Echtzeitsysteme

Rangfolge und gerichtete Abhängigkeiten

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

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

16. Dezember 2019

Fragestellungen

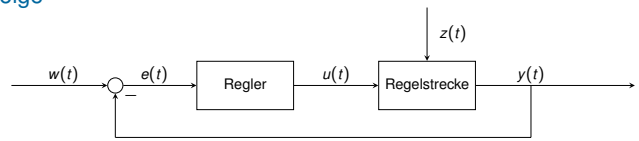
- Was bedeutet Rangfolge?
  - Was ist die Ursache von Rangfolge?
  - Wie beschreibt man Rangfolge?
- Wie kann Rangfolge implementieren werden?
  - Welche Implementierungsvarianten gibt es?
  - Welche Implikationen haben sie?
- Was bedeuten Rangfolgebeziehungen für die Ablaufplanung?

Gliederung

Rangfolge (engl. *precedence*)

Abhängigkeit von Kontrollflüssen

☞ Ausführung von Arbeitsaufträgen unterliegt häufig einer bestimmten Reihenfolge
↦ Rangfolge



- Beispiel: Regelungsanwendung
  - Signalverarbeitungsauftrag muss vor der Regelung gelaufen sein
- Beispiel: Kommunikationssystem
  - Sendeauftrag muss vor Empfangsauftrag gelaufen sein
  - Empfangsauftrag muss vor Bestätigungsauftrag gelaufen sein
- Beispiel: Anfragesystem
  - Eingabeauftrag muss vor Suchauftrag gelaufen sein
  - Suchauftrag muss vor Ausgabeauftrag gelaufen sein

⚠ Rangfolge ist oft in Datenabhängigkeiten begründet

Datenabhängigkeit (engl. *data dependency*)

Abhängigkeit von konsumierbaren Betriebsmitteln

☞ Arbeitsaufträge benötigen ggf. konsumierbare Betriebsmittel

- Anzahl ist (log.) unbegrenzt: Nachrichten, Signale, Interrupts

  Produzent kann beliebig viele davon erzeugen

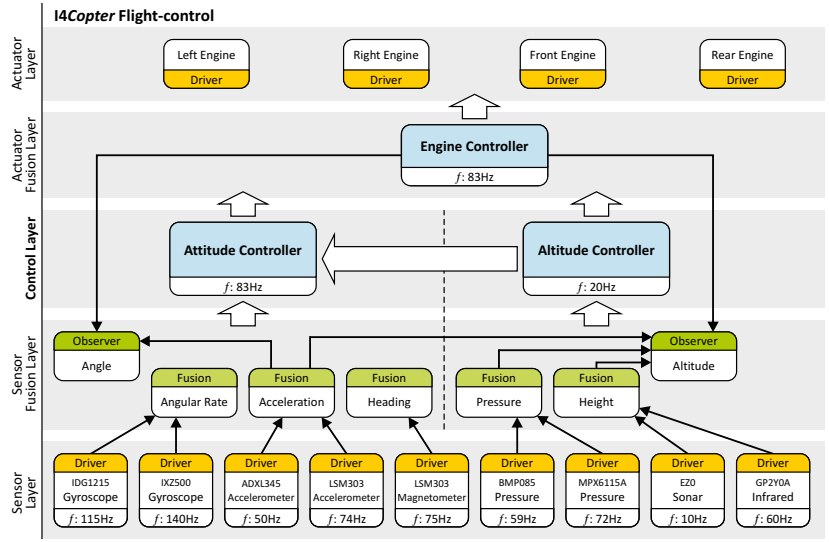
  Konsument zerstört sie wieder bei Inanspruchnahme

→ Zwischen ihnen besteht eine gerichtete Abhängigkeit

⚠ Produzent und Konsument sind voneinander abhängige Entitäten

- Abhängigkeit: Konsument → Produzent
  - Betriebsmittel muss vor Inanspruchnahme zunächst bereitgestellt werden
- Abhängigkeit: Produzent → Konsument (seltener)
  - Abbildung konsumierbare ↦ wiederverwendbare Betriebsmittel
  - Beispiel: begrenzter Puffer (engl. *bounded buffer*)
  - → Produzent fordert ein wiederverwendbares Betriebsmittel an, welches vom Konsumenten später wieder freizugeben ist

Datenabhängigkeiten im I4Copter



Nebenläufige Aktivitäten

Kausalität (lat. *causa*: Ursache)

Die Beziehung zwischen Ursache und Wirkung, d.h., die ursächliche Verbindung zweier Ereignisse.

