

Echtzeitsysteme

Planbarkeit

19. Januar 2009

Überblick

Planbarkeit

- Problemdefinition und Begriffe
- Komplexität
- Optimalität
- Planbarkeitsanalyse
- CPU-Auslastung
- Zeitbedarfsanalyse
- Antwortzeitanalyse
- Simulation
- Zusammenfassung
- Bibliographie

Einhaltung von Terminen

Taktgesteuerte Systeme \leadsto konstruktiv

- ▶ alle Lastparameter sind à priori bekannt
- ▶ die Konstruktion einer Ablauftabelle trägt ihnen Rechnung
- ▶ Abhängigkeiten können berücksichtigt werden

☞ alle Termine werden eingehalten

- ▶ wenn eine zulässige Ablauftabelle erzeugt werden kann

Vorranggesteuerte Systeme \leadsto analytisch

- ▶ Lastparameter sind nicht vollständig bekannt
- ▶ Ablauf wird erst zur Laufzeit berechnet
- ▶ Abhängigkeiten müssen explizit gesichert werden

☞ Einhaltung von Terminen muss explizit überprüft werden

Aufgabenstellung

Gegen sei eine Menge periodischer Aufgaben T_i mit

- p_i der Periode (engl. *period*)
- D_i dem relativen Termin (engl. *deadline*)
- ϕ_i der Phase (engl. *phase*)
- e_i der maximalen Ausführungszeit (WCET)

der jeweiligen Aufgabe.

Fragestellung:

Ist diese Menge von Aufgaben zulässig (engl. *feasible* oder *schedulable*)?

Zulässigkeit

(engl. *feasibility* oder *schedulability*)

Ein Ablaufplan ist **gültig** (engl. *valid*), falls

- ▶ jeder CPU gleichzeitig max. ein Arbeitsauftrag zugeteilt wird.
- ▶ jeder Arbeitsauftrag gleichzeitig an max. eine CPU zugeteilt wird.
- ▶ kein Arbeitsauftrag vor seinem Auslösezeitpunkt eingeplant wird.
- ▶ einem Arbeitsauftrag entweder seine tatsächliche oder seine maximale Ausführungszeit zugeteilt wird.
- ▶ alle Abhängigkeiten eingehalten werden.

Ein Ablaufplan ist **zulässig** (engl. *feasible*), falls

- ▶ der Ablaufplan gültig ist und
- ▶ alle Arbeitsaufträge termingerecht eingeplant werden.

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 von einander, d.h. die einzige gemeinsame Ressource ist die CPU und es existieren keine Einschränkungen hinsichtlich der Auslösezeiten der Arbeitsaufträge.
- A6 Der Overhead durch Unterbrechungen, Ablaufplanung oder Verdrängung ist vernachlässigbar.
- A7 Alle Aufgaben verhalten sich voll-präemptiv.

Zulässigkeit (Forts.)

Eine Menge von Aufgaben ist **zulässig** (engl. *feasible* oder *schedulable*)

- ▶ hinsichtlich eines Ablaufplanungsalgorithmus,
- ▶ falls dieser Algorithmus immer einen zulässigen Ablaufplan erzeugt.

Die Entscheidung, ob eine Aufgabenmenge planbar ist, hängt somit

- ▶ vom verwendeten Ablaufplanungsalgorithmus
- ▶ sowie von den Eigenschaften der Aufgaben ab.

☞ häufig schränken Algorithmen die Eigenschaften von Aufgaben ein

- ▶ dies vereinfacht die Frage der Zulässigkeit oft beträchtlich
- ▶ **aufwändige Analysen** können diese lockern/aufheben

Implikationen

Einschränkungen, die Einfluss auf Anwendungen ausüben

Betriebsmittel *gemeinsame Betriebsmittel sind nicht möglich!*

- ▶ ET Systeme: gemeinsame Betriebsmittel implizieren Synchronisation
- ▶ Aufgaben sind nicht mehr unabhängig

Rangordnung *komplexe Aufgaben können nicht geteilt werden!*

- ▶ Aufgaben erzeugen Eingaben für andere Aufgaben
- ▶ eine komplexe Aufgabe wird in mehrere einfachere Aufgaben geteilt
- ▶ Aufgaben sind nicht mehr unabhängig

Kommunikation *Aufgaben können nicht synchron kommunizieren!*

- ▶ synchroner Nachrichtenversand/-empfang
- ▶ Aufgaben sind nicht mehr unabhängig

Rechenleistung: Schlüssel zum Erfolg?

