Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 88 (1997)

Heft: 9

Artikel: Komplexe Technik schont die Umwelt : das Steuersystem von Hybrid III

Autor: Trutmann, Hans Otto

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902193

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Das Hybridfahrzeug-Projekt Hybrid III der ETH Zürich will den Wirkungsgrad von Motorfahrzeugen mittels einer optimalen Kombination von Benzinmotor, Elektromotor, Schwungradspeicher und moderner Elektronik verbessern. Der vorliegende Beitrag gibt einen kurzen Überblick über das Gesamtprojekt und befasst sich dann hauptsächlich mit dem sehr anspruchsvollen Steuerungsteil. Auf besonderes Interesse dürften die systemtechnischen Ausführungen stossen, die zeigen, wie die Komplexität eines dezentralen, verteilten Steuersystems dank einem modernen Software-Entwicklungswerkzeug (CIP) bewältigt werden kann.

Komplexe Technik schont die Umwelt

Das Steuersystem von Hybrid III

■ Hans Otto Trutmann

Das Fahrzeugprojekt Hybrid III

Die zunehmende Luftverschmutzung hat seit längerem die Forderung nach einem umweltfreundlichen Privatfahrzeug aufkommen lassen. Die ETH Zürich hat schon mit einigen Hybridfahrzeug-Projekten wichtige Forschungsbeiträge geleistet. Dieser Beitrag befasst sich mit Hybrid III, welches von verschiedenen Partnern (s. Kasten) Anfang der neunziger Jahre in Angriff genommen wurde und diesen Sommer mit dem Einbau in ein Fahrzeug seinen Abschluss findet. Dabei war nicht so sehr beabsichtigt, eine gänzlich neue Art von Fahrzeug zu entwickeln, als vielmehr mit heute vorhandenen Technologien eine optimale Energieausbeute und Schadstoffarmut anzustreben. Das Hauptaugenmerk wurde deshalb auf das Antriebssystem gelegt, welches von verschiedenen ETH-Instituten gemeinsam entwickelt und in ein kommerziell erhältliches Fahrzeug eingebaut werden sollte. Das im Projekt untersuchte Antriebskonzept lässt sich grob durch folgende Hauptmerkmale beschreiben:

- Während Motoren in konventioneller Verwendung kontinuierlich und innerhalb von unerwünscht grossen Drehzahl- und Leistungsbereichen arbeiten, wird der Verbrennungsmotor von Hybrid III intermittierend, dafür nahe beim optimalen Arbeitspunkt betrieben.
- Mittels Schwungrad wird die Bremsenergie rekuperiert.
- Die Abgasreinigung ist auf dem neusten Stand der Technik, und ein sorgfältiger Wärmehaushalt vermindert schädliche Umwelteinflüsse.
- Über Kurzstrecken, beispielsweise im innerstädtischen Verkehr, kann abgasfrei elektrisch gefahren werden.

Komponenten

Fahrzeuge mit mehr als einer Art der Energiespeicherung und -umwandlung nennt man Hybriden. Hybrid III ist der am weitesten entwickelte Prototyp einer Reihe von ETH-Hybriden (Bild 1). Er verfügt über einen Ottomotor, eine Elektromaschine und einen Schwungradspeicher und weist in zwei zentralen Bereichen wesentliche Verbesserungen gegenüber seinen Vorgängern auf. Der Wirkungsgrad der Energieumwandlung im tiefen Teillastbereich, der im Agglomerationsverkehr dominiert, wurde verbessert und die Nutzung der vorhandenen

Adresse des Autors
Hans Otto Trutmann, Institut für Technische Informatik und Kommunikationsnetze, TIK
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
ETH, 8092 Zürich
Email: trutmann@tik.ee.ethz.ch

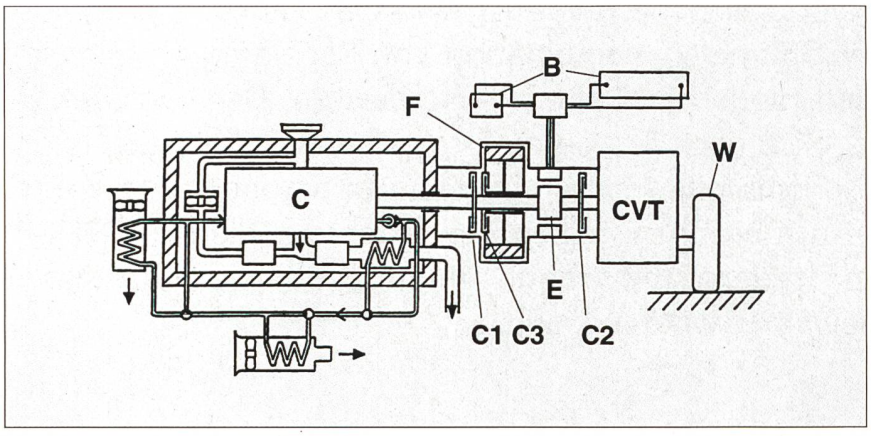


Bild 1 Hybrid-III-Antriebssystem

Energie optimiert; beim Bremsen kann Energie sowohl mechanisch wie elektrisch zurückgewonnen werden.

Über ein neuartiges stufenloses Getriebe übernimmt das Schwungrad im Stadtverkehr die Funktion der Antriebsquelle. Da der normale Verstellbereich von 1:5 zweimal durchfahren wird, steht eine viel grössere Spreizung als sonst zur Verfügung (1:20,5). Diese grosse Spreizung übersetzt auch hohe Schwungraddrehzahlen auf niedrige Fahrgeschwindigkeiten und kann umgekehrt ein schnelles Fahrzeug auch dann mit dem Schwungrad verbinden, wenn jenes nur langsam rotiert.

Muss das Schwungrad aufgeladen werden, wird der Ottomotor ans Schwungrad angekoppelt. Er arbeitet im Taktbetrieb, das heisst, er beschleunigt das Schwungrad mit voller Leistung auf die gewünschte Drehzahl und wird danach sofort abgestellt. Betriebspunkte mit schlechtem Wirkungsgrad werden dadurch eliminiert, und bei Fahrten über Land mit hohen Geschwindigkeiten ohne Schwungrad sorgt die gewählte Übersetzung für hohe Lasten und somit für auch in dieser Betriebsart besten Verbrauch.

Mit dem zusätzlichen Elektromotor kann im Stadtverkehr bis rund 60 km/h auch rein elektrisch und damit abgasfrei gefahren werden. Das Schwungrad deckt dabei jene Leistungsspitzen ab, welche die elektrische Nennleistung überschreiten.

Resultate

Messergebnisse bestätigen die Erwartungen: in allen auf dem Prüfstand gefahrenen Messzyklen wurden trotz des Mehrgewichts von über 300 kg Einsparungen von bis zu 40% erzielt. Im typischen ECE-R15-Zyklus beträgt der Verbrauch von Hybrid III 4,7 l/100 km gegenüber 8,9 l des konventionellen Fahrzeugs.

Steuersystem

Nach dieser summarischen Einführung in das Gesamtprojekt wird in den folgenden Kapiteln das Steuersystem von Hybrid III eingehend beschrieben, für welches das Institut für Technische Informatik und Kommunikationsnetze der ETH Zürich die Verantwortung übernommen hatte. Der damit zusammenhängende Arbeitsumfang umfasste nebst der Entwicklung der eigentlichen Steuerung und von Teilen der Software auch die Bereitstellung einer geeigneten Entwicklungsumgebung und die Begleitung des Projekts von den Anfängen bis zum Betrieb. Das Steuersystem musste sehr flexibel konzipiert werden; die Anzahl der Ein- und Ausgabesignale, deren zeitliche Anforderungen, die benötigte Rechenleistung waren bei Projektbeginn allesamt unbekannt. Dazu kam, dass während der Entwicklung jede Antriebskomponente sowohl alleine wie auch in verschiedenen Kombinationen mit anderen – am Schluss dann als Gesamtsystem – betrieben wurde.

Von der Arbeitsumgebung wurde vor allem gefordert, dass sie die an der Entwicklung der Antriebskomponenten beteiligten Spezialisten von Programmieraufgaben entlastet. Als Nebeneffekt sollten moderne Werkzeuge und neue Erkenntnisse im Bereich von industriellen Informatikanwendungen Eingang in die am Projekt beteiligten Institute finden. Eine wichtige Voraussetzung war deshalb eine einheitliche Arbeitsumgebung mit identischen, vernetzten Arbeitsplatzrechnern, die einerseits als selbständige Entwicklungsplätze für Elemente der Gesamtsteuerung ausgerüstet sind und über welche andererseits auch alle zentralen Dienste und die Projektdaten koordiniert werden können.

