Echtzeitsysteme

Architektur

17. Januar 2011

Überblick

Schönheit, Stabilität, Nützlichkeit

Venustas, *Firmitas*, *Utilitas*: Die drei Prinzipien von Architektur [1]

Fieberthermometer

- 1 „elektr. Steuergerät“
- weiche Echtzeit

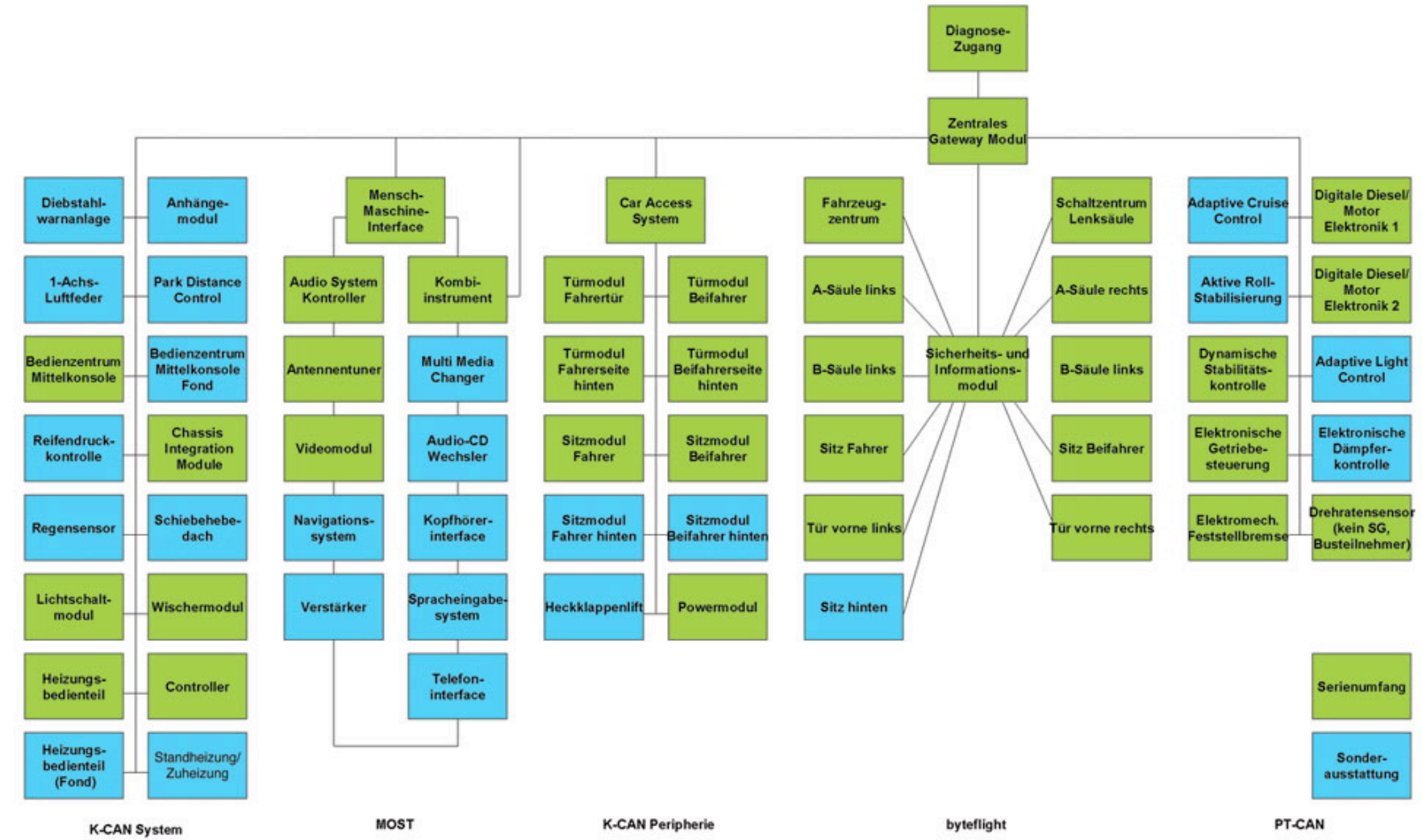
Automobil (7er BMW, E65)