Die Lösung unseres Problems erscheint einfach...

Coffman [1]

Für jede Menge von n asynchronen, periodischen Aufgaben, die den Kriterien A1 - A7 entsprechen, findet der EDF Algorithmus einen gültigen Ablaufplan, *genau dann, wenn* für die CPU-Auslastung gilt:

$$U = \sum_{i=1}^n u_i = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{p_i} \leq 1$$

- ▶ Eine Menge von Aufgaben heißt
 - synchron** falls $\forall i : \phi_i = 0$,
 - asynchron** sonst.

Realität: Einige Einschränkungen treffen nicht zu!

Die Lösung unseres Problems ist in Wirklichkeit sehr schwer...

- ▶ verzichtet man auf A3 \leadsto **stark \mathcal{NP} -hart** (Baruah [2])
 - ▶ Termine sind **kürzer** als die Perioden der Aufgaben.
- ▶ verzichtet man auf A4 \leadsto **stark \mathcal{NP} -hart** (Richard [3])
 - ▶ Aufgaben **legen sich schlafen** (engl. *self-suspension*).
- ▶ verzichtet man auf A5 \leadsto **stark \mathcal{NP} -hart** (Mok [4])
 - ▶ der **gegenseitige Ausschluss** wird durch Semaphore gesichert.
- ▶ verzichtet man auf A7 \leadsto **stark \mathcal{NP} -hart** (Cai [5])
 - ▶ harmonische, periodische Aufgaben sind **nicht verdrängbar**.

Möglichkeit, Ablaufplanungsalgorithmen zu klassifizieren

Optimalität (engl. *optimality*)

Ein Ablaufplanungsalgorithmus ist optimal (engl. *optimal*) für eine gewisse Klasse von Aufgaben, falls er für eine Menge von Aufgaben dieser Klasse einen gültigen Ablaufplan findet, sofern ein gültiger Ablaufplan existiert.

- ▶ solch ein Algorithmus stellt eine *Referenz* dar
 - ▶ schafft es dieser Algorithmus nicht, schafft es keiner!
- ▶ die (generelle) Zulässigkeit einer Menge von Aufgaben
 - ▶ kann auf die Zulässigkeit für diesen Algorithmus reduziert werden
 - ▶ sofern ein entsprechendes Kriterium existiert

RM

Der RM-Algorithmus ist optimal für Systeme, deren Aufgaben

- ▶ **synchron** sind und
- ▶ die Voraussetzungen A1 - A7 erfüllen.

Beweisidee (Baruah [6])

- ▶ gegeben sein ein System mit den Aufgaben $\{T_1, T_2, T_3, \dots, T_n\}$
- ▶ mit Prioritäten $T_1 \succ T_2 \succ \dots \succ T_n$ (nicht RM-konform)
- ▶ erzeugen einen zulässigen Ablaufplan
- ▶ Prioritäten können hinsichtlich RM umgeformt werden¹
- ▶ ohne Zulässigkeit des Ablaufplans zu zerstören

¹Man kann die Prioritäten zweier Aufgaben T_1 und T_2 , die das RM-Schema verletzen (für die also $T_1 \succ T_2$ gilt, obwohl $p_1 > p_2$), tauschen, ohne dabei die Zulässigkeit des Systems zu zerstören.

RM (Forts.)

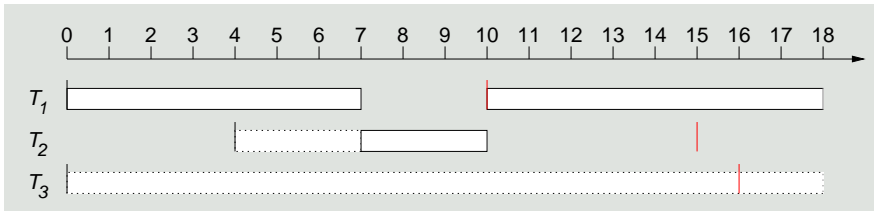
Nichtoptimalität

Der RM-Algorithmus ist nicht optimal für Systeme, deren Aufgaben

- ▶ **asynchron** sind und
- ▶ die Voraussetzungen **A1 - A7** erfüllen.

