

Microcomputer-gesteuertes Rangiersystem

Autor(en): **Hörder, A. / Schmall, J. / Stalder, O. / [s.n.]**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **94 (1976)**

Heft 36: **SIA-Heft, 4/1976: Bruchsicherheitsnachweis bei vorgespannten Betontragwerken**

PDF erstellt am: **25.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-73159>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Die beiden Arten des Tragsicherheitsnachweises lassen sich dann durch die folgenden Ungleichungen ausdrücken.

Querschnittsnachweis

$$(14a) \quad \frac{M_{Br}(N)}{1,3} \geq M'$$

Traglastnachweis

$$(14b) \quad P_r' \left(\frac{M_{Br}(N)}{1,3} \right) \geq P'$$

M' Obere Grenze der Biegebeanspruchung

P' Obere Grenze der Belastung

P_r' Untere Grenze der Traglast

M_{Br} Bruchmoment

N Normalkraftbeanspruchung

Literaturverzeichnis

- [1] SIA Richtlinie 34 zur Norm SIA 162, Ausgabe 1976.
- [2] Beer H., Schulz G.: Die Traglast des planmässig, mittig gedrückten Stabs mit Imperfektionen. «VDI-Z» 111 (1969), Nr. 21, 23, 24.
- [3] Sfintesco D.: Fondement expérimental des courbes européennes de flambement. «Construction Métallique» 3/1970.

Adresse des Verfassers: Beat Schneeberger, dipl. Ing. ETH, Buchlen, 3043 Uettiligen b. Bern.

Mikrocomputer-gesteuertes Rangiersystem

Von A. Hörder und J. Schmall, Braunschweig, O. Stalder, Bern, und E. Suter, Luzern

DK 656.212:681.3

Einführung

Bei dem heute üblichen rechnergesteuerten Rangiersystem zur Steuerung von automatischen Ablaufanlagen in Rangierbahnhöfen wirkt ein Prozessrechner als zentrales Leitsystem auf die dezentralen Steuerungen der Elemente des Prozesses. Die Gleistopographie einer solchen Ablaufanlage mit 64 Richtungsgleisen zeigt Bild 1.

Der zu steuernde Prozess besteht aus einer Schwerkraft-Ablaufanlage mit:

- fernsteuerbaren Rangierlokomotiven zum Heranschieben des Zuges aus der Einfahrgruppe an den Ablaufberg und zum Abdrücken des Zuges über den Ablaufberg
- Weichen der Verteilzone zum Verteilen der Abläufe auf die verschiedenen Richtungsgleise
- hydraulischen Gleisbremsen als obere und untere Talbremsen zum Abbremsen der Abläufe in der Verteilzone auf eine berechnete Geschwindigkeit
- elektrodynamischen Gleisbremsen als Richtungsgleisbremsen zum Abbremsen der Abläufe auf eine vorgegebene Geschwindigkeit

- Förderanlagen zum Räumen der Zonen hinter den Richtungsgleisbremsen und zum kuppelreifen Zusammenschieben der Wagen zu Zügen in den Richtungsgleisen
- Zwergsignalen für die optische Befehlsübermittlung an Rangierfahrten im Bereich der Verteilzone.

Die von der Rangierlokomotive über den Ablaufberg gedrückten Abläufe werden über die automatisch gestellten Weichen in das vorbestimmte Richtungsgleis geleitet. Die Talbremsen dienen dazu, die Abläufe so abzubremsen, dass diese sich trotz unterschiedlichen Laufeigenschaften nicht einholen.

Die Richtungsgleisbremsen bremsen die Abläufe auf 1,5 m/s ab, damit Auflaufstösse mit unzulässig hoher Geschwindigkeit im Richtungsgleis verhindert werden. Die Förderanlagen schieben die Abläufe mit 1,5 m/s kuppelreif zusammen.

Anlagen dieser Art wurden in Basel-Muttenz (SBB) und mit teilweise anderen Elementen in Seelze und Mannheim (DB) in Betrieb genommen. Sie haben sich in der Praxis gut bewährt. Weitere Anlagen in Zürich-Limmattal (SBB), Hamburg-Maschen und Saarbrücken (DB) sind im Bau.

