

Echtzeitsysteme

Abfertigung periodischer Echtzeitsysteme

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

<https://www4.cs.fau.de>

11. November 2015



Gliederung

- 1 Periodische Aufgaben
 - Zeitparameter periodischer Aufgaben
 - Periodische Echtzeitanwendungen
 - Restriktionen
- 2 Zeitgesteuerte Ausführung
 - Naive Implementierung
 - Ablauftabellen
 - Einlastung und Laufzeitkontrolle
 - Stapelbasierte Ablaufplanung
- 3 Ereignisgesteuerte Ausführung
 - Feste und dynamische Prioritäten
 - Verdrängbarkeit
 - Ereignisorientierter Planer
 - Berechnungskomplexität
- 4 Zusammenfassung



Fragestellungen

- Was zeichnet **periodische Echtzeitsysteme** aus?
 - Welches **Vorwissen** ist in solchen Systemen verfügbar?
 - Reicht dies aus, um **sinnvolle Anwendungen** umzusetzen?
 - Welchen **Restriktionen** unterliegen solche Echtzeitsysteme?
- Basismechanismen für die Abarbeitung periodischer Jobs
 - **Zeitgesteuerte Ausführung**
 - „Busy Loop“ vs. Ablauftabellen
 - zeitgesteuerte Abfertigung von Arbeitsaufträgen
 - **Ereignisgesteuerte Ausführung**
 - ereignisorientierte Einplanung
 - feste und dynamische Prioritäten
 - Berechnungskomplexität: Ablauftabelle vs. Ablaufliste



Periodische Aufgabe (engl. *periodic task*)

Vorwissen

Periodische Aufgaben

Aufgaben die in **regelmäßigen Zeitintervallen**¹ kontinuierlich eine vorgegebene Systemfunktion erbringen.
Eine periodische Aufgabe (T_i) ist eine Abfolge von Arbeitsaufträgen ($J_{i,j}$) mit vorgegebenen zeitlichen Eigenschaften.



$$T_i = (p_i, e_i, D_i, \phi_i)$$

p_i Periode (engl. *period*)

e_i Maximale Ausführungszeit (WCET)

D_i Relativer Termin (engl. *deadline*)

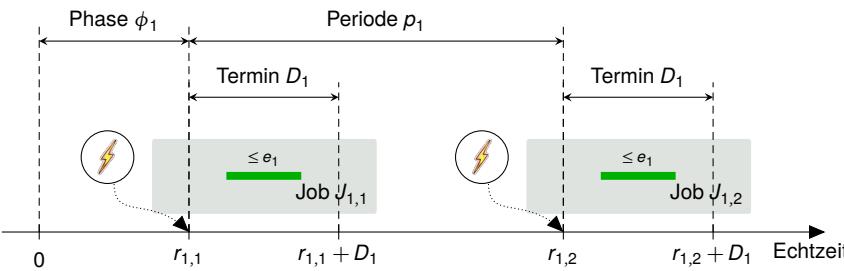
ϕ_i Phase (engl. *phase*)

$$J_{i,j} = (r_{i,j}, e_{i,j}, d_{i,j})$$

¹Nach [1, S. 40 ff] ist eine periodische Aufgabe nicht wirklich periodisch, da die Abstände zwischen den **Auslösezeiten** (engl. *interrelease time*) eines Arbeitsauftrags einer periodischen Aufgabe nicht der Periode selbst entsprechen müssen. Anderswo werden solche Aufgaben verschiedentlich als sporadische Aufgaben bezeichnet.



Periodische Aufgaben auf der Echtzeitachse



- WCET e_i : Maximale Ausführungszeit aller Jobs $J_{i,j}$ in T_i
relativer Termin D_i : Maximale Spanne zwischen Auslösezzeit $r_{i,j}$ und Fertigstellung \rightarrow absoluter Termin $d_{i,j}$ von $J_{i,j}$
Periode p_i : Minimale Länge aller Zeitintervalle $[r_{i,j}, r_{i,j+1}]$ zwischen den Auslösezzeiten der Jobs in T_i
Phase ϕ_i : Auslösezzeit $r_{i,1}$ des ersten Jobs $J_{i,1}$ in T_i (Abstand von Beginn der Hyperperiode)



Periodische Echtzeitsysteme in der Praxis

Lassen sich Echtzeitsysteme ausschließlich aus periodischen Aufgaben aufbauen?

