

Echtzeitsysteme

Zeitgesteuerte Ablaufplanung periodischer Echtzeitsysteme

Peter Ulbrich

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

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

04. Dezember 2017



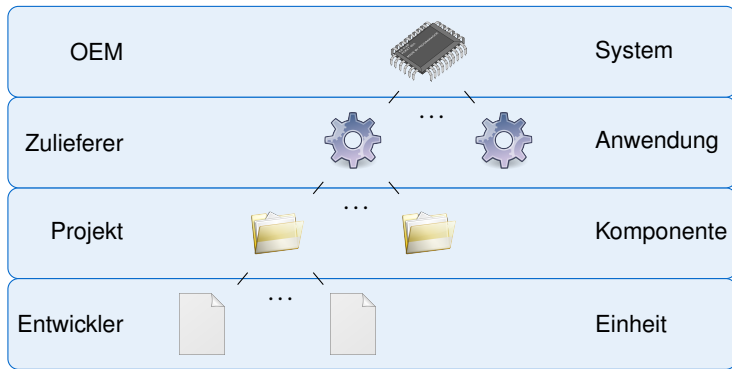
- Wie bestimmt man eine geeignete **Ablauf-tabelle** für eine gegebene Menge von Aufgaben?
- **Manuelle Bestimmung** zyklischer Ablaufpläne
 - Warum bestimmt man Ablaufpläne manuell?
 - Gibt es Leitlinien, um die manuelle Erstellung zu unterstützen?
- **Algorithmische Bestimmung** zyklischer Ablaufpläne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

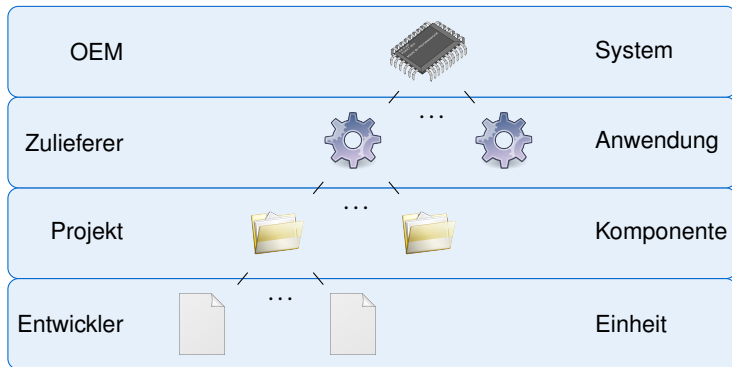


- 1 Entwicklung – Herangehensweise
 - Ablaufplanung – Bottom-Up
 - Spezifikation – Top-Down
- 2 Manuelle Einplanung
 - Struktur zyklischer Ablaufpläne
- 3 Algorithmische Einplanung
 - Branch&Bound-Algorithmen
- 4 Moduswechsel
- 5 Zusammenfassung

