

# Echtzeitsysteme

## Zugriffskontrolle

**Peter Wägemann**

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

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

5. Juli 2022





## Evaluation der Veranstaltung

- Eure Meinung (**Lob/Kritik**) ist uns wichtig!
  - Eure Rückmeldung hat Konsequenzen (z.B. Folien-Redesign)
- Bitte evaluiert **Vorlesung** und **Übungen**



- 1 Überblick
- 2 Konkurrenz und Koordination
  - Kausalordnung und Koordinierung
  - Konkurrenz und Konflikte
- 3 Effekte in Echtzeitsystemen
- 4 Echtzeitfähige Synchronisationsprotokolle
  - Verdrängungssteuerung
  - Prioritätsvererbung
  - Prioritätsobergrenzen
- 5 Ablaufplanung
- 6 Zusammenfassung



- **Gegenseitiger Ausschluss** in Echtzeitsystemen?
  - Betriebsmittel und Betriebsmittelarten
  - Konkurrenz, Wettstreit und Konflikte
  - Einfluss auf das **Laufzeitverhalten**?
  
- Umgang mit (unvermeidlichen) **Prioritätsumkehr**?
  - Zeitlichen Einfluss kritischer Abschnitte **bestimmen**
  - Ablaufplanung in ereignisgesteuerten Systemen
  
- **Synchronisationsprotokolle** für Echtzeitsysteme
  - Zeitlichen Einfluss kritischer Abschnitte **begrenzen**
  - Verdrängungssteuerung, Prioritätsvererbung, Prioritätsobergrenzen

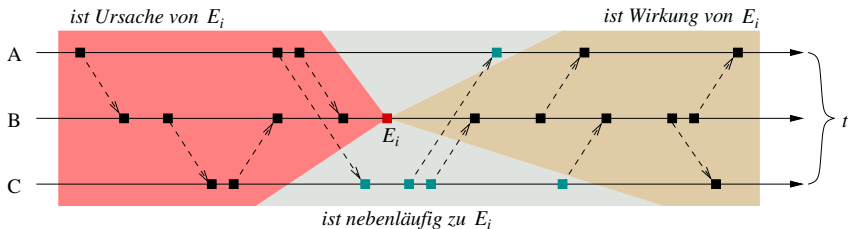


**Unkontrollierte Prioritätsumkehr** und **Verklemmungen** vermeiden

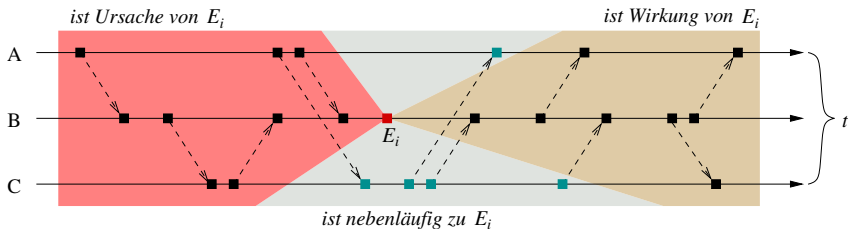


- 1 Überblick
- 2 Konkurrenz und Koordination
  - Kausalordnung und Koordinierung
  - Konkurrenz und Konflikte
- 3 Effekte in Echtzeitsystemen
- 4 Echtzeitfähige Synchronisationsprotokolle
  - Verdrängungssteuerung
  - Prioritätsvererbung
  - Prioritätsobergrenzen
- 5 Ablaufplanung
- 6 Zusammenfassung





- **Relationen:** Ursache  $\leftrightarrow$  Wirkung  $\leftrightarrow$  Nebenläufigkeit

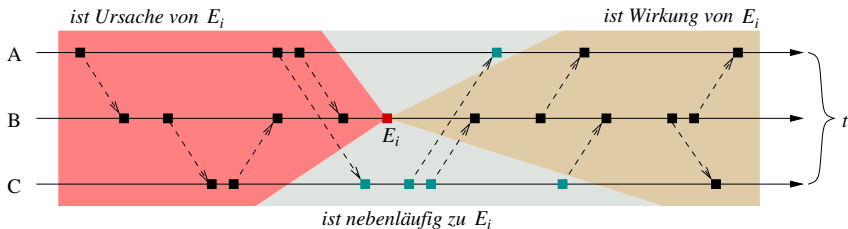


■ **Relationen:** Ursache  $\leftrightarrow$  Wirkung  $\leftrightarrow$  Nebenläufigkeit

⚠ Ein Ereignis  $E_j$  ist **nebenläufig** zu einem anderen:

→ Es liegt im **Anderswo** anderer Ereignisse





■ **Relationen:** Ursache  $\leftrightarrow$  Wirkung  $\leftrightarrow$  Nebenläufigkeit

⚠ Ein Ereignis  $E_i$  ist **nebenläufig** zu einem anderen:

→ Es liegt im **Anderswo** anderer Ereignisse

👉 **Kausalordnung** von Ereignissen

■ **Rangfolge**  $\mapsto$  zeitlich geordnete Ereignisse (vgl. Kapitel IV)

■ **Zugriffskontrolle**  $\mapsto$  nebenläufige Ereignisse







- Synchronisation (gr. *sýn*: zusammen, *chrónos*: Zeit)
  - „Herstellen von Gleichzeitigkeit“





- **Synchronisation** (gr. *sýn*: zusammen, *chrónos*: Zeit)
  - „Herstellen von Gleichzeitigkeit“
  - Koordination der Kooperation und Konkurrenz zwischen Aufgaben
  - Abgleich von Echtzeituhren (oder Daten) in verteilten Systemen





- **Synchronisation** (gr. *sýn*: zusammen, *chrónos*: Zeit)
  - „Herstellen von Gleichzeitigkeit“
  - Koordination der Kooperation und Konkurrenz zwischen Aufgaben
  - Abgleich von Echtzeituhren (oder Daten) in verteilten Systemen
  
- ☞ **Zugriffskontrolle** → Koordinierung nebenläufiger Ereignisse
  - **Synchronisation** gleichzeitiger Zugriffe auf **gemeinsame Betriebsmittel**
  - Herstellen einer Rangfolge für nebenläufige Ereignisse
  - Sequentialisierung von Arbeitsaufträgen entlang einer Kausalordnung





- **Synchronisation** (gr. *sýn*: zusammen, *chrónos*: Zeit)
  - „Herstellen von Gleichzeitigkeit“
  - Koordination der Kooperation und Konkurrenz zwischen Aufgaben
  - Abgleich von Echtzeituhren (oder Daten) in verteilten Systemen

 **Zugriffskontrolle**  $\mapsto$  Koordinierung nebenläufiger Ereignisse

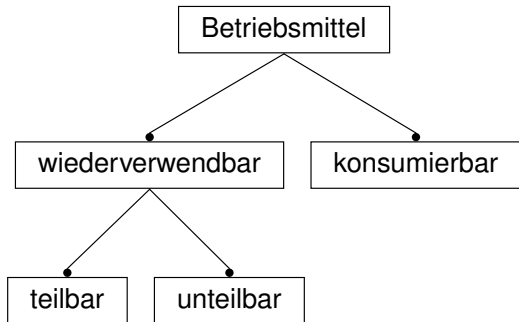
- **Synchronisation** gleichzeitiger Zugriffe auf **gemeinsame Betriebsmittel**
- Herstellen einer Rangfolge für nebenläufige Ereignisse
- $\rightarrow$  Sequentialisierung von Arbeitsaufträgen entlang einer Kausalordnung



**Umsetzung der Zugriffskontrolle** (vgl. VI/13 ff)

- **Implizit** in taktgesteuerten Systemen  $\leadsto$  geeigneter Ablaufplan
- **Explizit** in ereignisgesteuerten Systemen  $\leadsto$  Synchronisationsprotokolle
- $\rightarrow$  Analytische versus konstruktive Maßnahmen (vgl. VI/13 ff)





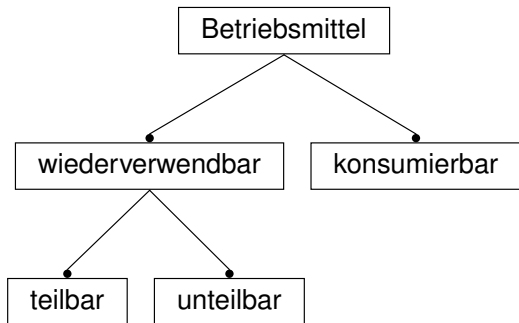
## Hardware

CPU, Speicher, Geräte,  
Signale

## Software

Dateien, Prozesse,  
Seiten, Puffer, Signale,  
Nachrichten





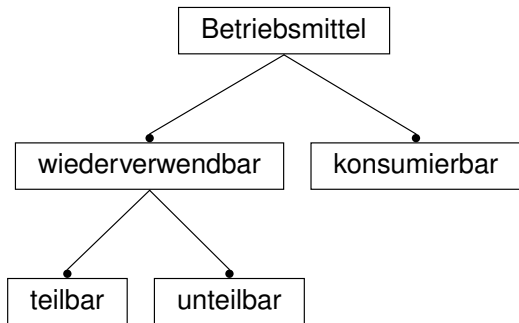
## Hardware

CPU, Speicher, Geräte,  
Signale

## Software

Dateien, Prozesse,  
Seiten, Puffer, Signale,  
Nachrichten

- **Wettstreit um Betriebsmittel** (engl. *resource contention*) bezieht sich auf Anzahl und Art eines **Betriebsmittels** (engl. *resource*) ( $R$ )



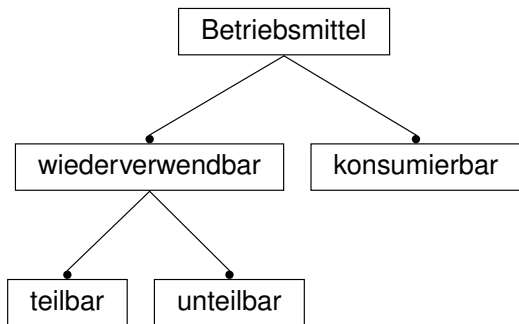
## Hardware

CPU, Speicher, Geräte,  
Signale

## Software

Dateien, Prozesse,  
Seiten, Puffer, Signale,  
Nachrichten

- **Wettstreit um Betriebsmittel** (engl. *resource contention*) bezieht sich auf Anzahl und Art eines **Betriebsmittels** (engl. *resource*) ( $R$ )  
**einseitige Synchronisation**  $\mapsto$  konsumierbare Betriebsmittel ( $\mapsto$  Kapitel IV)



## Hardware

CPU, Speicher, Geräte,  
Signale

## Software

Dateien, Prozesse,  
Seiten, Puffer, Signale,  
Nachrichten

- **Wettstreit um Betriebsmittel** (engl. *resource contention*) bezieht sich auf Anzahl und Art eines **Betriebsmittels** (engl. *resource*) ( $R$ )
  - einseitige Synchronisation  $\mapsto$  konsumierbare Betriebsmittel ( $\rightarrow$  Kapitel IV)
  - mehrseitige Synchronisation  $\mapsto$  wiederverwendbare Betriebsmittel
    - Begrenzung, gegenseitiger Ausschluss





Arbeitsaufträge befinden sich im **Konflikt**, falls:

- **Begrenzte Anzahl** gemeinsamer Betriebsmitteln verfügbar
- **Gemeinsame Verwendung** derselben, unteilbaren Betriebsmittel





Arbeitsaufträge befinden sich im **Konflikt**, falls:

- **Begrenzte Anzahl** gemeinsamer Betriebsmitteln verfügbar
- **Gemeinsame Verwendung** derselben, unteilbaren Betriebsmittel

■ **Wettstreit** (engl. *contention*) um ein Betriebsmittel

→ Einer will, was der andere hat

- Anfordernder Auftrag **blockiert** und wartet auf die Freigabe des Betriebsmittels durch den belegenden Auftrag
- Belegender Auftrag gibt das Betriebsmittel frei und **deblockiert** den anfordernden Auftrag





Arbeitsaufträge befinden sich im **Konflikt**, falls:

- **Begrenzte Anzahl** gemeinsamer Betriebsmitteln verfügbar
- **Gemeinsame Verwendung** derselben, unteilbaren Betriebsmittel

■ **Wettstreit** (engl. *contention*) um ein Betriebsmittel

→ Einer will, was der andere hat

- Anfordernder Auftrag **blockiert** und wartet auf die Freigabe des Betriebsmittels durch den belegenden Auftrag
- Belegender Auftrag gibt das Betriebsmittel frei und **deblockiert** den anfordernden Auftrag



Begrenzte/unteilbare Betriebsmittel implizieren **Kooperation**



# Synchronisationsprimitive zur Kooperation

Serialisierung von Arbeitsaufträgen mit begrenzten/unteilbaren Betriebsmitteln



Unteilbare Betriebsmittel können von gleichzeitigen Arbeitsaufträgen nur nacheinander belegt werden





Unteilbare Betriebsmittel können von gleichzeitigen Arbeitsaufträgen nur nacheinander belegt werden

