Echtzeitsysteme

Einleitung

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

`https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS19/V_EZS/`

14. Oktober 2019

Das erste Echtzeitrechensystem

- Whirlwind I
  - Zweck: Flugsimulator
    (Ausbildung von Bomberbesatzungen)
  - Auftraggeber: U.S. Navy
  - Auftragnehmer: MIT
  - Laufzeit: 1945 – 1952

(Quelle: Alex Handy from Oakland, Nmibia)

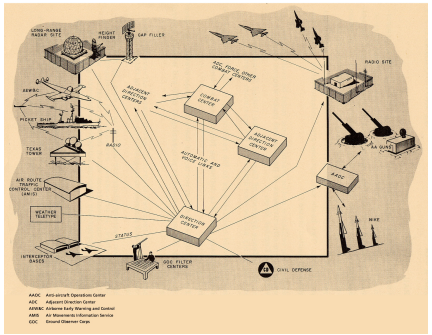
- Technische Daten
  - Digitalrechner, bit-parallele Operationen
  - 5000 Röhren, 11000 Halbleiterdioden
  - magnetischer Kernspeicher
  - Röhrenmonitore mit Lichtgriffel

⚠ Spätere Nutzung in SAGE durch die U.S. Air Force

SAGE – Semi-Automatic Ground Environment

Erstes verteiltes Echtzeitrechensystem als Schöpfung des „Kalten Krieges“

- Automatisiertes Kontroll- und Abwehrsystem gegen Bomber



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

☞ Entwicklung eines leistungsfähigeren Nachfolgers: Whirlwind II

AN/FSQ-7 Echtzeitrechensystem

- Der Nachfolger AN/FSQ-7 alias „Whirlwind II“:

(Quelle: Steve Jurvetson from Menlo Park, USA)

← SAGE Bedienstation

- Technische Daten
  - Auftraggeber: U.S. Air Force
  - Auftragnehmer: MIT, später IBM
  - Bauweise: 55000 Röhren, 2000 m^2, 275 t, 3 MW, 75 KIPS

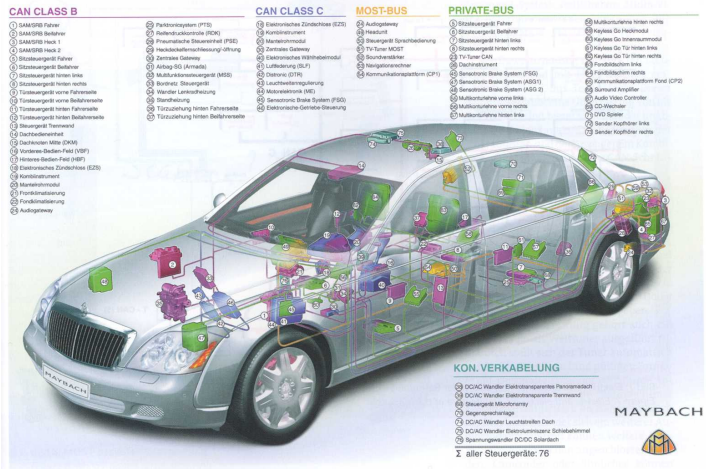
- Betriebsdaten von SAGE:
  - Installation: 22 - 23 Stationen im Zeitraum 1959 - 1963
  - Betrieb: bis 1983 (Whirlwind I bis 1979)
  - Kosten: 8–12 Milliarden $ (1964) ⇝ ca. 97 Milliarden $ (2019)
  - Nachfolger: u.a. AWACS

Moderne Echtzeitsysteme

Wo immer Rechensysteme mit ihrer physikalischen Umwelt interagieren . . .

Spezialzwecksysteme (Forts.)