Nebenläufigkeit (engl. *concurrency*)

Bezeichnet das Verhältnis von nicht kausal abhängigen, sich entsprechend nicht beeinflussenden, Ereignissen.

- Ereignisse sind nebenläufig, wenn keines Ursache des anderen ist
- Aktionen können nebenläufig ausgeführt werden, wenn keine das Resultat des anderen benötigt

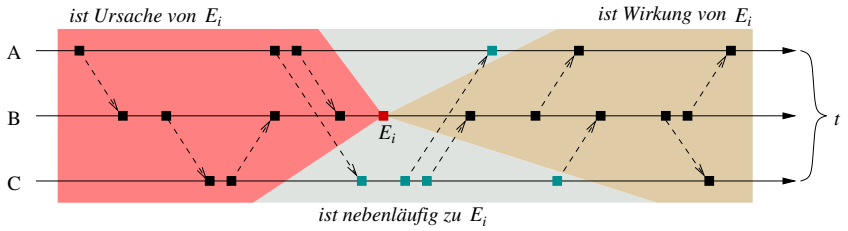
- Beispiel eines nichtsequentiellen Programms:

```
1:    foo = 4711;
2:    bar = 42;
3: foobar = foo + bar;
4: barfoo = bar + foo;
5:    hal = foobar + barfoo;
```

- Zeile 1 kann nebenläufig zu Zeile 2 ausgeführt werden
- Zeile 3 kann nebenläufig zu Zeile 4 ausgeführt werden

Kausalordnung

Nebenläufigkeit als relativistischer Begriff von Gleichzeitigkeit



- Relationen: Ursache ⟷ Wirkung ⟷ Nebenläufigkeit
  - Kausalkette von Ereignissen in Bezug zu einem Ereignis E_i
  - → Bezogen auf Raum[1] und Zeit

☞ Ein Ereignis E_i ist nebenläufig zu einem anderen:

- Es ist weder in der Zukunft noch in der Vergangenheit des Anderen
- Es ist weder Ursache oder Wirkung des anderen Ereignisses

→ Es liegt im Anderswo anderen Ereignisses

[1] A, B und C bezeichnen Ausführungsstränge auf einem Rechensystem.

Kausalordnung (Forts.)

Rangfolge aus Gründen von Daten- und Zeitabhängigkeit

- Ein Arbeitsauftrag kann nebenläufig bearbeitet werden, wenn:
  - Im Allgemeinen
    - Er benötigt kein Ergebnis eines Anderen (vgl. Folie 7)
    - → Abwesenheit von Datenabhängigkeiten
  - Im Speziellen
    - Er hängt zeitlich nicht von anderen Aufträgen ab
      - Termintreue (weich/fest bzw. hart) wird beibehalten
      - Periodizität wird beibehalten
    - → Abwesenheit von Zeitabhängigkeiten
- Zusammenwirken von Ereignissen beschränkt Nebenläufigkeit

Ereigniskorrelation vs. Bearbeitungsmodell

"ist Ursache von" / "ist Wirkung von" } ↦ sequentiell (verwirklicht vor/zur Laufzeit)

"ist nebenläufig zu" ↦ parallel (logisch/tatsächlich)

☞ Minimierung von sequentiellem Programmcode ist (auch) in Echtzeitsystemen von Bedeutung

Beispiel: Serieller Empfang von Nachrichten

Implementierung orientiert sich an OSEK OS [7] bzw. AUTOSAR OS [2]

- Nachrichtenverarbeitung besteht aus zwei getrennten Aufgaben
  - Empfang: Abholen einzelner Bytes und Zusammensetzen von Nachrichten
  - Verarbeitung: Nachricht verarbeiten und Behandlung aktivieren

Empfang

```
Pool *msgPool;
Buffer *msgBuffer; Message *msg;

ISR(SerialByte) {
  uint8_t rec = rs232_get();
  msg_addTo(msg,rec);

  if(msg_isComplete(msg)) {
    buffer_ins(msgBuffer,msg);
    msg = pool_getfree(msgPool);
  }
  return;
}
```

Verarbeitung

```
TASK(MsgHandler) {
  Message *cMsg = 0;

  InitHandler();

  cMsg = buffer_get(msgBuffer);
  msg_prepare(cMsg);
  handle(cMsg);

  TerminateTask();
}
```

☞ Datenabhängigkeit ⇝ gemeinsamer Puffer `msgBuffer`

⚠ Rangfolge ⇝ Wann kann die Nachricht verarbeitet werden? ???

