zu größeren Schäden, zu Reaktivitätserhöhung und zu einem größeren Unfall führen kann.

Das Institut für Reaktorentwicklung hat die Phänomene, die mit der Natriumkühlung schneller Reaktoren verbunden sind, theoretisch und experimentell seit Jahren untersucht [1, 2, 3]. Die Konsequenzen der Ausbreitung örtlicher Störungen und ihre Bedeutung für die Reaktorsicherheit wurden besonders von Gast untersucht [4], und die vorliegende Arbeit bezieht sich zum größten Teil auf die Analyse, die er durchgeführt hat (Abb. 1).

Da diese Störungen von einem konventionellen Sicherheitssystem nur beim Erreichen katastrophaler Größe detektiert werden können, ist es wünschenswert, diese Störungen in ihren früheren Stadien identifizieren zu können. Gast hat die drei folgenden ursächlichen Störungen als Startpunkte aufgezeichnet.

1.1.1 Die lokalen Kühlungsstörungen innerhalb eines Brennstoffbündels

Lokale Kühlungsstörungen entstehen zum Beispiel durch

- die Änderungen der Kühlkanalgeometrie
- die Kühlkanalverstopfungen, die, wenn das Wachsen der gestörten Zonen nicht verhindert wird, zu lokalem Natriumsieden und kaskadenförmigem Versagen von Brennstäben führen können.

Diese Störungen sind am Coreaustritt nicht detektierbar, sie verursachen eine Temperaturerhöhung von einigen Graden am Brennelementaustritt und eine Änderung von nur einigen Prozenten des Durchflußmessersignals. (Eine Reduktion des Kühlmitteldurchsatzes im Subkanal auf die Hälfte des nominellen Wertes über eine Länge von 10 cm verursacht eine Temperaturerhöhung von maximal 25°C.)

1.1.2 Die integralen Kühlungsstörungen in einem Brennelement

Typische Störungen sind die Blockierung des Kühlmiteleintritts und die Ablagerung von Verunreinigungen. Diese Störungen sind mit Durchflußmessern oder Thermoelementen leichter zu detektieren. Eine Durchsatzreduktion von 5 % entspricht einer Erhöhung der mittleren Austrittstemperatur zwischen 7°C und 10°C, je nach der radialen Position des Brennelementes im Kern.

1.1.3 Das Bersten von Hüllrohren im Spaltgasbereich

Das Bersten von Hüllrohren im Spaltgasbereich kann durch propagatives Versagen anderer Hüllrohre zur Freisetzung von großen Spaltgasmengen führen, und diese Ereigniskette ist durch ihren raschen Ablauf gekennzeichnet. Die frühzeitige und schnelle Detektion von Hülschaden ist durch Hülschadendetektoren, die nach dem Prinzip des Zyklonabscheiders arbeiten, möglich.

1.2 Instrumentierung für die Störfalldiagnose

Die Detektion der örtlichen Kühlungsstörungen erfordert den Einsatz einer entsprechenden In-Core-Instrumentierung. Diese Instrumentierung besteht

aus Meßfühlern, die nach dem letzten Stand der Technik für einen schnellen natriumgekühlten Reaktor in folgende Klassen eingeordnet werden können:

- Thermoelemente
- Durchflußmesser
- Rauschdetektoren (thermisches Rauschen)
- Ultraschall-Detektoren
- Hülschadendetektoren (Zyklonabscheider).

Diese Instrumente oder Meßfühler werden im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsaufträgen immer neu untersucht und verbessert. Ihre Eigenschaften hinsichtlich Zuverlässigkeit und Stetigkeit der gelieferten Signale sind etwas unterschiedlich zu bewerten. Da dieser Punkt für die Detektion von lokalen Kühlstörungen besonders wichtig ist, werden diese Meßfühler etwas ausführlicher beschrieben.

1.2.1 Thermoelemente

Die als Meßfühler verwendeten Thermoelemente sind allgemein Ni-Cr-Ni-Thermoelemente, die sich seit vielen Jahren bewährt haben. Ihr Einsatz im Kern von schnellen natriumgekühlten Reaktoren ist trotzdem mit einigen Schwierigkeiten verbunden. Die technischen Maßnahmen (das Schweißen unter Schutzgas und die Röntgenaufnahmen) bei der Herstellung und bei der Prüfung haben die Qualität dieser Thermoelemente erhöht, können aber noch nicht eine 100 %ige Zuverlässigkeit garantieren.

Besonders kritisch für sicherheitstechnische Anwendungen der Thermoelemente ist ihre Zeitkonstante. Die stabilen Thermoelement-Ausführungen sind dick, und das wirkt sich negativ auf die Zeitkonstante aus. Die Lösung ist stets ein Kompromiß zwischen einer kleinen Zeitkonstanten und einer robusten Ausführung. Sehr schnelle Thermoelemente sind oft Voraussetzungen für Forschungseinrichtungen, sind aber als stationäre Meßfühler für Sicherheitssysteme nicht so geeignet, weil die Anwesenheit von höheren Frequenzspektren Rauschsignale (Spurious) ergibt, die eine zusätzliche Glättung erfordern. Weitere Fehler der Thermoelemente können auch auftreten, wenn die Verschweißung nicht ganz natriumdicht wird. In diesem Fall kann das Natrium in das Element eindringen und verursacht eine Wanderung der

effektiven Meßstelle und eine Vergrößerung der Zeitkonstanten. Dieser Fehler ist oft sehr verhängnisvoll, weil die Messung nicht mehr an der kritischen Stelle (z.B. Austritt eines Kühlkanals) erfolgt und weil diese Situation im isothermischen Zustand des Reaktors nicht diagnostiziert werden kann. Die Thermoelemente sind jedoch unersetzbare Meßfühler und der Entwurf der In-Core-Instrumentierung für den SNR 300 hat mit einer dreifachen Ausführung der Thermoelemente diese Wichtigkeit berücksichtigt.

1.2.2 Durchflußmesser

Die Durchflußmesser nutzen die metallischen Eigenschaften des Kühlmittels aus und messen die Interaktion des Durchsatzes mit einem Magnetfeld. Bei der neuen Ausführung wird die Benutzung einer Erregungsspule (Wirbelströme) im Gegensatz zu dem permanenten Magnetsystem bevorzugt. Die Meßsignale betragen einige mA, folgen den schnellen Änderungen des Durchsatzes ziemlich gut, erfordern aber eine sorgfältige Eichung.

1.2.3 Rauschdetektoren

Die Rauschdetektoren sind spezielle Thermoelemente, die wegen ihrer kleinen Zeitkonstante das örtliche thermische Rauschen gut übertragen. Manche Forschungsergebnisse sprechen für den Einsatz von Rauschdetektoren, aber die dadurch erzeugten Signale erfordern eine entsprechende komplizierte Versuchseichung, und es ist noch nicht sicher, ob diese Instrumente bei dem SNR 300 systematisch verwendet werden sollen.

1.2.4 Schalldetektoren

Unter Schalldetektoren versteht man Wandler, die Druckamplituden in ein elektrisches Signal umsetzen. Hierzu dienen piezoelektrische Quarze, welche sowohl als Schallemitter wie auch als Schallempfänger Einsatz finden. Werden Ultraschallimpulse in den zu überwachenden Kern gesendet, so können möglicherweise Anomalien im Natriumbereich durch Reflexions-signale detektiert werden. Hierbei ist das Echo durch abweichende Laufzeiten der Schallwellenfronten gekennzeichnet. Die Ultraschalltechnik eignet sich besonders für die Ortung von Gasphasen oder Fremdoobjekten im Kühlmittel.

Zur Temperaturentkopplung und zur Bündelung des Schallfeldes sowie zur Schnelleitung durch verschiedene Wandungen oder Absorptionszonen werden Koppelstäbe benutzt [6, 7]. Neben dem Impuls-Echo-Verfahren kennt man das Durchschallungsverfahren; hierbei wird, im Gegensatz zu den bei dem Echoverfahren benutzten Einzelimpulsen, ein Dauerschallsignal emittiert, was durch Störungen im Ortungsbereich mehr oder minder gedämpft wird. Diese Technik, in Verbindung mit schallbündelnden Koppelstäben, gestattet insbesondere die Detektion dynamischer Störungen, wie z.B. das Vorhandensein von Dampf oder im Kühlmittelstrom mitgerissene Gasblasen. Mit Hilfe einiger am Tank oder an der Instrumentierungsplatte angebrachten Ultraschallsensoren wird erreicht, daß besonders kritische Bereiche des Kerns abgetastet und überwacht werden. Ob und in welcher Weise diese Technik für die Coreüberwachung zum Einsatz kommen kann, ist jedoch noch weitgehend ungeklärt.

1.2.5 Hülschadendetektoren

Die bei einem Hüllrohrbruch in das Kühlmittel eintretenden Spaltgasblasen werden im Austrittskanal des Brennelementes durch die Zentrifugenwirkung eines "Zyklonabscheiders" vom Natrium getrennt und im Zentrum des Zyklons zu einer geschlossenen Gassäule angesammelt. Dort wird das Gas mit Hilfe eines beheizten Temperaturfühlers nachgewiesen, der auf die stark verringerte Wärmeabfuhr bei Anwesenheit von Gas anstelle von Natrium mit einem raschen Temperaturanstieg reagiert [4]. Die Anwendung von solchen Zyklonabscheidern erlaubt es, die Hülschäden mit einer hohen Empfindlichkeit und einer kurzen Ansprechzeit (0,5 s) zu detektieren. Weitere Versuche sind geplant, um die Reaktion eines solchen Systems auf das in geringen Mengen im Kühlmittel enthaltene Schutzgas zu ermitteln. Die Zuverlässigkeit dieses Detektors entspricht der Zuverlässigkeit der beheizten Temperatursonde und kann z.Z. nicht genau eingeschätzt werden.

1.3 Verknüpfung der Instrumentierung mit dem Sicherheitssystem

Die verschiedenen Meßfühler, die zur Verfügung stehen, liefern Signale, die über den Zustand des Kerns eine umfangreiche Information geben können.

Änderungen in dem erwarteten Ablauf solcher Signale sind von höchster Bedeutung für die Gewährleistung der Sicherheit eines Reaktors und können eventuell dazu führen, daß das Abschaltssystem ausgelöst wird oder das Betriebspersonal von einer besorgniserregenden Situation unterrichtet wird. Das Problem der Verbindung zwischen dem Meßfühler und dem Sicherheitssystem für die Realisierung einer effektiven Coreüberwachung ist wegen dem Umfang der Informationsmenge eine delikate Angelegenheit.

Nimmt man an, daß 200 instrumentierte Brennelemente mit je 1 Durchflußmesser (DM), 3 Thermoelementen (TE) und 1 Zyklonabscheider (ZA) bestückt sind, ergeben die

200 DM

600 TE

200 ZA

eine Summe von 1000 Signalen,

die in irgendeiner Form zu verarbeiten sind, damit die permanent gestellte Frage "Soll man den Reaktor abschalten?" mit "Ja" oder "Nein" beantwortet wird. Es ist natürlich nicht möglich, die 1000 Signale mit 1000 Kontakten des Abschaltsystems durch Grenzwertmelder direkt zu koppeln. Ausfälle von Meßfühlern oder von Meßverstärkern würden somit zu einer kontinuierlichen Unterbrechung des Reaktorbetriebs führen. Die angestrebte Verknüpfung erfordert eine besser diskriminierende Lösung, die, wie die dreifache Ausführung der Thermoelemente es schon andeuten läßt, in Richtung Wahlschaltungen wie ein 2- von 3-System zu finden ist. Die Vorteile der 2- von 3-Schaltung sind bekannt. Beim Ausfall eines Instrumentes wird einerseits beim normalen Betrieb kein falsches Signal erzeugt und andererseits bei der Überschreitung der Grenze ist das Abschaltsignal nicht gesperrt. Die Vorteile der 2- von 3-Schaltung sind leider für die Coreüberwachung von einigen negativen Aspekten überschattet, und es scheint sinnvoll, diese Punkte etwas ausführlicher zu beschreiben.

Der Diskriminierungseffekt der 2- von 3-Schaltung eignet sich nur für drei Meßfühler. Ist die Zahl größer als drei, dann ist die Bestimmung der Auswahlkombination nicht so einfach. Das gilt besonders für unser Beispiel mit vier Instrumenten (3 TE, 1 DM), wo die 2/4 und 3/4 Bruchteile ganz andere Wahlkriterien erzwingen würden (2/4 ist sehr streng und

3/4 erscheint etwas kulant). Dazu kommt die Tatsache, daß die vier Meßfühler gleich behandelt werden, obwohl die Thermoelemente mit dreifacher Redundanz vertreten sind, der Durchflußmesser dagegen nur einmal, und daß die zwei Meßgrößen physikalisch durch die Kopplung über die Wärmebilanz voneinander nicht unabhängig sind. Die Erweiterung auf fünf Meßfühler bietet mit 3/5 einen günstigeren Schnitt, aber der Zyklonabscheider, der für die Detektion des Berstens vorgesehen ist, paßt mit den anderen vier nicht zusammen.

Die 2- von 3-Schaltung wird eine nicht vernachlässigbare Zahl von falschen Abschaltungen zulassen müssen, sobald die defekten Meßfühler eine Grenze von einigen Prozenten erreicht haben. Dieser Punkt ist im Anhang 1 diskutiert und muß wegen der finanziellen Konsequenzen "unbegründeter" Abschaltungen besonders beachtet werden.

Die 2- von 3-Schaltung kann die defekten Meßfühler nicht als solche anerkennen und kann die Simultaneität verschiedener Ereignisse nicht berücksichtigen. Diese Situation ist in Abb. 2a und 2b schematisiert. Fällt das erste Thermoelement am Montag aus, so ist, wenn das zweite am Donnerstag ausfällt, eine Abschaltung fällig. Der Abstand von drei Tagen zwischen den Ereignissen sowie die Tatsache, daß nach den ersten Ereignissen die zwei anderen Thermoelemente einwandfreie Signale geliefert haben, wurden bei der Entscheidung nicht berücksichtigt. In 2a waren die defekten Meßfühler mit Drahtbruch (open) gekennzeichnet, in 2b dagegen ist eine Wanderung der effektiven Lötstelle als Defekt zugrunde gelegt. Wenn eine gefährliche Situation bemerkbar wird, erkennt die 2- von 3-Schaltung nicht, daß 2 Thermoelemente überhaupt nicht reagieren können. Es wäre wünschenswert, daß das einzige glaubwürdige Thermoelement ernster genommen würde. Die 2- von 3-Schaltung reagiert auf Zustände, sie kann die Zustände aber nicht auf Ereignisse zurückführen, dafür hat sie kein Gedächtnis.

Die 2- von 3-Schaltung verknüpft logische Signale, die von analogen Instrumenten stammen, aber die in der digitalen Form 0 - 1 bearbeitet werden. Die Konversion unterliegt einer Grenzüberschreitung oder Vergleichs-Operation (Komparator) bei Rechnern, die von sicherheitstechnischem Standpunkt sowie von probabilistischen Betrachtungen festgelegt werden muß.

Die Temperaturschwellen müssen hoch genug liegen, so daß nur ernsthafte Kühlstörungen eine Reaktion auslösen können. Dieses schließt aber die Realisierung eines Frühwarnsystems und die "Trendanalyse" aus. Ein Fall, in dem die Anzeige von drei Thermoelementen simultan und bei stationärer Leistung um 12 Grad ansteigt, wird unbemerkt passieren, weil der Anstieg unter der Schwelle (z.B. 40°C) liegt.

Es muß betont werden, daß diese kritische Einstellung gegenüber der 2- von 3-Schaltung nur im Rahmen der Coreüberwachung und in einem bestimmten Kontext (1000 Signale) zu begründen ist. Ihr Einsatz bei konventionellem Sicherheitssystem ist überhaupt nicht in Frage gestellt, es scheint aber, daß die neuesten Erfahrungen, die aus sicherheitsorientierten Experimenten gewonnen wurden, nur dann völlig ausgenutzt werden können, wenn ein anderes Signalverarbeitungssystem zur Verfügung steht.

2. Vorgeschlagene Lösung

2.1 Annahmen und Voraussetzungen

Es wurde bereits erklärt, daß die Coreüberwachung eine besondere Aufgabe darstellt. Die Lösungen dieses Problems sind mannigfaltig und erfordern die Verfügbarkeit verschiedener Einrichtungen, die die Gestaltung einer Lösung variieren lassen können. Während das dritte Kapitel der Realisierung und der Realisierbarkeit des Systems gewidmet wird, ist es an dieser Stelle unentbehrlich, die allgemeinen Voraussetzungen und die Richtlinien des Systems kurz zu beschreiben. Die folgenden Punkte wurden für den Entwurf eines Systems angenommen:

- Das konventionelle Sicherheitssystem existiert schon und erfüllt selbständig die wichtigen Kontrollen, die entweder den Kern als Ganzes oder das gesamte Kraftwerk betreffen. Eine Kommunikation zwischen den zwei Systemen ist in beiden Richtungen möglich und erwünscht, ist jedoch keine Voraussetzung, und der Ausfall einer solchen Verbindung sollte niemals die Selbständigkeit beider Systeme beeinträchtigen.

