

Echtzeitsysteme

Abfertigung periodischer Echtzeitsysteme

Peter Wägemann

Lehrstuhl für Systemsoftware

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

<https://sys.cs.fau.de/lehre/ss24/ezs/>

14. Mai 2024



- 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** 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)

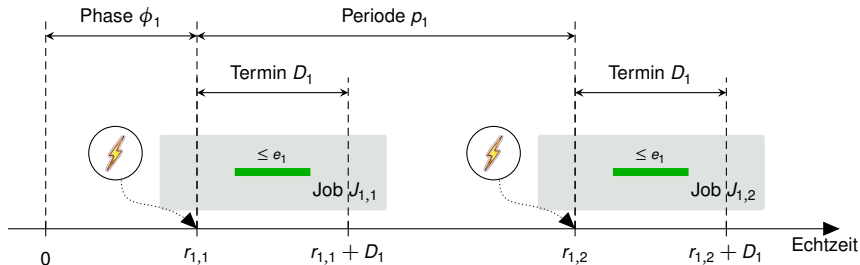
D_i relativer Termin (engl. *deadline*)

ϕ_i Phase (engl. *phase*)

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



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 $\mapsto$ absoluter Termin $d_{i,j}$ von $J_{i,j}$

Periode p_i Länge aller Zeitintervalle $[r_{i,j}, r_{i,j+1}]$ zwischen den Auslösezeiten der Aufträge in T_i

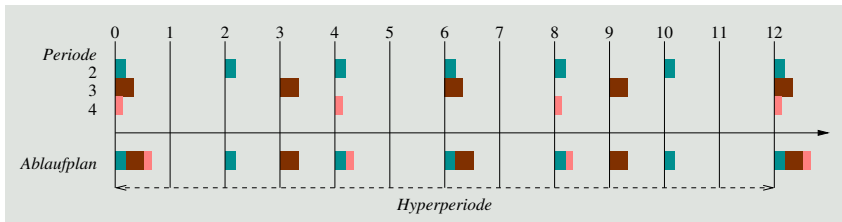
Phase ϕ_i Auslösezeit $r_{i,1}$ des *ersten* Auftrags $J_{i,1}$ in T_i (Abstand von Beginn der Hyperperiode)





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

$\rightarrow$ 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.

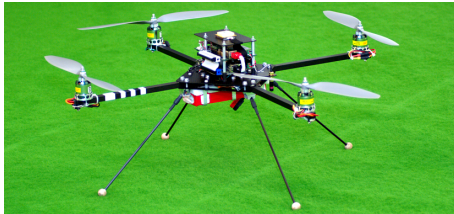


Die Berechnung von Stellwerten für Aktoren ist eine typische Aufgabe von Echtzeitsystemen

- 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** (implizite Termine)

A4 Kein Arbeitsauftrag gibt die **Kontrolle** über den Prozessor ab

A5 Alle Aufgaben sind **unabhängig**¹

A6 Die **Kosten** durch Unterbrechungen, Ablaufplanung und Verdrängung sind vernachlässigbar

A7 Alle Aufgaben verhalten sich **voll-präemptiv**

¹D.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





Busy Loop: „Arduino-artige“ Implementierung eines EZS

Die wirklich einfachste Variante für die Implementierung zyklischer Systeme?



Periodische Aufgaben wiederholt in einer Schleife ausführen

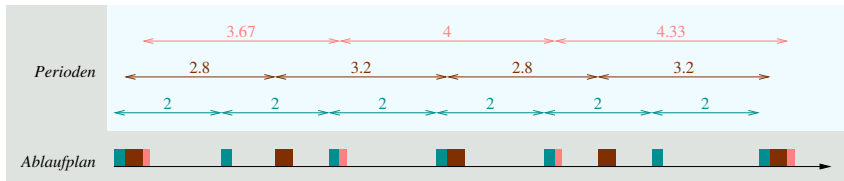
```
int main(void) {  
    unsigned long cnt = 0;  
    while(1) {  
        warte_durchlauf();  
        kontrolle_start();  
        aufgabe1();  
        kontrolle_stop();  
        if(cnt % 2 == 0) {  
            aufgabe2_1();  
        }  
        10ms_nach_aufgabe1();  
        if(cnt % 2 == 0)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

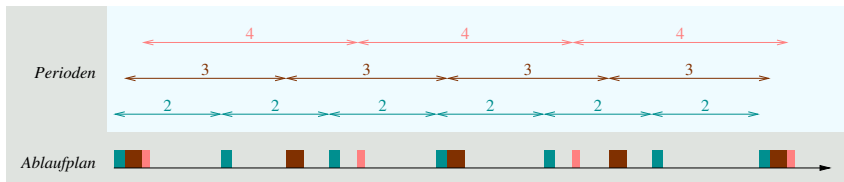


Genauigkeit periodischer Aufgaben

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/16 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 Ausnahmen² führen zu Terminüberschreitungen



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

²Gemeint 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



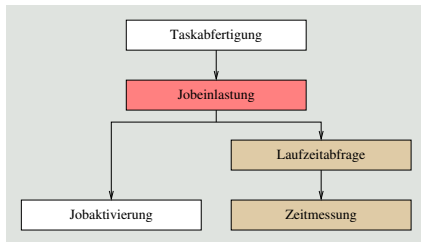
Am Tabellenende wird wieder zum -anfang gesprungen

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



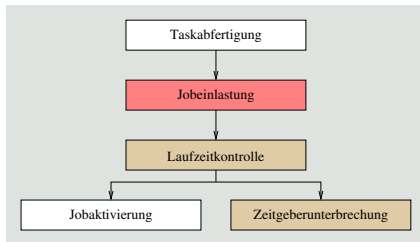
Abfertigung von Arbeitsaufträgen

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
 - 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
 - unnötige periodische Interrupts
- 👉 *Ticking System*



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.



- Unterbrechungen der Zeitkontrolle nur wenn unabdingbar (bei Terminüberschreitung)
- Periodische Unterbrechungen führen zu (unnötigen) Overheads/**CRPDs**
- Tickless System $\leadsto$ **geringere Overheads**
- Weitere Vorteile auch aus Sicht von *Energiesparmaßnahmen*
- Schlafzuständen (engl. *sleep modes*) in Phasen der Untätigkeit (engl. *idle*)

Idle-Task

(angelehnt an AVR-Systeme)

