

# Echtzeitsysteme

## Abfertigung periodischer Echtzeitsysteme

**Peter Ulbrich**

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

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

18. November 2016



- Was zeichnet **periodische Echtzeitsysteme** aus?
  - Welches **Vorabwissen** ist in solchen Systemen verfügbar?
  - Reicht dies aus, um **sinnvolle Anwendungen** umzusetzen?
  - Welchen **Restriktionen** unterliegen solche Echtzeitsysteme?
  
- Basismechanismen für die Abarbeitung periodischer Aufträge
  - **Zeitgesteuerte Ausführung**
    - Offline-Einplanung (vgl. III-2/17)
    - Getaktete Abfertigung von Arbeitsaufträgen
    - „*Busy Loop*“ vs. Ablauftabellen
  - **Ereignisgesteuerte Ausführung**
    - Online-Einplanung (vgl. III-2/17)
    - Unterschied zwischen festen und dynamischen Prioritäten
    - Berechnungskomplexität

- 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





## Periodische Aufgaben

Aufgaben die in **regelmäßigen Zeitintervallen**<sup>1</sup> 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*)

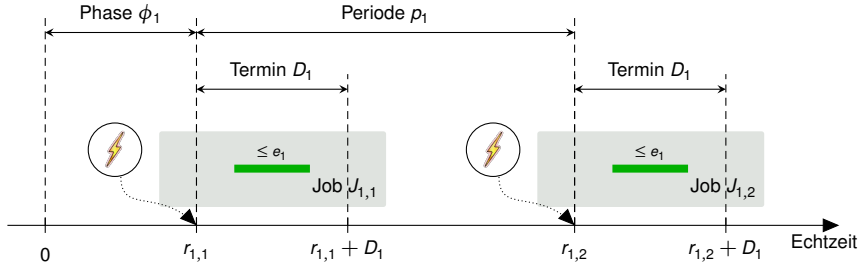
$\phi_i$  Phase (engl. *phase*)

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

<sup>1</sup>Nach [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



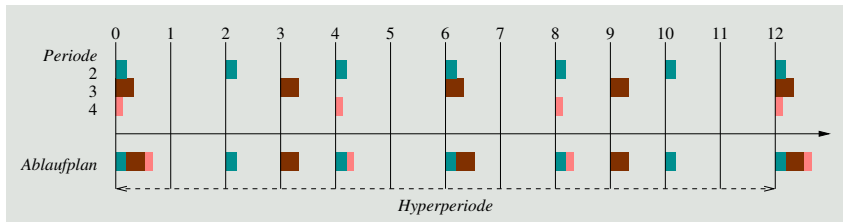
- WCET  $e_i$**  Maximale Ausführungszeit aller Aufträge  $J_{i,j}$  in  $T_i$
- relativer Termin  $D_i$**  Maximale Spanne zwischen Auslösezeit  $r_{i,j}$  und Fertigstellung  $\rightarrow$  absoluter Termin  $d_{i,j}$  von  $J_{i,j}$
- Periode  $p_i$**  Minimale Länge aller Zeitintervalle  $[r_{i,j},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





# 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  $\leadsto$  **Schwankungen** in den Einlastungszeiten

→ Falls mehrere Arbeitsaufträge zum selben Auslösezeitpunkt anstehen



## 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



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 unabhängig<sup>2</sup>
- A6** Die Kosten durch Unterbrechungen, Ablaufplanung und Verdrängung sind vernachlässigbar
- A7** Alle Aufgaben verhalten sich voll-präemptiv

---

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



- **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 Dienstleistung  $\leadsto$  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:** Synchrone Telemetriedatenübertragung



- 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





# Die *Busy Loop*

Die wirklich einfachste Variante für die Implementierung zyklischer Systeme?



