Echtzeitsysteme

Abfertigung periodischer Echtzeitsysteme

Peter Wägemann

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

`https://sys.cs.fau.de/lehre/ss22/ezs/`

24. Mai 2022

Fragestellungen

- 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

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

Periodische Aufgabe (engl. *periodic task*)

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.

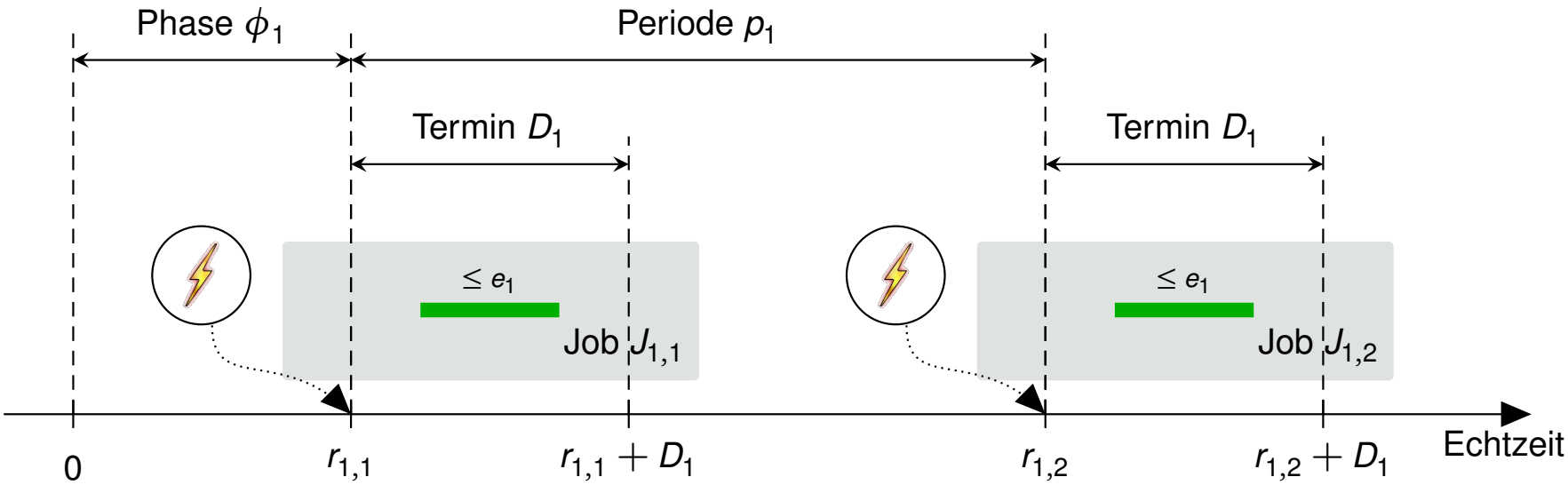
$$T_i = (p_i, e_i, D_i, \phi_i)$$

- p_i Periode (engl. *period*)
- e_i maximale Ausführungszeit (WCET)
- D_i relativer Termin (engl. *deadline*)
- ϕ_i Phase (engl. *phase*)

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

[1] 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.

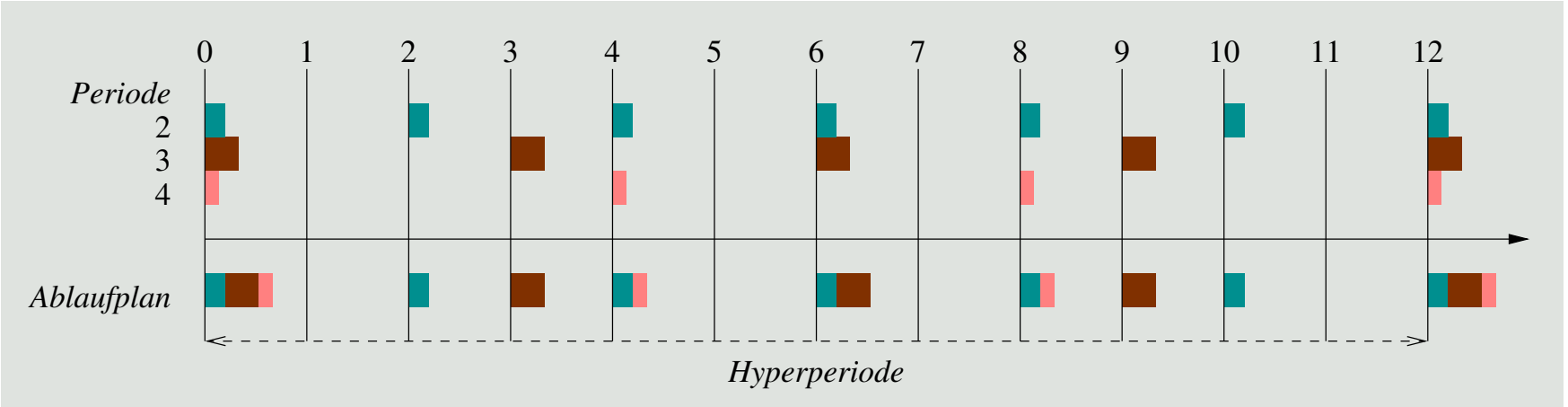
Periodische Aufgaben auf der Echtzeitachse



