Echtzeitsysteme

Einleitung

13. Oktober 2008

Überblick

DIN 44300

Ereignis- oder zeitgesteuerte Programmverarbeitung

- *Echtzeitbetrieb ist ein Betrieb eines Rechensystems, bei dem Programme zur Verarbeitung anfallender Daten ständig betriebsbereit sind derart, dass die Verarbeitungsergebnisse innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne verfügbar sind.*
- *Die Daten können je nach Anwendungsfall nach einer zeitlich zufälligen Verteilung oder zu vorbestimmten Zeitpunkten anfallen.*

Verarbeitung von Programmen in Echtzeit

Realzeitverarbeitung (engl. *real-time processing*)

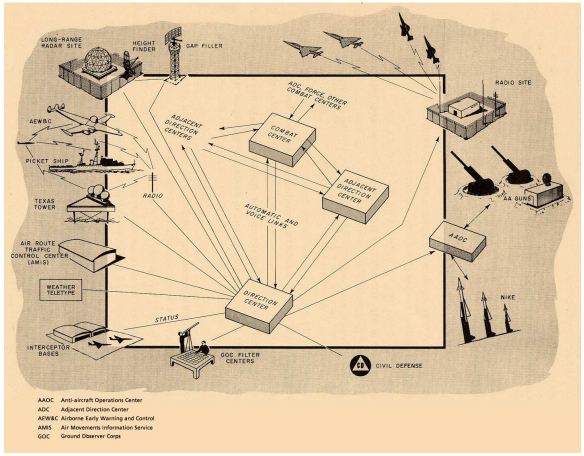
Zustandsänderung von Programmen wird zur Funktion der realen Zeit [2]

- korrektes Verhalten des Systems hängt nicht nur von den logischen Ergebnissen von Berechnungen ab
- zusätzlicher Aspekt ist der physikalische Zeitpunkt der Erzeugung und Verwendung der Berechnungsergebnisse

☞ Whirlwind (MIT, 1951), AN/FSQ-7 (Whirlwind II, IBM, 1957)
☞ SAGE (*semi-automatic ground environment*, 1958–1983)

SAGE und AN/FSQ-7 „Whirlwind II“

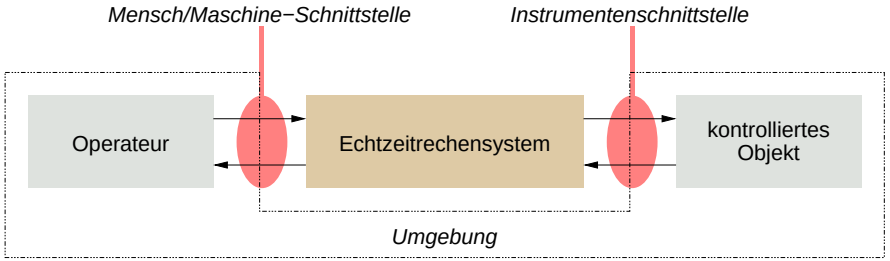
Erstes Echtzeitrechensystem als Schöpfung des „Kalten Krieges“



- 27 Installationen über die USA verteilt
  - *Nonstop*-Betrieb
  - 25 Jahre
- durch Datenfernleitungen miteinander gekoppelt
  - Telefonleitungen
  - Internet-„Mutter“
- pro Installation...
  - 100 Konsolen
  - 500 KLOC Ass.

Komponenten eines Echtzeitsystems

Echtzeitrechensystem und seine Umgebung



- das Echtzeitrechensystem muss auf Stimuli innerhalb von Zeitspannen reagieren, die durch die Umgebung vorgegeben sind
- der Zeitpunkt, zu dem ein Ergebnis vorliegen muss, wird als Termin oder Frist (engl. *deadline*) bezeichnet

Echtzeitfähigkeit bedeutet Rechtzeitigkeit

Zuverlässige Reaktion des Rechensystems auf Umgebungsereignisse

Geschwindigkeit liefert keine Garantie, um rechtzeitig Ergebnisse von Berechnungen abliefern und Reaktionen darauf auslösen zu können

- asynchrone Programmunterbrechungen (engl. *interrupts*) können unvorhersagbare Laufzeitvarianzen verursachen
- schnelle Programmausführung ist bestenfalls hinreichend für die rechtzeitige Bearbeitung einer Aufgabe

Zeit ist keine intrinsische Eigenschaft des Rechensystems

- die im Rechensystem verwendete Zeitskala muss mit der durch die Umgebung vorgegebenen identisch sein

☞ die Terminvorgaben der Umgebung gelten als weich, fest oder hart

Arten von Echtzeitsystemen

Verbindlichkeit von Terminvorgaben

weich (engl. *soft*) auch „schwach“

- das Ergebnis einer zu einem vorgegebenen Termin nicht geleisteten Arbeit ist weiterhin von Nutzen
- Terminverletzung ist tolerierbar

fest (engl. *firm*) auch „stark“

- das Ergebnis einer zu einem vorgegebenen Termin nicht geleisteten Arbeit ist wertlos und wird verworfen
- Terminverletzung ist tolerierbar, führt zum Arbeitsabbruch

hart (engl. *hard*) auch „strikt“

- das Versäumnis eines fest vorgegebenen Termins kann eine „Katastrophe“ hervorrufen
- Terminverletzung ist keinesfalls tolerierbar

Arten von Echtzeitsystemen (Forts.)