Periodische Aufgaben wiederholt in einer Schleife ausführen

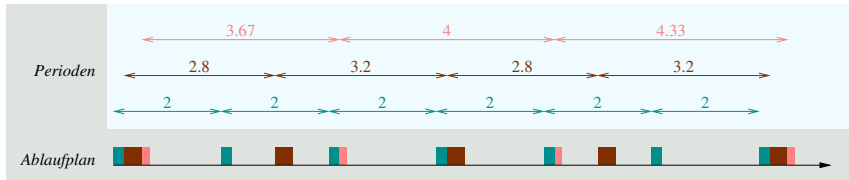
```
int main(void) {  
    unsigned long cnt = 0;  
    while(1) {  
        warte_durchlauf();  
        kontrolle_start();  
        aufgabe1();  
        kontrolle_stop();  
        if(cnt % 2 == 0) {  
            aufgabe2_1();  
        }  
        10ms_nach_aufgabe1();  
        if(cnt % 2 == 0) {  
            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 Aufträge**
  - Evtl. ist eine **manuelle Aufteilung** nötig
- **Überwachung** der Ausführungszeit
  - Schwieriger **Abbruch** des betroffenen Auftrags

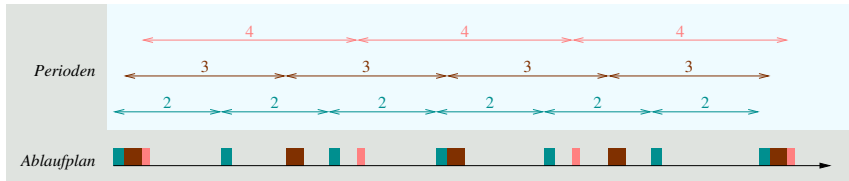


# Genauigkeit periodischer Aufgaben

Einfluss der Einplanung auf Schwankungen in der Einlastung



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



- Alle Aufträge laufen wirklich periodisch ab: Auftragsabstand = Periode



# Ein Ablaufplan gibt den Takt vor

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



**Vorabwissen** ermöglicht Ablaufpläne *off-line* zu erstellen (vgl. III-2/17)

- 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 Ausnahmen<sup>3</sup> führen zu Terminüberschreitungen



Durch *off-line* Einplanung können Algorithmen mit **hoher Berechnungskomplexität** zum Einsatz kommen

---

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





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



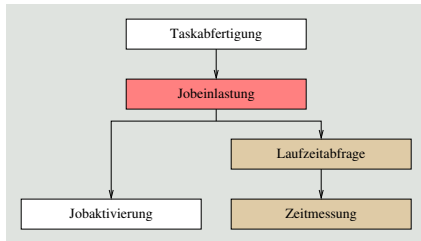
Am Tabellenende wird wieder zum -anfang gesprungen

- **Zyklischer Ablaufplan** (engl. *cyclic schedule*) periodischer Aufgaben
- Die **Hyperperiode** (siehe Folie 6) gibt die Tabellengröße vor



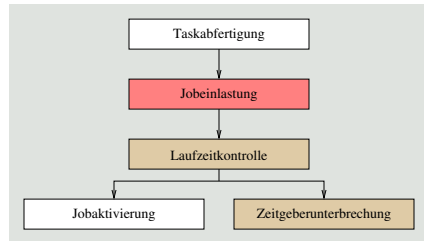
# Abfertigung von Arbeitsaufträgen

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



## Abfragebetrieb

(Folie 18 bis 19)



## Unterbrecherbetrieb

(Folie 20 bis 22)





**erledige** *Dispatcher* (Ablaufabelle, Tabellenlänge):

setze Laufzähler auf ersten Eintrag der Ablaufabelle;

**solange** der Betrieb läuft **tue**

**erledige**

lase 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**



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





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:** Termineinhaltung ist jederzeit garantiert

→ Die **WCET** muss die Behandlung evtl. Fehlersituationen einschließen



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



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
  - 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



**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*



# Synchronisation durch unterbrechende Zeitkontrolle

Auftrageinlastung, Laufzeitkontrolle, Zeitgeberunterbrechung: Unbedingter Auftragabbruch

**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:

- 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**.



# Stapelbasierte Abarbeitung von Ablauftabellen

Mischung aus lang andauernden und häufig wiederkehrenden Aufträge unterstützen



**Batch Processing** führt einen Auftrag nach dem anderen aus

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



**Stapelbasierte Abarbeitung** von Ablauftabellen

- Eingelastete Auftrag verdrängt den aktuell ausgeführten Auftrag
  - ⚠ Der ausgeführte Auftrag wird nicht abgebrochen
- Mehrere *kurze* Aufträge **während** eines *langen* Auftrags ausführen



Kontrolle des ausgeführten Auftrags wird schwieriger

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

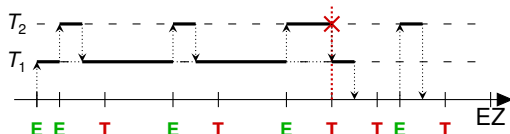


# Stapelbasierte Abarbeitung von Ablauftabellen

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  
 $\leadsto$  Ausnahme auslösen,  $T_2$  abbrechen

$t = 14$   $T_1$  terminiert

$t = 16$   $T_2$  einlasten

$t = 17$   $T_2$  terminiert





- 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





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

- Arbeitsaufträge erhalten **absolute Priorität**

**Variable Zuordnung** → Ereignisverarbeitung

- Arbeitsaufträge erhalten **relative Priorität**

Auch **prioritätsorientierte Einplanung** (engl. *priority-driven scheduling*)





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





## Verschiedene Kategorien von Einplanungsalgorithmen

- **Feste Priorität** wie gehabt (siehe IV-1/27)
- **Dynamische Priorität** (engl. *task-level dynamic-priority*)
  - **Feste Priorität auf Auftragebene** (engl. *job-level fixed-priority*)
  - **Dynamische Priorität auf Auftragebene** (engl. *job-level dynamic-priority*)



## **Praxisrelevanz** haben Verfahren, die Aufträgen 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 Auftragebene sind die Prioritäten fest, auf Taskebene aber variabel



**Dynamische Priorität** ↦ dynamisch auf Task- und fest auf Auftragebene





Arbeitsaufträge könn(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  $\leadsto$  Präemptivität als **Auftragattribut** implementiert



- 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



Auch **prioritätsorientierter Planer** (engl. *priority-driven scheduler*)



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



### 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  $O(1)$

### 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;
}
```