- $\geq 38 + 25$ elektr. Steuergeräte
- weiche bis harte Echtzeit

☞ die Funktion eines Objektes bestimmt seine physikalische Form [1]

Verteiltes System auf Rädern

Vernetzung beim 7er BMW, Baureihe E65



Quelle: BMW AG

Abstraktion

Kapselung logischer Funktionen

Erfassung der wesentlichen funktionalen und nicht-funktionalen (insb. zeitlichen) Eigenschaften eines Objektes

- Automobil $\mapsto$ Mechatronik $\mapsto$ Steuergerätenetz $\mapsto$ Steuergerät

Verdeckung aller irrelevanten Details der Implementierung hinter einer einfachen und stabilen Schnittstelle

- Modul, abstrakter Datentyp, Klasse, Objekt, ...
- Komponente (von lat. *componere*, zusammensetzen)
  - in der Informatik ein unabhängiges Softwaremodul, das in anderen Softwaresystemen wiederverwendet werden kann
  - im Maschinenbau eine aus verschiedenen Elementen bestehende Funktionseinheit eines übergeordneten Systems

Abstraktion (Forts.)
Fehlertransparenz

Zuschnitt und Platzierung der Schnittstellen bilden wesentliche Aktivitäten des Entwurfs eines Echtzeitrechensystems

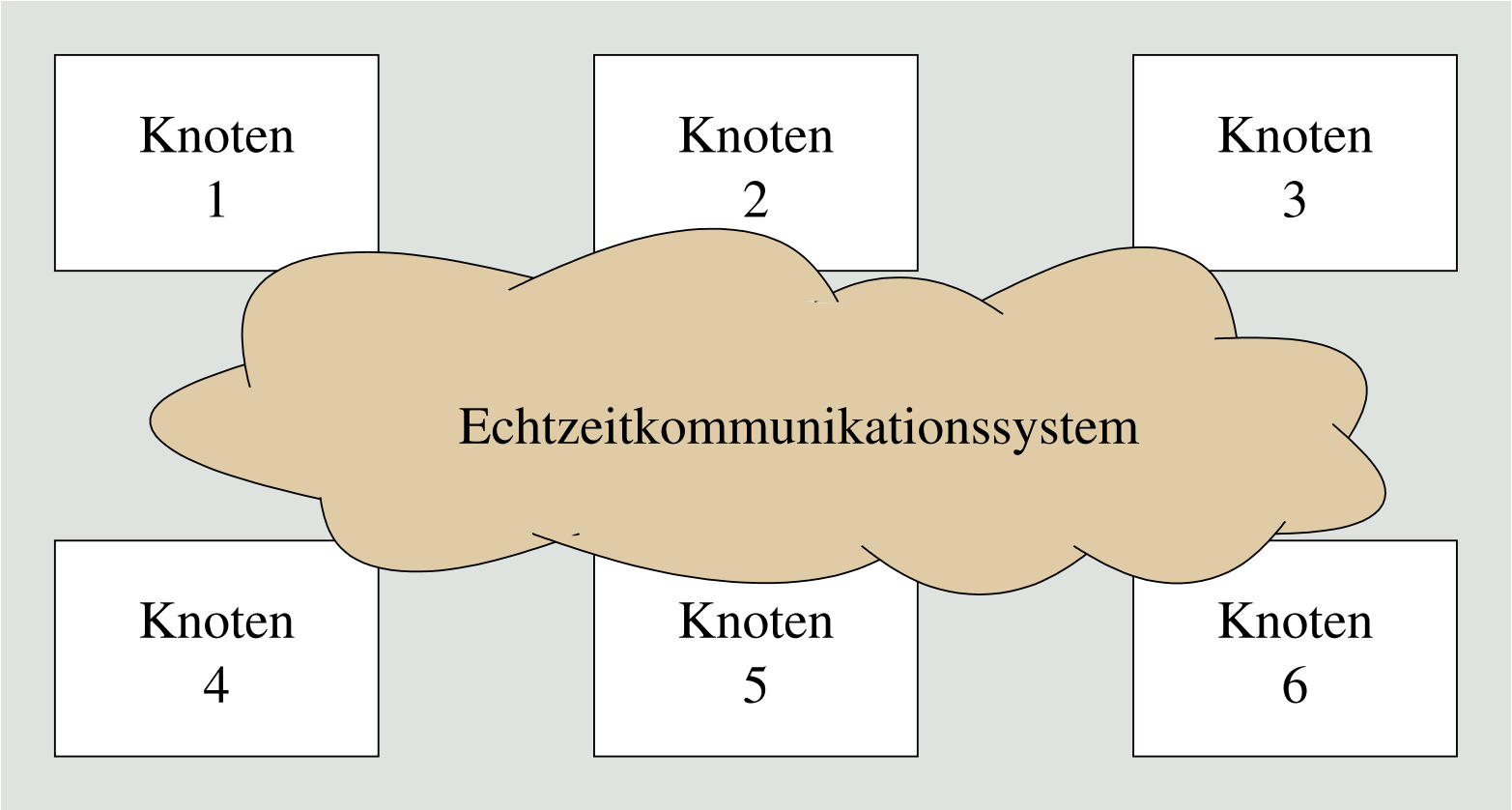
- bestimmen die Struktur und Eigenschaften des Systems als Ganzes