Rückgekoppelte Regelschleife (engl. *feedback control loop*)

initialisiere Stellwert;
initialisiere Zeitgeber und Unterbrecher;
bei Zeitgeberunterbrechung erledige /* abtasten, regeln, steuern */
A/D-Wandlung der Echtzeitinstanz, Echtzeitabbild ziehen;
Echtzeitdatenbasis aktualisieren, neuen Stellwert berechnen;
D/A-Wandlung des Stellwerts, Echtzeitinstanz verändern;
basta

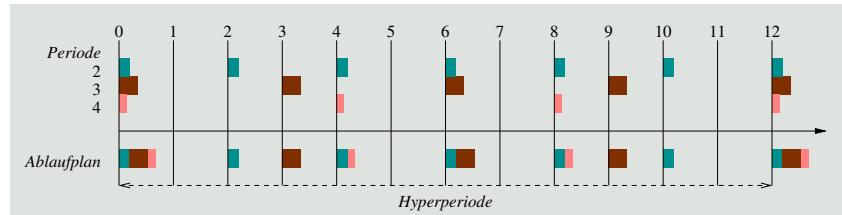


- Die Berechnung von Stellwerten für Aktoren ist eine typische Aufgabe von Echtzeitsystemen
- Das kontrollierte Objekt erfährt eine **direkte digitale Regelung**
 - Regelungsanwendungen zeigen dabei eine hohe **Regelmäßigkeit**
→ Meist endlose Sequenz von Regelzyklen



Hyperperiode

Wiederholung eines periodischen Aufgabensystems



Die Hyperperiode H

- Kleinstes gemeinsame Vielfache aller Perioden: $kgV(p_1 \dots p_i)$
- Startpunkt für Phasenversatz und Berechnung der Auslastung
- Maximale Anzahl aller Arbeitsaufträge in H ist $\sum_{i=1}^n H/p_i$
 - Hier: $(12/2) + (12/3) + (12/4) = 13$



- Phasenversatz \sim **Schwankungen** in den Einlastungszeiten
→ Falls mehrere Arbeitsaufträge zum selben Auslösezzeitpunkt anstehen



Periodische Echtzeitsysteme in der Praxis (Forts.)

Lassen sich Echtzeitsysteme ausschließlich aus periodischen Aufgaben aufbauen?



- Periodische Regelungsaufgaben im I4Copter:
 - alle 3 ms Sensorabtastung, Sensordatenfusion
 - alle 9 ms Fluglageregelung
 - alle 21 ms Höhenregelung



- Die **zeitliche Auflösung** der Regelung richtet sich nach der **Objektdynamik** (vgl. Folie III-1/7)



Restriktionen des periodischen Modells

Verzicht auf Entwicklungskomfort zugunsten einer realistischeren Analyse

⚠ Mathematische Ansätze zur **zeitlichen Analyse** periodischer Echtzeitsysteme bedingen häufig **starke Einschränkungen**:

- A1** Alle Aufgaben sind periodisch
- A2** Alle Arbeitsaufträge können an ihren Auslösezeitpunkten eingeplant und ausgeführt werden
- A3** Termine und Perioden sind identisch
- A4** Kein Arbeitsauftrag gibt die Kontrolle über den Prozessor ab
- A5** Alle Aufgaben sind unabhängig²
- A6** Die Kosten durch Unterbrechungen, Ablaufplanung und Verdrängung sind vernachlässigbar
- A7** Alle Aufgaben verhalten sich voll-präemptiv

²D.h. die einzige gemeinsame Ressource ist die CPU und es existieren keine Einschränkungen hinsichtlich der Auslösezeiten der Arbeitsaufträge voneinander.