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 $\mapsto$ 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: $kgV(p_1 \ldots p_i)$
- 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 $\rightsquigarrow$ Schwankungen in den Einlastungszeiten

$\rightarrow$ Falls mehrere Arbeitsaufträge zum selben Auslösezeitpunkt anstehen

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.

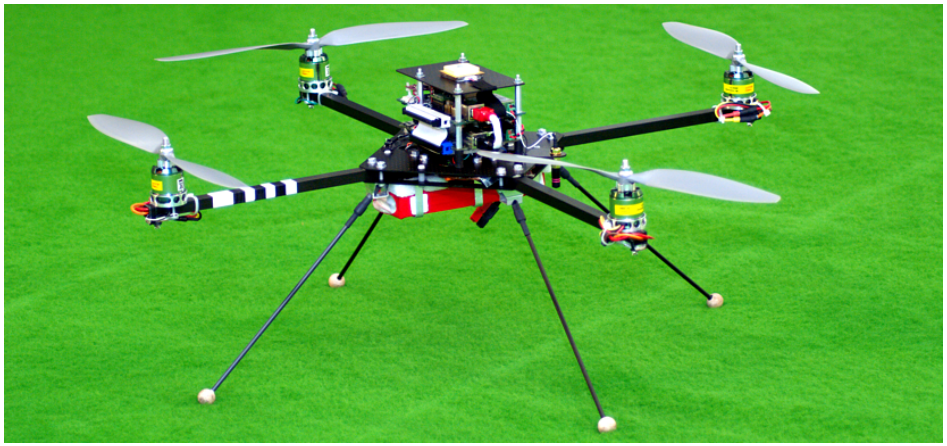
☞ Die Berechnung von Stellwerten für Aktoren ist eine typische Aufgabe von Echtzeitsystemen

- Das kontrollierte Objekt erfährt eine direkte digitale Regelung
- Regelungsanwendungen zeigen dabei eine hohe Regelmäßigkeit

→ Meist endlose Sequenz von Regelzyklen

Periodische Echtzeitsysteme in der Praxis (Forts.)

Lassen sich Echtzeitsysteme ausschließlich aus periodischen Aufgaben aufbauen?



- Periodische Regelungsaufgaben im I4*Copter*:

  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[2]

A6 Die Kosten durch Unterbrechungen, Ablaufplanung und Verdrängung sind vernachlässigbar

A7 Alle Aufgaben verhalten sich voll-präemptiv

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

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 Nachtrichtenhandhabung ab

  → Aufgaben sind nicht mehr unabhängig

  ⚡ I4Copter: Synchrone Telemetriedatenübertragung

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

Busy Loop (Arduino-artige Implementierung eines EZS)

Die wirklich einfachste Variante für die Implementierung zyklischer Systeme?

