

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



- 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



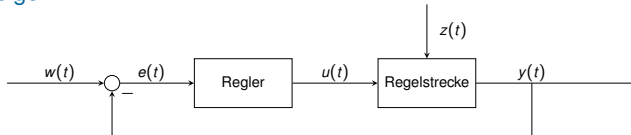


Ausführung von Arbeitsaufträgen unterliegt häufig einer bestimmten Reihenfolge
↳ Rangfolge





Ausführung von Arbeitsaufträgen unterliegt häufig einer bestimmten Reihenfolge
→ Rangfolge

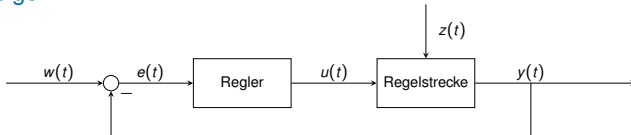


- Beispiel: **Regelungsanwendung**
 - Signalverarbeitungsauftrag muss vor der Regelung gelaufen sein





Ausführung von Arbeitsaufträgen unterliegt häufig einer bestimmten Reihenfolge
→ Rangfolge

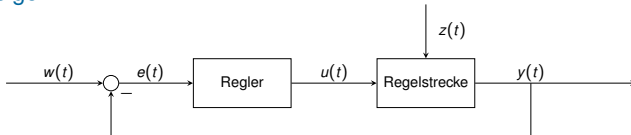


- Beispiel: **Regelungsanwendung**
 - Signalverarbeitungsauftrag muss vor der Regelung gelaufen sein
- Beispiel: **Kommunikationssystem**
 - Sendeauftrag muss vor Empfangsauftrag gelaufen sein
 - Empfangsauftrag muss vor Bestätigungsauftrag gelaufen sein





Ausführung von Arbeitsaufträgen unterliegt häufig einer **bestimmten Reihenfolge**
→ **Rangfolge**

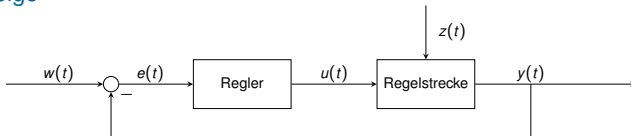


- Beispiel: **Regelungsanwendung**
 - Signalverarbeitungsauftrag muss vor der Regelung gelaufen sein
- Beispiel: **Kommunikationssystem**
 - Sendeauftrag muss vor Empfangsauftrag gelaufen sein
 - Empfangsauftrag muss vor Bestätigungsauftrag gelaufen sein
- Beispiel: **Anfragesystem**
 - Eingabeauftrag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





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





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





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**





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



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)

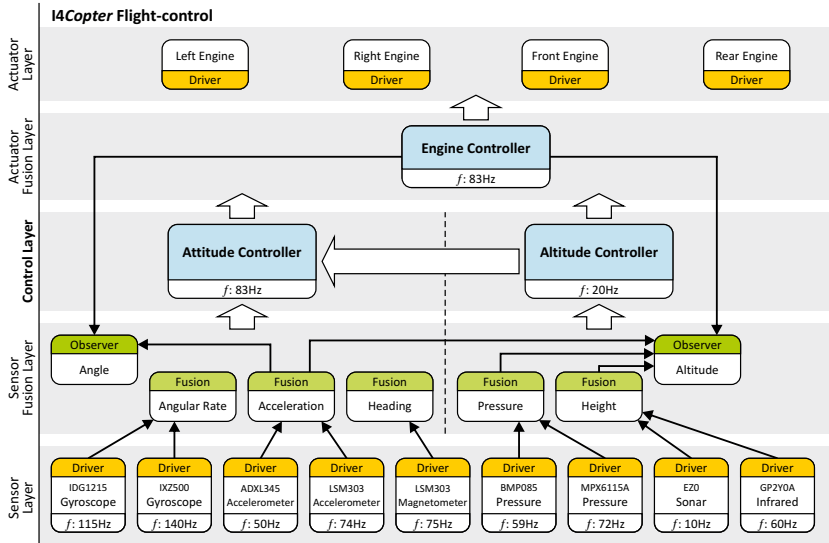
- Abbildung **konsumierbare** ↦ **wiederverwendbare Betriebsmittel**

- Beispiel: **begrenzter Puffer** (engl. *bounded buffer*)

- Produzent fordert ein wiederverwendbares Betriebsmittel an, welches vom Konsumenten später wieder freizugeben ist



Datenabhängigkeiten im I4Copter



Kausalität (lat. *causa*: Ursache)

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



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



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.