Fest $\Longleftrightarrow$ Hart

fest/hart $\mapsto$ Terminverletzung ist nicht ausgeschlossen[1]

- die Terminverletzung wird vom Betriebssystem erkannt

fest $\rightsquigarrow$ plangemäß weiterarbeiten

- das Betriebssystem bricht den Arbeitsauftrag ab
- der nächste Arbeitsauftrag wird gestartet
- ist transparent für die Anwendung

hart $\rightsquigarrow$ sicheren Zustand finden

- das Betriebssystem löst eine Ausnahmesituation aus
- die Ausnahmebehandlung führt zum sicheren Zustand
- ist intransparent für die Anwendung

[1] Auch wenn Ablaufplan und Betriebssystem auf dem Blatt Papier Determinismus zeigen, kann das im Feld eingesetzte technische System von Störeinflüssen betroffen sein, die ggf. die Verletzung auch eines harten Termins nach sich ziehen.

Arten von Echtzeitsystemen (Forts.)

Radikale Unterschiede im Systementwurf zeichnen sich ab...

hard real-time computer system

- ein Rechensystem, das mind. einen strikten Termin erreichen muss
  - garantiert unter allen (spezifizierten) Last- und Fehlerbedingungen
  - das Laufzeitverhalten ist ausnahmslos deterministisch
- typisch für ein sicherheitskritisches Echtzeitrechensystem
  - engl. *safety-critical real-time computer system*

soft real-time computer system

- ein Rechensystem, das keinen strikten Termin erreichen muss
- es ist erlaubt, gelegentlich Termine zu verpassen

Vorhersagbarkeit des Laufzeitverhaltens

Echtzeitsysteme sind (schwach, stark oder strikt) deterministisch

Determiniertheit — *Bei ein und derselben Eingabe sind verschiedene Abläufe zulässig, alle Abläufe liefern jedoch stets das gleiche Resultat.*

- Transparenz von Programmunterbrechungen
  - *Interrupts* verursachen vom „normalen Ablauf“ verschiedene ausnahmebedingte Abläufe
  - Verzögerungen in der Programmausführung wirken sich nicht nachteilig aus
- Terminvorgaben der Umgebung werden eingehalten

Determinismus — *Zu jedem Zeitpunkt ist bestimmt, wie weitergefahren wird.*

Spezialzweckbetrieb

Verhalten von Echtzeitanwendungen [3, S. 25]

rein zyklisch $\rightsquigarrow$ nur periodische *Tasks*, *Polling*-Betrieb

- nahezu konstanter Betriebsmittelbedarf von Periode zu Periode

meist zyklisch $\rightsquigarrow$ überwiegend periodische *Tasks*

- das System muss auf externe Ereignisse reagieren können

asynchron und irgendwie vorhersagbar $\rightsquigarrow$ kaum periodische *Tasks*

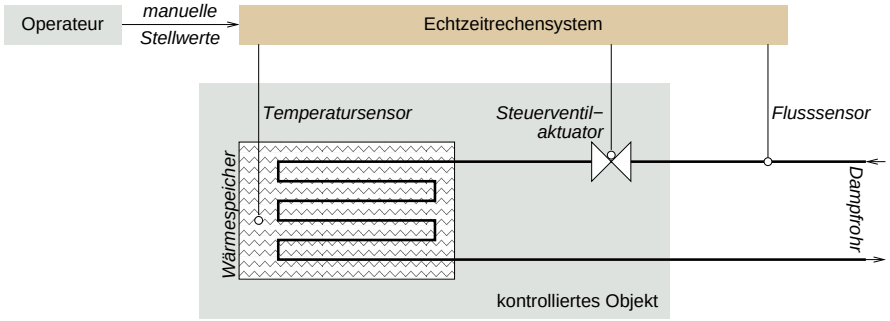
- aufeinanderfolgende Aktivierungen können zeitlich stark variieren
- Zeitdifferenzen haben eine obere Grenze oder bekannte Statistik

asynchron und nicht vorhersagbar $\rightsquigarrow$ aperiodische *Tasks*

- Anwendungen reagieren auf asynchrone Ereignisse
- hohe, nicht deterministische Laufzeitkomplexität einzelner *Tasks*

Aufbau des Demonstrators

Elementare Kontrollschleife



Aufgabe des Echtzeitrechensystems: Kontrolle des Steuerventils

- Dampffluss durch den Wärmetauscher bestimmen
- Temperatur im Wärmespeicher im vorgewählten Bereich halten

Kontrolliertes Objekt

Schrittfunktion (engl. *step function*) und Antwortfunktion (engl. *response function*)

Erhöhung des Dampfflusses (Schrittfunktion) verändert die Temperatur im Wärmespeicher (Antwortfunktion), bis Gleichgewicht eingestellt ist:

- die Objektdynamik bestimmt sich durch die Flüssigkeitsmenge im Wärmespeicher und den Dampffluss des Wärmetauschers

