Anwendung der Signaturanalyse in Mikrorechnersystemen

Dr.-Ing. GÜNTER WILL

Mitteilung aus dem
VEB Robotron Meßelektronik „Otto Schön" Dresden

Mit der Einführung hochintegrierter und programmierbarer Schaltkreise ist die Fehlersuche in digitalen Systemen immer schwieriger geworden. Die Mehrzahl der heute bekannten Testmethoden (Entwicklungssysteme, Logikanalysatoren) ist für den Einsatz im Service oder im Prüffeld ungeeignet, da sie in der Regel gute Kenntnisse des zu testenden Systems voraussetzen und da ein Test am Einsatzort fast völlig ausscheidet. Hier bietet sich die Signaturanalyse an, die mit einfachen gerätetechnischen Mitteln eine Fehlerlokalisierung bis zum defekten Bauelement erlaubt, ohne das umfangreiche Schaltungskenntnisse vom Testpersonal gefordert werden.

Die Signaturanalyse ist ein Algorithmus, mit dem serielle Bitströme innerhalb eines definierten Zeitfensters auf Einhaltung eines gegebenen Sollwerts überprüft werden können. Die Signalfolge wird dabei mit Hilfe von hard- oder softwareorientierten Hilfsmitteln auf eine Kenngröße (Signatur) abgebildet.
Die obige Definition gibt zunächst keinen Hinweis auf mögliche Realisierungen. Als Methoden sind bisher die Übergangszählung und die Signaturbildung mit Hilfe rückgekoppelter Schieberegister bekannt geworden. Die erste Methode, bei der die 0-1- oder 1-0-Übergänge des Signalstroms registriert werden, wird jedoch wegen ihrer schlechten Fehlererkennungseigenschaften kaum verwendet. Im folgenden wird die Methode der rückgekoppelten Schieberegister näher beschrieben, die heute allgemein als eigentliche Signaturanalyse angesehen wird.

Grundlagen

Verwendet wird ein nichtautonomes, lineares, rückgekoppeltes Schieberegister aus D-Flip-Flops (Bild 1). Die Eingangsfolge E(X) wird mit den Rückkopplungssignalen über ein EXOR-Gatter verknüpft und in das Schieberegister eingeschoben. Die Rückkopplungen sind so gewählt, daß im autonomen Fall (keine Eingangsfolge) ein Generator maximaler Länge entsteht. Dadurch ist eine maximale Fehlererkennung gewährleistet [1] [2] [3] [4]. Die im Schieberegister nach Abbruch der Prozedur verbleibende Bitserie wird als Signatur bezeichnet und einer geräteinternen Anzeige zugeführt.
Am Beispiel eines reduzierten Schieberegisters werden die Verhältnisse nochmals veranschaulicht (Bild 2).
Die Eingangsimpulsfolge e(t) wird nach Verknüpfung mit den Ausgängen r_2, r_3 seriell in das Schieberegister mit Ausgangslage r_0 bis $r_3 = 0$ geschoben, dabei wird das MSB zuerst und das LSB zuletzt geschoben. Für das Eingangspolynom im Bildbereich des Verschiebeoperators D erhält man durch D-Transformation [5]

$$E(X) = X^{10} + X^7 + X^5 + X^4 + X^2 + 1$$

Das Ausgangspolynom A(X) wird mit Division durch das charakteristische Schieberegisterpolynom $P_Q(X)$ gebildet, welches durch Inversion des Rückkopplungspolynoms $P_R(X)$ entsteht. Für das Schieberegister nach Bild 2 gilt:

$$P_R(X) = X^4 + X^3 + 1$$
$$P_Q(X) = X^4 \cdot P_R(X^{-1}) = X^4 + X + 1$$

Die Division $E(X)/P_Q(X)$ ergibt

$$(X^{10} + X^7 + X^5 + X^4 + X^2 + 1) : (X^4 + X + 1) = X^6 + X^2 + X + 1 = A(X)$$

$$\begin{array}{l}
X^{10} + X^7 + X^6 \\
\hline
\quad X^6 + X^5 + X^4 + X^2 + 1 \\
\quad X^6 \qquad\quad X^3 + X^2 \\
\hline
\qquad X^5 + X^4 + X^3 + 1 \\
\qquad X^5 \qquad\quad X^2 + X \\
\hline
\qquad\quad X^4 + X^3 + X^2 + X + 1 \\
\qquad\quad X^4 \qquad\qquad\quad X + 1 \\
\hline
\text{Rest} \qquad\quad X^3 + X^2 \qquad\qquad = R(X)
\end{array}$$

Der nach Ausführung der Division im Schieberegister verbleibende Rest r_3, r_2, r_1, r_0 ist nicht identisch mit dem nach Abbruch der ganzzahligen Division verbleibenden Rest $R(X) = X^3 + X^2$, d. h., R(X) stellt nicht die Signatur der Eingangsfolge E(X) dar.