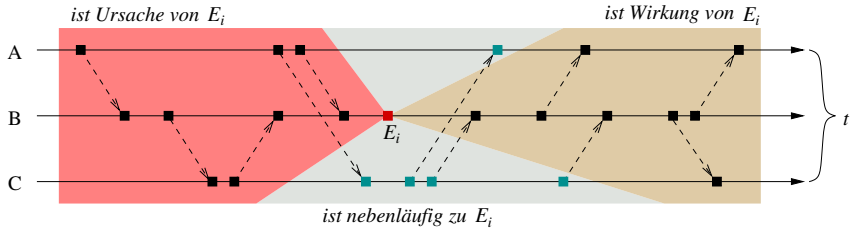
- Ereignisse sind **nebenläufig**, wenn keines Ursache des anderen ist
- Aktionen können nebenläufig ausgeführt werden, wenn keine das Resultat des anderen benötigt

■ Beispiel eines nichtsequentiellen Programms:

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

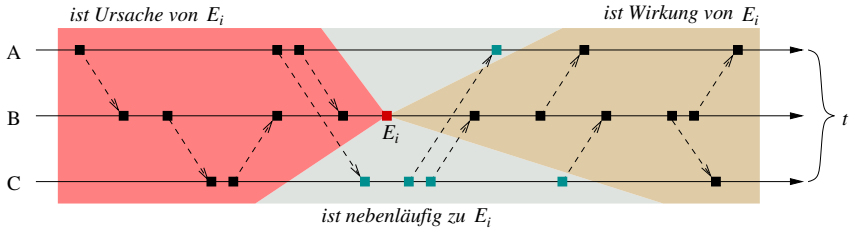
- Zeile 1 kann nebenläufig zu Zeile 2 ausgeführt werden
- Zeile 3 kann nebenläufig zu Zeile 4 ausgeführt werden





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

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



■ Relationen: Ursache $\leftrightarrow$ Wirkung $\leftrightarrow$ 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.



- Ein Arbeitsauftrag kann **nebenläufig** bearbeitet werden, wenn:
 - Im Allgemeinen ■ Er benötigt kein Ergebnis eines Anderen (vgl. Folie 7)
 - Abwesenheit von **Datenabhängigkeiten**



- 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**



- 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

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



- 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

$\left. \begin{array}{l} \text{"ist Ursache von"} \\ \text{"ist Wirkung von"} \end{array} \right\}$	↦	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



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

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;  
}
```



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();  
}
```



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?

???

$\rightarrow$ 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



- 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.



- 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

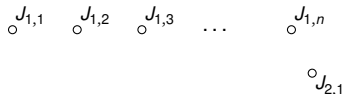
Aufgabe T_1 Empfang einzelner Bytes $\leadsto$ Aufträge $J_{1,1}, J_{1,2}, \dots$

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



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

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

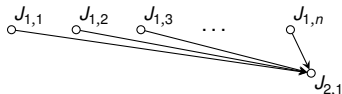


■ **Keine Abhängigkeiten** zwischen Aufträgen von T_1 und T_2

- Termin $D_{1,1}$ erzwingt lediglich Fertigstellung von $J_{1,1}$ vor $J_{1,2}$: $D_{1,1} \leq r_{1,2}$

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 $J_{2,1}$

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 $J_{2,l}$





- 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





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* $\mapsto$ 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**



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





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





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





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 $\leadsto e_2 \gg e_1$





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





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**

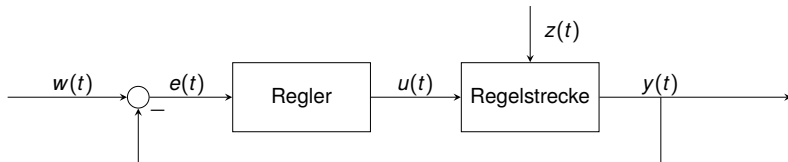
- Ergebnis ist eine Aufgabe $T'_1 = (\min(i_1, i_2), e_1 + e_2)$
- **Unrealistische** zeitliche Parameter $\leadsto$ Überabschätzung des Aufwands



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

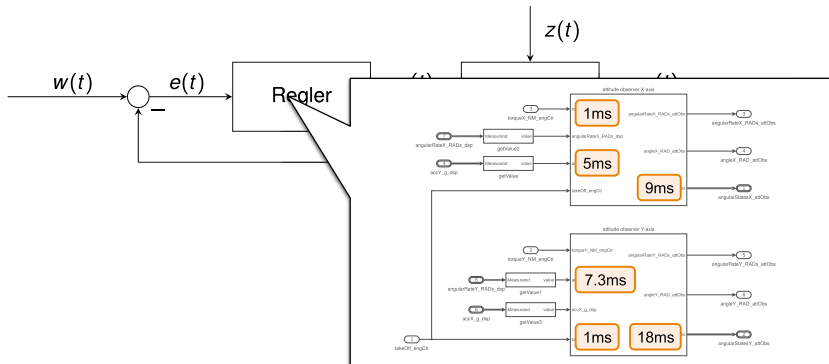
- Aufgaben mit dedizierten Auslöseereignissen und zeitlichen Parametern