Zeitparameter zur Charakterisierung der Schritt-/Antwortfunktion:

d^{object} Zeitdauer bis die Temperatur zu steigen beginnt
- hervorgerufen durch die (initiale) Trägheit des Objektes
- auch als Prozessverzögerung (engl. *process lag*) bezeichnet

d^{rise} Zeitdauer bis zum (erneuten) Temperaturgleichgewicht

Kontrollierendes Rechensystem

Echtzeitrechensystem

Temperaturwerte sind periodisch abzutasten, um Abweichungen des aktuellen Wertes von dem eingestellten Wert zu erkennen:

d^{sample} Zeitabstand (konstant) zwischen zwei Abtastungen
- analoge auf digitale Werte abbilden $\rightsquigarrow$ A/D-Wandlung
  - diskretes System sich quasi-kontinuierlich verhalten lassen
- Faustregel: $d^{sample} < (d^{rise}/10)$

f^{sample} Abtastfrequenz, entspricht $1/d^{sample}$

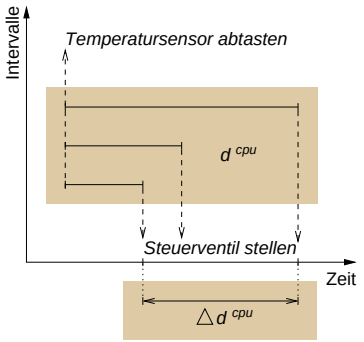
Abweichung (Ist-/Sollwert) bestimmen und dem Regelungsalgorithmus zur Berechnung des neuen Stellwertes zuführen:

d^{cpu} Zeitdauer bis zur Ausgabe des neuen Stellwertes
- digitale auf analoge Werte abbilden $\rightsquigarrow$ D/A-Wandlung
- Randbedingung: $d^{cpu} < d^{sample}$

Δd^{cpu} Differenz zwischen Minimum und Maximum von d^{cpu}

Kontrollierendes Rechensystem (Forts.)

Schwankung (engl. *jitter*) in den Messergebnissen



d^{cpu} ist trotz konstantem Rechenaufwand zur Stellwertbestimmung variabel
- verdrängende Einplanung
- überlappende Ein-/Ausgabe
- Programmunterbrechungen
- Busüberlastung, DMA

Δd^{cpu} fügt Unschärfe zum Zeitpunkt der Temperatursensorabtastung hinzu
- bewirkt zusätzlichen Fehler
- beeinträchtigt die Dienstgüte

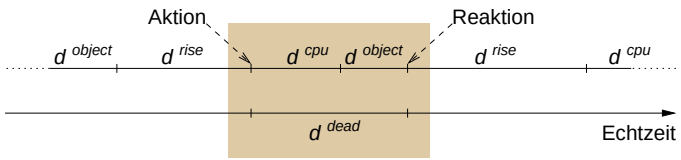
- unbekannte variable Verzögerungen können bei der Regelung nicht kompensiert werden, aber bekannte konstante Verzögerungen
- Randbedingung: $\Delta d^{cpu} \ll d^{cpu}$

Kontrolliertes Objekt ↔ Kontrollierendes Rechensystem

Totzeit des offenen Regelkreises

d^{dead} Zeitintervall zwischen Start der Aktion zur Stellwertberechnung und Wahrnehmung einer Reaktion nach erfolgter Steuerung

- setzt sich zusammen aus d^{cpu} und d^{object}, d.h.:
  1. der Implementierung des kontrollierenden Rechensystems
  2. der Dynamik des kontrollierten Objektes



- beeinträchtigt Güte und Stabilität der Kontrollschleife
  - insbesondere in Anbetracht der mit d^{cpu} gegebenen Varianz
- gibt einem relative Ungewissheit über die erzielte Wirkung

Datenaufzeichnung

Zustandsvariablen

Zustandsänderung des kontrollierten Objektes ist eine Funktion der Zeit

- der Zustand bildet sich aus einen Satz von Zustandsvariablen
  - im Falle des kontrollierten Objekts „Automobil“, z.B.:
    - Geschwindigkeit
    - Rotation eines Rads
    - Stellung des Blinkschalters
    - Öffnung des linken Seitenfensters
    - Position des Kolbens in einem Zylinder
  - ein komplexes Gebilde mit Hunderten von Zustandsvariablen
- erfasst wird er durch Aufzeichnung der Werte der Zustandsvariablen
  - sofern beim Aufzeichnen die Zeit eingefroren worden ist

Echtzeitinstanz (engl. *real-time entity*) die für einen bestimmten Zweck bedeutsame Zustandsvariable aus der Menge aller Zustandsvariablen

Datenaufzeichnung (Forts.)

Sichtbarkeit von Zustandsvariablen

Kontrollbereich (engl. *sphere of control*) einer Echtzeitinstanz ist das Subsystem, zu dem die betreffende Echtzeitinstanz gehört

- besitzt Autorität zur Änderung des Wertes einer Echtzeitinstanz

Echtzeitinstanzen können außerhalb ihrer Kontrollbereiche nur beobachtet, nicht jedoch verändert werden

- im Falle des kontrollierten Objekts „Automobil“, z.B.:
  - die aktuelle Kolbenposition in einem Zylinder des Motors, die zum Kontrollbereich des Automobils gehört
  - sie kann (durch Aufzeichnung) von außen nur observiert werden
- jedes kontrollierte Objekt definiert einen eigenen Kontrollbereich

Datenaufzeichnung (Forts.)

Abbilder von Zustandsvariablen

Echtzeitabbild (engl. *real-time image*) Repräsentation der Beobachtung einer Echtzeitinstanz innerhalb des Echtzeitrechensystems

- ist immer nur für ein begrenztes Zeitintervall akkurat (d.h. gültig)
- die Intervalllänge hängt ab von der Dynamik des kontr. Objekts

Echtzeitdatenbasis (engl. *real-time data base*) die Menge aller zeitlich akkuraten Echtzeitabbilder des kontrollierten Objekts

- ist mit jeder Werteänderung einer Echtzeitinstanz zu aktualisieren
- die Aktualisierung erfolgt entweder periodisch oder spontan:
  - zeitgesteuert (engl. *time-triggered*) $\rightsquigarrow$ periodisch
    - zu festen Zeitpunkten des Echtzeitrechensystems
  - ereignisgesteuert (engl. *event-triggered*) $\rightsquigarrow$ spontan
    - zum Änderungszeitpunkt des kontrollierten Objekts