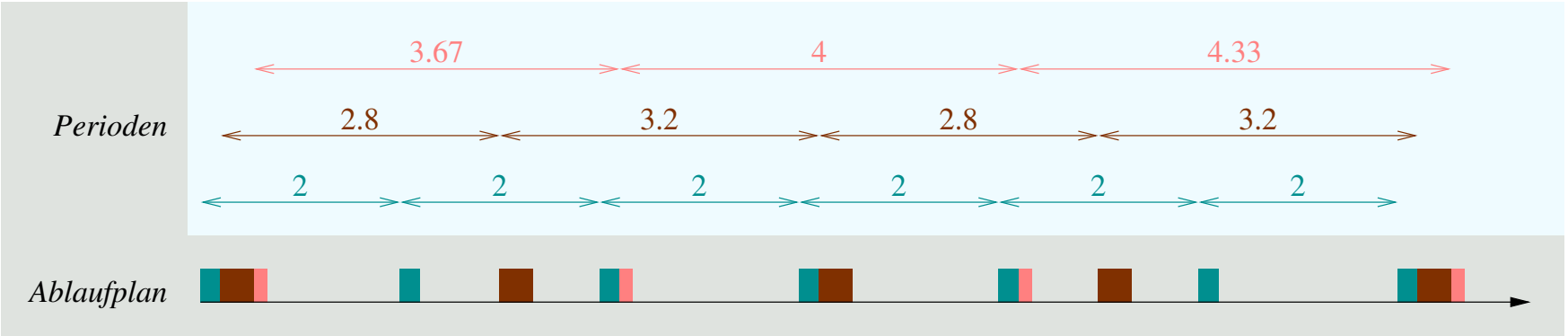
Periodische Aufgaben wiederholt in einer Schleife ausführen

```
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;
}
```

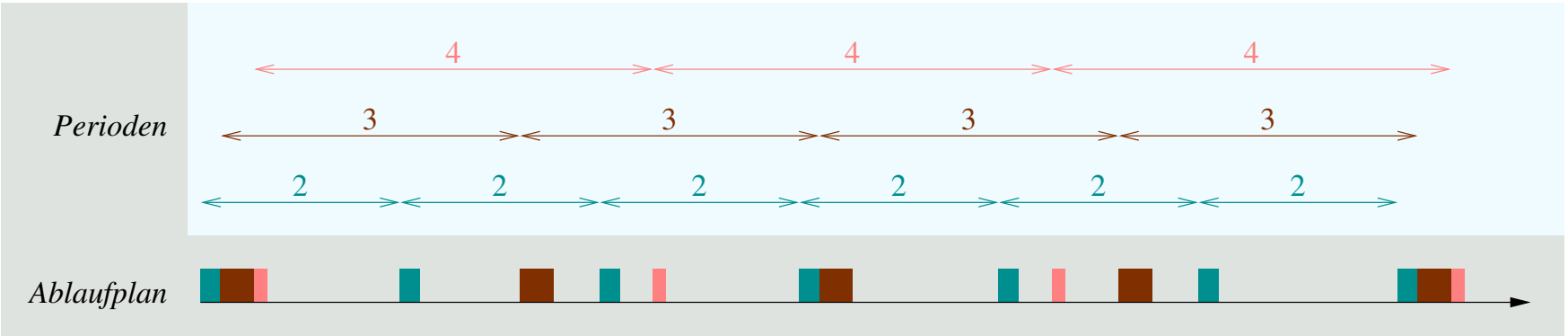
- Längere Perioden lassen sich durch einen Rundenzähler ableiten
  - die Schleife definiert einen Rahmen
  - → Ausrichtendes Raster für alle Aktivitäten
- Explizite Überwachung der Rahmendauer
  - Ausführungszeit ist i.d.R. nicht konstant
- Schwierige Spezifikation zeitlichen Versatzes
  - Abhängigkeit 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 ↦ exakter Fahrplan
  - Feste Angaben wann welche Arbeitsaufträge auszuführen sind
  - Zugeteilte Prozessorzeit ↦ maximalen Ausführungszeit (WCET)
  - Einlastung der Arbeitsaufträge geschieht streng nach Fahrplan
    - Alle Termine werden im Normalfall sicher eingehalten
    - ⚠ Unvorhergesehene Ausnahmen[3] führen zu Terminüberschreitungen

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

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

Abarbeitung statischer Ablaufpläne

Vorberechneter (statischer) Ablaufplan ↦ 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