Das Antriebssystem besteht aus fünf Hauptkomponenten, und dementsprechend ist auch die Steuerung aus einzelnen, lose kooperierenden Blöcken zusammengesetzt. Diese sogenannten Cluster brechen das Ganze in Teilsysteme auf, die ihrerseits lokal eingrenzbare Abläufe selbsttätig ausführen können. Konstruktiv zusammengehörige Gruppen sind auch in der Steuerung vereint, wodurch die getrennte Entwicklung und separate Tests einzelner Baugruppen innerhalb der endgültigen Struktur erst möglich werden. Cluster ermöglichen damit auch, das System hierarchisch zu zerteilen (Bild 2).

Ein zusätzlich eingefügter Cluster mit höheren Steuerfunktionen überwacht und koordiniert die einzelnen Teilsysteme. Die Ein- und Ausgaben erfolgen über dezentrale, für den Einsatz im Fahrzeug miniaturisierte Anschlusseinheiten (und einen weiteren Cluster, der mit diesen Aufgaben betraut ist). Diese Struktur bildet die Basis für die Arbeit der einzelnen Ingenieurgruppen, die nun damit ihren Teil des Antriebssystems steuern können.

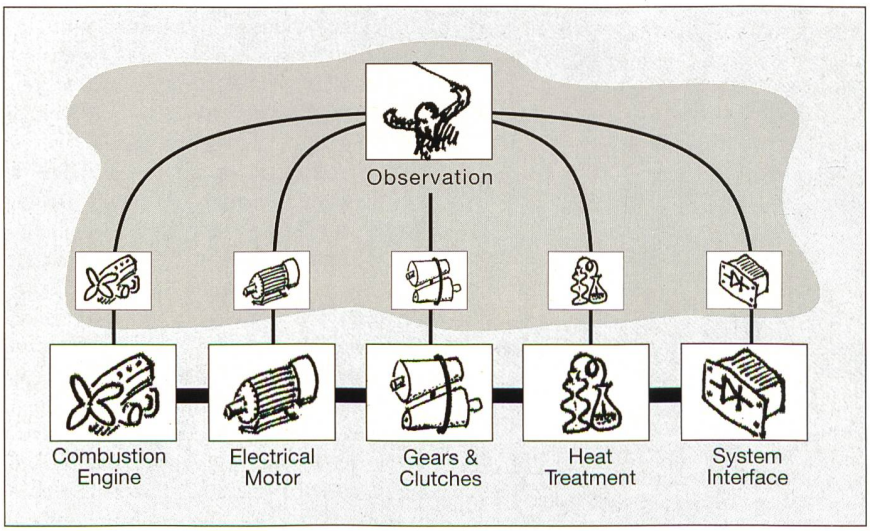


Bild 2 Logische Struktur des Steuersystems

Die Cluster von Hybrid III heissen:

O Observation
C Combustion
E Electrical
M Mechanical
H Heat Treatment
S System Interface
IO Input/Output

Konzepte

Die oben skizzierte Aufteilung in einzelne Cluster und deren Verbindungen untereinander können in der Implementation nicht direkt übernommen werden; die verwendeten Prozessorknoten haben zu wenige Verbindungen, um eine Sternstruktur mit so vielen Partnern aufzubauen. In der Implementation gewährleisten zwei gegenläufige Ringe, dass alle Partner auf zwei Arten erreichbar sind. In diesen Ring einbezogen ist auch der Cluster-**IO**, der zudem über einen Broadcast-Mechanismus allen anderen Clustern die Eingabedaten gleichzeitig übermitteln kann.

Die grosse Anzahl von Sensoren und Aktoren (ca. 150 Sensoren und 80 Aktoren, auf den Prüfständen sogar noch mehr) erfordern eine gute Lösung für die Datenerfassung und -ausgabe. Auf der Hardwareseite kommt ein auf dem eigentlichen Peripheriebus aufsetzender Mezzaninbus, zusammen mit dezentralen, eigens entwickelten Anschlusseinheiten (Satelliten) zum Einsatz. Dazu gehören auf der Softwareseite massgeschneiderte Algorithmen, die gemäss einer Spezifikation für die jeweilige Installation generiert werden (Bild 3).

Alle globalen Funktionen (Betriebsarten, Fehlerbehandlung usw.) werden vom übergeordneten SystemMaster im Cluster Observation **O** erledigt, der SystemMaster kontrolliert damit alle langsamen systemübergreifenden Vorgänge. Die lokalen Funktionen all jener Cluster, die mit einer Maschineneinheit verknüpft sind (**C, E, M, H, S**), werden von einem lokalen SubMaster gesteuert; die meisten schnellen Vorgänge im System bleiben so lokal.

Die Detailausführung der Fahrstrategien (Kupplungsbetätigung, Getriebebetätigung und -umschaltung usw.) ist sehr stark auf den Cluster Mechanical **M** konzentriert und wird in dessen StrategyMaster angesiedelt, der damit diejenigen schnellen Vorgänge beherrscht, die unter Umständen auch systemübergreifend sein können.

Manchmal bestehen Widersprüche zwischen der funktionalen Zugehörigkeit und den konstruktiven Gegebenheiten. Da die Konstruktion die Randbedingungen auch für das Steuersystem vorgibt, sind alle Elemente denjenigen Clustern zugeordnet, zu denen sie konstruktiv gehören. Ein Remote-Service-Mechanismus macht solche in funktionaler Hinsicht falsch plazierte Elemente den Clustern zugänglich, zu denen sie von der Funktion her gehören.

Cluster verfügen bei Bedarf über zusätzliche lokale Ressourcen (Rechenkapazität, Speicher usw.). Solange es erforderlich ist, kann ein Entwicklungssystem am Cluster **O** angeschlossen werden.

Prozessoren

Als Prozessoren arbeiten in der Steuerung Transputer [1], Risk-Prozessoren, die alle für ein Mehrprozessorsystem nötigen Fähigkeiten besitzen. Die in einem solchen System übliche klare Gliederung einer komplexen Aufgabe in einzelne Prozesse ist auf unsere Systemanforderungen ideal zugeschnitten; jeder Aufgabenblock wird von einer Gruppe von Prozessen auf einem unabhängigen Rechner gesteuert, der über Kanäle mit seinen Partnern kommuniziert. Die dazu nötige Kommunikation (Synchronisation, Datenaustausch) geschieht über je vier Links, durch die mehrere Transputer zu einem fast beliebigen Netzwerk zusammengeschaltet werden können. Kommunikation und Arbeitsteilung werden von der Hardware unterstützt, so dass mit der Programmierung direkt, das heisst ohne Betriebssystem, auf die Rechner aufgesetzt werden kann.

Transputer vom Typ T805 erreichen bei einer Taktfrequenz von 30 MHz etwa 15 MIPS. Die Rechenleistung der integrierten FPU beträgt 2 MFlops und die Kommunikationsgeschwindigkeit der Verbindungen zwischen den Transputern 20 MBit/s.

Die Cluster können bei Bedarf jederzeit weitere Rechenleistung erhalten, indem ihnen ein oder mehrere lokale Rechenknechte beigefügt werden.

Kommunikation

Die Strukturpfade im Gesamtsystem gehen sternförmig vom Cluster **O** aus. Diese Strukturpfade sind gleichzeitig Kommunikationspfade und garantieren, dass Implementationen von Teilsystemen alle ihre Schnittstellen vorfinden; alle Prüfstände fallen in diese Kategorie. Verschiedene Protokolle für Punkt-zu-Punkt- und Broadcast-Verbindungen sind global vereinbart und decken die vorkommenden Fälle ab.

Auf der ganz anders aussehenden Hardware-Topologie wird diese hierarchische Cluster-Struktur mit Hilfe eines Rings implementiert: ein spezieller Prozess (Communicator) besorgt auf jedem der verarbeitenden Cluster den Ring-Datenverkehr von und zu diesem Element. Für andere Adressaten bestimmte Meldungen leitet er weiter. Der Ringmechanismus dient jeglichem Meldungsaustausch im System inklusive der Datenausgabe.