Datenvergütung
Beurteilung von Messwerten

Sensoren liefern Rohdaten, die bei Abtastung über mehrere Schritte erst vergütet werden müssen, um ein korrektes Echtzeitabbild zu erhalten:

1. Signalangleichung (engl. *signal conditioning*)
   - Rohdatensequenz einlesen und mitteln, um Messfehler zu verkleinern
   - geglätteten Wert kalibrieren und in interne Maßeinheit umwandeln
2. Plausibilitätsprüfung des gemessenen Werts
   - den Wert mit anderen Messwerten in Korelation setzen
   - dadurch auch versuchen, einen ggf. fehlerhaften Sensor zu erkennen

bestätigtes Datenelement (engl. *agreed data element*)

- signalbereinigter und plausibler Messwert
- korrektes Echtzeitabbild der korrespondierenden Echtzeitinstanz

Überwachung von Echtzeitinstanzen
Abnormales Prozessverhalten erkennen

Ausfall nur einer Anlagenkomponente kann Abweichungen/Störungen im Normalbetrieb vieler Echtzeitinstanzen verursachen:

- Grenzwertverletzungen können die Folge sein und Alarme auslösen
- Schneeballprinzip gleich werden ggf. korrelierte Alarme generiert
- ein Alarmschauer (engl. *alarm shower*) ist mögliche Konsequenz

Echtzeitrechensysteme müssen Alarme erkennen, anzeigen und Operateure bei der Ursachenfindung eines Alarmschauers assistieren

- Buchführung aller Alarme, mit exaktem Zeitstempel pro Alarm
  - über die Zeitordnung lässt sich der Erstalarm identifizieren
- ggf. wissensbasierte Systeme zur Alarmanalyse einsetzen

Überwachung von Echtzeitinstanzen (Forts.)
Alarmsituationen mit Spitzenlast und von Seltenheit

Alarmspitze (engl. *peak-load alarm situation*) $\mapsto$ Alarmschauer

- darf die Vorhersagbarkeit (engl. *predictability*) des Verhaltens eines Echtzeitrechensystems nicht beeinträchtigen
- eine höchst bedeutsame Eigenschaft für viele Echtzeitanwendungen

seltenes Ereignis (engl. *rare-event situation*)

- ein Ereignis, das zwar höchst selten auftritt, aber höchst relevant ist
- Validierung der Leistungsfähigkeit eines Echtzeitrechensystems im Falle eines solchen Ereignisses ist enorm schwierig

> *Einziger Zweck des Systems zur Überwachung und zum Herunterfahren einer Kernkraftanlage ist zuverlässige Leistung in einer seltenen Alarmsituation mit Spitzenlast — die hoffentlich nie eintreten wird. [2, S. 5]*

Digitale Kontrolle
Regelung und Steuerung eines kontrollierten Objekts

Echtzeitrechensysteme berechnen Stellwerte für Aktoren oft ohne ein unterliegendes konventionelles Kontrollsystem

- das kontrollierte Objekt erfährt dann eine direkte digitale Kontrolle
- die Kontrollanwendungen zeigen dabei eine hohe Regelmäßigkeit
  - eine meist endlose Sequenz von Kontrollperioden

Rückgekoppelte Kontrollschleife (engl. *feedback control loop*)

```
initialisiere Stellwert;
initialisiere Zeitgeber und Unterbrecher;
bei Zeitgeberunterbrechung erledige      /* abtasten, regeln, steuern */
    A/D-Wandlung der Echtzeitinstanz, Echtzeitabbild ziehen;
    Echtzeitdatenbasis aktualisieren, neuen Stellwert berechnen;
    D/A-Wandlung des Stellwerts, Echtzeitinstanz verändern;
basta.
```

Digitale Kontrolle (Forts.)

Systeme mit mehrere Abtastraten (engl. *multirate systems*)

Anlagen mit zig oder gar hunderten rückgekoppelter Kontrollschleifen, betrieben von einem Echtzeitrechensystem, sind keine Seltenheit

- eine solche Anlage hat mehr als einen Freiheitsgrad
  - der Zustand ist definiert durch mehrere Echtzeitinstanzen
  - pro Echtzeitinstanz mindestens ein Paar Sensor/Aktor
- jede Echtzeitinstanz kann eine andere Dynamik zeigen
  - verschiedene Abtastraten werden die Konsequenz sein

Abtastraten solcher Systeme sind häufig harmonisch: längere Perioden bilden ein ganzzahliges Vielfaches kürzerer Perioden

- kleinster gemeinsamer Nenner ist die kürzeste Periode, die damit auch den „Arbeitstakt“ des Echteitrechensystems vorgibt
- jede Kontrollschleife kann kurz nach Beginn ihrer Periode beginnen
  - sollte vor Beginn ihrer nächsten Periode komplett durchgelaufen sein

Interaktion Mensch/Maschine

Kritische Funktion von großer Bedeutung

Echtzeitrechensysteme müssen das Bedienpersonal (Operateure) ...

informieren über den aktuellen Zustand des kontrollierten Objekts

assistieren bei der Überwachung/Steuerung einer Maschine bzw. Anlage

- viele Unfälle basieren auf Fehler der Mensch/Maschine-Schnittstelle

Buchführung und langfristige Speicherung von Prozessdaten besitzt je nach Anwendungsfall einen sehr hohen Stellenwert:

> *Zum Beispiel ist in manchen Ländern die pharmazeutische Industrie per Gesetz verpflichtet, alle relevanten Prozessparameter eines jeden Produktionsstoßes in ein Archiv aufzuzeichnen und zu speichern, so dass die zum Zeitpunkt des Produktionslaufs vorherrschenden Prozessbedingungen nachträglich untersucht werden können, wenn zum späteren Zeitpunkt ein schadhaftes Produkt am Markt identifiziert worden ist. [2, S. 5]*

Rechtzeitigkeit (engl. *timeliness*)

Latenzen minimieren und determinieren

d^{cpu} klein, konstant

- Ausführungszeit des schlimmsten Falls bestimmen
  - engl. *worst-case execution time*, WCET
- Komplexität der Alg. auf $O(1)$ beschränken

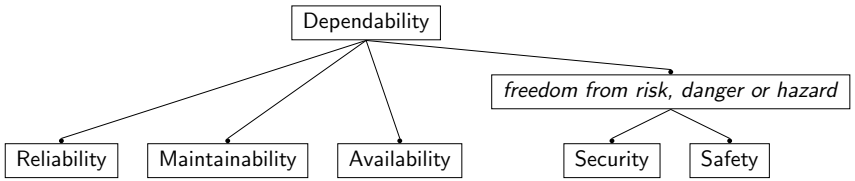
Δd^{cpu} (engl. *delay jitter*) sehr klein, konstant

- schlimmsten Fall (max. Differenz) bestimmen
- schwankungsfreies Echtzeitrechensystem bauen

Fehlererkennung in kurzer Zeit, mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit

- Größenordnung der Abtastfrequenz der schnellsten Kontrollschleife $\rightsquigarrow$ Latenz
  - Fehler kompensieren, -ausbreitung eingrenzen
- korrektive Schritte sind so noch durchführ- bzw. ein sicherer Systemzustand ist so noch erreichbar

Verlässlichkeit (engl. *dependability*)



> *The trustworthiness of a computing system which allows reliance to be justifiably placed on the service it delivers. [4]*

Zuverlässiggkeit (engl. *reliability*)

Mittlere Betriebsdauer

$R(t)$ die Wahrscheinlichkeit, dass ein System seinen Dienst bis zum Zeitpunkt t leisten wird, sofern es bei $t = t_0$ betriebsbereit war

- Annahme: eine konstante Fehlerrate von λ Fehler/Stunde
- Zuverlässigkeit zum Zeitpunkt t: $R(t) = exp(-\lambda(t - t_0))$
  - mit $t - t_0$ gegeben in Stunden
- Inverse der Fehlerrate $1/\lambda$ ist die *mean time to failure* (MTTF)

ultra-hohe Zuverlässigkeit wenn $\lambda \leq 10^{-9}$ Fehler/Stunde gefordert ist

- Beispiel: elektronisch gesteuerte Bremsanlage im Automobil
  - das Kfz sei durchschnittlich eine Stunde täglich in Betrieb
  - dann darf jährlich nur ein Fehler pro eine Million Kfz auftreten
- andere Beispiele sind Eisenbahnsignalanlagen, Kernkraftwerk- und Flugüberwachungssysteme

Wartbarkeit (engl. *maintainability*)

Mittlere Reparaturdauer

$M(d)$ die Wahrscheinlichkeit, dass das System innerhalb Zeitspanne d nach einem reparierbaren (gutartigen) Fehler wieder hergestellt ist

- Ansatz: konstante Reparaturrate von μ Reparaturen/Stunde
- die Inverse $1/\mu$ ist dann die *mean time to repair* (MTTR)

Fundamentaler Konflikt zwischen Zuverlässigkeit und Wartbarkeit:

- ein wartbares System erfordert einen modularen Aufbau
  - kleinste ersetzbare Einheit (engl. *smallest replaceable unit*, SDU)
  - über Steckverbindungen lose gekoppelt mit anderen SDUs
  - dadurch ist jedoch eine höhere (physikalische) Fehlerrate gegeben
  - darüberhinaus verbuchen sich höhere Herstellungskosten
- ein zuverlässiges System ist aus einem Guss gefertigt. . .

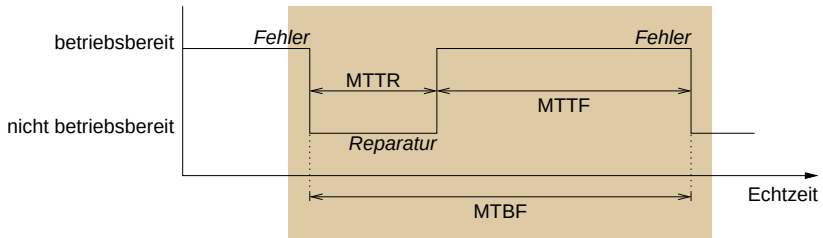
Beim Entwurf von Produkten für den Massenmarkt geht die Zuverlässigkeit meist auf Kosten von Wartbarkeit.