Verteiltes System auf Rädern



(Quelle: DaimlerChrysler [1])

Gliederung

DIN 44300

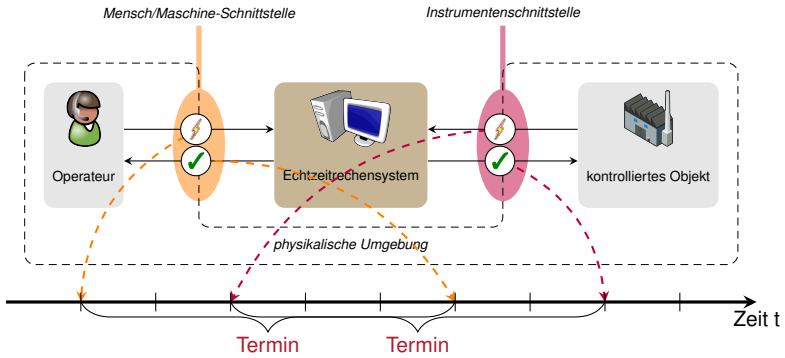
Ereignis- oder zeitgesteuerte Programmverarbeitung

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.

Kopplung mit der (realen) Umwelt

Komponenten eines Echtzeitsystems



- Echtzeitrechensystem interagiert mit der physikalischen Umwelt
- Berechnet als Reaktion auf Ereignisse ⚡ (engl. *event*, Stimuli) der Umgebung Ergebnisse ✓ (engl. *result*)
- Zeitpunkt, zu dem ein Ergebnis vorliegen muss, wird als Termin oder Frist (engl. *deadline*) bezeichnet

Verarbeitung von Programmen in Echtzeit

Realzeitverarbeitung (engl. *real-time processing*)

⚠ Echtzeitbetrieb bedeutet Rechtzeitigkeit

- Funktionale Korrektheit reicht für korrektes Systemverhalten nicht aus
- Rechtzeitige Bereitstellung der Ergebnisse ist entscheidend

- Den Rahmen stecken der Eintrittspunkt des Ereignisses und der entsprechende Termin ab

☞ Termine hängen dabei von der Anwendung ab

wenige Mikrosekunden	z.B. Drehzahl- und Stromregelung bei der Ansteuerung von Elektromotoren
einige Millisekunden	z.B. Multimedia-Anwendungen (Übertragung von Ton- und Video)
Sekunden, Minuten, Stunden	z.B. Prozessanlagen (Erhitzen von Wasser)

Geschwindigkeit impliziert nicht unbedingt Rechtzeitigkeit

Zuverlässige Reaktion des Rechensystems auf Umgebungsereignisse

⚠ Geschwindigkeit ist keine Garantie für die rechtzeitige Bereitstellung von Ergebnissen

- 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 Zeitskala des Rechensystems muss nicht mit der durch die Umgebung vorgegebenen (Realzeit) übereinstimmen ⇝ Zeitgeber?

→ Temporale Eigenschaften des kontrollierten (physikalischen) Objekts müssen im Rechensystem geeignet abgebildet werden

Konsequenzen überschrittener Termine

Verbindlichkeit von Terminvorgaben

- **Weich** (engl. *soft*) auch „schwach“
  - Ergebnis verliert mit zunehmender Terminüberschreitung an Wert (z.B. Bildrate bei Multimediasystemen)

  → Terminverletzung ist tolerierbar
- **Fest** (engl. *firm*) auch „stark“
  - Ergebnis wird durch eine Terminüberschreitung wertlos und wird verworfen (z.B. Abgabetermin einer Übungsaufgabe)

  → Terminverletzung ist tolerierbar, führt zum Arbeitsabbruch
- **Hart** (engl. *hard*) auch „strikt“
  - Terminüberschreitung kann zum Systemversagen führen und eine „Katastrophe“ hervorrufen (z.B. Airbag)

  → Terminverletzung ist keinesfalls tolerierbar

Arten von Echtzeitsystemen

Fest ⟺ Hart

- Fest/Hart ↦ Terminverletzung ist nicht ausgeschlossen[1]
  - Terminverletzung wird vom Betriebssystem erkannt

  → Weiteres Vorgehen hängt von der Art des Termins ab

Fest ⇝ plangemäß weiterarbeiten
- Betriebssystem bricht den Arbeitsauftrag ab
- Nächster Arbeitsauftrag wird (planmäßig) gestartet

→ Transparent für die Anwendung

hart ⇝ sicheren Zustand finden
- Betriebssystem löst eine Ausnahmesituation aus
- Ausnahme ist intransparent für die Anwendung

→ Anwendung behandelt diese Ausnahme

[1] Auch wenn Ablaufplan und Betriebssystem auf dem Blatt Papier Determinismus zeigen, kann das im Feld eingesetzte technische System von unbekannten/unvermeidbaren Störeinflüssen betroffen sein!

