

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



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

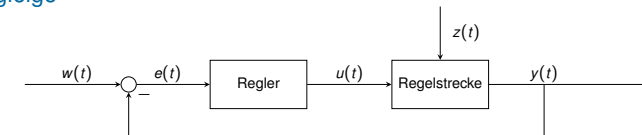


Rangfolge (engl. *precedence*)

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**

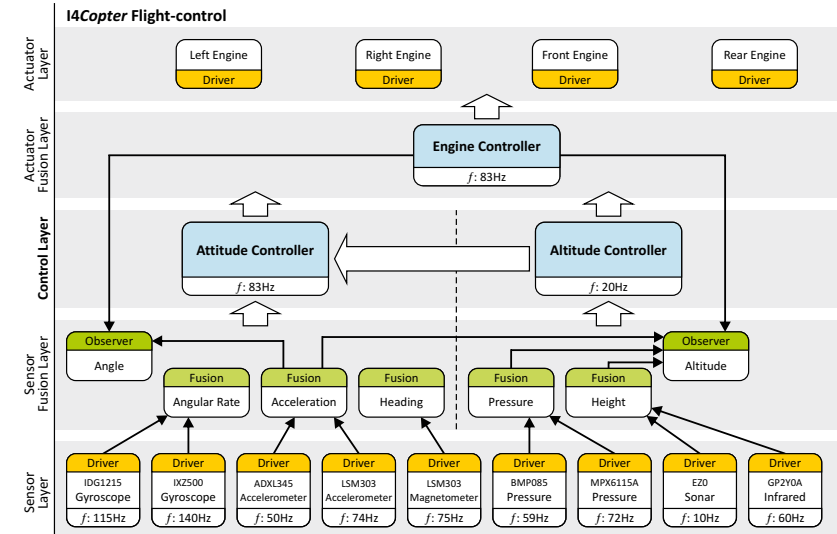
- Anzahl ist (log.) unbegrenzt: Nachrichten, Signale, Interrupts
 - Produzent kann beliebig viele davon erzeugen
 - Konsument zerstört sie wieder bei Inanspruchnahme
- Zwischen ihnen besteht eine **gerichtete Abhängigkeit**

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:

```

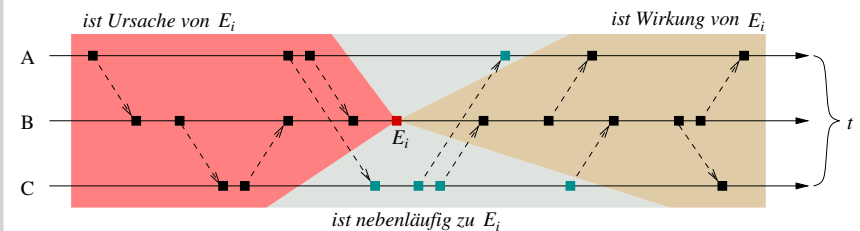
1:   foo = 4711;
2:   bar = 42;
3:   foobar = foo + bar;
4:   barfoo = bar + foo;
5:   hal = foobar + barfoo;
    
```

- 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

“ist Ursache von”
“ist Wirkung von” } → **sequentiell** (verwirklicht vor/zur Laufzeit)

“ist nebenläufig zu” → **parallel** (logisch/tatsächlich)

Minimierung von **sequenziellem Programmcode** ist (auch) in Echtzeitsystemen von Bedeutung

Beispiel: Serieller Empfang von Nachrichten

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

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

Empfang

```
Pool *msgPool;  
Buffer *msgBuffer; Message *msg;  
  
ISR(SerialByte) {  
    uint8_t rec = rs232_get();  
    msg_addTo(msg, rec);  
  
    if(msg_isComplete(msg)) {  
        buffer_ins(msgBuffer, msg);  
        msg = pool_getfree(msgPool);  
    }  
    return;  
}
```

Verarbeitung

```
TASK(MsgHandler) {  
    Message *cMsg = 0;  
  
    InitHandler();  
  
    cMsg = buffer_get(msgBuffer);  
    msg_prepare(cMsg);  
    handle(cMsg);  
  
    TerminateTask();  
}
```

Datenabhängigkeit → gemeinsamer Puffer msgBuffer

Rangfolge → Wann kann die Nachricht verarbeitet werden? ???

