

Echtzeitsysteme

Rangfolge und gerichtete Abhängigkeiten

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

<https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS18/V-EZS/>

20. Dezember 2018



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

- 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

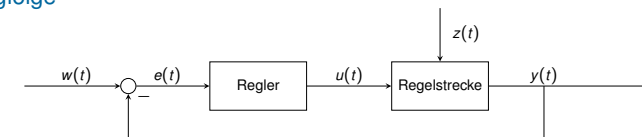


Rangfolge (engl. *precedence*)

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**

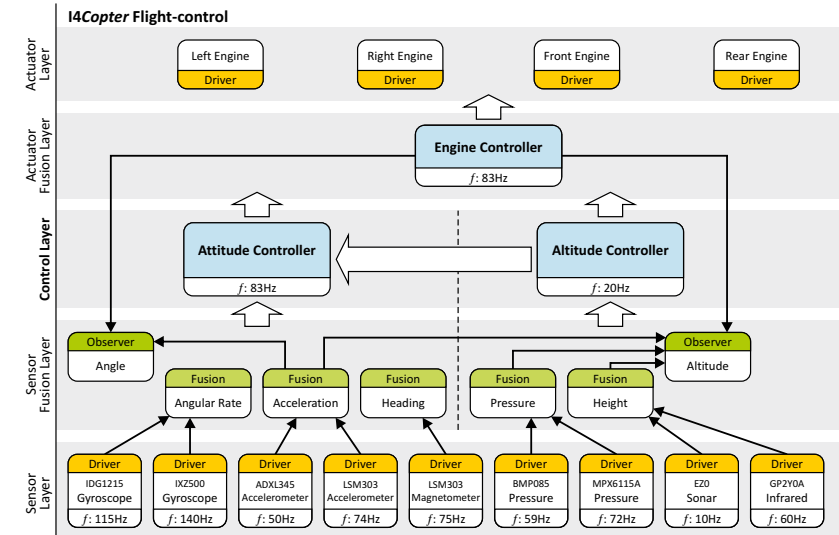
- Anzahl ist (log.) unbegrenzt: Nachrichten, Signale, Interrupts
 - Produzent kann beliebig viele davon erzeugen
 - Konsument zerstört sie wieder bei Inanspruchnahme
- Zwischen ihnen besteht eine **gerichtete Abhängigkeit**

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:

```

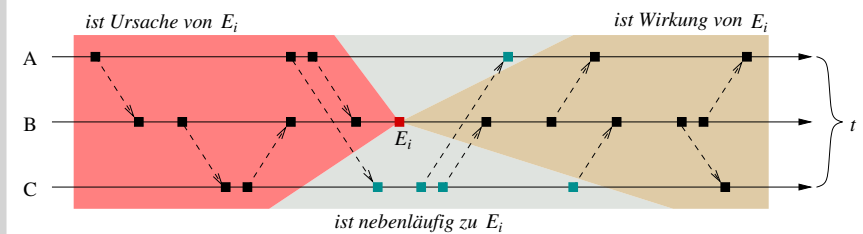
1:  foo = 4711;
2:  bar = 42;
3:  foobar = foo + bar;
4:  barfoo = bar + foo;
5:  hal = foobar + barfoo;
    
```

- 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 Raum¹ 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

¹A, 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

$\left. \begin{array}{l} \text{"ist Ursache von"} \\ \text{"ist Wirkung von"} \end{array} \right\} \rightarrow \text{sequentiell (verwirklicht vor/zur Laufzeit)}$
 $\text{"ist nebenläufig zu"} \rightarrow \text{parallel (logisch/tatsächlich)}$

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 $\leadsto$ gemeinsamer Puffer msgBuffer



Rangfolge $\leadsto$ 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:

- $J_i \rightarrow J_k$: 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



Beispiel: Serieller Empfang von Nachrichten (Forts.)