Beweis (Baruah [6])

- ▶ Betrachte $T_1 = (0, 7, 10)$, $T_2 = (4, 3, 15)$, $T_3 = (0, 1, 16)$
- ▶ RM: $T_1 \succ T_2 \succ T_3$



- ▶ T_3 verpasst bei t_{16} seinen Termin
- ▶ $T_1 \succ T_3 \succ T_2$ würde funktionieren

DM

Der DM-Algorithmus ist optimal für System, deren Aufgaben

- ▶ **synchron** sind,
- ▶ die Voraussetzungen **A1, A2**, sowie **A4 - A7** einhalten und
- ▶ für deren Termine $D_i \leq p_i$ gilt.

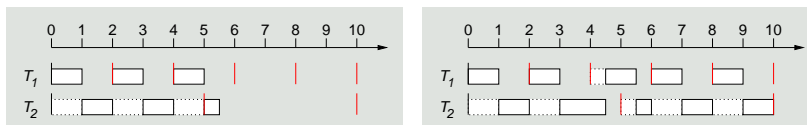
Beweisidee (Baruah [6])

- ▶ Analog zum RM-Algorithmus

DM (Forts.)

Nichtoptimalität statischer Prioritäten

- ▶ betrachte $T_1 = (2, 1)$ und $T_2 = (5, 2.5)$
- ▶ sei $T_1 \succ T_2$



t_5 T_2 verpasst Termin

t_4 $T_2 \succ T_1$

t_{10} Hyperperiode

- ▶ vor dem Zeitpunkt t_4 muss gelten $T_1 \succ T_2$
- ▶ zum Zeitpunkt t_4 muss gelten $T_2 \succ T_1$

☞ Widerspruch zur statischen Vergabe von Prioritäten

EDF

Der EDF-Algorithmus ist optimal für Systeme, deren Aufgaben

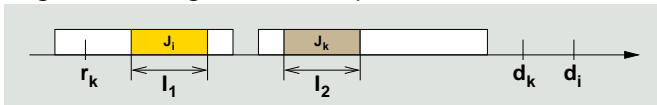
- ▶ beliebige Auslösezeiten
 - ▶ sporadisch/periodisch
 - ▶ synchron/asynchron
- und
- ▶ beliebige Deadlines
 - ▶ länger oder
 - ▶ kürzer als die entsprechende Periode
- besitzen, sowie
- ▶ die Voraussetzungen **A2** und **A4 - A7** erfüllen.

Beweis (Liu [7, S. 67])

- ▶ Jeder **gültige** Ablaufplan für solche Systeme
- ▶ lässt sich in einen EDF-Ablaufplan umformen.

EDF: Ablaufplanherleitung durch Umformung

Gegeben sei folgender Ablaufplan:



- ▶ betrachte alle Paare von Arbeitsaufträgen J_i und J_k
- ▶ Arbeitsauftrag J_i wird im Intervall l_1 , J_k im Intervall l_2 eingeplant
- ▶ der Termin von J_k sei vor dem Termin von J_i : $d_k < d_i$
- ▶ das Intervall l_1 liegt komplett vor l_2 : $l_1 < l_2$

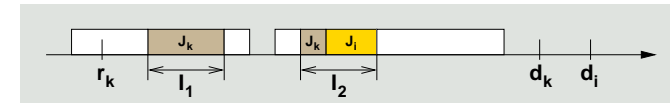
- Fall 1: $r_k > l_1$
- ▶ J_k kann nicht in l_1 eingeplant werden
 - ▶ der Ablaufplan hat bereits EDF-Form

EDF: Ablaufplanherleitung durch Umformung (Forts.)

Fall 2: $r_k < l_1$ ohne Beschränkung der Allgemeinheit

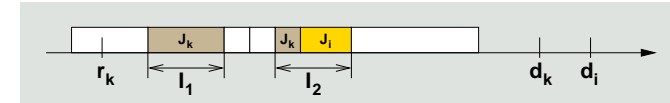
1. tausche J_i und J_k

Fall 2a: $d(l_1) < d(l_2)$ J_k passend stückeln (Verdrängung!)