- Es ist wahrscheinlich, daß ein Prozeßrechner die Überwachung mancher Anlagen des Kraftwerks übernimmt und daß er weitere komplizierte Aufgaben, wie Abbrandberechnungen, Ermittlung des Wirkungsgrades oder Reaktivitätsbilanz, mit ausführlichen Protokollen erledigen kann. Wie beim konventionellen System ist der Prozeßrechner ebenso wie seine Verbindung mit dem System erwünscht, ist jedoch keine Voraussetzung.
- Es wurde angenommen, daß die notwendige In-Core-Instrumentierung eingebaut ist. Eine Anzahl von 165 bis 199 (mit Brutzone) instrumentierten Brennelementen wurde als Richtwert festgelegt (200 wird gelegentlich als runde Zahl benutzt, um einige Berechnungen zu vereinfachen). Jedes Brennelement enthält drei Thermoelemente und einen Durchflußmesser. Ferner wird die eventuelle Verfügbarkeit von Rauschdetektoren, Schall-detektoren und Zyklonabscheidern berücksichtigt.
- Die Benutzung der Datenverarbeitung ist eine weitere Voraussetzung und schließt die folgenden Forderungen ein.

Die Meßfühler werden in regelmäßigem Abstand abgetastet (äquidistante Meßwerte) und mit Hilfe eines Analog-Digital-Umsetzers umgewandelt. Da die Zeitkonstante der Thermoelemente bei ca. 1 bis 1,5 sec liegt und da eine Abschaltzeit von ca. 2 sec bei lokalen Störungen vertretbar erscheint, ist eine Abtastfrequenz von 2 Hz ($t = 0,5$ sec) eine realistische Annahme.

Der Digitalrechner dient zur Erfassung, zur Verarbeitung und teilweise zur Speicherung der Meßwerte. Die Speicherung der Werte wird vierstufig betrachtet:

- Der letzte erfaßte Wert (entspricht einem Meßzyklus)
- Die letzten 8 Werte (die Wahl der Zahl 8 ist keine Bedingung, jedoch günstig, wie es im Kapitel 3 erklärt wird)
- Die kurze Historik (erwünscht)
- Die lange Historik (erwünscht - OFF-LINE).

Zur Gestaltung des Entwurfs sind folgende Punkte wichtig:

Das System soll als Schutzsystem konzipiert werden, aber auch als Core-überwachung geeignet sein und das schließt nicht nur die Meldung

katastrophaler Zustände, sondern auch die frühzeitige Detektion von Schäden und die Trendanalyse ein. Der Reaktor ist ein Leistungsreaktor, daher muß die Zahl von falschen Alarmen minimal gehalten werden.

2.2 Organisation der Grenzwerte

Jeder Meßfühler liefert ein Signal, das für einen gegebenen Zustand des Reaktors (Leistung, Durchsatz) innerhalb eines Toleranzbereiches liegen sollte. Dieser Toleranzbereich entspricht einem Soll-Band, das durch zwei Grenzwerte definiert ist. Wenn die Signale von diesem Band abweichen, erscheint es wichtig, den Umfang dieser Abweichung zu erfahren. Dieses erfordert zusätzliche Grenzwerte. Diese dienen - wie später erklärt werden wird - zur Identifizierung defekter Meßfühler und benötigen nur wenig zusätzliche Rechenzeit, weil sie nur von einer Minderheit in Anspruch genommen werden.

Die Festlegung der Grenzwerte verlangt eine genaue Kenntnis des gemessenen Wertes. Die Austrittstemperatur eines Brennelementes, zum Beispiel, ergibt sich aus folgenden vereinfachten Gleichungen:

$$T_A = \Delta T_{sp} + \sigma T_n + T_e \quad (1)$$

mit
$$\Delta T_{sp} = \frac{p \times K_p}{D} \quad (2)$$

und
$$\sigma T_n = \sigma T_i + \sigma T_t + \sigma T_d + \sigma T_b \quad (3)$$

ΔT_{sp} = Temperaturspanne und ist eine Funktion der Reaktorleistung p und des Durchsatzes D

K_p = Konstante

T_e = Eintrittstemperatur

σT_n = Summe von Abweichungen oder Fehlern

σT_i = Instrumentierungsfehler (Vergleichsstelle, Verstärkeroffset usw.)

σT_t = statistische Abweichung (mechanische Toleranzen, Anreicherungsgrad usw.)

ΔT_d = Profilkorrektur. Das Leistungsprofil des Cores ist durch Drosselung kompensiert; da aber diese Korrektur stufenweise vorgenommen wird, ist eine kleine Differenz in Kauf zu nehmen.

ΔT_b = Abbrand-Variation und ist eine Funktion des Ortes und der Zeit.

Das Durchsatzsignal erfordert eine ähnliche Behandlung, aber das Verfahren ist einfacher, weil der Durchsatz primär von der Pumpenleistung und wenig von der Temperatur abhängt und wird im Rahmen dieses Berichtes nicht detailliert.

Die Anpassung der Grenzwerte an die Variationen der Reaktorleistung ist für die mittleren Grenzwerte eine Notwendigkeit. Diese Anpassung scheint auf den ersten Blick etwas kompliziert, kann aber mit relativ wenig Aufwand realisiert werden. Die Anwendung eines "Push-Pull"-Prinzips, bei dem eine große Zahl (20 %) von abweichenden Signalen eine Verschiebung des Sollbandes verursachen sollte, wäre sehr einfach. Eine solche Rückführung ist möglicherweise zu probabilistisch orientiert und für ein Sicherheitssystem nicht unbedingt akzeptabel. Eine andere Lösung bietet die Vereinfachung der Gleichung (1). Die Betriebsbedingungen eines Leistungsreaktors werden nicht willkürlich geändert, und die Änderung der Austrittstemperatur in der Nähe eines Arbeitspunktes kann wie folgt errechnet werden:

$$\Delta T_a = k_1 \Delta T_1 + k_2 \Delta T_d + k_3 \Delta T_e \quad (4)$$

ΔT_1 , ΔT_d und ΔT_e sind die elementaren Variationen der Austrittstemperatur, die durch Änderungen der Leistung, des Durchsatzes und der Eintrittstemperatur erfolgen. Die Koeffizienten k_1 , k_2 und k_3 wären für vier typische Leistungsbereiche zu definieren und könnten für jedes Brennelement gespeichert werden, so daß die lokalen Abweichungen (z.B. Drosselung) und die langsame Evolution (z.B. Abbrandkorrektur) nach der initialen Einschätzung progressiv und individuell eingeführt werden könnten. Daß die Gleichung nicht linear ist, sollte kein großes Hindernis sein. Die Bestimmung der Grenzwerte erfordert einen Toleranzbereich, und die Genauigkeit ist nicht vorrangig. Die Leistungs-Durchsatz-Paare treten

nur in engbegrenzten Kombinationen auf, so daß auch hier linearisiert werden kann. Das Problem der Nichtlinearitäten ist in jedem Fall zu behandeln, weil die Meßfühler keine linearen Werte liefern. Die Umwandlung der elektrischen Größe in industrielle Einheiten erfordert nicht nur einen numerischen Konversionsfaktor, sondern die Berücksichtigung der Kennlinien des Meßfühlers. Die Kompensation, auch Entzerrung genannt, wird nicht vorgenommen, weil sie entweder zu viel Zeit (Software) oder zu hohe Investitionen (Funktionsgenerator) verlangt. Es ist daher notwendig, die Nichtlinearitäten global zu betrachten, und es wäre vorteilhaft, diesen letzten Punkt bei der Berechnung der Koeffizienten k_1 , k_2 und k_3 einzuschließen.

2.3 Bilanz eines Brennelementes

Die Detektion von Kühlungsstörungen ist prinzipiell ein Istwert-Sollwert-Vergleich, der mit digitalen Komparatoren vorgenommen wird. Es wurde schon gezeigt, daß diese Auswertung mehr als eine einfache logische Verknüpfung verlangt, weil die Ausfallquote sehr ungünstig sein kann und weil Störungen unter "großzügigen Grenzwerten" liegen könnten. Eine verfeinerte Auswertung bieten Algorithmen, die die Sicherheitskriterien entsprechend wichten können. Ein derartiger Vorschlag kann aus Zeitgründen nicht für alle Brennelemente verwirklicht werden. Es scheint dann sinnvoll zu sein, einen Ausleseprozeß zu organisieren, der die für eine Sonderbehandlung in Frage kommenden "verdächtigen" Brennelemente aussortieren kann. Dieses schnelle Verfahren kann mit Hilfe des unten erläuterten Status-Index die Glaubwürdigkeit der Signale berücksichtigen.

2.3.1 Status-Index

Wenn ein Signal im Toleranzband liegt, entspricht diese Tatsache unserer Erwartung. Ist das Signal außerhalb des Bandes, so wird es als Anomalie betrachtet, weil es von dem normalen Zustand abweicht. In unserem Anwendungsbereich hat das abweichende Signal für die Sicherheit ein größeres Gewicht (es trägt zur Abschaltung und damit zum verbundenen finanziellen Aufwand bei), und dieses erfordert notwendigerweise eine Prüfung der Glaubwürdigkeit des Signals. Die Glaubwürdigkeit ist das Vertrauen in das Signal und wird unangetastet bleiben, solange das Verhalten des Signals kein Mißtrauen geweckt hat. Diese Glaubwürdigkeit ist entweder

gut oder schlecht und soll durch einen Status-Index charakterisiert werden. Dieser Status wichtet die Information nach dem Integritätsgrad eines Meßfühlers, dient zum Umtausch defekter Instrumente (Service) und könnte für diese spezifische Anwendung nach folgender Tabelle organisiert werden:

Wertung	Wert	Typischer Zustand
gut	0	normal
	1	frei (noch nicht zugeteilt)
	2	Sonderüberwachung
	3	rekalibriert (Offset)
schlecht	4	wackelig
	5	Spurious (Rausch)
	6	defekt (open)
	7	defekt (short)

Die Klassifizierung dieser typischen Zustände verlangt natürlich ein Revisionsverfahren, das von der Vorgeschichte des Meßfühlers abhängt. Dieses "Updating" des Status wird später behandelt.

2.3.2 Ermittlung des Meßfühlerindex

Die Amplitude eines Signals ist mit verschiedenen Schwellen verglichen und die Ergebnisse sind für die Zuteilung eines numerischen elementaren Index benutzt. Die Staffelung der Indexwerte ist mit der allgemeinen Störfallanalyse verbunden und ist als einfaches Beispiel in Abb. (3) dargestellt. Ein Thermoelement-Signal, das in dem Sollband liegt, hat einen elementaren Index gleich Null und dem oberen Band wird eine 1 zugeteilt. Die oberen Werte sind mit 2 und 4 noch höher bewertet und für die unteren Zonen sind -1 und +1 vorgesehen. Der Wert -1 ist negativ, um statistische Variationen etwas zu kompensieren, es ist aber anzunehmen,

daß dieser Wert nur kurz unter dem Sollband bleiben kann, ohne eine Statusänderung zu verursachen. Von besonderer Bedeutung ist der Defaultwert, der als Bewertung einer Abwesenheit zu interpretieren ist. Dieses Konzept ist durch folgendes Beispiel leichter zu erklären: Wenn ein Thermoelement bricht (open), ist die Zuteilung des elementaren Index III (Wert +4) fällig. Nach einigen Zyklen, wenn die beiden anderen Thermoelemente sich einwandfrei benommen haben, wird die Lage dieses Meßfühlers nicht mehr als ein katastrophaler Zustand betrachtet, sondern als defekt anerkannt. Die logische Konsequenz ist dann, diesen Index zu reduzieren und die Glaubwürdigkeit eines solchen Signals gleich Null zu setzen. Das bedeutet, daß der Meßfühler abwesend ist, momentan abgeschrieben wird und daß die Zahl von glaubwürdigen Meßühlern eines Brennelementes von 3 auf 2 reduziert ist. Der Überwachungsgrad des Brennelementes ist aber dadurch vermindert worden, und es ist begreiflich, daß eine solche Minderung der Brennelement-Information einer strengen Überwachung unterliegen sollte. Dieses wird erneut durch die Zuteilung des Defaultwertes erreicht.

Die elementaren Indices des Durchflußmessers werden ähnlich berechnet, aber einige Unterschiede, die von der Flexibilität des Verfahrens Gebrauch machen, sollen hervorgehoben werden.

Die Bewertungsindices des Durchflußmessers sind höher gestaffelt als die Thermoelementindices. Dieses stützt sich auf die einfache Tatsache, daß nur ein Durchflußmesser pro Brennelement zur Verfügung steht, die drei Thermoelemente dagegen redundant sind. Wenn das Durchflußmessersignal die Toleranzzone überschreitet, geht dieses Ereignis nicht unbedingt in Richtung der Sicherheit. Dieses kann durch einen Drosselungsfaktor, aber auch durch eine langsame Blockierung, bei welcher der Durchsatz alternativ pendelt, verursacht werden. Als Wert steht in der Tabelle ein Fragezeichen, aber ein Wert von 3 bis 4 sollte dieses Phänomen entsprechend bemerkbar machen.

2.3.3 Zuteilung des Brennelementindex

Die Zahlen, die als Indexwerte gewählt worden sind, sind nur als Beispiel zu betrachten. Die zwischen 0 und 10 dargestellte Skala könnte natürlich

mit verfeinerten Unterschieden zwischen 0 und 50 anders gestaffelt werden. Das Ziel ist nicht, eine logische Entscheidung zu bekommen, sondern eine provisorische Indikation als Bilanz aufzustellen, und das Summierungsverfahren ist für einen Standard-Rechner fast leichter als UND/ODER-Verknüpfungen zu erledigen. Die Bilanz eines Brennelementes ist nicht anders als die ausgeführte Summe der vier elementaren Indexe. Mit der vorgegebenen Tabelle kann diese Summe alle Werte zwischen 0 und 22 nehmen.

2.3.4 Ermittlung der Prioritäten

Die resultierende Summe stellt einen Gefahrengrad dar, der komplementäre Untersuchungen verursachen soll. Die Dringlichkeit dieser Untersuchungen wird sofort nach Ermittlung des Brennelementindex bestimmt. Dieses scheint notwendig, wenn die Instrumentierung durch einige Prozente von beschädigten Meßfühlern gekennzeichnet ist, und sorgt dafür, daß die wichtigsten Fälle zuerst an die Reihe kommen und die anderen später, sofern die Zeit dafür ausreicht. Der Rechner kann genau erfahren, was als Rechen- volumen vorliegt und deshalb ist kein Interruptsystem notwendig.

2.4 Diagnose

Die Erfassung der Meßwerte und die Ermittlung der Prioritäten sind schnelle Vorgänge, die innerhalb eines Zyklus viel Zeit übrig lassen, um die Situation einer kleineren Anzahl von Signalen genau zu überprüfen. Diese Untersuchung kann zu einer Störungsdiagnose führen und betrifft nicht einen einzigen momentanen Wert, sondern dehnt sich auf einen Signalablauf aus und schließt die Vorgeschichte des Meßfühlers mit ein. Die kurzfristige Evolution der Signale ist in den letzten Werten (8 Werte in unserem Beispiel) gespeichert und diese Folge von Punkten unterscheidet die Signalverarbeitung von einer einfachen Grenzwertverarbeitung. Bei einem digitalen System ist ein Punkt zu wenig diskriminierend, weil man immer annehmen kann, daß das Ein- bzw. Ausschalten von großen elektrischen Anlagen eines Kraftwerkes funktartige Störungen auf mehreren elektronischen Komponenten verursachen könnte. Die Zwei-Punkte-Lösung liefert einen elementaren Gradienten, man weiß aber, daß die digitale Differenzbildung bei leicht

schwankenden Signalen hohe Gradientenwerte ergibt, die nicht sehr repräsentativ sind. Die Benutzung der acht letzten Werte dagegen umfaßt eine Zeitspanne von 4 Sekunden ($8 \times 0,5$) und erlaubt eine ausgewogenere Auswertung der Signale.

2.4.1 Stetigkeitskontrolle

Die Untersuchung des Ablaufs von Signalen erfordert eine Trennung zwischen stationären und nicht stationären Profilen. Dieses Verfahren wird als "Stetigkeitskontrolle" bezeichnet. Die erste Stufe dieses Prozesses betrifft die Berechnung des Mittelwertes, die wie folgt definiert ist:

$$DC = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 M(I) \quad (5)$$

Die Benutzung der Abkürzungen (Abb. 4) DC und AC deutet auf eine Verwandtschaft mit Gleichstromanteil und Wechselstromanteil, obwohl dieser Zusammenhang nur mit einigen Einschränkungen korrekt ist.

Die Bildung des Mittelwertes kann zusätzliche Information liefern, wenn der Mittelwert aus folgenden Teilsummen errechnet wird:

$$M_{41} = (M_{81} + M_{82})/2$$

$$M_{42} = (M_{83} + M_{84})/2$$

$$M_{43} = (M_{85} + M_{86})/2$$

$$M_{44} = (M_{87} + M_{88})/2$$

wo M_{81} bis M_{88} die 8 Werte $M(I)$ in einer anderen Schreibform sind.

Die einzelnen Paare sind weiter kombiniert:

$$M_{21} = (M_{41} + M_{42})/2$$

$$M_{22} = (M_{43} + M_{44})/2$$

und

$$DC = (M_{21} + M_{22})/2.$$

Die Zwischenergebnisse können mit einfachen Vergleichen gegenseitig gewogen werden und die Ermittlung solcher Ungleichungen wie

$$M_{21} > M_{22}$$
$$M_{41} > M_{42} > M_{43} > M_{44}$$

ist für die Analyse der Profile sehr interessant.