→ Wann wird `TASK(MsgHandler)` aktiv?

Kausalordnung [6, S. 43]

Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Arbeitsaufträgen

- Die Kausalordnung wird durch eine Vorgängerrelation (engl. *precedence relation*) beschrieben:
  - $J_i \longrightarrow J_k$: Arbeitsauftrag J_i ist Vorgänger (engl. *predecessor*) von J_k
  - Ausführung des Nachfolgers (engl. *successor*) J_k erfordert die Fertigstellung des Vorgängers J_i
- Beispiel auf Folie 10:
  - `ISR(SerialByte)` ist der Vorgänger
    - Zuerst muss die Nachricht vollständig empfangen werden, ...
  - `TASK(MsgHandler)` ist der Nachfolger
    - ... anschließend findet die eigentliche Nachrichtenbehandlung statt.

⚠ Koordinierte Ausführung von `ISR(SerialByte)` und `TASK(MsgHandler)` ist für korrekte Funktion notwendig

Beispiel: Serieller Empfang von Nachrichten (Forts.)

Abhängigkeitsbeziehungen der einzelnen Arbeitsaufträge

Aufgabe T_1 Empfang einzelner Bytes ⇝ Aufträge $J_{1,1}, J_{1,2}, \ldots$

Aufgabe T_2 Empfang der Nachrichten ⇝ Aufträge $J_{2,1}, J_{2,2}, \ldots$

- Keine Abhängigkeiten zwischen Aufträgen von T_1 und T_2
  - Termin $D_{1,1}$ erzwingt lediglich Fertigstellung von $J_{1,1}$ vor $J_{1,2}$: $D_{1,1} \leq r_{1,2}$
- Arbeitsaufträge $J_{1,1}, \ldots, J_{1,n}$ ermöglichen die Ausführung von $J_{2,1}$
  - Verarbeitung der Nachricht nach vollständigem Empfang

→ $J_{1,1}, \ldots, J_{1,n}$ sind Vorgänger von $J_{2,1}$

⚠ Endgültige Abhängigkeitsbeziehungen erst zur Laufzeit bekannt

- Nachrichten können unterschiedlich viele Bytes umfassen

→ Unterschiedlich viele Vorgänger von $J_{2,1}$ und $J_{2,l}$

Koordinierung (engl. *coordination*)

Behandlung von gerichteten Abhängigkeiten

- Statisch durch Einplanung ⇝ analytische Verfahren
  - Ablaufpläne berücksichtigen Rangfolgen und Datenabhängigkeiten
    - *à priori* Wissen ↦ periodische Aufgaben
  - Arbeitsaufträge laufen komplett durch (engl. *run to completion*)
    - Warten weder ex- noch implizit, dürfen jedoch verdrängt werden

  → Ergebnis ist ein System von ausschließlich einfachen Aufgaben

- Dynamisch durch Kooperation ⇝ konstruktive Verfahren
  - Synchronisationspunkte in den Programmen explizit machen
    - d.h., Zeitsignale austauschen ↦ Semaphor
  - Arbeitsaufträge sind Produzenten/Konsumenten von Ereignissen

    physikalische Ereignisse von den kontrollierten Objekten

    logische Ereignisse von anderen Arbeitsaufträgen

  → Ergebnis ist ein System von (ggf. vielen) komplexen Aufgaben

Gliederung

Naive Implementierung

Anordnung im Quelltext: Rangfolge ↦ Programmsequenz

☞ Implizite Codierung gerichteter Abhängigkeiten im Quelltext

- Vorgänger und Nachfolger sind unveränderlich und à priori bekannt

→ Hier: Behandlung nach vollständigem Empfang der Nachricht

```
Message *msg;

ISR(SerialByte) {
  uint8_t received = rs232_getByte();
  msg_addTo(msg,received);

  if(msg_isComplete(msg)) {
    InitHandler();

    msg_prepare(currentMsg);
    handle(currentMsg);

    msg_clear(msg);
  }
}
```

Einfache Implementierung

- Nur ein Aktivitätsträger
- Rangfolge unmittelbar ablesbar
- Keine Pufferung/Koordinierung notwendig

⚠ Entwurfsvariante mit gravierenden Implikationen!