**Vergabe**  $\mapsto$  Betriebsmittel sperren und dem Auftrag zuteilen ..... P

- Erneute Belegung eines gesperrtes Betriebsmittel führt zur **Blockierung** des anfordernden Auftrags
- Der blockierende Auftrag erwartet das Ereignis/Signal zur **Freigabe** des gesperrten Betriebsmittels, ihm wird die CPU entzogen





Unteilbare Betriebsmittel können von gleichzeitigen Arbeitsaufträgen nur nacheinander belegt werden

**Vergabe**  $\mapsto$  Betriebsmittel sperren und dem Auftrag zuteilen ..... P

- Erneute Belegung eines gesperrtes Betriebsmittel führt zur **Blockierung** des anfordernden Auftrags
- Der blockierende Auftrag erwartet das Ereignis/Signal zur **Freigabe** des gesperrten Betriebsmittels, ihm wird die CPU entzogen

**Freigabe**  $\mapsto$  Betriebsmittel entziehen/abgeben und freigeben..... V

- Nur der das Betriebsmittel **besitzende** Auftrag kann es freigeben
- Wartende Aufträge führen zur sofortigen **Wiedervergabe**:
  - (a) Betriebsmittel entsperren und alle Aufträge deblockieren  $\leadsto$  Konkurrenz um die Wiedervergabe
  - (b) Betriebsmittel entsperren und einem ausgewählten Auftrag zuteilen



- 1 Überblick
- 2 Konkurrenz und Koordination
  - Kausalordnung und Koordinierung
  - Konkurrenz und Konflikte
- 3 Effekte in Echtzeitsystemen**
- 4 Echtzeitfähige Synchronisationsprotokolle
  - Verdrängungssteuerung
  - Prioritätsvererbung
  - Prioritätsobergrenzen
- 5 Ablaufplanung
- 6 Zusammenfassung





## Kritischer Abschnitt (engl. *critical section*), *cs*

- Folge von Anweisungen, deren Ausführung einen gegenseitigen Ausschluss erfordern  $\leadsto$  **mehrseitige Synchronisation**
  - (a) Vor Überlappung schützen  $\mapsto$  binärer Semaphor
  - (b) Vor Verdrängung schützen  $\mapsto$  Einlastung abschalten







## Kritischer Abschnitt (engl. *critical section*), *cs*

- Folge von Anweisungen, deren Ausführung einen gegenseitigen Ausschluss erfordern  $\leadsto$  **mehrseitige Synchronisation**
  - (a) Vor Überlappung schützen  $\mapsto$  binärer Semaphor
  - (b) Vor Verdrängung schützen  $\mapsto$  Einlastung abschalten
- Beispiel: Blockierung durch Systemaufrufe
  - Unterbindung von Verdrängung bei Ausführung von Systemaufrufen





## Kritischer Abschnitt (engl. *critical section*), *cs*

- Folge von Anweisungen, deren Ausführung einen gegenseitigen Ausschluss erfordern  $\leadsto$  **mehrseitige Synchronisation**
  - (a) Vor Überlappung schützen  $\mapsto$  binärer Semaphor
  - (b) Vor Verdrängung schützen  $\mapsto$  Einlastung abschalten

## ■ Beispiel: Blockierung durch Systemaufrufe

- Unterbindung von Verdrängung bei Ausführung von Systemaufrufen
- Auswirkungen auf das Laufzeitverhalten von Arbeitsaufträgen:
  - Auftrag  $J_i$  läuft und tätigt einen Systemaufruf
  - $\leadsto J_i$  hat eine niedrige Priorität, durchläuft unverdrängbar den Kern





## Kritischer Abschnitt (engl. *critical section*), *cs*

- Folge von Anweisungen, deren Ausführung einen gegenseitigen Ausschluss erfordern  $\leadsto$  **mehrseitige Synchronisation**
  - (a) Vor Überlappung schützen  $\mapsto$  binärer Semaphor
  - (b) Vor Verdrängung schützen  $\mapsto$  Einlastung abschalten

## ■ Beispiel: Blockierung durch Systemaufrufe

- Unterbindung von Verdrängung bei Ausführung von Systemaufrufen
- Auswirkungen auf das Laufzeitverhalten von Arbeitsaufträgen:
  - Auftrag  $J_l$  läuft und tätigt einen Systemaufruf
    - $\leadsto J_l$  hat eine niedrige Priorität, durchläuft unverdrängbar den Kern
  - Während des Systemaufrufs, wird Job  $J_h$  ereignisbedingt ausgelöst
    - $\leadsto J_h$  hat eine hohe Priorität, wird eingeplant aber nicht eingelastet





## Kritischer Abschnitt (engl. *critical section*), *cs*

- Folge von Anweisungen, deren Ausführung einen gegenseitigen Ausschluss erfordern  $\leadsto$  **mehrseitige Synchronisation**
  - (a) Vor Überlappung schützen  $\mapsto$  binärer Semaphore
  - (b) Vor Verdrängung schützen  $\mapsto$  Einlastung abschalten

## ■ Beispiel: Blockierung durch Systemaufrufe

- Unterbindung von Verdrängung bei Ausführung von Systemaufrufen
- Auswirkungen auf das Laufzeitverhalten von Arbeitsaufträgen:
  - Auftrag  $J_l$  läuft und tätigt einen Systemaufruf
    - $\leadsto J_l$  hat eine niedrige Priorität, durchläuft unverdrängbar den Kern
  - Während des Systemaufrufs, wird Job  $J_h$  ereignisbedingt ausgelöst
    - $\leadsto J_h$  hat eine hohe Priorität, wird eingeplant aber nicht eingelastet
  - $J_l$  blockiert bzw. hemmt  $J_h$ , die Priorität von  $J_h$  wird verletzt



## Kritischer Abschnitt (engl. *critical section*), *cs*

- Folge von Anweisungen, deren Ausführung einen gegenseitigen Ausschluss erfordern  $\leadsto$  **mehrseitige Synchronisation**
  - (a) Vor Überlappung schützen  $\mapsto$  binärer Semaphor
  - (b) Vor Verdrängung schützen  $\mapsto$  Einlastung abschalten

## ■ Beispiel: Blockierung durch Systemaufrufe

- Unterbindung von Verdrängung bei Ausführung von Systemaufrufen
- Auswirkungen auf das Laufzeitverhalten von Arbeitsaufträgen:
  - Auftrag  $J_l$  läuft und tätigt einen Systemaufruf  
 $\leadsto J_l$  hat eine niedrige Priorität, durchläuft unverdrängbar den Kern
  - Während des Systemaufrufs, wird Job  $J_h$  ereignisbedingt ausgelöst  
 $\leadsto J_h$  hat eine hohe Priorität, wird eingeplant aber nicht eingelastet
  - $J_l$  blockiert bzw. hemmt  $J_h$ , die Priorität von  $J_h$  wird verletzt



Synchronisation ist **nicht-funktionale Eigenschaft**  
(in diesem Fall der Systemaufrufe)





**Prioritätsumkehr** [6] ist Folge der Blockierung eines höher durch einen niedriger priorisierten Auftrag





**Prioritätsumkehr** [6] ist Folge der Blockierung eines höher durch einen niedriger priorisierten Auftrag

1

Der niedrig priorisierte Auftrag durchläuft einen kritischen Abschnitt und wird vom höher priorisierten Auftrag verdrängt





**Prioritätsumkehr** [6] ist Folge der Blockierung eines höher durch einen niedriger priorisierten Auftrag

- 1 Der niedrig priorisierte Auftrag durchläuft einen kritischen Abschnitt und wird vom höher priorisierten Auftrag verdrängt
- 2 Der höher priorisierte Auftrag möchte denselben kritischen Abschnitt betreten, wird vom niedrig priorisierten Auftrag jedoch daran gehindert







**Prioritätsumkehr** [6] ist Folge der Blockierung eines höher durch einen niedriger priorisierten Auftrag

- 1 Der niedrig priorisierte Auftrag durchläuft einen kritischen Abschnitt und wird vom höher priorisierten Auftrag verdrängt
- 2 Der höher priorisierte Auftrag möchte denselben kritischen Abschnitt betreten, wird vom niedrig priorisierten Auftrag jedoch daran gehindert
- 3 Der niedrig priorisierte Job kann weiter ausgeführt werden, obwohl ein höher priorisierter Job wartet





**Prioritätsumkehr** [6] ist Folge der Blockierung eines höher durch einen niedriger priorisierten Auftrag

- 1 Der niedrig priorisierte Auftrag durchläuft einen kritischen Abschnitt und wird vom höher priorisierten Auftrag verdrängt
- 2 Der höher priorisierte Auftrag möchte denselben kritischen Abschnitt betreten, wird vom niedrig priorisierten Auftrag jedoch daran gehindert
- 3 Der niedrig priorisierte Job kann weiter ausgeführt werden, obwohl ein höher priorisierter Job wartet



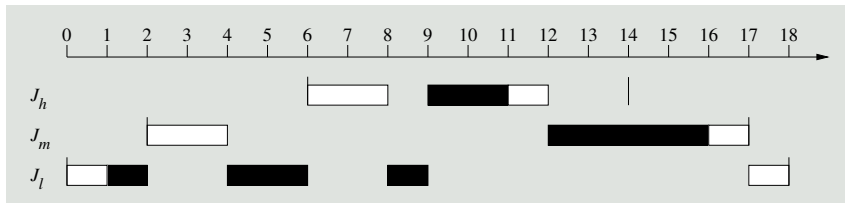
Diese Form der (**normalen**) **Prioritätsumkehr** ist **nicht vermeidbar**

- Kritischer Abschnitt oder Betriebsmittel: **Unteilbarkeit** ist das Problem



# Beispiel: Wettstreit und Prioritätsumkehr

$J_l = (0, 6, 18)$ ,  $J_m = (2, 7, 17)$ ,  $J_h = (6, 5, 14)$ , alle fordern  $R$  an



$J_l$  (niedrige Priorität)

- $t_0$  startet
- $t_1$  belegt Betriebsmittel  $R$
- $t_4$  setzt Ausführung fort
- $t_8$  setzt Ausführung fort
- $t_9$  gibt  $R$  frei  $\mapsto J_h$
- $t_{17}$  setzt Ausführung fort
- $t_{18}$  beendet die Ausführung

$J_m$  (mittlere Priorität)

- $t_2$  startet, verdrängt  $J_l$
- $t_4$  fordert  $R$  an, blockiert
- $t_{12}$  belegt  $R$
- $t_{16}$  gibt  $R$  frei
- $t_{17}$  beendet die Ausführung

$J_h$  (hohe Priorität)

- $t_6$  startet, verdrängt  $J_l$
- $t_8$  fordert  $R$  an, blockiert
- $t_9$  deblockiert, belegt  $R$
- $t_{11}$  gibt  $R$  frei  $\rightsquigarrow J_m$
- $t_{12}$  beendet die Ausführung





## What really happened on Mars?

Prioritätsumkehr beim *Mars Pathfinder* [11, 5]

- `bc_sched` ↪ Task mit höchster Priorität (mit Ausnahme der VxWorks Task „tExec“)
  - Kontrollierte Transaktionen des „1553“-Bus
  - Dieser koppelte Fahr- und Landeeinheit der Raumsonde





- `bc_sched`  $\mapsto$  Task mit höchster Priorität (mit Ausnahme der VxWorks Task „tExec“)
  - Kontrollierte Transaktionen des „1553“-Bus
  - Dieser koppelte Fahr- und Landeeinheit der Raumsonde
- `bc_dist`  $\mapsto$  Task mit dritthöchster Priorität
  - Steuerte die Einsammlung der Transaktionsergebnisse
  - Dateneingabe über doppelt gepufferten gemeinsamen Speicher





- **bc\_sched**  $\mapsto$  Task mit höchster Priorität (mit Ausnahme der VxWorks Task „tExec“)
  - Kontrollierte Transaktionen des „1553“-Bus
  - Dieser koppelte Fahr- und Landeeinheit der Raumsonde
- **bc\_dist**  $\mapsto$  Task mit dritthöchster Priorität
  - Steuerte die Einsammlung der Transaktionsergebnisse
  - Dateneingabe über doppelt gepufferten gemeinsamen Speicher
- **ASI/MET**  $\mapsto$  Task mit sehr niedriger Priorität
  - Sammelte in seltenen Durchläufen meteorologische Daten ein
  - Interoperierte mit `bc_dist` (blockierend) auf IPC-Basis



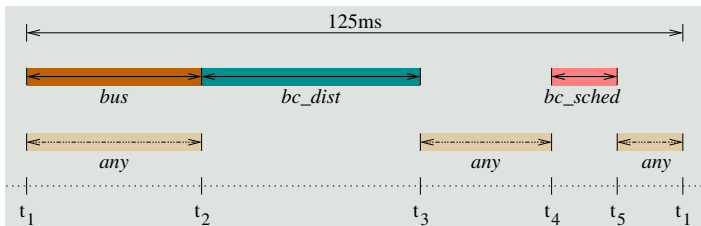


- `bc_sched`  $\mapsto$  Task mit höchster Priorität (mit Ausnahme der VxWorks Task „tExec“)
  - Kontrollierte Transaktionen des „1553“-Bus
  - Dieser koppelte Fahr- und Landeeinheit der Raumsonde
- `bc_dist`  $\mapsto$  Task mit dritthöchster Priorität
  - Steuerte die Einsammlung der Transaktionsergebnisse
  - Dateneingabe über doppelt gepufferten gemeinsamen Speicher
- `ASI/MET`  $\mapsto$  Task mit sehr niedriger Priorität
  - Sammelte in seltenen Durchläufen meteorologische Daten ein
  - Interoperierte mit `bc_dist` (blockierend) auf IPC-Basis



