

Echtzeitsysteme

Taktsteuerung

16. November 2009

Überblick

Taktsteuerung

Ablauftabellen

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 \sim 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

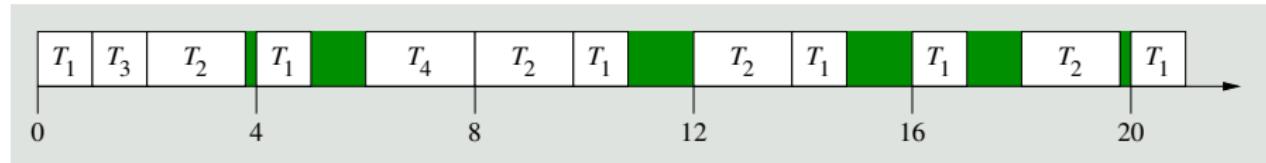
Reihumverfahren: am Tabellenende wird wieder zum -anfang gesprungen

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

Ruheintervalle periodischer Aufgaben

Arbeitsaufträge, um überschüssige Zeit zu verbrauchen...

Phasen von beabsichtigter „Untätigkeit“ zwischen den Arbeitsaufträgen:



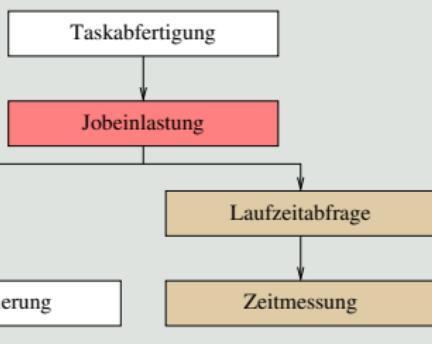
- ▶ nicht beanspruchte, freie/verfügbare Zeitintervalle in den Perioden
 - ▶ der mit periodischen Arbeitsaufträgen ggf. entstehende „Verschnitt“
- ▶ spezielle Arbeitsaufträge an die CPU, untätig (engl. *idle*) zu sein

Nutzung der Ruheintervalle für andere Zwecke kann möglich sein:

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

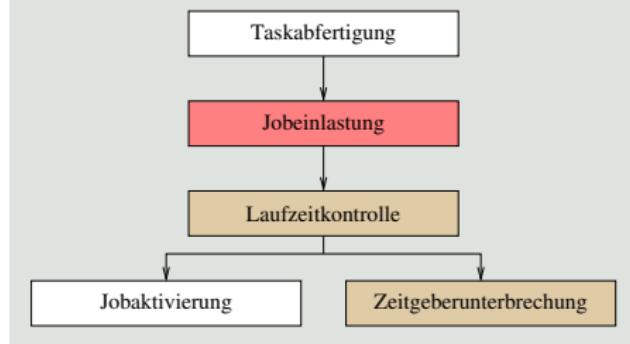
Abfertigung von Arbeitsaufträgen

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



Abfragebetrieb

(S. 5-7 bis 5-9, 5-13)



Unterbrecherbetrieb

(S. 5-10 bis 5-12, 5-13)

Benutzthierarchie

Die Benutztbeziehung [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* (Ablauftabelle, Tabellenlänge):

setze Laufzähler auf ersten Eintrag der Ablauftabelle;
solange der Betrieb läuft *tue*

erledige

laste Ablauftabelle[Laufzähler].Arbeitsauftrag ein;

wenn Laufzähler < Tabellenlänge dann erhöhe Laufzähler um 1
sonst setze Laufzähler auf ersten Eintrag der Ablauftabelle;

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: **Zeitgeberunterbrechnung** (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

- ▶ Ausführungs freigabe 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.

erledige aktiviere (Arbeitsauftrag):

setze Arbeitsauftrag.Koroutine fort;
basta.

erledige Koroutine (Arbeitsauftrag):

solange der Betrieb läuft tue
erledige

rufe Arbeitsauftrag.Routine auf;
setze Dispatcher.Koroutine fort;
basta;
basta.

Arbeitsauftrag \mapsto Routine

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

Arbeitsauftrag \mapsto Koroutine

- ▶ autonomer Kontrollfluss
- ▶ eigener Laufzeitkontext

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 → Aktivierungsblöcke zerstören

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

Koroutinenaufruf → *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

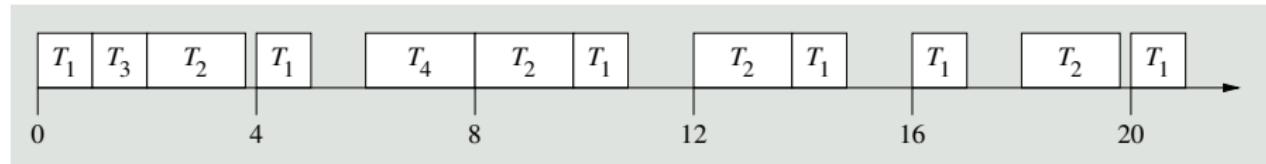
Programmiersprachliche Formulierung

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: 3.8, 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 unterteilten 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