Die Werte r_3 bis r_0 bilden die Koeffizienten des Polynoms, das nach Fortsetzung der Division entstehen würde, begrenzt auf die Schieberegisterlänge:

$$(X^3 + X^2) : (X^4 + X + 1) = 1 \cdot X^{-1} + 1 \cdot X^{-2} + 0 \cdot X^{-3} + 1 \cdot X^{-4}$$

$$\begin{array}{l}
X^3 + 1 + X^{-1} \\
\hline
\quad X^2 + 1 + X^{-1} \\
\quad X^2 \qquad + X^{-1} + X^{-2} \\
\hline
\qquad\quad 1 + X^{-2} \\
\qquad\quad 1 + X^{-3} + X^{-4} \\
\hline
\qquad X^{-2} + X^{-3} + X^{-4}
\end{array}$$

Die Signatur ist also die Ziffernfolge 1101.

Die Verwandtschaft der dargestellten Methode mit der Technik der CRC-Zeichenbildung bei der Datensicherung ist deutlich erkennbar [6].

Fehlerbetrachtungen

Bei der Angabe des Begriffs der Genauigkeit einer Signaturmessung ist zunächst eine Erläuterung des Fehlerbegriffs notwendig. Die Signaturanalyse kann nur ein-

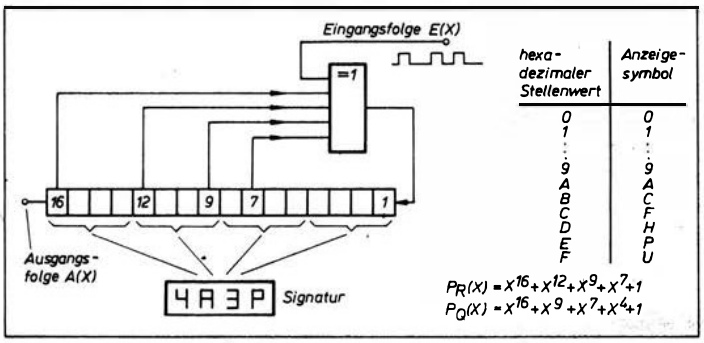

Bild 1: Zur Signaturbildung benutztes Schieberegister

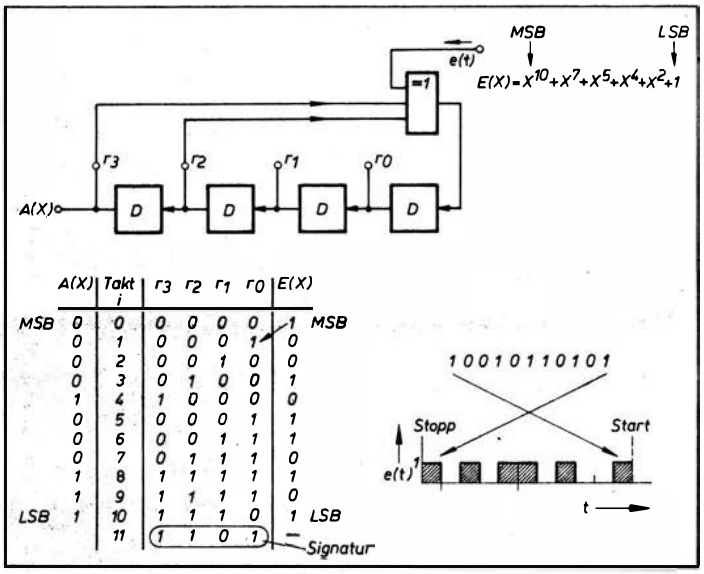

Bild 2: Vorgang der Signaturbildung ▶

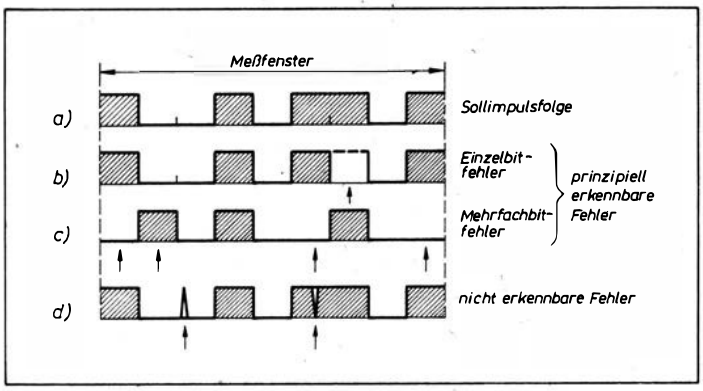

Bild 3: Beispiele fehlerhafter Bitfolgen

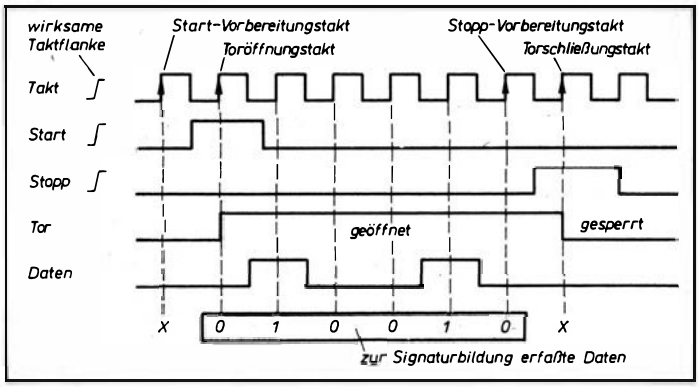

Bild 5: Wirkungsablauf im Signaturanalysator, dargestellt durch die Signale TAKT, START, STOPP, DATEN

zelne oder mehrfache Verfälschungen im analysierten Bitstrom erkennen, wenn der verfälschte Wert zum Zeitpunkt des Auftretens einer aktiven Taktflanke vorhanden ist. Die Fälle b, c nach Bild 3 sind prinzipiell erkennbare Fehler, kurzzeitige Störungen (Glitches, Spikes) sind nur in seltenen Fällen durch die Signaturanalyse erfaßbar.

Hinsichtlich der Erkennbarkeit von Einzelbit- und Mehrfachbitverfälschungen bestehen Unterschiede. Einzelbitfehler sind unabhängig von der Länge des Eingangspolynoms 100%ig erkennbar [1]. Mehrfachbitfehler sind bei Polynomlängen m, die die Schieberegisterlänge n überschreiten, nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit erkennbar (Bild 4).

