

# Echtzeitsysteme

## Zeitgesteuerte Ablaufplanung periodischer Echtzeitsysteme

**Peter Ulbrich**

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

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

09. Dezember 2016

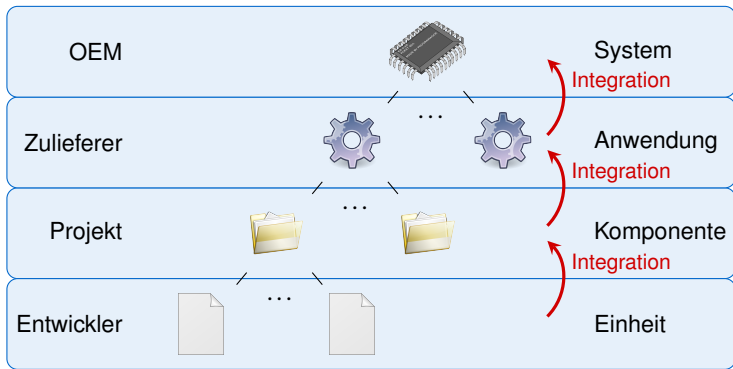


- Wie bestimmt man eine geeignete **Ablaufabelle** für eine gegebene Menge von Aufgaben?
- **Manuelle Bestimmung** zyklischer Ablaufpläne
  - Warum bestimmt man Ablaufpläne manuell?
  - Gibt es Leitlinien, um die manuelle Erstellung zu unterstützen?
- **Algorithmische Bestimmung** zyklischer Ablaufpläne
  - **Heuristische Verfahren**
  - **Optimale Verfahren**
- Wie **flexibel** sind zyklische Ablaufpläne?



- 1 Entwicklung – Herangehensweise
  - Ablaufplanung – Bottom-Up
  - Spezifikation – Top-Down
- 2 Manuelle Einplanung
  - Struktur zyklischer Ablaufpläne
- 3 Algorithmische Einplanung
  - Branch&Bound-Algorithmen
- 4 Moduswechsel
- 5 Zusammenfassung





- Der Integrationsprozess verläuft *Bottom-Up*:

- 1 Bündelung von **Softwareeinheiten** (engl. *unit*) zu **Komponenten**
- 2 **Komponenten** implementieren Arbeitsaufträge in **Anwendungen**
- 3 Einplanung der **Arbeitsaufträge** in einer statischen **Ablaufabelle**



☞ Die **Ablaufplanung** ist **finale Schritt** der Systemerstellung

⚠ Inhärent abhängig von den bereitgestellten Edukten

→ **SW-Einheiten und -Komponenten**: **Maximale Ausführungszeiten**

→ **Anwendung**: Spielraum der Ablaufplanung durch Abbildung  
**Komponenten** ↪ **Arbeitsaufträge** ↪ **Aktivitätsträger**

⚠ Erstellung von Software-Einheit, -Komponente, Anwendung und System fällt meist in **verschiedene Zuständigkeitsbereiche**:

- Softwarekomponenten werden zugekauft (z.B. Betriebssystem, Mathematik- oder Kryptographiebibliothek)
- Zulieferer fügt diese Komponenten zu einer Anwendung zusammen (z.B. ABS, Fahrspurassistent)
- OEM fertigt schließlich das endgültige Produkt (z.B. ein Auto)