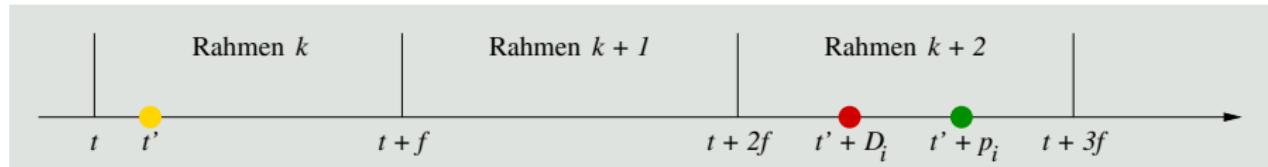
f hinreichend kurz \leadsto Terminüberwachung unterstützen

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]

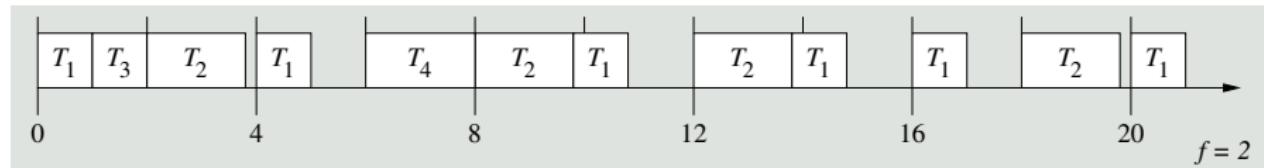
²Befindet sich f in diesem Bereich, gibt es wenigstens einen Rahmen zwischen der Auslösungszeit und dem Termin jedes Arbeitsauftrags der betreffenden Aufgabe.

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

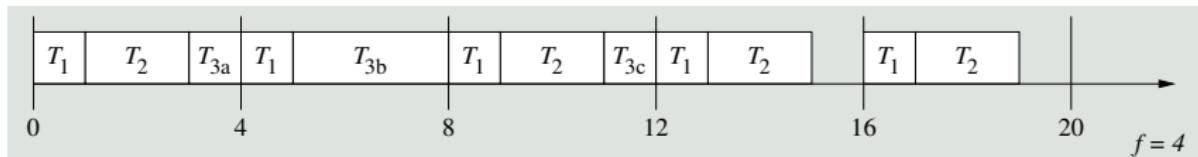
- ▶ $f \geq 3$ muss gelten, um jeden Job komplett durchlaufen zu lassen
- ▶ mögliche Rahmenlängen in H : 3, 4, 5, 10, 11, 15, 20, 22 ($H = 660$)
- ▶ jedoch nur $f = 3, 4$ oder 5 erfüllt alle drei Bedingungen (S. 5-18)

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

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 Kompilatoren
 - ▶ schlimmstenfalls sind die Programme manuell nachzuarbeiten
3. die Arbeitsauftragsscheiben in die Rahmen platzieren

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

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

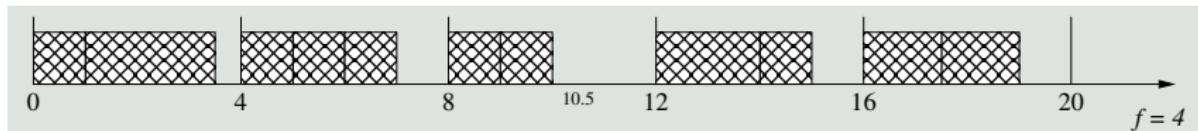
Folge: aperiodische Jobs werden zugunsten periodischer Jobs verzögert

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

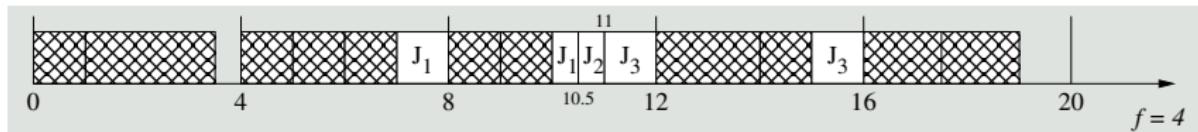
Aperiodische Arbeitsaufträge: Einplanung (Forts.)

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



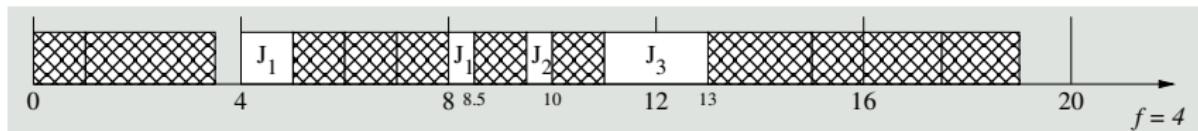
- Ausführungszeiten 1.5, 0.5 und 2
- zulässige Ausführungsintervalle (*earliest, latest*)
- ∞ meint: der Job hat keinen, einen weichen oder festen Termin
- mittlere Antwortzeit: $((10.5 - 4) + (11 - 9.5) + (16 - 10.5)) / 3 = 4.5$

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 \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 → **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 ~ **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 *à 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

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

Resümee

Ablauftabellen \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.