Die Stetigkeit der Signale ist auch durch geringe Abweichungen zwischen dem Mittelwert und den verschiedenen Punkten gekennzeichnet und sie können durch folgende Berechnung ermittelt werden:

$$AC = \sum_{i=1}^8 |M(I) - DC|$$

Diese Größe ist die Summe der Abweichungen und hat eine Bedeutung, die sehr nah an der Varianz liegt. Die exakte Berechnung der Varianz erfordert die quadratische Form der Abweichungen und ist damit immer positiv. Das Multiplizieren wird hier prinzipiell vermieden und dieses verlangt die Summierung der absoluten Werte. Diese Operation ist mit dem Befehl "Lade Positiv" für fast alle Rechner sehr leicht durchführbar.

Wenn diese Auswertungen für die vier Meßfühler vorliegen, ist die Klassifizierung der Signale in verschiedenen Profilen möglich (Abb. 5).

Folgende Klassen können ermittelt werden:

- Schnell ansteigende oder abfallende Signale unter Sonderberücksichtigung der zwei letzten Werte, die für eine Abschaltung sehr wichtig sind,
- Signale, die langsam einen höheren Mittelwert erreicht haben,
- Einzelstörungen, die schnell quittiert werden könnten,
- schnelle Schwankungen, die durch große Amplitude gekennzeichnet werden.

Alle diese Anzeichen müssen weiterverarbeitet werden, um Koinzidenzen und Zusammenhänge festzustellen. Der Status Index spielt dabei eine große

Rolle und kann durch dieses Verfahren nach einigen Zyklen geändert werden für den Fall, daß nur ein Meßfühler sich abnormal verhält. Die Verknüpfung der Stetigkeitsergebnisse erfolgt mit Einsatz von Algorithmen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht beschrieben werden. Diese Algorithmen müssen die verschiedenen Aspekte des Problems berücksichtigen und die Abtastfrequenz, die Zeitkonstante der Meßfühler oder des Verstärkers bzw. des Transmitters, die Eigenschaften des Filters, die Rauschpegel der Instrumentierung sowie die Erfahrungen, die durch Simulierung von Kühlungsstörungen in einem nachgebauten Kühlkanal gewonnen werden, werden nicht ohne Einfluß bleiben. Es wird aber ratsam sein, bei diesen Algorithmen ein ähnliches numerisches Wichtungungsverfahren zu benutzen, um die Grenzfälle effektiver zu behandeln, wenn die Information der anderen Geräte (Ultraschall, Rausch) dadurch leicht zufließen kann. Es wird weiter vorgeschlagen, das Abschaltensignal nach Bestätigung eines zweiten Zyklus auszulösen.

2.4.2 Rauschanalyse

Die acht letzten Werte eines Signals reichen nicht aus, um die Signale der Rauschdetektoren oder der Schalldetektoren zu analysieren. Selbst wenn die kurze Historik sofort greifbar wäre, läßt die niedrige Frequenz von 2 Hz keine sinnvolle Analyse zu. Die Auswertung des Rauschens muß getrennt behandelt werden, weil sie die Untersuchung anderer Frequenzbereiche mit der damit verbundenen höheren Abtastfrequenz verlangt. Es muß hinzugefügt werden, daß die Ergebnisse solch einer Analyse innerhalb einer kurzen Zeit geliefert werden sollten, falls ihre Information für eine schnelle Abschaltung des Reaktors herangezogen wird. Niemand hat die ausgezeichneten theoretischen und experimentellen Ergebnisse der Noise-Analysis in Frage gestellt, aber Methoden wie die Kreuzkorrelation oder die Ermittlung des Leistungsdichtespektrums werden mit einigen Ausnahmen als Forschungsmethoden betrachtet und sind oft bei Standardinstrumentierungen ausgeschlossen. Dieser Standpunkt wird wahrscheinlich aus folgenden Gründen demnächst modifiziert werden:

- Die Erfassung und das Multiplexing von schnell abgetasteten Meßwerten kann jetzt sehr preiswert realisiert werden, wenn man eine Genauigkeit von 1 bis 2 % als ausreichend annimmt. Die Anwendung der sogenannten "Schnellen Fourier Transformation" hat die Rechenzeiten eines solchen Verfahrens drastisch reduziert.

- Neue fest verdrahtete Einheiten, die für diese Anwendungen speziell ausgelegt wurden, können die Rechenzeiten noch weiter abkürzen und befinden sich bereits auf dem Markt.

Alle Signale, die mit Rauschspektren gekennzeichnet sind (Schall-Detektoren, thermische Rauschdetektoren), werden ursprünglich als Funktion der Zeit registriert und eine Analyse auf der Zeitebene ist fast unmöglich. Die Umwandlung dieser Signale in Frequenzspektren ist dagegen leicht zu realisieren und würde durch die Einteilung des Spektrums in kleine Frequenzbänder typische Kühlungsstörungen schnell identifizieren können. Die Anwendung der Schnellen Fourier Transformation erlaubt es, die zeitraubenden Vorgänge [9] bei der Berechnung der Kreuzkorrelation (computation of the mean lagged products) zu umgehen und gibt durch die einfache Multiplikation der Fourier-transformierten Zweier-Signale die spektrale Leistungsdichte. Die Einteilung eines Spektrums in kleine Frequenzabschnitte ergibt Profile, die als Pattern betrachtet werden können. Diese Pattern sollten für die wichtigen Leistung-Durchsatz-Paare ermittelt und entsprechend klassifiziert werden. Wenn ein solches Profil nicht dem Standardmuster entspricht, sollte es mit "pathologischen Pattern" verglichen werden. Dieses Verfahren würde für die Präzisierung einer Diagnose sehr wertvoll sein. Die Bedingungen dafür wären die Klassifizierung und ein langsames "Updating" der Pattern. Diese fortschrittlichen Methoden, sie werden bereits bei der Kriminalistik (Fingerabdrücke) oder der Anthropometrie angewandt, sind aber nach dem aktuellen Stand der Technik durchführbar.

2.5 Flexibilität des Verfahrens

Die verschiedenen Koeffizienten, die für die Sortierung und die Abzweigungen des Programms benutzt werden, können leicht geändert werden. Die Änderungen können durch Modifizierung des Programms oder automatisch nach dem Zustand der Instrumentierung oder nach dem "Beschäftigungsgrad" des Systems vorgenommen werden. Ist die Instrumentierung 98 % in Ordnung, reicht die Zeit aus, um jede kleine Abweichung zu analysieren. Sind einige Defekte entdeckt worden, sorgt die Klassifizierung für die Untersuchung der höheren Prioritäten. Ein Brennelement, bei dem nur ein einziger Meßfühler funktionsfähig geblieben ist, würde eventuell durch

strenge Untersuchungen der "Nachbarn" noch nicht zur Abschaltung führen, falls die gesamte Instrumentierung so gut ist, daß die Zeit vorhanden ist, um komplizierte Algorithmen einzusetzen.

Die Anwendung einer numerischen Wichtung erlaubt, daß andere Faktoren additiv die Entscheidung mitbestimmen können. Informationen, wie eine leichte Änderung der Reaktivitätsbilanz, eine Messung des Ultraschall-echos, werden keine direkte Abschaltung verursachen können, werden jedoch zur Kenntnis des Schichtphysikers gebracht. Durch Änderungen eines normalerweise auf Null gesetzten Wertes können diese Informationen zur Entscheidung bei Grenzfällen beitragen. Das "Interface" bleibt einfach; fällt das Gerät aus, bleibt der Wert Null, ist die Qualität der Schallüberwachung ausgezeichnet, kann ihr Einfluß auf die Entscheidung erhöht werden. (Er trägt zum Beispiel für drei Punkte statt zwei bei.) Diese Betrachtung ist interessant, weil die Entdeckungen "verdächtige" Fourier-Pattern oder Schnellsignale für den Schichtphysiker (oder Schichtleiter) eine Gewissensfrage sein wird, und es ist nicht angenehm, unter dem Druck der Forderung nach einem glatten Betriebsverlauf aufgrund einiger nicht sehr deutlicher Anzeichen die Abschaltentscheidung zu treffen. In der vorgeschlagenen Lösung ist es möglich, mit der numerischen Wichtung die beiden Untersuchungskomplexe (Fouriertransformierte und Stetigkeitskontrolle) sich gegenseitig beeinflussen zu lassen, ohne daß der Ausfall eines Gerätes die Weiterführung der Überwachung beeinträchtigt (Wert Null als Default). Wenn eine Fourier-Analyse ein pathologisches Pattern entdeckt hat und wenn die Stetigkeitskontrolle ungünstig erscheint, ist die Situation viel präziser geworden. Diese Interaktion ist auch bemerkbar, wenn unstetige Signale der Brennelementauswertung mit einem Signal des Zyklonabscheiders in Koinzidenz kommen. Die Konvergenz von mehreren Anzeichen, die jedes für sich noch keine sofortige Maßnahme verursachen, könnte in diesem Kontext eine Störung viel eindeutiger melden.

Es ist anzunehmen, daß in regelmäßigen Abständen die Meßwerte auf einen sequentiellen Datenträger (Magnetband) übertragen werden. Diese Registrierung der Daten könnte für die Überwachung des Cores sehr vorteilhaft werden. Es ist möglich, mit einem Auswertungsprogramm für Standard- sowie maßgeschnittene Auswertungen in Off-Line-Betrieb (z.B. SEDAP [10, 11])

die Abbrandrechnungen und die Umtauschanweisungen für das Service der Meßfühler gleich vorzunehmen. Die Auswertung solcher Daten würde eine sehr interessante "Lernphase" mit sich bringen und Fragen wie: "wie schnell sterben die Thermoelemente" oder "wieviel Grad betragen die Temperaturschwankungen in der Brutzone" usw., könnten sehr schnell beantwortet werden. Dieser Aspekt der Lernphase ist mit dem Prototypcharakter des SNR sehr gut in Einklang zu bringen.

3. Realisierbarkeit

Die elektronische Datenverarbeitung ist bei der Erfassung und der Verarbeitung von ca. 1000 Meßwerten unentbehrlich. Die vorgeschlagene Lösung stützt sich auf die Eigenschaften der EDV und benutzt nicht nur die Einrichtungen, sondern auch die Methoden der Datenverarbeitung. Die Schwierigkeiten bei der Anwendung der Informatik sind manchmal dadurch gekennzeichnet, daß die verschiedenen Meßverfahren, Rechenalgorithmen und Meßdatenspeicherungsarten nur effektiv gestaltet werden können, wenn man eine ausreichende Vorstellung über die Hardware zur Verfügung hat. Umgekehrt ist es unmöglich, eine Hardware-Konfiguration zu spezifizieren, solange der Bedarf an Datenspeicherplatz, Zykluszeit des Rechenwerks und die Programmunterbrechungs-Möglichkeiten (Interrupt Levels) nicht grob eingeschätzt werden können. Die gegenseitige Beeinflussung von Hardware-/Software-Spezifikationen ist für alle Datenverarbeitungsprojekte von höchster Bedeutung. Von dieser Interaktion hängt manchmal ab, ob ein Programm realisiert werden kann. Versucht wird, durch Beschreibung von Richtlinien für ein Hardware-System zu zeigen, daß die vorgeschlagene Methode realisierbar ist. Die Auslegung der verschiedenen Bauteile, die zur Verstärkung und Erfassung der Meßwerte sowie zu ihrer Verarbeitung und Zwischenspeicherung dienen, werden im Kontext der Coreüberwachung und ihrer Realisierbarkeit beschrieben.

3.1 Erfassung der Meßwerte

3.1.1 Verstärkung des Meßsignals

Die analogen Meßwerte werden in digitale umgewandelt. Es ist allgemein besser, die Signale vor dieser Umwandlung auf einen standardisierten

Spannungsbereich zu verstärken (z.B. 0 → 10 Volt). Die Übertragung der Signale soll, wenn möglich, in diesem Bereich geschehen und mit einem Mindeststrom vorgesehen werden. Besonders kritisch ist die Benutzung von sogenannten Transmittern, die manchmal nach Schrittverfahren arbeiten und die zu Pseudo-Pattern führen können. Gern gesehen wäre die auf Abb. 7 dargestellte Schaltung, die Gleichtaktunterdrückung, Spannungs- und Stromübertragung kombinieren könnte.

3.1.2 Analog-Digital-Wandler (ADW)

Der Analog-Digital-Wandler konvertiert die Meßsignale in eine Reihe von binären Zeichen, die in den Rechner direkt als Meßwerte eingegeben werden. Eine Länge von 12 Bits (4096 mögliche Einteilungen) scheint erforderlich zu sein. Zwei ADW werden parallel die Signale konvertieren. Die Ausgänge der zwei Geräte (Digitalsignal 0-1) werden durch ein Gatter gesperrt oder freigegeben, um nur eine Ausgangsreihe durchzulassen. Es ist vorgeschlagen, vier Kanäle mit vier Prüfspannungen zu reservieren, damit der Rechner bei einem ADW-Defekt sofort die Weiche umstellen kann (Abb. 8). Wenn die Kanaladresse "rutscht" oder die Konversion nicht genau genug wird, ist eine sofortige Wiederholung des Meßzyklus mit dem zweiten ADW gesichert.

3.2 Auslegung der Rechner

Die Digitalrechner gelten als das aktive Teil des Systems, dienen hauptsächlich zur Verarbeitung und Speicherung der Meßwerte und führen schließlich zur Ausgabe einer Warnung oder eines Abschaltsignals. Es gibt keinen speziellen Rechner für die Lösung der Coreüberwachung, aber es scheint vorteilhaft, mehrere kleine Rechner (sogenannte Mini-computers) einzusetzen, und diese Wahl wird wie folgt begründet:

- Das Verhältnis Leistung/Preis ist sehr günstig (16 K Rechner für DM 90.000.--).
- Das Betriebssystem ist einfach und minimal. Im Gegensatz zum echten Prozeßrechner sind die Verbindungen zur Peripherie, die Behandlung der Unterbrechungen und die Software auf das Wesentliche reduziert. Ferner bieten manche Hersteller dieser "Minirechner" einen Direkt-Speicherzugriff (auch DMA = Direct memory access genannt), der sich für unser auf die Datenerfassung orientiertes Problem sehr positiv auswirken kann.

- Das Vorhandensein von mehreren kleinen Rechnern wirkt sich positiv auf Ersatzteillagerung und Reparaturzeiten aus.
- Die Umprogrammierungen werden lokal und pro Sparte vorgenommen. Das Testen von Programmen ist viel leichter.
- Die Zykluszeiten von kleinen Rechnern sind sehr kurz und mit der Anwendung von MOS oder Halbleiterspeichern verlassen sie den Mikrosekundenbereich, um Werte von 300 bis 500 Nanosekunden zu erreichen.

Die Zykluszeiten dieser Minicomputer sind mit größeren Anlagen vergleichbar, weil die Zentrale-Prozessor-Einheit (ZPE oder CPU) sehr nah am Kernspeicher steht, und dieses ist für die Propagation der Impulse sehr günstig. Die Vorteile der kleinen Rechner sind auch mit einigen Schwächen verbunden. Die Gleitkommabefehle sind keine Standardbefehle, andere Befehle wie Multiplizieren, Dividieren und Potenzieren sind viel langsamer (auch mit Hardware Multiply ist die Zeit nicht vernachlässigbar) als für die Großrechner. Es ist aber möglich, die Programme so zu gestalten, daß hauptsächlich die einfachen Befehle, wie Addieren, Laden, Vergleichen und Schieben, verwendet werden.

3.2.1 Verbindung von mehreren Rechnern

Die Verarbeitung der Meßwerte kann mit einem einzigen Rechner vorgenommen werden, die Besonderheit der Fourier-Transformation verlangt den Einsatz eines speziellen Rechners mit einer getrennten Erfassung der eigenen Meßwerte. Die Wichtigkeit der Aufgabe und ihr enger Zusammenhang mit der Sicherheit des gesamten Reaktors erfordern eine hohe Zuverlässigkeit, die eine Redundanz des abschaltleitenden Rechners befürwortet. Die Anwendung des 2- von 3-Prinzips kann die Zuverlässigkeit des Systems erhöhen. Wenn die drei Rechner einen Direkt-Speicher-Zugriff erlauben, ist diese Lösung interessant. Es ist durchaus möglich, drei Rechner parallel laufen zu lassen, die drei Takte und die Eingabe zu synchronisieren. Was in unserer Anwendung sehr schwierig erscheint, ist die Verbindung mit einer Speicherplatte oder einem Magnetband. Bei einer Konfiguration mit drei Rechnern würde wahrscheinlich nur einer der drei Rechner an die Peripherie angeschlossen, weil die dreifache Ausführung dieser Speichereinheiten kostspielig und unpraktisch wäre. Die in der Abbildung 4 dargestellte Konfiguration

wurde in dieser Arbeit bevorzugt, weil die Zuverlässigkeit des Coreüberwachungssystems keine extreme Forderungen stellt, solange das konventionelle Sicherheitssystem vorhanden ist und weil sie eine bessere Flexibilität bietet.