Gliederung

- 1** Periodische Aufgaben
 - Zeitparameter periodischer Aufgaben
 - Periodische Echtzeitanwendungen
 - Restriktionen
- 2** Zeitgesteuerte Ausführung
 - Naive Implementierung
 - Ablauftabellen
 - Einlastung und Laufzeitkontrolle
 - Stapelbasierte Ablaufplanung
- 3** Ereignisgesteuerte Ausführung
 - Feste und dynamische Prioritäten
 - Verdrängbarkeit
 - Ereignisorientierter Planer
 - Berechnungskomplexität
- 4** Zusammenfassung



Implikationen

Einschränkungen, die Einfluss auf Anwendungen ausüben

- **Betriebsmittel:** Gemeinsame Betriebsmittel sind **nicht möglich**
 - ⚠ Implizieren Synchronisation
 - Aufgaben sind nicht mehr unabhängig
 - ⚡ I4Copter: Sensoren teilen sich den SPI-Bus
- **Rangordnung:** Komplexe Aufgaben können **nicht geteilt werden**
 - ⚠ Kooperative Diensterbringung ~ Koordinierung mehrerer Aufgaben
 - Aufgaben sind nicht mehr unabhängig
 - ⚡ I4Copter: Sensorik, Fusion und Regelung sind aufgeteilt
- **Kommunikation:** Aufgaben können **nicht synchron kommunizieren**
 - ⚠ Fortschritt hängt von Nachrichtenhandhabung ab
 - Aufgaben sind nicht mehr unabhängig
 - ⚡ I4Copter: Sychrone Telemetriedatenübertragung



Die Busy Loop

Die wirklich einfachste Variante für die Implementierung zyklischer Systeme?



Periodische Aufgaben wiederholt in einer Schleife ausführen

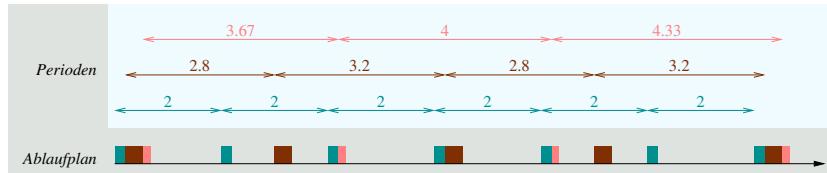
```
int main(void) {  
    unsigned long cnt = 0;  
    while(1) {  
        warte_durchlauf();  
        kontrolle_start();  
        aufgabe1();  
        kontrolle_stop();  
        if(cnt % 2 == 0) {  
            aufgabe2_1();  
        }  
        10ms_nach_aufgabe1();  
        if(cnt % 2 == 0) {  
            aufgabe2_2();  
        }  
        ++cnt;  
    }  
    return 0;  
}
```



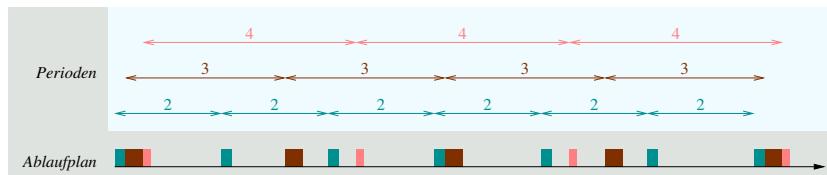
- Längere Perioden lassen sich durch einen **Rundenzähler** ableiten
 - die Schleife definiert einen **Rahmen**
 - Ausrichtendes Raster für alle Aktivitäten
- Explizite Überwachung der **Rahmendauer**
 - Ausführungszeit ist i.d.R. **nicht konstant**
- Schwierige Spezifikation **zeitlichen Versatzes**
 - Abhängigkeit von der **tats. Ausführungszeit**
- Konflikte durch **lange andauernde Jobs**
 - Evtl. ist eine **manuelle Aufteilung** nötig
- **Überwachung** der Ausführungszeit
 - Schwieriger **Abbruch** des betroffenen Jobs

Genauigkeit periodischer Aufgaben

Einfluss der Einplanung auf Schwankungen in der Einlastung



- Bis auf Periode 2 sind alle anderen Jobs nicht wirklich periodisch



- Alle Jobs laufen wirklich periodisch ab: Jobabstand = Periode



Abarbeitung statischer Ablaufpläne

Tabellengesteuerte Einlastung von Arbeitsaufträgen

- Vorberechneter (statischer) Ablaufplan \mapsto Ablauftabelle
 - Jeder Tabelleneintrag entspricht einer Einplanungsentscheidung zu einem (vorab) bestimmten Zeitpunkt auf der Echtzeitachse
 - Bei Einlastung wird ein **Zeitgeber** (engl. *timer*) programmiert und der Arbeitsauftrag wird gestartet
 - Kurzzeitwecker auf nächsten Entscheidungszeitpunkt stellen
 - Einzustellender Wert ist im aktuellen Tabelleneintrag zu finden
 - Ein **Zeitgebersignal** schaltet zum nächsten Tabelleneintrag weiter