Verfügbarkeit (engl. *availability*)

MTTF und MTTR im Zusammenhang

Maß zur Bereitstellung einer Funktion vor dem Hintergrund eines abwechselnd korrekt und fehlerhaft arbeitenden Systems

- Zeitanteil der Betriebsbereitschaft: $A = MTTF/(MTTF + MTTR)$
- $MTTF + MTTR$ auch kurz: *mean time between failures* (MTBF)



☞ hohe Verfügbarkeit bedeutet kurze MTTR und/oder lange MTTF

Sicherheit $\mapsto$ *Security* und *Safety*

Robustheit des Echtzeitrechensystems stärken

security Schutz von Informationen und Informationsverarbeitung vor „intelligenten“ Angreifern

- allgemein in Bezug auf Datenbasen des Echtzeitsystems
  - Vertraulichkeit (engl. *confidentiality*)
  - Datenschutz (engl. *privacy*)
  - Glaubwürdigkeit (engl. *authenticity*)
- speziell z.B. Diebstahlsicherung: Zündungssperre im Kfz
  - Kryptographie (engl. *cryptography*)

safety Schutz von Menschen und Sachwerten vor dem Versagen technischer Systeme

- Zuverlässigkeit trotz bösartigen (engl. *malign*) Fehlerfall
  - Kosten liegen um Größenordnungen über den Normalbetrieb
- Abgrenzung von unkrit., gutartigen (engl. *benign*) Fehlern
- oft ist Zertifizierung (engl. *certification*) erforderlich

Verlässlichkeit ↔ Komplexität

Automobil eine Bestandsaufnahme vom Jahr 2005 ...

- etwa 90 % der Innovationen im Auto bringt die Elektronik ein
  - gut 80 % davon sind Software
- etwa ein Drittel aller Pannen liegen an fehlerhafte Elektronik
  - gut 80 % davon sind Softwarefehler

> *Everything should be made as simple as possible, but no simpler. (Albert Einstein)*

> *You know you have achieved perfection in design, not when you have nothing more to add, but when you have nothing more to take away. (Antoine de Saint Exupery)*

Merkmale von Echtzeitsystemen

Klassifikation nach äußeren Faktoren ↦ Charakteristik der Anwendung

- *hard/soft real-time*
- *fail safe/operational*

Klassifikation nach inneren Faktoren ↦ Charakteristik des Systems[2]

- *guaranteed response/best effort*
- *resource adequate/inadequate*
- *event/time triggered*

[2] Entwurf und Implementierung

hard real-time vs. *soft real-time*

hard real-time mindestens ein strikt einzuhaltender Termin liegt vor

- dass das System seine Zeitschranken einhält, ist zu validieren
  - auf Basis einer nachweislich korrekten, effizienten Vorgehensweise
  - oder durch ausgiebige Simulation und intensives Testen
- Validierung und Ausführung können gekoppelt (engl. *online*) sein
  - dynamische Einplanung ↦ Akzeptanztest (engl. *acceptance test*)

soft real-time ein strikt einzuhaltender Termin ist nicht gegeben

- die im Mittel von einem System zu erwartende Leistung bzw. Dienstgüte (engl. *quality of service*) steht im Vordergrund
  - gelegentlicher Leistungsabfall kann geduldet werden

> *Wenn man die beste Dienstgüte fordert, die das System bieten kann, jedoch erlaubt, dass die gelieferte Dienstgüte schlechter sein darf, als durch die Zeitschranken definiert ist, dann sind die Zeitschranken weich. [3, S. 29]*

fail-safe vs. *fail-operational*

fail-safe Charakteristik des kontrollierten Objekts

- sicherer Zustand ist im Fehlerfall identifizier- und einnehmbar
- z.B. der Wächter bzw. *Zerberus*[3] (engl. *watchdog*) ...
  - überwacht den laufenden Betrieb des Echtzeitrechensystems
  - zwingt sein kontrolliertes Objekt in einen sicheren Zustand wenn das periodische Lebenszeichen des Echtzeitrechensystems ausbleibt

> *In solch einem System ist Rechtzeitigkeit nur erforderlich, um hohe Verfügbarbeit zu erreichen, nicht jedoch, um Sicherheit ↦ Safety zu garantieren, da der Watchdog das kontrollierte Objekt bei einer Zeitverletzung in einen sicheren Zustand zwingt. [2, S. 14]*

fail-operational sicherer Zustand ist nicht identifizierbar

- z.B. ein Flugkontrollsystem (engl. *flight control system*) ...
  - muss auch im Fehlerfall ein Minimum an Funktionalität garantieren

[3] In der gr. Mythologie der Höllenhund, der den Eingang zur Unterwelt bewacht.

guaranteed response vs. *best effort*

guaranteed response analytische Antwortgarantie

- Ausgangspunkt: die Spezifikation einer Fehler- und Lasthypothese
- Schlüsse über einen adequaten Entwurf sind rein logischer Natur
- sorgfältige Planung/umfassende Analyse des Entwurfs: ein Muss

> *Die Fehlerwahrscheinlichkeit eines perfekten Systems mit Antwortgarantie reduziert sich auf die Wahrscheinlichkeit, dass Annahmen über Spitzenlast und Fehleranzahl/-typen in Realität gelten (engl. assumption coverage). [2, S. 14]*

best effort *keine* analytische Antwortgarantie

- rigorose Spezifikation der Fehler-/Lasthypotese ist nicht gefordert
- Test-/Integrationsphase bestätigt den ausreichenden Entwurf
- korrektes Verhalten trotz *rare-event situation* ist kaum nachweisbar

resource adequate vs. *resource inadequate*

resource adequate für Spitzenlast- und Fehlerszenarien stehen gemäß Spezifikation genügend Betriebsmittel zur Behandlung bereit

- notwendige Eigenschaft, um Antwortgarantien geben zu können
- unbedingte Voraussetzung für strikte Echtzeitsysteme
  - insbesondere für sicherheitskritische Systeme

resource inadequate probabilistische Aussagen über die erwarteten Spitzenlast- und Fehlerszenarien sind akzeptabel