☞ Entscheidend ist das **Verhalten des Gesamtsystems**





## Nachträgliche Änderungen bedeuten beträchtlichen Aufwand

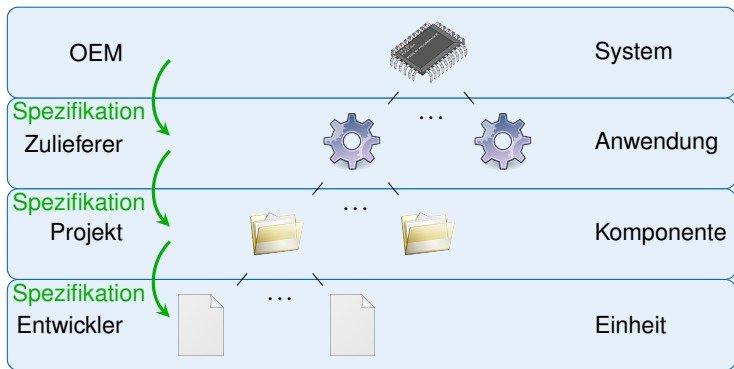
- **Beeinflussung** des Laufzeitverhaltens durch Änderung der
    - Maximalen Ausführungszeit (WCET,  $e$ )
    - Abbildung von Arbeitsaufträgen auf Aktivitätsträger
    - Abhängigkeiten zwischen Arbeitsaufträgen
  - Überlast z. B. durch ineffiziente Implementierung bzw. Strukturierung
    - Keine **zulässigen** Ablaufpläne ermittelbar (siehe III-2/31)
- **Nachbesserungen** falls die Ablaufplanung fehlschlägt



## Spezifikation des zeitlichen Verhaltens von Softwarekomponenten

- Beispielsweise durch vorgezogene/iterative Analyse/Ablaufplanung





■ Die Spezifikation erfolgt *Top-Down*:

- 1 OEM weist den Anwendungen Zeitschlitz im Ablaufplan zu
- 2 Anwendungen **verteilen** die Rechenzeit auf Softwarekomponenten
- 3 Komponenten und Einheiten müssen mit ihrer Rechenzeit **haushalten**



- Idee der **Rahmenkonstruktion** (engl. *framework*)

- *Hollywood-Prinzip*: „Don't call us, we'll call you!“

→ OEM muss die Anwendungsstruktur **vorgeben**

- ☞ **Globale Planung** von zeitlichen Abläufe

- Zeitschlitze und deren Einhaltung werden zu lokalen Belangen

→ Problemlösung im selben Zuständigkeitsbereichs möglich

- ⚠ Erstellung eines globalen Ablaufplans erfordert **Vorabwissen**

- Rückgriff auf **zurückliegende Entwicklungsprojekte**

- Erkenntnis aus der Entwicklung von **Prototypen**

- ☞ Leitlinien für die Erstellung **gut strukturierter, zyklischer Ablaufpläne** sind wünschenswert und sinnvoll



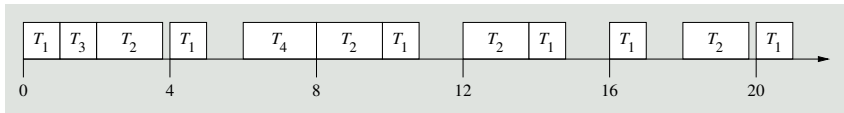


- 1 Entwicklung – Herangehensweise
  - Ablaufplanung – Bottom-Up
  - Spezifikation – Top-Down
- 2 **Manuelle Einplanung**
  - **Struktur zyklischer Ablaufpläne**
- 3 Algorithmische Einplanung
  - Branch&Bound-Algorithmen
- 4 Moduswechsel
- 5 Zusammenfassung



⚠ Einplanungsentscheidungen periodischer Aufgaben können in **unregelmäßigen Abständen** wirksam werden (vgl. IV-1/4)

- Beispiel: 0, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18



- **Regularität** von Einplanungsentscheidungen trägt wesentlich zu **Determinismus** und **Analysierbarkeit** bei

☞ Erfordert **gute Anordnung** eines zyklischen Ablaufplans (Strukturiertheit)

- Einplanungsentscheidungen nicht zu beliebigen Zeitpunkten treffen





### Die Rahmenlänge $f$

Zeitpunkte von Einplanungsentscheidungen unterteilen die Echtzeitachse in **Intervalle fester Länge  $f$**  (engl. *frame size*)

 Entscheidungen erfolgen nur am Rahmenanfang

- Aufträge einer Aufgabe werden am Anfang eines Rahmens ausgelöst

 Innerhalb eines Rahmens ist Verdrängung ausgeschlossen

→ Phase einer periodischen Aufgabe ist ein Vielfaches von  $f$

- Verantwortungsbereich des *Dispatchers* erweitert sich

- Einlastung von Arbeitsaufträgen am Rahmenanfang

- **Überwachung/Durchsetzung** von Einplanungsentscheidungen

- Wurde ein eingeplanter Auftrag tatsächlich **ausgelöst**?