→ Wann wird TASK(MsgHandler) aktiv?

Kausalordnung [6, S. 43]

Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Arbeitsaufträgen

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

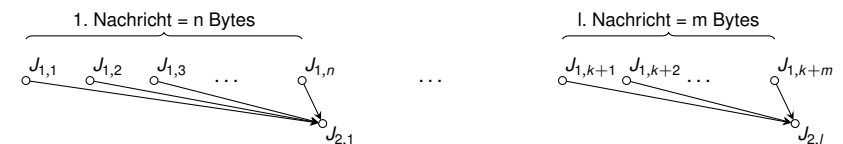
⚠ **Koordinierte Ausführung** von ISR(SerialByte) und TASK(MsgHandler) ist für **korrekte Funktion** notwendig

Beispiel: Serieller Empfang von Nachrichten (Forts.)

Abhängigkeitsbeziehungen der einzelnen Arbeitsaufträge

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

Aufgabe T_2 Bearbeitung der Nachrichten → 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* \rightarrow 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** \leadsto **konstruktive Verfahren**
 - Synchronisationspunkte in den Programmen explizit machen
 - d.h., **Zeitsignale austauschen** \rightarrow Semaphore
 - 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**



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 \rightarrow Programmsequenz



Implizite Codierung gerichteter Abhängigkeiten im Quelltext

- Vorgänger und Nachfolger sind **unveränderlich** und **à priori bekannt**
- \rightarrow 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** \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 $T'_1 = (\min(i_1, i_2), e_1 + e_2)$
- \rightarrow **Unrealistische** zeitliche Parameter \leadsto Überabschätzung des Aufwands



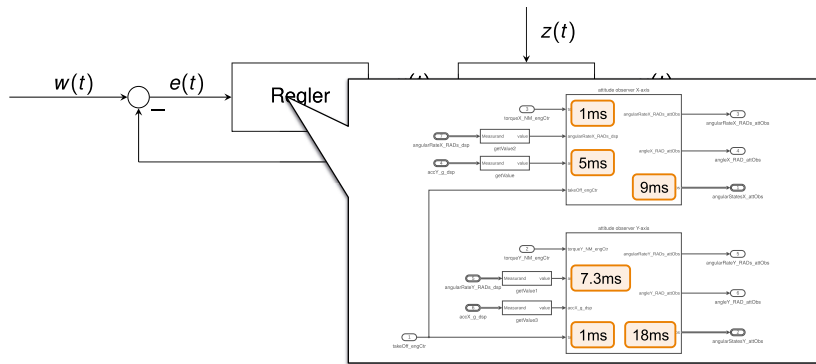
Gerichtete Abhängigkeiten \rightarrow Hinweis auf **versch.** zeitliche Domänen

\rightarrow Aufgaben mit dedizierten Auslöseereignissen und zeitlichen Parametern



Zeitliche Domänen

Am Beispiel des I4Copters



■ Signaldatenverarbeitung im Fokus

- Scheinbar einfache Funktion → 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.



Übergang zwischen zeitlichen Domänen (Forts.)

