

Überblick

Echtzeitsysteme

Taktsteuerung

16. November 2009

Taktsteuerung

- Ablauf tabellen
- Einlastung und Laufzeitkontrolle
- Struktur zyklischer Ablaufpläne
- Nichtperiodische Arbeitsaufträge
- Betriebswechsel
- Zusammenfassung
- Bibliographie

Arbeitsaufträge mit strikten Terminen

Alle Parameter der Arbeitsaufträge sind im Voraus bekannt

Vorabwissen bahnt den Weg, um Ablaufpläne *off-line* erstellen zu können

- ▶ alle Programme sind determiniert, das System ist deterministisch

statischer Ablaufplan \mapsto exakter Jobfahrplan; enthält feste Angaben darüber, wann welche Arbeitsaufträge auszuführen sind

- ▶ die jedem Arbeitsauftrag zugeteilte Prozessorzeit ist gleich seiner maximalen Ausführungszeit \leadsto WCET
- ▶ Einlastung der Arbeitsaufträge geschieht streng nach Fahrplan
 - ▶ alle Termine werden im Normalfall sicher eingehalten
 - ▶ unvorhergesehene Ausnahmen¹ führen zu Terminüberschreitungen
- ▶ da die Einplanung *off-line* geschieht, können Algorithmen mit hoher Berechnungskomplexität zum Einsatz kommen

¹Gemeint sind hier die synchronen Programmunterbrechungen (d.h., *Traps*), z.B. aufgrund von Berechnungs- und/oder Adressierungsfehlern.

Abarbeitung statischer Ablaufpläne

Tabellengesteuerte Einlastung von Arbeitsaufträgen

Repräsentation vorberechneter (statischer) Ablaufpläne \leadsto **Tabelle**

- ▶ jeder Tabelleneintrag entspricht einer Einplanungsentscheidung zu einem (vorab) bestimmten Zeitpunkt auf der Echtzeitachse
- ▶ dabei werden zwei Arten von Tabelleneinträgen unterschieden:
 1. Adresse bzw. Identifikation eines Arbeitsauftrags
 2. Ruheintervall (engl. *idle interval*) einer Aufgabe
- ▶ bei Einlastung wird ein **Zeitgeber** (engl. *timer*) programmiert und der Arbeitsauftrag/das Ruheintervall wird gestartet
 - ▶ „Kurzzeitwecker“ auf nächsten Entscheidungszeitpunkt stellen
 - ▶ einzustellender Wert ist im aktuellen Tabelleneintrag zu finden
- ▶ ein **Zeitgebersignal** schaltet zum nächsten Tabelleneintrag weiter

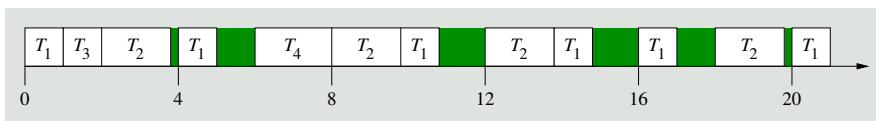
Reihumverfahren: am Tabellenende wird wieder zum -anfang gesprungen

- ▶ **zyklischer Ablaufplan** (engl. *cyclic schedule*) periodischer Aufgaben

Ruheintervalle periodischer Aufgaben

Arbeitsaufträge, um überschüssige Zeit zu verbrauchen...

Phasen von beabsichtigter „Untätigkeit“ zwischen den Arbeitsaufträgen:



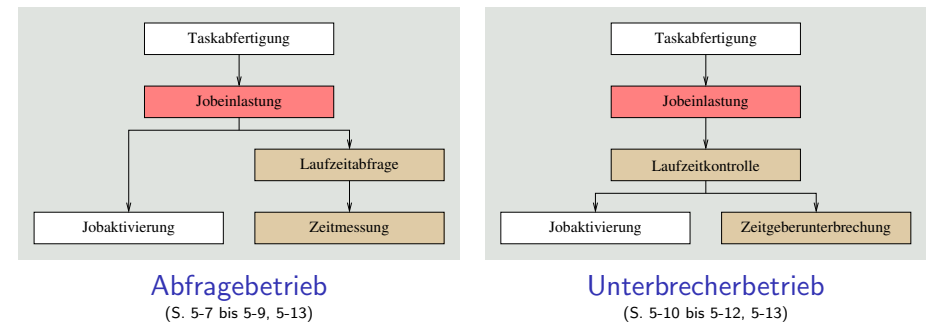
- ▶ nicht beanspruchte, freie/verfügbare Zeitintervalle in den Perioden
 - ▶ der mit periodischen Arbeitsaufträgen ggf. entstehende „Verschnitt“
- ▶ spezielle Arbeitsaufträge an die CPU, untätig (engl. *idle*) zu sein