Hardware gab eine Periodenlänge von 8 Hz (d.h., 125 ms) vor

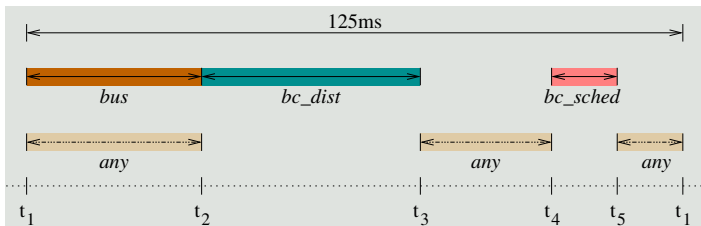




- $t_1$  Transaktion startet hardware-kontrolliert an einer 8 Hz Grenze
- $t_2$  Busverkehr ist zur Ruhe gekommen, bc\_dist wird ausgelöst
- $t_3$  bc\_dist hat die Datenverteilung abgeschlossen
- $t_4$  bc\_sched setzt Transaktion für nächsten Buszyklus auf
- $t_5$  bc\_sched hat seine Aufgabe für diesen Zyklus beendet







- $t_1$  Transaktion startet hardware-kontrolliert an einer 8 Hz Grenze
- $t_2$  Busverkehr ist zur Ruhe gekommen, bc\_dist wird ausgelöst
- $t_3$  bc\_dist hat die Datenverteilung abgeschlossen
- $t_4$  bc\_sched setzt Transaktion für nächsten Buszyklus auf
- $t_5$  bc\_sched hat seine Aufgabe für diesen Zyklus beendet



Intervalle  $[t_1, t_2[$ ,  $[t_3, t_4[$ ,  $[t_5, t_1[$  standen ASI/MET zur Verfügung





bc\_dist muss die Datenverteilung vor Auslösung von bc\_sched abgeschlossen haben, um die Transaktion des nächsten Zyklus aufzusetzen:

- Stellt bc\_sched fest, dass bc\_dist noch nicht abgeschlossen ist, wird ein Total-reset durchgeführt
  - Der reset hat die Initialisierung der gesamten Hard- und Software zur Folge, insbesondere den **Abbruch aller bodengesteuerten Aktivitäten**
- Bereits aufgezeichnete wiss. Daten sind dann zwar gesichert, aber die noch anstehende Tagesarbeit kann nicht mehr vollbracht werden





bc\_dist muss die Datenverteilung vor Auslösung von bc\_sched abgeschlossen haben, um die Transaktion des nächsten Zyklus aufzusetzen:

- Stellt bc\_sched fest, dass bc\_dist noch nicht abgeschlossen ist, wird ein Total-reset durchgeführt
- Der reset hat die Initialisierung der gesamten Hard- und Software zur Folge, insbesondere den **Abbruch aller bodengesteuerten Aktivitäten**
- Bereits aufgezeichnete wiss. Daten sind dann zwar gesichert, aber die noch anstehende Tagesarbeit kann nicht mehr vollbracht werden

■ Kategorie **feste Echtzeit** (engl. *firm real-time*) zur Erinnerung:

- **Ergebnis** einer zu einem vorgegebenen Termin nicht geleisteten Arbeit **ist wertlos und wird verworfen**
- Terminverletzung ist tolerierbar, führt zum Arbeitsabbruch





ASI/MET (niedrige Priorität) hat bc\_dist (hohe Priorität) blockiert:

- ASI/MET belegte wiederverwendbares, unteilbares Betriebsmittel
  - Wurde von bc\_dist angefordert, bevor ASI/MET es wieder frei gab
- Im weiteren Verlauf verdrängten Tasks mittlerer Priorität ASI/MET
  - Verlängerung der **Blockierungszeit** für bc\_dist
  - bc\_dist war noch nicht abgeschlossen als bc\_sched startete
- bc\_sched stellte die Zeitverletzung fest und löste einen reset aus





ASI/MET (niedrige Priorität) hat bc\_dist (hohe Priorität) blockiert:

- ASI/MET belegte wiederverwendbares, unteilbares Betriebsmittel
  - Wurde von bc\_dist angefordert, bevor ASI/MET es wieder frei gab
- Im weiteren Verlauf verdrängten Tasks mittlerer Priorität ASI/MET
  - Verlängerung der **Blockierungszeit** für bc\_dist
  - bc\_dist war noch nicht abgeschlossen als bc\_sched startete
- bc\_sched stellte die Zeitverletzung fest und löste einen reset aus

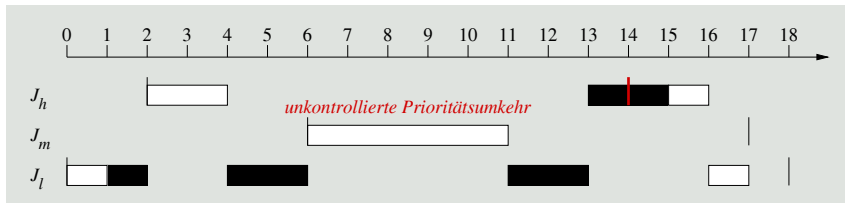
■ Fehlererkennung und -beseitigung:

- Die Semaphorinitialisierung war in VxWorks falsch eingestellt
- Sie wurde bodengesteuert (durch ein Skriptprogramm) korrigiert
  - Der Semaphor wurde auf **Prioritätsvererbung** umgestellt



# Anomalie im Laufzeitverhalten

Beispiel:  $J_l = (0, 7, 18)$ ,  $J_m = (6, 5, 17)$ ,  $J_h = (2, 5, 14)$ ,  $J_m$  fordert  $R$  nicht an



## $J_l$ (niedrige Priorität)

- $t_0$  startet
- $t_1$  belegt Betriebsmittel  $R$
- $t_4$  setzt Ausführung fort
- $t_{11}$  setzt Ausführung fort
- $t_{13}$  gibt  $R$  frei  $\mapsto J_h$
- $t_{16}$  setzt Ausführung fort
- $t_{17}$  beendet die Ausführung

## $J_m$ (mittlere Priorität)

- $t_6$  startet, verdrängt  $J_l$
- $t_{11}$  beendet die Ausführung

## $J_h$ (hohe Priorität)

- $t_2$  startet, verdrängt  $J_l$
- $t_4$  fordert  $R$  an, blockiert
- $t_{13}$  belegt  $R$
- $t_{14}$  verletzt seinen Termin
- $t_{15}$  gibt  $R$  frei
- $t_{16}$  beendet die Ausführung





## Synchronisation *Considered Harmful*

Prioritätsumkehr bei prioritätsorientierter Einplanung

- **Prioritätsumkehr** (siehe Folie 13) ist ein mögliches Phänomen abhängiger Aufträge, welches in zwei Ausprägungen auftreten kann:





# Synchronisation *Considered Harmful*

Prioritätsumkehr bei prioritätsorientierter Einplanung

- **Prioritätsumkehr** (siehe Folie 13) ist ein mögliches Phänomen abhängiger Aufträge, welches in zwei Ausprägungen auftreten kann:
  - 1 (Normale) **Prioritätsumkehr** (engl. *priority inversion*)
    - Gegenseitiger Ausschluss  $\rightarrow$  Ein Auftrag hoher Priorität wartet auf einen niedriger Priorität (ggf. unvermeidbar)







# Synchronisation *Considered Harmful*

Prioritätsumkehr bei prioritätsorientierter Einplanung

- **Prioritätsumkehr** (siehe Folie 13) ist ein mögliches Phänomen abhängiger Aufträge, welches in zwei Ausprägungen auftreten kann:
  - 1 (Normale) **Prioritätsumkehr** (engl. *priority inversion*)
    - Gegenseitiger Ausschluss  $\rightarrow$  Ein Auftrag hoher Priorität wartet auf einen niedriger Priorität (ggf. unvermeidbar)
  - 2 **Unkontrollierte Prioritätsumkehr** (engl. *unbounded priority inversion*)
    - Der Auftrag niedriger Priorität wird von *unbeteiligten Aufträgen* mittlerer Priorität verdrängt





# Synchronisation *Considered Harmful*

Prioritätsumkehr bei prioritätsorientierter Einplanung

- **Prioritätsumkehr** (siehe Folie 13) ist ein mögliches Phänomen abhängiger Aufträge, welches in zwei Ausprägungen auftreten kann:

**1** (Normale) **Prioritätsumkehr** (engl. *priority inversion*)

- Gegenseitiger Ausschluss  $\rightarrow$  Ein Auftrag hoher Priorität wartet auf einen niedriger Priorität (ggf. unvermeidbar)

**2** **Unkontrollierte Prioritätsumkehr** (engl. *unbounded priority inversion*)

- Der Auftrag niedriger Priorität wird von *unbeteiligten Aufträgen* mittlerer Priorität verdrängt

 Lösungsansätze für die blockierende Synchronisation sind:

- Verdrängungssteuerung (NPCS)
- Prioritätsvererbung (PI)
- Prioritätsobergrenzen (PCP)

 Folie 22 ff.

 Folie 28 ff.

 Folie 32 ff.



- 1 Überblick
- 2 Konkurrenz und Koordination
  - Kausalordnung und Koordinierung
  - Konkurrenz und Konflikte
- 3 Effekte in Echtzeitsystemen
- 4 Echtzeitfähige Synchronisationsprotokolle**
  - Verdrängungssteuerung
  - Prioritätsvererbung
  - Prioritätsobergrenzen
- 5 Ablaufplanung
- 6 Zusammenfassung





# Verdrängungssteuerung – NPCS

Verdrängungsfreie kritische Abschnitte (engl. *non-preemptive critical sections*)



Verdrängung wird für die **Gesamtzeit der Belegung** von (unteilbaren) Betriebsmitteln unterbunden

- Die Benutzung der Betriebsmittel kontrolliert ein **Monitor** [3, 4]
  - Kernelized monitor [8], RES\_SCHEDULER in OSEK, ...





# Verdrängungssteuerung – NPCS

Verdrängungsfreie kritische Abschnitte (engl. *non-preemptive critical sections*)



Verdrängung wird für die **Gesamtzeit der Belegung** von (unteilbaren) Betriebsmitteln unterbunden

- Die Benutzung der Betriebsmittel kontrolliert ein **Monitor** [3, 4]
  - Kernelized monitor [8], RES\_SCHEDULER in OSEK, ...
    - Eintrittsprotokoll** → Verdrängung abwehren
      - Ausgelöste Aufträge einplanen, aber nicht einlasten





# Verdrängungssteuerung – NPCS

Verdrängungsfreie kritische Abschnitte (engl. *non-preemptive critical sections*)



Verdrängung wird für die **Gesamtzeit der Belegung** von (unteilbaren) Betriebsmitteln unterbunden

- Die Benutzung der Betriebsmittel kontrolliert ein **Monitor** [3, 4]
  - Kernelized monitor [8], RES\_SCHEDULER in OSEK, ...
    - Eintrittsprotokoll** → Verdrängung abwehren
      - Ausgelöste Aufträge einplanen, aber nicht einlasten
    - Austrittsprotokoll** → Verdrängung wieder zulassen
      - Höher priorisierte Aufträge (nachträglich) einlasten





# Verdrängungssteuerung – NPCS

Verdrängungsfreie kritische Abschnitte (engl. *non-preemptive critical sections*)



Verdrängung wird für die **Gesamtzeit der Belegung** von (unteilbaren) Betriebsmitteln unterbunden

- Die Benutzung der Betriebsmittel kontrolliert ein **Monitor** [3, 4]
  - Kernelized monitor [8], RES\_SCHEDULER in OSEK, ...
    - Eintrittsprotokoll** → Verdrängung abwehren
      - Ausgelöste Aufträge einplanen, aber nicht einlasten
    - Austrittsprotokoll** → Verdrängung wieder zulassen
      - Höher priorisierte Aufträge (nachträglich) einlasten



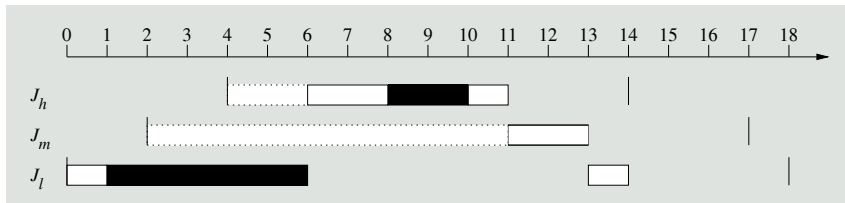
Aufträge **unverdrängbar** bis zur Freigabe des Betriebsmittels

- **Verklemmungsfreies Verfahren** durch **Verklemmungsvorbeugung** (engl. *deadlock prevention*)



# Beispiel: Verdrängungssteuerung

Beispiel:  $J_l = (0, 7, 18)$ ,  $J_m = (6, 5, 17)$ ,  $J_h = (2, 5, 14)$ ,  $J_m$  fordert  $R$  nicht an