Arten von Echtzeitsystemen (Forts.)

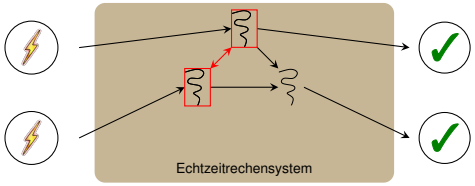
Radikale Unterschiede im Systementwurf zeichnen sich ab...

- **Hard real-time computer system**
  (dt. Hartes Echtzeitrechensystem)
  - Rechensystem mit mind. einem hartem Termin
  - Garantiert unter allen (spezifizierten) Last- und Fehlerbedingungen
  - Laufzeitverhalten ist ausnahmslos deterministisch
  - Typisch für sicherheitskritische Echtzeitrechensysteme
    - engl. *safety-critical real-time computer system*
    - Beispiel: Fluglageregelung, Airbag, ...

- **Soft real-time computer system**
  (dt. Weiches Echtzeitrechensystem)
  - Rechensystem welches keinen harten Termin erreichen muss
  - Termine können gelegentlich verpasst werden

Herausforderung: Gewährleisten von Rechtzeitigkeit

Ereignisbehandlungen müssen termingerecht abgearbeitet werden



- Ereignisse aktivieren Ereignisbehandlungen
  - Wie viel Zeit benötigt die Ereignisbehandlung maximal?
  - Lösung des trivialen Falls ist (scheinbar) einfach, wenn man die maximale Ausführungszeit der Ereignisbehandlung kennt.
- Reale Echtzeitsysteme sind komplex
  - Mehrere Ereignisbehandlungen ⇝ Konkurrenz
    - Verwaltung gemeinsamer Betriebsmittel, allen voran die CPU.
  - Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Ereignisbehandlungen

Vorhersagbarkeit des Laufzeitverhaltens

Echtzeitsysteme sind (schwach, stark oder strikt) deterministisch

Determiniertheit

Bei identischen Eingaben sind verschiedene Abläufe zulässig, sie liefern jedoch stets das gleiche Resultat.

☞ Im allgemeinen unzureichend für den Entwurf von Echtzeitsystemen

⚠ Transparenz von Programmunterbrechungen
- Interrupts verursachen vom normalen Ablauf abweichende ausnahmebedingte Abläufe

Determinismus

Identische Eingaben führen zu identischen Abläufen. Zu jedem Zeitpunkt ist bestimmt, wie weitergefahren wird.

☞ Notwendig, falls Termine einzuhalten sind
- Nur so lässt sich das Laufzeitverhalten verlässlich abschätzen

Vorhersagbarkeit des Laufzeitverhaltens (Forts.)

Vorhersagbarkeit

Der Ablauf lässt sich zu jedem Zeitpunkt exakt angeben und hängt nicht von den aktuellen Eingaben oder vom aktuellen Zustand ab.

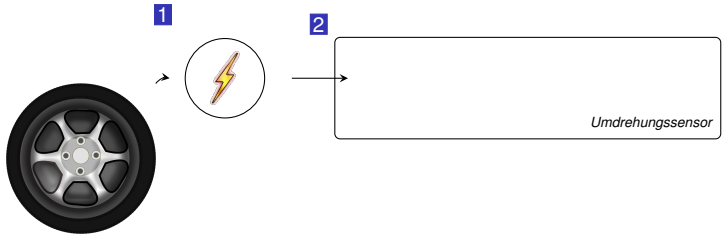
☞ Vorteilhaft für zeitkritische Systeme

- Exakte Angaben zum zeitlichen Ablauf sind bereits à priori möglich
- Von Umgebung und Eingaben entkoppeltes Laufzeitverhalten
  → Aktivitäten folgen einem strikt vorgegebenem Stundenplan

Echtzeitsysteme müssen stets ein deterministisches oder besser vorhersagbares Laufzeitverhalten gewährleisten!