- Ist dieser Arbeitsauftrag auch zur Ausführung **bereit**?

- Liegt eine **Terminverletzung** vor → steht eine Fehlerbehandlung an?

- Beeinflusst im hohen Maße den Wert für  $f$





# Randbedingungen für die Rahmenlänge

Rahmenlänge  $f$  genau richtig wählen...

## ■ $f$ hinreichend lang $\rightsquigarrow$ Jobverdrängung vermeiden

1 Erfüllt, wenn gilt:  $f \geq \max(e_i)$ , für  $1 \leq i \leq n$

- Jeder Auftrag läuft in der durch  $f$  gegebenen Zeitspanne komplett durch

2  $f$  teilt die Hyperperiode  $H$  so, dass gilt:  $\lfloor p_i/f \rfloor - p_i/f = 0$

- Ermöglicht die zyklische Ausführung des Ablaufplans

- Das Intervall  $H$  heißt **großer Durchlauf** (engl. *major cycle*),
  - Intervall der Länge  $f$  heißt **kleiner Durchlauf** (engl. *minor cycle*)

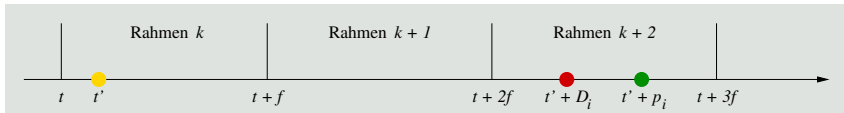
## ■ $f$ hinreichend kurz $\rightsquigarrow$ Terminüberwachung unterstützen

3 Erfordert eine rechtzeitige Auslösung:  $f \leq p_i$ , für  $1 \leq i \leq n$   
Möglich unter der Bedingung:  $2f - \gcd(p_i, f) \leq D_i$

- Rahmen passend auf die anstehenden Aufgaben verteilen
  - Mindestens ein Rahmen zwischen Auslösung und Termin jedes Auftrags



- Feststellung eines passenden Bereichs für  $f$  von  $T = (p_i, e_i, D_i)$ :<sup>1</sup>



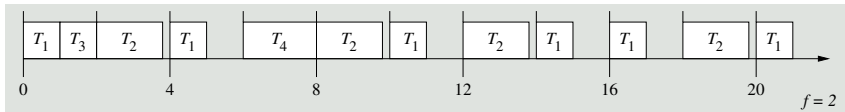
- $t$ : Anfang des Rahmens  $k$  in dem ein Auftrag in  $T_i$  ausgelöst wird
- $t'$ : Zeitpunkt der Auslösung des betreffenden Auftrags
- Rahmen  $k+1$  erlaubt die Kontrolle des bei  $t'$  ausgelösten Jobs
  - Der Rahmen sollte daher zwischen  $t'$  und  $t'+D_i$  des Jobs liegen
- Dies ist erfüllt, wenn gilt:  $t+2f \leq t'+D_i$  bzw.  $2f - (t' - t) \leq D_i$ 
  - $t' - t$  ist mindestens größter gemeinsamer Teiler von  $p_i$  und  $f$  [4]

<sup>1</sup> Befindet sich  $f$  in diesem Bereich, gibt es wenigstens einen Rahmen zwischen der Auslösezeitpunkt und dem Termin jedes Arbeitsauftrags der betreffenden Aufgabe.