```
void idle(void){ // enter a sleep mode when idling
    sleep_enable(); // activate sleep mode
    sei(); // set enable interrupts
    sleep_cpu(); // sleep until next interrupt
}
```

- Tickless $\leadsto$ Verlängerung von möglichen Schlafphasen
- Auswirkungen auf Mehrkernprozessoren: schlafende Prozessoren werden im Tickless-Betrieb nicht aufgeweckt



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 unterbrochen, aber nicht abgebrochen
- Mehrere *kurze* Aufträge **während** eines *langen* Auftrags ausführen



Kontrolle des ausgeführten Auftrags wird schwieriger

- Entscheidungszeitpunkte ermöglichen Einlastung oder Kontrolle eines Auftrags
- **Ausführungszeit eines Auftrags muss explizit protokolliert werden**
- **Terminüberwachung** statt Laufzeitkontrolle notwendig (z.B. OSEKtime [1])

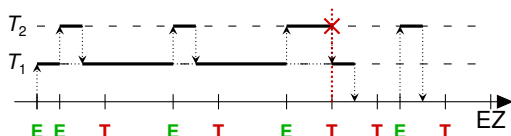


Stapelbasierte Abarbeitung von Ablauftabellen

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 abberechnen

$t = 14$ 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 **zeitliche Dringlichkeit** ($\neq$ Wichtigkeit/Kritikalität)



Ereignisse haben Prioritäten die dem Ereignisauslöser und/oder der Ereignisverarbeitung zugeordnet sind

Feste Zuordnung $\mapsto$ Ereignisverarbeitung/-auslöser

- Arbeitsaufträge erhalten **absolute Priorität**

Variable Zuordnung $\mapsto$ 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





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*)
 - Bedingt verdrängbar (engl. *limited preemptions*), also an ausgewiesenen Stellen (engl. *preemption points*)
- **Unverdrängbar** (engl. *non-preemptable*), sonst
 - Der Arbeitsauftrag läuft durch (engl. *run-to-completion*)



Mischbetrieb $\rightsquigarrow$ Präemptivität als **Auftragsattribut** implementiert



- Einplanung ereignisbedingt ausgelöster Arbeitsaufträge resultiert in einer **dynamischen Datenstruktur** $\mapsto$ 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 $\mapsto$ WCET
- $\rightarrow$ 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 Auslöszeitpunkt
 - Vorabwissen zur **WCET des Sortiervorgangs** ist gefordert
 - Konstanter Berechnungsaufwand zum Auswahlzeitpunkt
 - Aufträge vom Kopf her der (ggf. einfach verketteten) Liste entnehmen
- Ablauftabelle $\mapsto$ **statische** Datenstruktur
 - Prioritäten werden fest auf Tabellenindizes abgebildet
 - Zur Laufzeit unveränderliches Gefüge absoluter Prioritäten
 - $\rightarrow$ Eignung für die Implementierung **fester Prioritäten**
 - Konstanter Berechnungsaufwand zum Auslöszeitpunkt
 - 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()` $\mapsto \mathcal{O}(n)$ Suchschritte

`extract()` $\mapsto \mathcal{O}(1)$ Entnahme

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;
}
```

⚠ Feste Anzahl an Aufträgen

`release` $\mapsto \mathcal{O}(1)$ Einsetzung

`extract` $\mapsto \mathcal{O}(n)$ Suchschritte



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

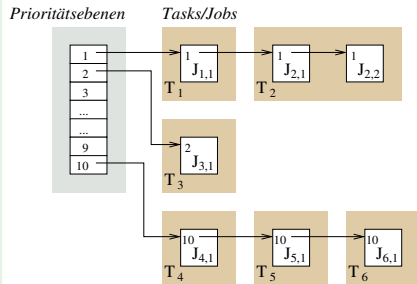
Multi-Level-Queue

```
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



- 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
- Tickless Systeme
- 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*



- [1] 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
- ω_i Antwortzeit (engl. response time)
- σ_i Schlupf (engl. slack)

Periodische Aufgaben

- p_i Periode (engl. period)
- ϕ_i Phase (engl. phase)

Aufgaben – Tupel

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

