

Thomas Franke
Michael Kircher

**High-Speed-Boolean SPS überwacht und steuert das
Fusionsplasma am MPI für Plasmaphysik in Garching**

**Boolean High-Speed PLC controls fusion plasma at MPI for
plasma physics, Garching**

Teil 1 Bericht
Teil 2 Vortragsfolien

Part 1 Report
Part 2 Slides

**IPP Z / 5
Dezember 2006**

Boolean High-Speed SPS überwacht und steuert das Fusionsplasma am MPI für Plasmaphysik in Garching

Dipl.-Ing. (Univ.) Thomas Franke, IPP Garching, Abteilung ZE
Dipl.-Ing. (FH) Michael Kircher, IPP Garching, Abteilung ZE

Boolean High-Speed SPS controls fusion plasma at MPI for plasma physics, Garching

This text describes the PLC of a High-Voltage Modulator. The control loop consists of an analogue precision PID-controller in conjunction with a S7-300 PLC which is assisted by a High-Speed-Boolean Coprocessor.

Keynotes: PLC, High-Voltage-Modulator, High-Speed-Boolean CPU

1. Einleitung

Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching ist eine der Helmholtz-Gemeinschaft deutscher Forschungseinrichtungen assoziierte Einrichtung, deren Forschungsgegenstand die kontrollierte Kernfusion als Energiequelle der Zukunft ist. Wie auf der Sonne, erzeugt solch ein Fusionskraftwerk Energie aus der Verschmelzung leichter Atomkerne. Damit die Teilchen mit ausreichend hoher Geschwindigkeit aufeinander zufliegen, muss die Plasmatemperatur 100 Millionen Grad erreichen. Die Elektronenzyklotronresonanzheizung nutzt dabei die Resonanzschwingungen der im Plasma eingeschlossenen Elektronen aus. Die dazu notwendigen Hochfrequenzleistungen betragen je Hochfrequenzgenerator (Gyrotron) ca. 800kW. Zur leistungsarmen Ansteuerung wurde ein Bodymodulator entwickelt, der in dieser Anwendung Hochspannungsimpulse mit 35 kV bei einer Leistung von 12 kW erzeugt.

Im folgenden wird die Steuerung dieses Bodymodulators beschrieben. Zur Regelung und Steuerung kommen Hochgeschwindigkeits-Präzisionsregler und eine Simatic S7/300 Steuerung mit einem Boolean-High-Speed Prozessor zum Einsatz. Der folgende Beitrag zeigt die Anforderungen und die Umsetzung der Funktionen der SPS auf.

2. Anforderungen an die Hardware

Die Steuerung arbeitet in zwei Zeitregimen, die durch mehrere Zehnerpotenzen getrennt sind. Die überwiegende Zahl der insgesamt 117 definierten Signale wird durch eine S7/300-SPS verarbeitet. Dies betrifft 72 von 90 der digitalen I/O's und alle 27 der analogen Signale. Hier wurde bei der Planung eine Reaktionszeit im Bereich von 10 ms bis maximal 100 ms als Vorgabe angenommen.

Für die verbleibenden 18 digitalen I/O's darf die Reaktionszeit 10 μ s nicht überschreiten. Andererseits soll die Verarbeitung der Signale flexibel und programmier-technisch vergleichbar zur sonstigen SPS-Hardware erfolgen. Aus diesem Grund wurde die SPS um einen Boole'schen Koprozessor erweitert, im folgenden High-Speed-SPS genannt.

3. Aufgabenbeschreibung

Der Bodymodulator bezieht die Energie aus dem 400 V Drehstromnetz. Einer der Aufgaben der SPS ist zunächst die Ansteuerung der Leistungsschütze im Niederspannungsteil, über die alle anderen Verbraucher eingeschaltet werden. Die für die Grundbereitschaft nötigen Verbraucher werden nicht auf einmal, sondern über eine Ablaufsteuerung zeitversetzt eingeschaltet, um Einschaltstromspitzen zu minimieren.

Über Profibus (optical link) werden der SPS vor Pulsbeginn die Parameter des Arbeitspunktes (gewünschte Spannung/Strom) mitgeteilt. Diese Parameter werden der Regelelektronik als analoge Signale übergeben.