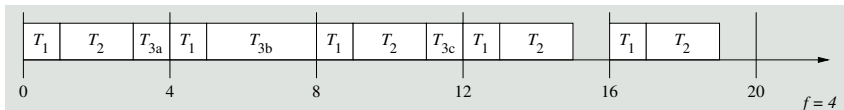
## Randbedingungen für die Rahmenlänge (Forts.)

$$T_i = (p_i, e_i), D_i = p_i \text{ und } \phi_i = 0$$



- Beispiel:  $T_1 = (4, 1)$ ,  $T_2 = (5, 1.8)$ ,  $T_3 = (20, 1)$ ,  $T_4 = (20, 2)$ 
  - $f \geq 2$  muss gelten, um jeden Job komplett durchlaufen zu lassen
  - Mögliche Rahmenlängen in  $H$  sind 2, 4, 5, 10 und 20 ( $H = 20$ )
  - Nur  $f = 2$  erfüllt jedoch alle drei Bedingungen (Folie 12) zugleich
- Weiteres Beispiel:  $T_x = (15, 1, 14)$ ,  $T_y = (20, 2, 26)$ ,  $T_z = (22, 3)$ 
  - $f \geq 3$  muss gelten, um jeden Auftrag komplett durchlaufen zu lassen
  - Mögliche Rahmenlängen in  $H$ : 3, 4, 5, 10, 11, 15, 20, 22 ( $H = 660$ )
  - Nur  $f = 3, 4$  oder  $5$  erfüllt alle drei Bedingungen





⚠ **Arbeitsaufträge sind in Scheiben zu schneiden**, falls nicht alle Randbedingungen erfüllbar sind

- Beispiel:  $\mathbf{T} = \{(4, 1), (5, 2, 7), (20, 5)\}$ :
  - $f \geq \max(e_i)$  gilt für  $f \geq 5$  und  $2f - \gcd(p_i, f) \leq D_i$  gilt für  $f \leq 4$  !?
- $T_3 = (20, 5)$  ist aufzuteilen in  $T'_3 = \{(20, 1), (20, 3), (20, 1)\}$ 
  - Drei Teilaufgaben  $T_{3a} = (20, 1)$ ,  $T_{3b} = (20, 3)$ ,  $T_{3c} = (20, 1)$
  - Das resultierende System hat fünf Tasks und die Rahmenlänge  $f = 4$
- $T_3 = (20, 5)$  in zwei Teilaufgaben aufzuteilen, bleibt erfolglos:
  - $\{(20, 4), (20, 1)\}$  geht nicht, wegen  $T_1 = (4, 1)$
  - $\{(20, 3), (20, 2)\}$  geht nicht, da für  $T_{3b} = (20, 2)$  kein Platz bleibt



- 1 Rahmenlänge festlegen (vgl. IV-3/12)
  - Mögliche Konflikte erkennen
- 2 Arbeitsaufträge in Scheiben aufteilen (vgl. IV-3/15)
  - Insbesondere kann dies zur Folge haben, andere Programm- bzw. Modulstrukturen herleiten zu müssen
  - Die erforderlichen **Programmtransformationen** geschehen bestenfalls (semi-) automatisch durch spezielle Kompilatoren
  - ⚠ Schlimmstenfalls sind die Programme manuell umzuschreiben
    - Aber: Gut geeignet für **Kommunikationssysteme**
      - Nachrichten lassen sich sehr gut und gezielt aufteilen
- 3 Arbeitsaufträge in die Rahmen platzieren



Rahmenlänge **querschneidende nicht-funktionale Eigenschaft**







## Vor-/Nachteile zyklischer Ablaufpläne

### Zyklisches Ablaufmodell liefert wohlgeordnete Ablaufpläne

- Eine feste Rahmengröße mit definierten Schranken
- Ablaufplanung (→ Zuteilung Aufträge zu Rahmen) findet **offline** statt
- **Einlastung** und **Terminüberwachung** zu definierten Zeitpunkten

### - **Busy-Loop-Verhalten** innerhalb eines Rahmens (vgl. IV-1/12)

- Sequentielle, kooperative Abarbeitung der Aufträge
- Keine individuelle **Laufzeitüberwachung** und **Ausnahmebehandlung**
- Anfällig für Jitter und mangelnde Periodizität

### + **Niedrige Verwaltungsgemeinkosten**

- **Einlastung** und **Terminüberwachung** findet nur an den Rahmengrenzen statt
- Keine Verdrängung (engl. *preemption*) (vgl. III-2/13)
- Minimalistisches Laufzeitsystem (Dispatcher+Terminprüfung genügt)