Die Meßwerte werden gleichzeitig in den Kernspeicher der beiden Rechner R 1 und R 2 durch Direktspeicherzugriff geladen. Der Rechner R 1 ist normalerweise im aktiven Zustand und er allein verarbeitet die Meßwerte und speichert sie gelegentlich auf die Datenträger. Der Rechner R 2 arbeitet im Stand-by Mode und überwacht den Rechner R 1. Tritt ein Fehler auf, wird R 1 gesperrt und R 2 übernimmt die Verarbeitung innerhalb einiger Mikrosekunden, weil die Meßwerte auch in R 2 vorhanden und die beiden Rechner symmetrisch programmiert sind. Der Operator wird von einem solchen Zustand benachrichtigt und ersetzt den Rechner R 1 durch den Backup-Rechner R 3. Solange der Rechner R 3 nicht in Anspruch genommen wird, steht er als verbundener Service-Rechner zur Verfügung. Eine solche Anwendung wäre sehr praktisch, weil die Meßwerte binär dargestellt sind und ihre Umwandlung in industrielle Einheiten sowie ihre Darstellung auf Plotter oder Bildschirmgerät, die R 1 oder R 2 durch lange Vorgänge überfordern würden, damit gewährleistet wären.

3.2.2 Organisation des Kernspeichers

Der Kernspeicher ist nach einem bestimmten Schema eingeteilt, in dem die Implementierung von Sub-assembly-Meßdatenblöcken (SAMB) eine wesentliche Rolle spielen sollte. Ein SAMB ist eine einheitliche Datei, die jedem Brennelement zugeordnet ist (Abb. 10). Wegen der Einteilung des SAMB in 64 Wörter (8 x 8) kann die Adressierung der verschiedenen Elemente der Datei durch Bitmanipulationen besonders günstig werden. Alle Koeffizienten die für die Ermittlung der Grenzwerte notwendig sind, sowie die Status Indices, sind im unteren Teil des SAMB untergebracht. Der erste Teil der Adresse enthält, wegen der schon erwähnten Unterteilung in 64 Wörter, die Nummer des Brennelementes, und dieses sollte bei Konsolenabfragen von besonderem Vorteil werden.

Die Organisation des Rechners mit 200 elementaren Zellen (SAMB) ergibt folgende Berechnung:

200 Zellen je 64 Wörter	12800
Zusätzliche Speicherplätze	<u>3584</u>
Summe	16384 = 16 K

Das Betriebssystem und der feste Programmteil wären in ein zusätzliches 4 K Read-only-Memory geladen und somit hardwaremäßig geschützt.

3.3 Zusätzliche Einheiten

Die Realisierung des Systems bedarf einiger Erweiterungen, die durch den Aufbau einer bequemerer und flexibleren Anlage gerechtfertigt werden. Die folgenden Ein- bzw. Ausgabegeräte und Datenträger wären dann dem System anzuschließen. Das Konzept eines Unibus (einheitlicher oder gemeinsamer Datensammelweg) wäre für solche Verbindungen erstrebenswert.

3.3.1 Der Direkt-Zugriff-Speicher

Vorgesehen ist eine Platte (DISK) mit einer Zugriffszeit von ca. 10 ms für eine Kapazität von 3 bis 6 Mio Zeichen.

Auf dieser Platte werden folgende Einteilungen vorgenommen:

- a) Die kurze Historik, wahrscheinlich in drei Zeitrastern verteilt
 - 200 zuletzt erfaßte Werte
 - 200 Werte der letzten 24 Stunden
 - 200 Werte des Abbrandzyklus.
- b) Ein Pattern-Katalog mit gesunden Pattern und pathologischen Pattern. Die Pattern werden für verschiedene Leistungs- und Durchsatzpaarungen gespeichert.
- c) Service-Programme und Verschiedenes.
 - Kalibrierung und Test in isothermischem Zustand ($P = 0$, $T = 0$)
 - Druckausgabe und Plot in technischen Einheiten (Engineering Units).

3.3.2 Die sequentielle Datenspeicherung

Eine Magnetbandeinheit wird die Meßwerte speichern und diese Werte mit einem OFF-line-Auswertungsprogramm verarbeiten. Damit ist die Möglichkeit,

den Betrieb des Rechners zu kontrollieren und die allgemeine Coresituation einzuschätzen, für die Spezialisten gewährleistet.

3.3.3 Fernschreiber

Teletyp 1 - (leise und langsam). Dieser Fernschreiber sollte in der Operatoren-Konsole eingebaut werden und nur sehr wichtige Meldungen übertragen:

- entdeckter Ausfall von BE-Meßfühlern
- höherer Scramindex.

Teletyp 2 - ist als Abfragemöglichkeit erwähnt.

3.3.4 Schnelle Erfassung

Die Erfassung der Meßwerte $\lceil \bar{8} \rceil$ für die Ermittlung der Fourier-Spektren sollte gleichzeitig zwei Kanäle betreffen (Korrelationsmöglichkeiten sind dadurch gewährleistet). Da die Genauigkeit (1 bis 2 %) nicht so kritisch wie für den Vergleich von Grenzwerten ist, wäre eine Anwendung von MDS-Schaltern zu untersuchen. Bauelemente der Fernsprechtechnik (z.B. Kreuzschienenverteiler in Siemens-Crosspointtechnik könnten unter Berücksichtigung der Tiefpaß-Eigenschaften preiswert angewandt werden. Ein Operator könnte dann mit einer Telefonwählscheibe die Kanäle auf ein Bildschirmgerät beliebig umleiten. Die Erfassung sollte in einem Zug zweimal 256 Punkte erfassen und analysieren. Ein von der Industrie angebotenes Gerät kann eine Fourier-Transformation in 13,5 Millisekunden bewerkstelligen und eine solche Zahl zeigt, daß die Anwendung der Fourier-Transformation nicht mehr aus Zeitgründen abgelehnt werden kann.

3.4 Programmstruktur

Die detaillierte Struktur der Programme ist das Endergebnis vieler langer Arbeitsgänge, die von den Eigenschaften der Instrumentierung, von den Sicherheitsüberlegungen und auch von der Wahl des Rechners stark abhängen. Die folgende Information dient zur Einschätzung der Realisierbarkeit und hat als Ziel die Ermittlung durchschnittlicher Rechenzeiten. Die Notwendigkeit, im ON-LINE-Betrieb arbeiten zu müssen, erzwingt bei solchen Anwendungen eine sorgfältige Einteilung der benötigten Ausführungszeiten innerhalb einer Zyklusdauer.

Das Programm (Abb. 12) fängt mit der Datenerfassung und mit der Übertragung der alten Werte an. Die Erfassung ist mit einer 20 kHz-Abtastfrequenz vorgesehen und diese Einschätzung ist konservativ, weil eine 50 kHz-Erfassung möglich ist. Die Speicherung der Werte erfolgt durch den Direktspeicherzugriff, der den Rechner selbst nicht beansprucht, und dauert 40 ms für 800 Werte. In der gleichen Zeit kann die Übertragung eines der früheren Wertes vorgenommen werden und diese Bedingung vermeidet einen Konflikt, der möglich wäre, wenn die gleichen Werte der acht Gruppen von zwei Richtungen behandelt würden. Die Bestimmung der Prioritäten fängt mit einer Verzögerung an, weil es zu befürchten ist, daß diese Operation bei einer intakten Instrumentierung die Datenerfassung "überholen" könnte. Die Zuteilung der Brennelementindices und die Ermittlung der Prioritäten (s. Anhang 2) dauert ca. 40 ms (200 BE je 200 Microsek.), ist aber als variabel zu betrachten. Die "Beschäftigung" des Rechners mit Übertragung auf Magnetband oder auf Platte könnte für die notwendige Verzögerung sorgen. Die Änderung der Grenzwerte braucht weniger als 10 ms, so daß in einem ungünstigen Fall die schon zitierten Vorgänge unter 20 % eines 500 ms-Zyklus bleiben würden. Nimmt man an, daß ca. 40 Brennelemente in drei Prioritätsklassen aussortiert wurden und daß die detaillierte Stetigkeitskontrolle eines Brennelementes mit 3 ms gut gedeckt ist, läßt diese Spanne von 120 ms noch viel Zeit übrig, um Sonderprüfungen und Kernspeicherüberwachung vorzunehmen. Der Rechner kann dann in den "WAIT"-Zustand gebracht werden, um die Interrupt-Struktur umgehen zu können.

3.5 Zuverlässigkeit des Systems

Die Aufgabe der Coreüberwachung ist so kompliziert, daß diese Studie mehr Wert auf die Flexibilität als auf die Zuverlässigkeit gelegt hat. Dieses ist nur möglich, weil die primären Aufgaben des Sicherheitssystems von einem erprobten konventionellen System gewährleistet sind. Es scheint, daß die dual ausgelegte Struktur mit einer guten CPU-Zuverlässigkeit zufriedenstellen wird. Die Zuverlässigkeit von CPU macht jedes Jahr große Fortschritte und wenn die Klimaanlage und die stabilisierte Stromversorgung entsprechend dimensioniert werden, ist die vorgeschlagene Konfiguration zuverlässig. Es ist zu bemerken, daß die amerikanische NASA, die in einem finanziellen Kontext arbeitet, schon über sehr zuverlässige Rechner verfügt, die sich sogar selbst reparieren können. Solche technische Errungenschaften werden teilweise bald der Standardproduktion zufließen müssen.

Trotz dieser Bemerkungen, und wie es aus folgenden Punkten zu entnehmen ist, wurde die Verfügbarkeit nicht stiefmütterlich behandelt.

Die meisten Fehler des ADU (Analog Digital Umsetzer) werden mit den Prüfkä- nalen entdeckt (Rutschen der Adresse, Komparatorfehler, Bitstelle defekt). Dieses verlangt, daß die Kopplungsgatter mit Redundanz aufgebaut werden müssen.

Die Kernspeicherdefekte oder Rechenwerkpannen können auch mit den Service- programmen (10 % am Ende des Zyklus) schnell entdeckt werden. Dafür hat man zwei "Save areas", wo ein Teil des Kernspeichers kopiert wird, Test- rechnungen werden in dieser abgeräumten Zelle vorgenommen, die einen ge- wissen Bitpattern liefern sollen, der Zelleninhalt wird dann restoriert.

Die Software-Fehler sind manchmal so speziell, daß kein universales Rezept gegeben werden kann. Eine Fehlerklasse bilden die endlosen Schleifen, das Stillstehen des Adressenregisters (Hardware- oder Software-Ursachen) oder falsche Interrupt-Programmierung. Diese Fehler könnten mit der Überwachung des Speicherindex des Rechners R 1 sofort entdeckt werden; der Standbyrechner könnte diese Funktion sehr leicht übernehmen. Die Struktur des Programms läßt die Zeitspanne der verschiedenen Äste nur in bestimmten Grenzen variieren. Der Rechner R 1 könnte R 2 überwachen, weil der Programmablauf ähnlich wie ein Rallyerennen oder ein Slalomlauf ausgelegt ist, wo innerhalb normierter Zeiten etwas Vorbeilaufendes zu sehen ist. Sieht man nichts, so ist daraus zu schließen, daß eine Panne eingetreten ist. Das Programm muß z.B. die Brennelemente 1 bis 200 schnell untersuchen, die Stetigkeit ermitteln usw.; das betrifft bestimmte Kernspeicherzonen, die hinterein- ander adressiert werden sollten. Die Einteilung des Kernspeichers in Kacheln wird eine solche Kontrolle erheblich erleichtern.

Schlußfolgerung

Die Coreüberwachung ist mit modernen Methoden möglich und erfordert eine Signalverarbeitung, die viele sicherheitstechnische Betrachtungen berücksichtigen muß. Es ist mit dem heutigen Stand der Technik möglich, den Zustand eines Cores zu ermitteln, falls die entsprechende Instrumentierung vorhanden ist. Von dem Signal einer solchen Instrumentierung eine Abschalt- entscheidung abzuleiten ist schwierig, weil diese Ableitung die

deterministische Zugehörigkeit der nicht immer deutlichen Anzeichen in einem sehr stark probabilistischen Kontext finden muß. Obwohl die vorgeschlagene Lösung einige Erweiterungen oder komplementäre Untersuchungen bedarf, ist anzunehmen, daß die Berücksichtigung der Glaubwürdigkeit und das schnelle Sortierverfahren einer einfachen logischen Verknüpfung überlegen sind. Die Sortierung verdächtiger Brennelemente erlaubt eine sorgfältige Behandlung der Grenzfälle und führt zu einer Reduzierung falscher Abschaltungen und zu einer Erhöhung der Sicherheit. Die Übertragung eines solchen Ziels auf ein Kraftwerk von 1000 MWe ist mit Vorteilen verbunden, die weitere Entwicklungen auf diesem Gebiet rechtfertigen könnten.

Referenzen

- [1] D.Smidt, W.Peppler, E.G.Schlechtendahl, G.F.Schultheiß
"Sodium Boiling and Fast Reactor Safety"
KFK-Bericht 612, September 1967
- [2] K.Gast, E.G.Schlechtendahl
"Schneller Natriumgekühlter Reaktor Na 2"
KFK-Bericht 660, EUR 3706d, Oktober 1967
- [3] E.G.Schlechtendahl
"Sieden des Kühlmittels in Natriumgekühlten Schnellen Reaktoren"
KFK-Bericht 1020, EUR 4302d, Juni 1969
- [4] K.Gast
"Die Ausbreitung örtlicher Störungen im Kern Schneller
Natriumgekühlter Reaktoren und ihre Bedeutung für die
Reaktorsicherheit"
KFK-Bericht 1380, Mai 1971
- [5] W.Peppler
"Thermoelemente für den Einsatz in flüssigem Natrium
bis zu 900°C"
Externer Bericht 8/70-3, Juli 1970
- [6] H.A.Rohrbacher
"Theorie und Voruntersuchungen für die Entwicklung eines
Ultraschallgerätes in Natrium"
IRE-Bericht 18/69
- [7] H.A.Rohrbacher
"Ultraschall-Dämpfung einer Natrium-Teststrecke"
IRE-Bericht 89/71
- [8] M.Audoux
"Grundlagen der digitalen Erfassung primär analoger
Meßwerte"
Externer Bericht 8/69, November 1969

[9]

Cooley I.W. et al.

"Application of the Fast Fourier Transform to Computation of Fourier Integrals, Fourier Series, and Convolution Integrals"

IEEE Trans. Vol. AU-15-No. 1, June 1967

[10]

M.Audoux

"SEDAP, A Systematic Approach to the Processing of Experimental Data"

Proc. IFIP Congress 71, Booklet TA-76, North Holland

[11]

M.Audoux, F.Katz, E.G.Schlechtendahl, W.Olbrich

"SEDAP - A FORTRAN IV System for Experimental Data Processing"