Nachteile implizit codierter Abhängigkeiten

Zeitliche Domänen

Innerhalb einer zeitlichen Domäne (engl. *temporal domain*) ist das zeitliche Verhalten einheitlich:

- Ereignisse mit gleichen zeitlichen Eigenschaften
- Typischerweise durch eine Aufgaben behandelbar

- Zeitliche Domänen des Nachrichtenempfangs:

  Empfang ⇝ Nicht-periodische Aufgabe $T_1 = (i_1, e_1)$

  Verarbeitung ⇝ Nicht-periodische Aufgabe $T_2 = (i_2, e_2)$
- Empfang mehrere Bytes pro Nachricht ⇝ $i_1 \ll i_2$
- Verarbeitung ist komplexer als deren Empfang ⇝ $e_2 \gg e_1$

⚠ Naive Implementierung verletzt zeitlichen Domänen

- Ergebnis ist eine Aufgabe $T_1' = (\min(i_1, i_2), e_1 + e_2)$

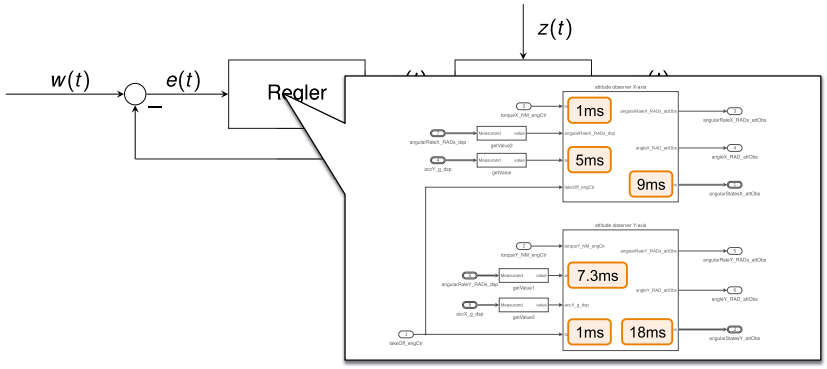
→ Unrealistische zeitliche Parameter ⇝ Überabschätzung des Aufwands

☞ Gerichtete Abhängigkeiten ↦ Hinweis auf versch. zeitliche Domänen

→ Aufgaben mit dedizierten Auslöseereignissen und zeitlichen Parametern

Zeitliche Domänen

Am Beispiel des I4Copters



- Signaldatenverarbeitung im Fokus
  - Scheinbar einfache Funktion ↦ Potpourri zeitlicher Domänen
  - Jeder Sensor ist einem physikalischen Ereignis zugeordnet
  - Werte werden in Fusionsfiltern zusammengeführt

Übergang zwischen zeitlichen Domänen

Produzenten und Konsumenten werden mit unterschiedlichen Raten aktiviert

☞ Koordinierung verschiedener zeitlicher Domänen (vgl. Folie 6)
- Unterschiedliche Raten in den Bereichen des Echtzeitsystems

→ Gerichtete Abhängigkeiten erfordern Angleichung

- Datenaustausch zwischen Produzent und Konsument
  - Erfolgt in Abstimmung ↦ Konsument erwartet Daten
  - Aufwand abhängig von der Diskrepanz der Raten

☞ Typisches Vorgehen in Echtzeitanwendungen
- Gemeinsamer Puffer als Zwischenspeicher ↦ Produzent schneller
  - Problem: Puffergröße und WCET (Abarbeitung des Rückstands)
- Prädikation durch Beobachter ↦ Konsument schneller[2]
  - Generierung von Zwischenwerten kompensiert langsamen Produzenten
- Letzter Wert genügt (engl. *last is best*) ↦ beidseitig
  - Verzicht auf explizite Abstimmung (simpel)
  - Alter unterliegt gewissen Schwankungen

[2] Sonderfall in der digitalen Signalverarbeitung: Zukünftige Messwerte lassen sich mittels Modellen des physikalischen Systems in gewissem Umfang vorhersagen.

Übergang zwischen zeitlichen Domänen (Forts.)

