

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



Organisatorisches



Evaluation der Veranstaltung

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



Gliederung

- 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



Fragestellungen

- **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 **Verklebungen** vermeiden



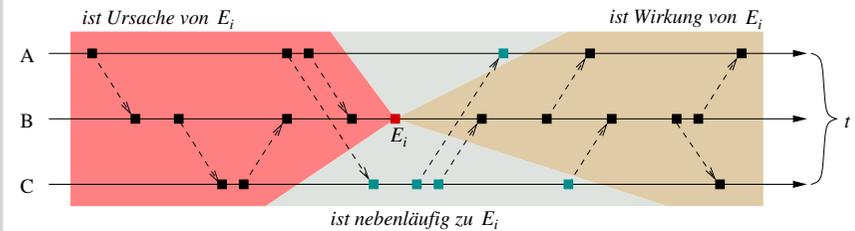
Gliederung

- 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



Wiederholung: Nebenläufigkeit

Wiederholung von VI/8 ff



- **Relationen:** Ursache ↔ Wirkung ↔ Nebenläufigkeit
- ⚠ Ein Ereignis E_i ist **nebenläufig zu** einem anderen:
 - Es liegt im **Anderswo** anderer Ereignisse
- 🔍 **Kausalordnung von Ereignissen**
 - **Rangfolge** → zeitlich geordnete Ereignisse (vgl. Kapitel IV)
 - **Zugriffskontrolle** → nebenläufige Ereignisse



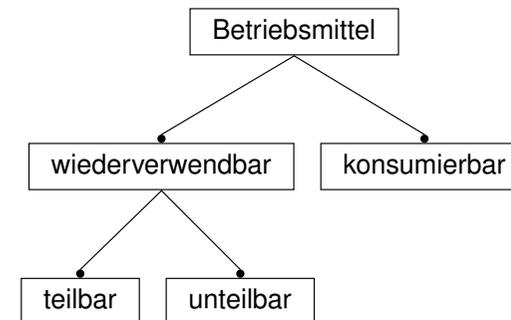
⚠ Koordinierung

Reihenschaltung nebenläufiger Aktivitäten

- **Synchronisation** (gr. *syn*: 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
- ⚠ **Umsetzung der Zugriffskontrolle** (vgl. VI/13 ff)
 - **Implizit** in taktgesteuerten Systemen → geeigneter Ablaufplan
 - **Explizit** in ereignisgesteuerten Systemen → Synchronisationsprotokolle
 - Analytische versus konstruktive Maßnahmen (vgl. VI/13 ff)



Betriebsmittel (engl. *resource*) und Betriebsmittelarten



- 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** → konsumierbare Betriebsmittel (→ Kapitel IV)
 - **mehrseitige Synchronisation** → wiederverwendbare Betriebsmittel
 - Begrenzung, gegenseitiger Ausschluss



Konfliktsituation

Blockierung von Arbeitsaufträgen

- ⚠ 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

Vergabe → 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 → 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 ~> Konkurrenz um die Wiedervergabe
 - (b) Betriebsmittel entsperren und einem ausgewählten Auftrag zuteilen



Gliederung

- 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



Intervalle von Unverdrängbarkeit

Blockierung, Hemmung (engl. *blocking*)

- 👉 **Kritischer Abschnitt** (engl. *critical section*), *cs*
 - Folge von Anweisungen, deren Ausführung einen gegenseitigen Ausschluss erfordern ~> **mehrseitige Synchronisation**
 - (a) Vor Überlappung schützen → binärer Semaphor
 - (b) Vor Verdrängung schützen → 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
 - ~> J_i hat eine niedrige Priorität, durchläuft unverdrängbar den Kern
 - Während des Systemaufrufs, wird Job J_h ereignisbedingt ausgelöst
 - ~> J_h hat eine hohe Priorität, wird eingeplant aber nicht eingelastet
 - J_i blockiert bzw. hemmt J_h , die Priorität von J_h wird verletzt



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



Prioritätsumkehr (engl. *priority inversion*)