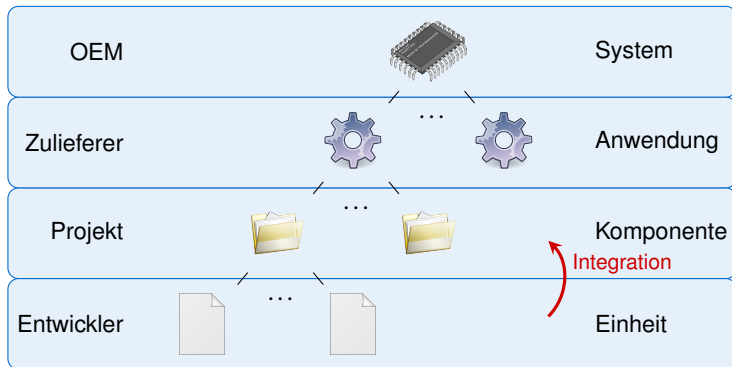


Ablaufplanung – Teil des Entwicklungsprozesses





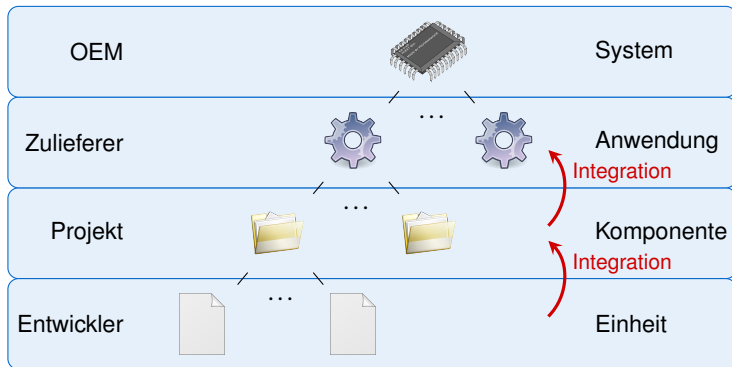
- Der Integrationsprozess verläuft *Bottom-Up*:



- Der Integrationsprozess verläuft *Bottom-Up*:

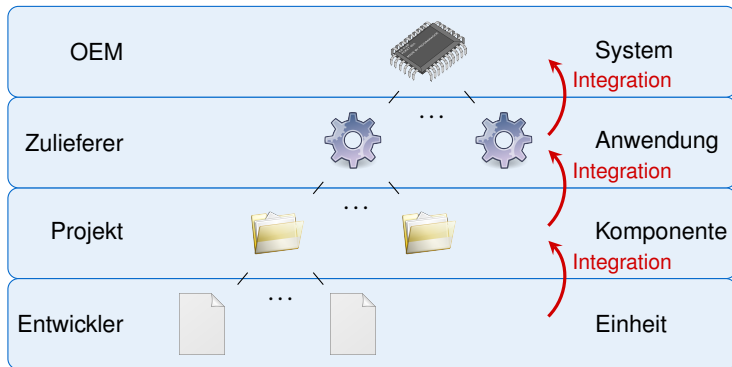
1 Bündelung von **Softwareeinheiten** (engl. *unit*) zu **Komponenten**





- Der Integrationsprozess verläuft *Bottom-Up*:

- 1 Bündelung von **Softwareeinheiten** (engl. *unit*) zu **Komponenten**
- 2 **Komponenten** implementieren Arbeitsaufträge in **Anwendungen**




- 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 **Ablauftabelle**



 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**



 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)



☞ 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





Nachträgliche Änderungen bedeuten beträchtlichen Aufwand

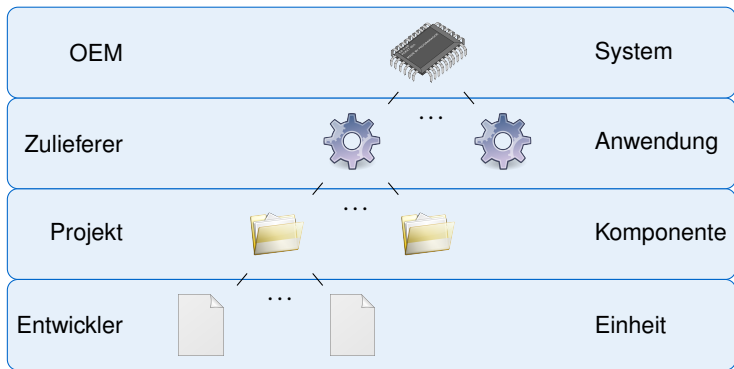
- **Beeinflussung** des Laufzeitverhaltens durch Änderung der
 - Maximalen Ausführungszeit (WCET, e)
 - Abbildung von Arbeitsaufträgen auf Aktivitätsträger
 - Abhängigkeiten zwischen Arbeitsaufträgen
 - Überlast z. B. durch ineffiziente Implementierung bzw. Strukturierung
 - Keine **zulässigen** Ablaufpläne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