Herausforderung dabei ist, dass die Abstraktionen 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

Verteiltes Echtzeitrechensystem

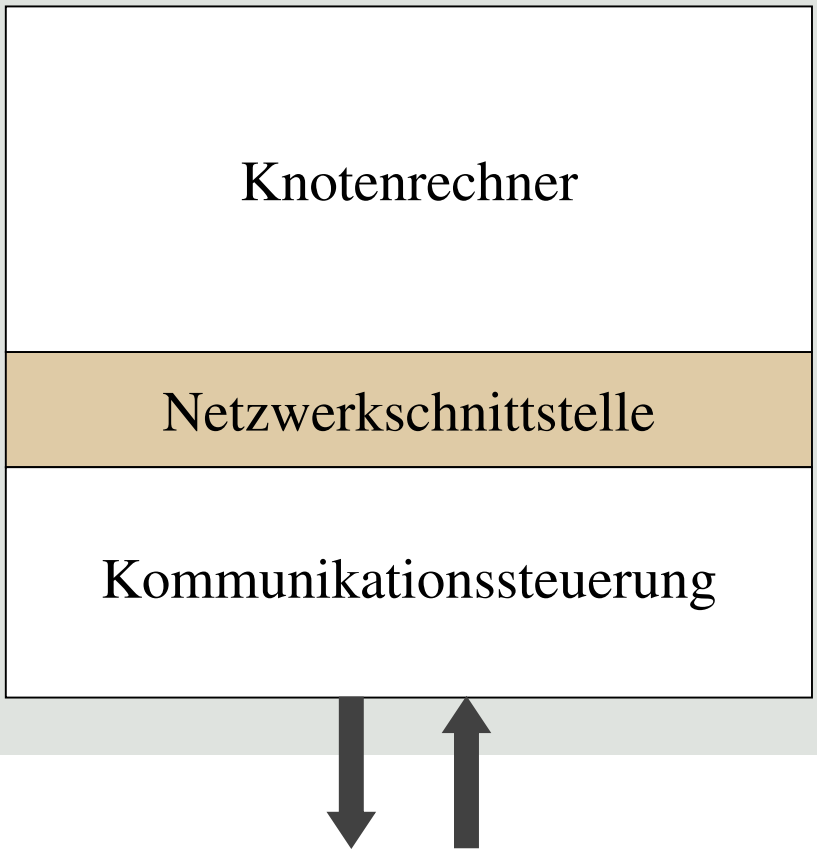
Rechenbetonte Gerätegruppe (engl. *computational cluster*)



- 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 [2]
- 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

Netzwerkschnittstelle (Forts.)

