Echtzeitsysteme

Verteilte Echtzeitsysteme

Lehrstuhl Informatik 4

16. Januar 2014

Gliederung

Fragestellungen

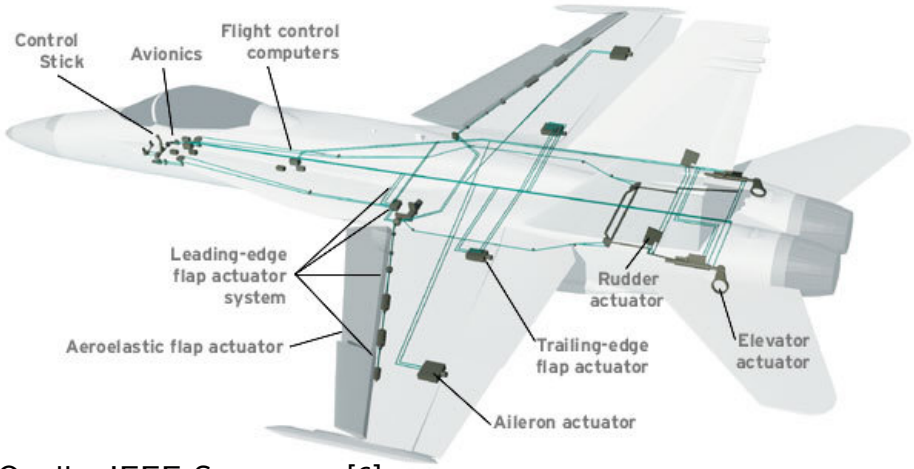
- Warum sind Echtzeitsysteme häufig auch verteilte Systeme?
  - Wären zentralisierte Rechensysteme nicht einfacher handhabbar?
  - Welche Vorteile bietet eine verteilte Lösung?
- Welche Anforderungen stellen wir an verteilte Echtzeitsysteme?
  - Wie helfen uns verteilte Systeme, um die Rechenleistung eines Echtzeitsystems zu steigern und dessen Komplexität zu beherrschen?
- Wie ist der grundlegende Aufbau verteilter Echtzeitsysteme?
  - Welche Elemente verteilter Echtzeitsysteme werden unterschieden?
- Was zeichnet echtzeitfähige Kommunikationssysteme aus?

Echtzeitsysteme sind inhärent verteilt!

Orientierung an der physikalischen Verteilung des zu kontrollierenden Objekts

Elemente wie Sensoren, Aktoren und Bedienpulte unterliegen häufig einer natürlichen Verteilung, die durch das physikalische Objekt vorgeben ist.

Beispiel: Fly-By-Wire-Systeme moderner Flugzeuge



Quelle: IEEE Spectrum [6]

- Bedienpult $\mapsto$ Cockpit
- Triebwerke $\mapsto$ Heck, Flügel
- Leitwerke $\mapsto$ Heck, Flügel
- Fahrwerk $\mapsto$ Rumpf
- Steuerrechner $\mapsto$ Rumpf

weitere Beispiele:

- Automobile, Schienenverkehr (Züge und Signalanlagen), Industrieanlagen (Kraftwerke, Fertigungsstraßen, . . .), . . .

Echtzeitsysteme sind komplex!

Echtzeitrechensysteme übernehmen eine Vielzahl von Aufgaben:

- von einfach Fensterhebern (aber mit Einklemmschutz),
- über zeitkritische Motorsteuerungen (bei bis zu 10000 U/min),
- bis zu komplexen Fahrerassistenzsystemen

Die Vielfalt der abzuarbeitenden Aufgaben ist enorm, ihr Rechenzeitbedarf ist durch monolithische Systeme nicht zu erfüllen.

Verteilung der Aufgaben auf mehrere Knoten erhöht die Rechenleistung

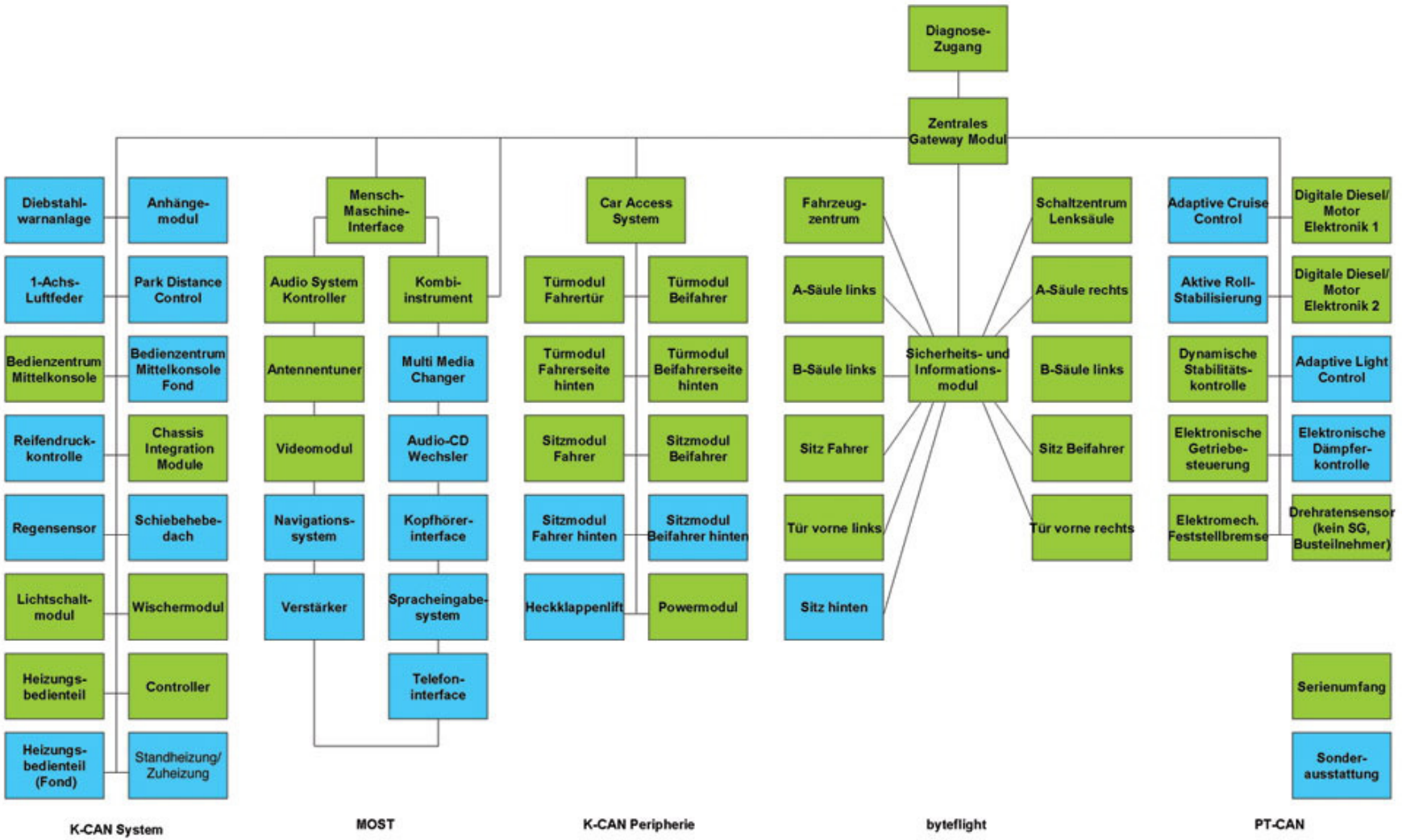
- die Motorsteuerung wird z.B. oft exklusiv von einem einzigen Steuergerät übernommen

Aufteilung in Subsysteme reduziert die Komplexität

- eigene Bereiche für Antriebssteuerung, Komfortfunktionen (z.B. Klimaanlage) oder Infotainment im verteilten System „Automobil“