Nutzung der Ruheintervalle für andere Zwecke kann möglich sein:

- ▶ z.B. zur Ausführung aperiodischer/sporadischer Arbeitsaufträge
- ▶ bzw. zur Hintergrundausführung sonstiger (nicht Echtzeit) Jobs

Abfertigung von Arbeitsaufträgen

Abfragebetrieb (engl. *polling mode*) vs. Unterbrecherbetrieb (engl. *interrupt mode*)



Benutzthierarchie

Die Benutzbeziehung [1] in einer funktionalen Hierarchie drückt Abhängigkeiten von der Verfügbarkeit korrekter Implementierungen von Funktionen aus. *A benutzt B*, wenn die korrekte Ausführung von *B* zwingend ist für die Korrektheit von *A*: d.h., die Korrektheit von *A* hängt ab von der Korrektheit von *B* (*A* liegt über *B*).

Tabellengesteuerte Einlastung zyklischer Arbeitsaufträge

Taskabfertigung: Grundsätzliche Verfahrensweise

erledige Dispatcher (Ablaufabelle, Tabellenlänge):

setze Laufzähler auf ersten Eintrag der Ablaufabelle;

solange der Betrieb läuft **tue**

erledige

laste Ablaufabelle[Laufzähler].Arbeitsauftrag ein;

wenn Laufzähler < Tabellenlänge **dann** erhöhe Laufzähler um 1

sonst setze Laufzähler auf ersten Eintrag der Ablaufabelle;

basta;

basta.

Einlastung der Arbeitsaufträge verläuft in drei grundsätzlichen Schritten:

1. Laufzeitüberwachung des anstehenden Arbeitsauftrags aufsetzen
2. anstehenden Arbeitsauftrag starten und ausführen
3. sich auf den nächsten Entscheidungszeitpunkt **synchronisieren**

Synchronisation durch Abfrage eines Taktzählers

Jobeinlastung, Laufzeitabfrage und Zeitmessung

erledige laste ein (Arbeitsauftrag):

interpretiere Arbeitsauftrag. Entscheidungszeitpunkt als Taktzahl;


aktiviere Arbeitsauftrag;

solange Taktzähler < Taktzahl **tue** nichts;

basta.

Grundlage bildet ein **Taktzähler** (engl. *clock counter*) in der Hardware

- ▶ der Entscheidungszeitpunkt muss als Taktzahl vorliegen oder in eine Taktzahl umgerechnet werden können
 - ▶ diese Taktzahl wird nach Beendigung des Arbeitsauftrags abgewartet
- ▶ gezählt werden z.B. die CPU-Takte bei Befehlsausführung

 Verzögerung von Arbeitsaufträgen kann Spätfolgen nach sich ziehen

Synchronisation durch Abfrage einer Zeitkontrolle

Jobeinlastung, Laufzeitabfrage und Zeitmessung

erledige laste ein (Arbeitsauftrag):

richte Zeitkontrolle aus auf Arbeitsauftrag. Entscheidungszeitpunkt;

aktiviere Arbeitsauftrag;

solange Zeitkontrolle $\neq 0$ **tue** nichts;

basta.

Zeitkontrolle im Sinne von „zurück zählen“ (engl. *count down*)

- ▶ der Entscheidungszeitpunkt muss als relativer Zeitwert vorliegen oder in einen solchen umgerechnet werden können

- ▶ auf diesen Wert wird ein **Zeitmesser** (engl. *timer*) eingestellt

- ▶ für den Zeitwert t gilt: $t \geq WCET(\text{Arbeitsauftrag})$

 Verzögerung von Arbeitsaufträgen kann Spätfolgen nach sich ziehen

Abfragebetrieb im Rückblick

Verzögerungsproblematik bei Taktzähler und Zeitkontrolle

Abtastung des Zeitgebers durch das **im Vordergrund** laufende Programm

- ▶ nachdem ein aktivierter Arbeitsauftrag komplett durchgelaufen ist
 - ▶ Arbeitsaufträge erhalten einen gewissen Vertrauensvorschuss
 - ▶ evtl. Terminüberschreitungen werden erst im Nachhinein erkannt

- ▶ schwache/strikte Echtzeitfähigkeit liegt ganz in Anwendungshand
schwach bei Terminüberschreitung, Ergebnis findet Verwendung