Für $m > n$ gibt es 2^{m-n} Fälle, die auf den gleichen Schieberegisterinhalt führen. Die Wahrscheinlichkeit der Fehlererkennung sinkt dadurch auf den Wert

$$w = 1 - \frac{2^{m-n} - 1}{2^m - 1} \qquad (1)$$

Gl. (1) vereinfacht sich für große Polynomlängen m zu

$$w = 1 - \frac{1}{2^n} \qquad (2)$$

Es ist also stets eine Testfolge möglichst kleiner Längen anzustreben.

Wie funktioniert ein Signaturanalysator?

Die Wirkungsweise wird verdeutlicht durch das Zusammenspiel der vier Signale TAKT, START, STOPP und DATEN. Alle Funktionen, d. h. das Öffnen und Schließen des Tores (START-STOPP), das Übernehmen der Daten sowie die Aktualisierung der Anzeigefunktionen, erfolgen taktgesteuert. Im Bild 5 ist das Zusammenspiel aller Signale dargestellt. Zur Gewährleistung einer einwandfreien Torfunktion sind sowohl für START als auch für STOPP zwei Taktsignale notwendig, die den Flankenwechsel eindeutig erkennen lassen. Der Toröffnungstakt übernimmt bereits das er-

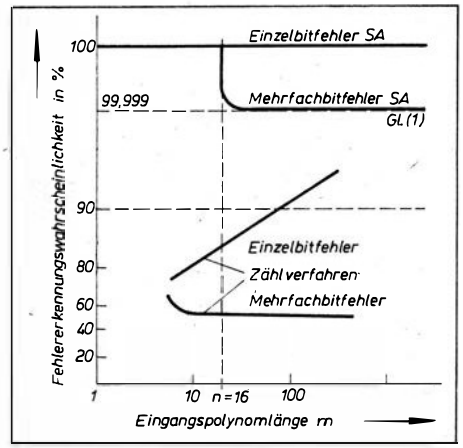

Bild 4: Fehlererkennungswahrscheinlichkeit als Funktion der Eingangspolynomlänge

ste Datenbit für die Signaturbildung, der Torschließungsimpuls ist für die Signaturbildung bezüglich des Datensignals wirkungslos.

Mit dem wirksamen START-Takt wird das Schieberegister zunächst in die Ausgangslage (Registerinhalt Null) gebracht, bevor das erste Datensignal registriert wird. Der wirksame STOPP-Takt übergibt den Inhalt des Schieberegisters an das Speicherregister und bewirkt den Stabilitätsvergleich mit der vorherigen Signatur. Zur Erzielung stabiler Signaturen ist es notwendig, daß alle Signale zum Zeitpunkt des Eintreffens der aktiven Taktflanke einen definierten Pegel besitzen (Bild 6). Die minimale Voreinstellzeit beträgt beim Signaturanalysator 31 020 etwa 25 ns für START, STOPP und etwa 15 ns für Daten. Eine Haltezeit nach Eintreffen der aktiven Taktflanke ist nicht erforderlich.