KFK-Bericht 1594, 1972

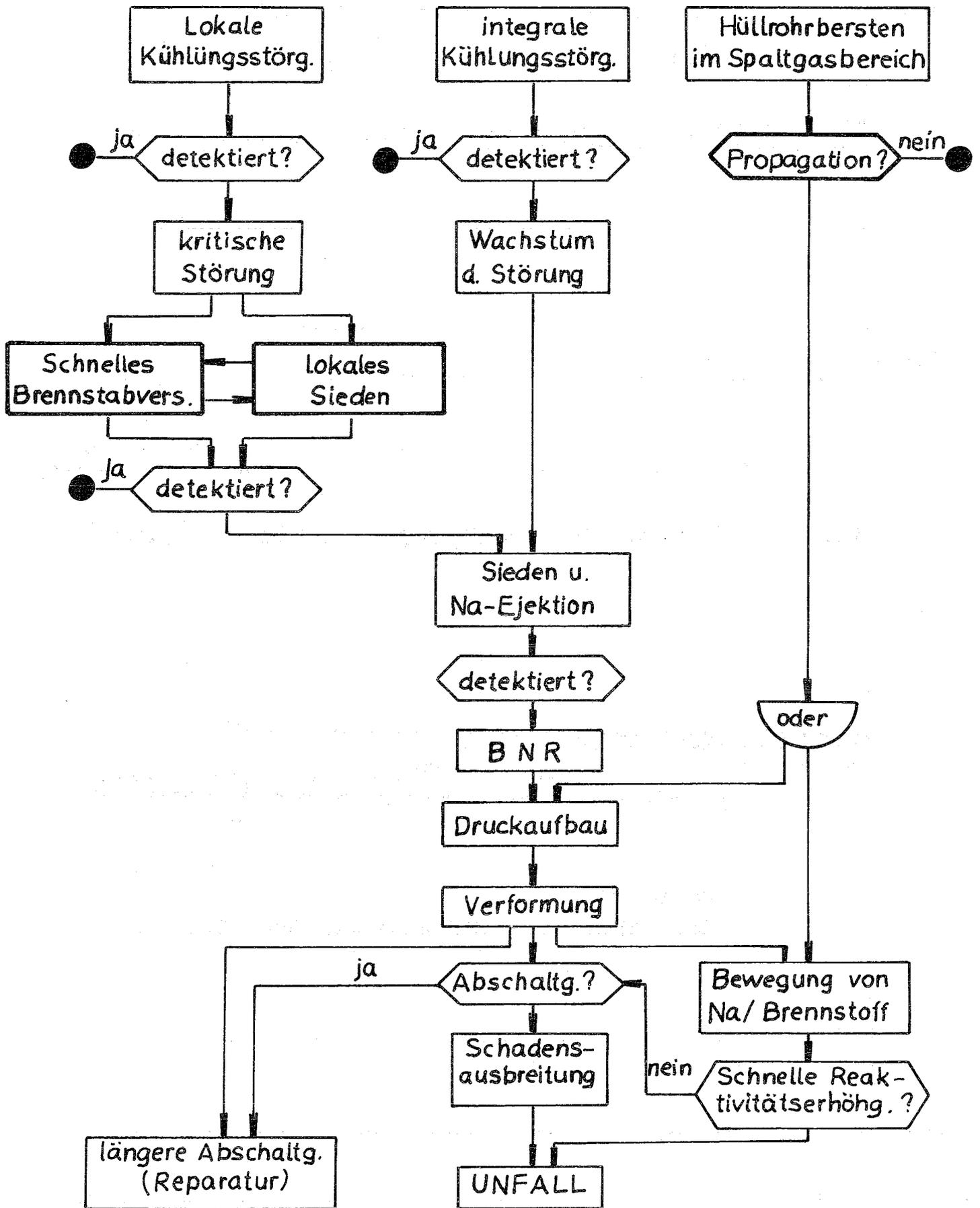


Abb.1 Propagationsmechanismen Übersicht

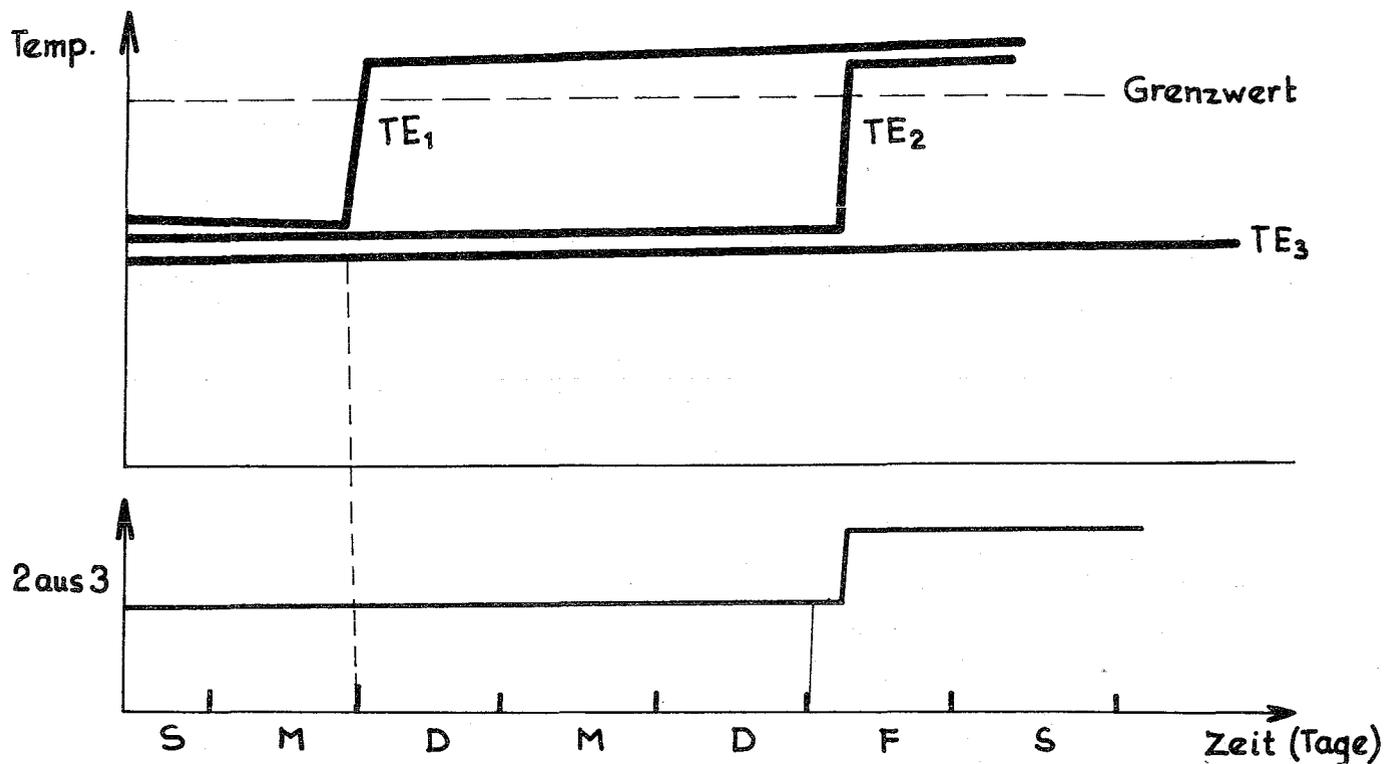


Abb. 2a Abschaltung nach zwei Defekten (OPEN)

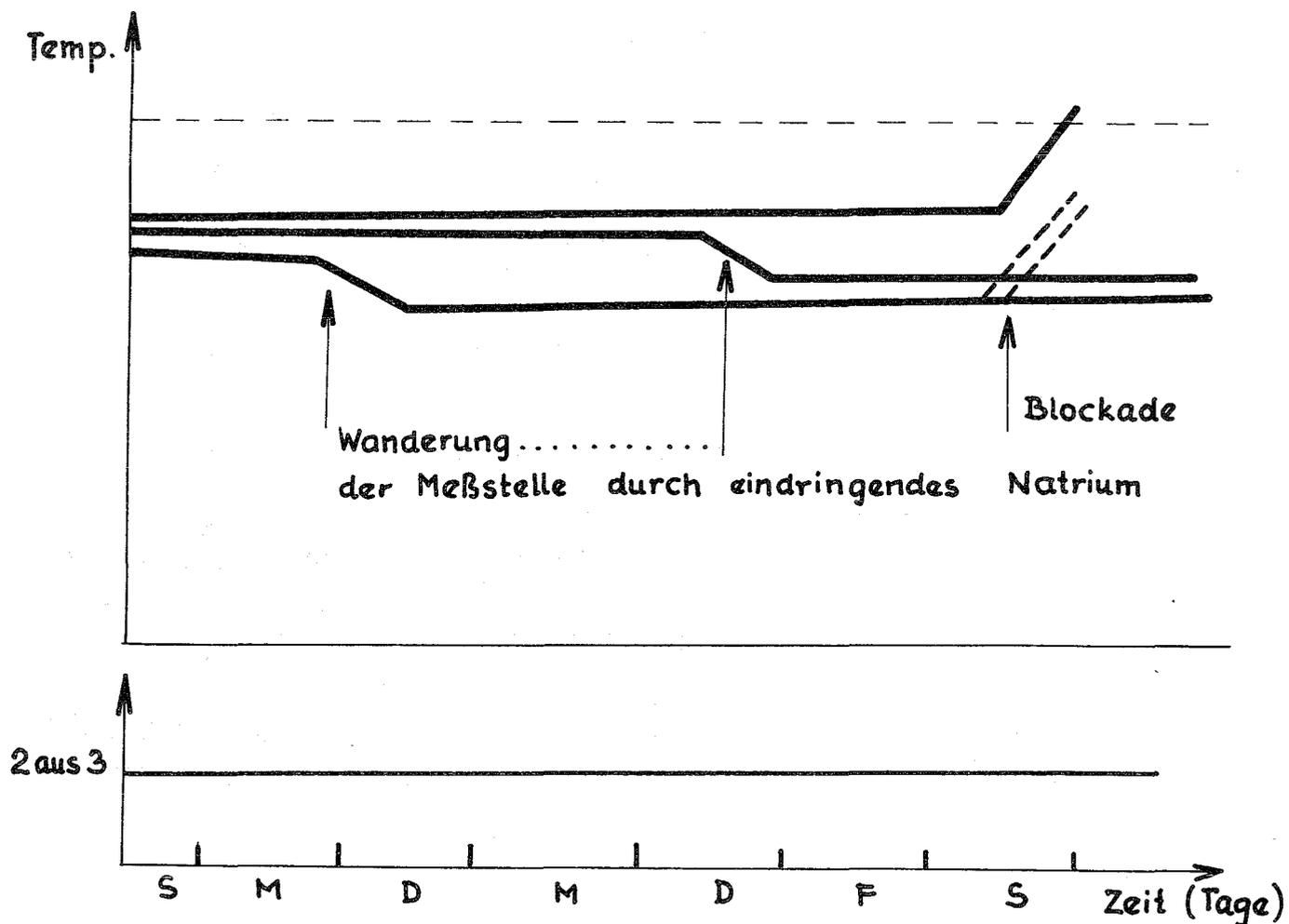
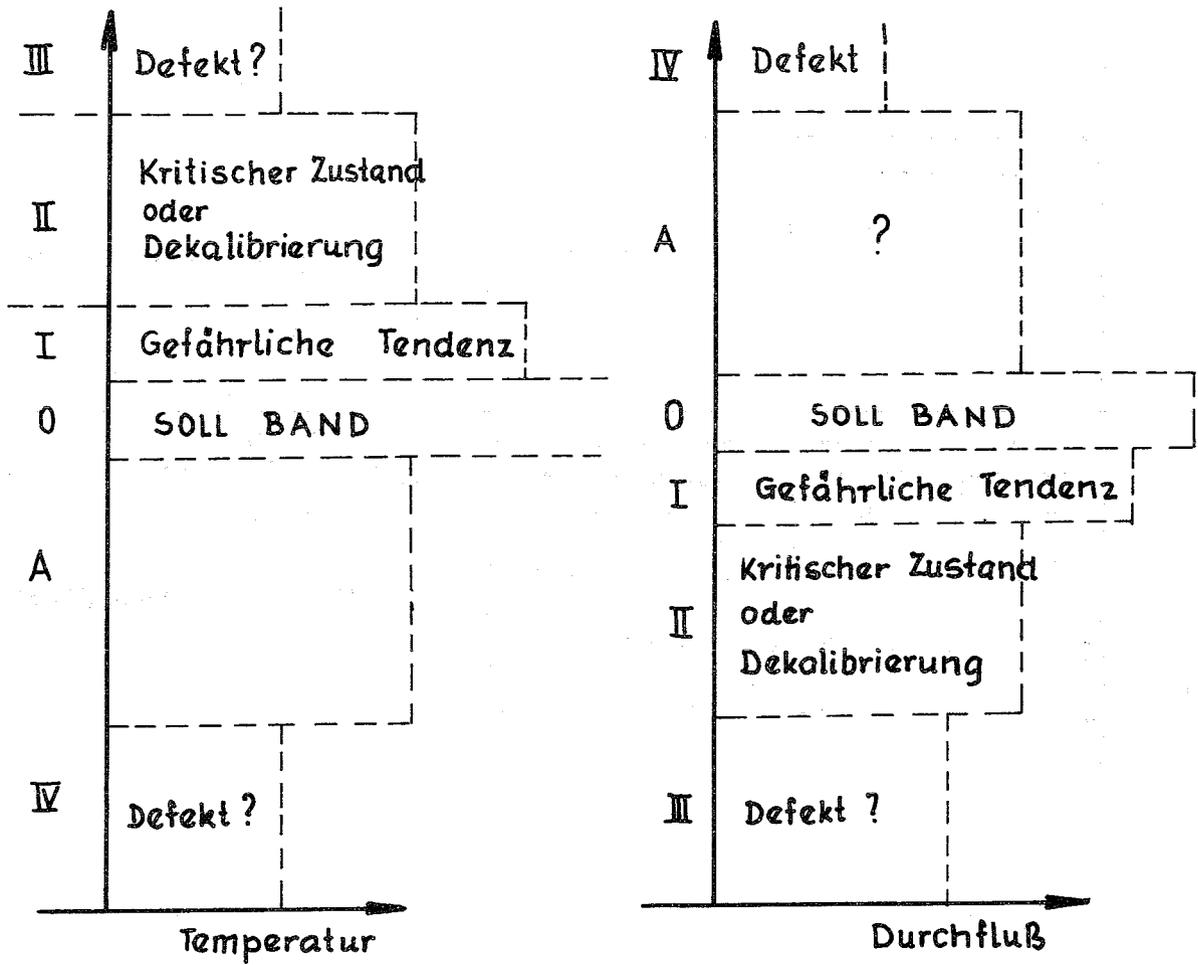


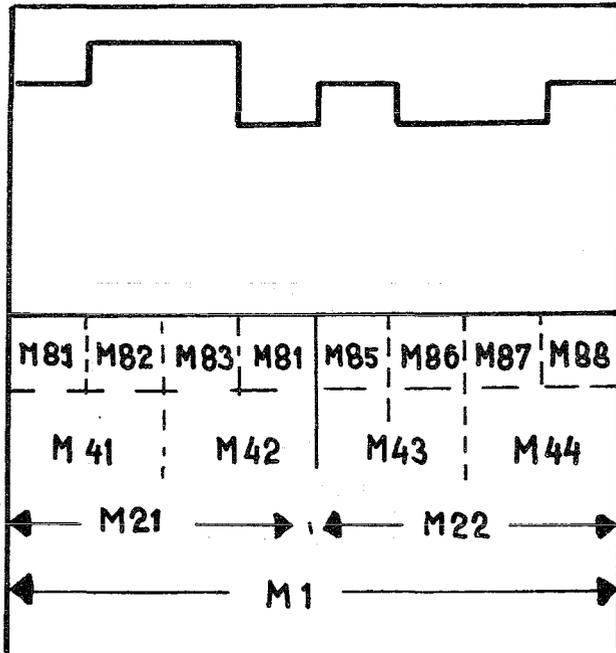
Abb. 2b Nicht detektierte Blockade mit zwei defekten Thermo-elementen



	DM	TC 1	TC 2	TC 3	
IV	10	4	4	4	
A	?	-1	-1	-1	
0	0	0	0	0	← SOLL BAND
I	2	1	1	1	
II	4	2	2	2	← auch DEFAULT
III	10	4	4	4	

0 → 3	4 → 7	8 → 9	10 → 22
Nichts	P III	P II	P I

Abb. 3 Organisation der Grenzwerte und Zuteilung der Prioritäten



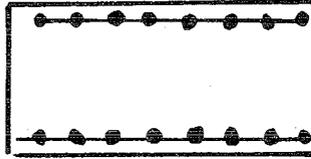
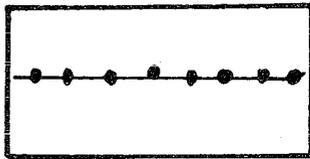
$$M_1 = M_{21} + M_{22} = \dots = M_{81} \rightarrow M_{88}$$

$$\underline{DC} = \frac{1}{8} M_1$$

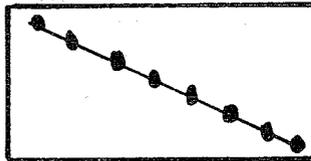
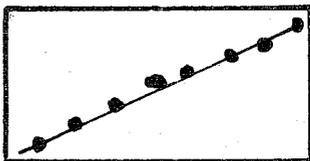
(Mittelwert)

$$\underline{AC} = \frac{1}{8} \sum_{I=1}^8 |DC - M(I)|$$

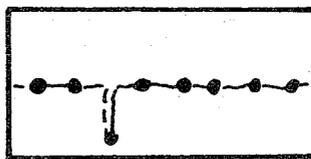
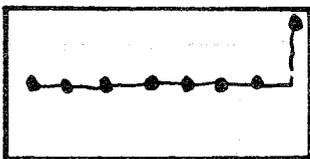
(Summe d. Abweichungen)



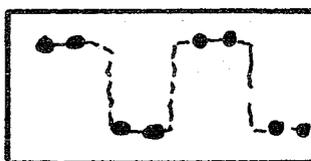
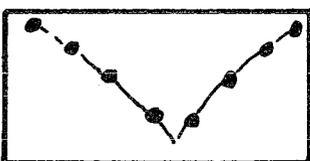
- a) DC = OK
- b) DC > AC = 0
- c) DC <



- a) Steigend
- b) Absteigend



- a), b)
- Einzelstörung



- a), b)
- Nicht identifiziert

Abb. 4 Stetigkeitskontrolle (Prinzip)

