

Echtzeitsysteme

Rangfolge und gerichtete Abhängigkeiten

Peter Wägemann

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

<https://sys.cs.fau.de/lehre/ss22/ezs/>

28. Juni 2022



- 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**?



1 Grundlagen

- Datenabhängigkeiten
- Nebenläufigkeit
- Abhängigkeits- und Aufgabengraphen
- Koordinierung

2 Effekte in Echtzeitsystemen

- Zeitliche Domänen
- Physikalisch und logische Ereignisse

3 Lösungsverfahren

- Analytische Koordinierung
- Konstruktive Koordinierung

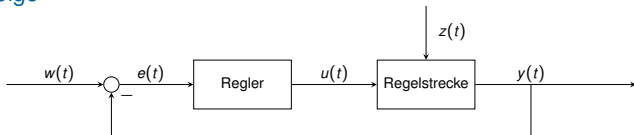
4 Ablaufplanung

5 Zusammenfassung





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





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)

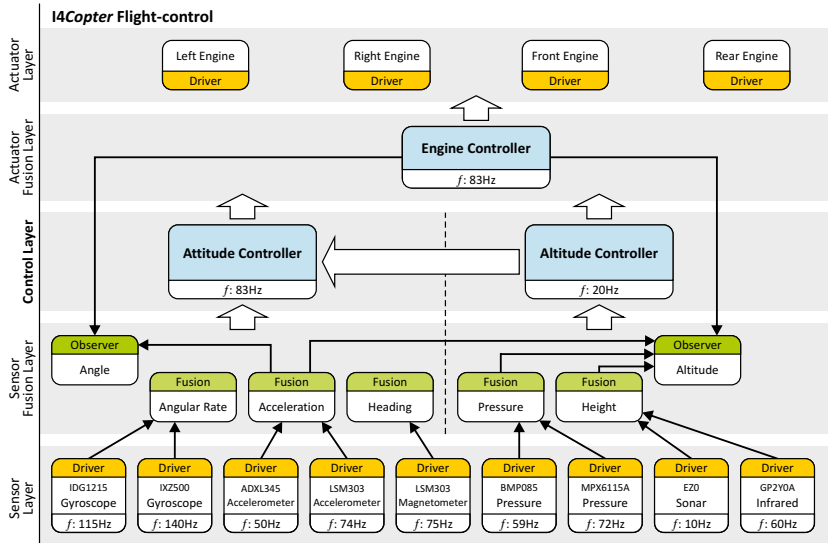
- Abbildung **konsumierbare** ↦ **wiederverwendbare Betriebsmittel**

- 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*)

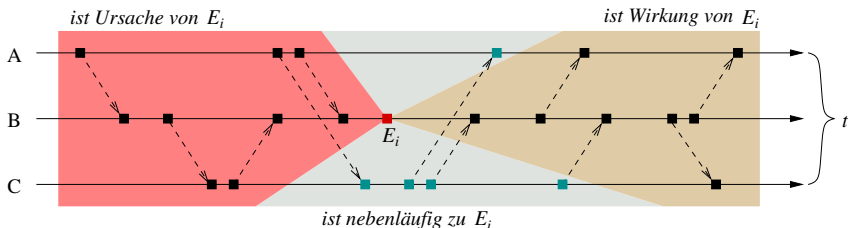
Bezeichnet das Verhältnis von nicht kausal abhängigen, sich entsprechend nicht beeinflussenden, Ereignissen.

- 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





- **Relationen:** Ursache \leftrightarrow Wirkung \leftrightarrow Nebenläufigkeit
 - Kausalkette von Ereignissen in Bezug zu einem Ereignis E_i
 - Bezogen auf Raum¹ und Zeit

☞ Ein Ereignis E_j **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

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

- 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 **sequentiell** 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** \rightsquigarrow gemeinsamer Puffer msgBuffer

 **Rangfolge** \rightsquigarrow Wann kann die Nachricht verarbeitet werden?

???

\rightarrow Wann wird TASK(MsgHandler) aktiv?



- Die **Kausalordnung** wird durch eine **Vorgängerrelation** (engl. *precedence relation*) beschrieben:
 - $J_i \rightarrow J_k$: 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



Aufgabe T_1 Empfang einzelner Bytes \rightsquigarrow Aufträge $J_{1,1}, J_{1,2}, \dots$

Aufgabe T_2 Bearbeitung der Nachrichten \rightsquigarrow Aufträge $J_{2,1}, J_{2,2}, \dots$



- **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 $J_{1,1}, \dots, J_{1,n}$ ermöglichen die Ausführung von $J_{2,1}$
 - Verarbeitung der Nachricht nach vollständigem Empfang
 - $J_{1,1}, \dots, J_{1,n}$ 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 $J_{2,l}$