Auswirkungen auf das Echtzeitverhalten

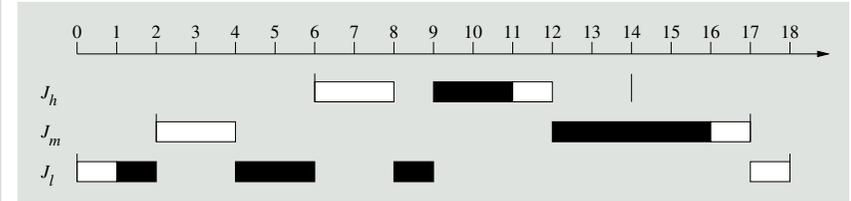
- ☞ **Prioritätsumkehr** [6] ist Folge der Blockierung eines höher durch einen niedriger priorisierten Auftrag
- 1 Der niedrig priorisierte Auftrag durchläuft einen kritischen Abschnitt und wird vom höher priorisierten Auftrag verdrängt
- 2 Der höher priorisierte Auftrag möchte denselben kritischen Abschnitt 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)	J_m (mittlere Priorität)	J_h (hohe Priorität)
t_0 startet	t_2 startet, verdrängt J_l	t_6 startet, verdrängt J_l
t_1 belegt Betriebsmittel R	t_4 fordert R an, blockiert	t_6 fordert R an, blockiert
t_4 setzt Ausführung fort	t_{12} belegt R	t_9 deblockiert, belegt R
t_6 setzt Ausführung fort	t_{16} gibt R frei	t_{11} gibt R frei $\leadsto J_m$
t_9 gibt R frei $\rightarrow J_h$	t_{17} beendet die Ausführung	t_{12} beendet die Ausführung
t_{17} setzt Ausführung fort		
t_{18} beendet die Ausführung		



What really happened on Mars?

Prioritätsumkehr beim *Mars Pathfinder* [11, 5]

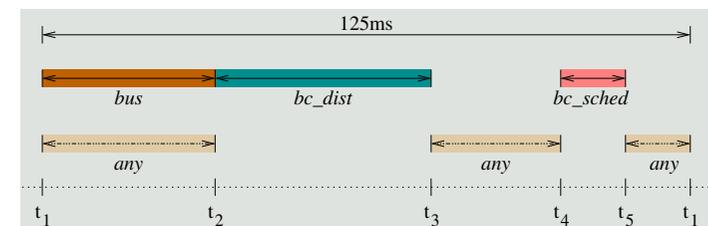
- **bc_sched** \mapsto Task mit höchster Priorität (mit Ausnahme der VxWorks Task „Exec“)
 - Kontrollierte Transaktionen des „1553“-Bus
 - Dieser koppelte Fahr- und Landeeinheit der Raumsonde
- **bc_dist** \mapsto Task mit dritthöchster Priorität
 - Steuerte die Einsammlung der Transaktionsergebnisse
 - 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



What really happened on Mars? (Forts.)

Aufbau eines Buszyklus



- 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

- 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:

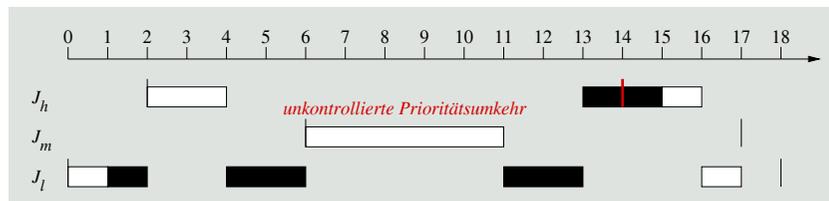
- ASI/MET belegte wiederverwendbares, unteilbares Betriebsmittel
 - Wurde von bc_dist angefordert, bevor ASI/MET es wieder frei gab
- Im weiteren Verlauf verdrängten Tasks mittlerer Priorität ASI/MET
 - Verlängerung der **Blockierungszeit** für bc_dist
 - bc_dist war noch nicht abgeschlossen als bc_sched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

- 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)	J_m (mittlere Priorität)	J_h (hohe Priorität)
t_0 startet	t_6 startet, verdrängt J_l	t_2 startet, verdrängt J_l
t_1 belegt Betriebsmittel R	t_{11} beendet die Ausführung	t_4 fordert R an, blockiert
t_4 setzt Ausführung fort		t_{13} belegt R
t_{11} setzt Ausführung fort		t_{14} verletzt seinen Termin
t_{13} gibt R frei → J_h		t_{15} gibt R frei
t_{16} setzt Ausführung fort		t_{16} beendet die Ausführung
t_{17} 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:

- 1 (Normale) **Prioritätsumkehr** (engl. *priority inversion*)
 - Gegenseitiger Ausschluss → 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) Folie 22 ff.
- Prioritätsvererbung (PI) Folie 28 ff.
- Prioritätsobergrenzen (PCP) Folie 32 ff.