> *Es wird davon ausgegangen, dass ein ausreichendes Betriebsmittelangebot zur Behandlung aller möglichen Situation ökonomisch nicht sinnvoll ist und stattdessen dynamische Strategien der Betriebsmittelzuteilung auf Teilhaberschaftsbasis (engl. resource sharing) genügen. [2, S. 15]*

- typisch für Systeme/Produkte des Massenmarkts: Automobile...

event-triggered vs. *time-triggered*

Auslöser (engl. *trigger*) ist allgemein ein Ereignis, das den Start einer vordefinierten Aktion zur Folge haben soll:

- Ausführung eines Prozesses, einer Prozedur $\mapsto$ Aufgabe (engl. *task*)
- Übertragung eines Signals und/oder einer Nachricht

Auslösungsmechanismus ist je nach Ansatz implementiert als Funktion des kontrollierten Objekts oder des Echtzeitrechensystems:

event-triggered Zustandswechel einer Echtzeitinstanz, kontr. Objekt

- sporadisch auftretender *Interrupt*
- dynamische Einplanung (engl. *online scheduling*)

time-triggered Voranschreiten der Zeit, Echtzeitrechensystem

- periodische Zeitgeberunterbrechung
- statische Einplanung (engl. *offline scheduling*)

Eingebettete Echtzeitsysteme

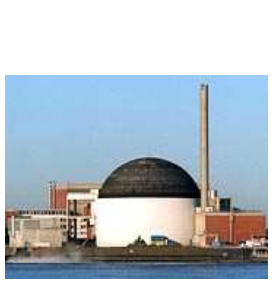
eingebettetes System (engl. *embedded system*)

- jedes in einem Produkt verborgenes jedoch von einem Rechner verschiedenes Rechensystem
  - Thermostate, Spielzeuge, TV/Audio/Video-, Haushaltsgeräte, ...
  - Kraftfahrzeuge, Flugzeuge, Raumschiffe, ..., Waffen
- ein rechnerbasiertes System, das eine spezielle Funktion oder einen speziellen Funktionsbereich abdeckt
  - Ölraffinerie, Walzstraße, Hochofen, Kernkraftanlage, ...
  - Anlagen für wissenschaftliche, technische und industrielle Zwecke
- für eine spezielle Aufgabe entworfen, dennoch versehen mit Wahlmöglichkeiten und Optionen

> *Embedded systems often have several things to do at once. They must respond to external events (e.g., someone pushes the elevator button). They must cope with all unusual conditions without human intervention. Their work is subject to deadlines. [5, S. 1]*

Spezialzwecksysteme

Wenn Kompromisslösungen impraktikabel sind

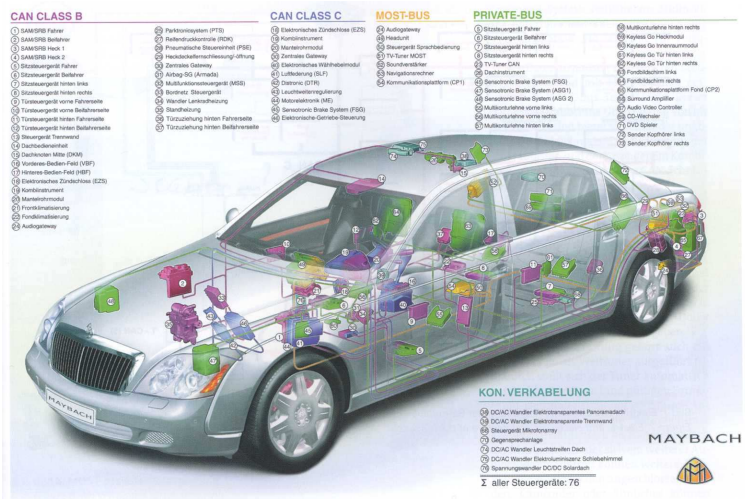







Spezialzwecksysteme (Forts.)

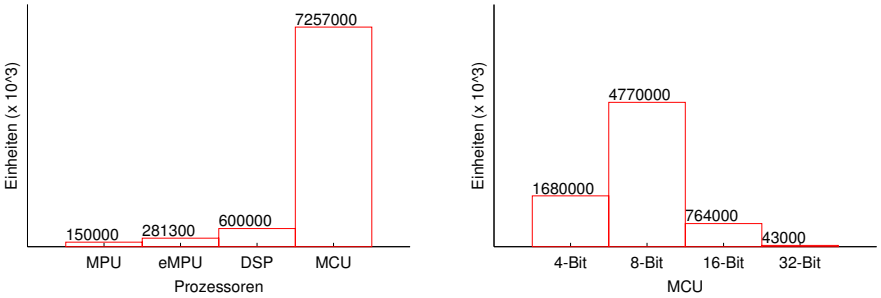
Verteiltes System auf Rädern



(Quelle: DaimlerChrysler [6])

Y2K Prozessorproduktion

„Where have all the processors gone?“

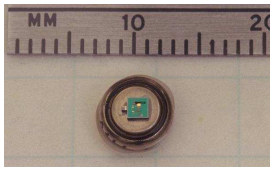


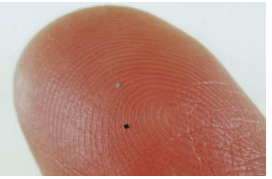
über 8 Mrd. Prozessoren [7]

1.8 %	(MPU)	Server, Desk-/Laptops, ...
98.2 %	(eMPU, DSP, MCU)	eingebettete Systeme

Drahtlose Sensornetze

„Intelligenter Staub“ (engl. *smart dust*)