### + **Hohe Vorhersagbarkeit**

- Einziger Interrupt ist der Zeitgeber an den Rahmengrenzen
- **Unterbrechungsfreier Durchlauf** innerhalb der Rahmen
- Vereinfacht die WCET-Analyse ungemein (vgl. Kapitel III-3)



- 1 Entwicklung – Herangehensweise
  - Ablaufplanung – Bottom-Up
  - Spezifikation – Top-Down
- 2 Manuelle Einplanung
  - Struktur zyklischer Ablaufpläne
- 3 Algorithmische Einplanung**
  - Branch&Bound-Algorithmen**
- 4 Moduswechsel
- 5 Zusammenfassung





Statische Ablaufpläne werden sehr schnell **umfangreich**

- Ablauftabellen werden zur Hyperperiode aufgeblasen
- Beispiel:  $T_1 = (20, 3)$ ,  $T_2 = (15, 2)$ ,  $T_3 = (2, 0.25)$ 
  - Resultiert in einer Ablauftabelle mit 37 Einträgen
  - Fügt man  $T_4 = (40, 3)$  hinzu, werden daraus 77 Einträge

■ Algorithmische Ablaufplanung ist schwierig (vgl. IV-2/29)

- Im Allgemeinen ist Ablaufplanung **stark NP-hart**



**Automatisierte Berechnung** von Ablauftabellen

- Computer sind dafür da, große Datenmengen schnell zu verarbeiten
- Exponentielles Wachstum der Laufzeit ist auch für Computer fatal
  - Entwicklung **heuristischer** und **optimaler Verfahren**
- Verfahren haben nur eine **sehr geringe Praxisrelevanz**
  - Pessimistische Annahmen über die WCET erweisen sich als hinderlich



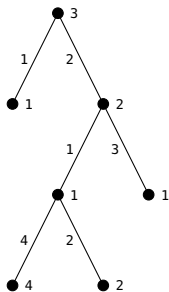
- ☞ Grundlegende Aufgabenstellung: Berechnung einer statischen Ablauftabelle für eine Menge periodischer Aufgaben (vgl. IV-2/24)
  
- Existierende Verfahren erfüllen deutlich mehr Anforderungen:
  - Berücksichtigung gerichteter und ungerichteter Abhängigkeiten
  - Verteilte Systeme und Mehrkern- sowie Mehrprozessorsysteme
  - Beschleunigung von Arbeitsaufträgen durch Duplizierung
  - ...
  
- Kategorien algorithmischer Lösungsverfahren:
  - Heuristiken → effizient, finden u.U. keine (existierende) Lösung 🏠 Folie ??
    - Genetische Algorithmen, List-Scheduling [5], ...
  
  - Optimale Verfahren → finden eine Lösung, sofern existierend Folie 21
    - Lineare Programmierung [8], Branch&Bound [1], ...
    - Exponentiell wachsende Laufzeit im schlimmsten Fall



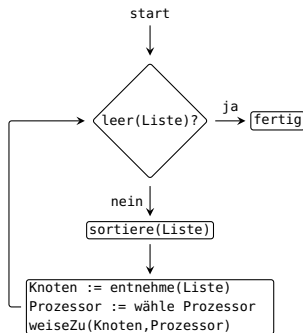


- List-Scheduling als Klasse heuristischer Verfahren, die gerichtete, azyklische Graphen (engl. *directed acyclic graph, DAG*) ordnen [7]

DAG



List-Scheduling



Knotengewichte  $\rightsquigarrow$  Berechnung ( $\mapsto$  Jobs)

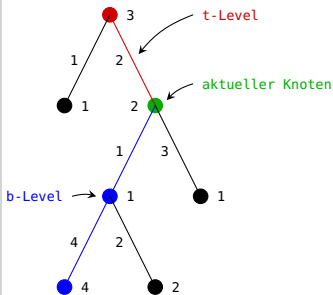
Kantengewichte  $\rightsquigarrow$  Kommunikation

verwaltet Knoten in einer sortierten Liste





Position eines Knotens im DAG bestimmt die Position in der Liste



**t-Level** Der längste Pfad von einer Wurzel zum aktuellen Knoten

- Variiert während der Ablaufplanung
- Kommunikation *verschwindet* u.U.