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

\rightarrow Ergebnis ist ein System von ausschließlich **einfachen Aufgaben**

- **Dynamisch durch Kooperation** \rightsquigarrow **konstruktive Verfahren**
 - Synchronisationspunkte in den Programmen explizit machen
 - d.h., *Zeitsignale austauschen* \mapsto Semaphor
 - Arbeitsaufträge sind Produzenten/Konsumenten von Ereignissen
 - physikalische Ereignisse** von den kontrollierten Objekten
 - logische Ereignisse** von anderen Arbeitsaufträgen

\rightarrow Ergebnis ist ein System von (ggf. vielen) **komplexen Aufgaben**



1 Grundlagen

- Datenabhängigkeiten
- Nebenläufigkeit
- Abhängigkeits- und Aufgabengraphen
- Koordinierung

2 Effekte in Echtzeitsystemen

- Zeitliche Domänen
- Physikalisch und logische Ereignisse

3 Lösungsverfahren

- Analytische Koordinierung
- Konstruktive Koordinierung

4 Ablaufplanung

5 Zusammenfassung





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 Nachrichteneingangs:
- Empfang \rightsquigarrow Nicht-periodische Aufgabe $T_1 = (i_1, e_1)$
 - Verarbeitung \rightsquigarrow Nicht-periodische Aufgabe $T_2 = (i_2, e_2)$
 - Empfang mehrere Bytes pro Nachricht $\rightsquigarrow i_1 \ll i_2$
 - Verarbeitung ist komplexer als deren Empfang $\rightsquigarrow e_2 \gg e_1$

Naive Implementierung **verletzt zeitlichen Domänen**

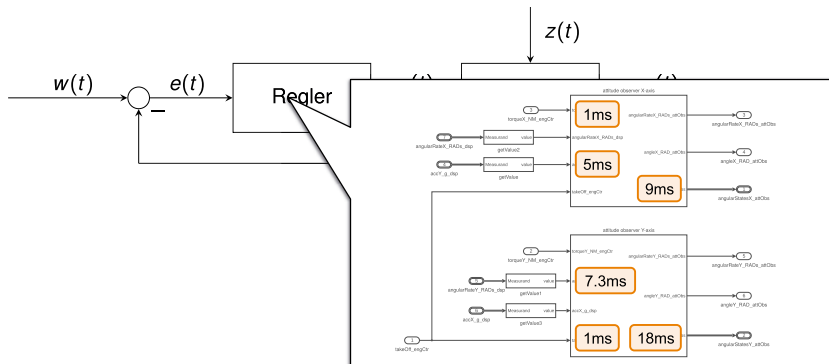
- Ergebnis ist eine Aufgabe $T'_1 = (\min(i_1, i_2), e_1 + e_2)$
- **Unrealistische** zeitliche Parameter \rightsquigarrow Überabschätzung des Aufwands



Gerichtete Abhängigkeiten \mapsto Hinweis auf **versch.** zeitliche Domänen

→ Aufgaben mit dedizierten Auslöseereignissen und zeitlichen Parametern





- **Signaldatenverarbeitung im Fokus**
 - Scheinbar einfache Funktion \mapsto unterschiedliche zeitliche 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 schneller²
 - Generierung von Zwischenwerten kompensiert langsamen Produzenten
- **Letzter Wert genügt** (engl. *last is best*) → beidseitig
 - Verzicht auf explizite Abstimmung (**simpel**)
 - **Alter unterliegt gewissen Schwankungen**

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



- 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**



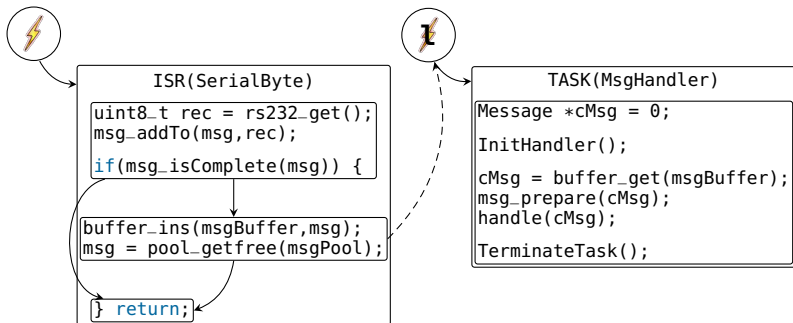


Physikalische und logische Ereignisse

- **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



1 Grundlagen

- Datenabhängigkeiten
- Nebenläufigkeit
- Abhängigkeits- und Aufgabengraphen
- Koordinierung