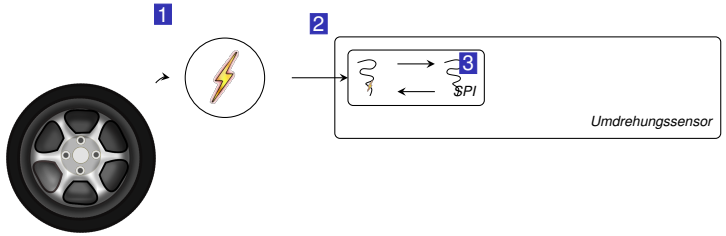
- Insbesondere beim Zugriff auf gemeinsame Betriebsmittel
  CPU ↦ Umschaltung zwischen verschiedenen Aktivitäten
  Kommunikationsmedium ↦ Versand von Nachrichten

Beispiel: Ein (fiktives) Anti-Blockier-System



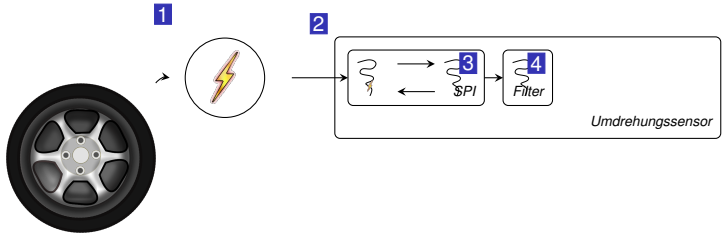
- ABS überwacht kontinuierlich Umdrehungszahl des Rads
  → Messfühler erzeugt Signale (Ereignisse)
- Intelligenter Sensor (engl. *smart sensor*) führt Vorverarbeitung der Daten durch (erkennt z.B. Stillstand)

Beispiel: Ein (fiktives) Anti-Blockier-System



- Meßfühlerdaten werden über den SPI-Bus entgegengenommen
  - Buskommunikation erfordert eine ISR und einen Faden
    → Wann wird die ISR angesprungen? Sind Unterbrechungen gesperrt?
    → Wann wird der Faden eingeplant? Muss er auf Betriebsmittel warten?

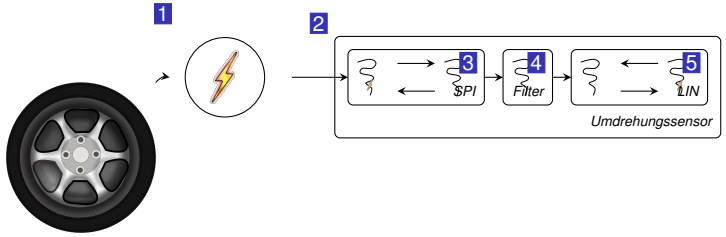
Beispiel: Ein (fiktives) Anti-Blockier-System



- Filter übernimmt die Signalvorverarbeitung
  - Angleichung diverser Abtastraten durch gesonderten Faden
    – der Filter verarbeitet immer mehrere Messwerte auf einmal
    → Wann wird der Faden eingeplant? Muss er auf Betriebsmittel warten?

Beispiel: Ein (fiktives) Anti-Blockier-System

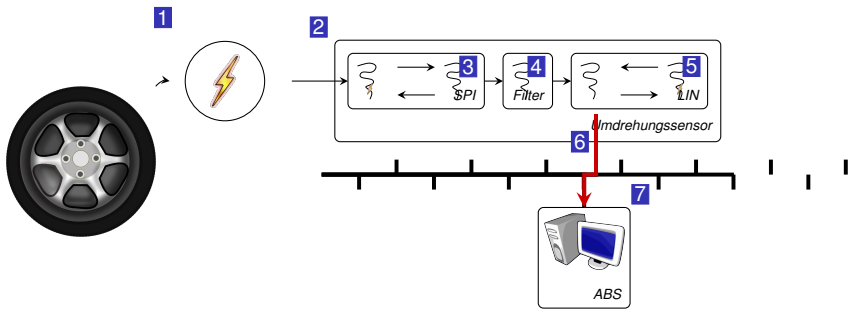
Funktion eines verteilten Echtzeitrechensystems



- Konsolidierte Messwerte werden an ABS-Steuergerät gesendet
  - Komplexer Gerätetreiber notwendig
    - → Wann wird die ISR angesprungen? Sind Unterbrechungen gesperrt?
    - → Wann wird der Faden eingeplant? Muss er auf Betriebsmittel warten?
    - → Können alle Daten „auf einmal“ übetragen werden?