- Am Tabellenende wird wieder zum -anfang gesprungen
 - Zyklischer Ablaufplan** (engl. *cyclic schedule*) periodischer Aufgaben
 - Die **Hyperperiode** (siehe IV-1/6) gibt die Tabellengröße vor



Ein Ablaufplan gibt den Takt vor

Falls alle Parameter der Arbeitsaufträge im Voraus bekannt sind ...



Vorabwissen ermöglicht Ablaufpläne *off-line* zu erstellen

- Alle Programme und das System verhalten sich **deterministisch**
 - Oder noch besser **vorhersagbar** (vgl. Folien II/15 ff)



Statischer Ablaufplan \mapsto exakter Fahrplan

- Feste Angaben wann welche Arbeitsaufträge auszuführen sind
- Zugeteilte Prozessorzeit \mapsto maximalen Ausführungszeit (WCET)
- Einlastung der Arbeitsaufträge geschieht streng nach Fahrplan
 - Alle Termine werden im Normalfall sicher eingehalten
 - ⚠️ Unvorhergesehene Ausnahmen³ führen zu Terminüberschreitungen
- Durch *off-line* Einplanung können Algorithmen mit hoher Berechnungskomplexität zum Einsatz kommen

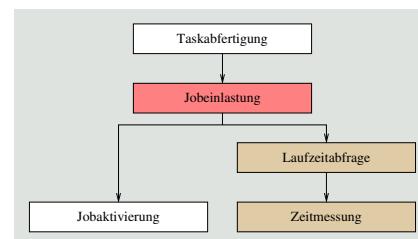


³Gemeint sind hier die synchronen Programmunterbrechungen (d.h., *Traps*), z.B. aufgrund von Berechnungs- und/oder Adressierungsfehlern.

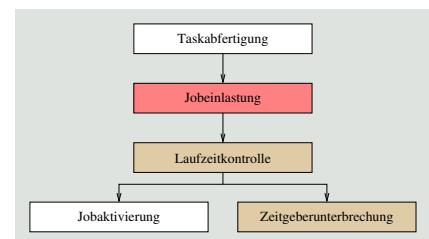


Abfertigung von Arbeitsaufträgen

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



Abfragebetrieb
(S. IV-1/18 bis IV-1/19)



Unterbrecherbetrieb
(S. IV-1/20 bis IV-1/22)



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**



Abfragebetrieb im Rückblick

Verzögerungsproblematik bei Taktzähler und Zeitkontrolle

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

- Nachdem ein aktiverter 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: Termineinhaltung ist jederzeit garantiert

- Die WCET muss die Behandlung evtl. Fehlersituationen einschließen

☞ Alternative: **Zeitgeberunterbrechnung** (engl. *timer interrupt*)



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 **Taktzähler** (engl. *clock counter*) der Hardware

- Entscheidungszeitpunkt muss als Taktzahl vorliegen oder in eine Taktzahl umgerechnet werden können
 - 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 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
 - Zeitgebersignalmarke, die beim Konsumieren gelöscht wird
 - **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 *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*



Stapelbasierte Abarbeitung von Ablauftabellen

Mischung aus lang andauernden und häufig wiederkehrenden Jobs unterstützen



Batch Processing führt einen Job nach dem anderen aus

- Lang andauernde Jobs verzögern kurze, häufig wiederkehrende Jobs
- Diese Jobs verpassen u.U. deshalb ihre Termine
 - Alternativ müssen lange Jobs aufgeteilt werden



Stapelbasierte Abarbeitung von Ablauftabellen

- Eingelastete Job verdrängt den aktuell ausgeführten Job
 - ⚠ Der ausgeführte Job wird nicht abgebrochen
 - Mehrere kurze Jobs während eines langen Jobs ausführen



Kontrolle des ausgeführten Jobs wird schwieriger

- Entscheidungszeitpunkte ermöglichen Einlastung oder Kontrolle eines Jobs, **beides zugleich ist i.A. nicht möglich**
- Ausführungszeit eines Jobs muss explizit protokolliert werden
- Alternativ wird eine **Terminüberwachung** statt einer Laufzeitkontrolle durchgeführt (z.B. OSEKtime [2])



Synchronisation durch unterbrechende Zeitkontrolle

Jobeinlastung, Laufzeitkontrolle, Zeitgeberunterbrechung: Unbedingter Jobabbruch

erledige Behandlungsroutine zum *Timer Interrupt*:

breche Arbeitsauftrag ab;
basta.