- ▶ der nachfolgende Arbeitsauftrag startet verspätet

- ▶ als Folge kann das System komplett aus den Takt geraten

strikt sonst, d.h., wenn Termineinhaltung jederzeit garantiert ist

- ▶ die WCET muss die Behandlung evtl. Fehlersituationen einschließen

 Alternative: **Zeitgeberunterbrechung** (engl. *timer interrupt*)

Synchronisation durch unterbrechenden Zeitgeber

Jobeinlastung: Einseitige Synchronisation mit Zeitgeberunterbrechung

erledige laste ein (Arbeitsauftrag):

stelle Zeitgeber ein auf Arbeitsauftrag. Entscheidungszeitpunkt;

kontrolliere Arbeitsauftrag;

solange Zeitgebersignalmarke ungesetzt ist **tue** nichts;

setze Zeitgebersignalmarke zurück;

basta.

Anzeige des Zeitgebersignals durch ein **im Hintergrund** arbeitendes Gerät

- ▶ Ausführungsfreigabe durch **Softwaresignal** der Behandlungsroutine
 - ▶ hier: die Zeitgebersignalmarke, die beim Konsumieren gelöscht wird
 - ▶ der *Dispatcher* synchronisiert sich mit dem Zeitgeber

- ▶ Abbruch des Arbeitsauftrags als Folge einer Zeitgeberunterbrechung
 - ▶ sofern der Arbeitsauftrag dann noch in Ausführung befindlich war
 - ▶ ist in Bezug auf die WCET des Arbeitsauftrags ein Ausnahmefall

Synchronisation durch unterbrechenden Zeitgeber (Forts.)

Laufzeitkontrolle, Zeitgeberunterbrechung: Bedingter Jobabbruch

erledige Behandlungsroutine zum *Timer Interrupt*:

wenn Arbeitsauftrag.Zustand = laufend **dann** breche Arbeitsauftrag ab;

setze Zeitgebersignalmarke;

basta.

Erfüllung der Wartebedingung für den (aktiv wartenden) *Dispatcher*

- ▶ ggf. Abbruch eines seinen Termin überschreitenden Arbeitsauftrags

erledige kontrolliere (Arbeitsauftrag):

setze Arbeitsauftrag.Zustand auf laufend;

aktiviere Arbeitsauftrag;

setze Arbeitsauftrag.Zustand auf beendet;

basta.

„Schönheitsfehler“:

- ▶ Zustand
- ▶ Signalmarke
- ▶ unnötiger *Interrupt*

Synchronisation durch unterbrechende Zeitkontrolle

Jobeinlastung, Laufzeitkontrolle, Zeitgeberunterbrechung: Unbedingter Jobabbruch

erledige Behandlungsroutine zum *Timer Interrupt*:
 breche Arbeitsauftrag ab;
basta.

erledige kontrolliere (Arbeitsauftrag):
 lasse Unterbrechung durch Zeitkontrolle zu;
 aktiviere Arbeitsauftrag;
 wehre Unterbrechung durch Zeitkontrolle ab;
basta.

Ausnahmefall die
 Zeitkontrolle läuft
 bei Überschreitung
 der WCET des
 Arbeitsauftrags ab

erledige laste ein (Arbeitsauftrag):
 richte Zeitkontrolle aus auf Arbeitsauftrag.Entscheidungszeitpunkt;
 kontrolliere Arbeitsauftrag;
solange Zeitkontrolle $\neq 0$ **tue** nichts;
basta.

Aktivierung eines Arbeitsauftrags

Frage der technischen Repräsentation: Routine vs. Koroutine

erledige aktiviere (Arbeitsauftrag):
 rufe Arbeitsauftrag.Routine auf;
basta.

Arbeitsauftrag \mapsto **Routine**

- ▶ ggf. auch als Makro
- ▶ C/C++ *inline function*

erledige aktiviere (Arbeitsauftrag):
 setze Arbeitsauftrag.Koroutine fort;
basta.

Arbeitsauftrag \mapsto **Koroutine**

- ▶ autonomer Kontrollfluss
- ▶ eigener Laufzeitkontext

erledige Koroutine (Arbeitsauftrag):
solange der Betrieb läuft **tue**
erledige
 rufe Arbeitsauftrag.Routine auf;
 setze *Dispatcher*.Koroutine fort;
basta;
basta.