Der Betriebszustand und die internen Ressourcen werden ständig überwacht und in der nächsten Ausbaustufe auch in einer Visualisierung dargestellt. Treten extreme Betriebszustände auf, so werden alle Verbraucher ausgeschaltet und die Anlage dadurch in einen sicheren Zustand gebracht.

Wird ein Puls angefordert, dann schaltet die SPS weitere, über die Grundbereitschaft hinausgehende Verbraucher zu und gibt die Hochspannung frei. Diese Aufgaben werden alle von der SPS bearbeitet. Die Zyklus-Zeit liegt bei 10 ms und erfüllt damit die Planungsvorgaben optimal.

Die High-Speed-SPS erzeugt ab diesem Zeitpunkt die Freigabesignale, die von den Gittertreibern der Leistungstetroden und der Regelelektronik benötigt werden. Im Fehlerfall greift eine Schnellabschaltung der Treiberstufen durch die schnelle SPS. Die Zyklus-Zeit der High-Speed-SPS beträgt 1 μ s, die gesamte Reaktionszeit liegt unter 10 μ s und erfüllt ebenfalls die Vorgaben.

Die elektrische Sicherheit wird durch Hauptschalter, Leistungsschalter mit Unterspannungsauslöser, NOT-AUS-Schalter und Türkontakte mit Sicherheitsrelais mit zwangsgeführten Kontakten im Sicherheitskreis gewährleistet. Alle Komponenten erfüllen die Norm EN 954-1, mit der Sicherheitskategorie 4. Die SPS ist bewußt von einer Eingriffsmöglichkeit ausgenommen.

4. Programmentwurf

4.1 Eingabe- und Ausgabeanalyse

Zu Beginn des Programmentwurfs wurde eine Eingabe- und Ausgabeanalyse vorgenommen. Es wurden alle Signale aufgelistet und Namen vergeben. Dann wurde kategorisiert nach digitalen oder analogen Signalen und Eingang oder Ausgang. Während die digitalen Signale mit 24 V Pegeln definiert wurden, mußte bei den analogen Signalen zusätzlich noch festgelegt werden, ob Spannung oder Strom als Meß- oder Steuergrößen verwendet werden sollten und welche Signalamplituden vorliegen.

4.2 Verarbeitungsanalyse

Die Signalverarbeitung sollte in einem ersten Entwurf in Gruppen vorgenommen werden, die aus den in Hardware vorhandenen Subsystemen abgeleitet wurden. Während der Verarbeitungsanalyse wurden 17 Hardware-Systeme identifiziert und die 117 Signale auf diese Systeme verteilt. Hinzugefügt wurden 5 nur in Software vorhandene Systeme mit weiteren internen Signalen.

Diese Systeme sollten dann durch Funktionsbausteine repräsentiert werden. Hierdurch ergab sich implizit ein dezentrales Gesamtsystem aus irgendwie verkoppelten Funktionsbausteinen. Es wurde schnell erkannt, daß dieser Entwurf:

- unübersichtlich,
- schwer zu warten, und
- schwer zu erweitern

sein würde. Aus diesem Grund wurde dieser erste Entwurf auch nicht softwaremäßig realisiert. Allerdings erwies sich die geleistete Vorarbeit dennoch als nützlich, als Grundlage zur Realisierung der Ablaufsteuerung als (Mealy-)Zustandsautomat.

Es wurden 8 Hauptzustände identifiziert:

- 2 Zustände: Einschalten, Hochfahren des Geräts und Selbsttest,
- 4 Zustände: Grundbereitschaft, Pulsbereitschaft,
Pulsbereitschaft herstellen und wegnehmen,
- 1 Zustand: (nicht-quittierbare) Störung,
- 1 Zustand: (temporäre, d.h. quittierbare) Blockierung.

5. Realisierung

5.1 Realisierung der Hardware

Folgende Hardware wurde zur Realisierung der Steuerung ausgewählt:

Ein Dual-CPU-System, bestehend aus

- 1 CPU 315-2 DP,
- 1 FM 352-5 Baugruppe als schnelle Bool'sche CPU,
- 8 digitalen und analogen I/O-Baugruppen,
- 1 CP-342 FO Kommunikationsprozessor zur Ansteuerung durch eine S7/400 der ECRH,

aufgeteilt auf 2 Profilschienen, verbunden mit IM-36x Baugruppen, Koppelrelais und Trennverstärker.