Entwurfsraum (engl. *design space*)

Datensemantik und Steuerungsstrategie jeweils in Bezug auf Sender und Empfänger resultieren in 16 Kombinationsmöglichkeiten [3, S. 32]:

Sender / Empfänger		Ereigniseintritt		Zustandswert	
		extern	autonom	extern	autonom
Ereigniseintritt	ext.	Ereignisnachricht	kann sein	ja	ja
	aut.	nein	kann sein	ja	ja
Zustandswert	ext.	ja	kann sein	ja	ja
	aut.	nein	kann sein	ja	Zustandsnachricht

- die mit „nein“ markierten Kombinationen machen keinen Sinn:
  - die Sendezeitpunkte werden beliebig vom Empfangstakt abweichen
    - mehrere Sendeereignisse könnten in einen Empfangstakt fallen
  - Nachrichten, die Ereignisdaten beinhalten, werden ggf. verworfen
- besondere Bedeutung haben Ereignis- und/oder Zustandsnachrichten

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

Netzübergänge taktgesteuerter verteilter Systeme haben Schnittstellen zur gemeinsamen Benutzung von Daten (engl. *data-sharing interface*)

- durch die Netzübergangskomponenten verlaufen keine Steuersignale
- autonome Kontrolle der Gerätegruppen ist trotz Kopplung gesichert

Netzübergangsknoten als Entwicklungshelfer

Altsysteme (engl. *legacy systems*)

Echtzeitrechensysteme ab einer gewissen Komplexität werden nicht von Grund auf (engl. *from scratch*) und komplett neu entwickelt