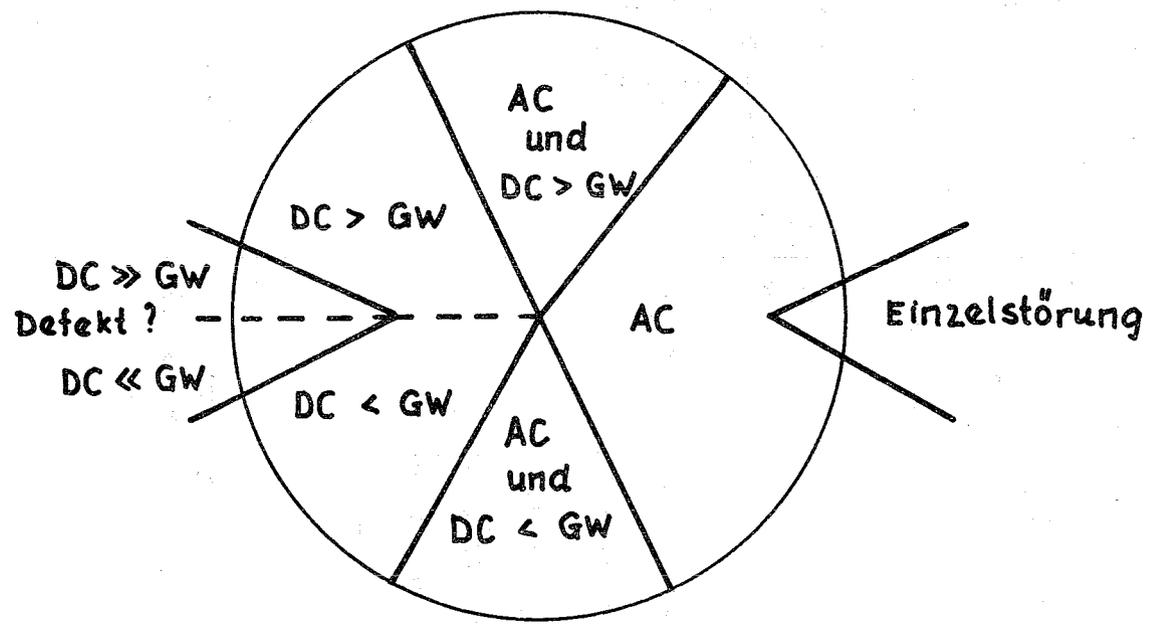
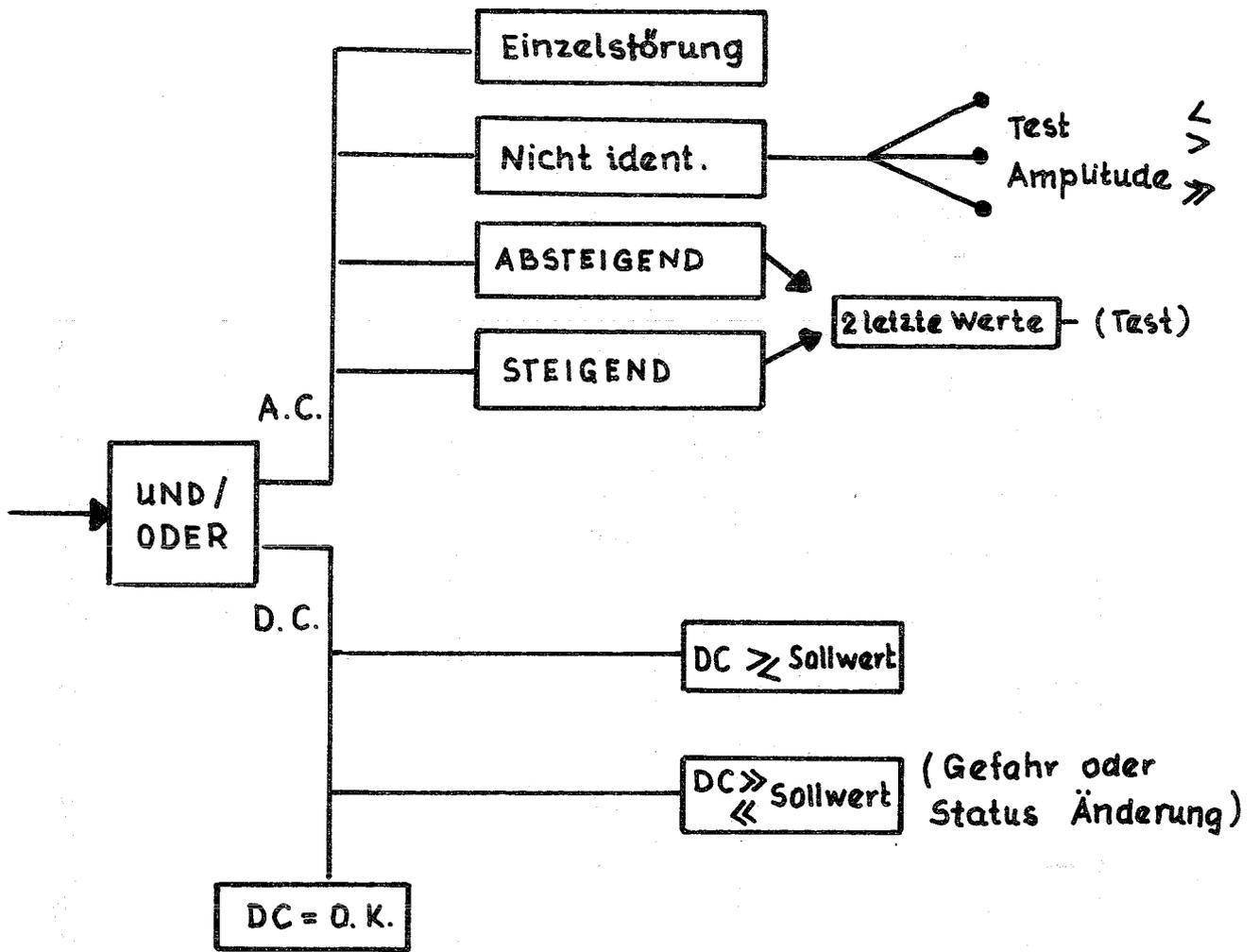


Abb. 5 Auswertung der Stetigkeit

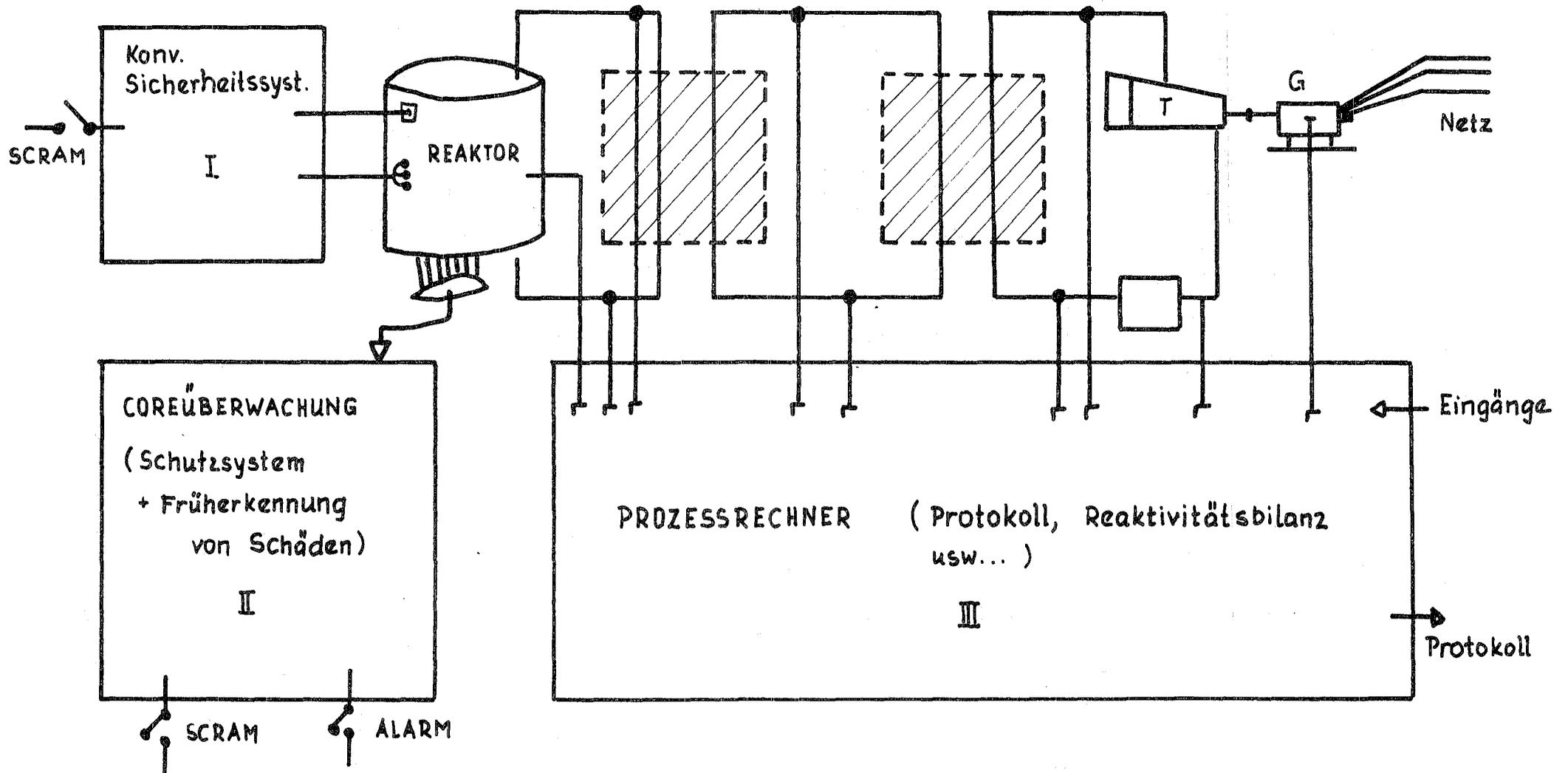


Abb. 6 Einteilung des Sicherheitssystems

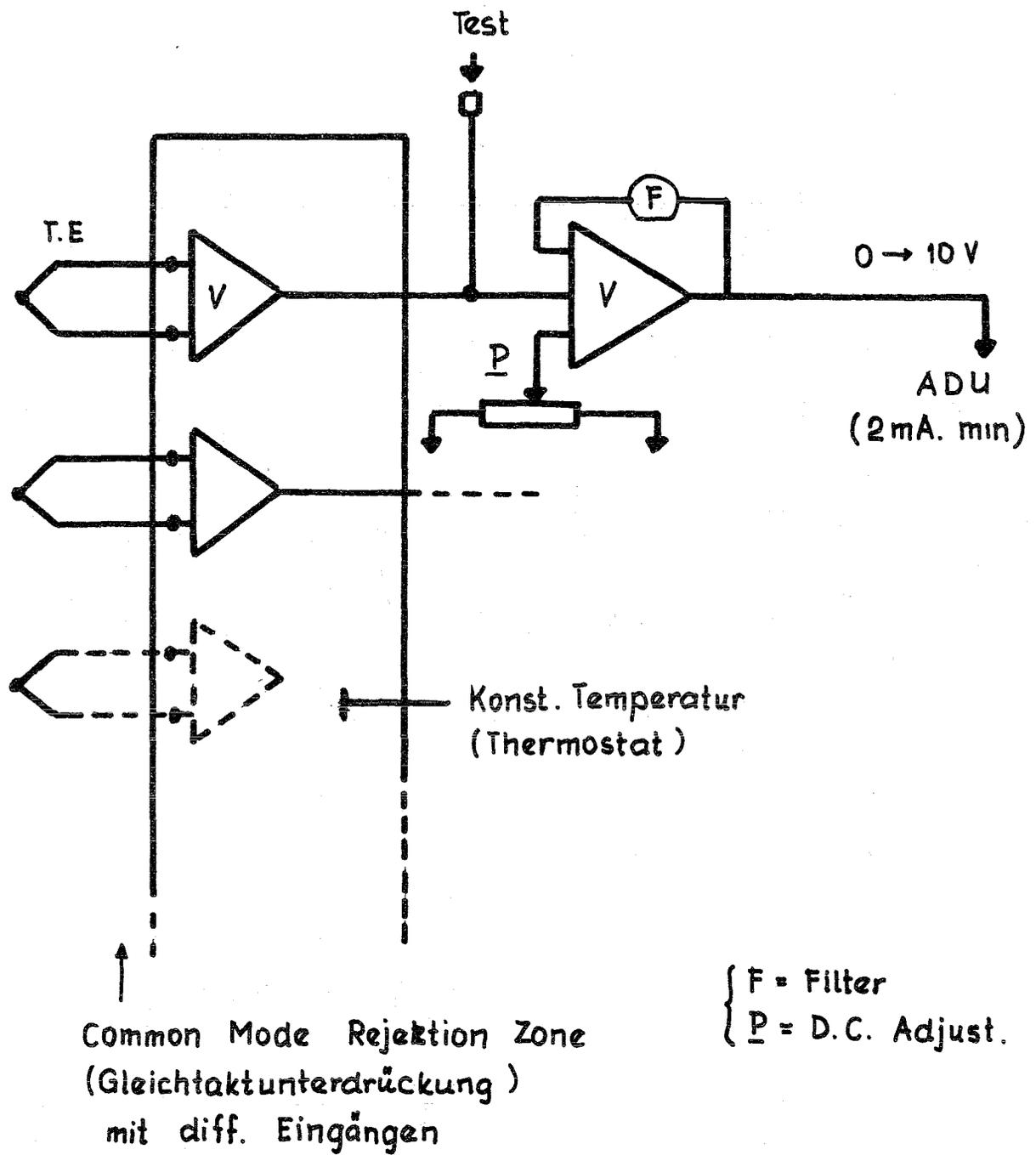


Abb. 7 Signalverstärkung

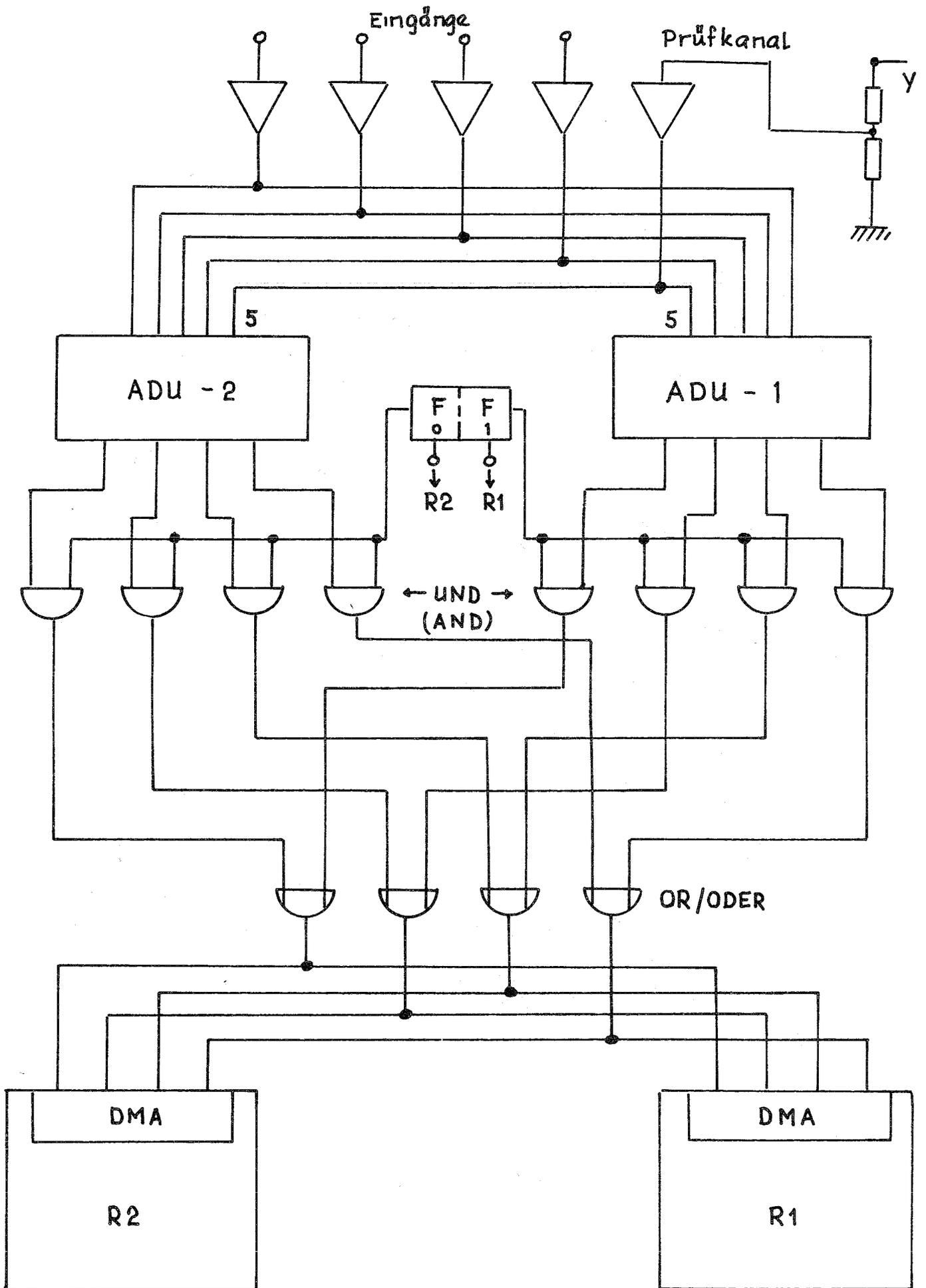


Abb. 8 Signalübertragung (INPUT)