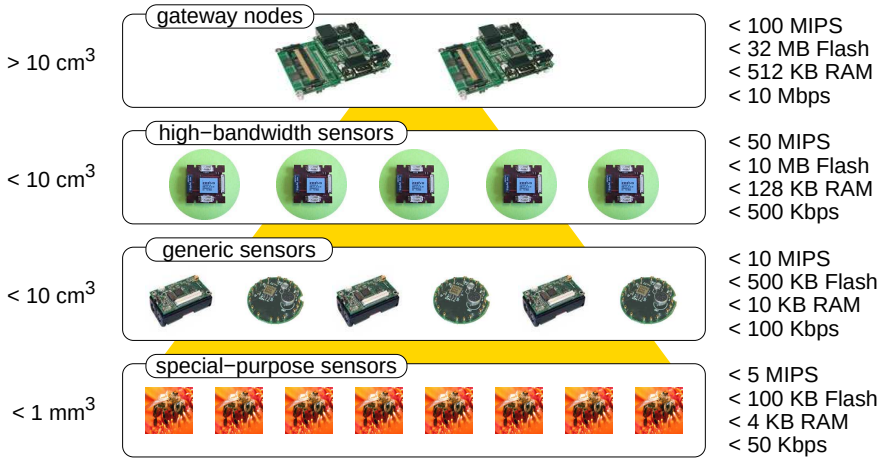


μController von Sand-/Staubkorngröße, die über Radiofrequenztechnik miteinander kommunizieren [8]:

- jeder einzelne Kleinstrechner bildet einen kubischen Sensor (*mote*)
- u.A. gedacht zur Überwachung menschenfeindlicher Umgebungen

Drahtlose Sensornetze (Forts.)

Referenzarchitektur und Technologie



Drahtlose Sensornetze (Forts.)

„Welt am Draht“

$$\left\{\begin{array}{rl} \text{[verteiltes]} & \textit{grid} \\ \text{[durchdringendes]} & \textit{pervasive} \\ \text{[allgegenwärtiges]} & \textit{ubiquitous} \end{array}\right\} \textit{computing} \Longrightarrow \textit{ambient intelligence}$$

- nahezu jedes „Gerät“ ist mit Kleinstrechnern (Sensoren, Aktoren) bestückt, die die unbegrenzte globale Vernetzung ermöglichen
- die Gerätenetze sind in einer Art und Weise in die Umgebung eingebettet, dass ihre Konnektivität jederzeit verfügbar und höchst unaufdringlich ist

Fiktion? Ja, noch . . .

Einbettbare Echtzeitbetriebssysteme

„Kleinvieh macht Mist“

{BlueCat, HardHat} Linux, Embedix, Windows {CE, NT Embedded}, . . .

- Probleme bereiten u.a. Skalierbarkeit und Betriebsmittelbedarf
  - insbesondere der Bedarf an RAM und Energie. . .

. . . , BOSS, C{51, 166, 251}, CMX RTOS, C-Smart/Raven, eCos, eRTOS, Embos, Ercos, Euros Plus, Hi Ross, Hynet-OS, ITRON, LynxOS, MicroX/OS-II, Nucleus, OS-9, OSE, OSEK {Flex, Plus, Turbo, time}, Precise/{MQX, RTCS}, proOSEK, pSOS, PURE, PXROS, QNX, Realos, RTMOSxx, Real Time Architect, RTA, RTOS-UH, RTX{51, 166, 251}, RTXC, Softune, SSXS RTOS, ThreadX, TinyOS, VRTX, VxWorks, . . .

- der Anteil proprietärer Lösungen liegt bei über 50 % [9]
  - in vielen Fällen wird das Rad neu erfunden. . .

Resümee

Echtzeitbetrieb eines Rechensystems in seiner Umgebung
- schwache, starke oder strikte Echtzeitbedingungen

Fallbeispiel (Wärmetauscher)
- Schritt- und Antwortfunktion, Abtastrate, Zeitparameter
- Schwankungen in den Messergebnissen, Totzeit

Anforderungen funktionaler und nicht-funktionaler Art
- Aufzeichnung, Vergütung, Überwachung (dig. Kontrolle), Interaktion
- Rechtzeitigkeit und Verlässlichkeit

Klassifikation nach äußeren und inneren Faktoren
- *hard/soft real-time*, *fail safe/operational*
- *guaranteed response/best effort*, *resource adequate/inadequate*
- *event/time triggered*

eingebettete Systeme sind spezielle Echtzeitsysteme

Literaturverzeichnis

[1] Deutsches Institut für Normung.
Informationsverarbeitung — Begriffe.
DIN 44300. Beuth-Verlag, Berlin, Köln, 1985.

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

[3] Jane W. S. Liu.
Real-Time Systems.
Prentice-Hall, Inc., 2000.

[4] IFIP.
Working Group 10.4 on Dependable Computing and Fault Tolerance.
`http://www.dependability.org/wg10.4`, 2003.

Literaturverzeichnis (Forts.)

[5] David E. Simon.
An Embedded Software Primer.
Addison-Wesley, 1999.

[6] DaimlerChrysler AG.
Der neue Maybach.
ATZ/MTZ Sonderheft, page 125, September 2002.

[7] David Tennenhouse.
Proactive computing.
Communications of the ACM, 43(5):43–50, May 2000.

[8] David E. Culler and Wei Hong.
Wireless sensor networks — introduction.
Communications of the ACM, 47(6):30–33, June 2004.

Literaturverzeichnis (Forts.)

[9] Collin Walls.
The perfect RTOS.
In *Proceedings of the embedded world 2004*, Nürnberg, 2004.