■ Signaldatenverarbeitung im Fokus





■ Signaldatenverarbeitung im Fokus

- Scheinbar einfache Funktion $\mapsto$ 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**



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



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



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



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



- 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



- 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



- 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



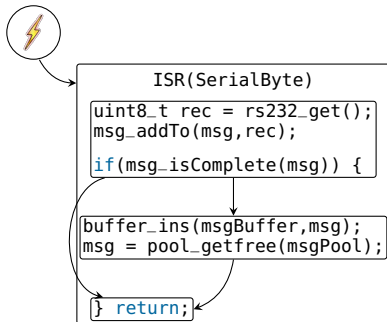
Entkopplung zeitlicher Domänen durch **logische Ereignisse**





Physikalische und logische Ereignisse

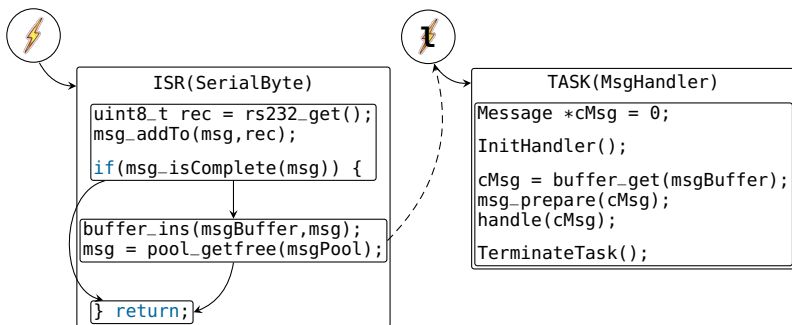
- **Physikalische Ereignisse** $\mapsto$ Zustandsänderungen der Umwelt
 - Empfang eines Byte auf der seriellen Schnittstelle
 - $\rightarrow$ Auslösung einer Unterbrechung





Physikalische und logische Ereignisse

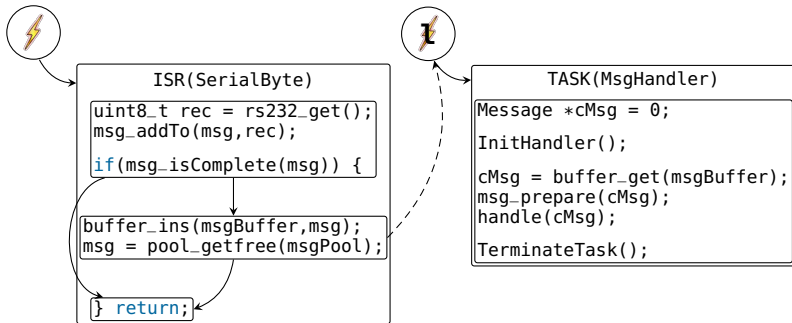
- **Physikalische Ereignisse** $\mapsto$ Zustandsänderungen der Umwelt
 - Empfang eines Byte auf der seriellen Schnittstelle
 - $\rightarrow$ Auslösung einer Unterbrechung
- **Logische Ereignisse** ruft die Echtzeitanwendung selbst hervor
 - $\rightarrow$ Vollständiger Empfang einer Nachricht





Physikalische und logische Ereignisse

- **Physikalische Ereignisse** $\mapsto$ 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**



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





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





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





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:

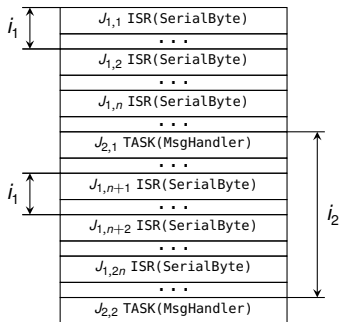
$J_{1,1}$ ISR(SerialByte)
. . .
$J_{1,2}$ ISR(SerialByte)
. . .
$J_{1,n}$ ISR(SerialByte)
. . .
$J_{2,1}$ TASK(MsgHandler)
. . .
$J_{1,n+1}$ ISR(SerialByte)
. . .
$J_{1,n+2}$ ISR(SerialByte)
. . .
$J_{1,2n}$ ISR(SerialByte)
. . .
$J_{2,2}$ TASK(MsgHandler)





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:



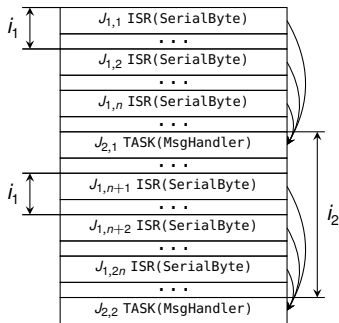
- Überführung von T_1 und T_2 in äquivalente **periodische Aufgaben**
 - Periode $p_n = \text{Zwischenankunftszeit } i_n$