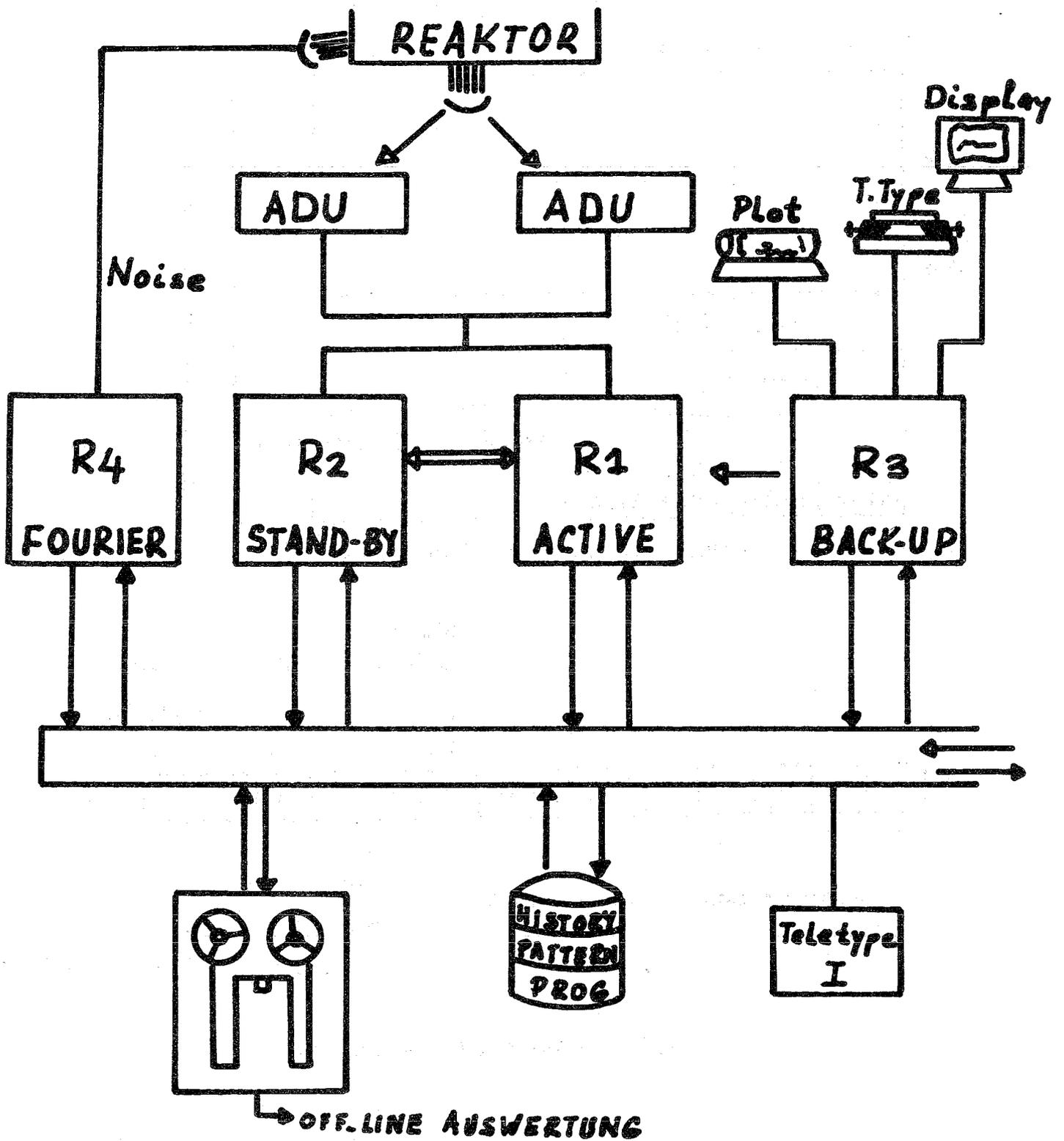
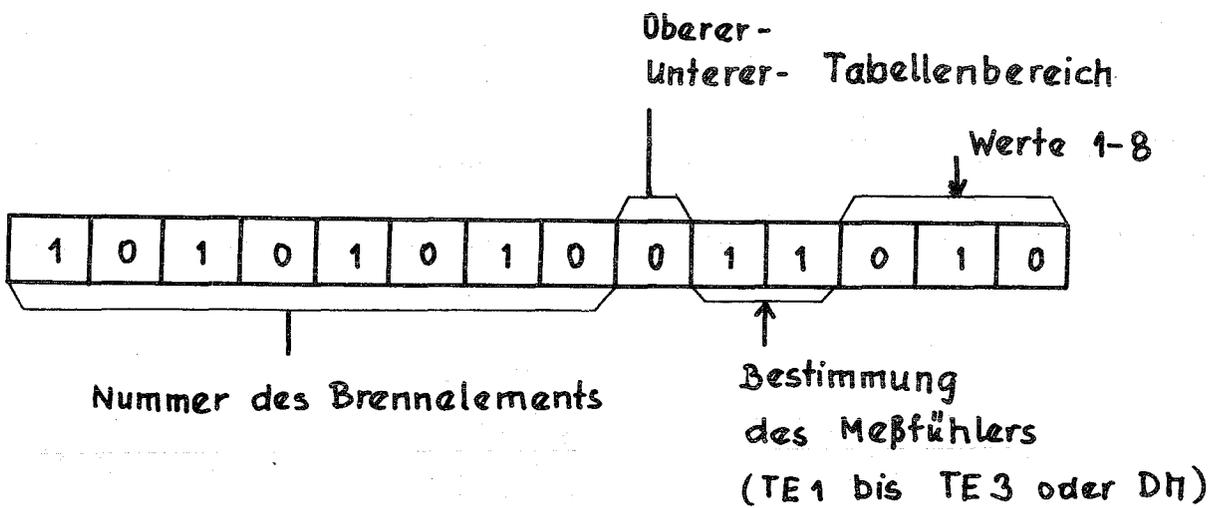
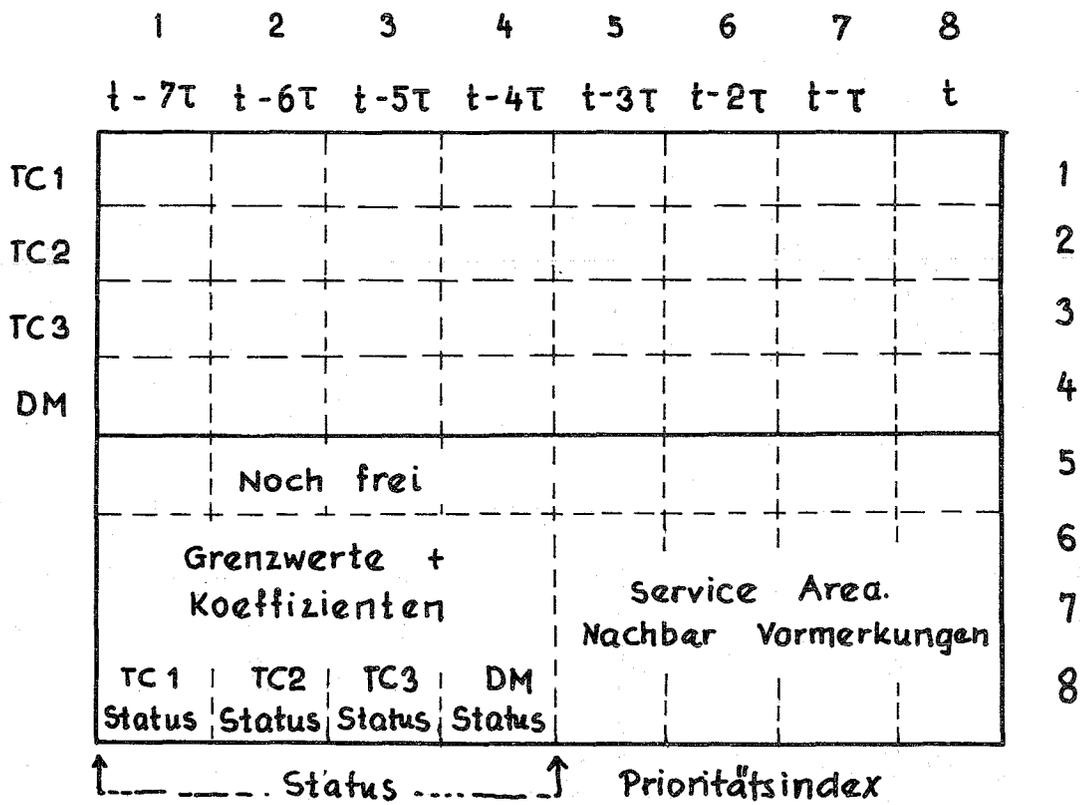


Abb 9 - KONFIGURATION



SUB - ASSEMBLY MESSBLOCK

Abb. 10 SAMB - (Prinzip der Einteilung)

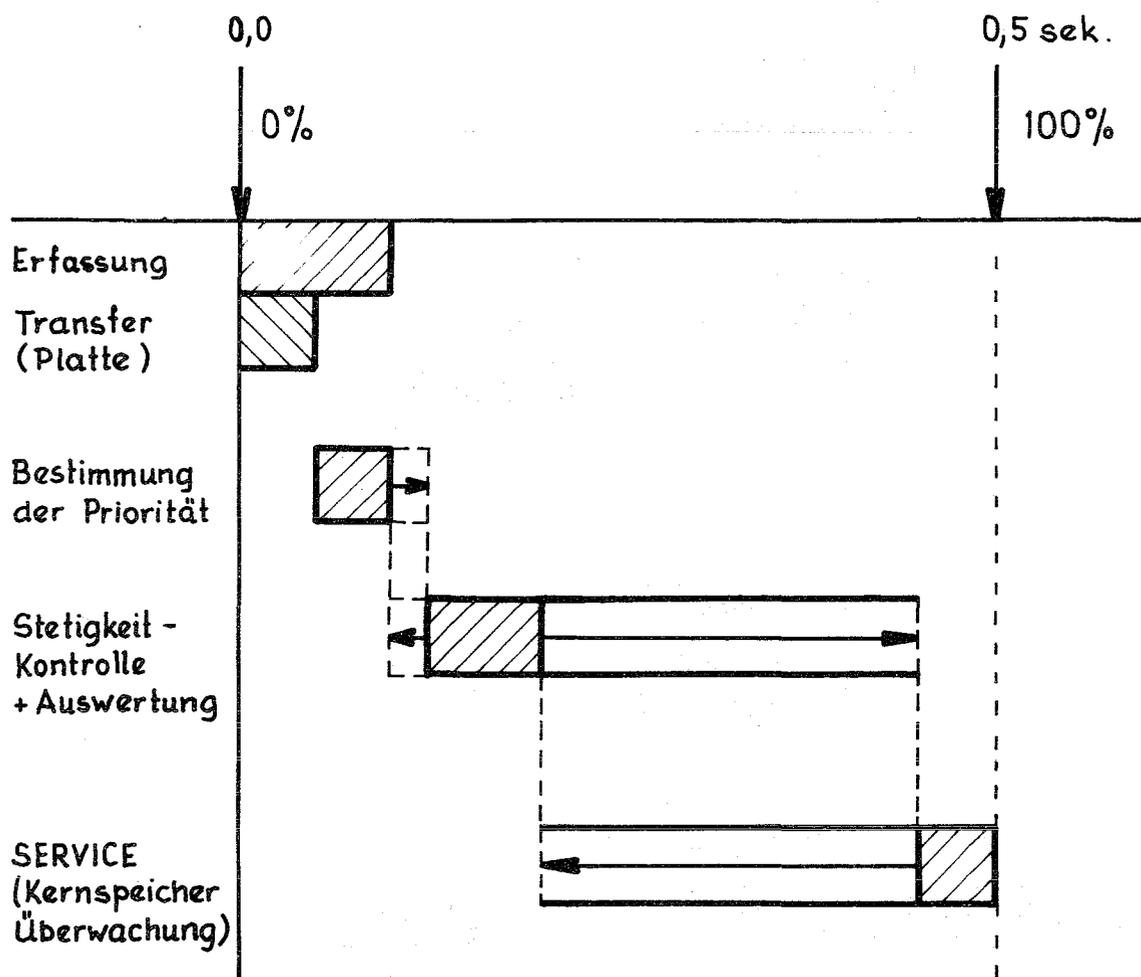


Abb. 11 Zeitablauf

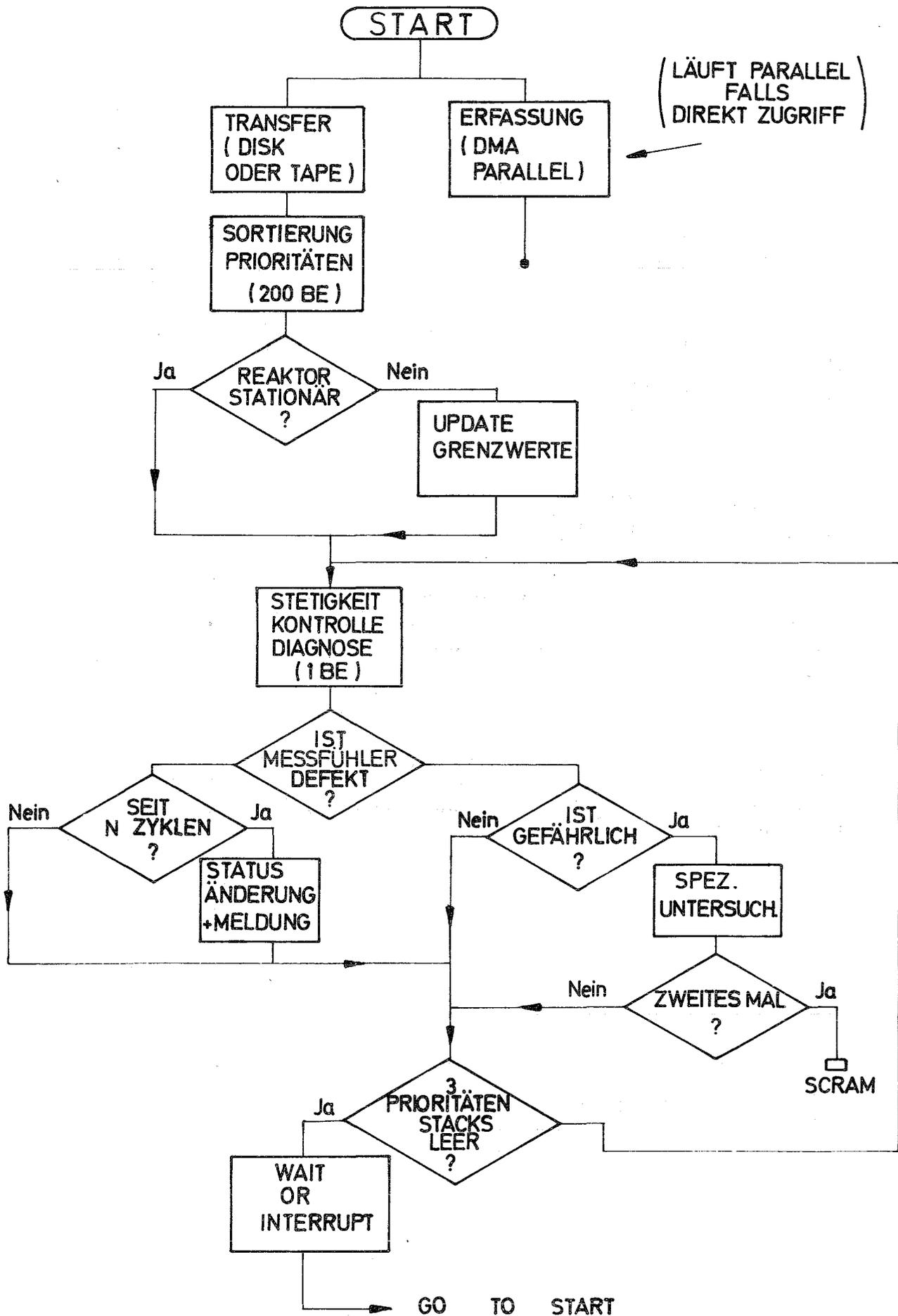


Abb. 12 STRUKTUR DES PROGRAMMES (Vereinfacht)

