

# Überblick

## Taktsteuerung

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

## Echtzeitsysteme

### Taktsteuerung

22. November 2010

## Arbeitsaufträge mit strikten Terminen

Alle Parameter der Arbeitsaufträge sind im Voraus bekannt

**Vorwissen** 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 zugewiesene Prozessorzeit ist gleich seiner maximalen Ausführungszeit  $\leadsto$  WCET
- ▶ Einlastung der Arbeitsaufträge geschieht streng nach Fahrplan
  - ▶ alle Termine werden im Normalfall sicher eingehalten
  - ▶ unvorhergesehene Ausnahmen<sup>1</sup> führen zu Terminüberschreitungen
- ▶ da die Einplanung *off-line* geschieht, können Algorithmen mit hoher Berechnungskomplexität zum Einsatz kommen

<sup>1</sup>Gemeint 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

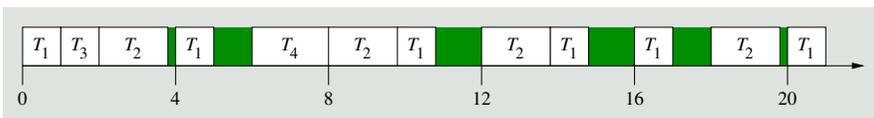
**Reihungsverfahren:** am Tabellenende wird wieder zum -anfang gesprungen

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

## Ruheintervalle periodischer Aufgaben

Arbeitsaufträge, um überschüssige Zeit zu verbrauchen...

Phasen von beabsichtigter „Untätigkeit“ zwischen den Arbeitsaufträgen:



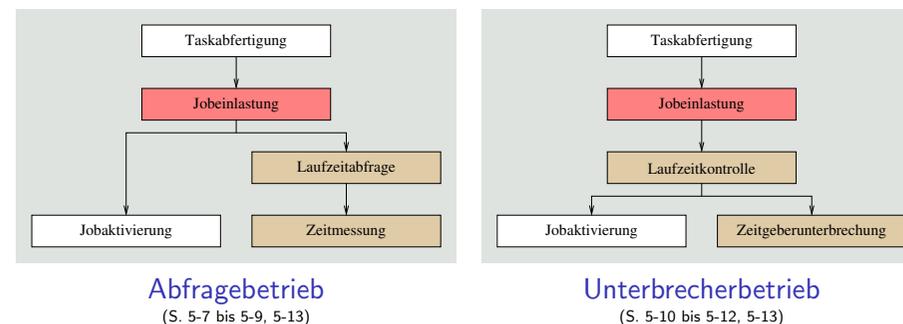
- ▶ nicht beanspruchte, freie/verfügbare Zeitintervalle in den Perioden
  - ▶ der mit periodischen Arbeitsaufträgen ggf. entstehende „Verschnitt“
- ▶ spezielle Arbeitsaufträge an die CPU, untätig (engl. *idle*) zu sein

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 (Ablauf Tabelle, Tabellenlänge):

setze Laufzähler auf ersten Eintrag der Ablauf Tabelle;

**solange** der Betrieb läuft **tue**

**erledige**

laste Ablauf Tabelle[Laufzähler].Arbeitsauftrag ein;

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

**sonst** setze Laufzähler auf ersten Eintrag der Ablauf Tabelle;

**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...

## Variantevielfalt von Arbeitsaufträgen

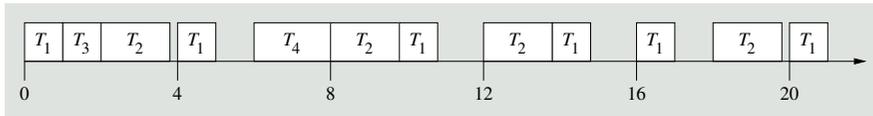
Programmiersprachliche Formulierung

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: 3,8, 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**  $\rightsquigarrow$  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  $f$

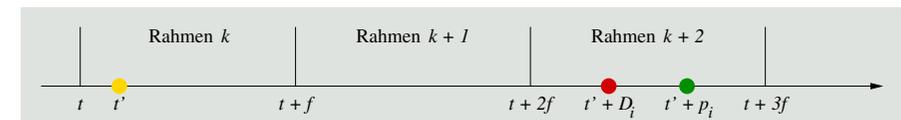
$f$  **hinreichend kurz**  $\rightsquigarrow$  Terminüberwachung unterstützen