Aktivitätsträger einer Routine

- ▶ Wiederverwendung der prozeduralen Ausprägung des Arbeitsauftrags
- ▶ kooperative Verarbeitung mehrfädiger Programme

Abbruch von Arbeitsaufträgen

Ausnahmebehandlung (engl. *exception handling*)

Arbeitsauftragsabbrüche unterscheiden sich je nach Aktivierungsmodell

- ▶ Aufruf/Aktivierung einer Routine oder Koroutine
 - ▶ prozedur- oder prozessorientierter Ansatz

Prozeduraufruf \mapsto Aktivierungsblöcke zerstören

- ▶ *Dispatcher* und Arbeitsauftrag laufen im selben Programmfaden ab
- ▶ der *Timer Interrupt* terminiert Prozedurinkarnationen
- ▶ in der nächsten Periode beginnt der Arbeitsauftrag von vorne

Koroutinenaufruf \mapsto *Dispatcher*-Kontext reaktivieren

- ▶ *Dispatcher*/Arbeitsaufträge laufen in eigenen Programmfäden ab
- ▶ der *Timer Interrupt* **verdrängt** den Arbeitsauftragsfaden
- ▶ in der nächsten Periode fährt der Arbeitsauftrag an der Stelle fort
 - ▶ ist je nach Arbeitsauftrag sinnvoll oder nicht zu tolerieren
 - ▶ ggf. ist wie beim Prozeduraufrufmodell zu verfahren...

Variantenvielfalt von Arbeitsaufträgen

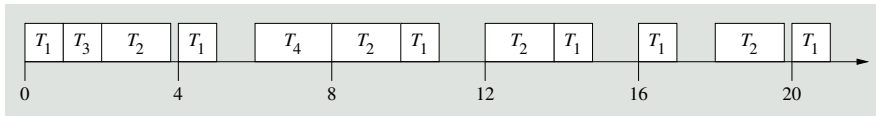
Programmiersprachliche Formulierung

Qual der Wahl...

- ▶ jede der behandelten Optionen ist bedeutsam für eine bestimmte Anwendungsklasse und folglich auch sinnvoll
 - ▶ bei weiterer Konkretisierung werden sich zusätzliche Optionen ergeben
- ▶ den Arbeitsauftrag als **parametrischen Datentypen** formulieren
 - ▶ d.h., als „Programmgerüst“ bzw. Schablone (engl. *template*)
- ▶ der Datentypparameter bestimmt sodann die technische Ausprägung
 - ▶ Laufzeitüberwachung:
 - ▶ Taktzähler
 - ▶ Zeitkontrolle oder Zeitgeber, abfragend bzw. unterbrechend
 - ▶ Laufzeitkontext:
 - ▶ gemeinsamer Kontext mit der aufrufenden Instanz \leadsto Routine
 - ▶ ein von der aufrufenden Instanz getrennter Kontext \leadsto Koroutine
 - ▶ Prozedurart: konventionell, *inline*, *virtual*, *pure virtual*
- ▶ Wunsch: **linguistische Unterstützung** für **generische Programmierung**

Regelmäßigkeit zyklischer Abläufe

Einplanungsentscheidungen können trotz periodischer Aufgaben *ad hoc*, d.h., in unregelmäßigen Abständen wirksam werden:



- ▶ Entscheidungszeitpunkte sind 0, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18
- ▶ zusätzlich die Zeitpunkte für Ruheintervalle: 3, 5, 11, 15, 17, 19, 8

Regularität bei der Umsetzung und Überprüfung solcher Entscheidungen zur Laufzeit trägt wesentlich zum **Determinismus** bei

„gute Anordnung“ (engl. *good structure*) eines zyklischen Ablaufplans

- ▶ Einplanungsentscheidungen *nicht* zu beliebigen Zeitpunkten treffen

Rahmen (engl. *frames*)

Strukturelemente von zyklischen Ablaufplänen

Zeitpunkte von Einplanungsentscheidungen unterteilen die Echtzeitachse in **Intervalle fester Länge f** (engl. *frame size*)

- ▶ Entscheidungen werden nur am Rahmenanfang getroffen/wirksam
 - ▶ innerhalb eines Rahmens ist Verdrängung ausgeschlossen
- ▶ Folge: die Phase einer periodischen Aufgabe ist Vielfaches von f
 - ▶ der erste Job jeder Task wird am Anfang eines Rahmens ausgelöst

Aufgaben, die der *Dispatcher* zusätzlich zur Einlastung eines Jobs am Anfang eines Rahmens durchführen kann...