Spezifikation des zeitlichen Verhaltens von Softwarekomponenten

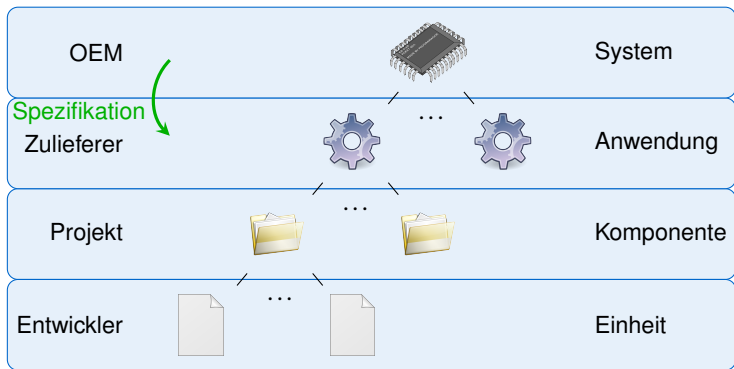
- Beispielsweise durch vorgezogene/iterative Analyse/Ablaufplanung





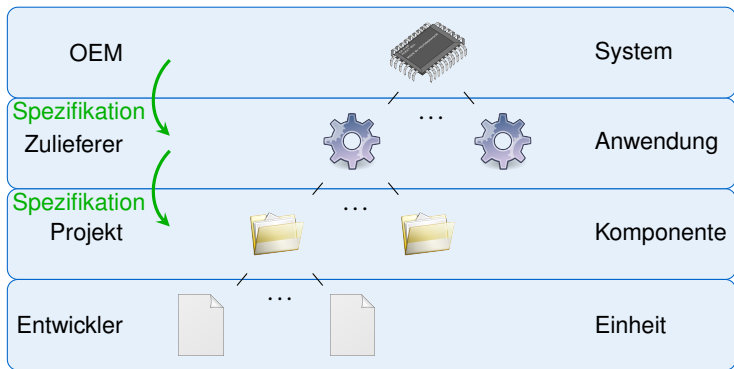
- Die Spezifikation erfolgt *Top-Down*:





- Die Spezifikation erfolgt *Top-Down*:

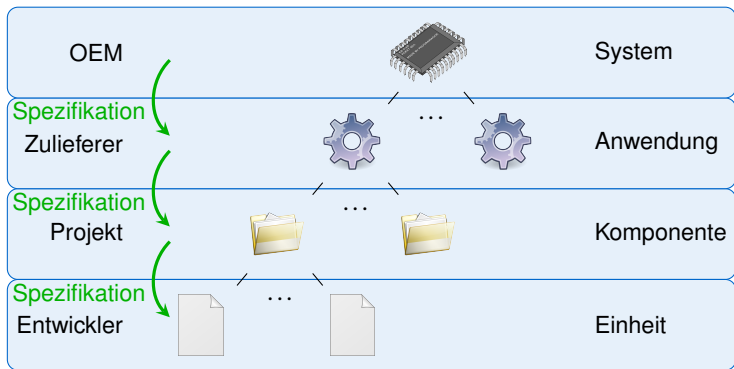
- 1 OEM weist den Anwendungen Zeitschlitz im Ablaufplan zu



- Die Spezifikation erfolgt *Top-Down*:

- 1 OEM weist den Anwendungen Zeitschlitz im Ablaufplan zu
- 2 Anwendungen *verteilen* die Rechenzeit auf Softwarekomponenten





■ 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



- 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**



- 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



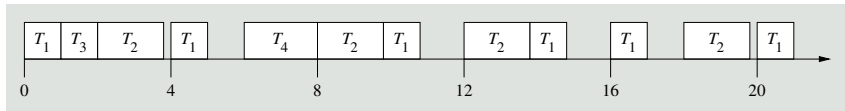
- 1 Entwicklung – Herangehensweise
 - Ablaufplanung – Bottom-Up
 - Spezifikation – Top-Down
- 2 **Manuelle Einplanung**
 - **Struktur zyklischer Ablaufpläne**
- 3 Algorithmische Einplanung
 - Branch&Bound-Algorithmen
- 4 Moduswechsel
- 5 Zusammenfassung