**b-Level** Der längste Pfad vom aktuellen Knoten zu einem Endknoten

- Während der Planung i.d.R. konstant

**Pfadlänge** Summe der Knoten- und Kantengewichte ohne aktuellen Knoten



Gewichtung von **t-Level** und **b-Level** Algorithmus-spezifisch

**b-Level**  $\rightsquigarrow$  Knoten auf dem **kritischen Pfad** werden bevorzugt

**t-Level**  $\rightsquigarrow$  Plant Knoten entlang der **topologischen Ordnung**





### HLFET (Highest Level First with Estimated Times) [2]

- Vernachlässigt Kommunikation  $\leadsto$  Kantengewichte = 0
- Verwendet b-Level als alleiniges Sortierkriterium

### ISH (Insertion Scheduling Heuristic) [6]

- Sortierkriterium  $\leadsto$  wie HLFET
- Evtl. entstehen Intervalle der Untätigkeit (engl. *idle time slots*)
  - Auffüllung durch Knoten aus der Bereitliste falls möglich

### DLS (Dynamic Level Scheduling) [9]

- Sortierkriterium: *Dynamic Level*
  - Differenz: b-Level – frühestem Startzeitpunkt für einen Prozessor
  - Wird nach jedem Durchlauf neu berechnet
- Bereitliste enthält zunächst nur die Wurzelknoten des DAG
  - Hinzufügen von Knoten nach Einplanung des Vorgängers

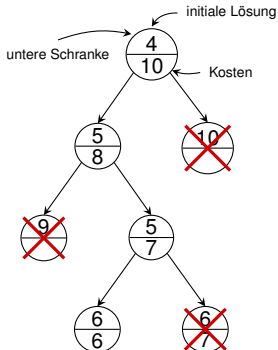


# Optimale Suche mittels Branch&Bound



Planungsproblem  $\mapsto$  Suchproblem in einem Suchbaum

- Potentiell Betrachtung des **kompletten Suchraums**  $\leadsto$  **exp. Laufzeit**



- 1** Berechne eine **initiale Lösung**
  - $\rightarrow$  Ein (evtl. unzulässiger) Ablaufplan
  - Bestimmung der **tatsächlichen Kosten**
  - Bestimmung einer **unteren Schranke**
- 2** Leite **verbesserte initiale Lösungen** ab
  - $\rightarrow$  **Branch-Schritt**
  - Verwerfen ungeeigneter Lösungen
  - $\rightarrow$  Reduktion des Suchraums: **Bound-Schritt**
- 3** Wiederhole diese Schritte ...  
bis zur **optimalen Lösung**
  - oder klar ist, dass **keine Lösung existiert**



Um Optimalität zu erreichen, müssen im Branch-Schritt **alle Möglichkeiten** ausgeschöpft werden, eine Lösung zu verbessern





# Branch&Bound – Statische Ablaufplanung

Wo kommen die initiale Lösung, die Kosten und die untere Schranke her?

- **Initiale Lösungen** sind bereits vollständige gültige Ablaufpläne
  - Diese können aber noch Termine verletzen, sind also nicht zulässig
  - Ein Verfahren für deren Bestimmung wird benötigt
- **Kosten** einer Lösung sind die vorhandenen **Verspätungen**
  - Maximale Terminüberschreitung aller Jobs
- **Untere Schranken** durch Vereinfachung des Planungsproblems
  - Ohne die Optimalität des Algorithmus zu verletzen
- **Verbesserung** durch Manipulation des Planungsproblems
  - Arbeitsauftrag mit der größten Terminüberschreitung früher einplanen
  - Verspätung ohne Verletzung der ursprünglichen Vorgaben reduzieren

**Ziel:** Eine Lösung finden, deren Kosten kleiner oder gleich 0 sind. Der zugehörige Ablaufplan ist daher zulässig.





## Leistungsumfang des Algorithmus

- Auslösezeiten, Ausführungszeiten, Termine
- Gerichtete und ungerichtete Abhängigkeiten
- Einkern-, Mehrkern- und Mehrprozessorsysteme
- Verteilte Systeme und nachrichtenbasierte Kommunikation



Der Algorithmus führt jedoch **keine Allokation** durch!