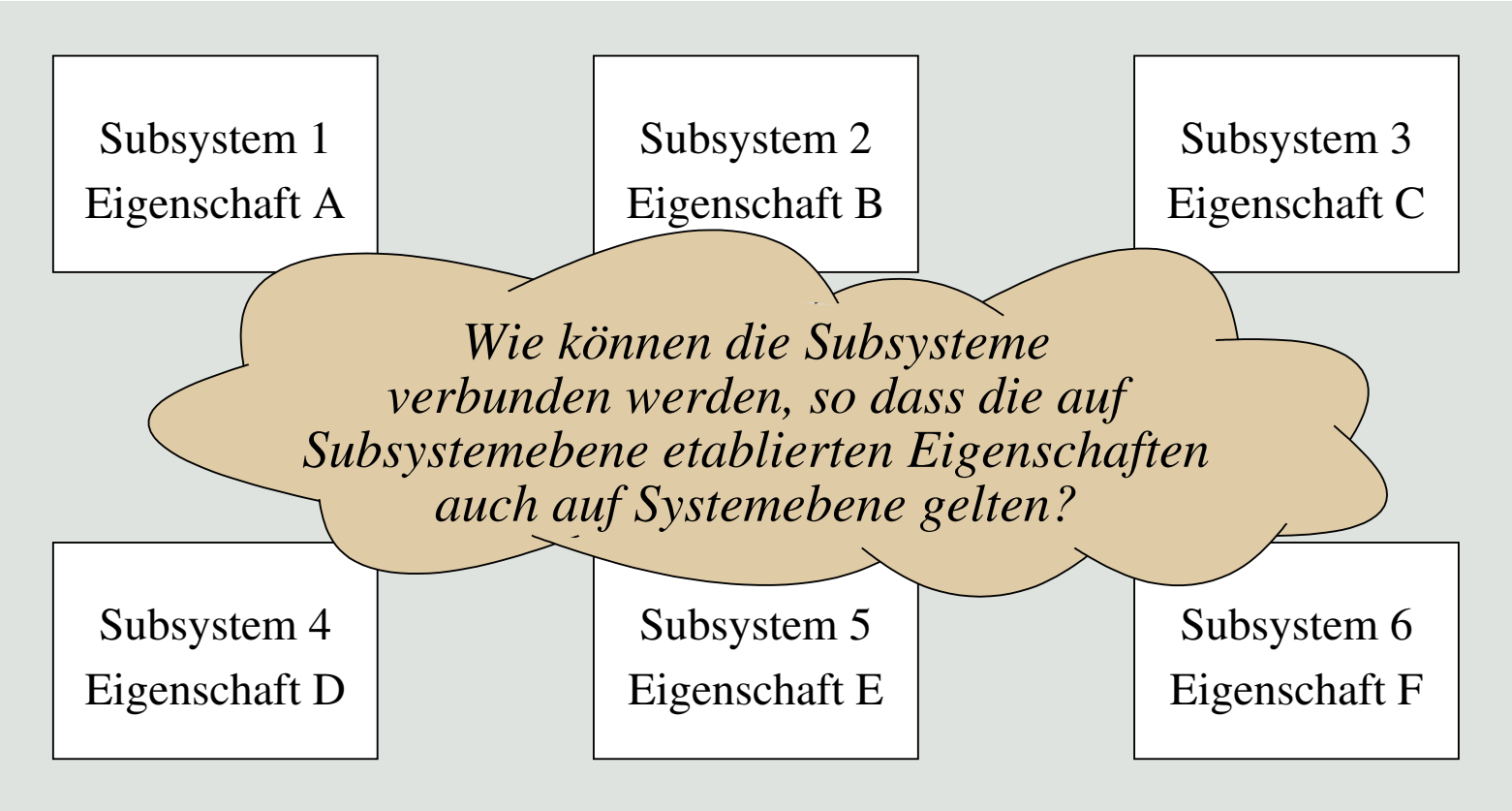
- der Produktionsplan ist ggf. vollständig, jedoch sieht er nicht selten auf mehrere Zeiträume aufgeteilte Ausbaustufen vor
- Technologiewandel bereits während der Produktionszeit ist typisch

Ausbaustufen wie auch Altsysteme bilden Gerätegruppen, die frühzeitig in Dienst gestellt und später erweitert/erneuert werden

- Netzübergänge fördern die Entwicklung evolutionär stabiler Systeme
  - neue Ausbaustufen können „leicht“ an bestehende angedockt werden
  - Eigenschaften von Altsystemen lassen sich „leicht“ nachbilden
- Netzübergangsknoten abstrahieren (teils) von Gerätegruppen

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*)