- ▶ sind **Überwachung/Durchsetzung von Einplanungsentscheidungen**:
 - ▶ wurde ein für den Rahmen eingeplanter Job bereits ausgelöst?
 - ▶ ist dieser Job auch zur Ausführung bereit?
 - ▶ gab es einen „Überlauf“ eines Termins, steht Fehlerbehandlung an?
- ▶ beeinflussen im großen Maße die Bestimmung eines Wertes für f

Randbedingungen für die Rahmenlänge

Lang genug und so kurz wie möglich halten...

f **hinreichend lang** \leadsto Jobverdrängung vermeiden

1. ist erfüllt, wenn gilt: $f \geq \max(e_i)$, für $1 \leq i \leq n$
 - ▶ jeder Job läuft in der durch f gegebenen Zeitspanne komplett durch
2. f teilt die Hyperperiode H so, dass gilt: $\lfloor p_i/f \rfloor - p_i/f = 0$
 - ▶ die Periode einer beliebigen Task in H kann hergenommen werden

- ▶ das Intervall in H von F Rahmen heißt **größter Durchlauf**
 - ▶ engl. *major cycle*, beginnt mit Rahmen $kF + 1$, für $k = 0, 1, 2, \dots$
 - ▶ Intervall der Länge f heißt **kleinster Durchlauf** (engl. *minor cycle*)
- ▶ im Regelfall verlängert sich der Ablaufplan: Vielfaches von f

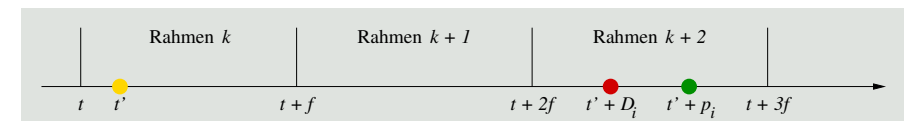
f **hinreichend kurz** \leadsto Terminüberwachung unterstützen

3. ist möglich unter der Bedingung: $2f - \gcd(p_i, f) \leq D_i$
 - ▶ Rahmen „passend“ auf die anstehenden Aufgaben verteilen
 - ▶ zwischen der Auslösezeit und dem Termin jedes Jobs (S. 5-19)

Randbedingungen für die Rahmenlänge (Forts.)

Platzierung einer Task auf der Echtzeitachse

Feststellung eines passenden Bereichs für f von $T = (p_i, e_i, D_i)$:²



- ▶ t ist der Anfang eines Rahmens, in dem ein Job in T_i ausgelöst wird
- ▶ t' ist der Zeitpunkt der Auslösung des betreffenden Jobs
- ▶ Rahmen $k + 1$ erlaubt die Kontrolle des bei t' ausgelösten Jobs
 - ▶ der Rahmen sollte daher zwischen t' und $t' + D_i$ des Jobs liegen
- ▶ dies ist erfüllt wenn gilt: $t + 2f \leq t' + D_i$ bzw. $2f - (t' - t) \leq D_i$
 - ▶ $t' - t$ ist mindestens größter gemeinsamer Teiler von p_i und f [2]

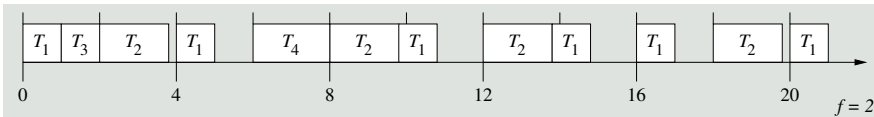
²Beindet sich f in diesem Bereich, gibt es wenigstens einen Rahmen zwischen der Auslösungszeit und dem Termin jedes Arbeitsauftrags der betreffenden Aufgabe.

Randbedingungen für die Rahmenlänge (Forts.)

$T_i = (p_i, e_i, D_i)$; gilt $D_i = p_i$, wird D_i nicht geschrieben

Beispiel S. 5-16: $T_1 = (4, 1)$, $T_2 = (5, 1.8)$, $T_3 = (20, 1)$, $T_4 = (20, 2)$

- ▶ $f \geq 2$ muss gelten, um jeden Job komplett durchlaufen zu lassen
- ▶ mögliche Rahmenlängen in H sind 2, 4, 5, 10 und 20 ($H = 20$)
- ▶ nur $f = 2$ erfüllt jedoch alle drei Bedingungen (S. 5-18) zugleich



Beispiel: $T_x = (15, 1, 14)$, $T_y = (20, 2, 26)$, $T_z = (22, 3)$

- ▶ $f \geq 3$ muss gelten, um jeden Job komplett durchlaufen zu lassen
- ▶ mögliche Rahmenlängen in H : 3, 4, 5, 10, 11, 15, 20, 22 ($H = 660$)
- ▶ jedoch nur $f = 3, 4$ oder 5 erfüllt alle drei Bedingungen (S. 5-18)