Ausnahmefall:

- Zeitkontrolle läuft bei Überschreitung der WCET des Arbeitsauftrags ab

erledige kontrolliere (Arbeitsauftrag):

lässe Unterbrechung durch Zeitkontrolle zu;
aktiviere Arbeitsauftrag;
wehre Unterbrechung durch Zeitkontrolle ab;
basta.

erledige laste ein (Arbeitsauftrag):

richte Zeitkontrolle aus auf Arbeitsauftrag.Entscheidungszeitpunkt;
kontrolliere Arbeitsauftrag;
solange Zeitkontrolle ≠ 0 tue nichts;
basta.

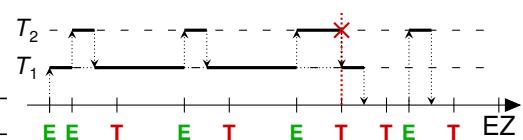


Stapelbasierte Abarbeitung von Ablauftabellen

Beispiel – $T_1 = (p : 20, e : 10, D : 15, \phi : 0)$, $T_2 = (5, 1, 2, 1)$

mögliche Ablauftabelle:

Aktion	Aufgabe	Zeit
E	T_1	0
E	T_2	1
T	T_2	3
E	T_2	6
T	T_2	8
E	T_2	11
T	T_2	13
T	T_1	15
E	T_2	16
T	T_2	18



$t = 0$ T_1 einlasten

$t = 1, 6, 11$ T_2 einlasten, T_1 verdrängen

$t = 2, 7$ T_2 terminiert, T_1 fortsetzen

$t = 13$ T_2 verfehlt seinen Termin
~ Ausnahme auslösen, T_2 abbrechen

$t = 14$ T_1 terminiert

$t = 16$ T_2 einlasten

$t = 17$ T_2 terminiert



Gliederung

- 1 Periodische Aufgaben
 - Zeitparameter periodischer Aufgaben
 - Periodische Echtzeitanwendungen
 - Restriktionen
- 2 Zeitgesteuerte Ausführung
 - Naive Implementierung
 - Ablauftabellen
 - Einlastung und Laufzeitkontrolle
 - Stapelbasierte Ablaufplanung
- 3 Ereignisgesteuerte Ausführung
 - Feste und dynamische Prioritäten
 - Verdrängbarkeit
 - Ereignisorientierter Planer
 - Berechnungskomplexität
- 4 Zusammenfassung



Prioritätsorientierte Algorithmen

Klassifikation

- ☞ Verfahren zur **prioritätsorientierten Einplanung** periodischer Arbeitsaufträge werden folglich in zwei Gruppen eingeteilt:
- Feste Priorität** (engl. *fixed priority* oder *static priority*)
 - Priorität der Aufträge einer Aufgabe sind **unveränderlich**
 - Die Aufgabenpriorität steht unabhängig von der Auslösung bzw. Beendigung von Arbeitsaufträgen fest
 - Prioritäten werden **statisch zum Entwurfszeitpunkt** vergeben

- Dynamische Priorität** (engl. *dynamic priority*)
 - Priorität der Aufträge einer Aufgabe sind **veränderlich**
 - Aufgabenpriorität variiert relativ zu anderen Aufgaben, wenn Arbeitsaufträge ausgelöst bzw. beendet werden
 - Prioritäten werden **dynamisch zur Laufzeit** vergeben



Ereignisorientierte Einplanung

(engl. *event-driven scheduling*)