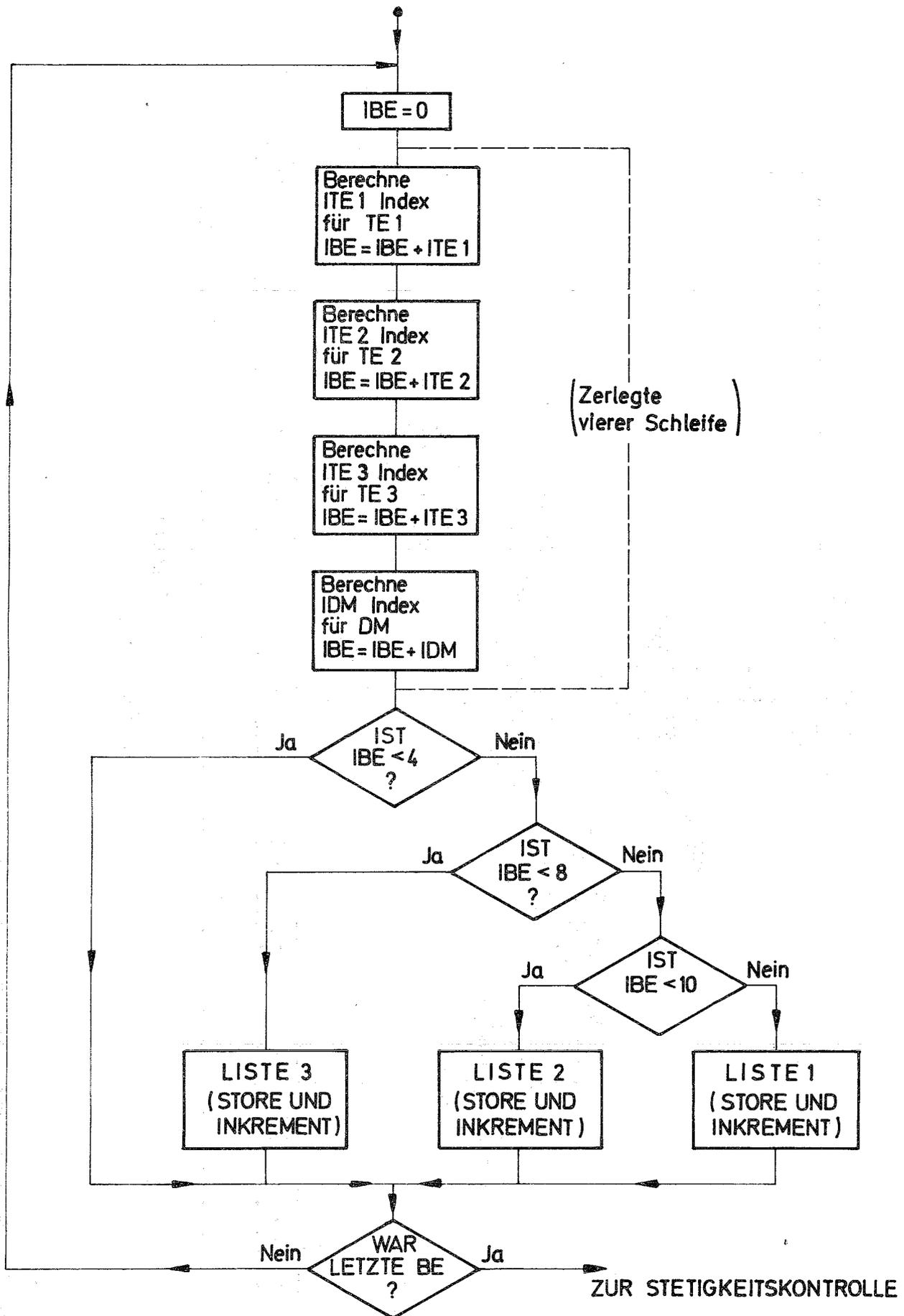


Abb. 13 Berechnung des BE-INDEX

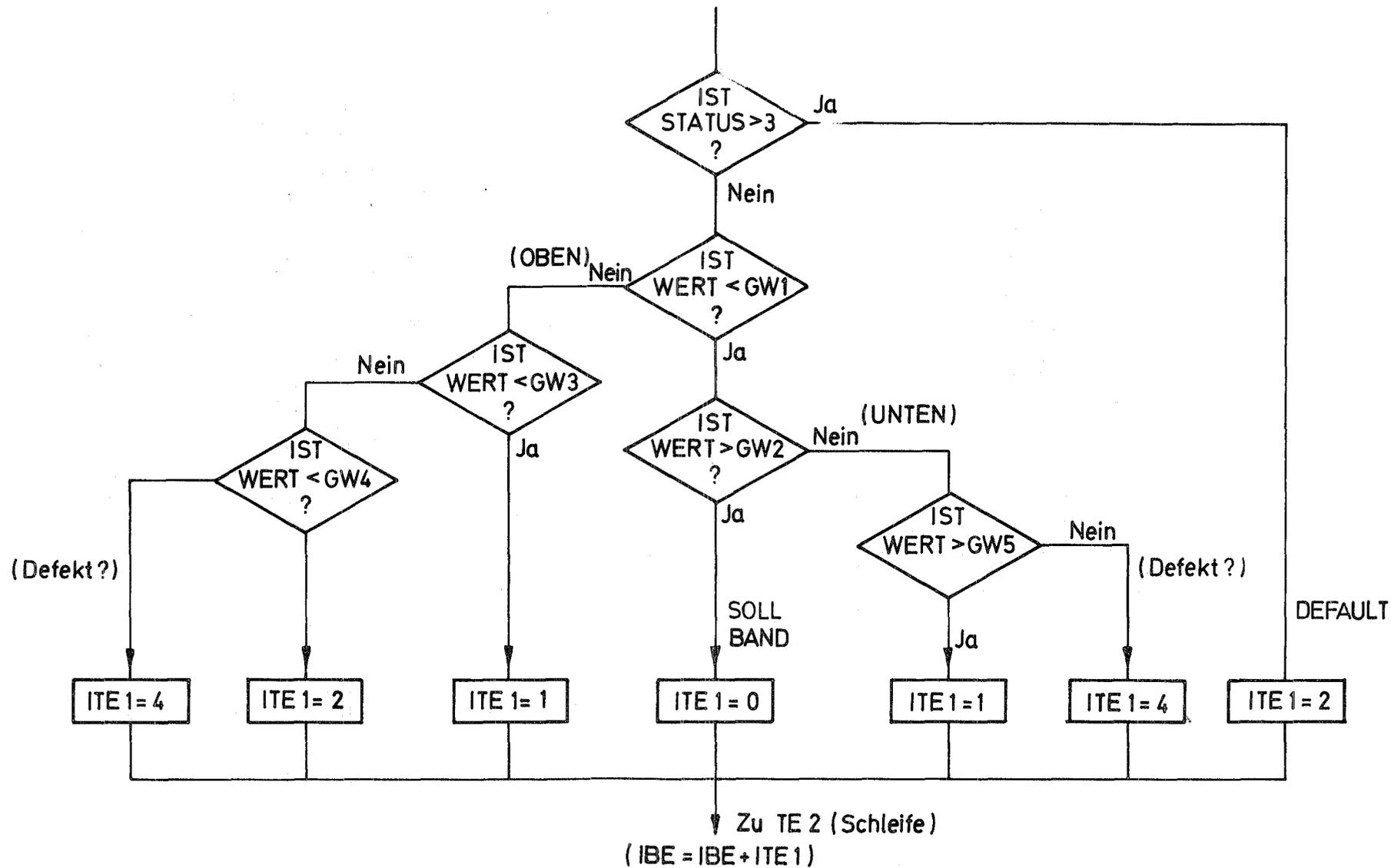


Abb. 14 Berechnung des Meßfühlerindex (Beispiel für TE - 1)

ANHANG 1

Statistische Verteilung von defekten Meßfühlern

Die schweren Bedingungen, denen die verschiedenen Meßfühler in einer Core-Instrumentierung unterworfen werden, lassen vermuten, daß nicht 100 % dieser Meßfühler bis zum Ende eines Abbrandzyklus funktionsfähig bleiben werden. Es ist von besonderem Vorteil, diese Instrumente an eine Meßpflaume anzubringen, wenn dadurch die defekten Meßfühler leichter ausgewechselt werden können. Diese Operation kann leider nicht täglich durchgeführt werden. Es ist auch anzunehmen, daß wegen der Ausdehnungseffekte eine gewisse Ausfallquote beim Einfahren des Reaktors auftritt.

Es werden alle Maßnahmen getroffen, um diese Ausfallquote minimal zu halten, aber es darf keine Coreüberwachung geplant werden, ohne daß der Einfluß von verschiedenen Ausfallraten untersucht wird. Diese Untersuchung wurde für einen Bereich von 0 bis 30 % durchgeführt und ein reduzierter Bereich von 4 bis 12 % scheint als Entwurfsbasis eine realistische Annahme zu sein.

Für diese statistische Studie wurden folgende Annahmen gemacht:

- Die Zahl der Subassemblies ist 200.
- Jedes Subassembly (BE) wird mit vier Meßfühlern überwacht.
 - 3 identische Thermoelemente (TE)
 - 1 Durchflußmesser (DM)
- Es wurde kein Unterschied zwischen den verschiedenen Typen von Defekten gemacht.
- Die Wahrscheinlichkeit, daß ein Meßfühler schneller ausfallen wird, wenn schon ein benachbarter ausgefallen ist (gleiche Stecker, bei gleichen Bedingungen geschweißt usw.), wodurch sich die Zahl von "Zwillingen" und "Drillingen" erhöhen würde, wurde nicht berücksichtigt.

Ein Zufallsgenerator ist so programmiert, daß man zwischen zwei Möglichkeiten wählen kann:

- 1) N Prozent aller vier Gruppen sind ausgefallen (Verteilung 4 x 200)
- 2) N Prozent von den gesamten Meßfühlern sind ausgefallen (Verteilung 1 x 800).

Das Programm ist so gestaltet, daß, wenn der Zufallgenerator einen Ausfall bei einem schon ausgefallenen Meßfühler ermittelt, die Operation verlängert wird, bis der vorbestimmte Prozentsatz erreicht ist. Diese Zahl ist als "Number of reruns" bezeichnet. Ferner besteht die Möglichkeit, den Prozentsatz variieren zu lassen und die gesamte Operation mehrmals nacheinander zu wiederholen, um die Abweichungen deutlicher zu machen.

Das Programm druckt ein Muster mit 800 Zeichen (0 und 1), die die Verteilung der ausgefallenen Meßfühler wiedergeben. Die Bilanz ist nach jedem Prozentsatz ausgedruckt und wird in einer Tabelle wiederholt, wo folgende Information eingetragen ist:

Zahl von intakten Subassemblies	
Zahl von Subassemblies mit	1 TE defekt
Zahl von Subassemblies mit	2 TE defekt
Zahl von Subassemblies mit	3 TE defekt
Zahl der Subassemblies mit	1 DM defekt
Zahl der Subassemblies mit	1 DM + 1 TE defekt
Zahl der Subassemblies mit	1 DM + 2 TE defekt
Zahl der Subassemblies mit	alle 4 defekt

Die Ausgabe kann auf Wunsch auf die Tabelle allein reduziert werden.

Die relativen Abweichungen sind wie erwartet für große Zahlen gering, für die kleine Zahl dagegen sehr deutlich festzustellen. Diesen Tabellen ist es zu entnehmen, daß bereits bei einer Ausfallquote der Meßfühler von einigen Prozent eine einfache logische Verknüpfung sehr häufig falschen Alarm oder Abschaltungen verursachen könnte und daß 6 bis 9 falsche Abschaltungen für einen 1000 MWe-Betrieb nicht annehmbar sind.

GESAMTWERTUNG (VERTEILUNG : 1 * 800)

%	INTAKT	1TE	2TE	3TE	DM	DM+1TE	DM+2TE	DM+3TE
0	200	0	0	0	0	0	0	0
0	200	0	0	0	0	0	0	0
0	200	0	0	0	0	0	0	0
0	200	0	0	0	0	0	0	0
2	185	10	1	0	4	0	0	0
2	184	11	0	0	5	0	0	0
2	184	13	0	0	3	0	0	0
2	184	11	0	0	5	0	0	0
4	168	26	0	0	6	0	0	0
4	168	25	0	0	7	0	0	0
4	169	25	1	0	5	0	0	0
4	170	26	1	0	2	1	0	0
6	157	28	2	0	10	3	0	0
6	158	21	3	1	16	1	0	0
6	155	31	3	0	11	0	0	0
6	155	36	1	0	6	2	0	0
8	139	47	2	0	11	1	0	0
8	141	37	2	0	17	3	0	0
8	138	49	2	0	11	0	0	0
8	141	40	3	0	14	2	0	0
10	130	51	7	0	9	3	0	0
10	132	41	5	0	15	7	0	0
10	132	51	4	0	5	8	0	0
10	132	46	1	2	13	5	1	0
12	119	44	5	1	24	6	1	0
12	121	48	10	0	15	5	1	0
12	118	52	2	0	16	12	0	0
12	121	52	7	0	10	10	0	0
14	110	55	11	0	13	11	0	0
14	111	54	8	0	17	5	5	0
14	110	56	11	0	13	9	1	0
14	107	61	3	1	16	10	2	0
16	104	52	15	0	17	8	3	1
16	105	44	10	0	20	19	2	0
16	101	49	9	0	24	14	3	0
16	102	56	12	0	13	16	1	0
18	88	63	14	1	20	12	2	0
18	88	65	9	0	19	15	4	0
18	90	61	16	2	18	12	1	0
18	94	55	7	3	20	17	4	0
20	85	59	12	2	18	19	5	0
20	77	65	11	0	24	20	3	0
20	85	53	12	2	26	16	5	1
20	88	53	10	2	24	13	9	1
22	66	76	12	1	25	13	6	1
22	75	61	17	1	20	20	6	0
22	69	71	13	1	23	17	5	1
22	79	68	19	2	12	11	6	3
24	62	69	14	1	24	22	8	0
24	61	66	21	2	28	16	6	0
24	63	62	15	2	29	23	5	1
24	62	69	22	1	20	22	4	0
26	56	64	24	2	25	23	5	1
26	67	48	32	2	22	20	8	1
26	59	70	16	3	15	30	6	1
26	61	68	21	2	18	18	10	2
28	51	73	20	7	18	21	10	0
28	50	71	20	5	23	20	9	2
28	51	67	19	1	18	35	8	1
28	42	79	26	4	22	22	5	0

GESAMTWERTUNG (VERTEILUNG :4 * 200)

%	INTAKT	1TE	2TE	3TE	DM	DM+1TE	DM+2TE	DM+3TE
0	200	0	0	0	0	0	0	0
0	200	0	0	0	0	0	0	0
0	200	0	0	0	0	0	0	0
0	200	0	0	0	0	0	0	0
2	184	12	0	0	4	0	0	0
2	184	12	0	0	4	0	0	0
2	185	10	1	0	4	0	0	0
2	184	12	0	0	4	0	0	0
4	170	21	1	0	7	1	0	0
4	169	22	1	0	8	0	0	0
4	169	22	1	0	8	0	0	0
4	170	20	2	0	8	0	0	0
6	157	30	1	0	8	4	0	0
6	157	28	3	0	10	2	0	0
6	156	30	0	2	12	0	0	0
6	155	33	0	0	9	3	0	0
8	144	38	2	0	11	4	1	0
8	145	35	4	0	11	5	0	0
8	141	40	3	0	14	2	0	0
8	141	40	3	0	14	2	0	0
10	131	47	2	0	13	5	2	0
10	127	50	3	0	16	4	0	0
10	130	41	9	0	19	1	0	0
10	132	39	8	1	18	2	0	0
12	118	51	7	0	17	7	0	0
12	121	48	6	1	15	9	0	0
12	117	53	4	2	19	5	0	0
12	113	58	5	0	20	4	0	0
14	110	51	11	0	17	11	0	0
14	110	51	11	0	18	9	1	0
14	108	56	8	0	20	6	0	2
14	109	53	10	0	19	7	2	0
16	105	46	17	0	17	14	1	0
16	100	60	7	1	16	13	3	0
16	100	56	12	0	20	9	2	1
16	100	55	13	0	20	9	3	0
18	92	58	14	0	16	18	2	0
18	90	60	13	1	21	11	4	0
18	89	61	14	0	20	13	3	0
18	88	65	11	0	17	17	2	0
20	83	55	21	1	26	8	6	0
20	87	58	13	2	14	22	4	0
20	88	49	21	2	19	19	2	0
20	81	64	14	1	18	19	3	0
22	72	62	21	1	21	21	2	0
22	66	77	12	1	21	19	3	1
22	75	60	20	1	23	14	6	1
22	74	60	21	1	21	19	4	0
24	60	72	18	2	21	24	3	0
24	64	68	19	1	22	17	9	0
24	64	67	20	1	21	20	7	0
24	68	64	17	3	19	22	6	1
26	58	70	15	5	22	22	5	3
26	60	62	24	2	22	20	10	0
26	58	60	27	3	25	22	4	1
26	59	64	23	2	25	15	11	1
28	48	68	27	1	22	26	7	1
28	59	57	25	3	19	23	13	1
28	59	51	33	1	24	19	10	3
28	58	60	22	4	18	25	12	1

ANHANG 2

Berechnung der Ausführungszeiten des Sortieralgorithmus

Das Sortierverfahren der verdächtigen Brennelemente ist für alle Brennelemente anzuwenden und es wurde versucht, eine mittlere Zeit für diesen Programmteil zu berechnen. Die Programmstruktur ist in Abb. 14 skizziert und die entsprechende Liste der Anweisungen ist auf der nächsten Seite zusammengestellt. Die benutzte Sprache ist eine symbolische Schreibweise, die nur einige Operationen oder Befehle enthält und bezieht sich nicht auf einen bestimmten Rechner oder Hersteller.

Folgende Abkürzungen werden benutzt:

R 1, R 2	=	Register 1 und 2
ADD	=	Addiere
BRN	=	Springe falls negativ
BRP	=	Springe falls positiv
LR	=	Lade Register
SPR	=	Springe (bedingungsloser Sprung)
ST	=	Store (Register zum Speichern)
VG	=	Vergleiche (Compare)

Liste des Programms (gekürzt)

(ADR)

LR (R 1, STAT (n))	Lade Status von n
LR (R 2, DREI)	Lade "3"
VG (R 1, R 2)	Vergleiche
BRP (DEFAULT)	Springe falls Status 3
LR (R 1, MF (n))	Lade-Wert des Meßfühlers (n)
LR (R 2, GW 1)	Lade ersten Grenzwert
VG (R 1, R 2)	Vergleiche
BRP (ØBEN)	Springe falls GW1 überschritten
LR (R 2, GW 2)	Lade zweiten Grenzwert
VG (R 1, R 2)	Vergleiche
BRN (UNTEN)	Springe falls GW 2 nicht erreicht
LR (R 1, NULL)	Lade Null (MF ist im Soll-Band)
SPR (BEWERT)	Springe nach BEWERT

OBEN	-----

UNTEN	-----

DEFAULT	ST (R 1, VIER) Lade Vier (Default Wert)
BEWERT	LR (R 2, IBE) Lade BE-index
	ST(R 1, IMF (n)) Store Meßfühler index
	ADD (R 2, R 1) Increment BE index
	ST (R 2, IBE) Store BE-index

Der kürzeste Ast ist der Default-Fall mit 9 Befehlen. Für das Sollband sind 17 Befehle nötig. Die Zahl der Befehle muß erhöht werden, weil einige Werte nicht im Sollband liegen (OBEN, UNTEN usw.) und weil die Verwaltung der Schleifen noch einige Anweisungen braucht. Eine Zahl von 25 Befehlen ist dann eine realistische Annahme. Wenn man zwei Zyklen pro Befehl und 1 MS pro Rechenzyklus zugrunde legt, bekommt man eine Ausführungszeit von 50 μ s pro Meßfühler oder 200 μ s pro BE. Diese Berechnung ist nur als Richtwertermittlung gültig, weil einige Rechner schnellere oder langsamere Register - Register Befehle oder Speicher zu Speicher-Anweisungen haben.