Fall 2b: $d(l_1) \geq d(l_2)$ trivial

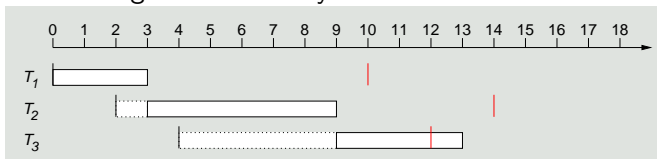
2. verbliebene Ruheintervalle durch Verschiebung von Arbeitsaufträgen auffüllen



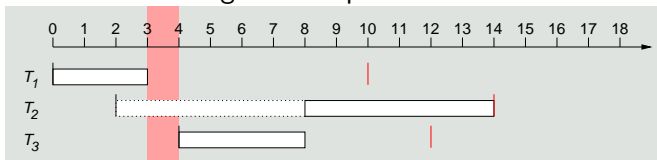
Nichtoptimalität vorrangesteuerter Ablaufplanung

Beliebige (in diesem Fall nicht-verdrängbare) Aufgaben

- ▶ betrachte $T_1 = (0, 3, 10)$, $T_2 = (2, 6, 14)$ und $T_3 = (4, 4, 12)$
- ▶ EDF versagt bei diesem System



- ▶ obwohl ein zulässiger Ablaufplan existiert



- ▶ dieser lässt allerdings den Prozessor kurz untätig

☞ der Plan wird von keinem vorrangesteuerten Algorithmus gefunden!

Planbarkeitsanalyse

Welche Möglichkeiten gibt es ...

CPU-Auslastung (engl. *loading factor*)

- ▶ Zu welchem Prozentsatz wird der Prozessor **maximal** beansprucht?
- ▶ bevorzugte Methode für **dynamische Prioritäten**

Zeitbedarfsanalyse (engl. *processor demand*)

- ▶ Wieviel Rechenzeit wird innerhalb eines Zeitintervalls benötigt?
- ▶ neuere Methode für **dynamische Prioritäten**

Antwortzeitanalyse (engl. *response time analysis*)

- ▶ Wie lange benötigt eine Aufgabe **maximal** bis zur Fertigstellung?
- ▶ präzise Methode für **statische Prioritäten**

Simulation (engl. *simulation*)

- ▶ Wird in einem bestimmten Intervall eine Deadline verfehlt?
- ▶ bevorzugte Methode für **statische Prioritäten**

Rechenzeitbedarf (engl. *processor demand*)

Gegeben sei eine Menge von Aufgaben T und ein Zeitintervall $[t_1, t_2)$, dann ist der **Rechenzeitbedarf** dieser Aufgaben im Intervall $[t_1, t_2)$:

$$h_{[t_1, t_2)} = \sum_{t_1 \leq r_k, d_k \leq t_2} e_k$$

Das sind alle Aufgaben, deren

- ▶ Auslösezeitpunkt und
- ▶ absoluter Termin

innerhalb dieses Intervalls liegt.

Zulässigkeitstest

Liu und Layland [8]

Für jede Menge von n asynchronen, periodischen Aufgaben, die den Kriterien **A1** - **A7** entsprechen, findet der EDF Algorithmus einen gültigen Ablaufplan, **gdw** für die CPU-Auslastung gilt:

$$U = \sum_{i=1}^n u_i = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{p_i} \leq 1$$

- ▶ Coffman zeigt dies auch für asynchrone Aufgaben (S. 9-8)
- ▶ schließlich zeigt Spuri [9] die „Optimalität“ des EDF-Algorithmus
 - ▶ Aufgaben wie oben
 - ▶ synchron oder asynchron
 - ▶ Kriterium: $U \leq 1$

CPU-Auslastung (engl. *loading factor*)

Die **CPU-Auslastung** einer Menge von Arbeitsaufträgen während eines Intervalls $[t_1, t_2)$, ist der Anteil des Intervalls, der nötig ist, um diese Arbeitsaufträge auszuführen:

$$u_{[t_1, t_2)} = \frac{h_{[t_1, t_2)}}{t_2 - t_1}$$

Für eine Aussage über die Zulässigkeit einer Menge von Aufgaben T ist **absolute** CPU-Auslastung (engl. *absolute loading factor*) von Bedeutung.