$J_l$  (niedrige Priorität)

$t_0$  startet

$t_1$  belegt  $R$  unverdrängbar

$t_6$  gibt  $R$  frei  $\mapsto J_h$

$t_{16}$  setzt Ausführung fort

$t_{17}$  beendet die Ausführung

$J_m$  (mittlere Priorität)

$t_6$  wird ausgelöst

$t_{11}$  startet

$t_{16}$  beendet die Ausführung

$J_h$  (hohe Priorität)

$t_2$  wird ausgelöst

$t_6$  startet

$t_8$  belegt  $R$  unverdrängbar

$t_{10}$  gibt  $R$  frei

$t_{11}$  beendet die Ausführung







Verzögerungen nebenläufiger Arbeitsaufträge durch die Zugriffskontrolle sind nach oben begrenzt





**Verzögerungen** nebenläufiger Arbeitsaufträge durch die Zugriffskontrolle sind **nach oben begrenzt**

- Höher priorisierte Aufträge werden schlimmstenfalls **einmal** durch einen niedriger priorisierten Auftrag blockiert





**Verzögerungen** nebenläufiger Arbeitsaufträge durch die Zugriffskontrolle sind **nach oben begrenzt**

- Höher priorisierte Aufträge werden schlimmstenfalls **einmal** durch einen niedriger priorisierten Auftrag blockiert
- Feste obere Schranke  $b^{rc}$  (*resource contention*) bestimmt sich aus der größten WCET aller kritischen Abschnitte aller niedriger priorisierten Aufträge:  $\max(cs)$





Verzögerungen nebenläufiger Arbeitsaufträge durch die Zugriffskontrolle sind nach oben begrenzt

- Höher priorisierte Aufträge werden schlimmstenfalls einmal durch einen niedriger priorisierten Auftrag blockiert
- Feste obere Schranke  $b^{rc}$  (*resource contention*) bestimmt sich aus der größten WCET aller kritischen Abschnitte aller niedriger priorisierten Aufträge:  $\max(cs)$

- NPCS verzögert eine periodische Aufgabe  $T_i$  von  $n$  periodischen Aufgaben um  $b_i^{rc} = \max_k(cs_k)$ , für  $i + 1 \leq k \leq n$ :

*fixed-priority* bei Abarbeitung nach absteigender Priorität






Verzögerungen nebenläufiger Arbeitsaufträge durch die Zugriffskontrolle sind nach oben begrenzt

- Höher priorisierte Aufträge werden schlimmstenfalls einmal durch einen niedriger priorisierten Auftrag blockiert
- Feste obere Schranke  $b^{rc}$  (*resource contention*) bestimmt sich aus der größten WCET aller kritischen Abschnitte aller niedriger priorisierten Aufträge:  $\max(cs)$

- NPCS verzögert eine periodische Aufgabe  $T_i$  von  $n$  periodischen Aufgaben um  $b_i^{rc} = \max_k(cs_k)$ , für  $i + 1 \leq k \leq n$ :

*fixed-priority* bei Abarbeitung nach absteigender Priorität

*dynamic-priority* EDF: Jobs in  $T_i$  mit relativem Termin  $D_i$  können nur durch Jobs mit längeren relativen Terminen als  $D_i$  blockiert werden   $i < j$  wenn  $D_i < D_j$



# NPCS: Ein pragmatischer Ansatz

Effektiv, bei vergleichsweise geringem Aufwand



Kein *à priori* Wissen über Betriebsmittelanforderungen notwendig





Kein **à priori Wissen** über Betriebsmittelanforderungen **notwendig**

- Beugt **unkontrollierter** Prioritätsumkehr vor
  - Hält  $J_l$  Betriebsmittel, wird  $J_h$  lediglich eingeplant und blockiert direkt
  - Beendet  $J_l$  seinen kritischen Abschnitt, sind alle Betriebsmittel frei
  - Aufträge geringerer Priorität als  $J_h$  können ihm diese nicht streitig machen





## Kein *à priori* Wissen über Betriebsmittelanforderungen *notwendig*

- Beugt **unkontrollierter** Prioritätsumkehr vor
  - Hält  $J_l$  Betriebsmittel, wird  $J_h$  lediglich eingeplant und blockiert direkt
  - Beendet  $J_l$  seinen kritischen Abschnitt, sind alle Betriebsmittel frei
  - Aufträge geringerer Priorität als  $J_h$  können ihm diese nicht streitig machen
- Beugt **Verklemmung** (engl. *deadlock*) vor, da Nachforderungen von Betriebsmitteln implizit unteilbar
  - Entkräftet **notwendige** Verklemmungsbedingung [9, VIII-60]
  - „Hold and wait“ Fall kann nicht eintreten







## Kein **à priori Wissen** über Betriebsmittelanforderungen **notwendig**

- Beugt **unkontrollierter** Prioritätsumkehr vor
  - Hält  $J_i$  Betriebsmittel, wird  $J_h$  lediglich eingeplant und blockiert direkt
  - Beendet  $J_i$  seinen kritischen Abschnitt, sind alle Betriebsmittel frei
  - Aufträge geringerer Priorität als  $J_h$  können ihm diese nicht streitig machen
- Beugt **Verklemmung** (engl. *deadlock*) vor, da Nachforderungen von Betriebsmitteln implizit unteilbar
  - Entkräftet **notwendige** Verklemmungsbedingung [9, VIII-60]
  - „Hold and wait“ Fall kann nicht eintreten

## ■ Einfaches und gutes Verfahren

- Falls alle **Belegungszeiten** aller Betriebsmittel **kurz** sind
- Wenn die **meisten** Aufträge **im Konflikt zueinander** stehen
- Für Systeme mit fester und dynamischer Priorität geeignet



- *Drei notwendige Bedingungen für Verklemmung:*
  - 1 Exklusive Belegung (engl. *mutual exclusion*)
  - 2 Nachforderung von Betriebsmitteln (engl. *hold and wait*)
  - 3 kein Entzug von BMs (engl. *no preemption*)



- *Drei notwendige Bedingungen für Verklemmung:*

- 1 Exklusive Belegung (engl. *mutual exclusion*)
- 2 Nachforderung von Betriebsmitteln (engl. *hold and wait*)
- 3 kein Entzug von BMs (engl. *no preemption*)

- *Eine hinreichende Bedingung:*

- 1 zirkuläres Warten (engl. *circular wait*)

- Entweder **eine** notwendige oder die hinreichende Bedingung entkräften



Verklemmungen ausschließen





## Benachteiligt an Betriebsmitteln **unbeteiligte Arbeitsaufträge**

- Blockierung hochpriorer Aufträge ohne Konfliktsituation
- Im Beispiel (vgl. Folie 23) wird  $J_m$  durch  $J_l$  blockiert, obwohl beide Aufträge nicht im gegenseitigen Ausschluss zueinander stehen





## Benachteiligt an Betriebsmitteln **unbeteiligte Arbeitsaufträge**

- Blockierung hochpriorer Aufträge ohne Konfliktsituation
- Im Beispiel (vgl. Folie 23) wird  $J_m$  durch  $J_l$  blockiert, obwohl beide Aufträge nicht im gegenseitigen Ausschluss zueinander stehen



## Verbesserungsmöglichkeiten

- 1 Durch anderweitige Vermeidung oder Vorbeugung von Verklemmungen:
  - Hochsetzen der Priorität des ein Betriebsmittel haltenden Auftrags für die restliche Belegungszeit auf die Priorität des anfordernden Auftrags
  - Beschleunigung kritischer Abschnitte durch **Prioritätsvererbung** (siehe Folie 32)
- 2 So Betriebsmittelanforderungen **à priori** bekannt sind:
  - Der ein Betriebsmittel haltende Auftrag läuft mit der höchsten Priorität aller Aufträge, die das Betriebsmittel beanspruchen
  - Das Betriebsmittel besitzt eine **Prioritätsobergrenze** (siehe Folie 32)





# Prioritätsvererbung

Wechsel zwischen zugewiesene und aktuelle (geerbte) Priorität



Prioritätsvererbung (engl. *priority inheritance*)

- Priorisierung für die **Restzeit der Belegung** im Konfliktfall





# Prioritätsvererbung

Wechsel zwischen zugewiesene und aktuelle (geerbte) Priorität



## Prioritätsvererbung (engl. *priority inheritance*)

- Priorisierung für die **Restzeit der Belegung** im Konfliktfall
  
- Vererbung der Priorität durch anfordernde Aufträge
  - Bei Anforderung eines gesperrtes Betriebsmittels, Vererbung der Priorität an den das Betriebsmittel haltenden Auftrag
    - Anfordernde Auftrag hat zu dem Zeitpunkt die **höchste Priorität**
    - Blockierung an dem gesperrten kritischen Abschnitt
    - Priorität des das Betriebsmittel haltenden Auftrags wird erhöht





# Prioritätsvererbung

Wechsel zwischen zugewiesene und aktuelle (geerbte) Priorität



## Prioritätsvererbung (engl. *priority inheritance*)

- Priorisierung für die **Restzeit der Belegung** im Konfliktfall
  
- Vererbung der Priorität durch anfordernde Aufträge
  - Bei Anforderung eines gesperrtes Betriebsmittels, Vererbung der Priorität an den das Betriebsmittel haltenden Auftrag
    - Anfordernde Auftrag hat zu dem Zeitpunkt die **höchste Priorität**
    - Blockierung an dem gesperrten kritischen Abschnitt
    - Priorität des das Betriebsmittel haltenden Auftrags wird erhöht
  - Bei Freigabe des Betriebsmittels, nimmt der niederpriore Auftrag die ihm ursprünglich zugewiesene Priorität wieder an
    - Der freigebende Auftrag wird ggf. sofort verdrängt
    - Der auf die Freigabe wartende Auftrag wird ggf. sofort eingelastet







# Prioritätsvererbung

Wechsel zwischen zugewiesene und aktuelle (geerbte) Priorität



## Prioritätsvererbung (engl. *priority inheritance*)

- Priorisierung für die **Restzeit der Belegung** im Konfliktfall
- Vererbung der Priorität durch anfordernde Aufträge
  - Bei Anforderung eines gesperrtes Betriebsmittels, Vererbung der Priorität an den das Betriebsmittel haltenden Auftrag
    - Anfordernde Auftrag hat zu dem Zeitpunkt die **höchste Priorität**
    - Blockierung an dem gesperrten kritischen Abschnitt
    - Priorität des das Betriebsmittel haltenden Auftrags wird erhöht
  - Bei Freigabe des Betriebsmittels, nimmt der niederpriore Auftrag die ihm ursprünglich zugewiesene Priorität wieder an
    - Der freigebende Auftrag wird ggf. sofort verdrängt
    - Der auf die Freigabe wartende Auftrag wird ggf. sofort eingelastet



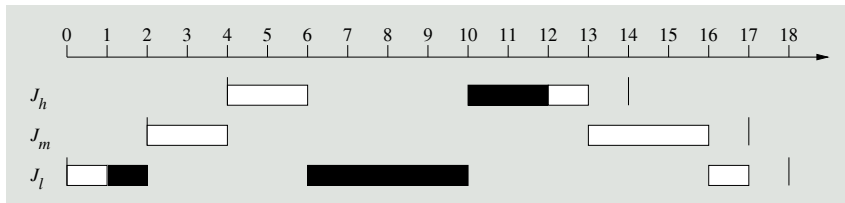
Prioritätsumkehr wird nicht vermieden, jedoch entschärft:

- Verdrängbarkeit durch unbeteiligte Arbeitsaufträge höherer Priorität



# Beispiel: Prioritätsvererbung

Beispiel:  $J_l = (0, 7, 18)$ ,  $J_m = (2, 7, 17)$ ,  $J_h = (4, 5, 14)$ ,  $J_m$  fordert  $R$  nicht an



## $J_l$ (niedrige Priorität)

- $t_0$  startet
- $t_1$  belegt  $R$
- $t_2$  Verdrängung durch  $J_m$
- $t_6$  erbt die Priorität von  $J_h$
- $t_{10}$  gibt  $R$  frei  $\mapsto J_h$
- $t_{16}$  läuft mit alter Priorität
- $t_{17}$  beendet die Ausführung

## $J_m$ (mittlere Priorität)

- $t_2$  startet
- $t_4$  Verdrängung durch  $J_h$
- $t_{13}$  läuft weiter
- $t_{16}$  beendet die Ausführung

## $J_h$ (hohe Priorität)

- $t_4$  startet
- $t_6$  fordert  $R$  an  $\mapsto$  Prioritätsvererbung
- $t_{10}$  belegt  $R$
- $t_{12}$  gibt  $R$  frei
- $t_{13}$  beendet die Ausführung





# Transitive Blockierung

Nachforderung unteilbarer Betriebsmittel



Prioritätsvererbung bedingt **zwei Arten** von Blockierung





# Transitive Blockierung

Nachforderung unteilbarer Betriebsmittel

 Prioritätsvererbung bedingt **zwei Arten** von Blockierung

**1** Direkte Blockierung (engl. *direct blocking*)

- Bekannte Blockierung eines höher priorisierten Auftrags ( $J_h$ ) durch einen niedriger priorisierter Auftrag ( $J_l$ ), welcher das angeforderte Betriebsmittel hält