Beispiel: Ein (fiktives) Anti-Blockier-System

Funktion eines verteilten Echtzeitrechensystems

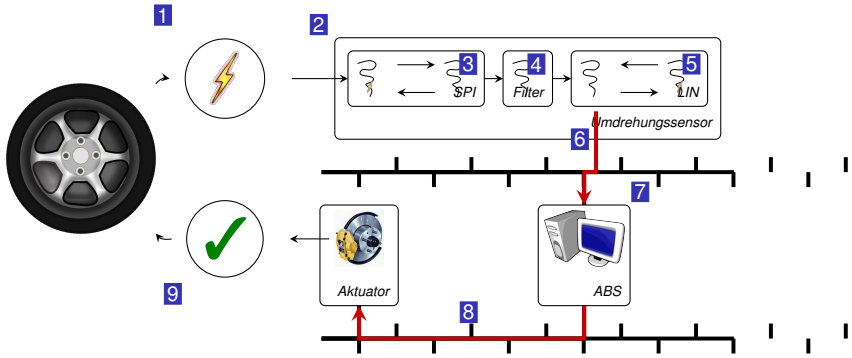


- Sensor und ABS-Steuergerät sind per LIN-Bus verbunden
  - Datenübertragung benötigt Zeit . . .
    - → Wie lange muss ich warten, bis ich auf das Medium zugreifen kann?

⚠ Vorgänge im ABS-Steuergerät sind noch deutlich komplexer

Beispiel: Ein (fiktives) Anti-Blockier-System

Funktion eines verteilten Echtzeitrechensystems



- Stellwert wird dem Aktor zugestellt
  - CAN-Bus verbindet ABS-Steuergerät und Aktor
    - → Wieviele Bytes schafft der Bus in einer bestimmten Zeit?
    - → Wie lange muss ich warten, bis ich auf das Medium zufgreifen kann?

☞ schließlich wird die Bremskraft geeignet beeinflusst

Beispiel: Ein (fiktives) Anti-Blockier-System (Forts.)

Wie lange dauert das ganze nun?

⚠ Die korrekte Funktion des ABS erfordert eine Reaktion auf eine Blockierung des Rades innerhalb einer bestimmten Zeitspanne

- Zu dieser Zeitspanne tragen zwei Komponenten bei:

  Aktive Zeitintervalle ⇝ „Fortschritt“ im ABS
  - Berechnungen benötigen Zeit ⇝ maximale Ausführungszeit
  - Geschwindigkeit der Datenübertragung ist beschränkt

  Inaktive Zeitintervalle ⇝ „Wartezeit“ für das ABS
  - Fortschritt erfordert die Zuteilung von Betriebsmitteln
  - z. B. CPU oder Kommunikationsmedium

☞ Die Frage ist, wie lange man auf die Zuteilung warten muss!
- Determiniertheit alleine reicht für die Beantwortung nicht aus!
- Determinismus erfordert die vollständige Kenntnis der Umgebung!
- Vorhersagbarkeit liefert die gewünschte Aussage zu dieser Frage!

Charakterisierung von Echtzeitanwendungen [4, S. 25]

☞ Deterministische Abarbeitung von Ereignisbehandlungen?