- ⚠ Einplanung von Arbeitsaufträgen erfolgt zu **Ereigniszeitpunkten**
 - Ihr Auftreten ist nicht (exakt) vorhersehbar
 - Ereignisauslöser sind kontrollierte Objekte/andere Arbeitsaufträge
 - Die Ereignisverarbeitung unterliegt einer gewissen **Dringlichkeit**
- ☞ **Ereignisse haben Prioritäten** die dem Ereignisauslöser und/oder der Ereignisverarbeitung zugeordnet sind
- Feste Zuordnung** → Ereignisverarbeitung/-auslöser
 - Arbeitsaufträgen erhalten **absolute Priorität**
- Variable Zuordnung** → Ereignisverarbeitung
 - Arbeitsaufträgen erhalten **relative Priorität**
- auch **prioritätsorientierte Einplanung** (engl. *priority-driven scheduling*)



Verfeinerte Klassifikation

Ein Frage der Betrachtungsebene...

- ☞ Verschiedene Kategorien von Einplanungsalgorithmen
 - **Feste Priorität** wie gehabt (siehe IV-1/27)
 - **Dynamische Priorität** (engl. *task-level dynamic-priority*)
 - Feste Priorität auf Jobebene (engl. *job-level fixed-priority*)
 - Dynamische Priorität auf Jobebene (engl. *job-level dynamic-priority*)
- ⚠ **Praxisrelevanz** haben Verfahren, die Arbeitsaufträgen feste Prioritäten zuweisen
 - Zuweisung erfolgt jedoch zum Auslösezeitpunkt eines Auftrags
 - Wenn er ereignisbedingt auf die **Bereitliste** (engl. *ready list*) kommt
 - Die Priorität eines ausgelösten Auftrags bleibt gleich
 - Auf Jobebene sind die Prioritäten fest, auf Taskebene aber variabel
- ☞ **dynamische Priorität** → dynamisch auf Task- und fest auf Jobebene



Verdrängbarkeit

Verschränkung (engl. *interleaving*) von Arbeitsaufträgen

- ⚠️ Arbeitsaufträge kann(t)en verschränkt ausgeführt werden, wenn:
- Diese verdrängbar sind (typischerweise durch den Planer)
 - Die Zeitbedingungen (engl. *time constraints*) es erlauben

☞ Präemptivität (engl. *preemptivity*) ist eine Eigenschaft des jeweiligen Arbeitsauftrags:

- **Verdrängbar** (engl. *preemptable*) ist ein Arbeitsauftrag, wenn seine Ausführung suspendiert werden darf
 - An beliebigen Stellen (engl. *fully preemptive*)
 - An ausgewiesenen Stellen (engl. *preemption points*)
- **Unverdrängbar** (engl. *non-preemptable*), sonst
 - Der Arbeitsauftrag läuft durch (engl. *run-to-completion*)

☞ Mischbetrieb ~ Präemptivität als **Jobattribut** implementiert



Aufbau und Berechnungskomplexität

Feste/Dynamische Prioritäten und Ablauftabellen/-listen

- Ablaufliste → **Dynamische** Datenstruktur
 - Prioritäten entsprechen der Position innerhalb der Ablaufliste
 - Das (relative) Prioritätsgefüge passt sich zur Laufzeit an
 - Eignung für die Implementierung **dynamischer Prioritäten**
 - Linearer Berechnungsaufwand zum Auslösezeitpunkt
 - Vorabwissen zur **WCET des Sortievorgangs** ist gefordert
 - Nahezu konstanter Berechnungsaufwand zum Auswahlzeitpunkt
 - Jobs vom Kopf her der (ggf. einfach verketteten) Liste entnehmen
- Ablauftabelle → **Statische** Datenstruktur
 - Prioritäten werden fest auf Tabellenindizes abgebildet
 - Zur Laufzeit unveränderliches Gefüge absoluter Prioritäten
 - Eignung für die Implementierung **fester Prioritäten**
 - Konstanter Berechnungsaufwand zum Auslösezeitpunkt
 - Jobs durch indizierte Adressierung in die Tabelle aufnehmen
 - Ggf. ist ein Tabelleneintrag eine Jobliste (FIFO) gleicher Priorität
 - Linearer Berechnungsaufwand zum Auswahlzeitpunkt
 - Vorabwissen zur **WCET des Suchvorgangs** ist gefordert
 - Tabelleneinträge können leer sein und sind zu überspringen