Entstehungsprozess eines zyklischer Ablaufplans

Gegenseitige Abhängigkeit von Entwurfsentscheidungen

1. eine Rahmenlänge festlegen (S. 5-18)
 - ▶ durch Taskparameter ggf. gegebene Konflikte erkennen und auflösen
2. Arbeitsaufträge in Scheiben aufteilen (S. 5-21)
 - ▶ insbesondere kann dies zur Folge haben, andere Programm- bzw. Modulstrukturen herleiten zu müssen
 - ▶ die erforderlichen **Programmttransformationen** geschehen bestenfalls (semi-) automatisch durch spezielle Compiler
 - ▶ schlimmstenfalls sind die Programme manuell nachzuarbeiten
3. die Arbeitsauftragsscheiben in die Rahmen platzieren

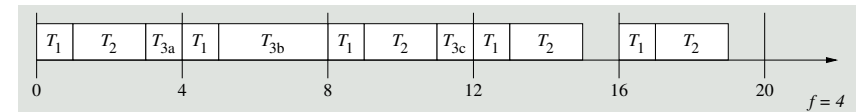
👉 Rahmenlängen sind **querschneidende nicht-funktionale Eigenschaften**

Konflikte und deren Auflösung

Taskparameter zugunsten einer guten Ablaufplananordnung korrigieren

Arbeitsaufträge sind in Scheiben zu schneiden, falls die Parameter der Aufgaben nicht alle Randbedingungen (S. 5-18) erfüllen können

- ▶ gegeben sei folgendes Tasksystem $\mathbf{T} = \{(4, 1), (5, 2, 7), (20, 5)\}$:
 - ▶ $f \geq \max(e_i)$ gilt für $f \geq 5$ und $2f - \gcd(p_i, f) \leq D_i$ gilt für $f \leq 4$ **!?**
- ▶ $T_3 = (20, 5)$ ist aufzuteilen in $T'_3 = \{(20, 1), (20, 3), (20, 1)\}$
 - ▶ d.h., in drei Teilaufgaben $T_{3a} = (20, 1)$, $T_{3b} = (20, 3)$, $T_{3c} = (20, 1)$
 - ▶ das resultierende System hat fünf Tasks und die Rahmenlänge $f = 4$



- ▶ $T_3 = (20, 5)$ in zwei Teilaufgaben aufzuteilen, bleibt erfolglos:
 - ▶ $\{(20, 4), (20, 1)\}$ geht nicht, wegen $T_1 = (4, 1)$
 - ▶ $\{(20, 3), (20, 2)\}$ geht nicht, da für $T_{3b} = (20, 2)$ kein Platz bleibt

Aperiodische Arbeitsaufträge: Einplanung

Schlupf nutzen

Ausführung aperiodischer Jobs erfolgt **im Hintergrund** periodischer Jobs

- ▶ d.h., nachdem alle Jobs mit harten Terminen durchgelaufen sind
 - ▶ genauer: alle Jobscheiben mit harten Terminen in ihren Rahmen
 - ▶ zur Erinnerung: aperiodische Jobs haben weiche oder feste Termine
- ▶ jeder Schlupf auf der gesamten Echtzeitachse kann genutzt werden
 - ▶ Rahmen werden bei Bedarf „aufgefüllt“ mit aperiodischen Jobs
 - ▶ am Rahmenende wird ein unvollendeter aperiodischer Job verdrängt
 - ▶ der evtl. Jobrest füllt einen späteren Rahmen (mit) auf...
- ▶ die Einplanungsentscheidung wird zur Laufzeit getroffen (**online**)
 - ▶ aperiodische Jobs werden ereignisbedingt und damit zufällig ausgelöst

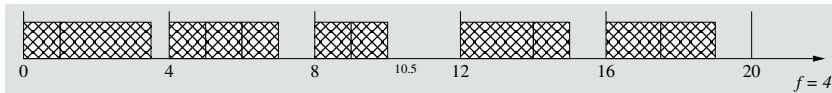
Folge: aperiodische Jobs werden zugunsten periodischer Jobs verzögert

- ▶ ihre Antwortzeit verschlechtert sich
- ▶ die Ansprechempfindlichkeit des Systems lässt nach

Aperiodische Arbeitsaufträge: Einplanung (Forts.)