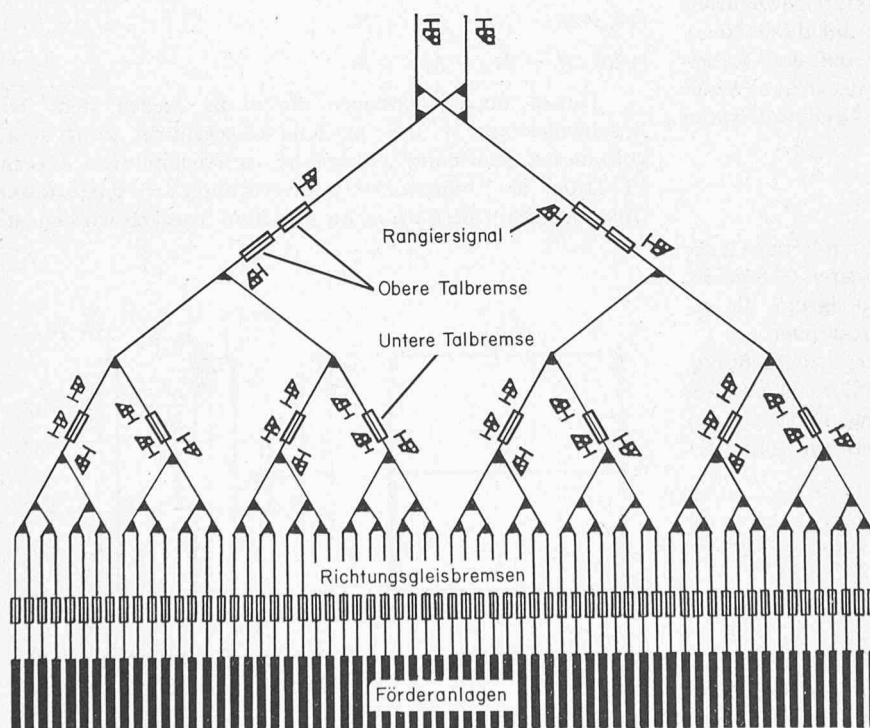


Bild 1. Gleistopographie einer Ablaufanlage mit 64 Richtungsgleisen

Dieses Rangiersystem ist im Laufe der Jahre gewachsen. So wirkt z.B. der zentrale Prozessrechner zum Stellen der Weichen auf die vorhandenen Weichengruppen in Relais-technik des Stellwerks und zum Steuern der Talbremsen auf die früher für halbautomatische Anlagen entwickelten, elektronischen Talbremsensteuerungen. Diese dezentralen Steuerungen wurden um Einrichtungen zum Steuern der Richtungsgleisbremsen und Förderanlagen erweitert [1] [2] [3].

Den Aufbau des Systems und die Anzahl der notwendigen Steuerungen für eine Anlage mit 64 Richtungsgleisen zeigt Bild 2. Für jede Weiche, Talbremse, Richtungsgleisbremse und Förderanlage ist eine eigene dezentrale Steuerung vorhanden.

Infolge der zentralen Struktur des Systems ist der Prozessrechner zeitlich so ausgelastet, dass z.B. in Anlagen mit zwei Berggleisen paralleles Ablaufenlassen von zwei Zügen und Verteilen in je eine Bahnhofshälfte nur eingeschränkt durchgeführt werden kann. In diesem Fall müssen meistens zwei zentrale Prozessrechner eingesetzt werden. Um beim Ausfall eines Prozessrechners den Betrieb weiterführen zu können empfiehlt es sich, auch in Anlagen ohne Parallelablauf einen zweiten Prozessrechner vorzusehen. Derartige Lösungen sind verhältnismässig aufwendig.

Nach dem Erscheinen der ersten Mikroprozessoren wurde daher untersucht, ob sich diese neue Technik zum Aufbau eines mehr dezentral gesteuerten Rangiersystems eignet.

In Zusammenarbeit der Schweizerischen Bundesbahnen mit der Siemens AG entstand im Jahr 1975 ein neues Konzept für die Steuerung zukünftiger Rangieranlagen mit Mikrocomputern. Ziel der Überlegungen war es, sowohl den zentralen Prozessrechner als auch die dezentralen Steuerungen durch Mikrocomputer zu ersetzen.