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

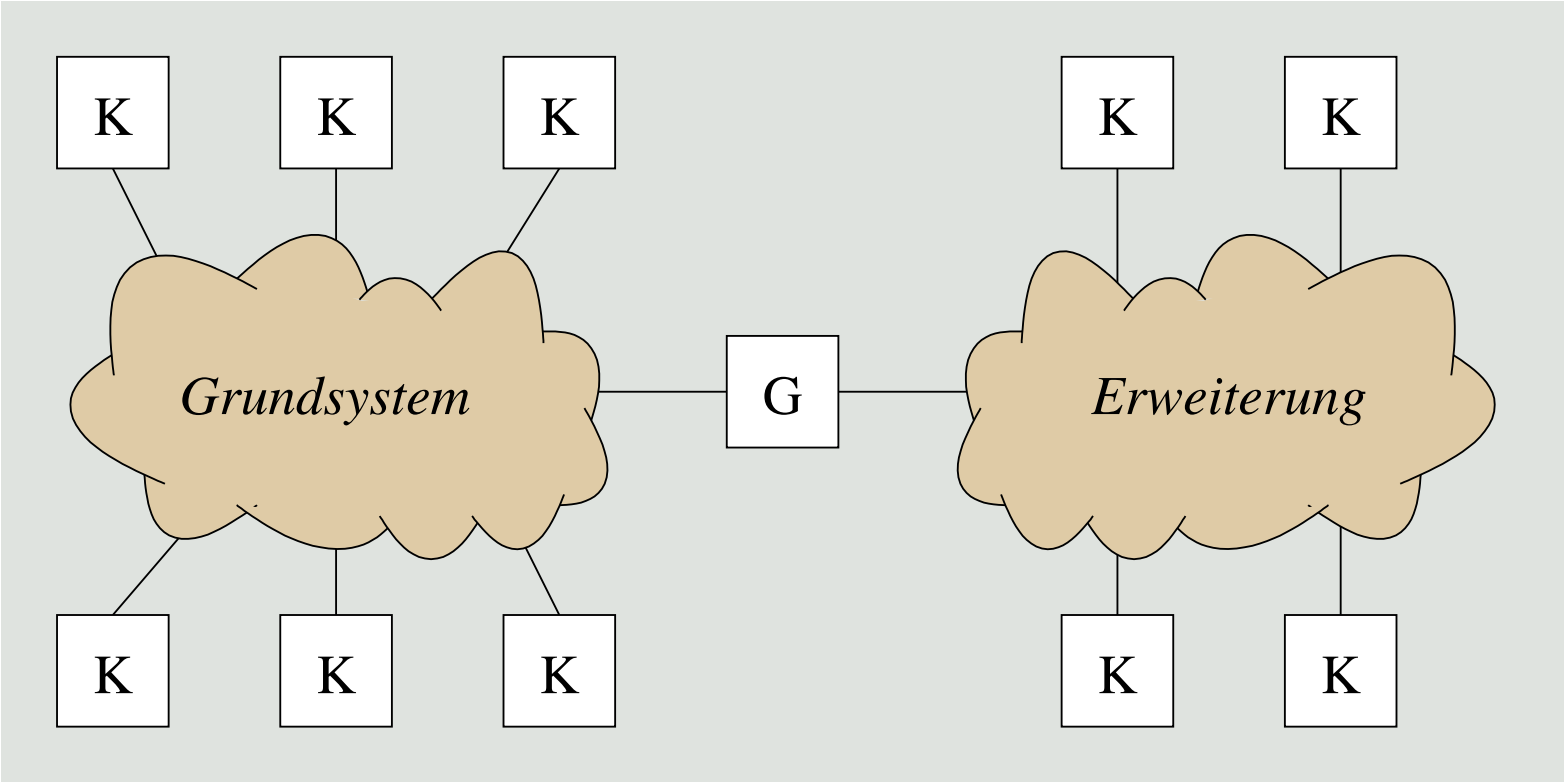
Rechtzeitigkeit bzw. zeitliche Kontrolle ist eine lokale Angelegenheit des Kommunikationssystems

- 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

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 (vergl. S. 10-12)
- 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. [3, 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

Abkapselung des Zeitverhaltens einer Gerätegruppe

Netzübergänge zeitgesteuerter Architekturen

Schnittstellen von Netzübergangsknoten in zeitgesteuerten Architekturen beschreiben die Eigenschaften der abgekapselten Gerätegruppen exakt

- sie enthalten das komplette Wissen, um Schlussfolgerungen über das zeitliche Verhalten einer Gerätegruppe führen zu können
  - Wissen über funktionale *und* nicht-funktionalen Eigenschaften
- sie geben eine Daten teilende Semantik vor, haben keine Steuersignale und bilden eine „zeitliche Brandmauer“
  - eine Steuerfehlerausbreitung ist per Definition ausgeschlossen
- sie repräsentieren und spezifizieren ein Subsystem, dessen (inneres) Verhalten von autonomer Kontrolle geprägt ist

Architekturen, die für die kompositen Strukturen eines Systems derartige Schnittstellen vorgeben, sind skalierbar

- Schlussfolgerungen über das korrekte Verhalten einer Gerätegruppe sind unabhängig von der Anzahl der Gerätegruppen im System

Reagierendes System

(engl. *responsive system*) $\mapsto$ Verteilung + Echtzeitperformanz + Fehlertoleranz [5]

Fehlereingrenzung durch eine Sicherheitshülle (engl. *containment*)

- fehlertolerante Systeme sind in Partitionen strukturiert
  - in „fehlerdämmende 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* [4])
  - 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...