Ereignisorientierter Planer

(engl. *event-driven scheduler*)

- Einplanung ereignisbedingt ausgelöster Arbeitsaufträge resultiert in einer **dynamischen Datenstruktur** → sortierte Liste

⚠️ Kritisch ist die **Berechnungskomplexität** und wann sie anfällt

- Gekoppelt mit der Einlastung: **online scheduling** (siehe III-2/15 ff)
- Konstant oder variabel, dann jedoch mit oberer Schranke → WCET
- Zum **Auslöse-** oder **Auswahlzeitpunkt** von Arbeitsaufträgen

☞ Priorität bildet den **Sortierschlüssel** (engl. *sort key*)

- Ergibt sich ggf. erst zum Ereigniszeitpunkt aus der Priorität der von ihm zu verarbeitenden **Ereignissen**
- Ist eindeutig abzubilden auf einen endlichen Wertebereich

also auch **prioritätsorientierter Planer** (engl. *priority-driven scheduler*)



Berechnungskomplexität (Forts.)

Ablaufliste vs. Ablauftabelle

Ablaufliste

```
Job *list = 0;  
  
void release(Job *item) {  
    Job* last = 0, tail = list;  
  
    while(tail && outrank(tail,item)) {  
        last = tail;  
        tail = last->next;  
    }  
  
    if(!last) {  
        item->next = list; list = item;  
    } else {  
        item->next = tail;  
        last->next = item;  
    }  
}  
  
Job* extract() {  
    Job* item = list;  
    if(item) list = item->next;  
    return item;  
}
```

release $O(n)$

extract nahezu $O(1)$

Ablauftabelle

```
Job* table[Jobs];  
  
void release(Job *item) {  
    assert((priority(item) >= 0)  
        && (priority(item) <= Jobs - 1));  
    item->state = Ready;  
}  
  
Job* extract() {  
    for(uint slot = 0; slot < Jobs; slot++)  
        if(table[slot]->state == Ready) {  
            table[slot]->state = Selected;  
            return table[slot];  
        }  
    return 0;  
}
```

release $O(1)$

extract $O(n)$, obere Schranke Jobs



Multi-Level-Queue-Scheduler, MLQ-Scheduler

Häufig anzutreffende Sonderform der Ablauftabelle

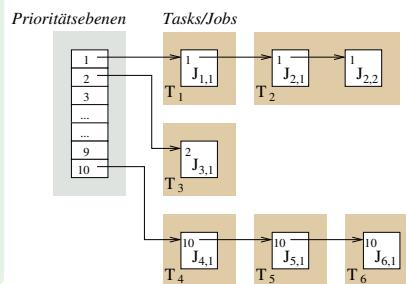
- Eine Ablaufliste je Priorität, organisiert als FIFO
- Ablauflisten werden in einer Ablauftabelle verwaltet

Multi-Level-Queue

```
Job* table[Jobs];
void release(Job *item) {
    assert((prior(item) >= 0)
        && (prior(item) <= Jobs - 1));
    item->state = Ready;
    append(table[prior(item)], item);
}

Job* extract() {
    for(uint slot = 0; slot < prios; slot++)
        if(!empty(table[slot])) {
            Job *item = head(table[slot]);
            item->state = Selected;
            return item;
        }
    return 0;
}
```

- Mehrere Tasks pro Priorität
- Mehrere Jobs pro Task
- Reihenfolge der Auslösung



Prioritätsorientierter O(1)-Scheduler (Forts.)

!?

Eine Abwägungsfrage...



Vorrangsteuerung ist mit grundsätzlichen Konflikten konfrontiert:

- Entweder Jobauslösung oder Jobauswahl mit $O(1)$ zu versehen
 - Beides zugleich geht nicht



Für Jobauslösung in $O(1)$ spricht:

- Ereignisgesteuerte Auslösung benötigen konstante Zeit
 - Z.B. als Folge eines *Interrupts* oder der Zustellung eines *Zeitsignals*
 - Bedeutsam für voll-verdrängbare Systeme
- Ereignisbedingte Jobverzögerungen lassen sich exakt bestimmen



Für Jobauswahl in $O(1)$ spricht:

- Übergang zum nachfolgenden Job benötigt konstante Zeit
 - Z.B. wenn der aktuelle Job durchgelaufen ist oder blockiert



Linux (bis 2.6), Mach, QNX, ..., VxWorks verhelfen Jobauslösung zu $O(1)$

Prioritätsorientierter O(1)-Scheduler

!?