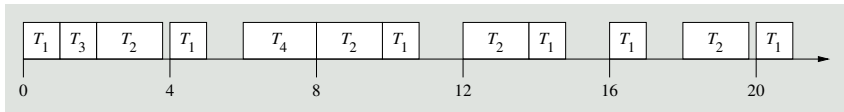
Einplanungsentscheidungen periodischer Aufgaben können in **unregelmäßigen Abständen** wirksam werden (vgl. IV-1/4)

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



⚠ 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

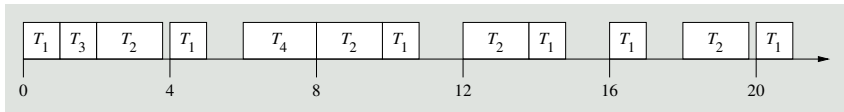


- **Regularität** von Einplanungsentscheidungen trägt wesentlich zu **Determinismus** und **Analysierbarkeit** bei



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





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 für n Aufgaben genau richtig wählen...



Verdrängung von Aufträgen vermeiden $\mapsto f$ **hinreichend lang**

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: $\lfloor p_i/f \rfloor - p_i/f = 0$, für $1 \leq i \leq n$

- Ermöglicht die zyklische Ausführung des Ablaufplans





Randbedingungen für die Rahmenlänge

Rahmenlänge f für n Aufgaben genau richtig wählen...



Verdrängung von Aufträgen vermeiden $\mapsto f$ **hinreichend lang**

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: $\lfloor p_i/f \rfloor - p_i/f = 0$, für $1 \leq i \leq n$

– 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*)





Randbedingungen für die Rahmenlänge

Rahmenlänge f für n Aufgaben genau richtig wählen...



Verdrängung von Aufträgen vermeiden $\mapsto f$ **hinreichend lang**

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: $\lfloor p_i/f \rfloor - p_i/f = 0$, für $1 \leq i \leq n$

– 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*)



Terminüberwachung ermöglichen $\mapsto f$ **hinreichend kurz**

3 Erfordert eine rechtzeitige Auslösung: $f \leq p_i$, für $1 \leq i \leq n$

4 Möglich unter der Bedingung: $2f - ggT(p_i, f) \leq D_i$





Randbedingungen für die Rahmenlänge

Rahmenlänge f für n Aufgaben genau richtig wählen...



Verdrängung von Aufträgen vermeiden $\mapsto f$ **hinreichend lang**

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: $\lfloor p_i/f \rfloor - p_i/f = 0$, für $1 \leq i \leq n$

– 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*)



Terminüberwachung ermöglichen $\mapsto f$ **hinreichend kurz**

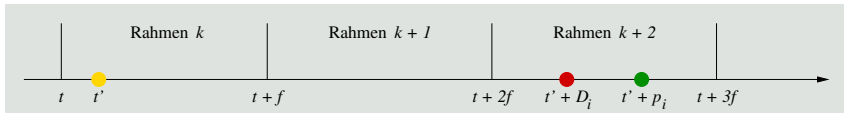
3 Erfordert eine rechtzeitige Auslösung: $f \leq p_i$, für $1 \leq i \leq n$

4 Möglich unter der Bedingung: $2f - ggT(p_i, f) \leq D_i$

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



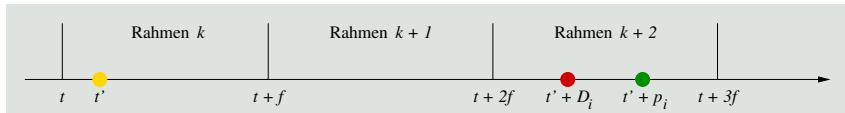
- Feststellung eines passenden Bereichs für f von $T = (p_i, e_i, D_i)$:¹