Grundlagen der Mikrocomputer-Technik

Für den Aufbau von kleineren Datenverarbeitungseinrichtungen, die zwar nicht so leistungsfähig wie Mini-rechner, dafür aber kostengünstiger sind, haben verschiedene Firmen, wie Intel, Motorola usw. nach dem Baukastenprinzip eine ganze Reihe von sogenannten Mikrocomputer (MC)-Bausteinen entwickelt, die sich nahezu beliebig zu einfachen und auch komplexen Systemen kombinieren lassen. Die Entwicklung derartiger LSI-Bausteine (Large Scale Integration) ist durch die Anwendung insbesondere der verschiedenen MOS-Techniken (Metal Oxide Semiconductor), die sich durch einen hohen Integrationsgrad (einige 1000 Gatterfunktionen je Baustein) und einen geringen Leistungsbedarf auszeichnen, möglich geworden.

Kernstück der MC-Bausteine ist der *Mikroprozessor*. Dieser enthält das vollständige Rechen- und Steuerwerk in einem Chip (SI-Baustein). Sein Befehlssatz, der im wesentlichen logische, arithmetische sowie Sprung- und Ein/Ausgabe-Operationen umfasst, ist entweder festverdrahtet oder mikroprogrammiert, wobei im letzteren Fall der Befehlssatz vor der Herstellung des Chips vom Anwender festgelegt werden kann.

Befehlsausführungszeiten von auf dem Markt befindlichen Bausteinen liegen zwischen 2 und 40 μ s. Die Wortlänge ist bei den meisten Bausteinen 8 Bit (1 Byte), manchmal auch 4 oder 16 Bit.

Die prinzipielle Struktur eines Mikrorechners zeigt Bild 3. Die einzelnen Bausteine sind im wesentlichen über voneinander unabhängigen Steuer-, Daten- und Adressbusleitungen auf den Mikroprozessor (CPU – Central Processor Unit) ausgerichtet. Alle Busarten sind für bidirektionalen Drei-Zustands (Three States)-Betrieb ausgelegt.

Als Speicher werden ausschliesslich Halbleiterspeicher verwendet, wobei als Programmspeicher ein ROM (Read Only Memory) oder ein PROM (Programmable ROM) be-

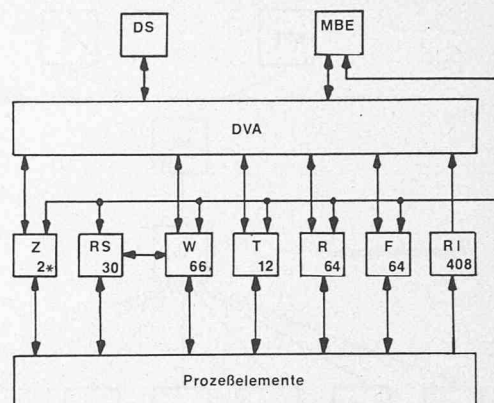


Bild 2. Ablaufsteuersystem mit zentraler DVA

DS	Dispositionssystem
MBE	Melde- und Bedienungseinrichtung
DVA	Datenverarbeitungsanlage
Z	Zulaufsteuerung
RS	Rangiersignalgruppe
W	Weichengruppe
T	Talbremsensteuerung
R	Richtungsgleisbremsensteuerung
F	Förderanlagensteuerung
RI	Richtungseinheit für Achszählpunkte
*)	Anzahl der notwendigen Funktionseinheiten bei 64 Richtungsgleisen

sonders geeignet ist, da bei Energieausfall der Informationsinhalt nicht zerstört wird. Als Schreib-Lese-Speicher für die variablen Daten dient ein RAM (Random Access Memory). Der Speicherausbau ist durch die Breite des Adressbusses bestimmt. So lässt z.B. der Mikroprozessor INTEL 8080 mit 16 Adressbits einen Speicherausbau von 64 K Bytes zu.

Die Leistungsfähigkeit der Mikrocomputer ist nicht nur durch die Geschwindigkeit und den Befehlssatz der CPU, sondern insbesondere auch durch das Vorhandensein von universellen und speziellen Ein-/Ausgabe-Bausteinen bestimmt, die es ermöglichen, aus Standardbauteilen ein komplettes, an eine bestimmte Aufgabe angepasstes MC-System aufzubauen [4].