Ein- und Ausgabe

Ein- und Ausgabesignale sind nicht global; sie gehören demjenigen Cluster, auf dessen Maschineneinheit sich der betreffende Sensor beziehungsweise Aktor befindet. Auch hier besteht jedoch ein Strukturkonflikt mit der Implementation, diesmal mit den Gegebenheiten von Ein- und Ausgabeschnittstellen. Eine typische Schnittstellenkarte ist mehrkanalig, mit 4 bis 32 Kanälen eines bestimmten Signaltyps. Da die Cluster eine beliebige Anzahl solcher Kanäle beanspruchen, sind den Clustern nicht ganze Karten zugeordnet, sondern bloss einzelne Kanäle. Dies verbessert die Auslastung der eingesetzten Hardware erheblich. Erschwerend kommt dazu, dass für die Eingabe drei verschiedene Geschwindigkeitsklassen definiert werden (z. B. 1 kHz, 100 Hz, 10 Hz), die gleichzeitig aktiv sind.

Damit die Rechenlast im Cluster-**IO** und damit verbunden im ganzen System

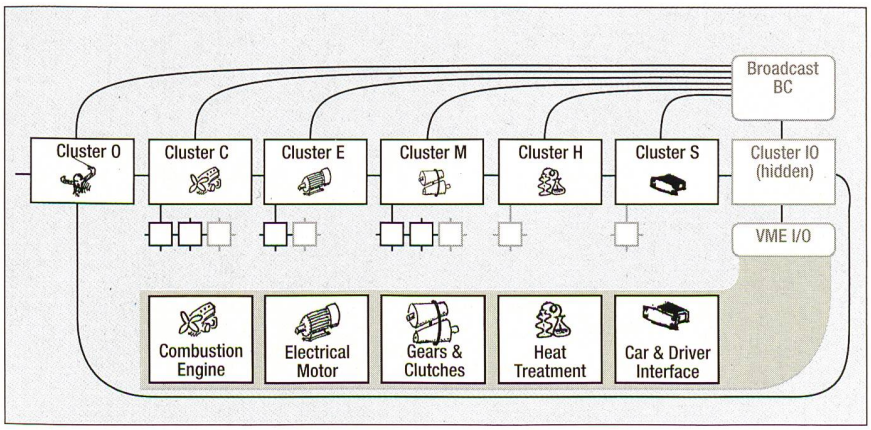


Bild 3 Implementationsstruktur des Steuersystems

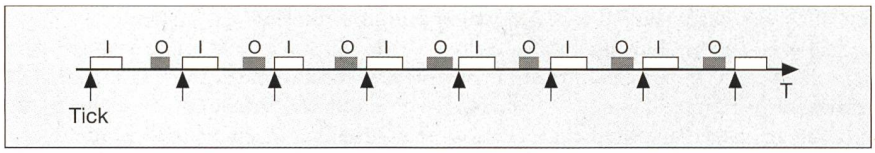


Bild 4 Zyklischer Ablauf von Ein- und Ausgabe

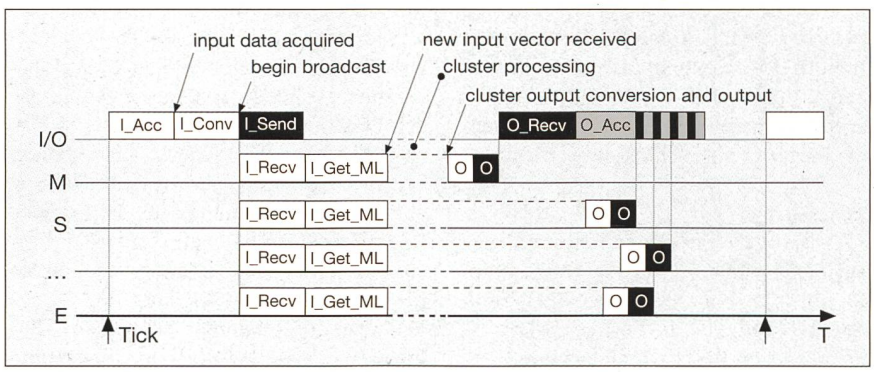


Bild 5 Synchroner Input und asynchroner Output

möglichst ausgeglichen ist, werden die Signalgruppen der niederen Klassen jeweils abwechselnd zusammen mit jenen der höchsten Geschwindigkeitsklasse eingelesen. Die grosse Anzahl Signale und die verschiedenen, auch häufig wechselnden Installationen verunmöglichen hier Software-Handarbeit vollends, so dass der notwendige Programmcode aus einer Spezifikationsliste erzeugt wird.

Die Ein- und Ausgabe von Prozessdaten ist standardisiert. Eingaben werden in fixen Intervallen (synchron) vorgenommen, Ausgaben, sobald ein Cluster einen neuen Ausgabewert abgesetzt hat (asynchron). Obwohl asynchron, müssen die Ausgabewerte vor dem nächsten Tick des Eingabesystems berechnet und ausgegeben werden. Wird die Leistungsgrenze der Anordnung überschritten, ist das nicht mehr der Fall (Bilder 4 und 5).

Ein einzelner Zyklus beginnt auf den Clock mit der Erfassung, Verarbeitung und dem Weitersenden einer Gruppe von Eingabedaten. Alle Cluster erhalten eine identische Kopie der neu erfassten, konvertierten Daten simultan über den Broadcast-Mechanismus. Irgendwann später, nachdem die Cluster ihre Verarbeitung beendet und neue Werte errechnet haben, treffen die Ausgabedaten im Cluster-**IO** ein. Diese Daten sind bis auf Spezialfälle schon konvertiert und können deshalb sofort ausgegeben werden.

Bussystem

Die Verwendung des M-Modul-Mezzaninbus [2] für alle Ein- und Ausgaben öffnet den Zugang zu einer grossen Auswahl an käuflichen Ein- und Ausgabekomponenten. Als lokaler Erweiterungsbus baut er auf dem VME-Bus [3] auf und hat für Eigenkonstruktionen den Vorteil von kleinen Karten mit einfachen Schnittstellen. Der VME-Bus ist aber auch Grund zur Besorgnis. Als einziges Element lässt er sich nicht oder nur schwer erweitern und ist damit für die Kapazitätsgrenze des Gesamtsystems verantwortlich. Nötigenfalls sind Ergänzungen in zwei Richtungen möglich. Einerseits können – was für die Leistungselektronik von Anfang an vorgesehen war – lokal Signalprozessoren eingesetzt werden, andererseits lassen sich in Ausnahmefällen auch direkte Peripherieanschlüsse eines Clusters realisieren.

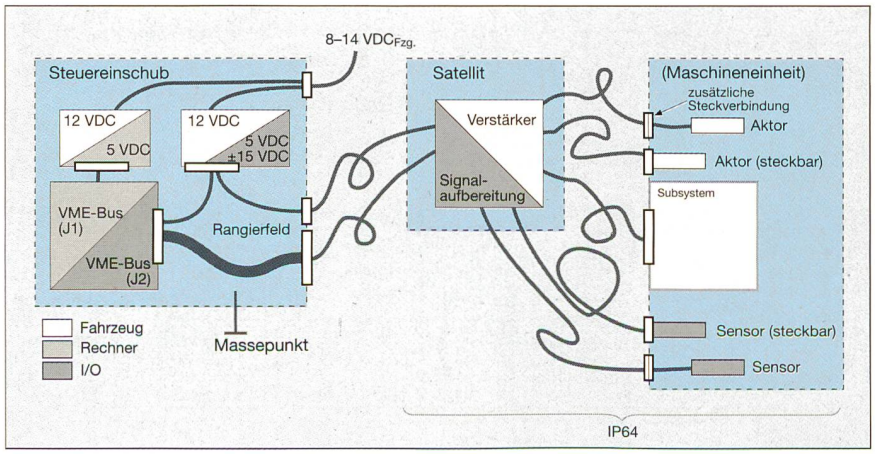


Bild 6 Verkabelungselemente und galvanische Trennung

Mechanische und elektrische Ausführung

Die Steuerung des fertigen Fahrzeugs soll klein sein, wenig Energie verbrauchen und den erschwerten Betriebsbedingungen in einem Fahrzeug gewachsen sein. Ein geschlossener, möglichst kleiner 19-Zoll-Einschub mit geregelten Lüftern und ausschliesslich steckbaren Verbindungen erfüllt diese Bedingungen. Eine ausreichende Schirmung ist durch die gewählte Anordnung bereits gegeben; sie wird durch ein rigides Speisungs- und Erdungskonzept auf die ganze Anlage ausgedehnt. Die Leistungsschalter des Steuersystems und einiger anderer gewichtiger Verbraucher sind Spezialausführungen mit besonders geringem Haltestrom.