In den Bildern 7 bis 9 sind einige Fälle von Signalverläufen dargestellt, die zu Fehlfunktionen des Tores im Signaturanalysator führen. Nach Bild 7 ist die Dauer des START- bzw. STOPP-Signales zu kurz, da im Zeitraum von der aktiven START-Signalflanke bis zum Zurücknehmen des START-Signals kein Taktimpuls eingetroffen ist. Gleiche Verhältnisse liegen bezüglich des STOPP-Signales vor. Nach Bild 8 fehlt vor der aktiven START-Flanke ein Taktsignal, so daß das Tor u. U. nicht geöffnet wird, während nach Bild 9 nach Auftreten einer STOPP-Flanke kein Takt vorhanden ist, so daß das bereits geöffnete Tor nicht geschlossen wird.

Im Bild 10 sind als Extremfälle die minimale Toröffnung (zwei Takte) und die minimale Torschließung zwischen zwei Signaturzyklen dargestellt.

Die Anzahl der Taktimpulse innerhalb eines Signaturbildungszyklus hat unmittelbaren Einfluß auf die Fehlererkennung (s. Bild 11). Eine hohe Taktimpulsdichte verbessert die Erkennung kurzzeitiger Störungen.

Ist die Datenleitung während des Signaturbildungszyklus konstant auf 0- oder 1-Pegel, so entsteht im ersten Fall die Signatur 0000, während im zweiten Fall die sogenannte H-Signatur entsteht, die typisch für den jeweiligen Signaturbildungszyklus ist und zur Beurteilung der einwandfreien Funktion des Signaturanalysators und des Stimulus nützlich ist (s. Bild 12).

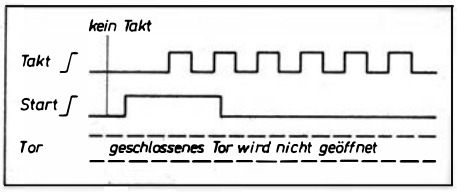

Bild 8: Fehlerhafte Torfunktion durch verspätete Taktbereitstellung zum START-Zeitpunkt

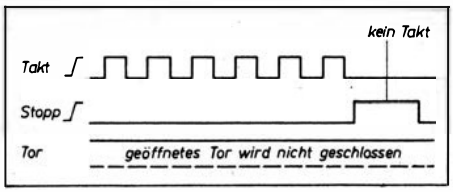

Bild 9: Fehlerhafte Torfunktion durch vorzeitige Taktunterbrechung zum STOPP-Zeitpunkt