Dies ist die

- ▶ maximale CPU-Auslastung
- ▶ über alle Intervalle $[t_1, t_2)$

$$u = \max_{0 \leq t_1 < t_2} u_{[t_1, t_2)}$$

Beliebige Termine und Perioden

Bedingung **A3** (S. 9-6), soll gelockert werden

$$D_i \geq p_i$$

- ▶ die Kriterien von Layland/Liu und Coffman gelten nach wie vor [10]
- ▶ diese Kriterien sind **notwendig** und **hinreichend**

$$D_i < p_i$$

Baruah [10]

Für eine hybride Menge von n Aufgaben T , findet der EDF-Algorithmus einen gültigen Ablaufplan, wenn gilt:

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\min\{D_i, T_i\}} \leq 1$$

- ▶ **hybride** Menge von Aufgaben: periodische und sporadische Aufgaben
- ▶ diese Kriterium ist **nur hinreichend!**

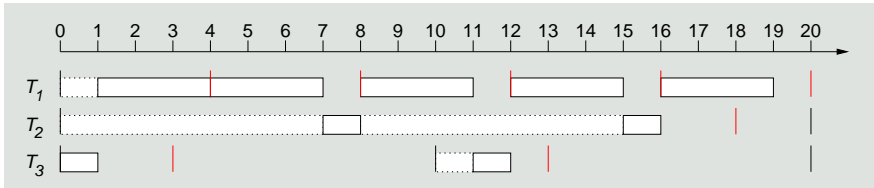
Dieser Test ist pessimistisch . . .

Betrachte folgende Aufgaben: $T_1 = (0, 4, 3, 4)$, $T_2 = (0, 20, 2, 18)$,
 $T_3 = (0, 10, 1, 3)$

$$\sum_i \frac{e_i}{\min\{D_i, T_i\}} = \frac{3}{4} + \frac{2}{18} \frac{1}{3} = \frac{43}{36} > 1$$

- das System ist laut des Tests (S. 9-23) **nicht zulässig!**

Es existiert jedoch ein zulässiger Ablaufplan:



☞ eine geeignete Analyseverfahren für hybride Systeme wird benötigt

Maximierung des Rechenzeitbedarfs

- hybrides System \leadsto entsprechendes synchrones, periodisches System
 - alle sporadischen Aufgaben
 - haben Phase $\phi_i = 0$
 - treten mit ihrer maximalen Frequenz auf
- der Rechenzeitbedarf solcher Systeme ist im Intervall $[0, t)$ maximal
 - man kann zeigen: $\forall t_1, t_2 : h_{[t_1, t_2)} \leq h_{[0, t_2 - t_1)}$
- der Rechenzeitbedarf im Intervall $[0, t)$ ist:

$$h(t) = \sum_{D_i \leq t} (1 + \lfloor \frac{t - D_i}{p_i} \rfloor) e_i$$

- alle Arbeitsaufträge, die vor t beendet sein müssen
- multipliziert mit der maximalen Anzahl ihrer Aktivierungen

Zulässigkeitstest

Der EDF-Algorithmus, erzeugt für jede hybride Menge von Aufgaben einen zulässigen Ablaufplan, **gdw**:

$$\forall t : h(t) \leq t$$

- entspricht direkt dem Satz von Spuri (S. 9-22)
- ist als Kriterium aber so nicht brauchbar
 - schließlich gibt es unendlich viele Intervalle $[0, t)$
 - alle zu überprüfen ist einfach unmöglich

☞ Einschränkung der zu überprüfenden Intervalle

Tätigkeitsintervalle

Liu und Layland [8]

Kann der EDF-Algorithmus für eine Menge periodischer Aufgaben keinen zulässigen Ablaufplan finden, so wird ein Termin im ersten Tätigkeitsintervall verpasst.