Abhängigkeitsbeziehungen der einzelnen Arbeitsaufträge

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

Aufgabe T_2 Bearbeitung der Nachrichten $\leadsto$ 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 $J_{2,l}$





Koordinierung (engl. *coordination*)

Behandlung von gerichteten Abhängigkeiten

- **Statisch durch Einplanung** $\leadsto$ **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
- Ergebnis ist ein System von ausschließlich **einfachen Aufgaben**
- **Dynamisch durch Kooperation** $\leadsto$ **konstruktive Verfahren**
 - Synchronisationspunkte in den Programmen explizit machen
 - d.h., **Zeitsignale austauschen** $\mapsto$ Semaphore
 - 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

- 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



Naive Implementierung

Anordnung im Quelltext: Rangfolge $\mapsto$ 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 $\leadsto$ Nicht-periodische Aufgabe $T_1 = (i_1, e_1)$

Verarbeitung $\leadsto$ Nicht-periodische Aufgabe $T_2 = (i_2, e_2)$

- Empfang mehrere Bytes pro Nachricht $\leadsto i_1 \ll i_2$
- Verarbeitung ist komplexer als deren Empfang $\leadsto e_2 \gg e_1$



Naive Implementierung verletzt zeitlichen Domänen

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



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

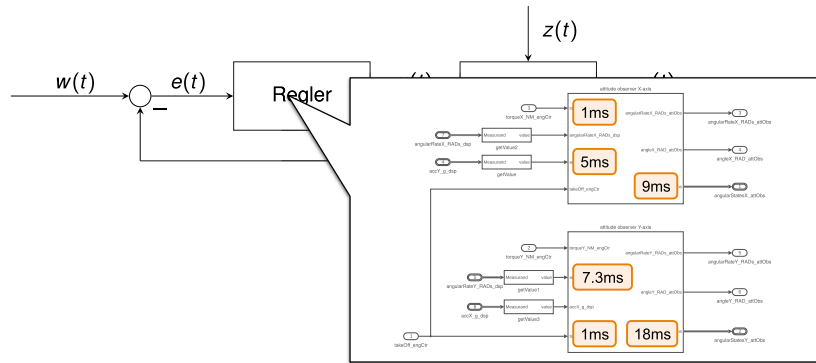
→ Aufgaben mit dedizierten Auslöseereignissen und zeitlichen Parametern





Zeitliche Domänen

Am Beispiel des I4Copters



■ Signaldatenverarbeitung im Fokus

- Scheinbar einfache Funktion $\rightarrow$ 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
- $\rightarrow$ Gerichtete Abhängigkeiten erfordern **Angleichung**

■ Datenaustausch zwischen Produzent und Konsument

- Erfolgt in Abstimmung $\rightarrow$ Konsument erwartet Daten
- Aufwand abhängig von der Diskrepanz der Raten



Typisches Vorgehen in Echtzeitanwendungen

- **Gemeinsamer Puffer** als Zwischenspeicher $\rightarrow$ Produzent schneller
 - Problem: Puffergröße und WCET (Abarbeitung des Rückstands)
- **Prädikation** durch Beobachter $\rightarrow$ Konsument schneller²
 - Generierung von Zwischenwerten kompensiert langsamen Produzenten
- **Letzter Wert genügt** (engl. *last is best*) $\rightarrow$ 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.



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 $\rightarrow$ Zustandsänderungen der Umwelt

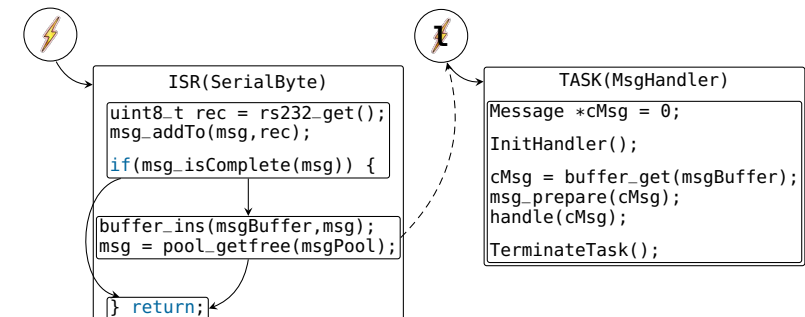
- Empfang eines Byte auf der seriellen Schnittstelle
- $\rightarrow$ Auslösung einer Unterbrechung

■ Logische Ereignisse ruft die Echtzeitanwendung selbst hervor

- $\rightarrow$ Vollständiger Empfang einer Nachricht



Das **logische Ereignis entkoppelt Empfang und Verarbeitung zeitlich**



Gliederung

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



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 $\leadsto$ Rangfolge bewusst vernachlässigen