Verteiltes System auf Rädern

Vernetzung beim 7er BMW, Baureihe E65

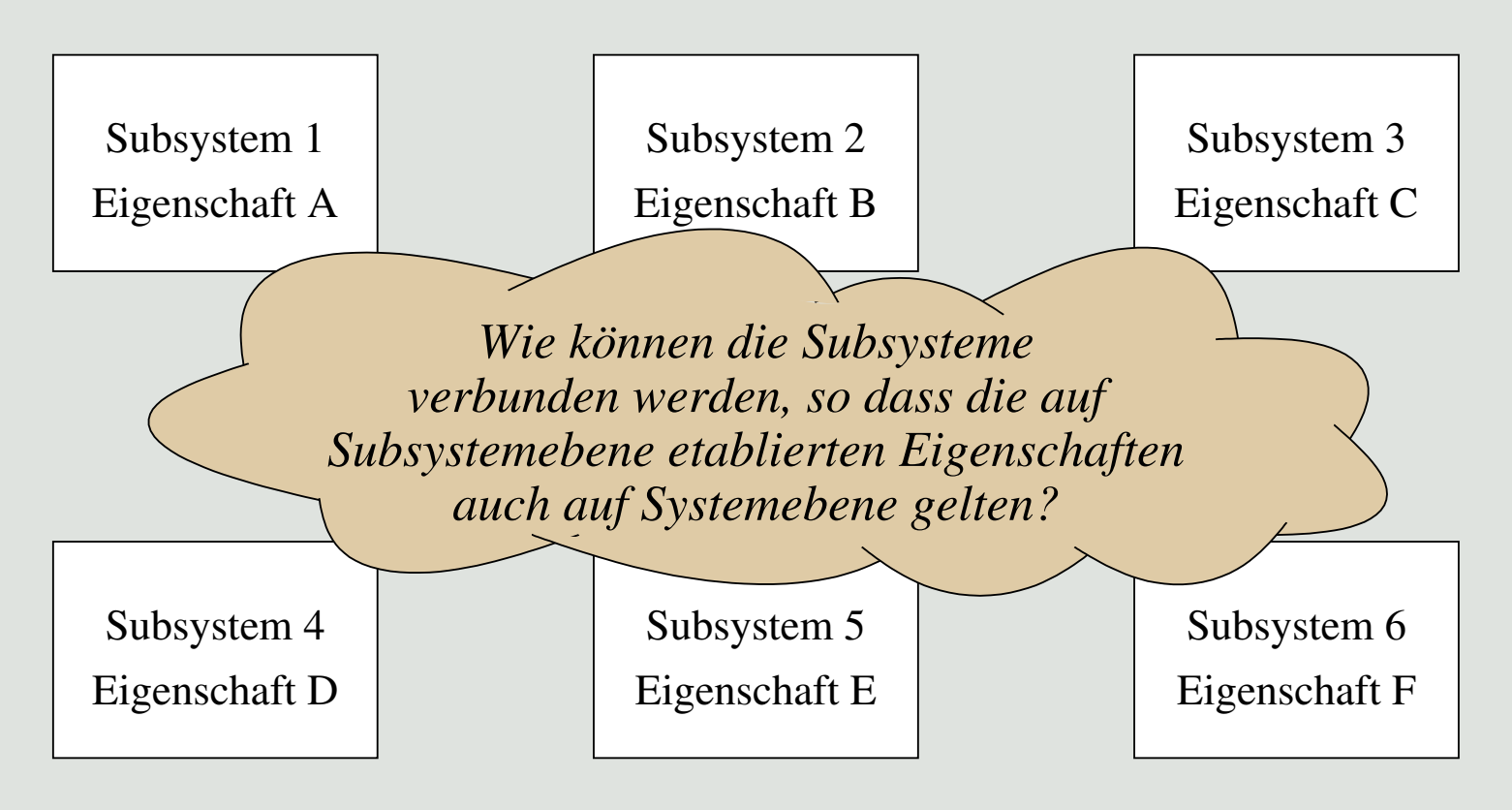


Quelle: BMW AG

Gliederung

Kompositionsproblem

Zentrale Rolle von Echtzeitkommunikationssystemen bzw. der Netzwerkschnittstelle

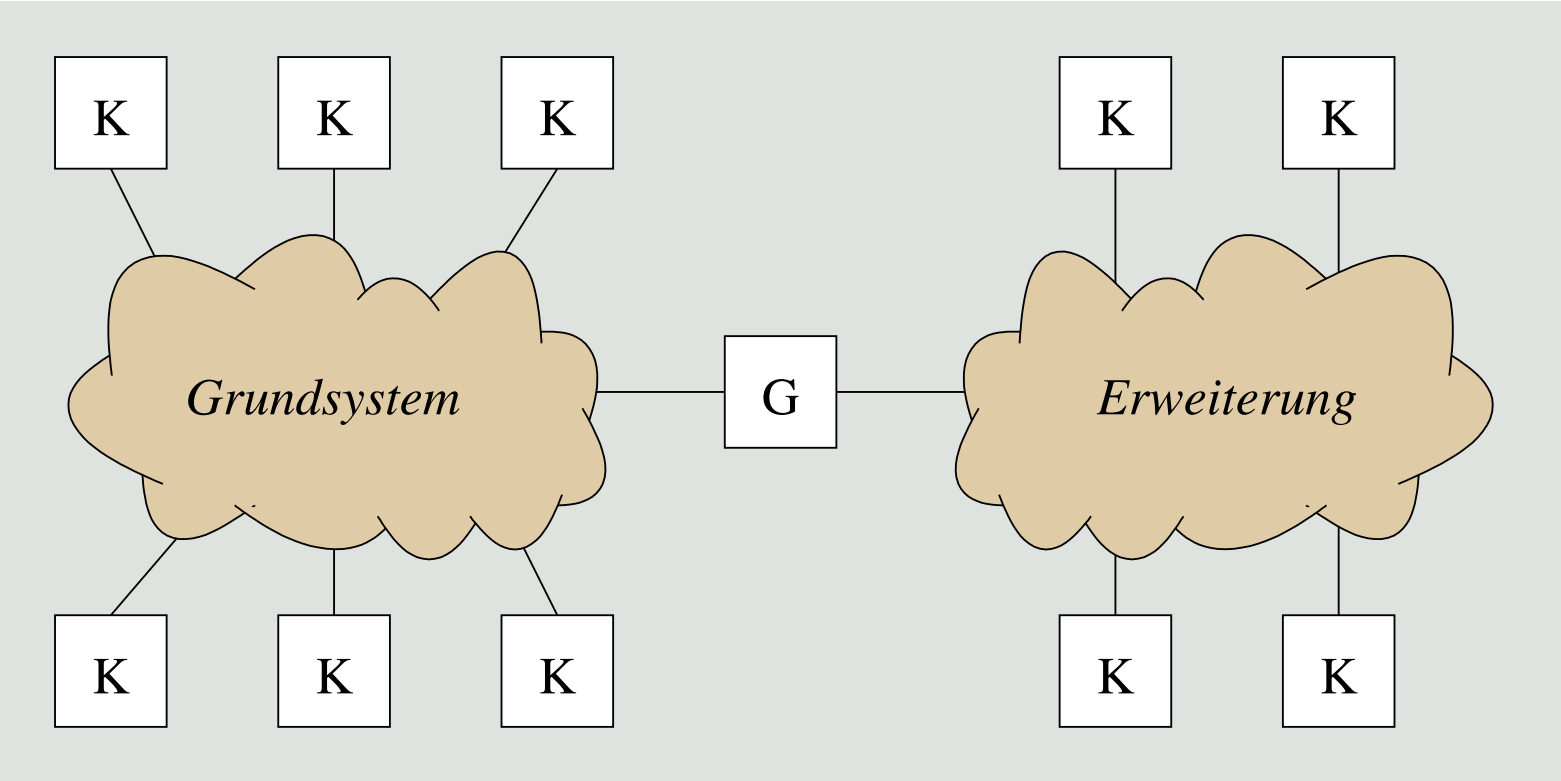


Architekturen sind zusammensetzbar (engl. *composable*) hinsichtlich einer spezifizierten Eigenschaft, wenn die Systemintegration diese vorher für ein Subsystem festgelegte Eigenschaft weiterhin aufrecht erhält

- Rechtzeitigkeit (engl. *timeliness*), Testbarkeit (engl. *testability*)

Transparenter Ausbau einer Gerätegruppe

Hinzunahme von Knoten $\rightsquigarrow$ Andocken neuer Gerätegruppen



- neue Anforderungen sind keine Ausnahme, sondern die Regel
- eine skalierbare Architektur ist offen für Änderungen...

Erweiterbarkeit

Graduelle Leistungszunahme — bzw. Leistungsabnahme, bei Schrumpfung

Architekturen dürfen keine zentralen Flaschenhälse aufweisen, um skalierbar zu sein in Bezug auf Rechen- und Kommunikationsleistung

- eine Hinzunahme von Knoten richtet sich nach der noch freien Kommunikationskapazität der Gerätegruppe
  - lediglich die Rechenleistung des Systems wird erhöht
- ist die Kommunikationskapazität einer Gerätegruppe erschöpft, so eröffnet der neue Knoten eine neue Gerätegruppe
  - ein Knoten der alten Gruppe „mutiert“ zum Netzübergangsknoten
  - der „geopferte“ und der neue Knoten bilden eine neue Gruppe
  - der Netzübergang ist transparent für andere Knoten
- die Zuordnung von Funktion zu Knoten muss weiterhin einer globalen Verteilungsdisziplin gehorchen
  - Lastausgleich (statisch, dynamisch)

☞ nur eine verteilte Architektur ermöglicht unbegrenztes Wachstum

Komplexität

Komponentenanzahl, Anzahl und Art der Komponenteninteraktionen

> *The partitioning of a system into subsystems, the encapsulation of the subsystem, the preservation of the abstractions in case of faults, and most importantly, a strict control over the interaction patterns among subsystems, are thus the key mechanisms for controlling the complexity of a large system. [9, S. 37]*

Komplexität eines großes Systems kann reduziert werden, wenn. . .

- das innere Verhalten der Subsysteme verborgen/gekapselt ist,
- zur Abkapselung stabile Schnittstellen Verwendung finden und
- diese Schnittsellen der Subsysteme „einfach und verständlich“ sind

Reaktionsfähiges System (engl. *responsive system*)

↦ Verteilung + Echtzeitperformanz + Fehlertoleranz [13]

Fehlereingrenzung durch eine Sicherheitshülle (engl. *containment*)

- fehlertolerante Systeme sind in Partitionen strukturiert
  - in „fehlereingrenzende Regionen“ (engl. *error-containment regions*)
- Fehler, die in einer Partition auftreten, bleiben isoliert...
  - sie werden lokal erkannt und korrigiert oder maskiert
  - sie können das restliche System nicht beschädigen
- Fehlererkennung betrifft den Wert- wie auch den Zeitbereich

Replikation (der Funktionen) von Knoten

- erfordert Replikdeterminismus (engl. *replica determinism* [15])
  - aktiv replizierte Knoten sehen denselben Zustand *zur selben Zeit*
  - mit Zugeständnis zur endl. Genauigkeit der *Uhrensynchronisation*
- Maßnahme zur Fehlermaskierung: *hot/warm/cold stand-by*
  - ohne Replikdeterminismus ist Abstimmung (engl. *voting*) sinnlos...
- Fehlereingrenzung ist weiterhin unabdingbar
  - ansonsten droht eine Beeinflussung durch ein fehlerhaftes Replikat

Fehlertransparenz

Zuschnitt und Platzierung der fehlereingrenzenden Regionen und die Schnittstellen zwischen ihnen bilden wesentliche Aktivitäten des Entwurfs eines verteilten Echtzeitrechensystems