2 Effekte in Echtzeitsystemen

- Zeitliche Domänen
- Physikalisch und logische Ereignisse

3 Lösungsverfahren

- Analytische Koordinierung
- Konstruktive Koordinierung

4 Ablaufplanung

5 Zusammenfassung





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

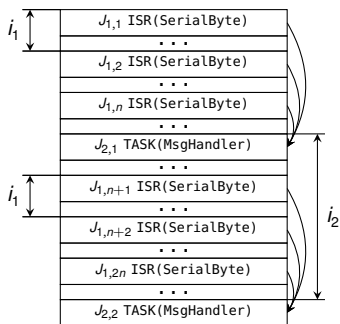
- **Ohne Koordinierung** \leadsto Rangfolge bewusst vernachlässigen
 - **Last is best**: Schwankungen in der Aktualität sind tolerierbar
- **Analytische Koordinierung** \leadsto mithilfe der Ablaufplanung
 - Nur für Abhängigkeiten zwischen **periodischen Aufgaben** anwendbar
 - Arbeitsaufträge werden nicht parallel ausgeführt (Folie 23)
 - Taktsteuerung**: Überlappungsfreie Anordnung in der Ablauftabelle
 - Vorrangsteuerung**: Analog durch Phasenversatz
- **Konstruktive Koordinierung** \leadsto 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 \leadsto 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 \rightsquigarrow InitHandler()
 - While \rightsquigarrow 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,rcv);
```

```
    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 \rightsquigarrow `SendMessage()`
 - Nachfolger \rightsquigarrow `ReceiveMessage()`

- Verwaltung/Pufferung der Daten entfällt typischerweise
 - \rightarrow Aufgabe des **Nachrichtendiensts**



AUTOSAR OS: Keine Rangfolge durch Nachrichtenversand

- `ReceiveMessage()` blockiert nicht
 - \rightarrow Erfordert Kombination mit **Signalen** (engl. *events*) \rightsquigarrow wird mit Nachrichtenversand gesetzt



1 Grundlagen

- Datenabhängigkeiten
- Nebenläufigkeit
- Abhängigkeits- und Aufgabengraphen
- Koordinierung

2 Effekte in Echtzeitsystemen

- Zeitliche Domänen
- Physikalisch und logische Ereignisse

3 Lösungsverfahren

- Analytische Koordinierung
- Konstruktive Koordinierung

4 Ablaufplanung

5 Zusammenfassung



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 unabhängig³

A6 Die Kosten durch Unterbrechungen, Ablaufplanung und Verdrängung sind vernachlässigbar

A7 Alle Aufgaben verhalten sich voll-präemptiv

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



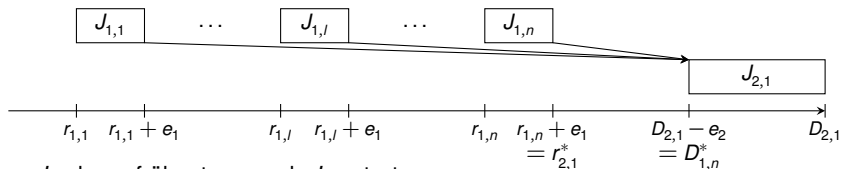
Abhängigkeiten \rightsquigarrow phasenverschobene Ausführung

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
↪ angepasste Auslösezeit des Nachfolgers $r_{2,1}^* = \max_{1 \leq j \leq n} r_{1,j} + e_1$
- $J_{2,1}$ benötigt noch genügend Ausführungszeit
↪ angepasster Termin des Vorgängers $D_{1,n}^* = D_{2,1} - e_2$



- 1 Nachfolger J_j kann Ausführung erst mit Fertigstellung seiner Vorgänger beginnen


→ Modifizierung der Auslösezeit des Nachfolgers

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


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

→ Modifizierung der Termine der Vorgänger

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

 Anschließend erfolgt die Ablaufplanung mittels EDF

- EDF ist auch für derartige Systeme optimal (vgl. IV-2/21)
- Für Systeme mit statischen Prioritäten ungeeignet

 Vorgehen nur für einfache Abhängigkeiten geeignet

- Muster wie 2 von 3 Vorgängern erfordern angepasste Abbildungen



1 Grundlagen

- Datenabhängigkeiten
- Nebenläufigkeit
- Abhängigkeits- und Aufgabengraphen
- Koordinierung

2 Effekte in Echtzeitsystemen

- Zeitliche Domänen
- Physikalisch und logische Ereignisse

3 Lösungsverfahren

- Analytische Koordinierung
- Konstruktive Koordinierung

4 Ablaufplanung

5 Zusammenfassung



Rangfolge \leadsto gerichtete Abhängigkeiten

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

Umsetzung gerichteter Abhängigkeiten \leadsto Koordinierung

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

implizit \leadsto statische Ablauftabellen, Phasenverschiebung

explizit \leadsto Aktivierung, Zeitsignale, Nachrichten

Ablaufplanung nutzt die Einschränkung des Ablaufverhaltens

- **Nachfolger** \leadsto modifizierte Auslösezeiten
- **Vorgänger** \leadsto modifizierte Termine



- [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



- [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

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_j 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

- $T_i^S = (i_j, e_i, D_i)$ Nicht-periodische Aufgabe (Schreibweise mit i_j)

- $T_i^S = ([r_i^{nach}, r_i^{vor}], e_i, D_i)$ 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_{Δ_i} Rechenzeitbedarf (engl. demand)
- u_{Δ_i} 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)