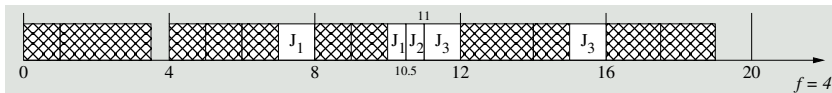
Beispiel: Major Cycle eines zyklischen Ablaufplans periodischer Jobs

- der erste große Durchlauf weist fünf Schlupfbereiche auf



- schraffierte Bereiche bedeuten statisch eingeplante periodische Jobs

- aperiod. Jobs $J_1 \mapsto 1.5(4, \infty]$, $J_2 \mapsto 0.5(9.5, \infty]$, $J_3 \mapsto 2(10.5, \infty]$



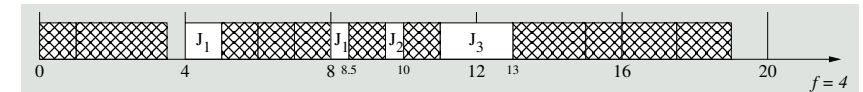
- Ausführungszeiten 1.5, 0.5 und 2
- zulässige Ausführungsintervalle (*earliest*, *latest*)
- ∞ meint: der Job hat keinen, einen weichen oder festen Termin
- mittlere Antwortzeit: $((10.5 - 4) + (11 - 9.5) + (16 - 10.5))/3 = 4.5$

Aperiodische Arbeitsaufträge: Antwortzeitverbesserung

Schlupf „stehlen“ (engl. *slack stealing*)

Schlupf in Rahmen k ist die Zeitspanne $f - x_k$, wobei x_k Zeiteinheiten bereits für Scheiben periodischer Jobs in k reserviert sind

- Ansatz ist, periodischen Jobs **Zeitpuffer am Rahmenende entziehen**
 - periodische Jobs werden ans Ende ihres Rahmens „geschoben“
 - vorne im Rahmen wird Platz für aperiodische Jobs geschaffen
- aperiodische Jobs J_1 , J_2 und J_3 , wie im Beispiel vorher (S. 5-24):



- J_1 wird sofort eingelastet, muss jedoch verdrängt werden
- J_2 wird ebenso behandelt, kann aber komplett durchlaufen
- J_3 wird verzögert bis der laufende periodische Job fertig ist
- mittlere Antwortzeit: $((8.5 - 4) + (10 - 9.5) + (13 - 10.5))/3 = 2.5$

Aperiodische Arbeitsaufträge: Einlastung

Dispatcher aperiodischer Jobs als spezialisierten periodischen Job auffassen

Ausführung aperiodischer Jobs übernimmt ein **Anbieter** (engl. *server*) mit einem eigenen, autonomen Kontrollfluss \leadsto (engl. *aperiodic server*)

- Anbieter wurde als erster Arbeitsauftrag eines Rahmens gestartet
 - für die Dauer der am Rahmenanfang verfügbaren Schlupfzeit
- er ruft die in einer Warteschlange stehenden aperiodischen Jobs auf

```

erledige aperiodischer Dispatcher (Warteschlange): /* Koroutine */
solange der Betrieb läuft tue
  wenn die Warteschlange nicht leer ist dann
    erledige
      entnehme der Warteschlange einen Arbeitsauftrag;
      rufe Arbeitsauftrag.Routine auf;
    basta;
  basta.

```

Aperiodische Arbeitsaufträge: Einlastung (Forts.)

Zusammenspiel zwischen periodischen und aperiodischen Dispatcher

Idee ist, dass der **Anbieter periodischer Jobs** (engl. *periodic server*) den „aperiodischen Dispatcher“ als **Koroutine** ausführt (S. 5-13):

```

erledige aktiviere (Arbeitsauftrag): /* aperiodischer Dispatcher */
  setze Arbeitsauftrag.Koroutine fort;
basta.

```

Zeitkontrolle sorgt für die Unterbrechung des laufenden aperiodischen Jobs, der dann im nächsten Schlupf fortgeführt wird \leadsto **Verdrängung**

```

erledige Behandlungsroutine zum Timer Interrupt:
  wenn Arbeitsauftrag.Art = aperiodisch
    dann setze periodischen Dispatcher.Koroutine fort;
  sonst breche Arbeitsauftrag ab;
basta.