Gliederung

- 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

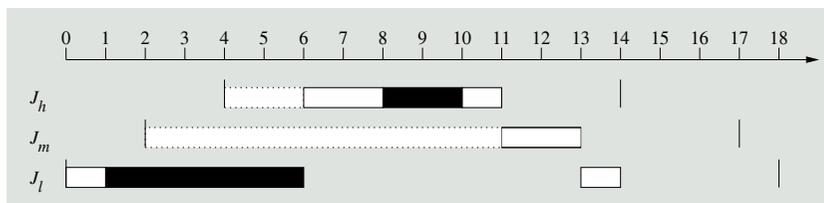
Verdrängungsfreie kritische Abschnitte (engl. *non-preemptive critical sections*)

- 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, ...
 - 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
 - **Verklebungsfreies Verfahren** durch **Verklebungsvorbeugung** (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)	J_m (mittlere Priorität)	J_h (hohe Priorität)
t_0 startet	t_6 wird ausgelöst	t_2 wird ausgelöst
t_1 belegt R unverdrängbar	t_{11} startet	t_6 startet
t_6 gibt R frei → J_h	t_{16} beendet die Ausführung	t_8 belegt R unverdrängbar
t_{16} setzt Ausführung fort		t_{10} gibt R frei
t_{17} beendet die Ausführung		t_{11} beendet die Ausführung



Verdrängungssteuerung: Blockierungszeit

Feste obere Schranke

- 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**

- Beugt **unkontrollierter** Prioritätsumkehr vor
 - Hält J_i Betriebsmittel, wird J_n lediglich eingeplant und blockiert direkt
 - Beendet J_i seinen kritischen Abschnitt, sind alle Betriebsmittel frei
 - Aufträge geringerer Priorität als J_n 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



Exkurs: Bedingungen für Verklemmung

■ **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



Pragmatischer Ansatz mit Schönheitsfehlern

Alternativen, sofern bestimmte Voraussetzungen gegeben sind

⚠ **Benachteiligt** an Betriebsmitteln **unbeteiligte Arbeitsaufträge**

- Blockierung hochpriorer Aufträge ohne Konfliktsituation
- Im Beispiel (vgl. Folie 23) wird J_m durch J_i 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

■ 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 niederpriorer 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)	J_m (mittlere Priorität)	J_h (hohe Priorität)
t_0 startet	t_2 startet	t_4 startet
t_1 belegt R	t_4 Verdrängung durch J_h	t_6 fordert R an \rightarrow Prioritätsvererbung
t_2 Verdrängung durch J_m	t_{13} läuft weiter	t_{10} belegt R
t_6 erbt die Priorität von J_h	t_{16} beendet die Ausführung	t_{12} gibt R frei
t_{10} gibt R frei $\rightarrow J_h$		t_{13} beendet die Ausführung
t_{16} läuft mit alter Priorität		
t_{17} beendet die Ausführung		



Transitive Blockierung

Nachforderung unteilbarer Betriebsmittel



Prioritätsvererbung bedingt zwei Arten von Blockierung

- Direkte Blockierung** (engl. *direct blocking*)
 - Bekannte Blockierung eines höher priorisierten Auftrags (J_h) durch einen niedriger priorisierten Auftrag (J_l), welcher das angeforderte Betriebsmittel hält
- 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

- J_l startet zuerst, belegt R_1 und wird von J_m verdrängt
- J_m belegt R_2 und wird von J_h verdrängt
- J_h fordert R_2 an und vererbt seine Priorität an J_m
- J_m läuft weiter, fordert R_1 an und vererbt „seine“ Priorität an J_l



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 $b_i^{fc} = \min(n, k) \cdot \max_i(cs_i)$
 - cs_i sind kritische Abschnitte von Aufträgen niedrigerer Priorität
 - Pessimistisch:** Kritische Abschnitte üblicherweise unterschiedlich lang
- !** Der GAU (J_0 höchste Priorität, vgl. [7, S. 289])
- J_k startet zuerst, belegt R_n ; J_{k-1} verdrängt J_k , belegt $R_{n-1}; \dots$
 - $\dots J_1$ verdrängt J_2 , belegt R_1
 - J_0 verdrängt J_1 , fordert R_i an in der Reihenfolge $i = 1, 2, 3, \dots, n$



Weiteres Problem: Verklemmungen nicht ausgeschlossen!