- bestimmen die Struktur und Eigenschaften des Systems als Ganzes

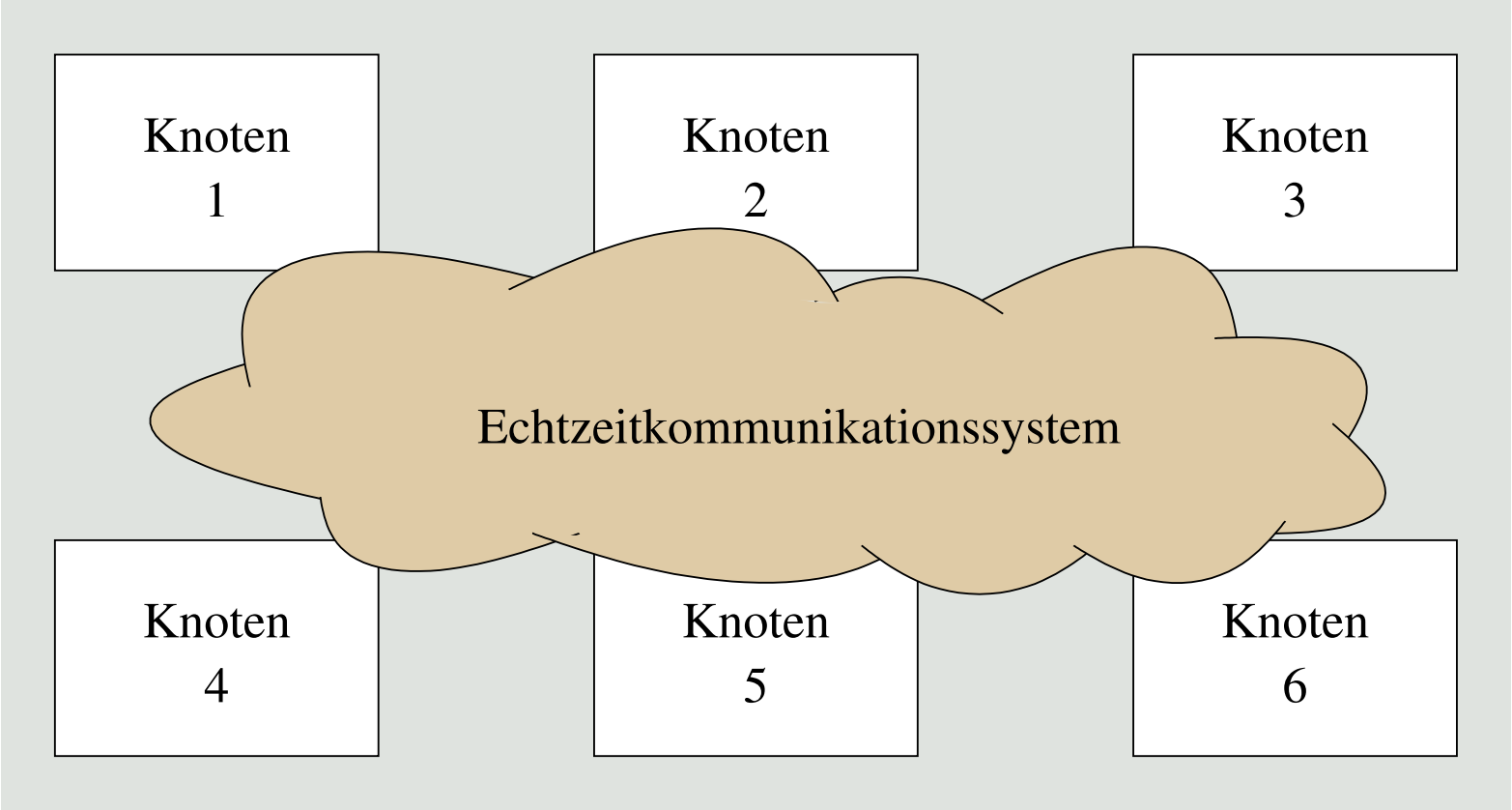
Herausforderung dabei ist, dass die Abstraktionen an den Schnittstellen auch im Fehlerfall ihre Gültigkeit haben sollten

- das Ideal ist ein verteiltes Rechensystem mit einer 1-zu-1-Beziehung zwischen Funktion und Rechenknoten
  (a) Ursache bzw. Knoten einer Fehlfunktion ist „leicht“ identifizierbar
  (b) Auswirkungen eines fehlerhaften Knotens sind „gut“ vorhersehbar
- ein zentralisiertes Rechensystem erschwert die Fehlerdiagnose enorm, wie auch die Analyse von Fehlereffekten von Subsystemen

Gliederung

Verteiltes Echtzeitrechensystem

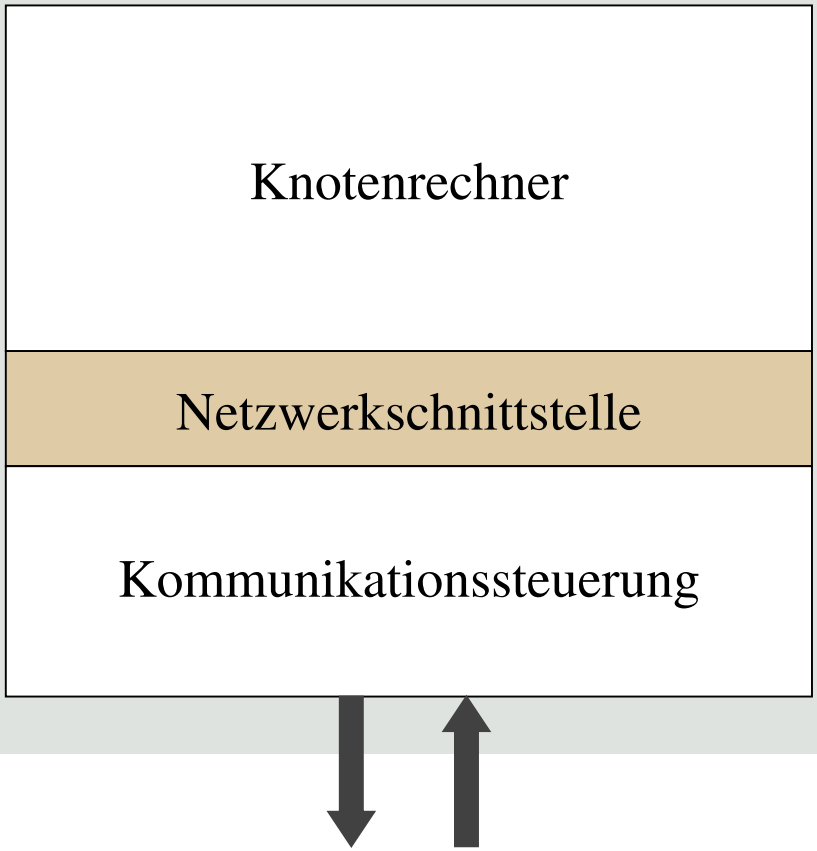
Rechenbetonte Gerätegruppe (engl. *computational cluster*)



- jeder Knoten erbringt eine Teilfunktion des Gesamtsystems
- ein Kommunikationssystem (KS) sorgt für die enge/lose Kopplung

Grobstruktur eines Knotens

Partitionierung in zwei Subsysteme: Knotenrechner und Kommunikationssteuerung



Echtzeitkommunikationssystem

- Menge der Subsysteme zur Kommunikationssteuerung der Knoten der Gerätegruppe
- zusammen mit dem jeweiligen phys. Verbindungsmedium

Netzwerkschnittstelle

- Transportschicht des ISO OSI Referenzmodells [7]
- wichtigster Bestandteil des Echtzeit-KS

Kommunikationssteuerung (engl. *communication controller*)

- Gerätetreiber und Netzsteuerung (Hardware und Software)

Netzwerkschnittstelle

Semantik von Daten und Strategie der Steuerung

Abstraktion von den Details der Protokolllogik und der physikalischen Struktur des Kommunikationsnetzwerks...

- einerseits in Bezug auf die Datensemantik, die Nachrichteninhalte als Ereigniseintritt oder Zustandswert versteht
  - (a) da jedes Ereignis signifikant ist, sind alle Nachrichten entsprechend ihrer Ereigniszeitpunkte zwischenzuspeichern $\mapsto$ sortierte Schlange
    - Nachrichtenverlust bedeutet ggf. Synchronisationsverlust
  - (b) da nur aktuelle Zustandswerte signifikant sind, ist immer nur die zuletzt empfangene Nachricht zu speichern $\mapsto$ überschreiben
- andererseits in Bezug auf die Steuerungsstrategie, die zwischen zwei Kontrollbereichen differenziert
  - (a) externe Kontrolle im Knotenrechner, die vom Kommunikationssystem die Anzeige von Kontrollsignalen erfordert $\rightsquigarrow$ Ereignissteuerung
  - (b) autonome Kontrolle im Kommunikationssystem, die Knotenrechner ununterbrochen weiter arbeiten lässt $\rightsquigarrow$ Taktsteuerung

Nachrichten besonderer Bedeutung

Ereigniseintritt vs. Zustandswert

Ereignisnachricht (engl. *event message*)

- kombiniert Ereignissemantik mit externer Kontrolle:
  - jede eingehende Nachricht wird beim Empfänger gepuffert
  - Entsorgung erfolgt durch Konsumierung (d.h., bei Verarbeitung)
- erfordert 1-zu-1-Synchronisation zwischen Sender und Empfänger
  - zur Vermeidung von Pufferüberlauf bzw. Empfängerblockaden
- korrespondiert zum „klassischen“ Botschaftenaustausch $\mapsto$ IPC

Zustandsnachricht (engl. *state message*)

- kombiniert Zustandswertsemantik mit autonomer Kontrolle
  - entspricht der Semantik globaler Variablen, jedoch...
    (a) das Kommunikationssystem garantiert unteilbares schreiben
    (b) es gibt nur 1 Schreiber (engl. *multiple reader, single writer*; MRSW)
  - gestattet eine losere Kopplung zwischen Sender und Empfänger
- korrespondiert zu den Anforderungen von Steuerungsanwendungen

Interagierende Gerätegruppen

Netzübergang (engl. *gateway*)

Netzübergangsknoten (engl. *gateway nodes*) schlagen Brücken zwischen verschiedenen Gerätegruppen (engl. *cluster*)

- Netzübergänge kommen mit zwei Ausprägungen von Schnittstellen:
  1. eine Instrumenten- und eine Kommunikationsschnittstelle
     - auch als Schnittstellenknoten (engl. *interface node*) bezeichnet
  2. zwei Kommunikationsschnittstellen (d.h., Netzwerkschnittstellen)
- sie bilden einen „Umschlagplatz für relevante Informationen“
  - in nicht allen Gerätegruppen ist jede Information signifikant
  - Datenformate bzw. -repräsentationen können verschieden sein
  - Nachrichtenweiterleitung bedingt Transformationsvorgänge