☞ Prioritätsvererbung bedingt **zwei Arten** von Blockierung

## 1 Direkte Blockierung (engl. *direct blocking*)

- Bekannte Blockierung eines höher priorisierten Auftrags ( $J_h$ ) durch einen niedriger priorisierter Auftrag ( $J_l$ ), welcher das angeforderte Betriebsmittel hält

## 2 Blockierung durch Vererbung (engl. *inheritance blocking*)

- Blockierung eines **nicht im gegenseitigen Ausschluss befindlichen** höher priorisierten Auftrags ( $J_h$ )
- Welcher  $J_l$  gemäß dessen „Altpriorität“ verdrängen könnte, dies jedoch wegen der geerbter Priorität nicht kann





# Transitive Blockierung

Nachforderung unteilbarer Betriebsmittel

 Prioritätsvererbung bedingt **zwei Arten** von Blockierung

## 1 Direkte Blockierung (engl. *direct blocking*)

- Bekannte Blockierung eines höher priorisierten Auftrags ( $J_h$ ) durch einen niedriger priorisierter Auftrag ( $J_l$ ), welcher das angeforderte Betriebsmittel hält

## 2 Blockierung durch Vererbung (engl. *inheritance blocking*)

- Blockierung eines **nicht im gegenseitigen Ausschluss befindlichen** höher priorisierten Auftrags ( $J_h$ )
- Welcher  $J_l$  gemäß dessen „Altpriorität“ verdrängen könnte, dies jedoch wegen der geerbter Priorität nicht kann

 **Transitive Blockierung** bei geschachtelten kritischen Abschnitten





# Transitive Blockierung

Nachforderung unteilbarer Betriebsmittel

☞ Prioritätsvererbung bedingt **zwei Arten** von Blockierung

## 1 Direkte Blockierung (engl. *direct blocking*)

- Bekannte Blockierung eines höher priorisierten Auftrags ( $J_h$ ) durch einen niedriger priorisierter Auftrag ( $J_l$ ), welcher das angeforderte Betriebsmittel hält

## 2 Blockierung durch Vererbung (engl. *inheritance blocking*)

- Blockierung eines **nicht im gegenseitigen Ausschluss befindlichen** höher priorisierten Auftrags ( $J_h$ )
- Welcher  $J_l$  gemäß dessen „Altpriorität“ verdrängen könnte, dies jedoch wegen der geerbter Priorität nicht kann



**Transitive Blockierung** bei geschachtelten kritischen Abschnitten

- 1  $J_l$  startet zuerst, belegt  $R_1$  und wird von  $J_m$  verdrängt





 Prioritätsvererbung bedingt **zwei Arten** von Blockierung

**1** Direkte Blockierung (engl. *direct blocking*)

- Bekannte Blockierung eines höher priorisierten Auftrags ( $J_h$ ) durch einen niedriger priorisierter Auftrag ( $J_l$ ), welcher das angeforderte Betriebsmittel hält

**2** Blockierung durch Vererbung (engl. *inheritance blocking*)

- Blockierung eines **nicht im gegenseitigen Ausschluss befindlichen** höher priorisierten Auftrags ( $J_h$ )
- Welcher  $J_l$  gemäß dessen „Altpriorität“ verdrängen könnte, dies jedoch wegen der geerbter Priorität nicht kann

 **Transitive Blockierung** bei geschachtelten kritischen Abschnitten

**1**  $J_l$  startet zuerst, belegt  $R_1$  und wird von  $J_m$  verdrängt

**2**  $J_m$  belegt  $R_2$  und wird von  $J_h$  verdrängt







 Prioritätsvererbung bedingt **zwei Arten** von Blockierung

**1** Direkte Blockierung (engl. *direct blocking*)

- Bekannte Blockierung eines höher priorisierten Auftrags ( $J_h$ ) durch einen niedriger priorisierter Auftrag ( $J_l$ ), welcher das angeforderte Betriebsmittel hält

**2** Blockierung durch Vererbung (engl. *inheritance blocking*)

- Blockierung eines **nicht im gegenseitigen Ausschluss befindlichen** höher priorisierten Auftrags ( $J_h$ )
- Welcher  $J_l$  gemäß dessen „Altpriorität“ verdrängen könnte, dies jedoch wegen der geerbter Priorität nicht kann



**Transitive Blockierung** bei geschachtelten kritischen Abschnitten

- 1**  $J_l$  startet zuerst, belegt  $R_1$  und wird von  $J_m$  verdrängt
- 2**  $J_m$  belegt  $R_2$  und wird von  $J_h$  verdrängt
- 3**  $J_h$  fordert  $R_2$  an und vererbt seine Priorität an  $J_m$





# Transitive Blockierung

Nachforderung unteilbarer Betriebsmittel

 Prioritätsvererbung bedingt **zwei Arten** von Blockierung

**1** Direkte Blockierung (engl. *direct blocking*)

- Bekannte Blockierung eines höher priorisierten Auftrags ( $J_h$ ) durch einen niedriger priorisierter Auftrag ( $J_l$ ), welcher das angeforderte Betriebsmittel hält

**2** Blockierung durch Vererbung (engl. *inheritance blocking*)

- Blockierung eines **nicht im gegenseitigen Ausschluss befindlichen** höher priorisierten Auftrags ( $J_h$ )
- Welcher  $J_l$  gemäß dessen „Altpriorität“ verdrängen könnte, dies jedoch wegen der geerbter Priorität nicht kann



**Transitive Blockierung** bei geschachtelten kritischen Abschnitten

- 1**  $J_l$  startet zuerst, belegt  $R_1$  und wird von  $J_m$  verdrängt
- 2**  $J_m$  belegt  $R_2$  und wird von  $J_h$  verdrängt
- 3**  $J_h$  fordert  $R_2$  an und vererbt seine Priorität an  $J_m$
- 4**  $J_m$  läuft weiter, fordert  $R_1$  an und vererbt „seine“ Priorität an  $J_l$



- **Schlimmster Fall:** Auftrag  $J_i$  benötigt  $n \geq 1$  BM und steht mit  $k \geq 1$  niederpriorien Jobs im Konflikt
  - $J_i$  kann  $\min(n, k)$ -mal blockiert werden
  - Für die Dauer der WCET des äußersten kritischen Abschnitts

# Prioritätsvererbung: Blockierungszeit

Feste obere Schranken, die kaskadenartig zur Wirkung kommen können

- **Schlimmster Fall:** Auftrag  $J_i$  benötigt  $n \geq 1$  BM und steht mit  $k \geq 1$  niederprioriten Jobs im Konflikt
  - $J_i$  kann  $\min(n, k)$ -mal blockiert werden
  - Für die Dauer der WCET des äußersten kritischen Abschnitts
- Blockierungszeit ist maximal  $b_i^{rc} = \min(n, k) \cdot \max_l(cs_l)$
- $cs_l$  sind kritische Abschnitte von Aufträgen niedrigerer Priorität
- **Pessimistisch:** Kritische Abschnitte üblicherweise unterschiedlich lang



# Prioritätsvererbung: Blockierungszeit

Feste obere Schranken, die kaskadenartig zur Wirkung kommen können

- **Schlimmster Fall:** Auftrag  $J_i$  benötigt  $n \geq 1$  BM und steht mit  $k \geq 1$  niederpriorien Jobs im Konflikt
  - $J_i$  kann  $\min(n, k)$ -mal blockiert werden
  - Für die Dauer der WCET des äußersten kritischen Abschnitts
- Blockierungszeit ist maximal  $b_i^{rc} = \min(n, k) \cdot \max_l(cs_l)$
- $cs_l$  sind kritische Abschnitte von Aufträgen niedrigerer Priorität
- **Pessimistisch:** Kritische Abschnitte üblicherweise unterschiedlich lang



Der GAU ( $J_0$  höchste Priorität, vgl. [7, S. 289])

1  $J_k$  startet zuerst, belegt  $R_n$



# Prioritätsvererbung: Blockierungszeit

Feste obere Schranken, die kaskadenartig zur Wirkung kommen können

- **Schlimmster Fall:** Auftrag  $J_i$  benötigt  $n \geq 1$  BM und steht mit  $k \geq 1$  niederpriorien Jobs im Konflikt
  - $J_i$  kann  $\min(n, k)$ -mal blockiert werden
  - Für die Dauer der WCET des äußersten kritischen Abschnitts
- Blockierungszeit ist maximal  $b_i^{rc} = \min(n, k) \cdot \max_l(cs_l)$
- $cs_l$  sind kritische Abschnitte von Aufträgen niedrigerer Priorität
- **Pessimistisch:** Kritische Abschnitte üblicherweise unterschiedlich lang



Der GAU ( $J_0$  höchste Priorität, vgl. [7, S. 289])

1  $J_k$  startet zuerst, belegt  $R_n$ ;  $J_{k-1}$  verdrängt  $J_k$ , belegt  $R_{n-1}$



**Weiteres Problem:** Verklemmungen nicht ausgeschlossen!



# Prioritätsvererbung: Blockierungszeit

Feste obere Schranken, die kaskadenartig zur Wirkung kommen können

- **Schlimmster Fall:** Auftrag  $J_i$  benötigt  $n \geq 1$  BM und steht mit  $k \geq 1$  niederpriorien Jobs im Konflikt
  - $J_i$  kann  $\min(n, k)$ -mal blockiert werden
  - Für die Dauer der WCET des äußersten kritischen Abschnitts
- Blockierungszeit ist maximal  $b_i^{rc} = \min(n, k) \cdot \max_l(cs_l)$
- $cs_l$  sind kritische Abschnitte von Aufträgen niedrigerer Priorität
- **Pessimistisch:** Kritische Abschnitte üblicherweise unterschiedlich lang



Der GAU ( $J_0$  höchste Priorität, vgl. [7, S. 289])

- 1  $J_k$  startet zuerst, belegt  $R_n$ ;  $J_{k-1}$  verdrängt  $J_k$ , belegt  $R_{n-1}; \dots$
- 2  $\dots J_1$  verdrängt  $J_2$ , belegt  $R_1$



**Weiteres Problem:** Verklemmungen nicht ausgeschlossen!



# Prioritätsvererbung: Blockierungszeit

Feste obere Schranken, die kaskadenartig zur Wirkung kommen können

- **Schlimmster Fall:** Auftrag  $J_i$  benötigt  $n \geq 1$  BM und steht mit  $k \geq 1$  niederpriorien Jobs im Konflikt
  - $J_i$  kann  $\min(n, k)$ -mal blockiert werden
  - Für die Dauer der WCET des äußersten kritischen Abschnitts
- Blockierungszeit ist maximal  $b_i^{rc} = \min(n, k) \cdot \max_l(cs_l)$
- $cs_l$  sind kritische Abschnitte von Aufträgen niedrigerer Priorität
- **Pessimistisch:** Kritische Abschnitte üblicherweise unterschiedlich lang



Der GAU ( $J_0$  höchste Priorität, vgl. [7, S. 289])

- 1  $J_k$  startet zuerst, belegt  $R_n$ ;  $J_{k-1}$  verdrängt  $J_k$ , belegt  $R_{n-1}; \dots$
- 2  $\dots J_1$  verdrängt  $J_2$ , belegt  $R_1$
- 3  $J_0$  verdrängt  $J_1$ , fordert  $R_i$  an in der Reihenfolge  $i = 1, 2, 3, \dots, n$



**Weiteres Problem:** Verklemmungen nicht ausgeschlossen!







**Prioritätsobergrenze** (engl. *priority ceiling*)  $\hat{\Pi}$  eines Betriebsmittels  $R_i$  ist die höchste Priorität aller beteiligten Arbeitsaufträge

- Die jeweiligen Werte  $\hat{\Pi}$  sind für alle Betriebsmittel **im Voraus bekannt**






**Prioritätsobergrenze** (engl. *priority ceiling*)  $\hat{\Pi}$  eines Betriebsmittels  $R_i$  ist die höchste Priorität aller beteiligten Arbeitsaufträge

- Die jeweiligen Werte  $\hat{\Pi}$  sind für alle Betriebsmittel **im Voraus bekannt**

■ **Aktuelle Prioritätsobergrenze** des Systems  $\hat{\Pi}(t)$

- Entspricht der höchsten Obergrenze aller belegten Betriebsmittel

 In Abhängigkeit vom betrachteten Zeitpunkt  $t$





**Prioritätsobergrenze** (engl. *priority ceiling*)  $\hat{\Pi}$  eines Betriebsmittels  $R_i$  ist die höchste Priorität aller beteiligten Arbeitsaufträge

- Die jeweiligen Werte  $\hat{\Pi}$  sind für alle Betriebsmittel **im Voraus bekannt**

## ■ Aktuelle Prioritätsobergrenze des Systems $\hat{\Pi}(t)$

- Entspricht der höchsten Obergrenze aller belegten Betriebsmittel



In Abhängigkeit vom betrachteten Zeitpunkt  $t$

- Ist kein Betriebsmittel belegt, existiert die aktuelle Prioritätsobergrenze (theoretisch) nicht
  - $\hat{\Pi}(t)$  ist dann niedriger als die niedrigste Priorität aller Aufträge