- diese Eigenschaft wurde später auch gezeigt für
 - Mengen synchroner, periodischer Aufgaben mit $D_i \leq p_i$ und
 - generische Mengen synchroner, periodischer Aufgaben
- sei L nun die Länge des ersten Tätigkeitsintervalls
 - die maximale Länge des zu prüfenden Intervalls ist nun beschränkt
- $h(t) \leq t$ muss nicht für alle Zeitpunkte in $[0, t)$ geprüft werden
 - $\{e_1, e_2, \dots\} = mp_i + D_i; i = 1 \dots n, m = 0, 1, \dots$
 - wobei alle $e_i < L$ genügen
 - Zeitbedarf erhöht sich nur bei Auslösung eines Arbeitsauftrags

Ansatz

- Antwortzeit** ▶ Zeitdauer zwischen Auslösezeit und Terminationszeitpunkt (S. 4-9)
- Idee** ▶ Terminationszeitpunkt vor dem **absoluten** Termin
▶ Antwortzeit ω_i kürzer als der **relative** Termin D_i
▶ für jede Aufgabe $T_i : \omega_i \leq D_i$
- Voraussetzungen** ▶ Bedingungen **A1 - A7** müssen eingehalten werden
▶ Konzept ist jedoch erweiterbar

Probleme

- ▶ Wie berechnet man die Antwortzeit?
- ▶ Wann wird die **maximale** Antwortzeit erreicht?

Berechnung der Antwortzeit

- ▶ die Antwortzeit ω_i einer Aufgabe T_i berechnet sich zu

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

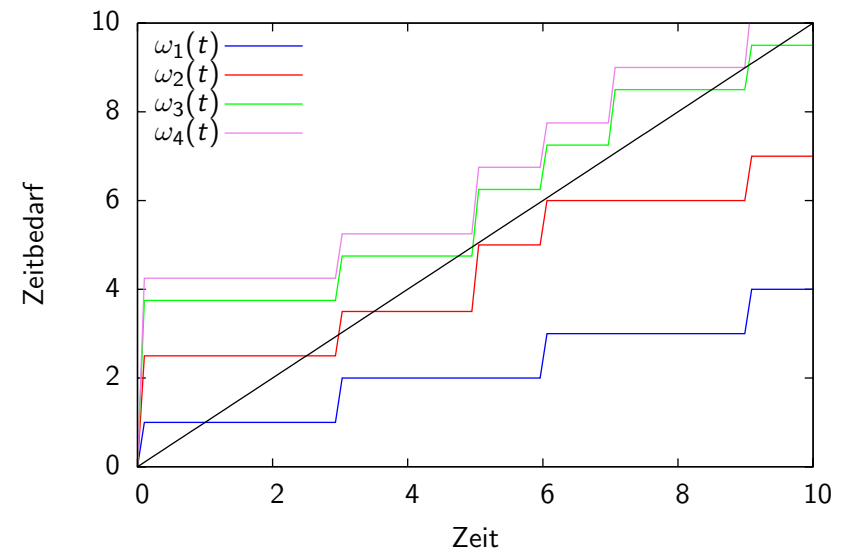
- ▶ die Aufgabe endet, bevor das Ereignis erneut eintritt
- ▶ setzt sich zusammen, aus
 - ▶ der WCET von T_i selbst und
 - ▶ den WCETs der Aufgaben mit höherer Priorität T_1, \dots, T_{i-1}
- ▶ zu prüfen ist nun $\omega_i(t) \leq t$;
 $t = jp_k; \quad k = 1, 2, \dots, i; \quad j = 1, 2, \dots, \lfloor \min(p_i, D_i) / p_k \rfloor$
 - ▶ Zeitbedarf erhöht sich nur bei Auslösung dringlicherer Aufgaben
 - ▶ bis das Ereignis erneut eintritt/der Termin der Aufgabe erreicht ist
 - ▶ ist die Ungleichung für **einen** Zeitpunkt t erfüllt, ist T_i **zulässig**

Beispiel: Berechnung der maximalen Antwortzeit

mit den Aufgaben $T_1 = (\phi_1, 3, 1)$, $T_2 = (\phi_2, 5, 1.5)$, $T_3 = (\phi_3, 7, 1.25)$, $T_4 = (\phi_4, 9, 0.5)$