5.2 Realisierung der Software

5.2.1 SPS

Das Programm der CPU 315-2 DP ist vollständig in AWL ausgeführt. Der Umfang beträgt etwa 1400 Zeilen aus reinem Funktionscode.

Aus dem Zustandsdiagramm abgeleitet wurde die Verarbeitung jedes Zustands durch einen zugeordneten FB. Ausgabesignale, deren Wert nur vom jeweiligen Zustand abhängen, werden direkt zu Beginn des Zustands-FBs gesetzt.

FB1 ruft den passenden Zustands-FB auf und entscheidet an Hand der Rückgabewerte, ob ein Wechsel in einen anderen Zustand erfolgen soll. Wird ein Zustand-FB nach einem solchen Wechsel das erste Mal aufgerufen, erfolgt ein interner Reset, so daß vorhandene Ablaufsteuerungen — also Unterzustände

— von Beginn an durchlaufen werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht, das Hochfahren des Bodymodulators im Zustand 1 zusammenzufassen.

Andere Verarbeitungsschritte wie z.B. die Schützüberwachung, die Kommunikation mit dem Experiment und der Datenaustausch mit der schnellen SPS erfolgen unabhängig vom aktuellen Zustand und werden in jedem Zyklus aufgerufen. Im Fehlerfall wird jeder sonstige Zustand oder Zustandsübergang überschrieben und in den Zustand 6: Störung gewechselt.

Durch Einsatz von getesteten Unterroutinen konnte der Programmieraufwand deutlich reduziert werden. Allein der "Building-Block" zur Schützüberwachung wurde 17-mal verwendet.

Im Falle der analogen Signale werden floating-point REAL Werte als „natürliche“ Datentypen verwendet. Der REAL Datentyp wird zwar vergleichsweise langsam verarbeitet, läßt aber eine direkte Interpretation, zunächst als Spannung und Strom, und dann auch als eigentliche Meßgröße wie Druck, Temperatur und Durchfluß zu. Auch hier erfolgt eine Überwachung des Betriebszustands.

In einem Fall konnte ein Hardwareproblem durch Software kompensiert werden: Die Messung des Ausgangsstroms unterliegt einer Temperaturdrift. Wird eine obere Schwelle für den Ausgangsstrom überschritten, so spricht ein analoger Komparator an und schaltet über die High-Speed-SPS die Hochspannung ab. Um die Schwelle trotz Drift definieren zu können, wird eine 3-Sekunden-Pause zwischen Pulsanforderung und Hochspannung Ein zur Kompensation genutzt.

5.2.2 High-Speed-SPS

Das Programm der High-Speed-SPS besteht aus 16 Netzwerken in KOP. Diese sind in einem Anwendungs-FB abgelegt. Die High-Speed-SPS bietet zwei Arten der Ausführung an, den Normal-Modus und den Debug-Modus.

Im Debug-Modus wird der Anwendungs-FB auf der SPS ausgeführt, die High-Speed-SPS dient dann lediglich als I/O-Baugruppe. In dieser Betriebsart kann die Funktion getestet werden, das Timing aus Geschwindigkeitsgründen nicht. Zur Ausführung des Anwendungs-FB im Normal-Modus wird dieser kompiliert und in den FPGA der High-Speed-SPS geladen.

Der Hersteller stellt zwei Funktionsbausteine zur Verfügung, welche jeweils den Debug- oder Normalmodus der High-Speed-SPS steuern. Diese beiden FBs besitzen unterschiedliche Schnittstellen und wurden deshalb in einen eigenen Aufruf-FB gekapselt, der dem aufrufenden Programm eine einheitliche und auf das notwendigste reduzierte Schnittstelle anbietet.

Sobald der Hochspannungspuls läuft, verknüpft die High-Speed-SPS die Anforderung mit den von der Standard-SPS übermittelten Freigaben über logische Netzwerke, und gibt so ihrerseits die Freigabe an die Gittertreiber und Regelelektronik, mit minimaler Verzögerung.

Tritt ein Überstrom auf, so wird zunächst nach einer Zeit, welche in Millisekundschnitten frei wählbar ist, erneut überprüft, ob der Überstrom immer noch vorliegt. In diesem Fall schaltet die High-Speed-SPS die Gittertreiber der Leistungstetroden ab. Nach einer Verzögerung wird mit einer ebenfalls frei wählbaren Anzahl ($N = 0..99$) versucht, die Gittertreiber wieder einzuschalten. Wird die Maximalanzahl überschritten, dann blockiert die High-Speed-SPS den Puls und meldet einen Fehler an das Experiment.