**Initiale Lösung:** Globaler EDF-Algorithmus (G-EDF)

- Erweitert um die Behandlung ungerichteter Abhängigkeiten
- Für obiges Planungsproblem **nicht optimal**

**Kosten:** Ablaufplan mittels EDF bestimmen

**Untere Schranke** : Vereinfachung bis EDF optimal ist!

- Entfernen ungerichteter oder kernübergreifender Abhängigkeiten

**Verbesserung:** Durch gezieltes Hinzufügen von Abhängigkeiten



- 1 Entwicklung – Herangehensweise
  - Ablaufplanung – Bottom-Up
  - Spezifikation – Top-Down
- 2 Manuelle Einplanung
  - Struktur zyklischer Ablaufpläne
- 3 Algorithmische Einplanung
  - Branch&Bound-Algorithmen
- 4 Moduswechsel**
- 5 Zusammenfassung





Eine für alle Lastsituationen passende statische Ablauf Tabellen

- In der Praxis nur schwer zu realisieren
- Negativbeispiel: Wartung von Steuergeräten im Auto
  - Diagnosedaten werden in normales Kommunikationsverhalten eingebettet
  - Niedrige Nutzlast (engl. *payload*) ist die Folge



Statische Ablauf Tabellen orientieren sich am schlimmsten Fall

- Arbeitsaufträge belegen immer die zugewiesene WCET
- Auch wenn sie zwar periodisch, aber nur selten ausgelöst werden

■ Entflechtung der Arbeitsaufträge ist das Ziel

- Arbeitsaufträge befinden sich nur in einer gemeinsamen Ablauf Tabelle, wenn sie auch zusammen ausgelöst werden können



Gruppierungen von Arbeitsaufträgen definieren Betriebszustände

- Repräsentiert durch eine eigene statische Ablauf Tabelle
- Wechsel des Betriebszustands impliziert auch ihren Wechsel

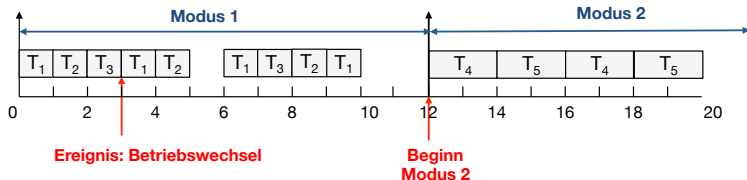


Betriebswechsel erfordert ein systemweit koordiniertes Vorgehen



# Rekonfiguration des Aufgabensystems

Änderung von Aufgabenanzahl und -parametern



Umstellen auf einen neuen statischen Ablaufplan bedeutet mehr als nur einen **Tabellenwechsel** zu vollziehen:

## 1 Zerstörung und Erzeugung von periodischen Aufgaben

- Einige periodische Aufgaben sind nicht mehr erforderlich  
→ **Betriebsmittelfreigabe**
- Andere Aufgaben müssen dem System neu hinzugefügt werden  
→ **Betriebsmittelanforderung**
- Manche Aufgaben überdauern den Betriebswechsel  
→ **Parametererhaltung**

## 2 Einlagerung und Aktivierung der neuen Ablauftabelle

- Taskparameter und neuer Ablaufplan wurden *à priori* bestimmt





Wechsel vom speziellen Arbeitsauftrag (engl. *mode-change job*) durchführen lassen → **nichtperiodische Aufgabe**

- Antwortzeit des Betriebswechsels minimieren (Hyperperiode!)
- Verbunden mit einem weichen oder harten Termin

### ■ **Aperiodisch** → Betriebswechsel mit weichem Termin

- Mit höchster Dringlichkeit ausgeführt als aperiodischer Auftrag
  - Kommt vor allen anderen aperiodischen Aufträgen zum Zuge
- **Zerstörung aperiodischer/sporadischer Jobs** ist problematisch
  - Ausführung aperiodischer Jobs wird hinausgezögert, bis der Betriebswechsel vollendet worden ist
  - Im Falle sporadischer Jobs stehen zwei Optionen zur Verfügung:
    - (a) Betriebswechsel wird unterbrochen und später fortgesetzt
    - (b) Übernahmeprüfung berücksichtigt den neuen Ablaufplan
- Ziel ist Minimierung der Antwortzeit für den Betriebswechsel