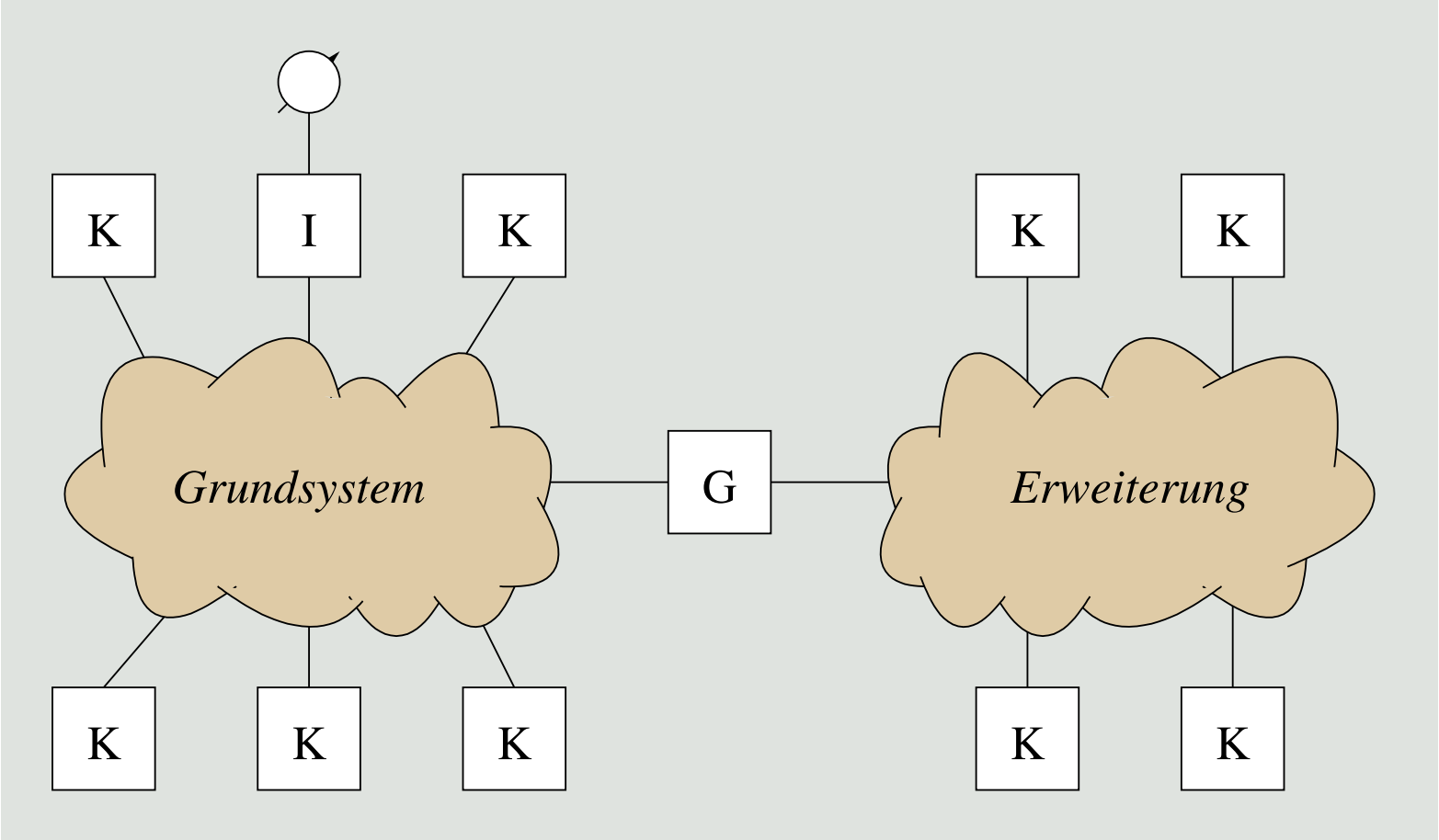
Netzübergangsknoten stellen stabile Schnittstellen zur Verfügung, ihr

funktionales Verhalten, d.h. Typ und Semantik der umgeschlagenen Nachrichten, und ihr

zeitliches Verhalten, d.h. zu welchen Zeitpunkten, diese Nachrichten weitergeleitet werden,

sind idealerweise eindeutig spezifiziert.

Netzübergangsknoten

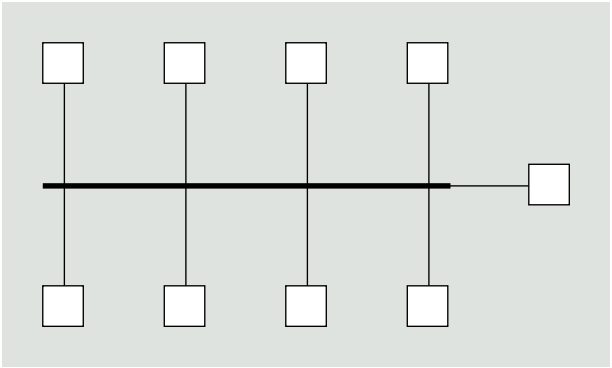


Knoten `G` verbindet zwei Subsysteme $\mapsto$ Netzübergangsknoten

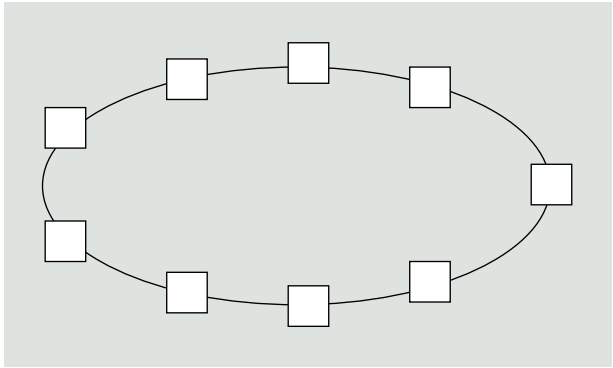
Knoten `I` bindet einen Sensor ein $\mapsto$ Schnittstellenknoten

Netzwerktopologie

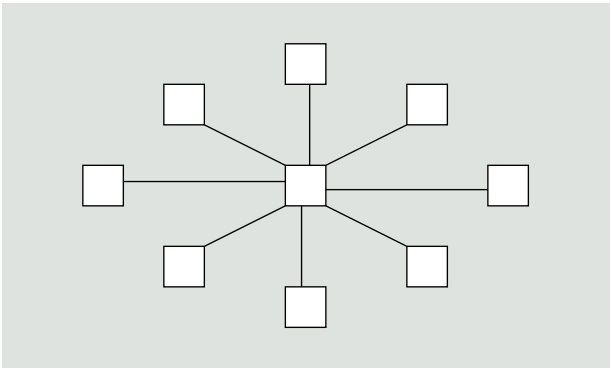
Physikalische Struktur des Kommunikationssystems



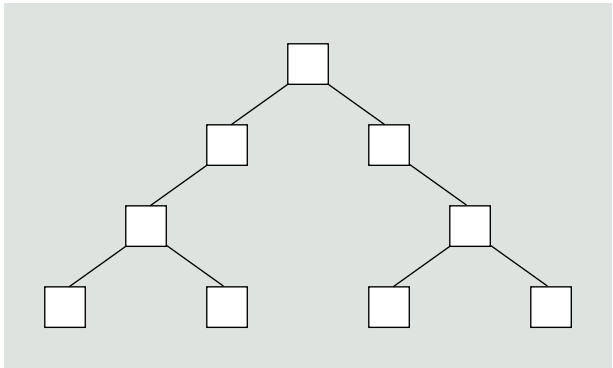
Bus (engl. *bus*), passive Topologie
zentrales Medium



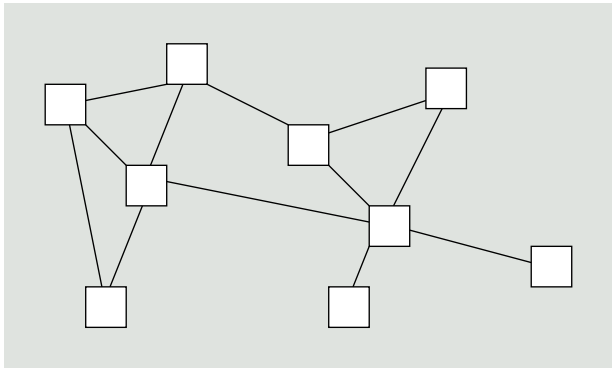
Ring (engl. *ring*), aktive Topologie
verteilte Steuerung



Stern (engl. *star*)
zentrale Verteilung



Baum (engl. *tree*)
dezentrale Steuerung



Masche (engl. *mesh*)
$\rightsquigarrow$ Internet

Netzwerktopologie (Forts.)

Bus *versus* Ring — in Echtzeitkommunikationssystemen verbreitete Techniken

Bus $\mapsto$ ein Hauptkabel, an dem alle Teilnehmer über spezielle T-Stücke (z.B. BNC, engl. *bayonet navy connectory*) angeschlossen sind

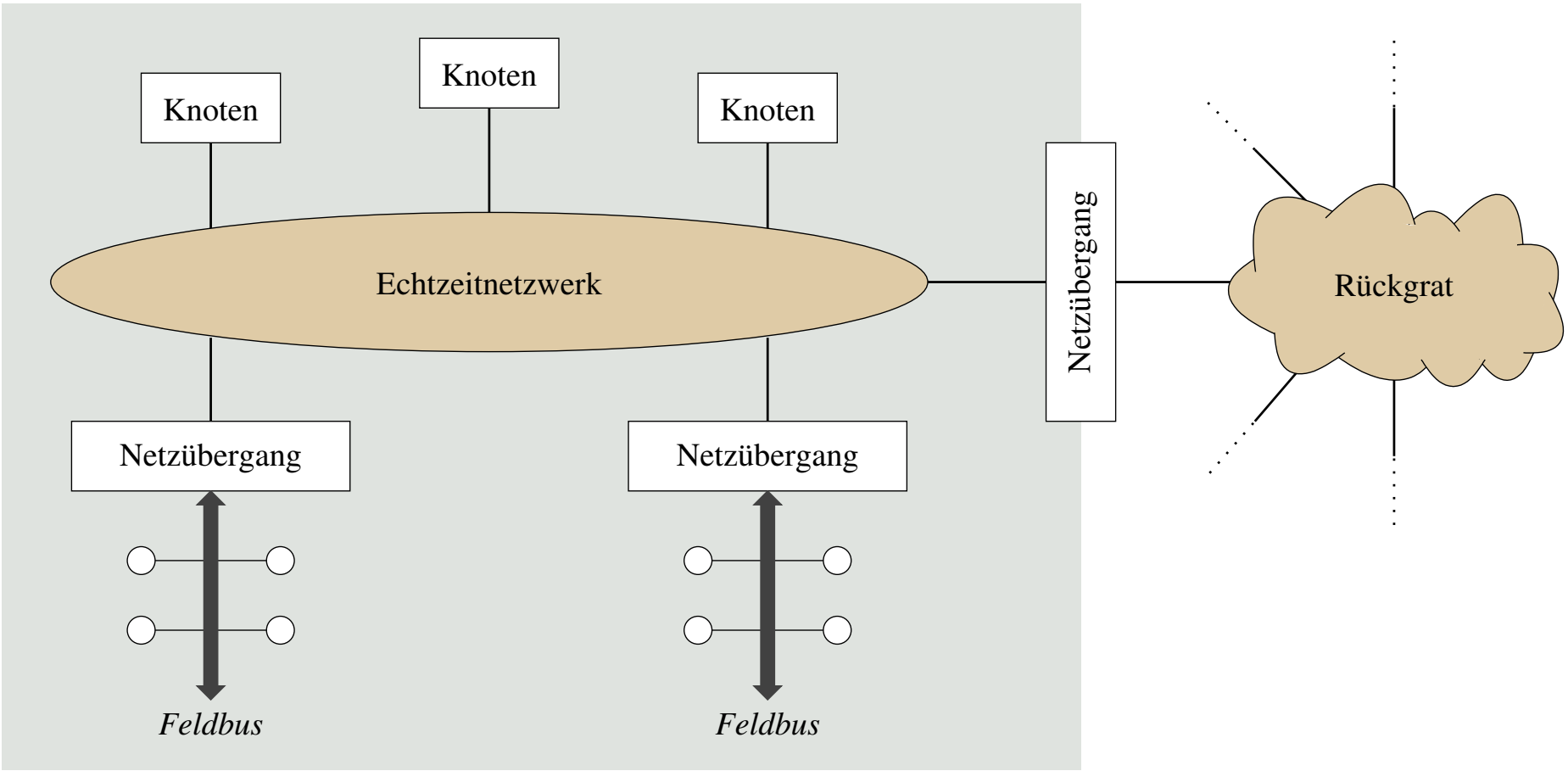
- Teilnehmer hören „gleichzeitig“, was auf dem Bus geschieht
  - Simultanzustellung von Nachrichten $\rightsquigarrow$ *Multicast*
- Zugriffsverfahren koordinieren „gleichzeitige“ Sendevorgänge
  - Bus ist gemeinsames und teil- bzw. unteilbares Betriebsmittel
- unabhängig von Knotenfunktionen; Problem: Kabelbruch

Ring $\mapsto$ Zweipunktverbindungen zwischen zwei Teilnehmern

- Nachrichten werden bis zum Bestimmungsort weitergeleitet
  - jeder Teilnehmer agiert als Zwischenverstärker (engl. *repeater*)
- Adressierung sorgt für überschneidungsfreies Senden
  - der Ring ist ein abschnittweise teilbares Betriebsmittel
- abhängig von Knotenfunktionen; Problem: Teilnehmerausfall
  - Fehlerfall: ggf. Umschaltung der Drehrichtung des Arbeitswegs

Netzwerkföderation

Organisation von Echtzeitnetzen [9, S. 156]



Netzwerkföderation (Forts.)