```


Sporadische Arbeitsaufträge

Zufällig ausgelöste Jobs mit harten Terminen

Durchführung einer **Übernahmeprüfung** (engl. *acceptance test*) für einen sporadischen Job wenn dieser (ereignisbedingt) ausgelöst wird

- ▶ der ausgelöste Job wird angenommen, wenn seine Ausführung zusammen mit allen anderen Jobs des Systems machbar ist
 - ▶ der gegenwärtige Ablaufplan muss genügend viel Schlupf aufweisen
 - ▶ mind. soviel, wie die max. Ausführungszeit des sporadischen Jobs
 - ▶ die Ausführungszeit wird ggf. erst zum Auslösezeitpunkt bekannt
 - ▶ nur Schlupf vor dem Termin des sporadischen Jobs ist von Relevanz
 - ▶ alle Rahmen, die mit dem Termin erfasst werden, finden Beachtung
 - ▶ der Test ist gekoppelt mit der Jobeinlastung, er läuft *online* ab
- ▶ scheitert der Test, so wird der sporadische Job abgewiesen
 - ▶ Anwendung eine **schwerwiegende Ausnahmesituation** anzeigen
 - ▶ für die Ausnahmebehandlung wird soviel Zeit wie möglich freigestellt

☞ „gleichzeitige“ sporadische Jobs werden oft nach EDF getestet

Arten von Betriebswechsel

Aperiodischer oder sporadischer Job

aperiodisch ⇨ Betriebswechsel mit weichem Termin

- ▶ mit höchster Dringlichkeit ausgeführt als aperiodischer Job
 - ▶ der vor allen anderen aperiodischen Jobs zum Zuge kommt
- ▶ **Zerstörung aperiodischer/sporadischer Jobs** ist problematisch
 - ▶ die Ausführung aperiodischer Jobs wird hinausgezögert, bis der Betriebswechsel vollendet worden ist
 - ▶ im Falle sporadischer Jobs stehen zwei Optionen zur Verfügung:
 - (a) der Betriebswechsel wird unterbrochen und später fortgesetzt
 - (b) die Übernahmeprüfung berücksichtigt den neuen Ablaufplan
- ▶ Ziel ist es, die Antwortzeit für den Betriebswechsel zu minimieren

sporadisch ⇨ Betriebswechsel mit hartem Termin

- ▶ die Anwendung muss die evtl. Abweisung des Jobs behandeln
 - ▶ sie wird den Betriebswechsel ggf. hinausschieben

Rekonfiguration des Tasksystems

Änderung von Taskanzahl und -parameter

Umstellen auf einen neuen statischen Ablaufplan bedeutet mehr als nur einen **Tabellenwechsel** zu vollziehen:

1. Zerstörung und Erzeugung von periodischen Tasks

- ▶ einige periodische Tasks werden aus dem System gelöscht, wenn ihre Funktion nicht mehr erforderlich ist ⇨ **Betriebsmittelfreigabe**
- ▶ andere müssen dem System neu hinzugefügt werden, ggf. sind Programme nachzuladen ⇨ **Betriebsmittelanforderung**
- ▶ manche Tasks überdauern den Betriebswechsel, da sie im alten und neuen Tasksystem benötigt werden

2. Einlagerung und Aktivierung der neuen Ablauftabelle

- ▶ neue Taskparameter und neuer Ablaufplan wurden *a priori* bestimmt

Betriebswechsel vom speziellen Arbeitsauftrag (engl. *mode-change job*) durchführen lassen ⇨ **nichtperiodischer Job**

- ▶ ausgelöst durch ein (interaktives) Kommando zum Betriebswechsel
- ▶ verbunden mit einem weichen oder harten Termin

Resümee

Ablauftabellen ⇨ vorberechnete (statische) Ablaufpläne

- ▶ Tabelleneinträge sind Jobs und deren Einlastungszeitpunkte

Einlastung und Laufzeitkontrolle im Abfrage- oder Unterbrecherbetrieb

- ▶ Taktzähler, Zeitgeber, Zeitkontrolle; Job als Routine/Koroutine

Struktur zyklischer Ablaufpläne ⇨ „gute Anordnung“, Determinismus

- ▶ Rahmen, Rahmenlänge, Scheiben; *major/minor cycle*

nichtperiodische Arbeitsaufträge ⇨ periodische/sporadische Jobs

- ▶ Schlupf (stehlen); Einplanung, Antwortzeitverbesserung, Einlastung
- ▶ Übernahmeprüfung (engl. *acceptance test*), Ausnahmebehandlung

Betriebswechsel bewerkstelligen aperiodische oder sporadische Jobs

- ▶ Tabellenwechsel, Betriebsmittelfreigabe/-anforderung, Nachladen

Literaturverzeichnis

- [1] David Lorge Parnas.
Some hypotheses about the “Uses” hierarchy for operating systems.
Technical Report BS I 75/2, TH Darmstadt, 1975.
- [2] Theodore P. Baker and Alan C. Shaw.
The cyclic executive model and Ada.
In *Proceedings of the 9th IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS '88)*, pages 120–129, Huntsville, Alabama, USA, December 6–8, 1988.