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



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

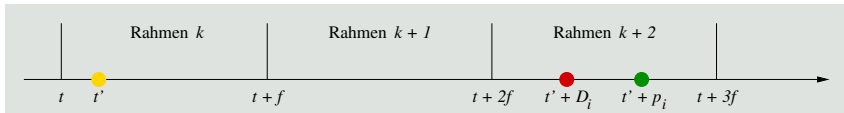


- t : Anfang des Rahmens k in dem ein Auftrag in T_i ausgelöst wird

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



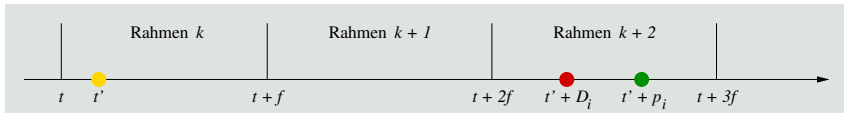
- Feststellung eines passenden Bereichs für f von $T = (p_i, e_i, D_i)$:¹



- t : Anfang des Rahmens k in dem ein Auftrag in T_i ausgelöst wird
- t' : Zeitpunkt der Auslösung des betreffenden Auftrags

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

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

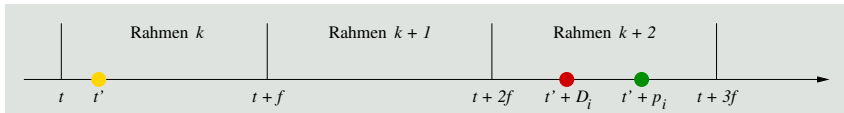


- t : Anfang des Rahmens k in dem ein Auftrag in T_i ausgelöst wird
- t' : Zeitpunkt der Auslösung des betreffenden Auftrags
- Rahmen $k+1$ erlaubt die Kontrolle des bei t' ausgelösten Jobs
 - Der Rahmen sollte daher zwischen t' und $t'+D_i$ des Jobs liegen

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



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



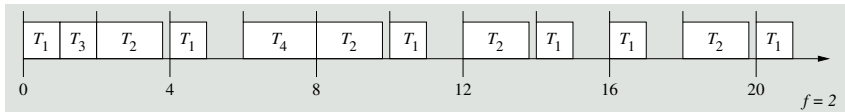
- t : Anfang des Rahmens k in dem ein Auftrag in T_i ausgelöst wird
- t' : Zeitpunkt der Auslösung des betreffenden Auftrags
- Rahmen $k+1$ erlaubt die Kontrolle des bei t' ausgelösten Jobs
 - Der Rahmen sollte daher zwischen t' und $t'+D_i$ des Jobs liegen
- Dies ist erfüllt, wenn gilt: $t+2f \leq t'+D_i$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

¹ 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.)

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

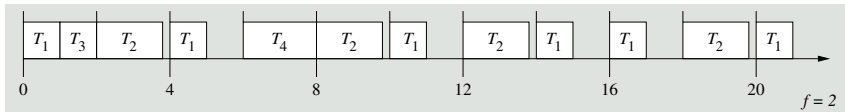


- Beispiel: $T_1 = (4, 1)$, $T_2 = (5, 1.8)$, $T_3 = (20, 1)$, $T_4 = (20, 2)$
 - $f \geq 2$ muss gelten, um jeden Job komplett durchlaufen zu lassen
 - Mögliche Rahmenlängen in H sind 2, 4, 5, 10 und 20 ($H = 20$)
 - Nur $f = 2$ erfüllt jedoch alle vier Bedingungen (Folie 12) zugleich



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 vier 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 vier Bedingungen



Konflikte und deren Auflösung

Taskparameter zugunsten einer guten Ablaufplananordnung korrigieren

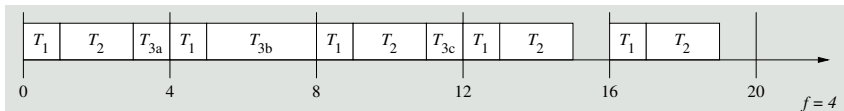


⚠ **Arbeitsaufträge sind in Scheiben zu schneiden**, falls nicht alle Randbedingungen erfüllbar sind