Mikrocomputer eignen sich daher besonders zur Ablösung verdrahteter Logik, z.B. der derzeitigen dezentralen Steuerungen von Ablauffanlagen. Ihre Vorteile lassen sich wie folgt darstellen:

– *hohe Flexibilität* und damit grosse Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Aufgabenstellungen

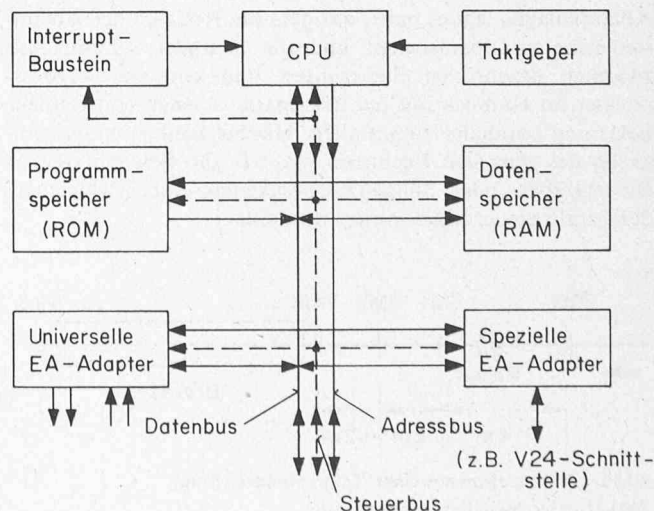


Bild 3. Prinzipielle Struktur eines Mikrocomputers

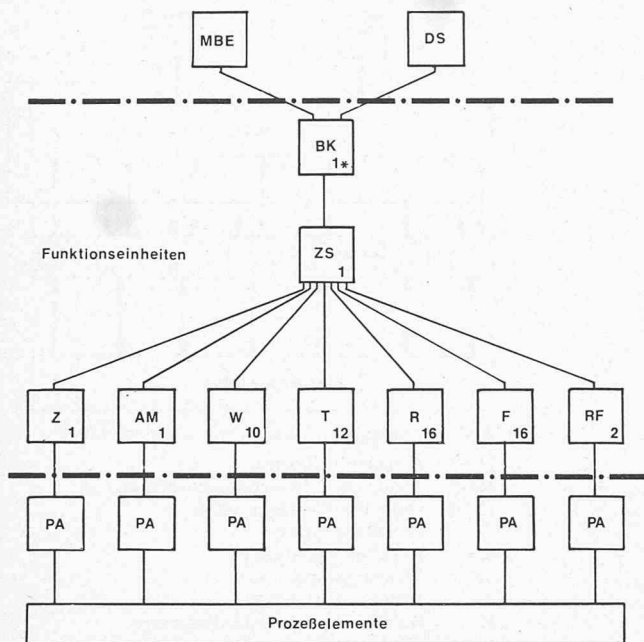


Bild 4. Ablaufsteuersystem mit Mikrocomputern

MBE	Melde- und Bedienungseinrichtung	W	Weichensteuerung
DS	Dispositionssystem	T	Talbremsensteuerung
BK	Bedienungskordinator	R	Richtungsgleisbremsensteuerung
ZS	Zentrale Steuerung	F	Förderanlagensteuerung
Z	Zulaufsteuerung (Loksteuerung)	RF	Rangierfahrwegsteuerung
AM	Ablaufdatenmessung (z. B. Achsgewicht, Ablauflänge)	PA	Prozessanpassungen
		*)	Anzahl der notwendigen Funktionseinheiten bei 64 Richtungsgleisen

- kurze Entwicklungszeiten, da mit einem Mikroprozessor ein sehr komplexes, ausgetestetes System vorliegt, das fast «nur» programmiert werden muss
- Gliederung eines Gesamtsystems in überschaubare Komplexe mit identischer Hardware bei Aufteilung der Software
- Verbesserung der Systemarchitektur durch Parallelarbeit mehrerer Mikrocomputer, Minimierung des Datenflusses, Verkürzen der Reaktionszeiten, genormte Schnittstellen
- Erhöhung der Systemzuverlässigkeit durch dezentrale Struktur, kleine Wirkungsbreite der Fehler, Ausgleich von Ausfällen durch Parallelredundanz
- geringe Kosten wegen Bauteile-, Platz- und Energieersparnis.