$\rightarrow$ **Last is best**: Schwankungen in der Aktualität sind tolerierbar

■ Analytische Koordinierung $\leadsto$ mithilfe der Ablaufplanung

- Nur für Abhängigkeiten zwischen **periodischen Aufgaben** anwendbar

$\rightarrow$ Arbeitsaufträge werden nicht parallel ausgeführt (Folie 23)

Taktsteuerung: Überlappungsfreie Anordnung in der Ablaufabelle

Vorrangsteuerung: Analog durch Phasenversatz

■ Konstruktive Koordinierung $\leadsto$ mithilfe expliziter Synchronisationsmechanismen des Echtzeitbetriebssystems

- Für **nicht-periodischen Aufgaben** unumgänglich

- In zeitgesteuerten Systemen **unsinnig**

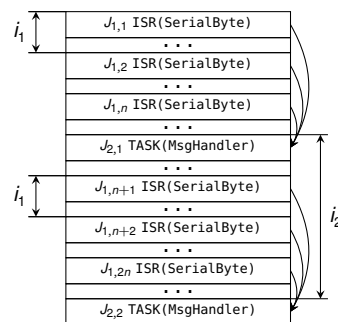
$\rightarrow$ Es existiert eine Vielzahl Synchronisationsmechanismen

(Folie 24 ff)



Rangordnung mittels statischer Ablaufplanung

- Eingabe für die **statische Ablaufplanung** (s. Folie IV-3/20 ff) ist ein Abhängigkeitsgraph. Die erzeugte Ablaufabelle 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**

$\rightarrow$ **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**

$\rightarrow$ Planer stellt die richtige Reihenfolge sicher



Absolute Sequentialisierung von Vorgänger und Nachfolger

- Erschwert die Umsetzung komplexer Abhängigkeitsszenarien

$\rightarrow$ **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 $\leadsto$ InitHandler()
 - While $\leadsto$ 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 $\leadsto$ SendMessage()
 - Nachfolger $\leadsto$ ReceiveMessage()
- Verwaltung/Pufferung der Daten entfällt typischerweise
 - $\rightarrow$ Aufgabe des **Nachrichtendienstes**
- ⚠ AUTOSAR OS: Keine Rangfolge durch Nachrichtenversand
 - ReceiveMessage() blockiert nicht
 - $\rightarrow$ Erfordert Kombination mit **Signalen** (engl. *events*) $\leadsto$ Wird mit Nachrichtenversand gesetzt



Gliederung

- 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 $\leadsto$ phasenverschobene Ausführung

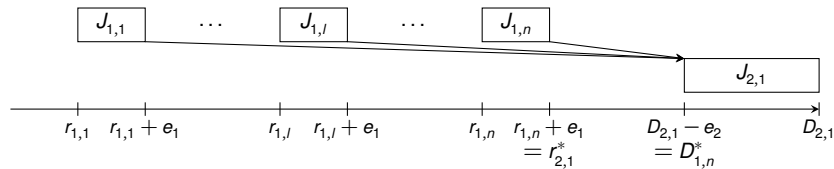
Gerichtete Abhängigkeiten in das Planungsproblem aufnehmen



Vorgehen analog zur Berechnung statischer Ablaufpläne

- Abhängigkeiten schränken den zeitlichen Ablauf ein (vgl. Folie 23)
- $\rightarrow$ 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
 $\leadsto$ 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
 $\leadsto$ angepasster Termin des Vorgängers $D_{1,n}^* = D_{2,1} - e_2$



Abhängigkeiten $\leadsto$ phasenverschobene Ausführung (Forts.)

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

$\rightarrow$ 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_i müssen rechtzeitig fertig werden, so dass der Nachfolger seinen Termin einhalten kann

$\rightarrow$ Modifizierung der Termine der Vorgänger

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



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

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



Resümee

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



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 l_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 $T_i^S = (l_i, e_i, D_i)$ Nicht-periodische Aufgabe (Schreibweise mit l_i) $T_i^S = (l_i^{r_{nach}}, r_i^{vor}, e_i, D_i)$ 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 l_i	Zusteller T_{PS} Abfragender Zusteller (engl. polling server) T_{DS} Aufschiebbarer Zusteller (engl. deferrable server) T_S Sporadischer Zusteller (engl. sporadic server) T_s Sporadischer Zusteller (engl. sporadic server) rt_i Wiederauffüllzeitpunkt (engl. replenishment time)
--	--	--