Ebenso wird der Puls sofort unterbrochen, wenn die Kathoden-Energieversorgung für das Gyrotron ausfällt. Das Gyrotron kann beschädigt werden, falls unter dieser Bedingung immer noch Spannung an der Body-Elektrode anliegt.

6. Aufwand

6.1 Vorbereitungsphase

Die Vorbereitungsphase umfaßte 3 Mannmonate und beinhaltete die Aufnahme aller Signale, die Eingabe- und Ausgabeanalyse, die Planung der externen Verdrahtung der SPS, parallel dazu bereits der Aufbau, die Verarbeitungsanalyse, und den endgültigen Entwurf des Zustandsautomaten.

6.2 Implementierungsphase

Die Implementierungsphase umfaßte 3 Mannmonate und beinhaltete die manuelle Ansteuerung in der ersten Inbetriebnahmephase des Bodymodulators, die Realisierung der Ablaufsteuerung und noch unbedingt notwendige Programm-erweiterungen auf Grund von zusätzlichen Benutzeranforderungen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Es ist gelungen auf Basis einer Simatic-CPU in Kombination mit einer High-Speed-SPS eine schnelle und komplexe speicherprogrammierbare Steuerung aufzubauen, die in der Lage ist, sowohl auf Signale im Mikrosekundenbereich zu reagieren, als auch Prozesse im Millisekundenbereich zu überwachen und zu steuern.

Der erste Modulator ist seit 6 Monaten im zuverlässigen Betrieb am Experiment. Auch in einer Umgebung mit starken elektromagnetischen Störungen arbeitet das Gerät einwandfrei.

Derzeit ist eine Visualisierung im Aufbau, die ausschließlich zur Beobachtung dient. Zur Zeit wird die Anwendbarkeit eines OPC Servers geprüft. Insbesondere sollen der Betriebszustand von insgesamt 4 Bodymodulatoren und im Fehlerfall die Fehlerauslöser erkennbar sein. Die Darstellung erfolgt dann über HTML in einem Browser. Aufgetretene Fehler werden in einem Vektor vermerkt, die bisher nur über ein PG zugreifbar sind.

Darüber hinaus ist die Nachrüstung eines Crowbars zum Schutz der Leistungstetroden vorgesehen. Dieser wird von der High-Speed-SPS angesteuert und ist ebenso in Planung. Die nächste Revision wird weitere Benutzerwünsche berücksichtigen. Zur Inbetriebnahme für Testzwecke dient ein eingebauter IPC mit darauf installierter Step7 Software.

Das gesamte Projekt soll in Anlehnung an das V-Modell XT umgesetzt werden.

Diagramme

SPS/IPC/Drives

Nürnberg, 29. November 2006

Boolean High-Speed-SPS überwacht und steuert das Fusionsplasma am MPI für Plasmaphysik in Garching

Dipl.-Ing. Thomas Franke, IPP Garching, Abteilung ZE

Dipl.-Ing. (FH) Michael Kircher, IPP Garching, Abteilung ZE

Herzlich willkommen bei der Fusionsforschung!