Prioritätsobergrenzen

Priorität durch Vorabwissen zeitweise deckeln



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



Regelwerk – Prioritätsobergrenzen

Betriebsmittelvergabe und Prioritätsvererbung

↳ **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 $\hat{\Pi}(t)$

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

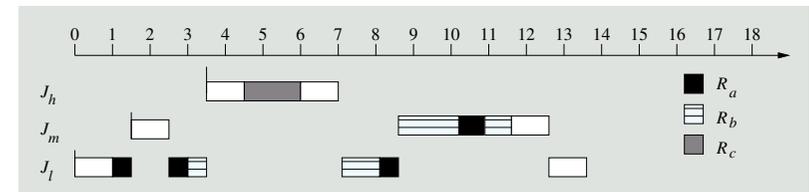
↳ **Prioritätsvererbung** findet auch hier bei Suspendierung statt

- J_i erbt die aktuelle Priorität $P_h(t)$ von J_h
- J_i 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: $J_i = (0, 3.5, 18)$, $J_m = (1.4, 5, 17)$, $J_h = (3.5, 5, 14)$; J_i, J_m teilen sich R_A, R_B



- J_i startet bei t_0 und belegt R_a an t_1
- J_m verdrängt J_i 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_i belegt bereits R_a und hat $\hat{\Pi}(t) = P_m$ verursacht (siehe Folie 33, Regel 2)
- J_i belegt R_b an t_3
- ...



Verklemmungsvorbeugung

Entkräftung der hinreichenden Bedingung [9, VIII-60]: zirkuläres Warten

↳ Betriebsmittelvergabe durch Prioritätsobergrenzen ist weniger **gefällig** (engl. *greedy*) als Prioritätsvererbung¹

- 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



¹Erinnerung: Verklemmungen werden durch Prioritätsvererbung nicht verhindert.



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
 - \leadsto *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*)



Stapelbezogene Prioritätsobergrenzen

Vereinfachtes Regelwerk

- 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“ Prioritätsobergrenzen (siehe Folie 33)



Stapelbezogene Prioritätsobergrenzen (Forts.)

Implikationen

- ☞ Verklemmungen sind durch eine **Methode (über hinreichende Bedingung) zur Verklemmungsvorbeugung²** 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



²zirkuläres Warten wird vorgebeugt (siehe auch Folie 35).

Prioritätsobergrenzen mit dynamischer Priorität

Vergleiche Folie IV-1/28

- ☞ PCP mit festen Prioritäten vergleichsweise einfach
- ⚠ **Dynamische Priorität** → Prioritäten der Aufgaben ändern sich
 - **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
- Für, auf Jobebene, statische oder dynamische Prioritäten



Blockierungszeit

☞ 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 $b_i^{pc} = \max_k (cs_k)$ analog zu NPCC (s. Folie 24)
 - Nur niederpriorige 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



Gliederung

- 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 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.



Fadensynchronisation \rightsquigarrow Blockierungszeit

Die Blockierungszeit verzögert die Fertigstellung von Arbeitsaufträgen

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

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

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

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

- ☞ 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

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

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

$$\text{Priority Ceiling} \quad b_i = b_i^{rc} + b_i^{np}$$



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 unabhängig⁴
- A6** Die Kosten durch Unterbrechungen, Ablaufplanung und Verdrängung sind vernachlässigbar
- A7 Alle Aufgaben verhalten sich voll-präemptiv

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



Selbtsuspendierung

Selbtsuspendierung ermöglicht die erneute Blockierung eines Jobs

☞ 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

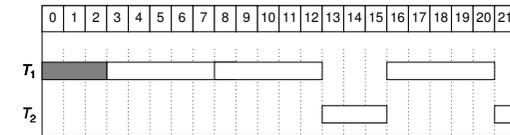
■ Zusammensetzung der maximale Gesamtdauer b_i

- Aufgabe T_i suspendiert sich K_i -mal
 - Jedes mal kann sie erneut für b_i^{np} Zeiteinheiten blockiert werden
- Priority Ceiling $b_i = b_i^{ss} + (K_i + 1)b_i^{c} + (K_i + 1)b_i^{np}$ (vgl. [7, S. 325])



Selbtsuspendierung (Forts.)