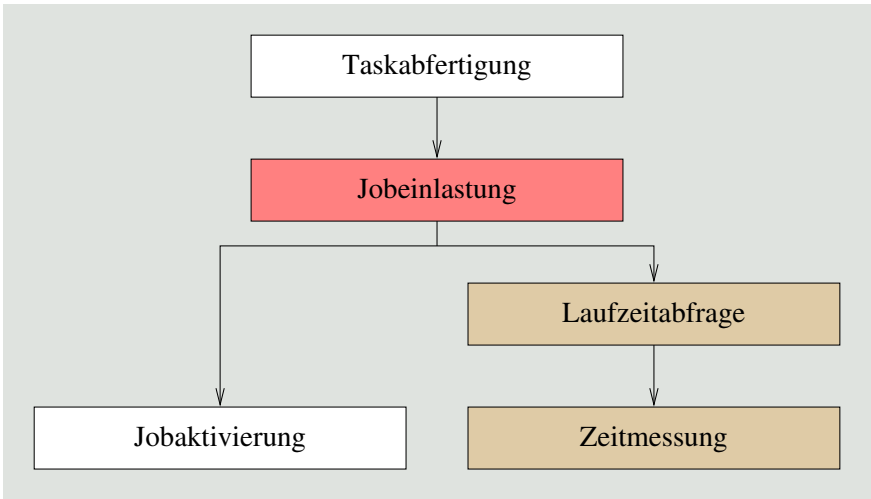
Am Tabellenende wird wieder zum -anfang gesprungen

- Zyklischer Ablaufplan (engl. *cyclic schedule*) periodischer Aufgaben

→ Die Hyperperiode (siehe Folie 6) gibt die Tabellengröße vor

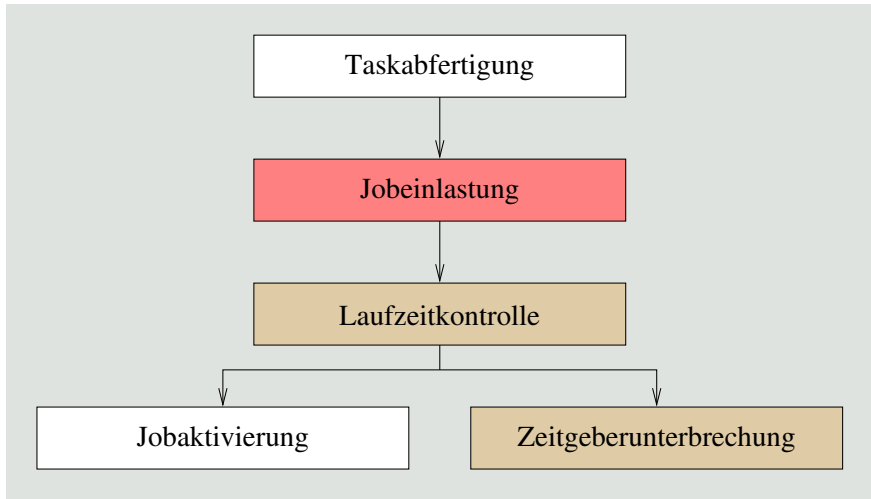
Abfertigung von Arbeitsaufträgen

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



Abfragebetrieb

(Folie 18 bis 19)



Unterbrecherbetrieb

(Folie 20 bis 22)

Tabellengesteuerte Einlastung zyklischer Arbeitsaufträge


```
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


```
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

Abfragebetrieb im Rückblick

☞ 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*)

Synchronisation durch unterbrechenden Zeitgeber

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

Synchronisation durch unterbrechenden Zeitgeber (Forts.)

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*

Synchronisation durch unterbrechende Zeitkontrolle: *Tickless 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.

Tickless Systeme in der Praxis

- Unterbrechungen der Zeitkontrolle nur wenn unabdingbar (bei Terminüberschreitung)
- Periodische Unterbrechungen führen zu (unnötigen) Overheads/CRPDs
- Tickless System $\rightsquigarrow$ 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 $\rightsquigarrow$ 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