Produzenten und Konsumenten werden mit unterschiedlichen Raten aktiviert

- Verschmelzung zeitlich identischer Domänen ist möglich
  - Stellt eine Optimierung der Implementierung dar

☞ Letzter Schritt des Systementwurfs [3, 4]

1 Identifikation der zeitlichen Domänen
- Exklusive Abbildung jeder Domäne auf eine Aufgabe

2 Vereinigung äquivalenter zeitlicher Domänen
- Reduktion von Aufgaben mit gleichartigen Parametern
- Zeitliche Kohäsion: Aufgaben werden immer gleichzeitig aktiviert
- Sequentialisierung: (Teil-)Aufgaben laufen immer nacheinander ab

⚠ Naive Implementierung nimmt diese Optimierung vorweg
- Auch wenn die zeitlichen Domänen verschieden sind

☞ Entkopplung zeitlicher Domänen durch logische Ereignisse

Physikalische und logische Ereignisse

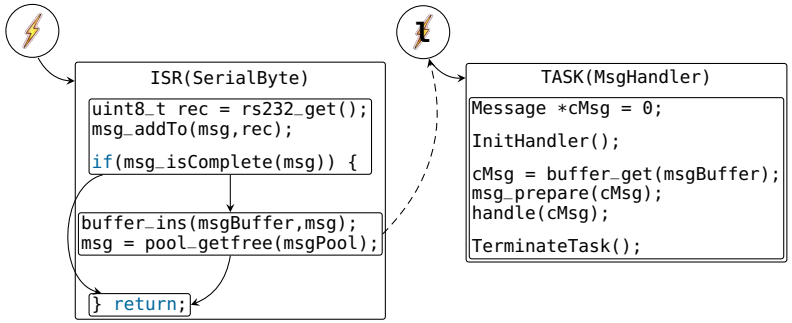
- Physikalische Ereignisse ↦ Zustandsänderungen der Umwelt
  - Empfang eines Byte auf der seriellen Schnittstelle

→ Auslösung einer Unterbrechung

- Logische Ereignisse ruft die Echtzeitanwendung selbst hervor

→ Vollständiger Empfang einer Nachricht

☞ Das logische Ereignis entkoppelt Empfang und Verarbeitung zeitlich



Gliederung

Implementierungsvarianten gerichteter Abhängigkeiten

Rangfolge sicherstellen, ohne eine zeitliche Kopplung vorwegzunehmen

☞ Herstellung der Rangfolge ohne die zeitliche Nähe durch eine entsprechende Anordnung im Quelltext zu erzwingen

- Ohne Koordinierung $\rightsquigarrow$ Rangfolge bewusst vernachlässigen

→ Last is best: Schwankungen in der Aktualität sind tolerierbar

- Analytische Koordinierung $\rightsquigarrow$ mithilfe der Ablaufplanung
  - Nur für Abhängigkeiten zwischen periodischen Aufgaben anwendbar

→ Arbeitsaufträge werden nicht parallel ausgeführt (Folie 23)

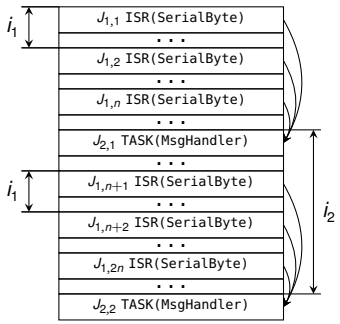
Taktsteuerung: Überlappungsfreie Anordnung in der Ablauftabelle
Vorrangsteuerung: Analog durch Phasenversatz

- Konstruktive Koordinierung $\rightsquigarrow$ mithilfe expliziter Synchronisationsmechanismen des Echtzeitbetriebssystems
  - Für nicht-periodischen Aufgaben unumgänglich
  - In zeitgesteuerten Systemen unsinnig

→ Es existiert eine Vielzahl Synchronisationsmechanismen (Folie 24 ff)

Rangordnung mittels statischer Ablaufplanung

- Eingabe für die statische Ablaufplanung (s. Folie IV-3/20 ff) ist ein Abhängigkeitsgraph. Die erzeugte Ablauftabelle muss die folgenden Randbedingungen einhalten:



- Überführung von T_1 und T_2 in äquivalente periodische Aufgaben
  - Periode p_n = Zwischenankunftszeit i_n
- Anordnung nach Abhängigkeit
  - $r_{i,j} + e_i \leq r_{n,m} \Leftrightarrow J_{i,j} \mapsto J_{n,m}$
- Phasenverschobene Ausführung
  - Analoges Vorgehen bei ereignisgesteuerten Systemen
  - Rangfolge impliziert passende Phase ϕ_m: $\phi_m = \max_{J_{i,j} \mapsto J_{m,n}} r_{i,j} + \omega_{i,j}$