- ▶ Antwortzeit ω_1 von T_1
 - ▶ $\omega_1(3) = 1 \leq 1$
 - ▶ T_1 ist zulässig
- ▶ Antwortzeit ω_2 von T_2
 - ▶ $\omega_2(3) = 1.5 + \lceil \frac{3}{3} \rceil = 2.5 \leq 3$
 - ▶ T_2 ist zulässig
- ▶ Antwortzeit ω_3 von T_3
 - ▶ $\omega_3(3) = 1.25 + \lceil \frac{3}{3} \rceil 1 + \lceil \frac{3}{5} \rceil 1.5 = 3.75 > 3$
 - ▶ $\omega_3(5) = 1.25 + \lceil \frac{5}{3} \rceil 1 + \lceil \frac{5}{5} \rceil 1.5 = 4.75 \leq 5$
 - ▶ T_3 ist zulässig
- ▶ Antwortzeit ω_4 von T_4
 - ▶ $\omega_4(3) = 0.5 + \lceil \frac{3}{3} \rceil 1 + \lceil \frac{3}{3} \rceil 1.5 + \lceil \frac{3}{7} \rceil 1.25 = 4.25 > 3$
 - ▶ $\omega_4(5) = 0.5 + \lceil \frac{5}{3} \rceil 1 + \lceil \frac{5}{3} \rceil 1.5 + \lceil \frac{5}{7} \rceil 1.25 = 5.25 > 5$
 - ▶ $\omega_4(6) = 0.5 + \lceil \frac{6}{3} \rceil 1 + \lceil \frac{6}{3} \rceil 1.5 + \lceil \frac{6}{7} \rceil 1.25 = 6.75 > 6$
 - ▶ $\omega_4(7) = 0.5 + \lceil \frac{7}{3} \rceil 1 + \lceil \frac{7}{3} \rceil 1.5 + \lceil \frac{7}{7} \rceil 1.25 = 7.75 > 7$
 - ▶ $\omega_4(9) = 0.5 + \lceil \frac{9}{3} \rceil 1 + \lceil \frac{9}{3} \rceil 1.5 + \lceil \frac{9}{7} \rceil 1.25 = 9.00 \leq 9$
 - ▶ T_4 ist zulässig

Zeitbedarfsfunktionen der Aufgaben T_1, T_2, T_3 und T_4



Fadensynchronisation

Erweiterung des Konzepts, Aufhebung von Bedingung A5

- ▶ Arbeitsaufträge können blockiert werden
 - ▶ wenn sie Betriebsmittel nachfragen,
 - ▶ die bereits von Arbeitsauftrag niedriger Priorität belegt sind.
- ▶ das muss bei der Bestimmung der Antwortzeit berücksichtigt werden

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

- ▶ die Blockadezeit bt_i der Aufgabe T_i verlängert die Antwortzeit
- ▶ die Blockadezeit hängt vom Synchronisationsprotokoll ab
 - ▶ NPCS (S. 7-13): $bt_i = \max_{i+1 \leq k \leq n}(cs_k)$
 - ▶ Priority Inheritance (S. 7-18): $bt_i = \min(n, j) \max_{i+1 \leq k \leq n}(cs_k)$
 - ▶ n Betriebsmittel und Konflikt mit j Aufgaben niedrigerer Priorität
 - ▶ Priority Ceiling (S. 7-22): $bt_i = \dots$

Wann wird die Antwortzeit maximal?

- ▶ **kritischer Zeitpunkt** (engl. *critical instant*)
 - ▶ Auslösung eines Arbeitsauftrags an seinem kritischen Zeitpunkt
 - ▶ die **maximale Antwortzeit** wird erreicht
- ▶ der Arbeitsauftrag einer Aufgabe T_i , der an einem kritischen Zeitpunkt ausgelöst wird
 - ▶ hat die **maximale Antwortzeit** aller Arbeitsaufträge in T_i
 - ▶ falls diese ihre Termine einhalten
 - ▶ **verpasst seinen Termin**
 - ▶ falls irgendein Arbeitsauftrag in T_i seinen Termin verpasst
- ▶ Liu und Layland [8]: ein kritischer Zeitpunkt
 - ▶ in Systemen mit **statischen** Prioritäten tritt ein
 - ▶ falls **zusammen** mit einem Arbeitsauftrag einer Aufgabe T_i
 - ▶ Arbeitsaufträge aller Aufgaben **höherer Priorität** T_1, \dots, T_{i-1} ausgelöst werden
- ▶ In Systemen mit **dynamischen** Prioritäten
 - ▶ lässt sich ein solcher kritischer Zeitpunkt **nicht** identifizieren,
 - ▶ was die Antwortzeitanalyse ungemein **aufwendig** macht.