Konflikte und deren Auflösung

Taskparameter zugunsten einer guten Ablaufplananordnung korrigieren



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

■ Beispiel: $\mathbf{T} = \{(4, 1), (5, 2, 7), (20, 5)\}$:

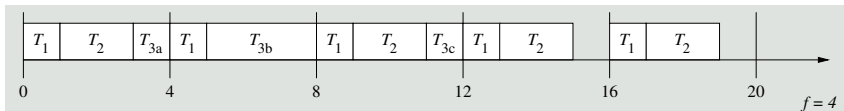
– $f \geq \max(e_i)$ gilt für $f \geq 5$ und $2f - ggT(p_i, f) \leq D_i$ gilt für $f \leq 4$

!?



Konflikte und deren Auflösung

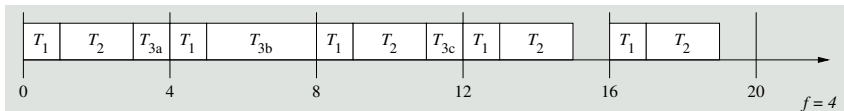
Taskparameter zugunsten einer guten Ablaufplananordnung korrigieren



⚠ **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 $2f - ggT(p_i, f) \leq D_i$ 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 $f = 4$





⚠ **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 $2f - ggT(p_i, f) \leq D_i$ 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



- 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



- 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



Entstehungsprozess eines zyklischer Ablaufplans

Gegenseitige Abhängigkeit von Entwurfsentscheidungen

- 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





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





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)





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





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-2/33)

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





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-2/33)

- 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-2/28)
- Existierende Verfahren erfüllen deutlich mehr Anforderungen:
 - Berücksichtigung **gerichteter** und **ungerichteter Abhängigkeiten**
 - **Verteilte Systeme** und **Merkern-** sowie **Mehrprozessorsysteme**
 - Beschleunigung von Arbeitsaufträgen durch **Duplizierung**
 - ...

- ☞ **Grundlegende Aufgabenstellung:** Berechnung einer statischen Ablauftabelle für eine Menge periodischer Aufgaben (vgl. IV-2/28)
- Existierende Verfahren erfüllen deutlich mehr Anforderungen:
 - Berücksichtigung **gerichteter** und **ungerichteter Abhängigkeiten**
 - **Verteilte Systeme** und **Merkern-** sowie **Mehrprozessorsysteme**
 - Beschleunigung von Arbeitsaufträgen durch **Duplizierung**
 - ...
- Kategorien algorithmischer Lösungsverfahren:
 - **Heuristiken** → effizient, finden u.U. keine (existierende) Lösung
 - Genetische Algorithmen, **List-Scheduling** [3], ...
 - **Optimale Verfahren** → finden eine Lösung, sofern existierend
 - Lineare Programmierung [4], **Branch&Bound** [1], ...
 - Exponentiell wachsende Laufzeit im schlimmsten Fall