⚠ Einhaltung der Phase wird zur Laufzeit nicht überwacht

→ Laufzeitüberschreitungen $\rightsquigarrow$ ggf. Verletzungen der Rangfolge

Rangfolge durch Bereitstellung des Nachfolgers

Konstruktive Umsetzung der Rangordnung

AUTOSAR OS [2]

```
ISR(SerialByte) {
  uint8_t rec = rs232_get();
  msg_addTo(msg,rec);

  if(msg_isComplete(msg)) {
    buffer_ins(msgBuffer,msg);
    msg = pool_getfree(msgPool);
    ActivateTask(MsgHandler);
  }
  return;
}


TASK(MsgHandler) { /* ... */ }
```

POSIX [5]

```
void i_serialbyte(void) {
  uint8_t rec = rs232_get();
  msg_addTo(msg,rec);

  if(msg_isComplete(msg)) {
    buffer_ins(msgBuffer,msg);
    msg = pool_getfree(msgPool);
    pthread_create(thread,attr,
          t_msghandler,NULL);
  }
  return;
}

void t_msghandler(void* arg)
  { /* ... */ }
```

- Explizite Aktivierung des Nachfolgers durch den Vorgänger
  - Systemaufrufe: `ActivateTask` bzw. `pthread_create`

→ Planer stellt die richtige Reihenfolge sicher

⚠ Absolute Sequentialisierung von Vorgänger und Nachfolger
- Erschwert die Umsetzung komplexer Abhängigkeitsszenarien

→ Auftragsorientiertes Ausführungsmodell (run-to-completion)

Rangfolge durch den Austausch von Zeitsignalen

POSIX

```
void i_serialbyte(void) {
  uint8_t rec = rs232_get();
  msg_addTo(msg,rec);

  if(msg_isComplete(msg)) {
    buffer_ins(msgBuffer,msg);
    msg = pool_getfree(msgPool);
    sem_post(&msg_sem);
  }
  return;
}

void t_msghandler(void* arg) {
  Message *cMsg = 0;
  InitHandler();

  while(1) {
    sem_wait(&msg_sem);
    cMsg = buffer_get(msgBuffer);
    msg_prepare(cMsg);
    handle(cMsg);
  }

  pthread_exit(NULL);
}
```

- Betriebssystemabstraktion: Semaphore (engl. *semaphore*)
  - `sem_wait()` wartet blockierend auf das Eintreten einer Abhängigkeit
  - `sem_post()` zeigt das Eintreten der Abhängigkeit an
- Prozessorientiertes Ausführungsmodell
  - Typ. in Verbindung mit sog. Do-While-Prozessen
  - Do ⇝ `InitHandler()`
  - While ⇝ Nachrichten verarbeiten
- Ermöglicht teilweise nebenläufige Abarbeitung
  - Ausführung von `InitHandler()`, bevor eine Nachricht ansteht

Rangfolge durch Nachrichtenversand

Kombination aus Rangfolge und Datenaustausch (engl. *message passing*)

AUTOSAR OS

```
Message msg,rcvMsg;

ISR(SerialByte) {
  uint8_t rcv = rs232_get();
  msg_addTo(&msg,rec);

  if(msg_isComplete(&msg))
    SendMessage(serialMsg,&msg);
  return;
}

TASK(MsgHandler) {
  Message *cMsg = 0;
  InitHandler();

  while(1) {
    WaitEvent(msgEvent);
    ClearEvent(msgEvent);
    ReceiveMessage(serialMsg,
                   &rcvMsg);
    msg_prepare(&rcvMsg);
    handle(&rcvMsg);
  }
  TerminateTask();
}
```

- Übermittlung der Daten durch den Versand einer Nachricht
  - Vorgänger ⇝ `SendMessage()`
  - Nachfolger ⇝ `ReceiveMessage()`
- Verwaltung/Pufferung der Daten entfällt typischerweise
  - → Aufgabe des Nachrichtendiensts
- ⚠ AUTOSAR OS: Keine Rangfolge durch Nachrichtenversand
  - `ReceiveMessage()` blockiert nicht
  - → Erfordert Kombination mit Signalen (engl. *events*) ⇝ Wird mit Nachrichtenversand gesetzt

Gliederung

Restriktionen des periodischen Modells

Weitere Lockerung durch Aufhebung von A2 und A5 (vgl. IV-1/9)

⚠ Mathematische Ansätze zur zeitlichen Analyse periodischer Echtzeitsysteme bedingen häufig starke Einschränkungen:

~~A1 Alle Aufgaben sind periodisch~~

~~A2 Alle Arbeitsaufträge können an ihren Auslösezeitpunkten eingeplant und ausgeführt werden~~

A3 Termine und Perioden sind identisch

A4 Kein Arbeitsauftrag gibt die Kontrolle über den Prozessor ab

~~A5 Alle Aufgaben sind unabhängig~~[3]

A6 Die Kosten durch Unterbrechungen, Ablaufplanung und Verdrängung sind vernachlässigbar

A7 Alle Aufgaben verhalten sich voll-präemptiv

[3] D.h. die einzige gemeinsame Ressource ist die CPU und es existieren keine Einschränkungen hinsichtlich der Auslösezeiten der Arbeitsaufträge voneinander.