Typen von Echtzeitnetzen

Echtzeitnetzwerk (engl. *real-time network*) Kern einer Gerätegruppe

- zuverlässige und zeitlich vorhersagbare Nachrichtenübertragung
  - insb. periodische Zustandsnachrichten mit impliziter Flusskontrolle
- Unterstützung für Fehlertoleranz: replizierte Knoten/Kanäle
  - Mitgliedsdienst (engl. *membership service*), Knotenausfallerkennung
- Uhrensynchronisation mit Auflösung im Mikrosekundenbereich

Feldbus (engl. *field bus*) Anschluss von Sensoren und Aktoren

- Netz von Mikrocontrollern (μC $\mapsto$ Sensor und/oder Aktor)
- periodisch übertragene, kurze Nachrichten mit Zustandsdaten
- strikte Echtzeitanforderungen an Latenz und Latenzschwankungen
  - zieht meist präzise Uhrensynchronisation auf Busebene nach sich

Rückgrat (engl. *backbone network*) Verbindung zur „Außenwelt“

- Austausch zeitunkritischer Daten mit anderen Rechensystemen

Gliederung

Unterstützung für Zusammensetzbarkeit

Architektonische Gesichtspunkte

Abkapselung des Zeitverhaltens von Knoten (engl. *temporal isolation*)

- Zeitverhalten an der Netzwerkschnittstelle ist vollständig bekannt
- Brandmauer (engl. *firewall*) gegen Steuerfehlerausbreitung
  - isolierte Prüfung der zeitl. Randbedingung von Anwendungssoftware

$\rightsquigarrow$ dadurch werden präzise Aussagen über einzelne Nachrichtenlaufzeiten im Kommunikationssystem möglich

Verpflichtungen der Klienten nachkommen $\mapsto$ Schutz des Anbieters

- Überlastung der Anbieter (engl. *server*) vermeiden
  - zuviele oder unkoordinierte Anforderungsnachrichten unterbinden
- Flusskontrolle der Dienstanforderungen der Klienten
  - Klienten helfen, ihre zeitlichen Verpflichtungen erfüllen zu können
- Anbietern ermöglichen, ihre Termine einhalten zu können
  - d.h. Nachrichten rechtzeitig zum Versand bereitstellen zu können

Ereignisgesteuerte Kommunikationssysteme

Kommunikation basiert auf Ereignisnachrichten (s. Folie VIII/18)

- ⇝ der genaue Zeitpunkt des Nachrichtenversands ist nicht bekannt
  - der Knotenrechner entscheidet über die Versandoperation
  - dieser Zeitpunkt hängt von der dort gegenwärtigen Lastsituation ab
- ⇝ die Lastsituation im Kommunikationssystem ist nicht bekannt
  - sie hängt von den Versandoperationen einzelner Knoten ab
- ⇝ nimmt man neue Rechenknoten in das verteilte Systeme auf, können sie die Kommunikation existierender Knoten erheblich beeinflussen
  - auch wenn das Kommunikationssystem noch genügend Kapazität für neue Knoten besitzt und keine Überlastsituation erzeugt wird

☞ Ereignisgesteuerte Kommunikationssysteme sind nicht für die Kapselung des Zeitverhaltens geeignet!

Zeitgesteuerte Kommunikationssysteme

Kommunikation basiert auf Zustandsnachrichten (s. Folie VIII/18)

- zumindest ist das Kommunikationssystem autonom gesteuert
- Uhrensynchronisation zwischen allen Kommunikationsteilnehmern

$\rightsquigarrow$ Nachrichten können nur an definierten Zeitpunkten versandt werden

- das Kommunikationssystem unterbindet den unkoordinierten Nachrichtenversand und schützt somit den Kommunikationskanal
- festgelegt durch statische Sende- und Empfangstabellen

$\rightsquigarrow$ im Kommunikationssystem ist die Auslastung bestimmbar

- die Auslastung hängt lediglich von der Kommunikationssteuerung und nicht von den teilnehmenden Knoten ab

$\rightsquigarrow$ neu hinzukommende Knoten können die Kommunikation existierender Knoten nicht beeinflussen

- nur die verfügbare Kommunikationsbandbreite entscheidet, ob ein neuer Knoten in das verteilte System aufgenommen werden kann

☞ Zeitgesteuerte Kommunikationssysteme kapseln das zeitliche Verhalten eines Knotens!

Regelung des Datenflusses

Aufgabe der Netzwerkschicht des ISO OSI Referenzmodells [7]

Steuerung der Geschwindigkeit des Informationsflusses zwischen Sender Empfänger, so dass der Empfänger mit dem Sender Schritt halten kann

- Sender werden veranlasst, nur soviele Nachrichten zu übertragen, wie der Empfänger auch aufnehmen kann
- Empfänger bestimmen maximale Kommunikationsgeschwindigkeit

Zweck der Maßnahme ist es, eine Überschreitung der Aufnahmekapazität des Empfängers zu vermeiden und diesen nicht zu überlasten

- ereignisgesteuerte Systeme sind besonders von Überlast bedroht:
  - Nachrichtenversand/-empfang verursacht Unterbrechungen
  - Pufferplatz für zu sendende/empfangende Nachrichten ist begrenzt
  - Nachrichten werden von einzuplanenden/-lastenden Jobs verarbeitet
- die Steuerung des Informationsflusses geschieht explizit oder implizit

Explizite Flusskontrolle

Voraussetzung — die jedoch oft übersehen wird — ist, dass sich ein Sender im Kontrollbereich eines Empfängers befindet

- ein Empfänger kann Gegendruck (engl. *back pressure*) auf den Sender ausüben, indem er die Übertragungsrate kontrolliert
  - Flusskontrolle durch Gegendruck (engl. *back-pressure flow control*)
- der Gegendruck des Empfängers äußerst sich dadurch, dass beim Sender die Übertragung weiterer Daten hinausgezögert wird
  - empfangene Nachrichten werden ohne weitere Behandlung verworfen
  - Empfangsbestätigungen werden bewusst und gezielt zurückgehalten
- das weitere Vorankommen des Senders hängt ab vom Zustand und vom Verhalten des Empfängers

Protokolle mit 1-zu-1-Synchronisation zwischen Sender und Empfänger bilden die Grundlage für Ereignisnachrichten

- Maximierung der Bandbreitenausnutzung ist nebensächlich (in EZS)

Explizite Flusskontrolle (Forts.)

Bedeutung (für Echtzeitsysteme) haben Protokolle, die nach dem Schema „sende und warte“ (engl. *send and wait*, auch *stop and wait*) arbeiten

PAR (engl. *positive acknowledgement and retransmission*)

senderseitige Schritte $\rightsquigarrow$ Fehlermaskierung

- die Quelle sendet ein Paket, startet einen Zeitgeber und erwartet eine Empfangsbestätigung, bevor ein neues Paket gesendet wird
- bleibt die Empfangsbestätigung aus, läuft der Zeitgeber ab und das Paket wird wiederholt gesendet
- ist die maximale Anzahl von Wiederholungen (desselben Pakets) erreicht, wird der Sendevorgang abgebrochen $\mapsto$ *Exception*

empfangsseitige Schritte $\rightsquigarrow$ Duplikatunterdrückung

- nimmt die Senke ein eingetroffenes Paket an, sendet sie eine Empfangsbestätigung an die Quelle zurück
- gleicht die Laufnummer des Pakets der des von derselben Quelle zuletzt empfangenen Pakets, wird das Paket verworfen

Explizite Flusskontrolle (Forts.)

Gefahr vor Überlast durch „Flattern“ (engl. *thrashing*)

Wiederholungen von Nachrichten bei Zeitüberschreitung (engl. *timeout*)

- Ursache kann sein, dass das Kommunikationssystem die gegebene Last kaum noch bzw. nicht mehr bewältigen kann
  - anfällig sind Systeme, deren Normallast nahe der Maximallast liegt
  - Wiederholungen wegen Übertragungsfehler sind dann bes. kritisch
  - ein abrupter Leistungsabfall (Durchsatz) kann die Folge sein
- Überlast erhöht das Risiko von Zeitüberschreitungen, woraufhin zusätzliche Last anfällt...
  - die die bereits vorhandene Überlast weiter ansteigen lässt
  - die Zeitüberschreitungen dadurch noch wahrscheinlicher macht
- ebenso abrupt, wie die Überlastsituation aufgetreten ist, wird sie auch wieder verschwinden
  - ggf. muss nur eine einzige Kommunikation erfolgreich abschließen

Thrashing ist unbedingt zu vermeiden ($\mapsto$ *rare-event situation*) und d.h.:

(a) kontinuierliche Überwachung der Betriebsmittelanforderungen

(b) Flusskontrolle durch Gegendruck, bei beobachtetem Leistungsabfall

Implizite Flusskontrolle

Voraussetzung ist globale Zeit (engl. *global time*)

Sender und Empfänger treffen vorher (z.B. beim Systemstart) eine Übereinkunft über die Sendezeitpunkte von Nachrichten

- der Sender verpflichtet sich, Nachrichten nur zu den vereinbarten Zeitpunkten zum Empfänger zu versenden
- der Empfänger verpflichtet sich, alle Nachrichten des Senders zu empfangen, solange dieser seine Verpflichtung einhält

unidirektionale Kommunikation $\mapsto$ Bestätigungen für eingetroffene Nachrichten entfallen, Fehlererkennung ist Aufgabe des Empfängers:

- er weiß, wann eine erwartete Nachricht nicht mehr eintreffen kann
- globale Zeit erlaubt ihm, den Zeitpunkt auf $t_s + d_{max}$ festzulegen
  - für jeden ihn betreffenden Sendezeitpunkt t_s
  - und für die maximale Protokolllatenz d_{max}

Fehlertoleranz (aktive Redundanz) durch *Multicast* ist gut umsetzbar

- gleichzeitige Übertragung von k Kopien derselben Nachricht
- bevorzugt über mehrere Kanäle, soweit verfügbar und möglich

Gegenüberstellung

Vor dem Hintergrund *Hard Real-Time System* (HRTS, [9, S. 153])

Charakteristik	Flusskontrolle		HRTS
	explizit	implizit	
Steuersignal	Der Empfänger muss in der Lage sein, die Sendeereignisse des Senders steuern zu können.	Die Signale werden bei Fortschreiten der Echtzeit mit konstanter Rate generiert.	Der Empfänger kann die Ereignisse im Kontrollbereich des Senders nicht völlig kontrollieren.
Fehlererkennung	Sender	Empfänger	Empfänger
Thrashing	anfällig	nicht anfällig	ist zu vermeiden
Multicast	schwer	einfach	gefordert

Flusskontrolle macht die Prozessschnittstelle zwischen kontrolliertem Objekt und Echtzeitrechensystem besonders kritisch

- nicht alle Ereignisse, die im kontrollierten Objekt anfallen, werden im Kontrollbereich des Echtzeitrechensystems liegen
- ein Alarmschauer kann die Folge sein, wenn mehr Ereignisse im kontrollierten Objekt anfallen, als im Entwurf angenommen wurde

Netzzugangsprotokolle

Verwalten den gemeinsam benutzten physikalischen Übertragungskanal

☞ Zugriffskontrolle für die exklusive Vergabe eines Übertragungskanals leistet das Netzzugangsprotokoll (engl. *media-access protocol*)

- unterstützt (externe Kontrolle) bzw. implementiert (autonome Kontrolle) dabei die Kommunikationssteuerung
- vermeidet bzw. behandelt Kollisionen durch gleichzeitiges Senden
  - um einen Mindestdurchsatz zu garantieren und
  - Latenz(schwankungen) zu begrenzen
- als Verfahren kommen allgemein zum Einsatz:
  - CSMA (CA/CD/CR)
  - *Token*
  - *Minislotting*
  - *Master/Slave*
  - TDMA

CSMA

(engl. *carrier sense multiple access*)

Klasse von verteilt arbeitenden Zugriffsverfahren, die keine zentrale Kontrolle (beim Schreiben) erfordern

- jeder Teilnehmer hört beim Schreiben gleichzeitig den Bus auf kollidierende Schreibzugriffe ab $\mapsto$ *carrier sense*

CA (engl. *collision avoidance*)

- Kollisionsvermeidung durch zufällige Wartezeit zum Schreiben

CD (engl. *collision detection*)

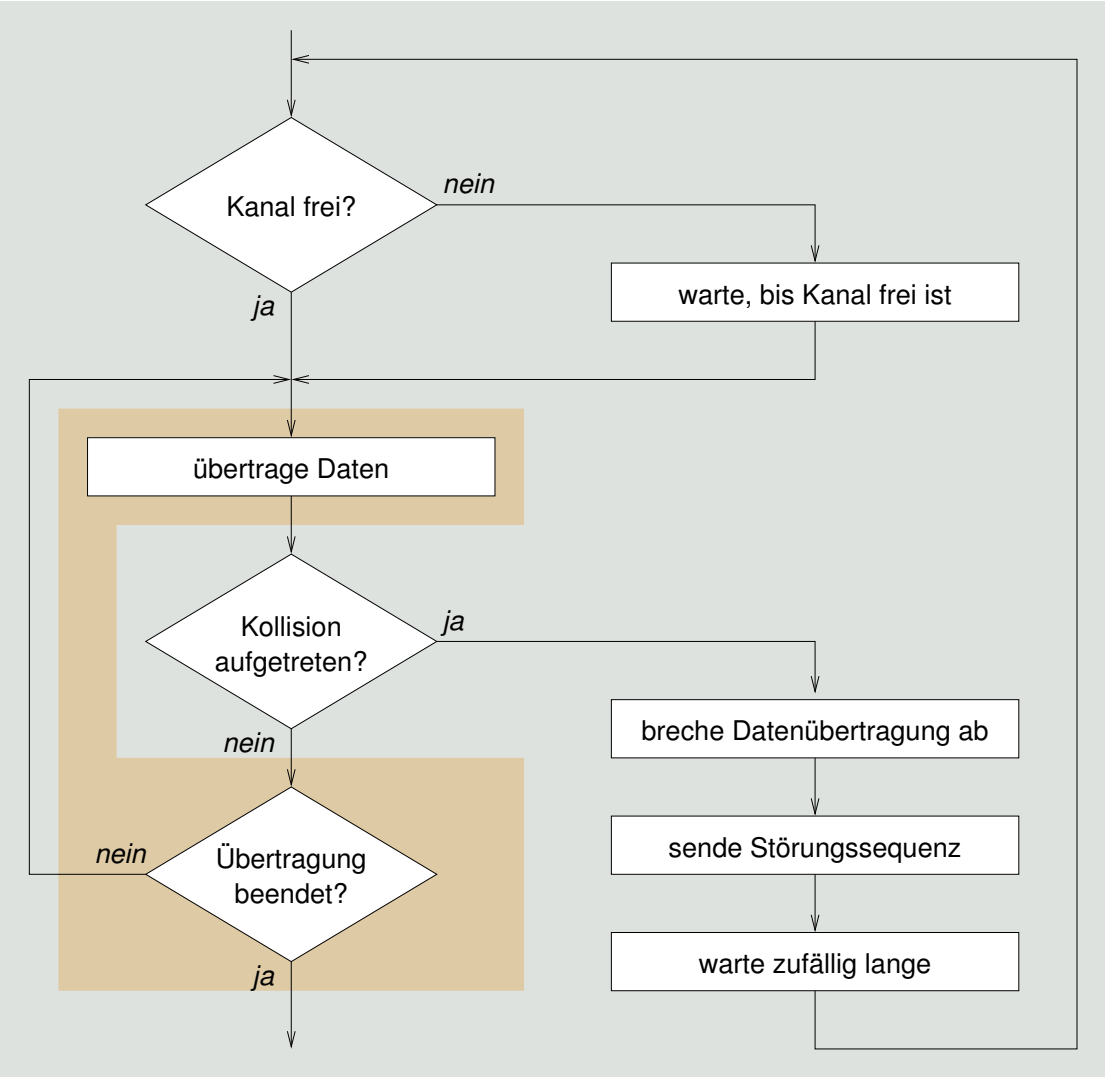
- im Konfliktfall werden die Schreibzugriffe zurückgenommen
- jeder betroffene Teilnehmer wartet zufällig lang
- nach den Wartephasen werden die Schreibzugriffe wiederholt

CR (engl. *collision resolution*) z.B. durch Bitarbitrierung

- Nachrichten gehen eindeutige Identifikationen/Prioritäten voran
- im Konfliktfall geben „Verlierer“ ihre Schreibzugriffe auf
- nach endlich vielen Schritten/Takten bleibt ein Gewinner übrig

CSMA/CD

Standardprotokoll für Halbduplexbetrieb



Ethernet (Xerox [14])

- lokales Netzwerk
  - quittierungsfrei
- Varianten:
  - *thick/thin*
  - *fast/gigabit*
- Probleme:
  - Wartezeiten
  - Fairness

CSMA/CD (Forts.)

Verringerung der Wahrscheinlichkeit von Kollisionen

LON (engl. *local operating network*, [4]) Gebäudeautomatisierung

- Busteilnehmer (Knoten): Neuron-Chip mit drei 8-Bit Prozessoren

  network CPU $\mapsto$ Schichten 2–6 des OSI-Referenzmodells

  media-access CPU $\mapsto$ Netzzugangsprotokoll (Schicht 1)

  application CPU $\mapsto$ Anwendung, Knotenfunktion
- Knoten greifen nach zufällig langer Verzögerung auf den Bus zu
  - am Anfang von (regulären) Übertragungen
  - während Übertragungswiederholungen als Folge von Kollisionen
  - nach Rücknahme des Trägers (engl. *carrier*) des voherigen Transfers
- die Größe des „Wartefensters“ ist eine Funktion der Kanallast
  - speziell ausgelegt, um die Wahrscheinlichkeit von Kollisionen bei hoher Last zu minimieren $\mapsto$ p-persistentes CSMA
  - Flusskontrolle kommt durch stochastischen Gegendruck zustande (engl. *stochastic back-pressure flow control*)

CSMA/CR

Kollisionensauflösung durch Arbitrierung: Bitarbitrierung

CAN (engl. *control area network*, [8]) Automobilindustrie

- jeder gesendeten Nachrichten geht ein Nachrichtentyp voran:
  - beschreibt den Inhalt einer Nachricht, verwendet zur Arbitrierung
  - je kleiner der Wert des Typs, desto höher die Priorität der Nachricht
- die Übertragung beginnt mit dem höchstwertigsten Bit des Typs
  - sendet ein Knoten eine 1 (rezessives Bit), empfängt er aber eine 0 (dominantes Bit), so bricht er seine Übertragung ab
  - erneuter Sendeversuch, nachdem Busruhe erkannt wurde: 11 Bitzeiten auf Ruhepotential (rezessiver Buspegel)
- Beispiel: vier Knoten senden gleichzeitig...

Nachrichtentyp 1431 $\mapsto$ ~~1 0 1 1 0 0 1 0 1 1 1~~
Nachrichtentyp 1337 $\mapsto$ ~~1 0 1 0 0 1 1 1 0 0 1~~
Nachrichtentyp 1335 $\mapsto$ ~~1 0 1 0 0 1 1 0 1 1 1~~
Nachrichtentyp 1332 $\mapsto$ 1 0 1 0 0 1 1 0 1 0 0
Bus 1 0 1 0 0 1 1 0 1 0 0 $\rightsquigarrow$ 1332 hat Vorrang

Token

Vergabe von Übertragungsrechten

Knoten im Besitz eines Übertragungsrechtes ($\mapsto$ *Token*) können den Bus zum Schreiben verwenden

- das Bussystem ist als Ring ausgelegt (engl. *token-ring bus*)
  - das *Token* umläuft den Ring von Knoten zu Knoten: aktive Topologie
- das Antwortverhalten bestimmt sich durch zwei Zeitparameter:
  THT (engl. *token-hold time*)
    - längste Zeit, für die ein Knoten den *Token* halten darf
  TRT (engl. *token-rotation time*)
    - längste Zeit, die ein *Token* zum kompletten Umlauf benötigt
- ernstes Problem: Ausfall des Knotens, der den *Token* besitzt
  - Verlust des *Token* wird durch Zeitüberschreitung festgestellt
  - einer der anderen Knoten (welcher?) erzeugt einen neuen *Token*

Profibus (engl. *process field bus*, [3]) Prozessautomatisierung

Minislotting

Zeitkontrolliertes Zugangsverfahren

Zeit wird in eine Folge von „Minischlitzen“ (engl. *mini slot*) unterteilt, jeder länger als die Ausbreitungsverzögerung des Kanals

- jedem Knoten ist eine eindeutige Anzahl von *Minislots* zugeordnet
  - zu verstreichende Zeit der Ruhe (auf dem Kanal) vor dem Schreiben

ARINC 629 (*Aeronautical Radio Incorporated*, [1]) Flugzeugindustrie

- ein Warteraumprotokoll ähnlich zum „Bäckereialgorithmus“ [11]
  - in einem ersten Zeitintervall finden sich Prozesse, die schreiben wollen, in einen (verteilten) Warteraum ein
  - im nachfolgenden Zeitintervall ($\mapsto$ Epoche) können alle wartenden Prozesse schreiben, bevor neue den Warteraum betreten dürfen
- kein (böswilliger) Knoten kann den Bus monopolisieren
  - Busschutz (engl. *bus protection*)

Minislotting (Forts.)