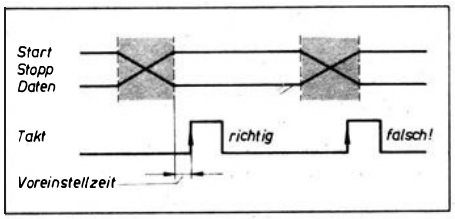

Bild 6: Voreinstellzeit der Signale START, STOPP, DATEN

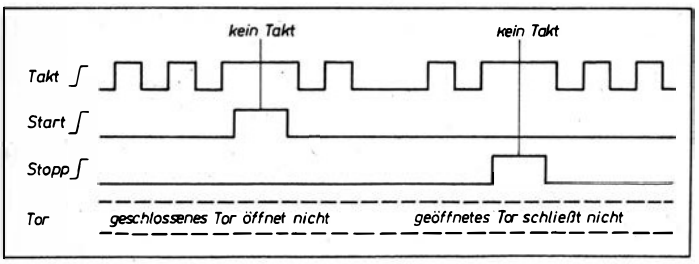

Bild 7: Torfehler durch fehlendes Taktsignal

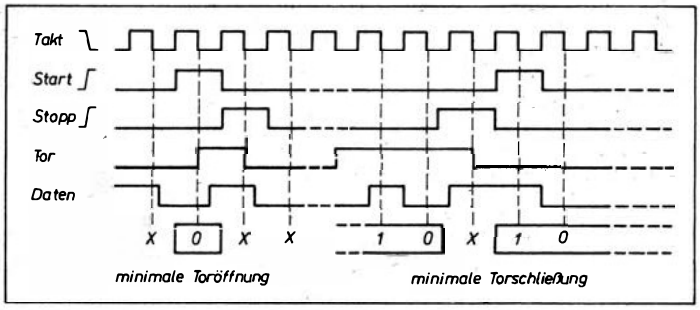

Bild 10: Minimale Toröffnungs- und Torschließungszeit

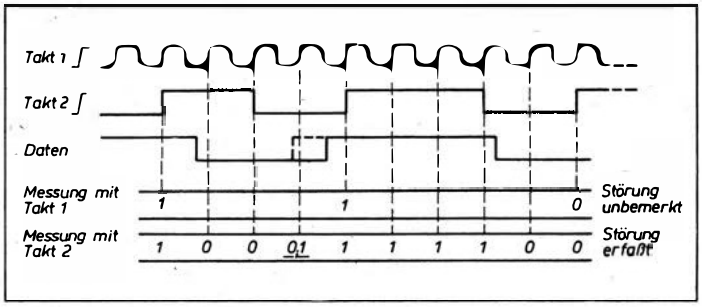

Bild 11: Wirkung unterschiedlicher Taktfrequenzen bei der Fehlererkennung

Mikrorechner und Signaturanalyse

Mikrorechnersysteme sind auf Grund mehrerer Eigenschaften besonders günstig für die Anwendung der Signaturanalyse:

- Anwesenheit komplexer Datenströme (Bussystem)
- Mehrzahl der Schaltungskomplexe synchron durch CPU-Takt gesteuert
- Möglichkeit der Anregung von Schaltungskomplexen durch Implementierung von Testsoftware (Einsparung von Stimulushardware).

Andererseits treten hier Besonderheiten auf, die innerhalb konventioneller Logiksysteme bei Anwendung der Signaturanalyse nicht berücksichtigt werden müssen. In erster Linie zählt hierzu die spezifische Arbeitsweise einer CPU. Alle Abläufe erfolgen in sinnvoll aufeinanderfolgenden Maschinenzyklen, die in sich streng taktgesteuert ablaufen. Um die Signaturanalyse auch in solchen Systemen erfolgreich anwenden zu können, ist insbesondere der Gültigkeitsbereich der Mikrorechnersignale zu beachten und mit der Arbeitsweise des Signaturanalysators in Übereinstimmung zu bringen.

Betrachten wir hierzu ein einfaches Beispiel. Die CPU wünscht innerhalb eines Speicherzyklus Daten aus einem Speicher zu lesen (Bild 13). Dazu ist die Ausgabe von Adreß- und Steuersignalen zu definierten Taktzeitpunkten erforderlich. Erst in der letzten Taktperiode T_3 werden durch die CPU die Datenleitungen abgefragt. Will man das gesamte Signalsystem, einschließlich der davon abgeleiteten Signale (innerhalb des Speichersystems), abhängig von zusätzlichen Zeitbedingungen (WAIT), der Signaturanalyse unterwerfen, so ist klar, daß die dem Signaturanalysator zuzuführenden Signale sorgfältig aufeinander abgestimmt werden müssen. Dies ist insbesondere bei der Bereitstellung des Taktsignals zu beachten. Dieses darf erst auftreten, wenn die zu analysierenden Signale gültig sind. Die geschilderte Vorgehensweise ist auch bei den übrigen Maschinenzyklen zu beachten.

Um den Anwender des Signaturanalysators 31 020 weitgehend von den Überlegungen nach Auswahl geeigneter Taktsignale zu entlasten, wurde in der Anschlußsteuerung ASA 535 225.0 ein komplexes Taktaufbereitungssystem implementiert.

Weitere Gesichtspunkte bei der Anwendung der Signaturanalyse in Mikrorechnersystemen sind

- Unterbringung von Test- und Stimulusprogrammen im System
- Eintrittsmöglichkeit in der Testphase bzw. Wiedereintritt in die Systemphase

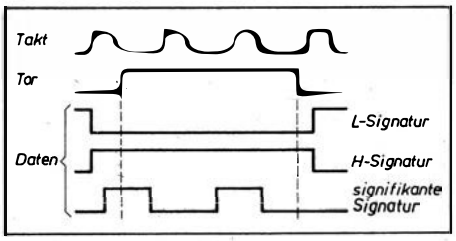

Bild 12: Entstehung von Null- und H-Signatur

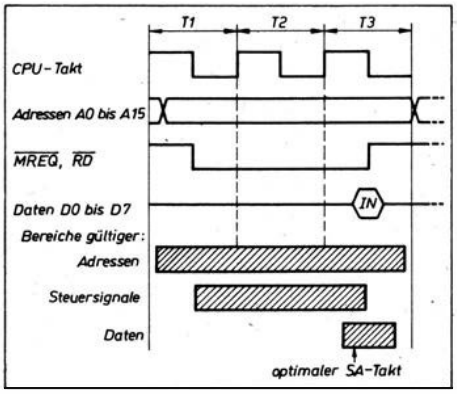

Bild 13: Gültigkeitsbereiche der Signale des Mikroprozessors U 880 D im Speicherlesezyklus

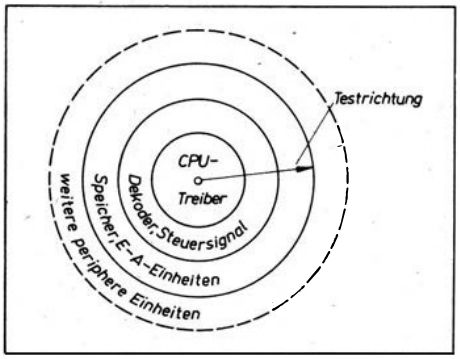

Bild 14: Teststrategie innerhalb eines Mikrorechnersystems

- Bereitstellung von Testhilfen in Form von zusätzlichen Hardwarestimuli sowie weitgehende Berücksichtigung von schaltungstechnischen Besonderheiten (Taktqualifier).