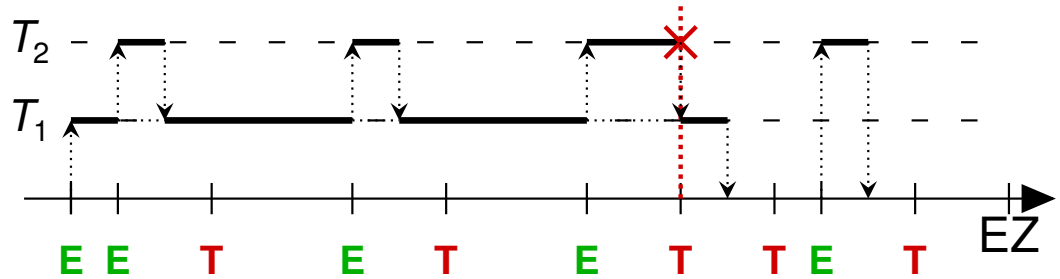
- Entscheidungszeitpunkte ermöglichen Einlastung oder Kontrolle eines Auftrags, beides zugleich ist i.A. nicht möglich
- Ausführungszeit eines Auftrags muss explizit protokolliert werden
- Terminüberwachung statt Laufzeitkontrolle notwendig (z.B. OSEKtime [2])

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

$\rightsquigarrow$ 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

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

- Arbeitsaufträge erhalten absolute Priorität

Variable Zuordnung ↦ Ereignisverarbeitung

- Arbeitsaufträge erhalten relative Priorität

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

Prioritätsorientierte Algorithmen

☞ 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 Aufgabenprioriät 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
- Aufgabenprioriät variiert relativ zu anderen Aufgaben, wenn Arbeitsaufträge ausgelöst bzw. beendet werden

→ Prioritäten werden dynamisch zur Laufzeit vergeben

Verdrängbarkeit

Verschränkung (engl. *interleaving*) von Arbeitsaufträgen

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 $\rightsquigarrow$ Präemptivität als Auftragsattribut implementiert

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

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

Aufbau und Berechnungskomplexität

- 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 Sortiervorgangs ist gefordert
  - Konstanter Berechnungsaufwand zum Auswahlzeitpunkt
    - Aufträge 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
    - Aufträge durch indizierte Adressierung in die Tabelle aufnehmen
    - Ggf. ist ein Tabelleneintrag eine Auftragliste (FIFO) gleicher Priorität
  - Linearer Berechnungsaufwand zum Auswahlzeitpunkt
    - Vorabwissen zur WCET des Suchvorgangs ist gefordert
    - Tabelleneinträge können leer sein und sind zu überspringen

Berechnungskomplexität (Forts.)

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

Multi-Level-Queue-Scheduler, MLQ-Scheduler

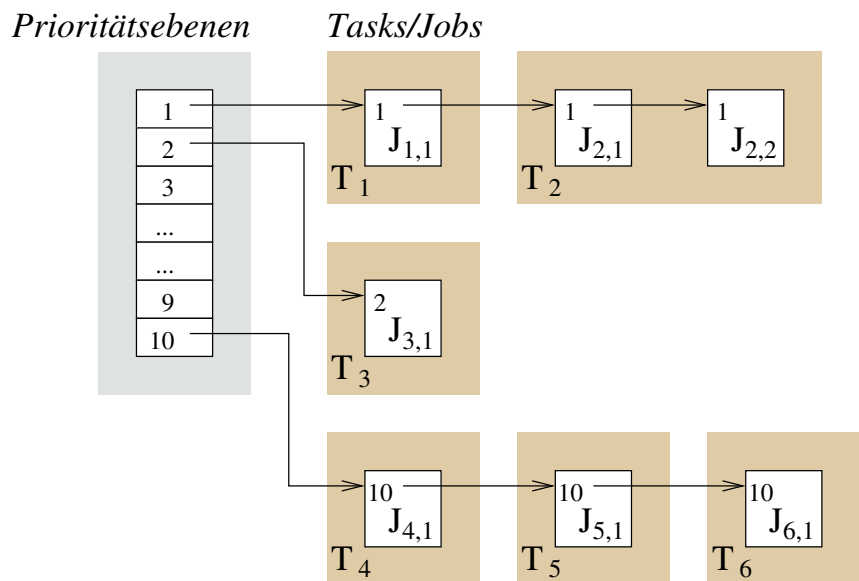
Häufig anzutreffende Sonderform der Ablauftabelle

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

Multi-Level-Queue

```
Job* table[Jobs];

void release(Job *item) {
  assert((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



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

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*

Literaturverzeichnis

[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

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 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)