Ablaufsteuersystem mit Mikrocomputern

Der Einsatz von Mikroprozessoren zur Steuerung von Ablaufanlagen legt es nahe, das gesamte Konzept der Ablaufsteuerung zu überarbeiten und die heutigen Schnittstellen zwischen dezentralen Steuerungen und zentralem Prozessrechner im Hinblick auf die Informationsmenge und zeitliche Belastung optimaler zu gestalten. Hierbei können einige Aufgaben des zentralen Rechners, wie z.B. die Berechnung von Bremskräften oder Sollgeschwindigkeiten, auf intelligentere dezentrale Steuerungen verlagert werden.

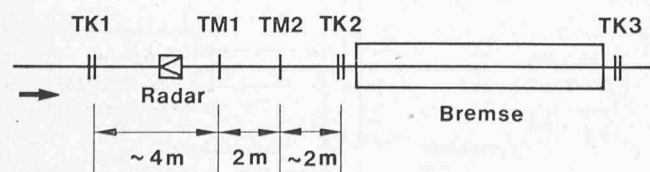


Bild 5. Prozesselemente einer Talbremsensteuerung

- TM1-2 Geschwindigkeitsmessstrecke
- TK1-3 Doppelschienenkopfkontakte

Somit lässt sich das Steuersystem dem Prozessgeschehen, das durch Parallelverarbeitung gekennzeichnet ist, besser anpassen und man kommt aus dem zeitlichen und organisatorischen Engpass, den der zentrale Prozessrechner darstellt, heraus.

Aufgrund dieser Überlegungen wurde ein Ablaufsteuersystem konstruiert, das vollständig aus Mikroprozessoren bzw. Mikrocomputern aufgebaut ist.

Bild 4 zeigt ein Multi-Mikrocomputer-System mit hierarchischer Grundstruktur, das aus folgenden Systemkomponenten besteht: Funktionseinheiten, Prozessanpassungen, Melde- und Bedienungseinrichtungen, Anschluss eines Dispositionssystems.

Systemkomponenten

Unter einer *Funktionseinheit* soll ein Mikrocomputer verstanden werden, der eine in sich weitgehend geschlossene Aufgabe, gegebenenfalls im Zusammenwirken mit der Aussenanlage, mit möglichst geringem Datenaustausch mit anderen Mikrocomputern bearbeitet. Alle Funktionseinheiten haben den gleichen Aufbau, sie unterscheiden sich im wesentlichen nur in der Software.

Grundsätzlich umfassen prozessnahe Funktionseinheiten drei Aufgabenbereiche: direkten Steuerkreis, Berechnung von Sollwerten, Ortung der Abläufe bzw. Freimeldung von Gleisabschnitten, Geschwindigkeitsmessung.

Eine typische Funktionseinheit stellt die Talbremsensteuerung dar (Bild 5), da sie neben der Bremsen auch noch andere Prozesselemente, wie Messstrecken, Schienenkopfkontakte und Radargerät, einbezieht, um alle Steuerfunktionen zu erfüllen. Eine zeitkritische Untersuchung auf der Grundlage des Mikroprozessors Intel 8080 hat ergeben, dass diese Funktionseinheit alle an sie gestellten Aufgaben erfüllen kann.

Die einzelnen Funktionseinheiten sind über *Prozessanpassungen* (Bild 4) mit den Prozesselementen verbunden. Diese Anpassungen dienen im wesentlichen zur Umsetzung der Signalpegel und zur Entkopplung vom Prozess.

Die *Melde- und Bedienungseinrichtungen* dienen der manuellen Beeinflussung des mit Mikrocomputern gesteuerten Rangiersystems und zur Anzeige der Betriebszustände des Prozesses und des steuernden Systems.

Die heute üblichen Meldetafeln mit Glühlampen und Tasten entfallen, dafür sind zur Darstellung von Übersichts- und Ausschnittsbildern des Prozessgeschehens Farbsichtgeräte und zur Eingabe von Befehlen eine Schreibmaschinentastatur vorgesehen.