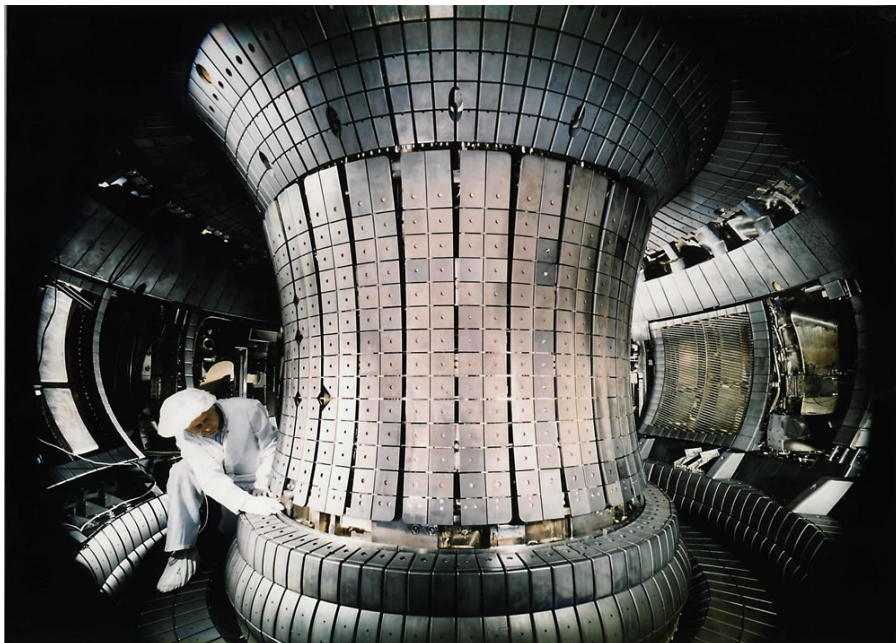
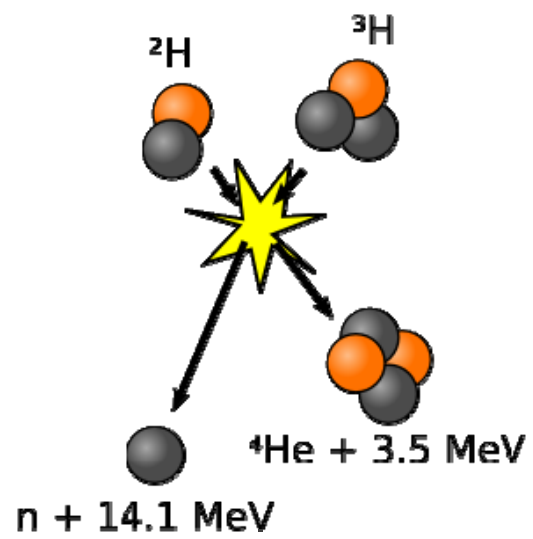


Foto: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

- Kernfusion: Energie für das 21. Jahrhundert
- Reaktion: $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17,6 \text{ MeV}$
- notwendige Plasmatemperatur: 100 Millionen °C
- Einschluß im magnetischen Käfig
- Plasmaheizung: Strom, Neutralteilchen, Hochfrequenz
- Hochfrequenzerzeugung mit Gyrotron (1 MW, 140 GHz)

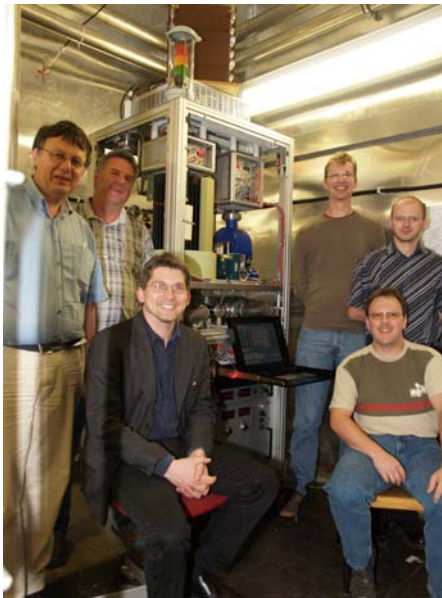
Schema der Fusionsreaktion



Quelle: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:D-t-fusion.png>

- Leistungsregelung des Gyrotrons erfolgt durch einen Bodymodulator (push-pull Verstärker, 35 kV, 12 kW).
- Bodymodulator: Steuerung arbeitet in zwei Zeitregimen:
 - Signale mit Reaktionszeiten von 10 bis 100 ms:
→ bearbeitet durch S7/300 CPU,
 - Signale mit Reaktionszeiten kleiner als 10 μ s:
→ bearbeitet durch High-Speed-SPS.
- Insgesamt 117 Signale (ohne Profibus und OPC-Daten)

Arbeitsgruppe und Gesamtansicht Bodymodulator



v.l.n.r.: René Blokker, Heinrich Schaub, Thomas Franke, Michael Kircher, Rudolf Mühlmann, Gottfried Lexa. Quelle: Öffentlichkeitsarbeit IPP

- Realisierung der Hardware:
 - 1 CPU 315-2 DP,
 - 1 FM 352-5 (High-Speed-SPS),
 - 8 digitale und analoge I/O-Baugruppen,
 - 1 CP-342 FO (Kommunikation mit Experiment).
- 2 Profilschienen, verbunden über IM-36x Baugruppen, Koppelrelais, analoge Trennverstärker.
- Visualisierung auf IPC (19" Breite, 3 HE, mit Monitor- und Tastaturschublade) über OPC-Server und HTML.