ARINC 629 — Zeitparameter zur Kontrolle des Zugangs zum Übertragungsmedium

SG (engl. *synchronization gap*)

- kontrolliert Zutritt zum Warteraum: identisch für alle Knoten

TG (engl. *termination gap*)

- kontrolliert den Buszugriff: unterschiedlich für jeden Knoten

TI (engl. *transmit interval*)

- verhindert Monopolisierung des Busses: identisch für alle Knoten

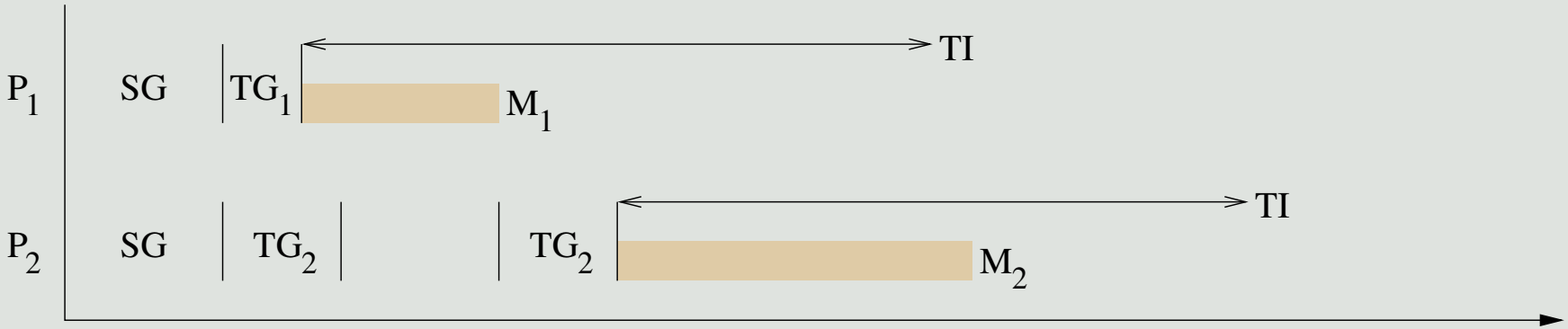
Relationen, die zwischen den Zeitparametern (*Timeouts*) definiert sind:

- $SG > \max(TG_i)$, für alle Knoten bzw. Prozesse i
- $TI > SG$

Minislotting (Forts.)

ARINC 629 — Protokollverlauf

Prozesse P_1 und P_2 wollen gleichzeitig senden, $TG_1 < TG_2$:



1. P_1 und P_2 warten SG Zeiten Busruhe ab, betreten den Warteraum
2. jeder Prozess i wartet zusätzlich noch seine TG_i Zeiten Busruhe ab
3. wegen $TG_1 < TG_2$ sendet P_1 zuerst seine Nachricht M_1
4. P_2 erkennt Verkehr auf den Bus; wartet, bis M_1 übertragen wurde
5. P_2 wartet TG_2 Zeiten Busruhe ab und sendet seine Nachricht M_2
6. P_1 und P_2 können frühestens nach TI Zeiten erneut senden

Master/Slave

Zentraler *Master* kontrolliert Buszugriffe

FIP (*factory instrumentation protocol*, [12]) Prozessautomatisierung

- arbeitet nach dem Modell „Produzent-Verteiler-Konsument“
  - Produzent $\mapsto$ pro Transaktion genau ein Sender
  - Verteiler $\mapsto$ Schiedsrichter (engl. *bus arbitrator*, BA)
  - Konsument $\mapsto$ pro Transaktion ggf. mehrere Empfänger
- Transaktionen verlaufen periodisch und in vier Schritten ab:
  1. BA gibt einen „Variablennamen“ per Sammelaufruf bekannt
  2. Produzent und Konsumenten erkennen die aufgerufene Variable
  3. der Produzent gibt den Variablenwert an die Konsumenten ab
  4. die Konsumenten nehmen den Variablenwert an, sofern benötigt
- Variablennamen sind systemweit eindeutige Bezeichner für...
  - *Boolean*, *Integer*, *Bitstring*, *Bytestring*, *General Time*, Verbünde
- freie Zeit kann für sporadische Daten genutzt werden
  - abfragen (engl. *polling*) der Knoten durch den BA

LIN (*local interconnect network*, [16]) Automobilindustrie

TDMA

(engl. *time division multiple access*)

Übertragungsrechte werden durch Voranschreiten der Echtzeit vergeben:

- Voraussetzung: fehlertolerante globale Zeitbasis in allen Knoten
- statische Aufteilung der gesamten Kanalkapazität in Zeitschlitze
  - jeder Knoten (Busteilnehmer) hat einen eindeutigen Sendeschlitz
  - TDMA Runde $\mapsto$ Sequenz von Sendeschlitzen einer Knotengruppe
    - in jeder Runde kann ein Knoten eine Nachricht übertragen
    - ist nichts zu versenden, bleibt ein Rahmen (engl. *frame*) leer
  - Runden wiederholen sich $\mapsto$ Gruppentakt (engl. *cluster cycle*)
    - Sequenz verschiedener TDMA-Runden
  - die Gruppentaktlänge bestimmt die Periodizität des TDMA-Systems

TTP (engl. *time-triggered protocol* [10])

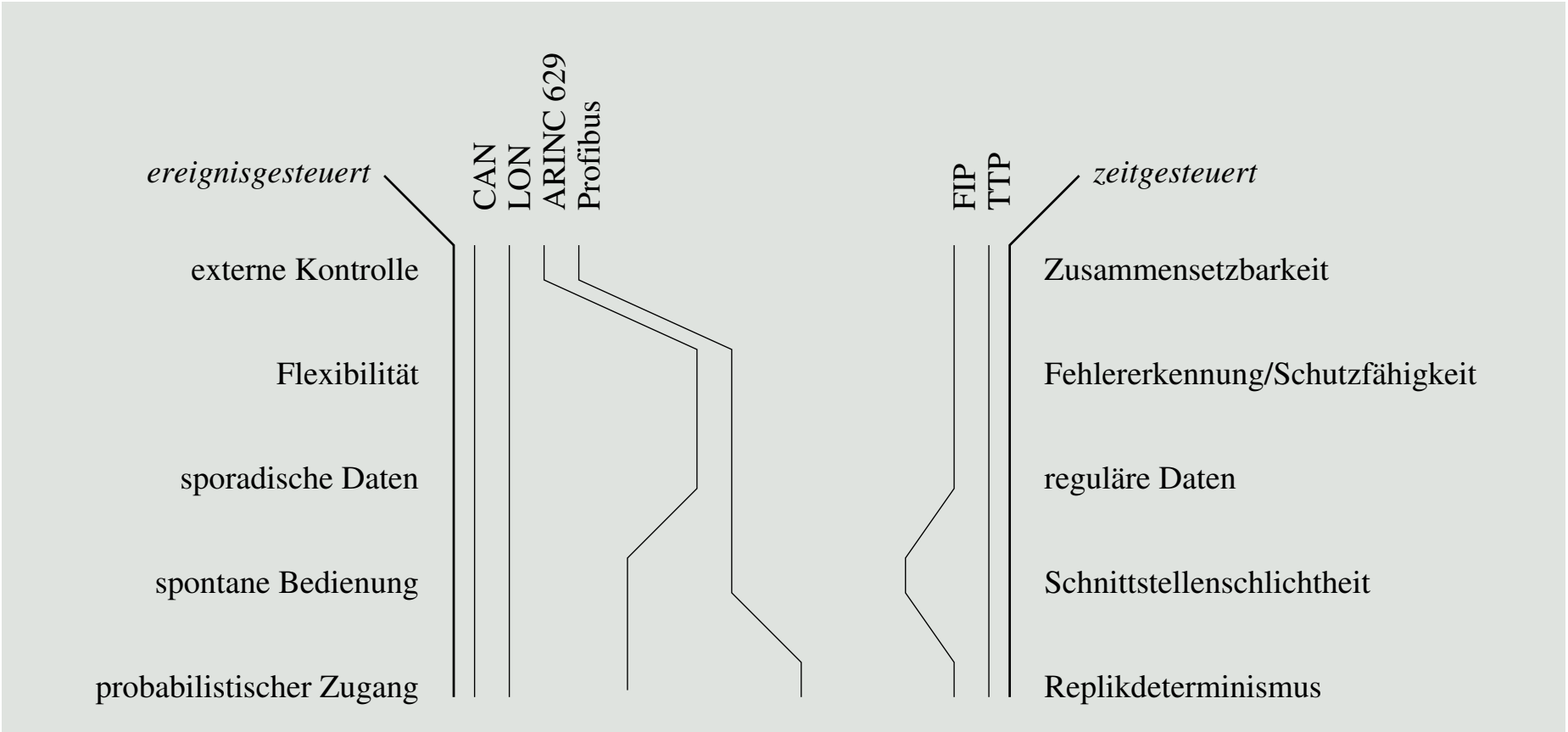
- Varianten, die in der Automobilindustrie Verwendung finden:

  byteflight ([2], Sicherheits- und Informationsbussystem: SI-BUS)

  FlexRay ([5], zeit- *und* ereignisgesteuerter Bus)

Vergleich

Entwurfsentscheidungen [9, S. 164]



Flexibilität
sofortige Antwort
sporadische Daten

versus

Zusammensetzbarkeit
Fehlererkennung
reguläre Daten

Ereignisgesteuerte Kommunikationssysteme

Transport von Ereignisnachrichten

Rechtzeitigkeit bzw. zeitliche Kontrolle ist eine globale Angelegenheit des gesamten verteilten Rechensystems