**Prioritätsobergrenze** (engl. *priority ceiling*)  $\hat{\Pi}$  eines Betriebsmittels  $R_i$  ist die höchste Priorität aller beteiligten Arbeitsaufträge

- Die jeweiligen Werte  $\hat{\Pi}$  sind für alle Betriebsmittel **im Voraus bekannt**

## ■ Aktuelle Prioritätsobergrenze des Systems $\hat{\Pi}(t)$

- Entspricht der höchsten Obergrenze aller belegten Betriebsmittel



In Abhängigkeit vom betrachteten Zeitpunkt  $t$

- Ist kein Betriebsmittel belegt, existiert die aktuelle Prioritätsobergrenze (theoretisch) nicht
  - $\hat{\Pi}(t)$  ist dann niedriger als die niedrigste Priorität aller Aufträge



Prioritätsobergrenzen sind eine **Variante von Prioritätsvererbung**

- Im Konfliktfall erben Arbeitsaufträge die Priorität des anfordernden Auftrags





**Betriebsmittelvergabe** von  $R$  zum Zeitpunkt  $t$  an  $J$  hängt vom Zustand von  $R$  und der aktuellen Priorität  $P(t)$  von  $J$  ab:





**Betriebsmittelvergabe** von  $R$  zum Zeitpunkt  $t$  an  $J$  hängt vom Zustand von  $R$  und der aktuellen Priorität  $P(t)$  von  $J$  ab:

**belegt**  $\mapsto R$  ist gesperrt,  $J$  blockiert





**Betriebsmittelvergabe** von  $R$  zum Zeitpunkt  $t$  an  $J$  hängt vom Zustand von  $R$  und der aktuellen Priorität  $P(t)$  von  $J$  ab:

**belegt**  $\mapsto R$  ist gesperrt,  $J$  blockiert

**frei**  $\mapsto R$  wird  $J$  zugeteilt und gesperrt, falls...





**Betriebsmittelvergabe** von  $R$  zum Zeitpunkt  $t$  an  $J$  hängt vom Zustand von  $R$  und der aktuellen Priorität  $P(t)$  von  $J$  ab:

**belegt**  $\mapsto R$  ist gesperrt,  $J$  blockiert

**frei**  $\mapsto R$  wird  $J$  zugeteilt und gesperrt, falls...

**1**  $P(t) > \hat{\Pi}(t)$







**Betriebsmittelvergabe** von  $R$  zum Zeitpunkt  $t$  an  $J$  hängt vom Zustand von  $R$  und der aktuellen Priorität  $P(t)$  von  $J$  ab:

**belegt**  $\mapsto R$  ist gesperrt,  $J$  blockiert

**frei**  $\mapsto R$  wird  $J$  zugeteilt und gesperrt, falls...

1  $P(t) > \hat{\Pi}(t)$

2  $P(t) \leq \hat{\Pi}(t)$ , aber  $J$  hält zum Zeitpunkt  $t$  mindestens ein Betriebsmittel mit Prioritätsobergrenze  $\hat{\Pi}(t)$





**Betriebsmittelvergabe** von  $R$  zum Zeitpunkt  $t$  an  $J$  hängt vom Zustand von  $R$  und der aktuellen Priorität  $P(t)$  von  $J$  ab:

**belegt**  $\mapsto R$  ist gesperrt,  $J$  blockiert

**frei**  $\mapsto R$  wird  $J$  zugeteilt und gesperrt, falls...

1  $P(t) > \hat{\Pi}(t)$

2  $P(t) \leq \hat{\Pi}(t)$ , aber  $J$  hält zum Zeitpunkt  $t$  mindestens ein Betriebsmittel mit Prioritätsobergrenze  $\hat{\Pi}(t)$

$\rightsquigarrow$  Anderenfalls bleibt  $R$  frei und  $J$  blockiert (siehe Folie 35)



➡ **Betriebsmittelvergabe** von  $R$  zum Zeitpunkt  $t$  an  $J$  hängt vom Zustand von  $R$  und der aktuellen Priorität  $P(t)$  von  $J$  ab:

**belegt**  $\mapsto R$  ist gesperrt,  $J$  blockiert

**frei**  $\mapsto R$  wird  $J$  zugeteilt und gesperrt, falls. . .

1  $P(t) > \hat{\Pi}(t)$

2  $P(t) \leq \hat{\Pi}(t)$ , aber  $J$  hält zum Zeitpunkt  $t$  mindestens ein Betriebsmittel mit Prioritätsobergrenze  $\hat{\Pi}(t)$

$\rightsquigarrow$  Anderenfalls bleibt  $R$  frei und  $J$  blockiert (siehe Folie 35)

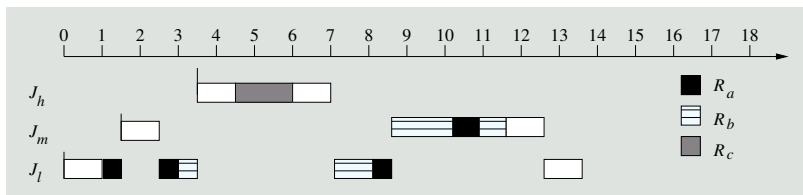
➡ **Prioritätsvererbung** findet auch hier bei Suspendierung statt

- $J_l$  erbt die aktuelle Priorität  $P_h(t)$  von  $J_h$
- $J_l$  behält diese Priorität, bis er alle Betriebsmittel freigibt, deren Prioritätsobergrenze größer oder gleich  $P_h(t)$  ist
  - Er nimmt dann wieder die Priorität bei der Betriebsmittelzuteilung an



# Beispiel: Prioritätsobergrenzen

Beispiel:  $J_l = (0, 3.5, 18)$ ,  $J_m = (1.4, 5, 17)$ ,  $J_h = (3.5, 5, 14)$ ;  $J_l, J_m$  teilen sich  $R_A, R_B$



- $J_l$  startet bei  $t_0$  und belegt  $R_a$  an  $t_1$
- $J_m$  verdrängt  $J_l$  an  $t_{1.5}$
- An  $t_{2.5}$  will  $J_m$   $R_b$  belegen  $\leadsto$  Verweigerung, obwohl  $R_b$  frei:  $\hat{\Pi}(t) = P_m$ , aber  $J_l$  belegt bereits  $R_a$  und hat  $\hat{\Pi}(t) = P_m$  verursacht (siehe Folie 33, Regel 2)
- $J_l$  belegt  $R_b$  an  $t_3$
- ...





Betriebsmittelvergabe durch Prioritätsobergrenzen ist weniger **gefräßig** (engl. *greedy*) als Prioritätsvererbung<sup>1</sup>

- Anforderung von  $J$  kann zurückgewiesen werden, obwohl das angeforderte Betriebsmittel  $R$  frei ist

<sup>1</sup>Erinnerung: Verklemmungen werden durch Prioritätsvererbung nicht verhindert.





Betriebsmittelvergabe durch Prioritätsobergrenzen ist weniger **gefräßig** (engl. *greedy*) als Prioritätsvererbung<sup>1</sup>

- Anforderung von  $J$  kann zurückgewiesen werden, obwohl das angeforderte Betriebsmittel  $R$  frei ist
- Falls die durch die Menge von Prioritätsobergrenzen definierte (ansteigende) **lineare Ordnung** verletzt werden sollte
  - $P(t) \leq \hat{\Pi}(t)$  trifft zu und  $J$  hält kein Betriebsmittel mit  $\hat{\Pi}(t)$
  - Die direkte/indirekte Priorität von  $J$  durchbricht die Ordnung
- Alle Betriebsmittel des Systems sind linear geordnet aufgestellt

<sup>1</sup>Erinnerung: Verklemmungen werden durch Prioritätsvererbung nicht verhindert.





Betriebsmittelvergabe durch Prioritätsobergrenzen ist weniger **gefräßig** (engl. *greedy*) als Prioritätsvererbung<sup>1</sup>

- Anforderung von  $J$  kann zurückgewiesen werden, obwohl das angeforderte Betriebsmittel  $R$  frei ist
- Falls die durch die Menge von Prioritätsobergrenzen definierte (ansteigende) **lineare Ordnung** verletzt werden sollte
  - $P(t) \leq \hat{\Pi}(t)$  trifft zu und  $J$  hält kein Betriebsmittel mit  $\hat{\Pi}(t)$
  - Die direkte/indirekte Priorität von  $J$  durchbricht die Ordnung
- Alle Betriebsmittel des Systems sind linear geordnet aufgestellt

■ Blockierung durch Prioritätsobergrenzen wird auch als **Aufhebungssperre** (engl. *avoidance blocking*) bezeichnet

- Durch die Verklemmungsvorbeugung implizit anfallende Kosten
- Blockierung von hochpriorien Aufgaben  $J_h$  durch Regel 2, Folie 33

<sup>1</sup>Erinnerung: Verklemmungen werden durch Prioritätsvererbung nicht verhindert.





# Vereinfachung durch Stapelorientierung

Stapelbezogene Einplanung (engl. *stack-based scheduling*)

- Ausgangspunkt ist die stapelorientierte Einplanung von Prozessen [1, 2]







# Vereinfachung durch Stapelorientierung

Stapelbezogene Einplanung (engl. *stack-based scheduling*)

- Ausgangspunkt ist die **stapelorientierte Einplanung von Prozessen** [1, 2]
  - Nicht immer ist es möglich, jeden Auftrag durch einen eigenen Faden zu repräsentieren bzw. mit einem eigenen Stapel zu versehen
    - Zu hohe Anzahl an Aufträgen und/oder zu wenig Speicherplatz





# Vereinfachung durch Stapelorientierung

Stapelbezogene Einplanung (engl. *stack-based scheduling*)

- Ausgangspunkt ist die **stapelorientierte Einplanung von Prozessen** [1, 2]
  - Nicht immer ist es möglich, jeden Auftrag durch einen eigenen Faden zu repräsentieren bzw. mit einem eigenen Stapel zu versehen
    - Zu hohe Anzahl an Aufträgen und/oder zu wenig Speicherplatz
  - Gemeinsame Nutzung desselben Stapels setzt voraus, dass kein Auftrag bei Anforderung eines gemeinsamen Betriebsmittels blockiert
    - Ansonsten droht die Überschreibung der Stapelbereiche anderer Aufträge





# Vereinfachung durch Stapelorientierung

Stapelbezogene Einplanung (engl. *stack-based scheduling*)

- Ausgangspunkt ist die **stapelorientierte Einplanung von Prozessen** [1, 2]
  - Nicht immer ist es möglich, jeden Auftrag durch einen eigenen Faden zu repräsentieren bzw. mit einem eigenen Stapel zu versehen
    - Zu hohe Anzahl an Aufträgen und/oder zu wenig Speicherplatz
  - Gemeinsame Nutzung desselben Stapels setzt voraus, dass kein Auftrag bei Anforderung eines gemeinsamen Betriebsmittels blockiert
    - Ansonsten droht die Überschreibung der Stapelbereiche anderer Aufträge
  - **Arbeitsaufträge dürfen ihre Ausführung niemals selbst aussetzen**, sie dürfen jedoch von höher priorisierten Aufträgen verdrängt werden
    - ↪ *run-to-completion-Semantik* im kritischen Abschnitt
      - Oben auf dem Stapel läuft immer der Auftrag mit der höchsten Priorität
      - Logische Konsequenz bei ausgeschlossener Selbstaussetzung





# Vereinfachung durch Stapelorientierung

Stapelbezogene Einplanung (engl. *stack-based scheduling*)

- Ausgangspunkt ist die **stapelorientierte Einplanung von Prozessen** [1, 2]
  - Nicht immer ist es möglich, jeden Auftrag durch einen eigenen Faden zu repräsentieren bzw. mit einem eigenen Stapel zu versehen
    - Zu hohe Anzahl an Aufträgen und/oder zu wenig Speicherplatz
  - Gemeinsame Nutzung desselben Stapels setzt voraus, dass kein Auftrag bei Anforderung eines gemeinsamen Betriebsmittels blockiert
    - Ansonsten droht die Überschreibung der Stapelbereiche anderer Aufträge
  - **Arbeitsaufträge dürfen ihre Ausführung niemals selbst aussetzen**, sie dürfen jedoch von höher priorisierten Aufträgen verdrängt werden
    - ↪ *run-to-completion-Semantik* im kritischen Abschnitt
      - Oben auf dem Stapel läuft immer der Auftrag mit der höchsten Priorität
      - Logische Konsequenz bei ausgeschlossener Selbstaussetzung



Vereinfachte **stapelbezogene Prioritätsobergrenzen** (engl. *stack-based priority ceiling*)



- Aktualisierung der **Priorität  $P(t)$**  (siehe Folie 32)
  - Erfolgt mit **jeder Vergabe/Freigabe** von Betriebsmitteln
  - Entspricht einer vorauseilenden Vererbung