Innenansicht SPS-Raum



Quelle: Zentrale Elektronik, IPP 2006

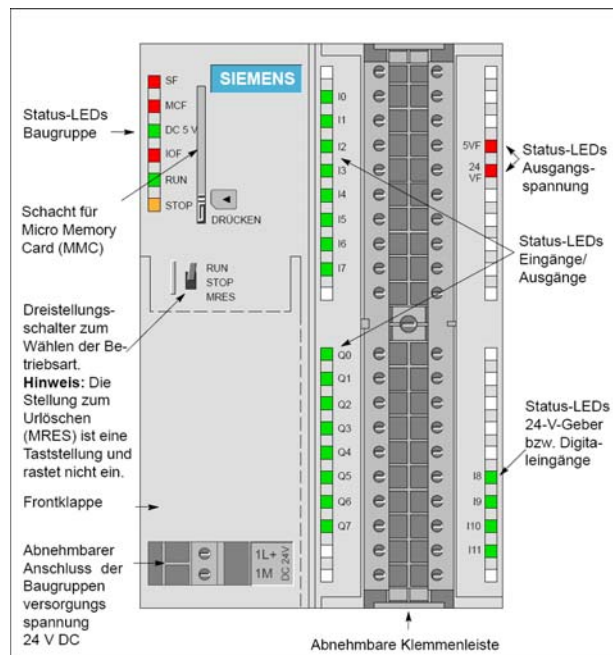
Visualisierung über OPC im Internet-Browser

The screenshot shows a web browser window titled "Pulse Parameter Settings - Microsoft Internet Explorer". The address bar shows "H:\work\Simatic 57-300\Bodymodu". The main content area is a form with a table-like structure for parameters. Each parameter has a "Value" column with an input field, a "Unit" column, and a "Range" column. There are also "enable/disable" buttons for each section. At the bottom, there is a "Confirm changes" button with a hand icon.

| Parameter | Value | Unit | Range |
|--|---|------|----------------------------|
| Test Operation | <input type="checkbox"/> enable <input type="checkbox"/> disable | | |
| Test Operation must be enabled for all the following settings to have an effect! | | | |
| Pulse Voltage | <input type="text" value="35"/> | kV | 0 .. 35 kV in 0.1 kV steps |
| ----- | | | |
| Pulse Generator | <input type="checkbox"/> enable <input type="checkbox"/> disable | | |
| Pulse Generator must be enabled for all the following settings to have an effect! | | | |
| Pulse Delay | <input type="text" value="3000"/> | ms | 2100 .. 3000 ms |
| Pulse Length | <input type="text" value="5"/> | ms | 0 .. 10000 ms |
| ----- | | | |
| Pulse Modulation | <input type="checkbox"/> enable <input type="checkbox"/> disable | | |
| Pulse Modulation must be enabled for all the following settings to have an effect! | | | |
| Pulse Modulation Period | <input type="text" value="1"/> | ms | 1 .. 255 ms |
| Pulse Duty Cycle | <input type="text" value="50"/> | % | 0 .. 100 % |
| ----- | | | |
| Confirm changes | | | |

- Technische Daten der High-Speed-SPS:
 - Zykluszeit: 1 μ s, harte Echtzeit,
 - Zyklus ist intern in 12 Schritte aufgeteilt:
 - 11 Schritte: logische Netzwerke, Speicherglieder,
 - 1 Schritt: Update Prozeßabbild, I/O.
 - Netzwerke werden auf FPGA parallel ausgeführt,
 - programmierbar in KOP und FUP,
 - Schnittstelle zur S7/300 über Datenbaustein.

Frontansicht High-Speed-SPS



Quelle: Benutzerhandbuch zur FM352-5 Baugruppe, S.1-4, Siemens AG

- Aufgaben der S7/300-CPU:
 - Herstellung Grund- und Pulsbereitschaft,
 - Überwachung Betriebszustand,
 - Kommunikation mit Experiment (über Profibus).