Die Tüte liegt oft im Detail...

☞ Jobauslösung mit konstantem Aufwand $O(1)$ erfordert:

- Ablaufplan ist dynamische Datenstruktur (Tabelle) aus mehreren Prioritätsebenen
 - Wartelisten \rightarrow LIFO
 - Warteschlangen \sim FIFO
- Jobs die über denselben Tabelleneintrag erfasst werden besitzen dieselbe Priorität \sim Prioritätsschlange
 - Sonst könnte LIFO/FIFO Prioritätsverletzung zur Folge haben
- Anzahl der Tabelleneinträge entspricht mindestens der Anzahl statisch zugewiesener Prioritäten
 - Ggf. werden dann nahezu alle Tabelleneinträge nur einen Job erfassen
 - Abhängig von der Echtzeitanwendung und dem Einplanungsverfahren

Jobauswahl ist unter diesen Bedingungen nicht in $O(1)$ möglich:

- Leere Tabelleneinträge sind ggf. zu überspringen



Gliederung

- Periodische Aufgaben
 - Zeitparameter periodischer Aufgaben
 - Periodische Echtzeitanwendungen
 - Restriktionen
- Zeitgesteuerte Ausführung
 - Naive Implementierung
 - Ablauftabellen
 - Einlastung und Laufzeitkontrolle
 - Stapelbasierte Ablaufplanung
- Ereignisgesteuerte Ausführung
 - Feste und dynamische Prioritäten
 - Verdrängbarkeit
 - Ereignisorientierter Planer
 - Berechnungskomplexität
- Zusammenfassung



Periodische Aufgaben haben in Echtzeitsystemen eine weite Verbreitung

- Periode, Phase, Hyperperiode, digitale Kontrollschleife
- Restriktionen periodischer Aufgaben und ihre Einschränkungen

Zeitgesteuerte Ausführung periodischer Aufgaben

- naive „*Busy Loop*“-Implementierung und Ablauftabellen
- Laufzeitkontrolle im Abfrage- und Unterbrecherbetrieb
- stapelbasierte Ablaufplanung

Ereignisgesteuerte Ausführung periodischer Aufgaben

- Ereignis- bzw. prioritätsorientierte Einplanung
- Feste und dynamische Prioritäten auf Task- bzw. Job-Ebene
- Auslösung vs. Auswahl, Ablaufliste vs. Ablauftabelle
- *Multi-Level-Queue-Scheduler*, Prioritätsorientierter $O(1)$ -Scheduler



EZS – Cheat Sheet

Typographische Konvention

Der erste Index gibt die Aufgabe an (z. B. D_i), der Zweite (optional) bezieht sich auf den Arbeitsauftrag (z. B. $d_{i,j}$). Exponenten zeigen verschiedene Varianten einer Eigenschaft an (z. B. T^{HI}, T^{MED}, T^{LO}). Funktionen beschreiben zeitlich variirende Eigenschaften (z. B. $P(t)$).

Temporale Eigenschaften

Allgemein

r_i Auslösezeitpunkt (engl. release time)

e_i Maximale Ausführungszeit (WCET)

D_i Relativer Termin (engl. deadline)

d_i Absoluter Termin

ω_i Antwortzeit (engl. response time)

Periodische Aufgaben

p_i Periode (engl. period)

ϕ_i Phase (engl. phase)

Strukturelemente

E_i Ereignis (engl. event)

R_i Ergebnis (engl. result)

T_i Aufgabe (engl. task)

$J_{i,j}$ Arbeitsauftrag (engl. job) der Aufgabe T_i gäbe T_i



- [1] Liu, J. W. S.:
Real-Time Systems.
Englewood Cliffs, NJ, USA : Prentice Hall PTR, 2000. –
ISBN 0-13-099651-3

- [2] OSEK/VDX Group:
Time Triggered Operating System Specification 1.0 / OSEK/VDX Group.
2001. –
Forschungsbericht. –
<http://portal.osek-vdx.org/files/pdf/specs/ttos10.pdf>