Die Speisung des Steuersystems, welche auch die Erzeugung aller nötigen Spannungen aus dem 12-V-Fahrzeugnetz umfasst, ist auf der Steuereinheit untergebracht (Bild 6). Somit kann die Versorgung der peripheren Systeme zentral ein-/ausgeschaltet und das Funktionieren dieser Systeme während des Betriebes überprüft werden. Die gesamte Installation ist in drei galvanisch getrennte Bereiche aufgeteilt und weist einen einzigen zentralen Massepunkt auf. Damit die Steuereinheit beim Wechsel vom Labor ins Fahrzeug nicht angetastet werden muss, wird sie auch im Labor mit 12 VDC betrieben. Die zentralen Spannungswandler müssen den im Fahrzeugnetz nötigen weiten Eingangsspannungsbereich verkraften und arbeiten mit hohem Wirkungsgrad.

Verkabelung

Die Verbindungen zwischen der Steuereinheit und den einzelnen Maschinenteilen haben verschiedenen Randbedingungen zu genügen. Insbesondere werden wegen der schwierigen Umgebungsbedingungen nur geschirmte Signalkabel verwendet. Da die Komponenten an verschiedenen Orten entwickelt wurden, haben alle Maschineneinheiten ihre eigene Verkabelung mit festgelegten Steckverbindungen. Die verwendeten

Projektpartner

Die vielen und komplexen Komponenten wurden bei den folgenden ETH-Instituten und externen Institutionen entwickelt:

- Institut für Energietechnik/Laboratorium für Verbrennungsmotoren (Projektleitung, Gesamtkonzept, Taktbetrieb und Fahrstrategie)
- Institut für Elektrische Maschinen (Elektromaschine, Wechselrichter und Batteriemanagement)
- Institut für Mess- und Regeltechnik (Regelungen von Verbrennungsmotor und Antriebsstrang, Simulation)
- Institut für Technische Informatik und Kommunikationsnetze (Steuersystem, Entwicklungsumgebung und Informatikwerkzeuge)
- Laboratorium für Energiesysteme (Latentwärmespeicher und Wärmetauscher)
- Technisch-Chemisches Laboratorium (Katalysator und Modellbildung)
- TU München/Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebe (Getriebekonstruktion und Montage)
- Volkswagen AG (Unterstützung für Verbrennungsmotor, Getriebefertigung und Fahrzeugaufbau)
- Helbling Technik AG Zürich (Schwungrad- und Gehäusekonstruktion sowie Hydraulik)

Kabel sind lang genug, um eine flexible Positionierung der Steuereinheit zu ermöglichen. Während der Fahrversuche wird die Steuereinheit zusammen mit anderen Geräten im Fahrzeuginnern plaziert; später soll sie im Kofferraum Platz finden.

Codierung

Entwicklungsarbeit bringt mit sich, dass wiederholt unfertige Teile zusammengefügt, geändert und wieder getrennt werden müssen – ohne Unterstützung durch leistungsfähige Werkzeuge ein Alptraum bei komplexen Projekten. Leider gibt es noch keine vollständig integrierten Entwicklungswerkzeuge, so dass wir bei unserem Ansatz aus verschiedenen Quellen schöpfen mussten.

Das Ein- und Ausgabesystem, der Ringmechanismus, die Ablaufumgebung für den generierten Code müssen – gewissermassen als Systemsoftware das Fundament für alles andere – nahe an der Hardware und effizient programmiert sein; sie sind deshalb von Hand geschrieben. Regleralgorithmen werden am besten in einer besonders dafür geschaffenen Umgebung erarbeitet und dann als fertige Bausteine übernommen. Die ereignisorientiert arbeitenden Steuerfunktionen sowie die allgemeinen Kontrollstrukturen können die Entwickler mit Hilfe einer Spezifikationsmethode und der dazugehörigen Arbeitsumgebung problemorientiert erarbeiten und deren Codierung dem Werkzeug überlassen.

Die fertige Applikation setzt sich aus drei Strängen zusammen (Bild 7). In einer späteren Phase sollten Änderungen einzig noch im mittleren Strang vorgenommen werden, so dass man dann, wenn auch nicht von logischen, so doch von Programmierfehlern verschont bleibt.

Methoden und Werkzeuge

Arbeitsumgebung

Die verschiedenen Entwicklungsgruppen arbeiten selbständig und an verschiedenen Orten an ihrem Teilsystem. An einer Workstation mit allen nötigen Werkzeugen hängt ein reduziertes Steuersystem mit den benötigten Rechnerknoten sowie Ein- und Ausgabemöglichkeiten. Zur Koordination der Arbeiten sowie zum sonstigen Datenaustausch bestehen Netzverbindungen.

Die Schnittstellen der Maschine und der Steuerungselemente sind für den späteren Zusammenbau vorbereitet; sie können also für Tests ohne umwälzende Änderungen hardware- und softwareseitig zusammengefügt und von einer einzigen Entwicklungsstation aus bedient werden (Bild 8). Beim Betrieb im Fahrzeug, wo Platz und Energie knapp sind, ist das besonders wichtig. Nach Beendigung der Entwicklung und nach dem Testbetrieb wird die gleiche Steuerungsstruktur ohne Entwicklungsstation weiter verwendet; die Bedieneroberfläche ist dann die eines ganz normalen Fahrzeugs. Um ein reduziertes Steuersystem mit einer beliebigen Anzahl Rechnerknoten sowie Ein- und Ausgabemöglichkeiten zu betreiben, sind keinerlei Änderungen am unterliegenden Programmgebäude nötig. Alle Anpassungen (zum Beispiel die Simulation der in der aktuellen Installation fehlenden Kommunikationspartner) erfolgen in den Spezifikationen der beteiligten Cluster.

Spezifikation und Modellierung

Das hybride Antriebskonzept bedeutet eine grosse Steigerung der Komplexität gegenüber konventionellen Fahrzeugen, was sich besonders im verwickelten Zusammenspiel der Einzelkomponenten niederschlägt. Die komplizierten Abläufe entziehen sich weitgehend der direkten Vorstellung, weshalb die Darstellung der diskreten Zustände und die Simulation der Abläufe mittels geeigneter Werkzeuge in der Planungsphase grosse Bedeutung erlangt. Ideal ist, wenn die dort geleisteten Arbeiten direkt in die spätere Applikation einfliessen können, was nur mit der Unterstützung eines leistungsfähigen, integrierten Werkzeugs gelingen kann. Diese Bemerkung gilt für alle eingebetteten Systeme (Embedded Systems), die als integrierender Bestandteil von Geräten umgebende Prozesse steuern und regeln, wozu sie ausserordentlich zuverlässig und in Echtzeit funktionieren müssen (Maschinen- und Prozesssteuerungen, Prozessleitsysteme u. a.).

Wie arbeiten Ingenieure an der Lösung ihrer regeltechnischen oder anderen Steuerprobleme? Üblich ist, dass sie sich neben der eigentlichen Aufgabe allzusehr mit der eigentlichen Codierung von Algorithmen befassen müssen, zum Was gesellt sich gewichtig das Wie und im Laufe der Arbeit, besonders dann bei späteren Änderungen, lassen sich die beiden überhaupt nicht mehr auseinanderhalten. Wir

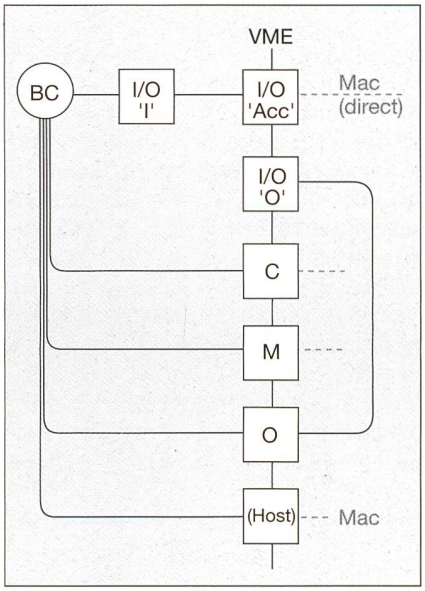


Bild 8 Teilsystem

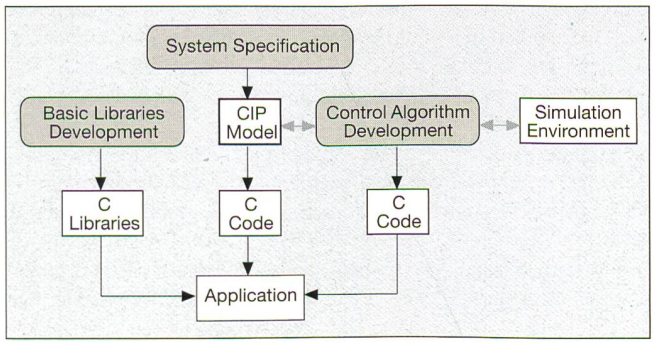


Bild 7 Software-Entwicklungsstränge

beschreiten einen anderen Weg: Anstatt zu programmieren, wird das funktionale Verhalten der einzelnen Blöcke in einem Werkzeug als grafisches Modell beschrieben. CIP (Communicating Interacting Processes) ist eine unter anderem am Institut für Technische Informatik und Kommunikationsnetze (TIK) entwickelte formale Entwicklungsmethode, mit der sich verteilte eingebettete Systeme durch grafische Modelle ablauffähig spezifizieren lassen [4; 5; 6]. Der Entwicklungsansatz geht vom Verhalten der realen Objekte der Umgebung aus und führt in konstruktiven Schritten zum kompositionell definierten Gesamtsystem. Aus solchen Spezifikationen kann direkt Programmcode erzeugt werden, der in einer vorbereiteten Umgebung ohne weiteres Zutun laufen kann.