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:



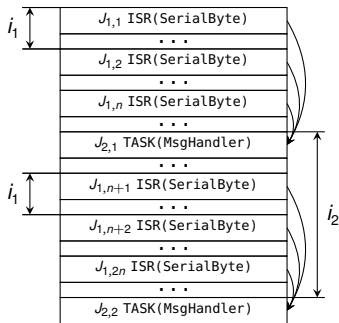
- Überführung von T_1 und T_2 in äquivalente **periodische Aufgaben**
 - Periode $p_n = \text{Zwischenankunftszeit } i_n$
- Anordnung nach Abhängigkeit
 - $r_{i,j} + e_i \leq r_{n,m} \Leftrightarrow J_{i,j} \mapsto J_{n,m}$





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:



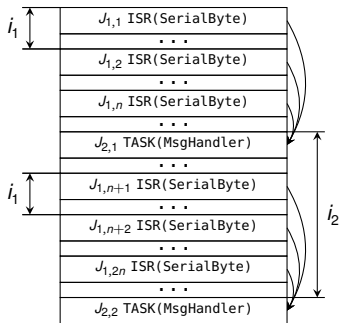
- Überführung von T_1 und T_2 in äquivalente **periodische Aufgaben**
 - Periode $p_n = \text{Zwischenankunftszeit } i_n$
- Anordnung nach Abhängigkeit
 - $r_{i,j} + e_i \leq r_{n,m} \Leftrightarrow J_{i,j} \mapsto J_{n,m}$
- **Phasenverschobene Ausführung**
 - Analoges Vorgehen bei ereignisgesteuerten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





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 $p_n = \text{Zwischenankunftszeit } i_n$
- 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



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



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` $\leadsto$ `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

→ Aufgabe des **Nachrichtendiensts**



AUTOSAR OS: Keine Rangfolge durch Nachrichtenversand

- `ReceiveMessage()` blockiert nicht
- Erfordert Kombination mit **Signalen** (engl. *events*) $\leadsto$ 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 unabhängig~~³

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

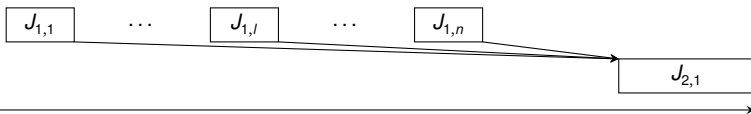
- Abhängigkeiten schränken den zeitlichen Ablauf ein (vgl. Folie 23)
- Umformulierung von **Auslösezeiten und Termine** so dass diese mit den Abhängigkeiten übereinstimmen [1]



☞ 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)

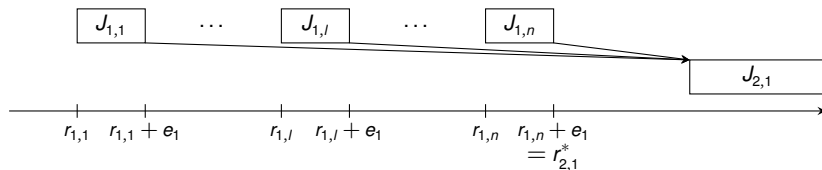




Vorgehen analog zur Berechnung statischer Ablaufpläne

- 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)



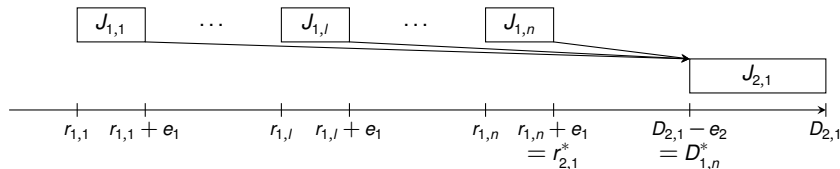
- $J_{2,1}$ kann frühestens nach $J_{1,n}$ starten
- $\leadsto$ angepasste Auslösezeit des Nachfolgers $r_{2,1}^* = \max_{1 \leq j \leq n} r_{1,j} + e_1$



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
 $\leadsto$ 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 $D_{1,n}^* = D_{2,1} - e_2$



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

→ Modifizierung der Auslösezeit des Nachfolgers

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



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

→ Modifizierung der Auslösezeit des Nachfolgers

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

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

→ Modifizierung der Termine der Vorgänger

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



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

→ Modifizierung der Auslösezeit des Nachfolgers

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

- 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-2/23)
- Für Systeme mit statischen Prioritäten ungeeignet



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

→ Modifizierung der Auslösezeit des Nachfolgers

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

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

→ 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



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



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



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

- 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)
- $h_{\Delta i}$ Rechenzeitbedarf (engl. demand)
- $u_{\Delta i}$ 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)