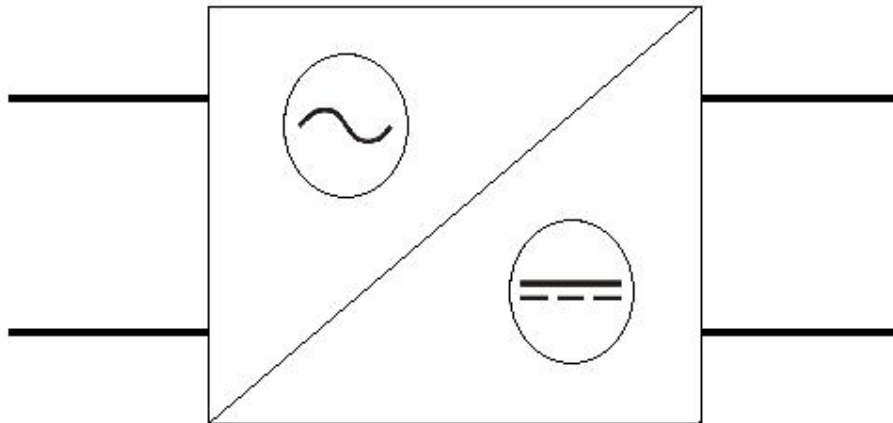
- Aufgaben der High-Speed-SPS:
 - Pulssteuerung,
 - Schnellabschaltung im Fehlerfall.

- Programmentwurf:
 - nach EVA-Prinzip,
 - Festlegung aller Signale, Gruppierung in Systeme,
 - Verarbeitungsanalyse.

- Zwei Alternativen:
 - dezentraler Programmentwurf,
 - Zustandsautomat.

EVA-Prinzip

Eingabe **Verarbeitung** **Ausgabe**

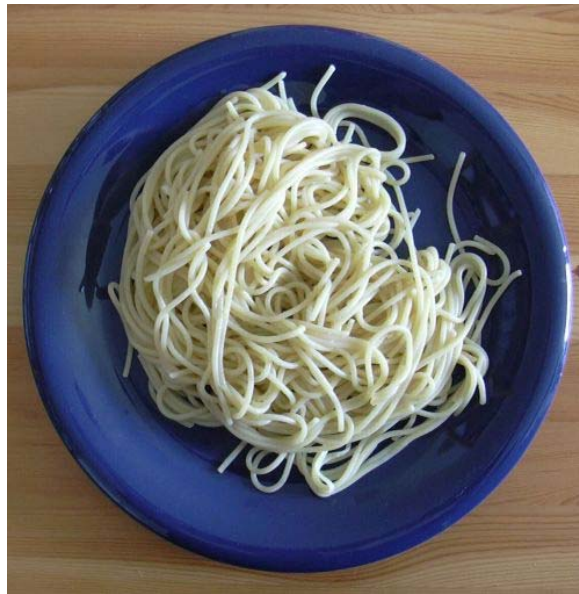


Quelle: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/d/da/Eva_prinzip_netzteil.jpg

- dezentraler Programmentwurf (nicht realisiert):
 - unübersichtlich,
 - schwer zu warten, und
 - schwer zu erweitern.

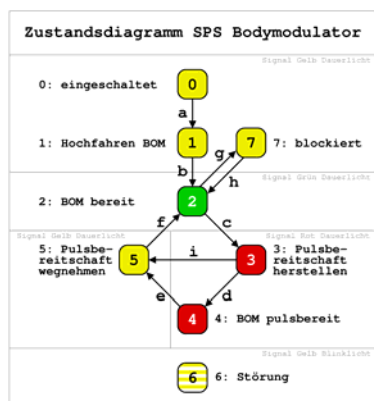
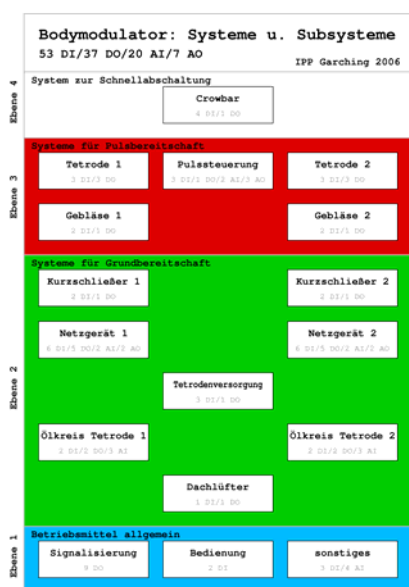
- Zustandsautomat:
 - direkte Abbildung von Grund- und Pulsbereitschaft,
 - Einschalten, Hochfahren, Selbsttest,
 - Fehlerbehandlung.