Für den *Anschluss des Dispositionssystems*, das die notwendigen Daten über die zu zerlegenden Züge liefert, an das Ablaufsteuersystem stellt der Bedienungskordinator (BK) eine Nahtstelle zur Verfügung. Besitzt der Ablaufwärter, der die gesamte Anlage bedient, kein Terminal mit direktem Anschluss an das Dispositionssystem, muss er die Kommunikation mit diesem über den Bedienungskordinator durchführen.

Struktur und Arbeitsweise

Beim Entwurf der Systemkonfiguration wurde streng auf einen modularen Aufbau geachtet, wobei die Funktionseinheiten die einzelnen Moduln darstellen, die entsprechend den Erfordernissen einer Ablaufanlage zu einem System zusammengefügt werden.

Abhängig von der zeitlichen Auslastung können einzelne Funktionseinheiten mehrere Prozesselemente steuern. So umfassen z.B. die Steuerungen der Weichen, Richtungsgleisbremsen und Förderanlagen jeweils nur so viele Elemente, dass bei Ausfall der Steuerung maximal nur eine Richtungsgleisharfe zu acht Gleisen betroffen ist.

Das Systemkonzept berücksichtigt ferner, dass die Zentrale Steuerung (ZS) als Träger der zentralen Funktionen, wie z.B. Führung des Wagen- und Ablaufdatenspeichers, Laufwegverfolgung, Laufwegsteuerung, Koordinierung des Datenverkehrs zwischen den einzelnen Funktionseinheiten, einerseits vom Prozess und andererseits von Bedienungshandlungen entkoppelt ist, so dass die ZS hardware- und softwaremässig aufwandsarm gestaltet werden kann. Neben der Kommunikation mit dem Ablaufwärter und dem Dispositionssystem erfüllt der Bedienungskoordinator (BK) weitere Aufgaben, wie die Führung von Statistiken über besondere Betriebsfälle und Störungsfälle oder die Speicherung aller anlagenspezifischen Konstanten, z.B. Gleiskrümmungswiderstände in einem Festwertspeicher (PROM) oder auf einer Floppy-Disk. Diese Konstanten werden von den einzelnen Funktionseinheiten im Zusammenhang mit einer «Grundstellungsroutine» abgefragt.

Das gesamte Steuersystem arbeitet im wesentlichen mit peripherer Initiative, d.h. die Verarbeitungsanstösse in den einzelnen Funktionseinheiten werden direkt vom Prozessgeschehen abgeleitet.

Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit

Zur Erreichung einer hohen Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Ablaufsteuersystems dienen folgende Massnahmen:

- Konsequente sternförmige Gesamtstruktur (nur intern weisen die Funktionseinheiten eine BUS-Struktur auf)
- Zusammenfassung aller Aufgaben, die zur Steuerung eines Prozesselements gehören, in einem Mikrocomputer
- Zusammenfassung mehrerer Prozesselemente, z.B. Weichen, Richtungsgleisbremsen oder Förderanlagen, in einer Funktionseinheit entsprechend dem Längsschnitt der Ablaufanlage
- Steuerung von zentralen Prozesselementen, z.B. Talbremsen, jeweils nur durch eine Funktionseinheit
- Verdoppelung zentraler Funktionseinheiten, unter anderem Ablaufdatenmessung (AM) und Zentrale Steuerung (ZS)
- Duplex-Funktionseinheiten arbeiten im «hot standby»-Betrieb, d.h. sie empfangen und bearbeiten die gleichen Meldungen zur gleichen Zeit; für die Ausgabe von Daten jedoch ist nur eine zuständig
- Alle Schnittstellen der einzelnen Funktionseinheiten sind zur Pegeltrennung konsequent mit optoelektronischen Koppellementen ausgestattet

- Mittels Softwarekontrollroutinen überwacht jede Funktionseinheit sich selbst sowie gleich- und untergeordnete Funktionseinheiten
- Datenaustauschwege werden durch den natürlichen – prozessabhängigen – Datenfluss oder durch einen künstlichen Datenfluss in einem zeitlich festen Raster, z.B. alle 10 s, überprüft.

Durch diese Massnahmen wird erreicht, dass bei Ausfall eines Teils des Steuersystems im ungünstigsten Fall nur ein begrenzter Bereich der Ablaufanlage betroffen ist und ein Totalausfall vermieden wird. Darüber hinaus ist die Reparaturzeit nicht durch Fehlerlokalisierung, sondern durch den Austausch von fehlerhaften Baugruppen bestimmt.