Redundanz

Primärsystem (engl. *primary system*) $\Longleftrightarrow$ Sekundärsystem (engl. *secondary system*)

hot standby Primär- und Sekundärsystem laufen simultan

- Sekundärsystem *spiegelt* Primärsystemzustand
  - in Echtzeit
- Daten beider Systeme sind „jederzeit“ konsistent

warm standby Sekundärsystem läuft im Hintergrund

- Sekundärsystem *sichert* Primärsystemzustand
  - regelmäßige Intervalle, Fixpunkt (engl. *checkpoint*)
  - Fehlerfall $\rightsquigarrow$ zum letzten Fixpunkt (engl. *recovery*)
- Daten beider Systeme sind zeitweise inkonsistent

cold standby Sekundärsystem startet bei Ausfall des Primärsystems

- auf Sekundärsystem gesicherte Primärsystemdaten
  - seltene und eher unregelmäßige Intervalle
  - planmäßige Sicherungskopie (engl. *backup*)
- Daten beider Systeme sind zeitweise inkonsistent

Unterstützung von Zertifizierung

Nachweis von Fehlereindämmung durch konstruktive Maßnahmen

Folge einer Störung (engl. *fault*) ist ein Fehler, der die Beschädigung des Systemzustands bedeutet

- sie ist katastrophal, gefährlich, bedeutend, undedeutend oder ohne Effekt in Bezug auf den Sicherheitsspielraum (engl. *safety margin*)
  - katastrophale/gefährliche Fehler müssen extrem unwahrscheinlich sein
  - die Ausbreitungsmöglichkeit von Fehlern ist stark einzuschränken
- eine Sytemarchitektur, die fehlereindämmende Regionen vorsieht bzw. ermöglicht, ist dabei von zentraler Bedeutung
  - auch, um Zertifizierung auf wesentliche Komponenten zu beschränken

> *If it is not possible to demonstrate that the error-containment coverage is very close to one, i.e., that the consequences of a particular error in a non safety-critical function do not have an adverse effect on a safety-critical system function, then, the error in the non safety-critical function must be classified as catastrophic. [3, S. 41]*

Resümee

Erscheinungsform $\mapsto$ verteiltes Echtzeitrechensystem

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

Zusammensetzbarkeit (engl. *composability*)

- interagierende Gerätegruppen, Kompositionsproblem
- ereignis- vs. zeitgesteuerte Kommunikationssysteme

Skalierbarkeit (engl. *scalability*)

- Erweiterbarkeit (aber auch Schrumpfung), Komplexität
- Abkapselung von Zeitverhalten, Eigenständigkeit

Verlässlichkeit (engl. *dependability*)

- Fehlereingrenzung, Replikation, Replikdeterminismus
- Sicherheitshüllen, fehlereindämmende Regionen, Zertifizierung

Literaturverzeichnis

[1] Vitruv Marcus Vitruvius Pollio.
De Architectura Libris Decem.
27 v.Chr.
Übersetzung von Curt Fensterbusch, Vitruv — Zehn Bücher über Architektur, Primus Verlag, 1996.

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

[3] Hermann Kopetz.
Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications.
Kluwer Academic Publishers, 1997.

Literaturverzeichnis (Forts.)

[4] Stefan Poledna.
Replica Determinism in Faul-Tolerant Distributed Real-Time Systems.
PhD thesis, Technical University of Vienna, Vienna, Austria, 1995.
Research Report 28/95.

[5] Miroslav Malek.
Responsive computer systems.
Real-Time Systems, 7(3), 1994.
Special Issue.