Optimale Suche mittels Branch&Bound

 Planungsproblem \mapsto Suchproblem in einem Suchbaum

- Potentiell Betrachtung des kompletten Suchraums \leadsto exp. Laufzeit

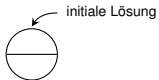


Optimale Suche mittels Branch&Bound



Planungsproblem \mapsto Suchproblem in einem Suchbaum

- Potentiell Betrachtung des kompletten Suchraums \leadsto exp. Laufzeit



1 Berechne eine initiale Lösung

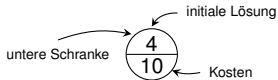


Optimale Suche mittels Branch&Bound



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**

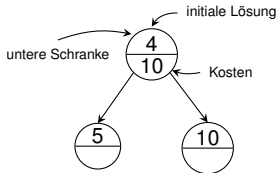


Optimale Suche mittels Branch&Bound



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**

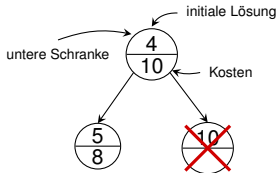


Optimale Suche mittels Branch&Bound



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

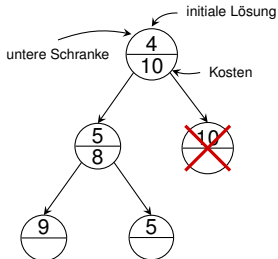


Optimale Suche mittels Branch&Bound



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 ...

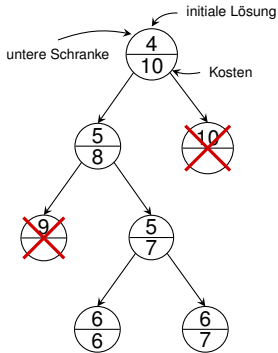


Optimale Suche mittels Branch&Bound



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 ...

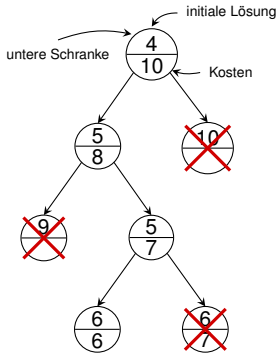


Optimale Suche mittels Branch&Bound



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



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



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!



Der Algorithmus von Abdelzaher und Shin [1]

Ein Beispiel für einen Branch&Bound-Algorithmus für die statische Ablaufplanung



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





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





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





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

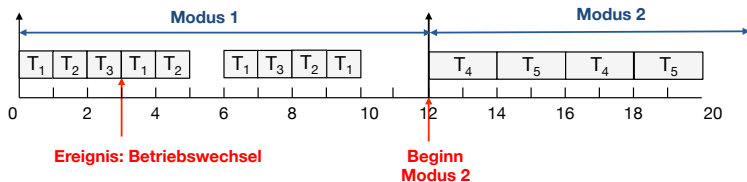


Betriebswechsel erfordert ein systemweit koordiniertes Vorgehen



Rekonfiguration des Aufgabensystems

Änderung von Aufgabenanzahl und -parametern

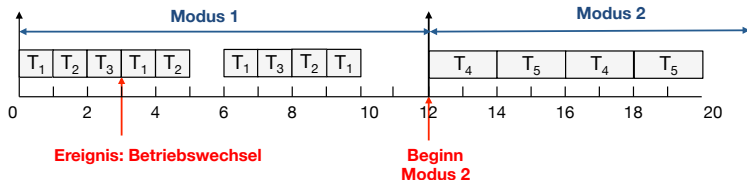


Umstellen auf einen neuen statischen Ablaufplan bedeutet mehr als nur einen **Tabellenwechsel** zu vollziehen:



Rekonfiguration des Aufgabensystems

Änderung von Aufgabenanzahl und -parametern



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

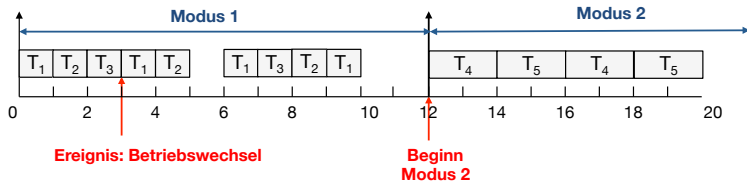
1 Zerstörung und Erzeugung von periodischen Aufgaben

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



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





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



- **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*



- **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**



- **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** \leadsto 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] 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
- [4] 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
 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

$T_p = (\rho, e, D, \phi)$ Periodische Aufgabe ohne Priorität (zeitgesteuert oder dynamische Taskpriorität), $D = \rho$ und $\phi = 0$ sind der Reihe nach optional

Ablaufplanung

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