Abhängigkeiten $\rightsquigarrow$ phasenverschobene Ausführung

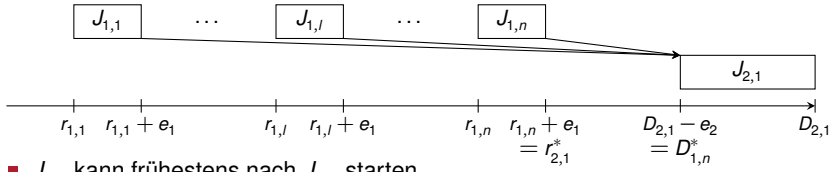
Gerichtete Abhängigkeiten in das Planungsproblem aufnehmen

☞ Vorgehen analog zur Berechnung statischer Ablaufpläne

- Abhängigkeiten schränken den zeitlichen Ablauf ein (vgl. Folie 23)

→ Umformulierung von Auslösezeiten und Termine so dass diese mit den Abhängigkeiten übereinstimmen [1]

- Beispiel: `ISR(SerialByte)` und `TASK(MsgHandler)` (vgl. Folie 10)



- $J_{2,1}$ kann frühestens nach $J_{1,n}$ starten
  - $\rightsquigarrow$ angepasste Auslösezeit des Nachfolgers $r^*_{2,1} = \max_{1 \le j \le n} r_{1,j} + e_1$
- $J_{2,1}$ benötigt noch genügend Ausführungszeit
  - $\rightsquigarrow$ angepasster Termin des Vorgängers $D^*_{1,n} = D_{2,1} - e_2$

Abhängigkeiten $\rightsquigarrow$ phasenverschobene Ausführung (Forts.)

1. Nachfolger J_i kann Ausführung erst mit Fertigstellung seiner Vorgänger beginnen

→ Modifizierung der Auslösezeit des Nachfolgers

$$r_i^* = \max\left\{r_i, \left\{r_j^* + e_j | J_j \rightarrow J_i\right\}\right\}$$

2. Die Vorgänger J_i müssen rechtzeitig fertig werden, so dass der Nachfolger seinen Termin einhalten kann

→ Modifizierung der Termine der Vorgänger

$$D_i^* = \min\left\{D_i, \left\{D_j^* - e_j | J_i \rightarrow J_j\right\}\right\}$$

☞ Anschließend erfolgt die Ablaufplanung mittels EDF

- EDF ist auch für derartige Systeme optimal (vgl. IV-2/23)
- Für Systeme mit statischen Prioritäten ungeeignet

⚠ Vorgehen nur für einfache Abhängigkeiten geeignet

- Muster wie 2 von 3 Vorgängern erfordern angepasste Abbildungen

Gliederung

Resümee

Rangfolge $\rightsquigarrow$ gerichtete Abhängigkeiten

- resultieren oft aus Datenabhängigkeiten
- gerichtete Abhängigkeiten in nebenläufigen Ausführungsumgebungen erfordern Koordinierung

Umsetzung gerichteter Abhängigkeiten $\rightsquigarrow$ Koordinierung

- wohlgeordneter Ablauf von Produzent und Konsument
- Übergang zwischen zeitlichen Domänen
- Implementierung gerichteter Abhängigkeiten

  implizit $\rightsquigarrow$ statische Ablauftabellen, Phasenverschiebung

  explizit $\rightsquigarrow$ Aktivierung, Zeitsignale, Nachrichten

Ablaufplanung nutzt die Einschränkung des Ablaufverhaltens

- Nachfolger $\rightsquigarrow$ modifizierte Auslösezeiten
- Vorgänger $\rightsquigarrow$ modifizierte Termine

Literaturverzeichnis

[1] Abdelzaher, T. F. ; Shin, K. G.:
Combined Task and Message Scheduling in Distributed Real-Time Systems.
In: *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 10 (1999), Nr. 11, S. 1179–1191.
http://dx.doi.org/10.1109/71.809575. –
DOI 10.1109/71.809575