Hybrid III ist ein geradezu beispielhaftes eingebettetes System, dazu ein recht kompliziertes. Dafür ist CIP-Tool das geeignete Software-Entwicklungswerkzeug; die Designer der Antriebskomponenten brauchen sich als reine Computeranwender nicht um die Einzelheiten des Steuersystems zu kümmern und können sich so ganz auf das richtige funktionale Verhalten ihres Maschinenteils konzentrieren.

Obwohl es keine Einbussen bei der Funktionalität gibt (jedenfalls nicht bei eingebetteten Systemen), bedeutet nicht zu programmieren auch eine Einschränkung, da nicht mehr die ganze Mächtigkeit einer Sprache (z. B. C, mit dem sich alles machen lässt) zur Verfügung steht.

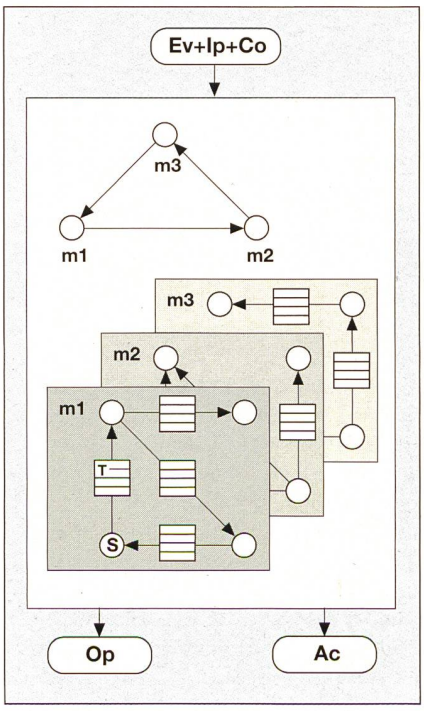
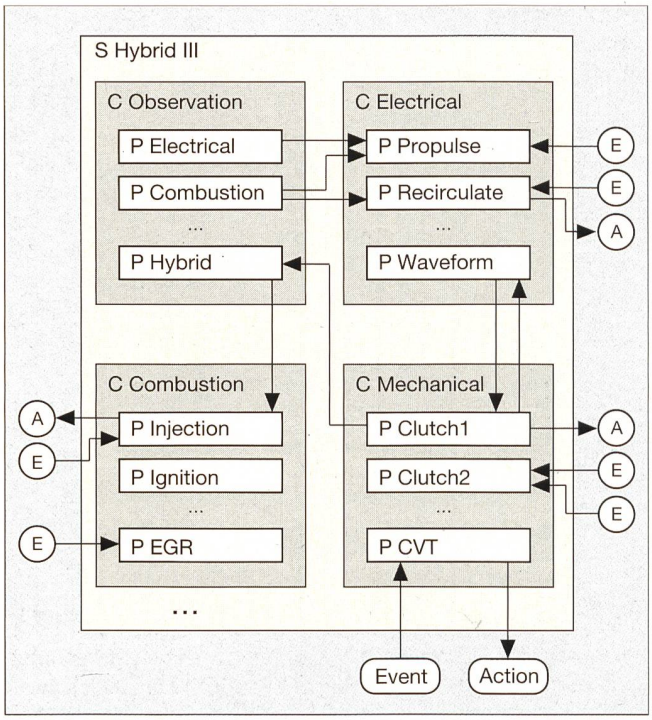


Bild 9 CIP-Prozessstruktur

Bild 10 Hybrid-III-Projektstruktur (Ausschnitt)



Dieser Verzicht ist ein Vorteil, denn solange man in der Frage der Korrektheit von Programmen noch im dunkeln tappt, sollte es darum gehen, einfache Lösungen zu suchen, die sich auch einem späteren Verständnis nicht entziehen.

Communicating Interacting Processes, CIP

Die CIP-Methode modelliert das Systemverhalten durch kooperierende Zustandsmaschinen, dargestellt als asynchrone Cluster, die ihrerseits synchron untereinander kooperierende Prozesse in verschiedenen Betriebsmodi enthalten (Bild 9) [6]. Das mathematische Modell eines Systems ist als Produkt dieser vielen Zustandsmaschinen definiert; es stellt also eine einzige Maschine im mehrdimensionalen Zustandsraum dar.

Ereignisse aus der Umgebung (Event) veranlassen einen Zustandsübergang im empfangenden Prozess, der seinerseits mit Pulsen weitere Prozesse des Clusters anstossen kann usw. Die aktivierten Prozesse können dann auf die Umgebung zurückwirken (Action). Eine so entstehende Kettenreaktion ist ununterbrechbar und definiert einen einzigen Zustandsübergang des Clusters; dass sie nicht zyklisch ist, dafür sorgt das Werkzeug. Die Prozesse haben auch die Möglichkeit, systemweit über Datenströme asynchron untereinander zu kommunizieren (Communication). Man kann einen Prozess durch Modi erweitern; er weist dann verschiedene Verhalten entsprechend unterschiedlichen Zustandsmaschinen auf.

Prozesse sind entweder Modellprozesse, die einen Teil der Maschinenrealität abbilden, oder Funktionsprozesse, wenn sie das reaktive Verhalten des Modells definieren. Die logische Struktur vieler Steuersysteme, auch diejenige von Hybrid III, stimmt mit dieser Art der Modellbildung ideal überein (Bild 10).

Hardware-Realisierung

Steuereinschub

Der Steuereinschub enthält Speisungen für die Rechner und die Peripherie, einen VME-Bus mit 12 Steckplätzen und eine Karte für die Link-Verbindungen der Transputer. Bis auf den einen Transputer, der den Zugang zum VME-Bus bedient, finden Transputer auf kleinen Trägerkarten (TRAM-Modulen) Verwendung. Daneben gibt es 7 Trägerkarten für höchstens 28 M-Module. Folgende Ein- und Ausgabemöglichkeiten (nebst den Spezialfällen) sind vorhanden: 80 binäre Eingänge, 64 analoge Eingänge, 8 Drehzahlmessungen, 2 Drehwinkelmessungen, 64 binäre Ausgänge, 24 analoge Ausgänge. Alle Anschlüsse sind über ein Rangierfeld nach hinten zu versenkten und codierten Steckern herausgeführt; jeder Satellit hat sein eigenes Daten- und Speisungskabel.

Die Steuereinheit wird über einen externen Schalter gestartet (Zündschlüssel), kann aber so nicht abgeschaltet werden. Sie schaltet sich selbsttätig und nur dann aus, wenn der Systemzustand es erlaubt. Die Ein- und Ausgabeschnittstelle hat gegenüber dem ursprünglichen Konzept

eine Erweiterung um zwei Transputer erfahren, so dass sich jetzt drei Rechnerknoten in die Aufgaben des Cluster-**IO** teilen: **IO_ACC** erledigt die Buszugriffe, **IO_I** konvertiert und filtert die Eingabewerte und sendet sie an die anderen Cluster, **IO_O** gibt Daten an die Aktoren aus und bedient die Ring-Schnittstelle (Bild 11).