Erwartetes Ergebnis des dezentralen Programmieransatzes



Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Spaghetti.jpg>

Systeme im Bodymodulator und Zustandsdiagramm der SPS



IPP Garching 2006

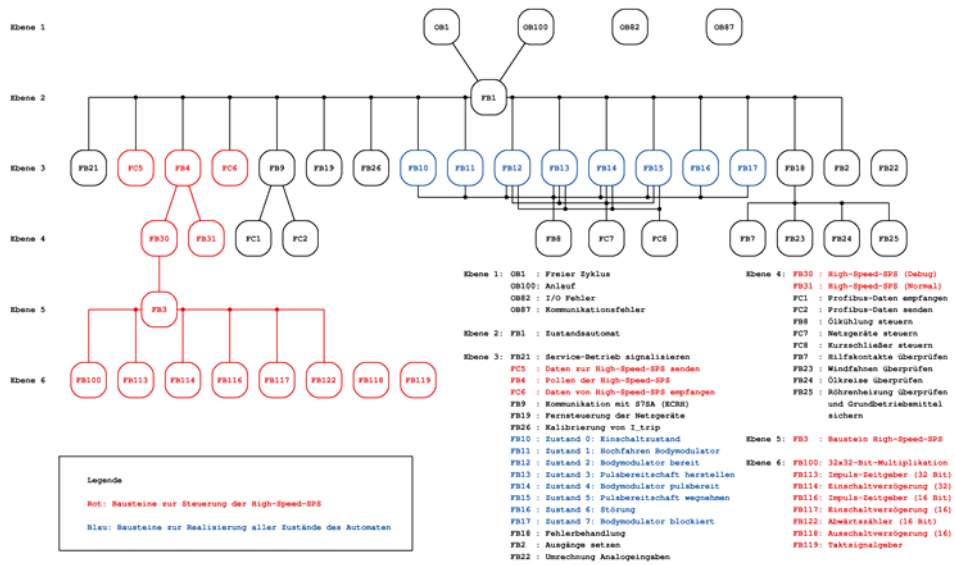
Bedingungen:
a: grundsätzliche Betriebsmittel vorhanden
b: Bodymodulator ist hochgefahren
c: Anforderung Puls (Signal SK ECRH → 1)
d: Pulsbereitschaft hergestellt
e: Puls zuende (oder maximale Dauer überschritten)
f: Pulsbereitschaft weggenommen
g: Verriegelung offen
h: Verriegelung zu und quittiert
i: Pulsabbruch (SK ECRH → 0 vor HV Puls)

Quelle: Zentrale Elektronik, IPP 2006

- Realisierung der Software:
 - S7/300 CPU:
 - ca. 1400 Zeilen AWL,
 - High-Speed-SPS:
 - 16 Netzwerke in KOP, in einem Anwendungs-FB.

- Betriebsarten der High-Speed-SPS: Debug/Normal
 - Aufruf-FB in Eigenentwicklung zur vereinfachten Ansteuerung

Übersichtsplan Funktionsbausteine SPS Bodymodulator



IPP Garching 2006

Quelle: Zentrale Elektronik, IPP 2006

- Zeitbedarf:
 - Vorbereitungsphase (3 Mannmonate):
 - vollständige Systemanalyse,
 - hardwareseitiger Aufbau.

 - Implementierungsphase (3 Mannmonate):
 - Erster Prototyp, manuelle Ansteuerung,
 - Realisierung der Ablaufsteuerung,
 - Programmerweiterungen nach Benutzerwunsch.

- Zusammenfassung und Ausblick:
 - High-Speed-SPS als Ergänzung zur S7/300 CPU,
 - Erster Modulator seit 6 Monaten zuverlässig im Betrieb, drei weitere Geräte in der Fertigung,
 - Ausbau der Visualisierung für alle Bodymodulatoren, Umsetzung in Anlehnung an V-Modell XT,
 - Nachrüstung eines solid-state Crowbars,
 - Amplitudenmodulation von 5 kHz auf 30 kHz.

SPS/IPC/Drives

Nürnberg, 29. November 2006

**Vielen Dank
für Ihr Interesse!**

Thomas Franke, Michael Kircher