[2] AUTOSAR:
Specification of Operating System (Version 4.0.0) / Automotive Open System Architecture GbR.
2009. –
Forschungsbericht

[3] Gomaa, H. :
A software design method for real-time systems.
In: *Communications of the ACM* 27 (1984), Nr. 9, S. 938–949.
http://dx.doi.org/10.1145/358234.358262. –
DOI 10.1145/358234.358262. –
ISSN 0001–0782

[4] Gomaa, H. :
Structuring criteria for real time system design.
In: *Proceedings of the 10th International Conference on Software Engineering (ICSE '88)*.
New York, NY, USA : ACM Press, 1989. –
ISBN 0–8186–1941–4, S. 290–301

Literaturverzeichnis (Forts.)

[5] IEEE:
ISO/IEC IEEE/ANSI Std 1003.1-1996 Information Technology — Portable Operating System Interface (POSIX®) — Part 1: System Application: Program Interface (API) [C Language].
IEEE, New York : IEEE, 1996. –
784 S. –
ISBN 1–55937–573–6

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

[7] OSEK/VDX Group:
Operating System Specification 2.2.3 / OSEK/VDX Group.
2005. –
Forschungsbericht. –
http://portal.osek-vdx.org/files/pdf/specs/os223.pdf, visited 2009-09-09

EZS – Cheat Sheet

Typographische Konvention

Der erste Index gibt die Aufgabe an (z. B. D_i), der Zweite (optional) bezieht sich auf den Arbeitsauftrag (z. B. $d_{i,j}$). Exponenten zeigen verschiedene Varianten einer Eigenschaft an (z. B. T^{HI},T^{MED}, T^{LO}). Funktionen beschreiben zeitlich variierende Eigenschaften (z. B. $P(t)$).

Eigenschaften

- t (Real-)Zeit
- d Zeitverzögerung (engl. delay)

Strukturelemente

- E_i Ereignis (engl. event)
- R_i Ergebnis (engl. result)
- T_i Aufgabe (engl. task)
- $J_{i,j}$ Arbeitsauftrag (engl. job) der Aufgabe T_i

Temporale Eigenschaften

Allgemein
- r_i Auslösezeitpunkt (engl. release time)
- e_i Maximale Ausführungszeit (WCET)
- D_i Relativer Termin (engl. deadline)
- d_i Absoluter Termin
- ω_i Antwortzeit (engl. response time)
- σ_i Schlupf (engl. slack)

Periodische Aufgaben
- p_i Periode (engl. period)
- ϕ_i Phase (engl. phase)

Nicht-Periodische Aufgaben
- i_i Minimale Zwischenankunftszeit (engl. minimal interarrival-time)

Aufgaben – Tupel

- $T_p = (p, e, D, \phi)$ Periodische Aufgabe ohne Priorität (zeitgesteuert oder dynamische Taskpriorität), $D = p$ und $\phi = 0$ sind der Reihe nach optional
- $T_i^S = (i_i, e_i, D_i)$ Nicht-periodische Aufgabe (Schreibweise mit i_i)
- $T_i^S = ([r_i^{nach}; r_i^{vor}], e_i, D_i)$ Nicht-periodische Aufgabe (Schreibweise mit Auslöseintervall)
- $J_{i,j} = (r_{i,j}, e_{i,j}, d_{i,j})$ Arbeitsauftrag

Ablaufplanung

- P_i Priorität (engl. priority) der Aufgabe T_i
- Ω_i Prioritätsebenen (engl. number of priorities)
- $h_{\Delta t}$ Rechenzeitbedarf (engl. demand)
- $u_{\Delta t}$ CPU-Auslastung (engl. utilisation)
- U Absolute CPU-Auslastung
- H Hyperperiode (großer Durchlauf, engl. major cycle)
- f Rahmenlänge (kleiner Durchlauf, engl. minor cycle)
- e_i^f WCET aller Aufträge im Rahmen i
- I_i Intervall (engl. interval)
- Δ_i Dichte (engl. density) von I_i

Zusteller

- T_{PS} Abfragender Zusteller (engl. polling server)
- T_{DS} Aufschiebbarer Zusteller (engl. deferable server)
- T_s Sporadischer Zusteller (engl. sporadic server)
- T_s Sporadischer Zusteller (engl. sporadic server)
- rt_i Wiederauffüllzeitpunkt (engl. replenishment time)