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  $T = (p_i, e_i, D_i)$ :<sup>2</sup>



- ▶  $t$  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]

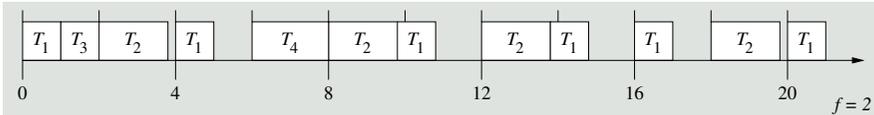
<sup>2</sup>Befindet sich  $f$  in diesem Bereich, gibt es wenigstens einen Rahmen zwischen der Auslösungszeit und dem Termin jedes Arbeitsauftrags der betreffenden Aufgabe.

## 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 **Programmtransformationen** geschehen bestenfalls (semi-) automatisch durch spezielle Compiler
  - ▶ schlimmstenfalls sind die Programme manuell nachzuarbeiten
3. die Arbeitsauftragsscheiben in die Rahmen platzieren

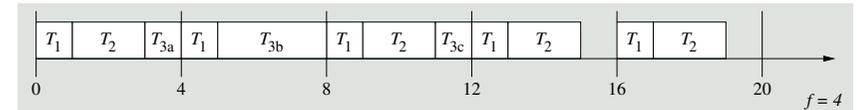
👉 Rahmenlängen sind **querschneidende nicht-funktionale Eigenschaften**

## 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

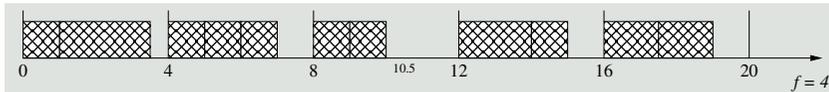
Folge: aperiodische Jobs werden zugunsten periodischer Jobs verzögert

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

## Aperiodische Arbeitsaufträge: Einplanung (Forts.)

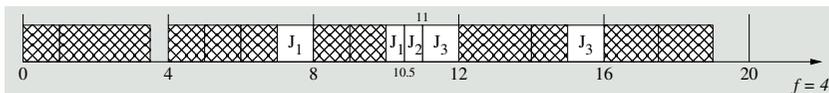
Beispiel: *Major Cycle* eines zyklischen Ablaufplans periodischer Jobs

- ▶ der erste große Durchlauf weist fünf Schlupfbereiche auf



- ▶ schraffierte Bereiche bedeuten statisch eingeplante periodische Jobs

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



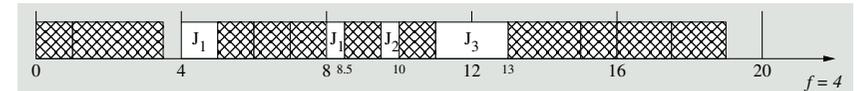
- ▶ Ausführungszeiten 1.5, 0.5 und 2
- ▶ zulässige Ausführungsintervalle (*earliest*, *latest*)
- ▶  $\infty$  meint: der Job hat keinen, einen weichen oder festen Termin
- ▶ mittlere Antwortzeit:  $((10.5 - 4) + (11 - 9.5) + (16 - 10.5))/3 = 4.5$

## 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  $\rightsquigarrow$  (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  $\rightsquigarrow$  **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

## 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  $\leadsto$  **Betriebsmittelfreigabe**
  - ▶ andere müssen dem System neu hinzugefügt werden, ggf. sind Programme nachzuladen  $\leadsto$  **Betriebsmittelanforderung**
  - ▶ manche Tasks überdauern den Betriebswechsel, da sie im alten und neuen Tasksystem benötigt werden
2. Einlagerung und Aktivierung der neuen Ablaufabelle
  - ▶ neue Taskparameter und neuer Ablaufplan wurden *a priori* bestimmt

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

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

## Arten von Betriebswechsel

Aperiodischer oder sporadischer Job

**aperiodisch**  $\mapsto$  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**  $\mapsto$  Betriebswechsel mit hartem Termin

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

## Resümee

**Ablaufpläne**  $\mapsto$  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**  $\leadsto$  „gute Anordnung“, Determinismus

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

**nichtperiodische Arbeitsaufträge**  $\mapsto$  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.