- Rein zyklisch ⇝ periodische Ereignisbehandlungen, Abfrage-Betrieb
  - (Nahezu) konstanter Betriebsmittelbedarf von Periode zu Periode
- Meist zyklisch ⇝ überwiegend periodische Ereignisbehandlungen
  - System muss auf externe Ereignisse reagieren können
  - Betriebsmittelbedarf schwankt bedingt von Periode zu Periode
- Asynchron/vorhersagbar ⇝ kaum periodische Ereignisbehandlungen
  - Aufeinanderfolgende Aktivierungen können zeitlich stark variieren
  - Zeitdifferenzen haben eine obere Grenze oder bekannte Statistik
  - Stark schwankender Betriebsmittelbedarf
- Asynchron/nicht vorhersagbar ⇝ aperiodische Ereignisbehandlungen
  - Ausschließlich externe Ereignisse
  - Hohe, nicht deterministische Laufzeitkomplexität einzelner Ereignisbehandlungen

Gliederung

Aufbau der Vorlesung

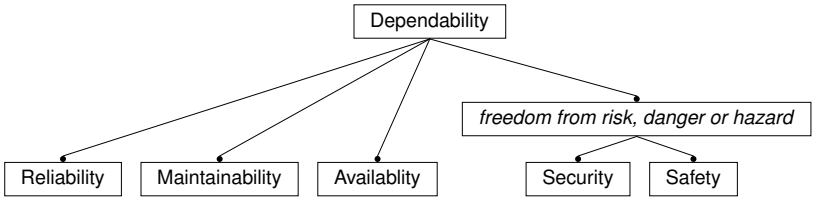
- Die Vorlesung orientiert sich vor allem ...
  - an der Ausprägung des Spezialzweckbetriebs
  - und den Eigenschaften der Ereignisse und ihrer Behandlungen,
  - blickt aber auch über den Tellerrand.

	vorranggesteuerte Systeme	taktgesteuerte Systeme	Analyse
Einleitung			
Grundlagen			
periodische Echtzeitsysteme			
nicht-periodische Echtzeitsysteme			
Rangfolge			
Zugriffskontrolle			
Aktuelle Forschungsthemen (Mehrkernrechensysteme)			
Aktuelle Forschungsthemen II / Industrievortrag (optional)			
Zusammenfassung und Ausblick			

Abgrenzung

Verlässlichkeit (engl. *dependability*)

Echtzeitsysteme sind häufig sicherheitskritische Systeme und erfordern ein hohes Maß an Verlässlichkeit. Verlässlichkeit selbst hat viele Gesichter ...



> *The trustworthiness of a computing system which allows reliance to be justifiably placed on the service it delivers. [3]*

Abgrenzung

Zusammenspiel von Rechtzeitigkeit und Verlässlichkeit

⚠ Verlässlichkeit erfordert Rechtzeitigkeit!
- Verpasste Termine stellen Fehler dar
- Diese Fehler müssen ggf. erkannt oder maskiert werden

- Andererseits: Rechtzeitigkeit erfordert Verlässlichkeit!
  - Fehler können zum Verpassen eines Termins führen
  - Maskieren solcher Fehler hilft, die Rechtzeitigkeit zu gewährleisten

- Betrachtung der Rechtzeitigkeit unter Annahme des *fehlerfreien Falls*
  - Verletzte Termine werden auf einer höheren Ebene behandelt
  - Toleranz gegenüber Fehlern dient der Verlässlichkeit

☞ Das ist Thema der Verlässlichen Echtzeitsystem im SS ;-)

Gliederung

Resümee

- Echtzeitbetrieb eines Rechensystems in seiner Umgebung
  - Ereignis, Ereignisbehandlung, Ergebnis, Termin
- Komponenten eines Echtzeitsystems
  - Operateur, Echtzeitrechensystem, kontrolliertes Objekt
- Weiche, feste und harte Echtzeitbedingungen
- Determiniertheit, Determinismus, Vorhersagbarkeit
- Verhalten von Echtzeitanwendungen
  - Rein/meist zyklisch
  - Asynchron und irgendwie/nicht vorhersagbar
- Abgrenzung: Fokus dieser Vorlesung liegt auf der Rechtzeitigkeit

Literaturverzeichnis

[1] DaimlerChrysler AG:
Der neue Maybach.
In: *ATZ/MTZ Sonderheft* (2002), Sept., S. 125

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

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

[4] Liu, J. W. S.:
Real-Time Systems.
Englewood Cliffs, NJ, USA : Prentice Hall PTR, 2000. –
ISBN 0–13–099651–3