⚠️ Fest Anzahl an Aufträgen

release  $O(1)$

extract  $O(n)$



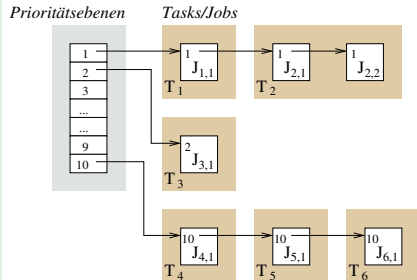


- Eine Ablaufliste je Priorität, organisiert als **FIFO**
- Ablauflisten werden in einer Ablaufabelle verwaltet

## Multi-Level-Queue

```
Job* table[Jobs];  
  
void release(Job *item) {  
    assert((prio(item) >= 0)  
        && (prio(item) <= Jobs - 1));  
    item->state = Ready;  
    append(table[prio(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 Aufträge pro Task
- Reihenfolge der Auslösung





**Auftragsauslösung** mit **konstantem Aufwand**  $O(1)$  erfordert:

- 1 Ablaufplan ist dynamische Datenstruktur (Tabelle) aus mehrere Prioritätsebenen
  - Wartelisten  $\mapsto$  LIFO
  - Warteschlangen  $\leadsto$  FIFO
- 2 Aufträge die über denselben Tabelleneintrag erfasst werden besitzen dieselbe Priorität  $\leadsto$  **Prioritätsschlange**
  - Sonst könnte LIFO/FIFO **Prioritätsverletzung** zur Folge haben
- 3 Anzahl der Tabelleneinträge entspricht mindestens der Anzahl statisch zugewiesener Prioritäten
  - Ggf. werden dann nahezu alle Tabelleneinträge nur einen Auftrag erfassen
  - Abhängig von der Echtzeitanwendung und dem Einplanungsverfahren

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

- Leere Tabelleneinträge sind ggf. zu überspringen





Vorrangsteuerung ist mit grundsätzlichen Konflikt konfrontiert:

- Entweder Auftragsauslösung oder Auftragsauswahl mit  $O(1)$  zu versehen
  - Beides zugleich geht nicht



Für Auftragsauslösung 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 Auftragverzögerungen lassen sich exakt bestimmen



Für Auftragsauswahl in  $O(1)$  spricht:

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

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



- 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



**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. Auftrag-Ebene
- Auslösung vs. Auswahl, Ablaufliste vs. Ablauftabelle
- *Multi-Level-Queue-Scheduler*, Prioritätsorientierter  $O(1)$ -Scheduler



- [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>



## 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 variierende Eigenschaften (z.B.  $P(t)$ ).

## Eigenschaften

- $t$  (Real-)Zeit
- $d$  Zeitverzögerung (engl. delay)

## Strukturelemente

- $E_i$  Ereignis (engl. event)
- $R_i$  Ergebnis (engl. result)
- $T_i$  Aufgabe (engl. task)
- $J_{i,j}$  Arbeitsauftrag (engl. job) der Aufgabe  $T_i$

## Temporale Eigenschaften

Allgemein

- $r_i$  Auslösezeitpunkt  
(engl. release time)
- $e_i$  Maximale Ausführungszeit (WCET)
- $D_i$  Relativer Termin (engl. deadline)
- $d_i$  Absoluter Termin
- $\omega_i$  Antwortzeit (engl. response time)
- $\sigma_i$  Schlupf (engl. slack)

Periodische Aufgaben

- $p_i$  Periode (engl. period)
- $\phi_i$  Phase (engl. phase)

## Aufgaben – Tupel

$T_p = (p, e, D, \phi)$  Periodische Aufgabe  
ohne Priorität (zeitgesteuert oder  
dynamische Taskpriorität)