Peripherie

Alle peripheren Anschlüsse sind in Satelliten zusammengefasst. Zehn solcher Satelliten sind in der Nähe der Maschinenkomponenten plaziert und einzelnen Clustern zugeordnet. Die Anschlüsse von Sensoren und Aktoren einerseits und der Steuereinheit andrerseits können dort rangiert werden; nötige Anpassschaltungen, Wandler, Verstärker usw. sind ebenfalls dort untergebracht. Satelliten enthalten also eine Reihe verschiedenster Funktionen, die sich in Gruppen aufteilen lassen. Die Voraussetzungen sind deshalb ideal für ein frei kombinierbares System mit modularen Elementen für alle vorkommenden Operationen wie Verstärker, Wandler usw. Existierende Lösungen kamen nicht in Betracht, da sie alle viel zuviel Platz beanspruchen.

Die Satelliten sind klein (250×75×75 mm), verfügen über massive Gehäuse mit guter Schirmung und Schutzart IP 64 und können deshalb überall im Fahrzeug eingesetzt werden. Sie sind mit einer Basiskarte bestückt, die Anschlüsse für die Versorgungsspannungen, das Steuersystem sowie für die Sensoren und Aktoren aufweist. Acht Steckplätze nehmen übereinander gestapelt bis zu drei Schnittstellenkarten, sogenannte S-Karten, auf. 15 verschiedene solche Kartentypen wurden entwickelt; eventuell vorhandene Leistungselemente arbeiten mit geringen Verlusten, was nicht nur Energie spart, sondern auch Abwärmeprobleme in den geschlossenen Gehäusen verhindert.

Die Sensoren und Aktoren stammen teils aus der Automobiltechnik, teils aus der industriellen Steuerungstechnik. Die Sammlung besticht durch grösstmögliche Variation aller Anschlusswerte; mit Hilfe der S-Karten schaffen wir einheitliche Bedingungen für die Schnittstelle des Steuersystems.

Spezielle Hardware

Auch wenn, wo immer möglich, käufliche Komponenten verwendet wurden, mussten doch die Satelliten, sämtliche S-Karten und einige Eingabe- und Ausgabekarten (M-Module) neu entwickelt und das Multiprozessor-Netzwerk um eine Broadcast-Möglichkeit erweitert werden.

Broadcast, BC

Der Cluster-**IO** ist für Datenerfassung und -ausgabe an zentraler Stelle vorgesehen. Es handelt sich um den einzigen Transputer mit direktem Zugang zum VME-Bus. Besonders bei der Datenerfassung ergeben sich dabei Probleme, die mit den für Transputer gängigen Kommunikationsmitteln schwer in den Griff zu bekommen sind. Der Vektor mit den aktuellen, aufbereiteten Daten wird periodisch an die verschiedenen verarbeitenden Cluster übermittelt. Da die verwendeten Transputer nur über vier Links verfügen, müsste dieser Vektor von einem zum anderen weitergereicht werden, was unerwünschte zusätzliche Belastungen der einzelnen Cluster mit sich brächte; zudem ginge dabei die angestrebte Gleichzeitigkeit im System verloren.

Die Erweiterung des Link-Mechanismus um eine Broadcast-Möglichkeit erlaubt, diesen Vektor gleichzeitig allen Abonnenten zu senden. Beide genannten Nachteile werden damit vermieden. Unsere Karte kann einen Transputerlink-Ausgang auf bis zu acht Empfänger aufspalten.

Drehzahlmessung M-RPM

Drehzahlen und Drehwinkel gehören zu den wichtigsten Messwerten in einer Antriebssteuerung; es gibt eine ganze Anzahl davon. Digitale Methoden zur Drehzahlmessung, welche entweder von einem Sensor erzeugte Pulse zählen oder deren Periodendauer bestimmen, sind mit einigen Unschönheiten versehen. So ist die für eine bestimmte Genauigkeit erreichbare kürzeste Messdauer drehzahlabhängig, beziehungsweise eine höhere Auflösung bedingt – umgekehrt – bei gleichbleibend kleiner Messdauer eine steigende Anzahl Pulse pro Umdrehung.

Beides ist in diesem Fall unerwünscht: Auch bei kleinen Drehzahlen müssen wir wegen der im ganzen Bereich zu bewältigenden Kupplungsvorgänge schnell und genau messen können. Die theoretisch kürzeste Antwortzeit eines digitalen Geschwindigkeitsreglers beträgt 1,5 Pulse, praktisch liegt dieser Wert aber 5- bis 200mal höher. Die damit nötig werdenden Sensoren mit hohen Pulszahlen pro Umdrehung sind wenig robust und in einer Fahrzeugumgebung nicht erwünscht. Zudem kann die Übertragung von Signalen mit hoher Frequenz Probleme schaffen. In unserem M-Modul nützen wir die physikalische Tatsache, dass keine Geschwindigkeitssprünge auftreten können, und lassen auch die Werte der vorangegangenen Messungen in das neue Resultat einfliessen [7; 8].

Das Verfahren füllt die Periode zwischen zwei vom Sensor kommenden Pulsen mit einer generierten Pulsreihe auf. Aufgrund der früheren Messungen wird der Zeitpunkt, an dem der nächste Puls eintreffen wird, vorausgesagt. Wirklich eintreffen wird er aber ein wenig früher oder später als erwartet, was dann Anlass

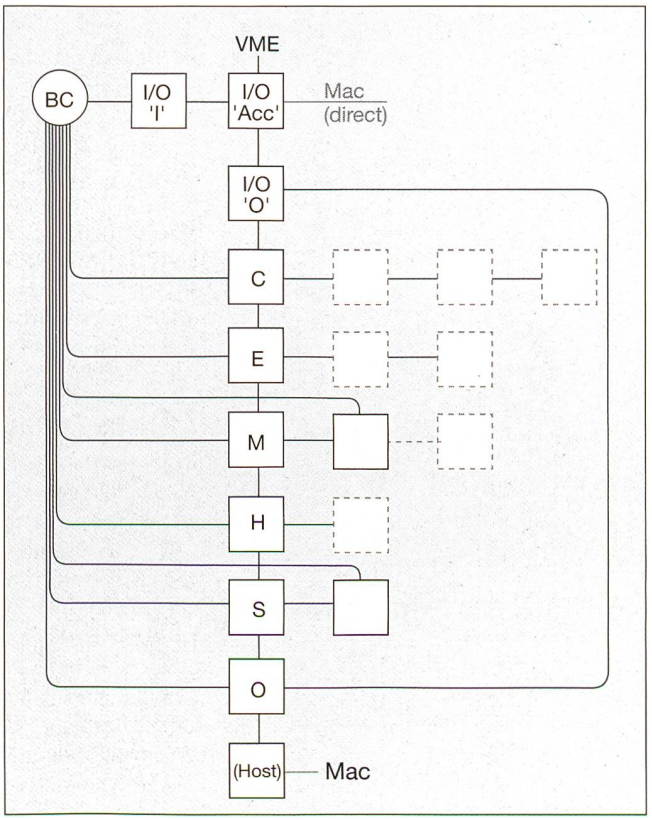


Bild 11 Implementation Gesamtsystem

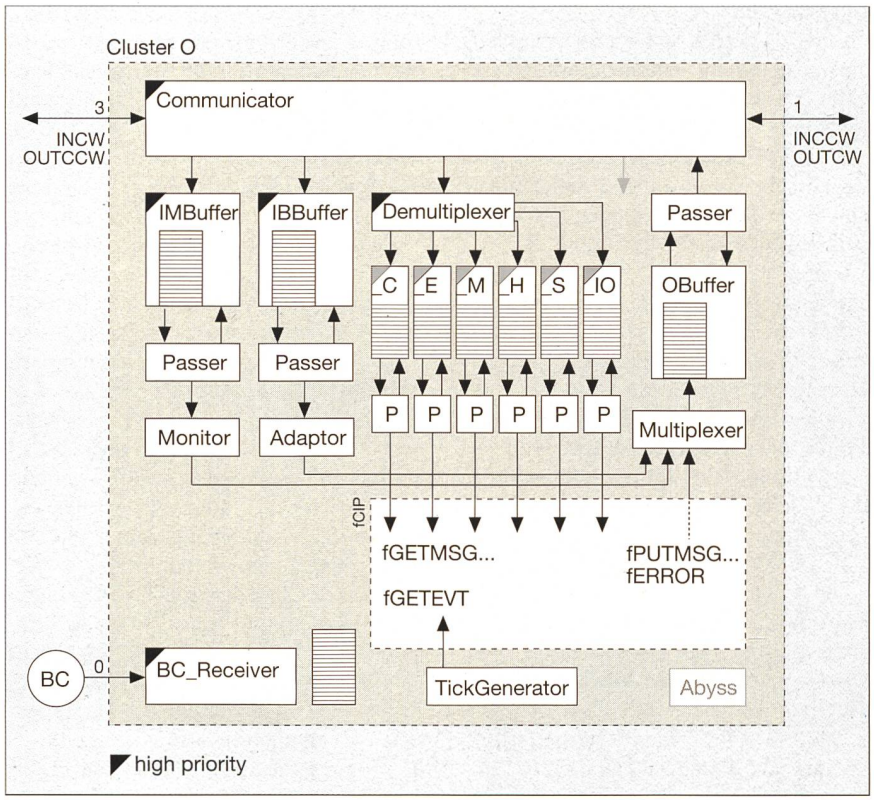


Bild 12 Prozessstruktur von Cluster O

zu einer Korrektur der nächsten Erwartung gibt. Mit der Masszahl Z_k für den Zeitpunkt des erwarteten Pulses gilt $Z_{k+1} := Z_k + (N - P_k)$.