Teststrategie

Bei der Anwendung der Signaturanalyse in komplexen Mikrorechnersystemen sind einige Grundsatzprobleme zu lösen:

- Wie wird die Signaturanalyse in ein vorhandenes universelles Diagnosesystem eingeordnet?
- In welche Teilkomplexe wird der Signaturtest zerlegt?
- In welcher Reihenfolge werden die Teilkomplexe zweckmäßigerweise durchlaufen?

Da die Signaturanalyse ein reines Auswerteverfahren ist, wird sie im allgemeinen von der System-CPU als steuernde Quelle Gebrauch machen. Eine sinnvolle Teststrategie wird folglich, vom Mikrorechnerkern (CPU und Bustreiber) beginnend, zu peripheren Funktionsgruppen (Speicher, E-A-Bausteine) fortschreiten (Bild 14). Der Test des Kerns erfolgt in der Regel im sogenannten Freilaufzustand, d. h., die CPU wird durch schaltungstechnische Maßnahmen (ohne Benutzung von Programmspeichern) gezwungen, sinnlose Befehle (NOP, LDA,A usw.) auszuführen, die z. B. zum Durchlaufen des gesamten Adreßraumes führen und hierbei zu einer Erregung der CPU-nahen Schaltungsteile führen [7]. Eine einfache Schaltung zum Erzwingen des Freilaufzustandes für die CPU U 880 D unter Benutzung des Befehls LD A,A (OP-Kode 7FH) zeigt Bild 15.

Bezüglich der Funktionsweise der CPU besitzt der Freilauftest nur eine geringe Aussagekraft, weitere CPU-Tests werden nur mit Hilfe von Stimulusprogrammen zu sinnvollen Ergebnissen führen. Hierbei können unterschiedliche Wege beschritten werden. In [8] ist eine emulationsähnliche Technik beschrieben, die mit Hilfe von Zusatzhardware und Stimulusprogrammen einen umfangreichen CPU-Test sowie die Analyse weiterer Mikrorechnerkomponenten erlaubt. Die Anwendbarkeit solcher Methoden wird jedoch erschwert, wenn z. B. LSI-Schaltkreise eingelötet werden. In vielen Fällen wird auch durch Mikroprozessor-Selbsttests eine Überprüfung des Systemkerns günstiger sein.

Innerhalb eines größeren Diagnosekomplexes wird die Signaturanalyse unmittelbar nach der Diagnose eines defekten Moduls (nicht mit Signaturanalyse) eingeordnet. Durch sie wird die Fehlerlokalisierung bis zum defekten Bauelement vorgenommen.

Signaturanalyse im Mikrorechnersystem K 1520

Im Standard-Leiterkartensortiment des Systems K 1520 sind keine Vorbereitungen getroffen, um beispielsweise mit dem Signaturanalysator 31 020 unmittelbar eine Signaturanalyse durchführen zu können.

Mit Hilfe der folgenden vom VEB Robotron Meßelektronik „Otto Schön" Dresden angebotenen Geräte bzw. Leiterkarten ist die Signaturanalyse in den meisten Anwendungsfällen durchführbar:

Fortsetzung auf Seite 54

Fortsetzung von Seite 24

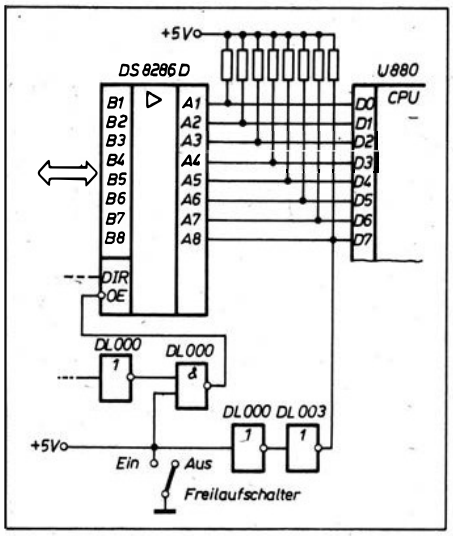

Bild 15: Freilaufzustand des U 880 D durch Befehl LD A,A

Signaturanalysator 31 020 (Gerät komplett)
Bestell-Nr. 535 090.7
Leiterplatte Signaturanalysator 535 145.0 mit Sondeneinheit
Bestell-Nr. 535 100.8
Leiterplatte Anschlußsteuerung für Signaturanalysator 535 226.7
Bestell-Nr. 535 225.0.
Mit diesen Einheiten lassen sich zwei prinzipielle Meßanordnungen aufbauen (Bilder 16 und 17). In der Meßanordnung nach Bild 16 wird der Signaturanalysator 31 020 (Gerät) über eine spezielle Anschlußsteuerung 535 226.7 mit dem Mikrorechnersystem verbunden. CPU und Bustreiber werden als fehlerfrei vorausgesetzt, alle anderen Systemeinheiten können als Testobjekte angesehen werden. Die Anschlußsteuerung ASA 535 225.0 enthält einen Stimulusprogrammspeicher, Schaltungen zur Erzeugung der Takt-, Start- und Stoppsignale für den Signaturanalysator, einen Taktqualifier sowie eine programmierbare Impulsquelle (Bild 18).

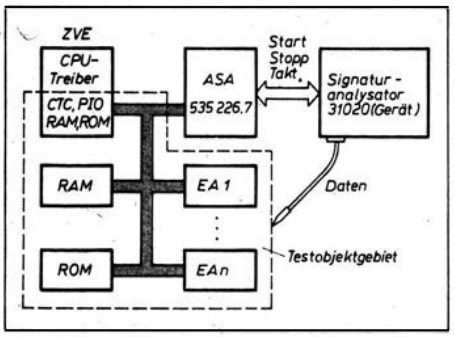

Bild 16: Prinzipieller Aufbau eines Signaturanalysesystems auf der Basis Signaturanalysator 31 020 und Anschlußsteuerung 535 225.0

Die Meßanordnung nach Bild 17 verwendet die Signaturanalysatorleiterplatte 535 145.0, die das signaturbildende 16stufige Schieberegister, den Zwischenspeicher, den Eingangsautomat und die Schaltungen zur K-1520-Busanpassung enthält (Bild 19). Das Mikrorechnersystem muß in diesem Fall Speicher für das Stimulusprogramm, Bedien- und Anzeigeelemente sowie Zusatzschaltungen zur Takt- und Start-Stopp-Signalerzeugung für den Signaturanalysator bereitstellen. Der Umfang des Testobjektbereichs wird dadurch zwangsläufig eingeengt. Diese Variante wird deshalb nur in größeren Gerätesystemen mit eigenem Diagnosekomplex zur Anwendung gelangen oder zum Aufbau spezieller Test- und Diagnosesysteme verwendet werden.

Anwendungsmöglichkeiten

Mit den beschriebenen Verfahren lassen sich folgende Prüfungen durchführen:

- Tests von PROM- und RAM-Leiterkarten (100 %)
- Prüfung von E-A-Einheiten (PIO, CTC, TTL-Logik)
- bedingte Prüfung von Tastaturen und Anzeigen.

Bei den beiden zuletzt genannten Komplexen kann der Prüfumfang erhöht werden, wenn in den Schaltungen unterstützende Maßnahmen getroffen werden (Auftrennen von Funktionskomplexen, Schaffung von Anregungsmöglichkeiten durch Zusatzhardware).
Die Prüfabläufe werden in der Regel durch einen Vergleich von Soll- und Istsignatur und durch Kontrolle der Signaturstabilität realisiert. In komfortablen Systemen ist eine Bildschirmführung mit Ausgabe der Sollsignaturen und der Testpunkte möglich. Die Analyse wird zwecks Zeiteinsparung stets an Punkten mit hohem Informationsgehalt begonnen (z. B. READY-Signale) und nur im Fehlerfall zu funktionstechnisch davorliegenden Punkten fortgesetzt. Wenn kein Fehler vorliegt, wird zum nächsten Testkomplex übergegangen.

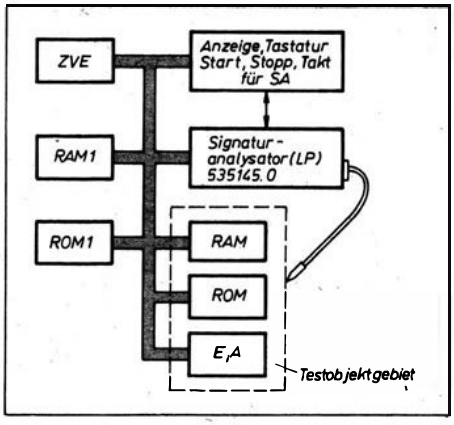

Bild 17: Systeminterne Signaturanalyse mi SA-Leiterplatte 535 145.0

Es ist nicht einfach, abschließend eine Aussage über den Stellenwert der Signaturanalyse innerhalb der in Frage kommenden Servicetesthilfsmittel zu machen. Bedingt durch die gerätetechnische Schlichtheit und die guten Fehlererkennungseigenschaften wird die Signaturanalyse auf dem Gebiet der Mikrorechnertesthilfsmittel jedoch zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Literatur