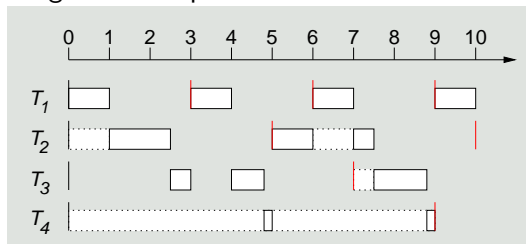
Simulation

- Vorteil**
- ▶ Analysemethoden: **komplex** und schwer verständlich
 - ▶ Planungsalgorithmen: relativ **einfach**
 - ▶ Konstruktion eines Ablaufplans!

- Voraussetzung**
- ▶ Simulation muss den *worst case* treffen

- Lösung**
- ▶ Simulation muss am kritischen Zeitpunkt beginnen

Vergleiche Beispiel auf S. 9-30



☞ Methode, die in vielen industriellen Werkzeugen vorzufinden ist

Resümee

Zulässigkeit einer Menge von Aufgaben

- ▶ **zentrale Frage**: ist eine Menge von Aufgaben zulässig?
- ▶ d.h. können alle Aufgaben termingerecht abgearbeitet werden?

Komplexität dieser Fragestellung

- ▶ Entscheidung der Zulässigkeit ist sehr, sehr schwierig
- ▶ nur Sonderfälle sind in polynomieller Laufzeit berechenbar
- ▶ nahezu alle Varianten des Problems sind **stark \mathcal{NP} -hart**

Optimalität eines Ablaufplanungsalgorithmus

- ▶ ist ein Ablaufplanungsalgorithmus **optimal**,
- ▶ findet er einen zulässigen Ablaufplan für eine bestimmte Aufgaben,
- ▶ **gdw** ein zulässiger Ablaufplan existiert.

Planbarkeitsanalyse für dynamische und statische Prioritäten

- ▶ dynamische Prioritäten \leadsto CPU-Auslastung, Zeitbedarfsanalyse
- ▶ statische Prioritäten \leadsto Antwortzeitanalyse, Simulation

Literaturverzeichnis

- [1] Edward G. Coffman.
Computer and Job-shop Scheduling Theory.
John Wiley & Sons Inc, 1976.
- [2] Sanjoy K. Baruah, Louis E. Rosier, and R. R. Howell.
Algorithms and complexity concerning the preemptive scheduling of periodic, real-time tasks on one processor.
Real-Time Systems Journal, 2(4):301–324, 1990.
- [3] Pascal Richard.
On the complexity of scheduling real-time tasks with self-suspensions on one processor.
Proceedings. 15th Euromicro Conference on Real-Time Systems (ECRTS 2003), pages 187–194, July 2003.

Literaturverzeichnis (Forts.)

- [4] A. K. Mok.
Fundamental design problems of distributed systems for the hard real-time environment.
PhD thesis, MIT, 1983.
- [5] Yang Cai and M. C. Kong.
Nonpreemptive scheduling of periodic tasks in uni- and multiprocessor systems.
Algorithmica, 15(6):572–599, 1996.
- [6] Sanjoy Baruah and Joel Goossens.
Scheduling Real-time Tasks: Algorithms and Complexity, chapter 28.
Computer and Information Science series. Chapman & Hall/CRC, 2004.

Literaturverzeichnis (Forts.)

- [7] Jane W. S. Liu.
Real-Time Systems.
Prentice-Hall, Inc., 2000.
- [8] C. L. Liu and James W. Layland.
Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard-real-time environment.
Journal of the ACM, 20(1):46–61, 1973.
- [9] Marco Spuri.
Earliest Deadline Scheduling in Real-Time Systems.
Dissertation, Scuola Superiore S. Anna, Pisa, 1996.
- [10] S.K. Baruah, A.K. Mok, and L.E. Rosier.
Preemptively scheduling hard-real-time sporadic tasks on one processor.
pages 182–190, December 1990.