Der generierte Pulsstrom entspricht gedachten zusätzlichen Zähnen auf dem Codierrad, was einem Rad mit N-mal so vielen Zähnen, wie tatsächlich vorhanden sind, gleichkommt. Die Anforderungen an Codierräder, Sensoren, Übertragung und Auswertung konnten damit erheblich verkleinert werden.

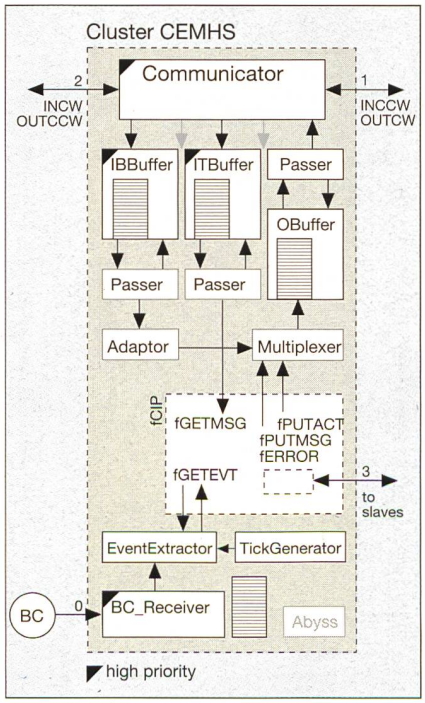


Bild 13 Prozessstruktur der Cluster C, E, M, H und S

Verbrennungsmotorsteuerung M-ICX

Das M-Modul dient der Ansteuerung eines Vierzylinder-Verbrennungsmotors und kann ausgehend von der Drehwinkelinformation selbsttätig Einspritz- und Zündimpuls-Zeitpunkte am Motor steuern. Die Ausgabe des Steuersystems wird so erheblich entlastet; der Aufwand reduziert sich auf das periodische Bereitstellen von neuen Werten für die diversen Winkel und Zeiten. Die beiden Pulsreihen f (Drehwinkel der Kurbelwelle) und s (Synchronisations-Impuls, alle zwei Umdrehungen) werden direkt von einer benachbarten M-RPM übertragen [9].

Software-Realisierung

Systemsoftware

Die beiden systemübergreifenden Verbindungen (Ring und Broadcast) sind auf allen Clustern mit entsprechenden Prozessen vertreten. Zahlreiche Puffer entkoppeln globale und lokale Vorgänge voneinander. Der Code aller dieser Prozesse ist im ganzen System der gleiche. Darüber hinaus sind auch alle verarbeitenden Cluster identisch und gliedern sich um den einen Prozess, in dem die aus der Spezifikation generierten eigentlichen Steuerfunktionen ablaufen.

In diesem Teil der Arbeit haben sich Nachteile der parallelen Programmierung bzw. der Mangel an brauchbaren käuflichen Werkzeugen zur Fehlersuche und Profilierung bemerkbar gemacht. Um die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems auszuschöpfen, mussten vor allem die Prozessprioritäten aufwendig aufeinander abgestimmt werden. Die Bilder 12 bis 14 zeigen die drei vorkommenden Clustertypen.

CIP-Shell

Für die Cluster **C**, **E**, **M**, **H** und **S** können Eingabedaten zwei grundsätzlich verschiedene Bedeutungen haben, entweder, wie gewohnt, die Bedeutung eines direkten Wertes oder die Bedeutung eines Wertes, der ein von CIP zu verarbeitendes Ereignis enthält. Der CIP-Prozess, eine den CIP-Code einhüllende Shell, muss die Daten in geeigneter Form aufbereiten und zwischen den gelesenen Werten und der in CIP spezifizierten Struktur einen Zusammenhang herstellen.

Die Art und Weise dieser Anbindung beschreiben die Betreiber der einzelnen Cluster in einer Konfigurationsliste. Aus der Liste wird Programmcode für den EventExtractor erzeugt, der dann im laufenden System CIP mit Ereignissen bedient. Die Beschreibung kann Zeitereignisse, binäre Ereignisse sowie Ereignisse, die sich aus kontinuierlichen Messwerten ergeben, enthalten. Ereignisse im Zusammenhang mit binären Signalen sind einfach zu verstehen: Das Ereignis tritt ein, wenn der Signalwert einer spezifizierten Maske entspricht.

Ereignisse aus kontinuierlichen Signalen treten dann ein, wenn bestimmte Grenzwerte über- oder unterschritten werden. Diese Grenzwerte können an beliebige Stellen innerhalb des Wertebereichs eines Signals gelegt werden. Der EventExtractor garantiert für die Einhaltung der Kontinuität, das heisst, es werden keine beliebigen Folgen von Ereignissen erzeugt (Bild 15).

Die CIP-Shell bindet darüber hinaus den CIP-Code an die darunterliegenden Systemroutinen für Kommunikation und Datenausgabe. Ausser den Regleralgorithmen wird die gesamte Anwendersoftware, also der Code mit den eigentlichen Clusterfunktionen, aus CIP-Spezifikationen generiert.

Schlussfolgerungen

Hybrid III ist ein sehr komplexes System – und es läuft. Die drei wichtigsten Aufgaben, die wir uns zu Projektbeginn gesetzt haben – Entlastung der Entwickler von Programmieraufgaben, Miniaturi-

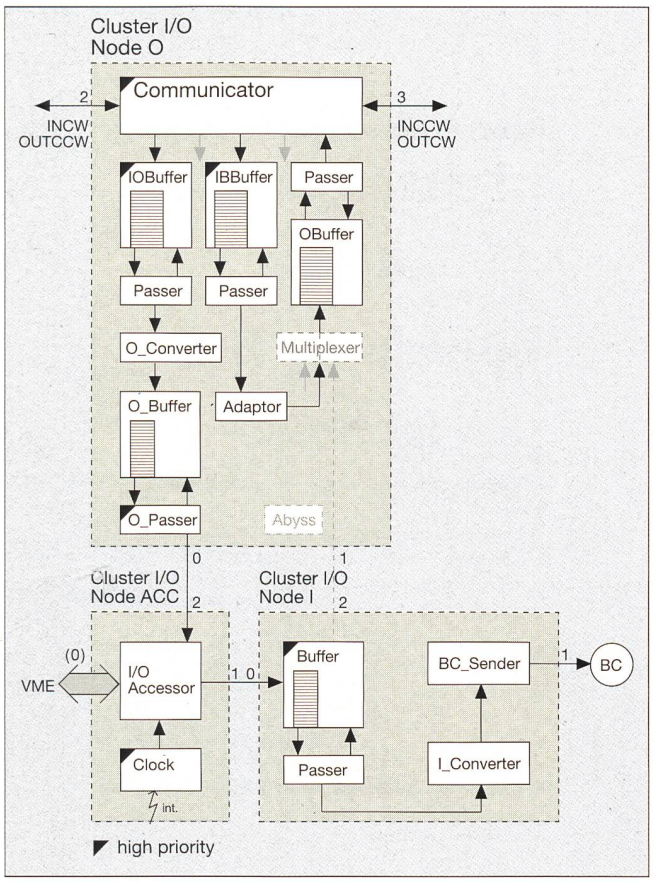


Bild 14 Prozessstruktur von Cluster IO

sierung der Elemente und Flexibilität – sind mit unterschiedlichem Erfolg gelöst worden.