Beispiel



- $T_1 = (p_1 = 8, e_1 = 5)$, $T_2 = (p_2 = 14, e_2 = 4, \phi_2 = 6)$
- T_1 höherprior als T_2 (nach RM)
- T_1 : Selbstsuspendierung für $\Delta t = 3$ Zeiteinheiten nach Auslösung
→ 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 **höherprioren auf niederpriore Aufgaben**



Erweiterte Planbarkeitsanalyse

Antwortzeit und Auslastung

■ 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):

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



Gliederung

- 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



Zusammenfassung

Konkurrenz und Koordination nebenläufiger Aktivitäten

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

Verdrängungssteuerung \rightarrow verdrängungsfreie kritische Abschnitte

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

Prioritätsvererbung \rightarrow Priorität zeitweise erhöhen

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

Prioritätsobergrenzen \rightarrow Priorität zeitweise deckeln

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

Ablaufplanung \rightarrow berücksichtigt Blockierungszeit

- Verzicht auf den Prozessor ermöglicht eine mehrfache Blockierung



Literaturverzeichnis

- [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/, 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



Literaturverzeichnis (Forts.)

- [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_S051, 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	Nicht-Periodische Aufgaben	Zusteller
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^{MED}, T^{CD}). Funktionen beschreiben zeitlich variierende Eigenschaften (z. B. $P(t)$).	i_i Minimale Zwischenankunftszeit (engl. minimal interarrival-time)	T_{PS} Abfragender Zusteller (engl. polling server)
Eigenschaften	Aufgaben – Tupel	T_{DS} Aufschiebbarer Zusteller (engl. deferrable server)
t (Real-)Zeit	$T_p = (p, e, D, \phi)$ Periodische Aufgabe ohne Priorität (zeitgesteuert oder dynamische Taskpriorität), $D = p$ und $\phi = 0$ sind der Reihe nach optional	T_s Sporadischer Zusteller (engl. sporadic server)
d Zeitverzögerung (engl. delay)	$T_i^S = (i, e_i, D_i)$ Nicht-periodische Aufgabe (Schreibweise mit i)	T_s Sporadischer Zusteller (engl. sporadic server)
Strukturelemente	$T_i^S = (r_i^{nach}, r_i^{vor}, e_i, D_i)$ Nicht-periodische Aufgabe (Schreibweise mit Auslöseintervall)	rt_i Wiederauffüllzeitpunkt (engl. replenishment time)
E_i Ereignis (engl. event)	$J_{i,j} = (r_{i,j}, e_{i,j}, d_{i,j})$ Arbeitsauftrag	Synchronisation
R_i Ergebnis (engl. result)	Ablaufplanung	cs_i Kritischer Abschnitt (engl. critical section)
T_i Aufgabe (engl. task)	P_i Priorität (engl. priority) der Aufgabe	R_i Betriebsmittel (engl. resource)
$J_{i,j}$ Arbeitsauftrag (engl. job) der Aufgabe T_i	Ω_i Prioritätsebenen (engl. number of priorities)	s_i Selbstausssetzung (engl. self suspension)
Temporale Eigenschaften	Δ_i Rechenzeitbedarf (engl. demand)	Blockierungszeit
Allgemein	U_{Δ_i} CPU-Auslastung (engl. utilisation)	b_i Blockierungszeit (engl. blocking time)
r_i Auslösezeitpunkt (engl. release time)	U Absolute CPU-Auslastung	b_i^{CP} — durch Wettbewerb (engl. resource contention)
e_i Maximale Ausführungszeit (WCET)	H Hyperperiode (großer Durchlauf, engl. major cycle)	b_i^{NP} — durch Unverdrängbarkeit (engl. nonpreemptable)
D_i Relativer Termin (engl. deadline)	f Rahmenlänge (kleiner Durchlauf, engl. minor cycle)	b_i^{SP} — durch s_i
d_i Absoluter Termin	f WCET aller Aufträge im Rahmen i	<i>Prioritätsobergrenzen</i>
ω_i Antwortzeit (engl. response time)	I_i Intervall (engl. interval)	$\hat{\Pi}_i$ Prioritätsobergrenze von R_i (engl. ceiling priority)
σ_i Schlupf (engl. slack)	ϕ_i Phase (engl. phase)	$\hat{\Pi}_i(t)$ Aktuelle (System-) Prioritätsobergrenze
<i>Periodische Aufgaben</i>		
p_i Periode (engl. period)		
Δ_i Dichte (engl. density) von I_i		