- Aktualisierung der **Priorität  $P(t)$**  (siehe Folie 32)
  - Erfolgt mit **jeder Vergabe/Freigabe** von Betriebsmitteln
  - Entspricht einer vorauseilenden Vererbung
- **Einplanung und Einlastung** von Arbeitsaufträgen
  - Nach Auslösung muss ein Auftrag ggf. solange warten, bis die ihm zugewiesene Priorität die Grenzpriorität übersteigt
  - Aufträge werden jeweils entsprechend ihrer zugewiesenen Priorität und verdrängend ausgeführt



- Aktualisierung der **Priorität  $P(t)$**  (siehe Folie 32)
  - Erfolgt mit **jeder Vergabe/Freigabe** von Betriebsmitteln
  - Entspricht einer vorseilenden Vererbung
- **Einplanung und Einlastung** von Arbeitsaufträgen
  - Nach Auslösung muss ein Auftrag ggf. solange warten, bis die ihm zugewiesene Priorität die Grenzpriorität übersteigt
  - Aufträge werden jeweils entsprechend ihrer zugewiesenen Priorität und verdrängend ausgeführt
- **Zuteilung** eines Betriebsmittels
  - **Erfolgt sofort** mit der Anforderung des Betriebsmittels



- Aktualisierung der **Priorität  $P(t)$**  (siehe Folie 32)
  - Erfolgt mit **jeder Vergabe/Freigabe** von Betriebsmitteln→ Entspricht einer vorauseilenden Vererbung
- **Einplanung und Einlastung** von Arbeitsaufträgen
  - Nach Auslösung muss ein Auftrag ggf. solange warten, bis die ihm zugewiesene Priorität die Grenzpriorität übersteigt
  - Aufträge werden jeweils entsprechend ihrer zugewiesenen Priorität und verdrängend ausgeführt
- **Zuteilung** eines Betriebsmittels
  - **Erfolgt sofort** mit der Anforderung des Betriebsmittels



Aufträge blockieren niemals nach Ausführungsbeginn

- Ohne Betriebsmittelzuteilung werden Aufträge nicht eingelastet
- Im Gegensatz zu „normalen“ Prioritätsbergrenzen (siehe Folie 33)





- ☞ Verklemmungen sind durch eine Methode (über hinreichende Bedingung) zur Verklemmungsvorbeugung<sup>2</sup> ausgeschlossen

<sup>2</sup>zirkuläres Warten wird vorgebeugt (siehe auch Folie 35).



- ☞ Verklemmungen sind durch eine **Methode (über hinreichende Bedingung) zur Verklemmungsvorbeugung<sup>2</sup>** ausgeschlossen
- (a) Mit Ausführungsbeginn einer Aufgabe sind alle im weiteren Verlauf benötigten Betriebsmittel frei
  - Sonst wäre die Grenzpriorität größer oder gleich ihrer Priorität
  - In diesem Fall wäre jedoch die Einlastung verzögert worden

<sup>2</sup>zirkuläres Warten wird vorgebeugt (siehe auch Folie 35).



- ☞ Verklemmungen sind durch eine **Methode (über hinreichende Bedingung) zur Verklemmungsvorbeugung<sup>2</sup>** ausgeschlossen
- (a) Mit Ausführungsbeginn einer Aufgabe sind alle im weiteren Verlauf benötigten Betriebsmittel frei
  - Sonst wäre die Grenzpriorität größer oder gleich ihrer Priorität
  - In diesem Fall wäre jedoch die Einlastung verzögert worden
- (b) Bei Verdrängung eines Auftrags sind alle von ihm benötigten Betriebsmittel (noch oder bereits wieder) frei
  - Sonst hätte die Grenzpriorität eine Verdrängung unterbunden
  - Der verdrängende Job wird also immer komplett durchlaufen können

<sup>2</sup>zirkuläres Warten wird vorgebeugt (siehe auch Folie 35).



- ☞ Verklemmungen sind durch eine **Methode (über hinreichende Bedingung) zur Verklemmungsvorbeugung<sup>2</sup>** ausgeschlossen
- (a) Mit Ausführungsbeginn einer Aufgabe sind alle im weiteren Verlauf benötigten Betriebsmittel frei
  - Sonst wäre die Grenzpriorität größer oder gleich ihrer Priorität
  - In diesem Fall wäre jedoch die Einlastung verzögert worden
- (b) Bei Verdrängung eines Auftrags sind alle von ihm benötigten Betriebsmittel (noch oder bereits wieder) frei
  - Sonst hätte die Grenzpriorität eine Verdrängung unterbunden
  - Der verdrängende Job wird also immer komplett durchlaufen können
- (c) Auf ein benötigtes Betriebsmittel kann direkt zugegriffen werden

<sup>2</sup>zirkuläres Warten wird vorgebeugt (siehe auch Folie 35).



 PCP mit festen Prioritäten vergleichsweise einfach



 PCP mit festen Prioritäten vergleichsweise einfach

 Dynamische Priorität  $\mapsto$  Prioritäten der Aufgaben ändern sich  
 $\rightarrow$  Grenzprioritäten der Betriebsmittel ändern sich mit der Zeit




 PCP mit festen Prioritäten vergleichsweise einfach

 Dynamische Priorität  $\mapsto$  Prioritäten der Aufgaben ändern sich  
 $\rightarrow$  Grenzprioritäten der Betriebsmittel ändern sich mit der Zeit

■ Aktualisierung der Obergrenzen bei **jeder** Auslösung



 PCP mit festen Prioritäten vergleichsweise einfach

 Dynamische Priorität  $\leftrightarrow$  Prioritäten der Aufgaben ändern sich  
 $\rightarrow$  Grenzprioritäten der Betriebsmittel ändern sich mit der Zeit

■ Aktualisierung der Obergrenzen bei **jeder** Auslösung

- 1 Dem ausgelösten Auftrag eine Priorität zuweisen
  - Relativ zu den anderen bereits eingeplanten/laufbereiten Jobs
  - Prioritätsorientierte Einplanung je nach Verfahren





 PCP mit festen Prioritäten vergleichsweise einfach

 Dynamische Priorität  $\leftrightarrow$  Prioritäten der Aufgaben ändern sich  
 $\rightarrow$  Grenzprioritäten der Betriebsmittel ändern sich mit der Zeit

■ Aktualisierung der Obergrenzen bei **jeder** Auslösung

- 1 Dem ausgelösten Auftrag eine Priorität zuweisen
  - Relativ zu den anderen bereits eingeplanten/laufbereiten Jobs
  - Prioritätsorientierte Einplanung je nach Verfahren
- 2 Grenzprioritäten aller Betriebsmittel aktualisieren
  - Auf Basis des neuen Prioritätsgefüges



 PCP mit festen Prioritäten vergleichsweise einfach

 Dynamische Priorität  $\mapsto$  Prioritäten der Aufgaben ändern sich  
 $\rightarrow$  Grenzprioritäten der Betriebsmittel ändern sich mit der Zeit

■ Aktualisierung der Obergrenzen bei **jeder** Auslösung

- 1 Dem ausgelösten Auftrag eine Priorität zuweisen
  - Relativ zu den anderen bereits eingeplanten/laufbereiten Jobs
  - Prioritätsorientierte Einplanung je nach Verfahren
- 2 Grenzprioritäten aller Betriebsmittel aktualisieren
  - Auf Basis des neuen Prioritätsgefüges
- 3 Grenzpriorität des Systems aktualisieren
  - Auf Basis der neuen Grenzprioritäten der Betriebsmittel



 PCP mit festen Prioritäten vergleichsweise einfach

 Dynamische Priorität  $\mapsto$  Prioritäten der Aufgaben ändern sich  
 $\rightarrow$  Grenzprioritäten der Betriebsmittel ändern sich mit der Zeit

■ Aktualisierung der Obergrenzen bei **jeder** Auslösung

**1** Dem ausgelösten Auftrag eine Priorität zuweisen

- Relativ zu den anderen bereits eingepflanzten/laufbereiten Jobs
- Prioritätsorientierte Einplanung je nach Verfahren

**2** Grenzprioritäten aller Betriebsmittel aktualisieren

- Auf Basis des neuen Prioritätsgefüges

**3** Grenzpriorität des Systems aktualisieren

- Auf Basis der neuen Grenzprioritäten der Betriebsmittel

■ Für, auf Jobebene, statische oder dynamische Prioritäten





Zugriffskontrolle durch Prioritätsobergrenzen impliziert nunmehr **drei Arten** der Blockierung:

- 1 Direkte Blockierung,
- 2 Blockierung durch Vererbung,
- 3 Blockierung durch Aufhebungssperre





Zugriffskontrolle durch Prioritätsobergrenzen impliziert nunmehr **drei Arten** der Blockierung:

- 1 Direkte Blockierung,
- 2 Blockierung durch Vererbung,
- 3 Blockierung durch Aufhebungssperre

} Prioritätsvererbung



- ☞ Zugriffskontrolle durch Prioritätsobergrenzen impliziert nunmehr **drei Arten** der Blockierung:

- 1 Direkte Blockierung,
- 2 Blockierung durch Vererbung,
- 3 Blockierung durch Aufhebungssperre

} Prioritätsvererbung

- Effekt von 3. ist, dass jeder Arbeitsauftrag höchstens einmal blockiert und dass eine Blockierung nicht transitiv ist [10]



- ☞ Zugriffskontrolle durch Prioritätsobergrenzen impliziert nunmehr **drei Arten** der Blockierung:

- 1 Direkte Blockierung,
- 2 Blockierung durch Vererbung,
- 3 Blockierung durch Aufhebungssperre

} Prioritätsvererbung

- Effekt von 3. ist, dass jeder Arbeitsauftrag höchstens einmal blockiert und dass eine Blockierung nicht transitiv ist [10]
  - Die Blockierungszeit ist begrenzt durch die größte WCET aller kritischen Abschnitte aller niedriger priorisierten Aufträge





Zugriffskontrolle durch Prioritätsobergrenzen impliziert nunmehr **drei Arten** der Blockierung:

- 1 Direkte Blockierung,
- 2 Blockierung durch Vererbung,
- 3 Blockierung durch Aufhebungssperre

} Prioritätsvererbung

- Effekt von 3. ist, dass jeder Arbeitsauftrag höchstens einmal blockiert und dass eine Blockierung nicht transitiv ist [10]
  - Die Blockierungszeit ist begrenzt durch die größte WCET aller kritischen Abschnitte aller niedriger priorisierten Aufträge
  - Unabhängig von der Anzahl der im Konflikt stehenden Aufträge
    - (a) Wenn ein Auftrag blockiert, dann nur durch höchstens einen Auftrag
    - (b) Ein Auftrag, der einen anderen blockiert, wird selbst nicht blockiert







Zugriffskontrolle durch Prioritätsobergrenzen impliziert nunmehr **drei Arten** der Blockierung:

- 1 Direkte Blockierung,
- 2 Blockierung durch Vererbung,
- 3 Blockierung durch Aufhebungssperre

} Prioritätsvererbung

- Effekt von 3. ist, dass jeder Arbeitsauftrag höchstens einmal blockiert und dass eine Blockierung nicht transitiv ist [10]
  - Die Blockierungszeit ist begrenzt durch die größte WCET aller kritischen Abschnitte aller niedriger priorisierten Aufträge
  - Unabhängig von der Anzahl der im Konflikt stehenden Aufträge
    - (a) Wenn ein Auftrag blockiert, dann nur durch höchstens einen Auftrag
    - (b) Ein Auftrag, der einen anderen blockiert, wird selbst nicht blockiert
  - Blockierungszeit  $b_i^{rc} = \max_k(cs_k)$  analog zu NPCS (s. Folie 24)
    - Nur niederpriorie Aufträge  $J_{i+1}, \dots, J_n$  blockieren  $J_i: i + 1 \leq k \leq n$
    - $J_i$  blockiert aber keine unbeteiligten Aufträge höherer Priorität




- 1 Überblick
- 2 Konkurrenz und Koordination
  - Kausalordnung und Koordinierung
  - Konkurrenz und Konflikte
- 3 Effekte in Echtzeitsystemen
- 4 Echtzeitfähige Synchronisationsprotokolle
  - Verdrängungssteuerung
  - Prioritätsvererbung
  - Prioritätsobergrenzen
- 5 Ablaufplanung**
- 6 Zusammenfassung



# Restriktionen des periodischen Modells

Weitere Lockerung von A7 zugunsten mehrseitiger Synchronisation

 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<sup>3</sup>~~

**A6** Die Kosten durch Unterbrechungen, Ablaufplanung und Verdrängung sind vernachlässigbar

**A7** ~~Alle Aufgaben verhalten sich voll-präemptiv~~

---

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



- Blockierungszeit  $b_i^{rc}$  durch Zugriffskontrolle hängt vom Synchronisationsprotokoll ab:

NPCS (s. Folie 24)  $b_i^{rc} = \max_{i+1 \leq k \leq n}(cs_k)$

Priority Inheritance (s. Folie 31)  $b_i^{rc} = \min(n, k) \cdot \max_{i+1 \leq l \leq n}(cs_l)$

Priority Ceiling (s. Folie 40)  $b_i^{rc} = \max_{i+1 \leq k \leq n}(cs_k)$

# Fadensynchronisation $\rightsquigarrow$ Blockierungszeit

Die Blockierungszeit verzögert die Fertigstellung von Arbeitsaufträgen

- Blockierungszeit  $b_i^{rc}$  durch Zugriffskontrolle hängt vom Synchronisationsprotokoll ab:

NPCS (s. Folie 24)  $b_i^{rc} = \max_{i+1 \leq k \leq n}(cs_k)$

Priority Inheritance (s. Folie 31)  $b_i^{rc} = \min(n, k) \cdot \max_{i+1 \leq l \leq n}(cs_l)$

Priority Ceiling (s. Folie 40)  $b_i^{rc} = \max_{i+1 \leq k \leq n}(cs_k)$



Die tatsächliche Blockierungszeit  $b_i$  schließt Blockierung  $b_i^{np}$  durch nicht-präemptive Bereiche ein:

- Bedingt durch die technische Umsetzung der Zugriffskontrolle
- CPU ist (verdeckte) Ressource

NPCS  $b_i = \max(b_i^{rc}, b_i^{np})$

Priority Inheritance  $b_i = \min(n, k) \cdot (b_i^{rc} + b_i^{np})$

Priority Ceiling  $b_i = b_i^{rc} + b_i^{np}$



# Restriktionen des periodischen Modells

Aufhebung von A4 zugunsten blockierender Synchronisation



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<sup>4</sup>

**A6** Die Kosten durch Unterbrechungen, Ablaufplanung und Verdrängung sind vernachlässigbar

A7 Alle Aufgaben verhalten sich voll-präemptiv

---

<sup>4</sup>D.h. die einzige gemeinsame Ressource ist die CPU und es existieren keine Einschränkungen hinsichtlich der Auslösezeiten der Arbeitsaufträge voneinander.