Produzenten und Konsumenten werden mit unterschiedlichen Raten aktiviert

■ Verschmelzung zeitlich identischer Domänen ist möglich

- Stellt eine **Optimierung der Implementierung** dar



Letzter Schritt des Systementwurfs [3, 4]

1 Identifikation der zeitlichen Domänen

- Exklusive Abbildung jeder Domäne auf eine Aufgabe

2 Vereinigung äquivalenter zeitlicher Domänen

- Reduktion von Aufgaben mit **gleichartigen Parametern**
- **Zeitliche Kohäsion**: Aufgaben werden immer gleichzeitig aktiviert
- **Sequentialisierung**: (Teil-)Aufgaben laufen immer nacheinander ab



Naive Implementierung nimmt diese Optimierung vorweg

- Auch wenn die zeitlichen Domänen **verschieden** sind



Entkopplung zeitlicher Domänen durch **logische Ereignisse**



Physikalische und logische Ereignisse

■ Physikalische Ereignisse → Zustandsänderungen der Umwelt

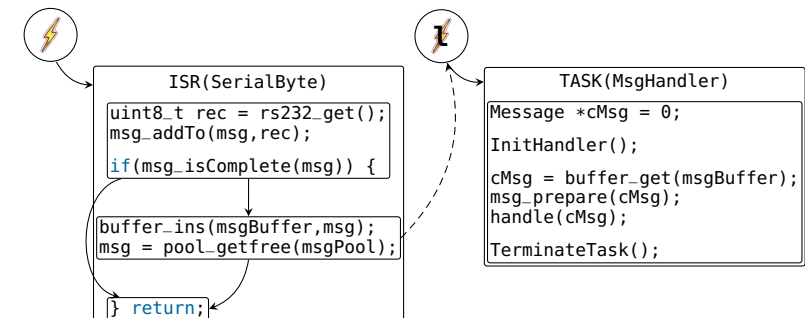
- Empfang eines Byte auf der seriellen Schnittstelle
→ Auslösung einer Unterbrechung

■ Logische Ereignisse ruft die Echtzeitanwendung selbst hervor

- Vollständiger Empfang einer Nachricht



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



Gliederung

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



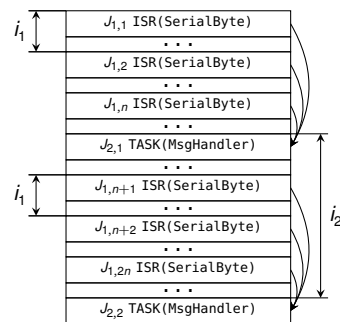
Herstellung der Rangfolge ohne die zeitliche Nähe durch eine entsprechende Anordnung im Quelltext zu erzwingen

- **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
 - $r_{i,j} + e_i \leq r_{n,m} \Leftrightarrow J_{i,j} \rightarrow J_{n,m}$
- **Phasenverschobene Ausführung**
 - Analoges Vorgehen bei ereignisgesteuerten Systemen
 - Rangfolge impliziert passende Phase ϕ_m :
 $\phi_m = \max_{J_{i,j} \rightarrow J_{m,n}} r_{i,j} + \omega_{i,j}$



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);
    }
}

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 **Nachrichtendiensts**
- ⚠ 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.



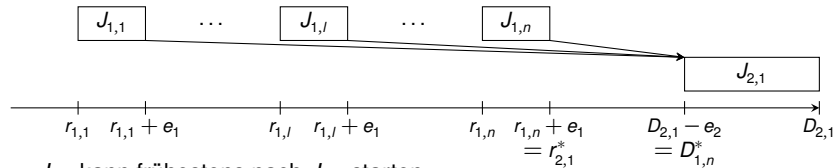
Abhängigkeiten \leadsto phasenverschobene Ausführung

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_j kann Ausführung erst mit Fertigstellung seiner Vorgänger beginnen

\rightarrow Modifizierung der Auslösezeit des Nachfolgers

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

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-2/21)
- 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^{HW} , T^{MEC} , T^{CD}). 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

$T_i^S = (i, e_i, D_i)$ 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_{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. deferrable server)
 T_s Sporadischer Zusteller (engl. sporadic server)
 $T_{\bar{s}}$ Sporadischer Zusteller (engl. sporadic server)
 rt_i Wiederauffüllzeitpunkt (engl. replenishment time)