Ausblick

Ein Vergleich mit dem bisherigen Ablaufsteuersystem zeigt, dass für die Unterbringung der Funktionseinheiten und der Prozessanpassungen nur etwa 25 % des heutigen Schrankvolumens benötigt wird.

Hieraus ergibt sich eine Verminderung des Leistungsbedarfs, wodurch es möglich wird, auf die bisher übliche Klimatisierung zu verzichten. Darüber hinaus werden durch die erhebliche Verringerung des Raumbedarfs die Kosten für die Gebäude vermindert.

Das vorgeschlagene System hat gegenüber dem vorhandenen erhebliche Vorteile, so dass zu erwarten ist, dass die in den achtziger Jahren zu bauenden Anlagen mit dieser Technik ausgerüstet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] A. Delpy: Die Prozesssteuerung im automatisierten Rangierbahnhof. «Signal und Draht» 62 (1970), H. 2.
- [2] G. Olzowy: Die rechnergesteuerten Ablaufanlagen. «Eisenbahningenieur» 26 (1975), H. 1.
- [3] O. Stalder: Computergesteuerter Rangierbahnhof. «Technische Rundschau» Nr. 16, 17, 18 und 21 (1975).
- [4] Siemens Datenbuch 1976/77. Mikroprozessor Bausteine. System SAB 8080.

Adressen der Verfasser: Dipl.-Ing. Alexander Hörder und Dipl.-Ing. Jürgen Schmall, Siemens AG, Ackerstrasse 22, D-3300 Braunschweig, Oskar Stalder, El.-Ing. ETH, SIA, Bauabteilung der Generaldirektion SBB, Mittelstrasse 43, 3000 Bern, und Dr. sc. techn. Edgar Suter, Bauabteilung der Kreisdirektion II der SBB, Schweizerhofquai 6, 6000 Luzern.

Europas grösster Tokamak im Bau

DK 621.039.6

Im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching bei München begann nach einer zweijährigen Planungs- und Konstruktionsphase vor wenigen Wochen der Aufbau von ASDEX, dem derzeit grössten Tokamak-Experiment Europas. Der Name ASDEX ist die Kurzbezeichnung für «Axialsymmetrisches Divertorexperiment». Es hat eine Höhe von 5 m und einen Durchmesser von 8,5 m und wird voraussichtlich Investitionskosten von rd. 30 Mio Mark erfordern. Finanziert wird es zu rd. 54 % vom Bundesministerium für Forschung und Technologie, 40 % kommen von EURATOM und 6 % vom Land Bayern. Mitte 1978 soll dieses Grosseperiment in Betrieb gehen.

Mit ASDEX werden die Forschungsarbeiten fortgesetzt, die mit dem wesentlich kleineren Tokamak «Pulsator» in den letzten Jahren weltweit beachtete Erfolge brachten. Ziel dieser Arbeiten ist die Entwicklung eines Kernfusionsreaktors, der die Energieprobleme der Zukunft lösen könnte.

Der prinzipielle Aufbau von ASDEX gleicht dem aller anderen grossen Tokamaks: 16 riesige Magnetfeldspulen (Höhe 4 m, Gewicht 10 t pro Stück) umgeben ein ringförmiges Metallgefäss, in dem ein extrem heisses Gas, das sogenannte Plasma, erzeugt wird. Um es von den Wänden des Gefässes fernzuhalten – diese würden sonst verdampfen –, erzeugt man mit den Spulen ein starkes magnetisches Feld, welches das heisse Plasma wie in einem Käfig «gefangen» hält. Gewaltige Ströme sind dazu notwendig: Durch jede der Spulen fliessen bis zu 45 000 A. Zum Vergleich: In einer 100-W-Glühbirne fliesst ein Strom kleiner als 0,5 A.

Beeindruckend ist von aussen die Gerüststruktur – für sich allein wiegt sie schon 100 t. Sie soll die Magnetfeldspulen abstützen und so halten, dass sie sich um keinen Millimeter verschieben. Die starken Ströme verursachen nämlich enorme Kräfte, drücken die Spulen mit 1000 t nach innen und versuchen, sie zu kippen.