Wir haben ein neues Vorgehen für die Steuersystemtechnologie ausprobiert. Da sich das CIP-Konzept an der Realität orientiert, sind klare und verständliche Spezifikationen möglich. Die Abstützung auf formale Modelle erlaubt die Entwicklung von robusten und zuverlässigen Systemen. In unserem Fall ist es wohl sogar so, dass das Steuersystem ohne ein solches Hilfsmittel nicht zum Laufen gekommen wäre. Das Werkzeug fordert eine gewisse Disziplin und schwächt so die Folgen der «akademischen Arbeitsweise» ein wenig ab. Das zeigt sich auch an der Häufigkeit, mit der sich fatale Fehler in den nicht durch CIP generierten Code einschleichen.

Die Erfüllung der sozusagen banalen Anforderungen für den Einbau des Steuersystems in ein Fahrzeug – Robustheit, kleine Bauformen, Störsicherheit – hat einen grossen Anteil am Gesamtaufwand verschlungen. Es ist deshalb sehr zu begrüssen, dass nun auch der Einsatz in ein wirkliches Fahrzeug folgen soll.

Im Laufe der Projektdauer sind Transputer aus politischen Gründen fast von der Bildfläche verschwunden. Das hat dazu geführt, dass sie heute hinsichtlich Rechenleistung nicht mehr auf dem neuesten Stand sind. In der Folge erlitten auch die verfügbaren Werkzeuge eine erhebliche Ausdünnung, und wir mussten mehr Dinge selbst machen, als uns lieb war. Vom technischen Standpunkt aus ist das Konzept der Transputer nach wie vor attraktiv und sogar besonders geeignet für komplexe eingebettete Systeme.

Das Mehrprozessorsystem, das wir für Hybrid III entwickelt haben, ist universell. Es kann zur Steuerung einer Vielzahl von ähnlich komplexen Maschinen Verwendung finden. Die sowohl im Verband wie auch einzeln lauffähigen, identischen Hardware- und Softwarebausteine machen es besonders geeignet für Projekte, bei denen die Entwicklungsarbeit von verschiedenen Leuten und an verschiedenen Orten geleistet wird. Laufen einmal die Komponenten, geht die Integration zügig voran; jetzt ein Vorteil, in der Zukunft eine Forderung in der Steuerungstechnik.

Literatur

[1] The Transputer Databook, Inmos 1989.
[2] Mezzanine Bus Mini-Specification, Vita 1991.
[3] The VME-Bus Specification, Vita 1987.
[4] CIP Tool User Manual 1.2, CIP System AG, Solothurn 1996.
[5] *H. Fierz, H. Müller et al.:* CIP, Communicating Interacting Processes, A Formal Method for the Development of Reactive Systems, Poznan 1993.
[6] *H. Fierz:* Spezifizieren und Entwickeln mit grafischen Modellen – CIP – eine konstruktive Entwicklungsmethode für eingebettete Systeme, Bulletin SEV/VSE 86(1995)21, S. 33.
[7] Ignition and Injection with a Minimum of CPU Load, Siemens Automotive Engine Management System.
[8] *V. Török et al.:* High Accuracy and Fast Response Digital Speed Measurement for Control of Industrial Motor Drives, IFAC.
[9] *H. P. Geering:* ICX: A Custom VLSI-Chip for Engine Control, IJVD 1989.

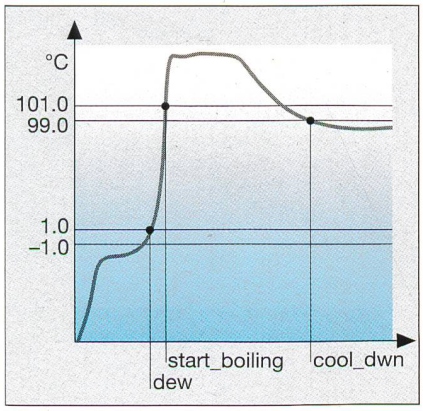


Bild 15 Ereignisse in einem kontinuierlichen Signal

Technique complexe qui ménage l'environnement

Le système de commande de Hybrid III

Le projet de véhicule à motorisation hybride Hybrid III de l'EPF Zurich veut améliorer le rendement de véhicules motorisés par une combinaison optimale associant un moteur à essence, un moteur électrique, un volant accumulateur et un système électronique moderne. Le présent article donne un aperçu du projet d'ensemble et s'occupe ensuite principalement de l'unité de commande très exigeante. Les développements systémiques vont certainement rencontrer un intérêt particulier, car ils montrent la manière de venir à bout de la complexité d'un système de commande décentralisé et réparti grâce à un outil de programmation moderne (CASE).

Nachdiplomstudium
berufsbegleitend

Telekommunikation

gesamtwirtschaftliche Sicht, Aktualisierung des Wissens, Fallanalysen, Rollenstudien, Wertungen, Orientierungshilfen im liberalisierten Markt

TECHNIK
MARKETING
RECHT

TELECOM

HTL CHUR

INGENIEUR-SCHULE HTL CHUR

Dauer:
2 Semester
mit anschliessender Diplomarbeit

Beginn:
Ende Oktober

Anmeldeschluss:
30. Juni

Auskunft und Unterlagen:
Ingenieuerschule
HTL Chur
Ringstrasse
7004 Chur

Tel. 081/286 24 24
Fax 081/286 24 00

Leistung ist gut
detron
optimierter Bezug
ist besser

Wir analysieren und beurteilen Elektroenergieverbräuche, danach schlagen wir wirkungsvolle Massnahmen für die Reduktion der Leistungsspitzen vor, so senken wir die Energiekosten. Mehr als 30 Jahre Erfahrung, die richtige Gerätepalette und unsere Fachkompetenz sind Garant für langlebige, wirtschaftliche Lösungen.

registriertes Qualitätssystem ISO 9001 SQS Reg.-Nr. 12327-01 Système de Qualité Certifié

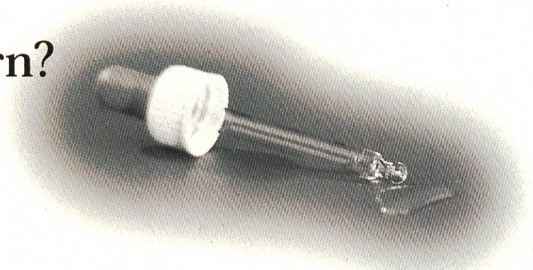
detron ag
Industrieautomation - Zürcherstrasse 25 - CH4332 Stein
Telefon 062-873 16 73 Telefax 062-873 22 10

Auch eine gesunde Kabel-Infrastruktur kann beruhigend wirken. BKS liefert: Kommunikationskabel, Koaxial- und Twinaxial-Kabel, Elektronik- und Steuerleitungen, Sonderleitungen, F.O.-Kabel, Anschluss-Systeme.

Unser Lieferprogramm geht aber noch weiter: Von der Einbaudose zum Verteilerschrank, vom Balun bis zum Gigabit Switch... Fortsetzung folgt.

Verlangen Sie doch unsere Produkteübersicht.

Herzflattern?



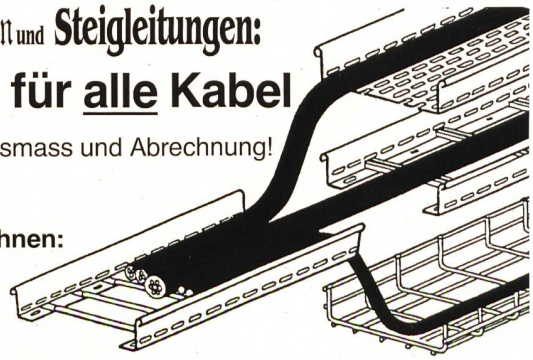
BKS Kabel-Service AG
Fabrikstrasse 8
CH-4552 Derendingen
Tel: +41/32-681 54 54
Fax: +41/32-681 54 59

BKS Kabel-Service AG
Chemin de la Sallaz
CH-1400 Yverdon-les-Bains
Tel: +41/24-423 94 09
Fax: +41/24-423 94 10

BKS
Plug in High-Tech!

Statt **Gitterbahnen** und **Kabelpritschen** und **Kabelbahnen** und **Steigleitungen:**

LANZ Multibahn - eine Bahn für alle Kabel



- LANZ Multibahnen vereinfachen Ihnen Planung, Ausmass und Abrechnung!
- Verringern Lager- und Montageaufwand!
- Senken die Kosten!
- Schaffen höheren Kundennutzen! — **LANZ Multibahnen:**

Verlangen Sie Beratung, Offerte, rasche und preisgünstige Lieferung von Ihrem Elektro-Grossisten oder von Lanz oensingen ag

lanz oensingen ag
CH-4702 Oensingen · Telefon 062 388 21 21 · Fax 062 388 24 24