### ■ **Sporadisch** → Betriebswechsel mit hartem Termin

- Anwendung muss die evtl. Abweisung des Wechsels behandeln
  - Betriebswechsel muss ggf. hinausgezögert werden



- 1 Entwicklung – Herangehensweise
  - Ablaufplanung – Bottom-Up
  - Spezifikation – Top-Down
- 2 Manuelle Einplanung
  - Struktur zyklischer Ablaufpläne
- 3 Algorithmische Einplanung
  - Branch&Bound-Algorithmen
- 4 Moduswechsel
- 5 Zusammenfassung**



- **Entwicklungsprozesse** führen verschiedenste Akteure zusammen
  - Firmen/Arbeitsgruppen sind u.U. über den ganzen Globus verstreut
  - Eine **zeitliche Spezifikation** der Abläufe ist wünschenswert
    - Sie ermöglicht die Entwicklung **top-down** zu strukturieren
    - Wird durch eine manuelle, statische Ablaufplanung unterstützt
- **Struktur zyklischer Ablaufpläne**  $\rightsquigarrow$  gute Anordnung, Determinismus
  - Rahmen, Rahmenlänge, Scheiben; *major/minor cycle*
- **Algorithmische Einplanung** ordnet gerichtete, azyklische Graphen
  - Entlastung bei der Lösung eines komplexen Problems
  - **List-Scheduling-** und **Branch&Bound-Algorithmen**
- **Moduswechsel** durch aperiodischen oder sporadischen Auftrag
  - Tabellenwechsel, Betriebsmittelfreigabe/-anforderung, Nachladen





- [1] Abdelzaher, T. F. ; Shin, K. G.:  
Combined Task and Message Scheduling in Distributed Real-Time Systems.  
In: *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 10 (1999), Nr. 11, S. 1179–1191.  
<http://dx.doi.org/10.1109/71.809575>. –  
DOI 10.1109/71.809575. –  
ISSN 1045–9219
- [2] Baker, T. P. ; Shaw, A. C.:  
The Cyclic Executive Model and Ada.  
In: *Proceedings of the 9th IEEE International Symposium on Real-Time Systems (RTSS '88)*,  
IEEE Computer Society Press, 1988, S. 120–129
- [3] Baker, T. P. ; Shaw, A. C.:  
The Cyclic Executive Model and Ada.  
In: *Proceedings of the 9th IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS '88)*.  
Huntsville, Alabama, USA, Dez. 6–8, 1988, S. 120–129
- [4] Casavant, T. L. ; Kuhl, J. G.:  
A taxonomy of scheduling in general-purpose distributed computing systems.  
In: *IEEE Transactions on Software Engineering* 14 (1988), Nr. 2, S. 141–154.  
<http://dx.doi.org/10.1109/32.4634>. –  
DOI 10.1109/32.4634. –  
ISSN 0098–5589

- [5] Schild, K. ; Würtz, J. :  
Off-Line Scheduling of a Real-Time System.  
In: *Proceedings of the 13th ACM Symposium on Applied Computing (SAC '98)*.  
New York, NY, USA : ACM Press, 1998. –  
ISBN 0–89791–969–6, S. 29–38



## 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),  $D = p$  und  $\phi = 0$  sind der Reihe nach optional

## Ablaufplanung

$P_i$  Priorität (engl. priority) der Aufgabe  
 $T_i$   
 $\Omega_i$  Prioritätsebenen (engl. number of priorities)  
 $h_{\Delta_i}$  Rechenzeitbedarf (engl. demand)  
 $u_{\Delta_i}$  CPU-Auslastung (engl. utilisation)  
 $U$  Absolute CPU-Auslastung  
 $H$  Hyperperiode (großer Durchlauf, engl. major cycle)  
 $f$  Rahmenlänge (kleiner Durchlauf, engl. minor cycle)