Aufgaben, die sich für eine bestimmte Zeit selbst suspendieren verhalten sich **nicht mehr wie periodische Aufgaben** [7, S. 164]

- Beanspruchen in bestimmten Zeitintervallen mehr Rechenzeit
- Weitere Verzögerung anderer Arbeitsaufträge
- Zusätzliche Blockierungszeit  $b_i^{ss}$  lässt sich nach oben abschätzen:

$$b_i^{ss} = s_i + \sum_{k=1}^{i-1} \min(e_k, s_k)$$

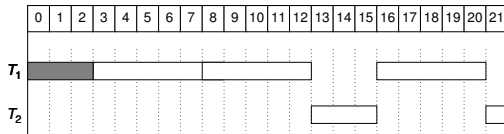
- Hierbei ist  $s_i$  die längste Selbstsuspendierung von  $T_i$
- Selbstsuspendierung höherpriorer Aufgaben  $T_k$  reduziert deren Einfluss

## ■ Zusammensetzung der maximale Gesamtdauer $b_i$

- Aufgabe  $T_i$  suspendiert sich  $K_i$ -mal
- Jedes mal kann sie erneut für  $b_i^{np}$  Zeiteinheiten blockiert werden

**Priority Ceiling**  $b_i = b_i^{ss} + (K_i + 1)b_i^{rc} + (K_i + 1)b_i^{np}$  (vgl. [7, S. 325])





- $T_1 = (p_1 = 8, e_1 = 5), T_2 = (p_2 = 14, e_2 = 4, \phi_2 = 6)$
- $T_1$  höherprior als  $T_2$  (nach RM)
- $T_1$ : Selbstsuspendierung für  $\Delta t = 3$  Zeiteinheiten nach Auslösung  
 $\rightsquigarrow T_1$  verhält sich nicht mehr wie **periodische Aufgabe**
- $T_1$ : **doppelter Verbrauch** der Laufzeit von  $t_3$  bis einschließlich  $t_{12}$
- Ähnlich zu **Doppeltreffer** beim Periodischen Zusteller
- Annahme: keine Selbstsuspendierung während Halten von BM
- **Terminüberschreitung** von  $T_2$  bei  $t_{20}$
- ☞ Selbstsuspendierung *wirkt* wie Blockierungszeit
- ☞ Unterschied: Einfluss von **höherprioreren auf niederpriorere Aufgaben**





- Die Planbarkeitsanalyse einer Aufgabe  $T_i$  unter Berücksichtigung der (gesamten) Blockierungszeit  $b_i$ :



- Die Planbarkeitsanalyse einer Aufgabe  $T_i$  unter Berücksichtigung der (gesamten) Blockierungszeit  $b_i$ :
  - Bestimmung der Antwortzeit (siehe IV-2/34):

$$\omega_i(t) = e_i + b_i + \sum_{k=1}^{i-1} \left\lceil \frac{t}{p_k} \right\rceil e_k; 0 < t \leq p_i$$



- Die Planbarkeitsanalyse einer Aufgabe  $T_i$  unter Berücksichtigung der (gesamten) Blockierungszeit  $b_i$ :
  - Bestimmung der Antwortzeit (siehe IV-2/34):

$$\omega_i(t) = e_i + b_i + \sum_{k=1}^{i-1} \left\lceil \frac{t}{p_k} \right\rceil e_k; 0 < t \leq p_i$$

- Betrachtung der CPU-Auslastung (siehe IV-2/28):

$$\sum_{k=1}^n \frac{e_k}{\min(D_k, p_k)} + \frac{b_i}{\min(D_i, p_i)} \leq 1 \quad ; i = 1, 2, \dots, n$$



- 1 Überblick
- 2 Konkurrenz und Koordination
  - Kausalordnung und Koordinierung
  - Konkurrenz und Konflikte
- 3 Effekte in Echtzeitsystemen
- 4 Echtzeitfähige Synchronisationsprotokolle
  - Verdrängungssteuerung
  - Prioritätsvererbung
  - Prioritätsobergrenzen
- 5 Ablaufplanung
- 6 Zusammenfassung**



## Konkurrenz und Koordination nebenläufiger Aktivitäten

- Nebenläufigkeit, Kausalität, Kausalordnung
- Konfliktsituationen  $\rightsquigarrow$  **synchronisieren ohne Prioritätsumkehr**



## Konkurrenz und Koordination nebenläufiger Aktivitäten

- Nebenläufigkeit, Kausalität, Kausalordnung
- Konfliktsituationen  $\rightsquigarrow$  **synchronisieren ohne Prioritätsumkehr**

## Verdrängungssteuerung $\mapsto$ verdrängungsfreie kritische Abschnitte

- benötigt kein *à priori* Wissen; Verklemmungsvorbeugung
- pragmatisch/effektiv, beeinträchtigt unabhängige Jobs

## Konkurrenz und Koordination nebenläufiger Aktivitäten

- Nebenläufigkeit, Kausalität, Kausalordnung
- Konfliktsituationen  $\leadsto$  **synchronisieren ohne Prioritätsumkehr**

## Verdrängungssteuerung $\mapsto$ verdrängungsfreie kritische Abschnitte

- benötigt kein *à priori* Wissen; Verklemmungsvorbeugung
- pragmatisch/effektiv, beeinträchtigt unabhängige Jobs

## Prioritätsvererbung $\mapsto$ Priorität zeitweise erhöhen

- benötigt kein *à priori* Wissen
- direkte Blockierung, Blockierung durch Vererbung; transitiv

## Konkurrenz und Koordination nebenläufiger Aktivitäten

- Nebenläufigkeit, Kausalität, Kausalordnung
- Konfliktsituationen  $\leadsto$  **synchronisieren ohne Prioritätsumkehr**

## Verdrängungssteuerung $\mapsto$ verdrängungsfreie kritische Abschnitte

- benötigt kein *à priori* Wissen; Verklemmungsvorbeugung
- pragmatisch/effektiv, beeinträchtigt unabhängige Jobs

## Prioritätsvererbung $\mapsto$ Priorität zeitweise erhöhen

- benötigt kein *à priori* Wissen
- direkte Blockierung, Blockierung durch Vererbung; transitiv

## Prioritätsobergrenzen $\mapsto$ Priorität zeitweise deckeln

- benötigt *à priori* Wissen; Verklemmungsvorbeugung
- Grundmodell vs. (einfachere) stapelorientierte Variante





## Konkurrenz und Koordination nebenläufiger Aktivitäten

- Nebenläufigkeit, Kausalität, Kausalordnung
- Konfliktsituationen  $\leadsto$  **synchronisieren ohne Prioritätsumkehr**

## Verdrängungssteuerung $\mapsto$ verdrängungsfreie kritische Abschnitte

- benötigt kein *à priori* Wissen; Verklemmungsvorbeugung
- pragmatisch/effektiv, beeinträchtigt unabhängige Jobs

## Prioritätsvererbung $\mapsto$ Priorität zeitweise erhöhen

- benötigt kein *à priori* Wissen
- direkte Blockierung, Blockierung durch Vererbung; transitiv

## Prioritätsobergrenzen $\mapsto$ Priorität zeitweise deckeln

- benötigt *à priori* Wissen; Verklemmungsvorbeugung
- Grundmodell vs. (einfachere) stapelorientierte Variante

## Ablaufplanung $\mapsto$ berücksichtigt Blockierungszeit

- Verzicht auf den Prozessor ermöglicht eine mehrfache Blockierung



- [1] Baker, T. P.:  
A Stack-Based Resource Allocation Policy for Real-Time Processes.  
*In: Proceedings of the 11th IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS '90).*  
Lake Buena Vista, FL, USA : IEEE, Dez. 5–7, 1990, S. 191–200
- [2] Baker, T. P.:  
Stack-Based Scheduling of Realtime Processes.  
*In: Real-Time Systems 3 (1991), Nr. 1, S. 67–99*
- [3] Hansen, P. B.:  
*Operating System Principles.*  
Prentice Hall International, 1973
- [4] Hoare, C. A. R.:  
Monitors: An Operating System Structuring Concept.  
*In: Communications of the ACM 17 (1974), Okt., Nr. 10, S. 549–557*
- [5] Jones, M. B.:  
*What really happened on Mars?*  
[http://research.microsoft.com/en-us/um/people/mbj/mars\\_pathfinder/](http://research.microsoft.com/en-us/um/people/mbj/mars_pathfinder/), 1997
- [6] Lampson, B. W. ; Redell, D. D.:  
Experiences with Processes and Monitors in Mesa.  
*In: Communications of the ACM 23 (1980), Nr. 2, S. 105–117*

- [7] Liu, J. W. S.:  
*Real-Time Systems*.  
Englewood Cliffs, NJ, USA : Prentice Hall PTR, 2000. –  
ISBN 0–13–099651–3
- [8] Mok, A. K.-L. :  
*Fundamental Design Problems of Distributed Systems for Hard Real-Time Environments*.  
Cambridge, MA, USA, Massachusetts Institute of Technology, MIT, Diss., Mai 1983. –  
Technical Report MIT/LCS/TR-297
- [9] Schröder-Preikschat, W. :  
*Softwaresysteme 1*.  
[www4.informatik.uni-erlangen.de/Lehre/SS07/V\\_S0S1](http://www4.informatik.uni-erlangen.de/Lehre/SS07/V_S0S1), 2007. –  
Lecture Notes
- [10] Sha, L. ; Rajkumar, R. ; Lehoczky, J. P.:  
Priority Inheritance Protocols: An Approach to Real-Time Synchronization.  
In: *IEEE Transactions on Computers* 39 (1990), Sept., Nr. 9, S. 1175–1185
- [11] Wilner, D. :  
*Vx-Files: What really happened on Mars?*  
San Francisco, CA : Keynote at the 18th IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS '97), Dez.  
1997

# 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
- $\omega_i$  Antwortzeit (engl. response time)
- $\sigma_i$  Schlupf (engl. slack)

Periodische Aufgaben

- $p_i$  Periode (engl. period)
- $\phi_i$  Phase (engl. phase)

Nicht-Periodische Aufgaben

- $i_j$  Minimale Zwischenankunftszeit (engl. minimal interarrival-time)

## Aufgaben – Tupel

- $T_p = (p, e, D, \phi)$  Periodische Aufgabe ohne Priorität (zeitgesteuert oder dynamische Taskpriorität),  $D = p$  und  $\phi = 0$  sind der Reihe nach optional

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

- $T_i^S = ([r_i^{nach}, r_i^{vor}], e_i, D_i)$  Nicht-periodische Aufgabe (Schreibweise mit Auslöseintervall)

- $J_{i,j} = (r_{i,j}, e_{i,j}, d_{i,j})$  Arbeitsauftrag

## Ablaufplanung

- $P_i$  Priorität (engl. priority) der Aufgabe  $T_i$
- $\Omega_i$  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)
- $\Delta_i$  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)
- $r_t$  Wiederauffüllzeitpunkt (engl. replenishment time)

## Synchronisation

- $cs_i$  Kritischer Abschnitt (engl. critical section)
- $R_i$  Betriebsmittel (engl. resource)
- $s_i$  Selbstaussatzung (engl. self suspension)

Blockierungszeit

- $b_i$  Blockierungszeit (engl. blocking time)
- $b_i^c$  — durch Wettbewerb (engl. resource contention)
- $b_i^{np}$  — durch Unverdrängbarkeit (engl. nonpreemptable)
- $b_i^{ss}$  — durch  $s_i$

Prioritätsobergrenzen

- $\hat{n}_i$  Prioritätsobergrenze von  $R_i$  (engl. ceiling priority)
- $\hat{n}_i(t)$  Aktuelle (System-) Prioritätsobergrenze