- bei ereignisgesteuerten Protokollen ist zeitliche Kontrolle an der Netzwerkschnittstelle undefiniert; das bedeutet:
  - ein einziger gemeinsamer Transportkanal schürt Zugriffskonflikte
    - Lösungsansätze sind zufällige Zugriffe (Ethernet), vorgegebene Zugriffsreihenfolgen (*token ring*) und priorisierte Nachrichten (CAN)
    - ohne jedoch das Grundproblem vom Tisch zu bekommen...
  - bei getrennten Transportkanälen droht Überlastung des Empfängers
- diese Kontrolle ist weiter oberhalb (des KS) sicherzustellen
  - in der Diensteschicht (engl. *middleware*) bzw. verteilten Anwendung
  - sie muss nicht deterministisches Systemverhalten „kaschieren“
  - vergleichsweise leicht bei weicher Echtzeit, schwer bis unmöglich sonst

☞ die Architektur ist nicht zusammensetzbar bzgl. Rechtzeitigkeit

Zeitgesteuerte Kommunikationssysteme

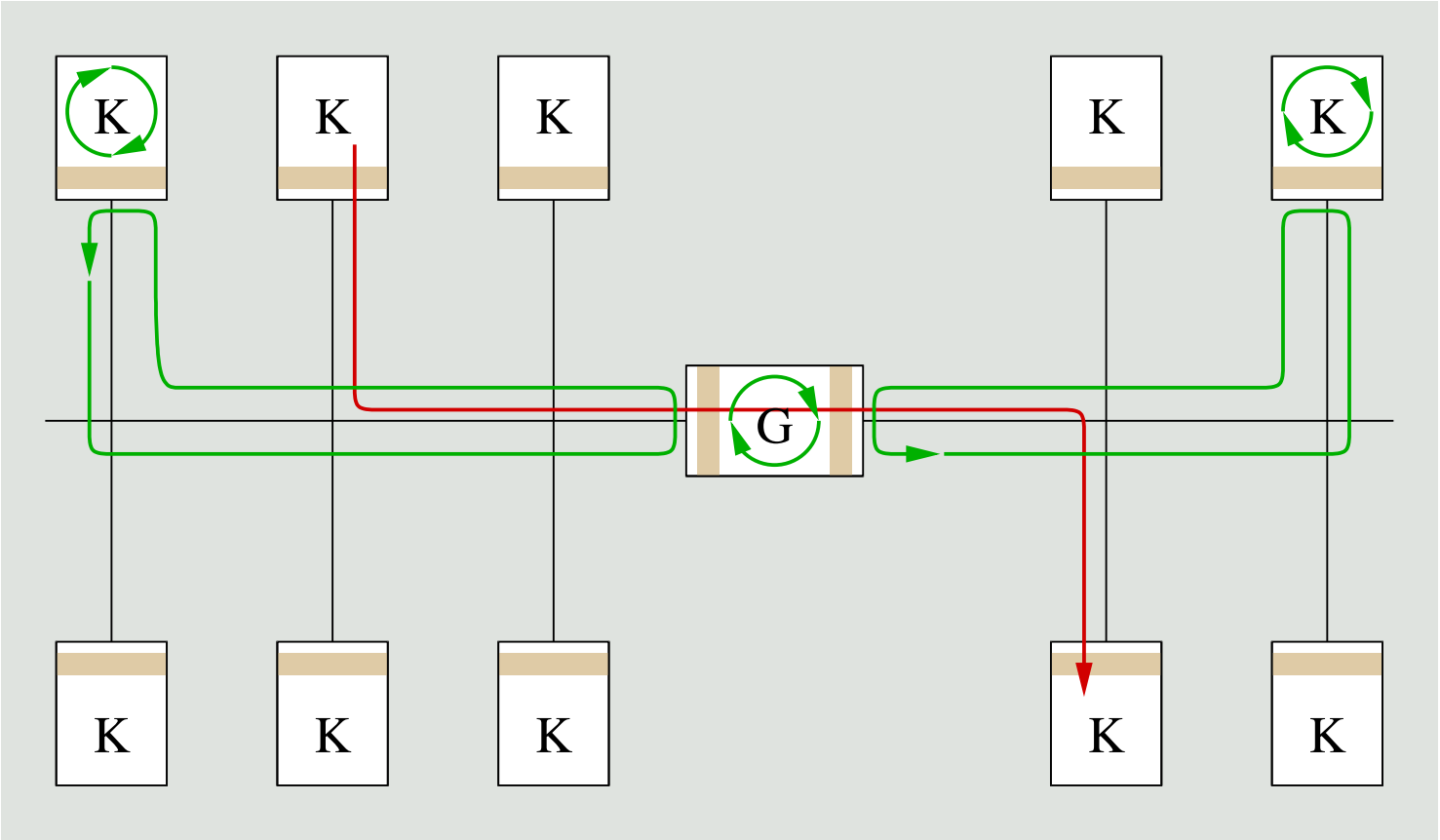
Transport von Zustandsnachrichten

Rechtzeitigkeit bzw. zeitliche Kontrolle ist eine lokale Angelegenheit des Kommunikationssystems

- bei zeitgesteuerten Protokollen ist die zeitliche Kontrolle an der Netzwerkschnittstelle wohl definiert
  - Nachrichten werden zu festen, vorgegebenen Zeitpunkten transferiert
    - auf Basis einer Ablauftabelle in der Kommunikationssteuerung
  - Knotenrechner haben keinen Einfluss auf das Zeitverhalten des KS
    - die Netzwerkschnittstelle ist frei von Steuersignalen
    - sie hat eine Daten teilende (engl. *data sharing*) Semantik
    - Steuerfehlerausbreitung (*control-error propagation*) ist unmöglich
- sämtliche zeitlichen Eigenschaften wurden beim Entwurf festgelegt
  - Knoten sind unabhägig von der Netzwerkschnittstelle testbar
  - Systemintegration verändert nicht das Zeitverhalten der Schnittstelle

☞ die Architektur ist zusammensetzbar in Bezug auf Rechtzeitigkeit

Zeitgesteuerte vs. Ereignisgesteuerte Kommunikation



Ereignissteuerung $\mapsto$ Steuersignale passieren die Netzwerkschnittstelle!

Zeitsteuerung $\mapsto$ Steuersignale passieren die Netzwerkschnittstelle nicht!

Gliederung

Resümee

Erscheinungsform $\mapsto$ verteiltes Echtzeitrechensystem

- physikalische Verteilung, steigende Komplexität

Anforderungen an verteilte Echtzeitsysteme

- Erhöhung der Rechenleistung, Beherrschung von Komplexität
- Zusammensetzbarkeit, Skalierbarkeit, Verlässlichkeit

grundlegender Aufbau verteilter Echtzeitrechensystem

- Netzwerkschnittstelle, Kommunikationssteuerung, Topologie
- externe vs. autonome Kontrolle; Ereignis- vs. Zustandsnachrichten

Kommunikationssysteme für verteilte Echtzeitsysteme

- Ereignissteuerung: externe Kontrolle + Ereignisnachricht
- Zeitsteuerung: autonome Kontrolle + Zustandsnachricht
- zeitliche Kapselung + implizite Flusskontrolle $\rightsquigarrow$ zusammensetzbar
- Netzzugangsprotokolle bestimmen Kommunikationssteuerung

Literaturverzeichnis

[1] Audsley, N. C. ; Grigg, A. :
Timing Analysis of the ARINC 629 Databus for Real-Time Applications.
In: *Proceedings of the ERA Avionics Conference and Exhibition*.
Heathrow, UK : ERA Technology Ltd, Nov. 20–21, 1996, S. 10.1.1–10.1.11

[2] Berwanger, J. ; Peller, M. ; Griessbach, R. :
byteflight — A New Protocol for Safety Critical Applications.
In: *Proceedings of the 28th FISITA World Automotive Congress*.
Seoul, Korea : FISITA, Jun. 12–15, 2000

[3] *Kapitel* 3.
In: Deutsches Institut für Normung:
Der Profibus.
Berlin, Köln : Beuth-Verlag, 1991 (DIN 19245)

[4] Echelon Corporation:
Enhanced Media Access Control with LonTalk Protocol.
Jan. 1995

[5] FlexRay Consortium:
FlexRay protocol specification 2.1 Revision A.
FlexRay Consortium, 2005. –
`http://www.flexray.com`

Literaturverzeichnis (Forts.)

[6] Hess, R. K. ; Bass, D. I. ; Baca, J. B.:
Control systems: crashproof code.
In: *IEEE Spectr.* 41 (2004), Sept., S. 48–53.
http://dx.doi.org/10.1109/MSPEC.2004.1330810. –
DOI 10.1109/MSPEC.2004.1330810. –
ISSN 0018–9235

[7] International Organization for Standardization:
Information technology – Open Systems Interconnection – Basic Reference Model: The Basic Model.
ISO, 1994 (ISO/IEC 7498-1)

[8] International Organization for Standardization:
Road vehicles — Control area network (CAN) — Parts 1–4.
ISO, 2003 (ISO 11898)

[9] Kopetz, H. :
Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications.
Kluwer Academic Publishers, 1997. –
ISBN 0–7923–9894–7

Literaturverzeichnis (Forts.)

[10] Kopetz, H. ; Grünsteidl, G. :
TTP—A Time-Triggered Protocol for Fault-Tolerant Real-Time Systems.
In: *Proceedings of the Twenty-Third Annual International Symposium on Fault-Tolerant Computing (FTCS-23)*.
Toulouse, France : IEEE, Jun. 22–24, 1993, S. 524–533

[11] Lamport, L. :
A New Solution of Dijkstra's Concurrent Programming Problem.
In: *Communications of the ACM* 8 (1974), Nr. 7, S. 453–455

[12] Leterrier, P. :
The FIP Protocol / WorldFIP Europe.
Nancy, France, 1992. –
Forschungsbericht

[13] Malek, M. :
Responsive Computer Systems.
In: *Real-Time Systems* 7 (1994), Nr. 3. –
Special Issue

[14] Metcalfe, R. M. ; Boogs, D. R.:
Ethernet: Distributed Packet Switching for Local Computer Networks.
In: *Communications of the ACM* 19 (1976), Jul., Nr. 5, S. 395–404

Literaturverzeichnis (Forts.)

[15] Poledna, S. :
Replica Determinism in Faul-Tolerant Distributed Real-Time Systems.
Vienna, Austria, Technical University of Vienna, Diss., 1995. –
Research Report 28/95

[16] Specks, J. W. ; Rajnák, A. :
LIN—Protocol, Development Tools, and Software Interfaces for Local Interconnect Networks in Vehicles.
In: *Proceedings of 9th International Conference on Electronic Systems for Vehicles*.
Baden-Baden, Germany, Okt. 5/6, 2000