[1] Frohwerk, R.: Signature Analysis: A New Digital Field Service Method. Hewlett-Packard-Journal; Palo Alto 28 (1977) 9, S. 2–8
[2] Voelkel, L.: Fehlerdiagnose durch Kennzeichenauswertung. Nachrichtentechnik · Elektronik, Berlin 31 (1981) 4, S. 139–142
[3] Golomb, S. W.: Shift-Register Sequences. San Francisco: Holden-Day Inc. 1967
[4] Peterson, W. W.: Prüfbare und korrigierbare Codes. München: R. Oldenbourg Verlag 1967
[5] Fey, P.: Operatorenrechnung bei linearen digitalen Systemen. Nachrichtentechnik · Elektronik, Berlin 20 (1970) 10, S. 365–370
[6] Leiengang, D.; Wagner, M.: Signaturanalyse in der Datenverarbeitung. Elektronik, München 32 (1983) 21, S. 67–72
[7] Stefanski, A.: Free-running Signature Analysis Simplifies Trouble-shooting. Hewlett-Packard Application Note 222-2, S. 37–39
[8] Rhodes-Burke, R.: Retrofitting for Signature Analysis Simplified. Hewlett-Packard-Journal, Palo Alto 33 (1982) 1, S. 9–19

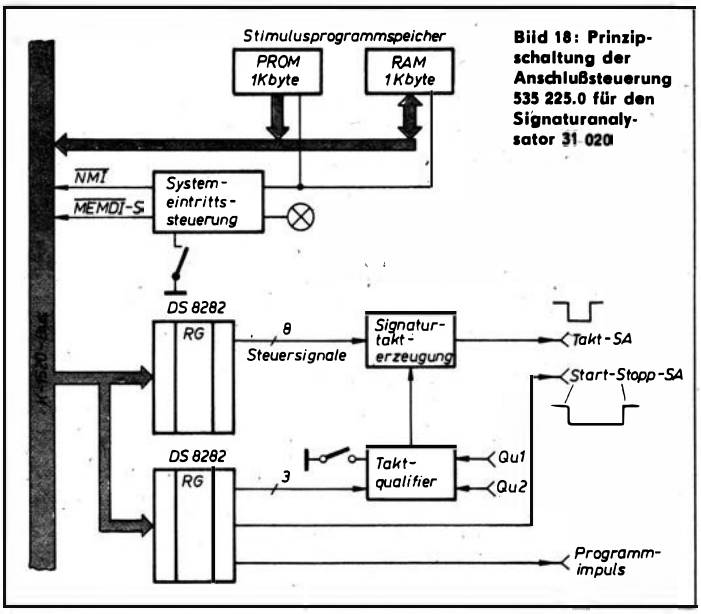

Bild 18: Prinzipschaltung der Anschlußsteuerung 535 225.0 für den Signaturanalysator 31 020

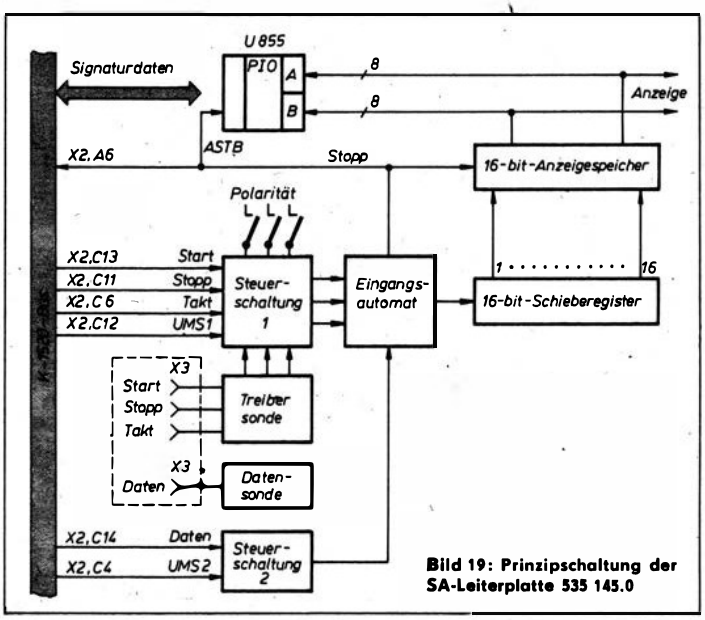

Bild 19: Prinzipschaltung der SA-Leiterplatte 535 145.0