

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 **Ablauftabelle** 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

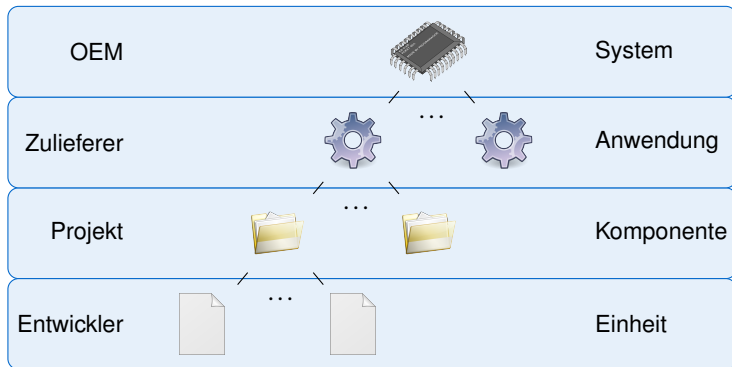
- Branch&Bound-Algorithmen

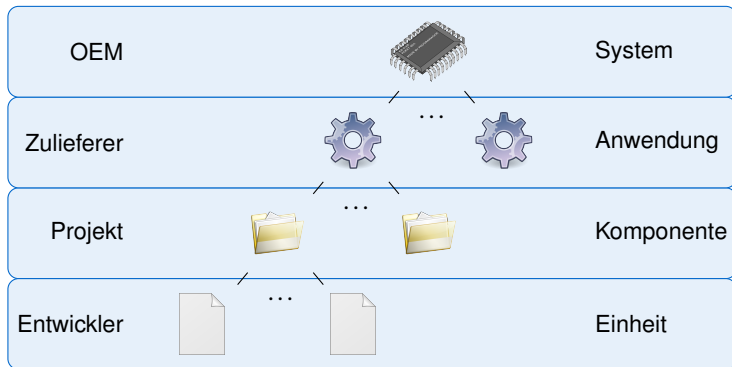
4 Moduswechsel

5 Zusammenfassung

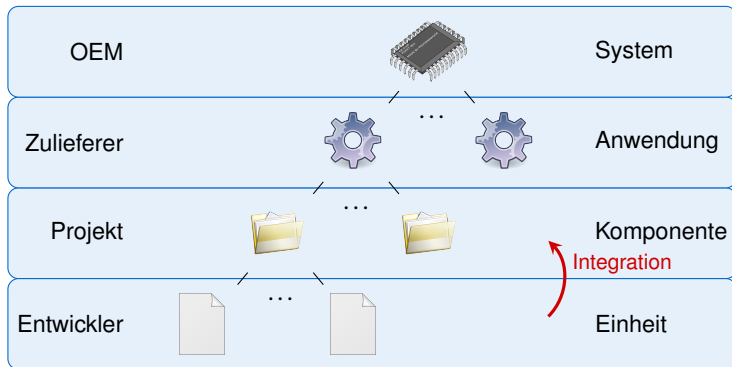


Ablaufplanung – Teil des Entwicklungsprozesses



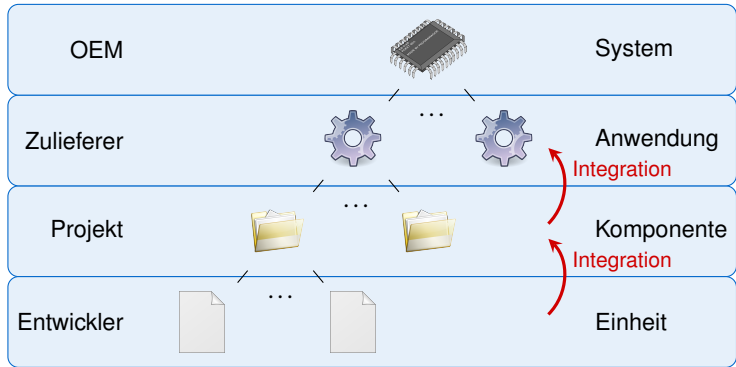


- Der Integrationsprozess verläuft *Bottom-Up*:



- Der Integrationsprozess verläuft *Bottom-Up*:

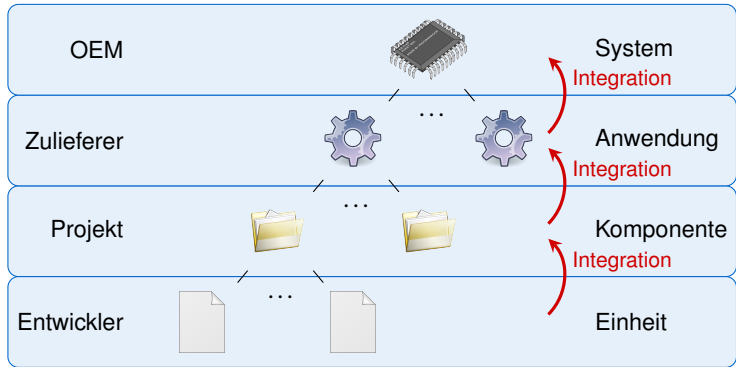
1 Bündelung von **Softwareeinheiten** (engl. *unit*) zu **Komponenten**



- 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

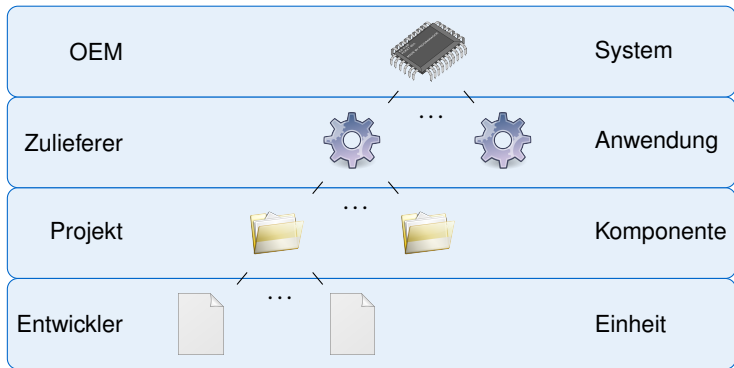
- **Beeinflussung** des Laufzeitverhaltens durch Änderung der
 - Maximalen Ausführungszeit (WCET, e)
 - Abbildung von Arbeitsaufträgen auf Aktivitätsträger
 - Abhängigkeiten zwischen Arbeitsaufträgen
 - Überlast z. B. durch ineffiziente Implementierung bzw. Strukturierung
 - Keine **zulässigen** Ablaufpläne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



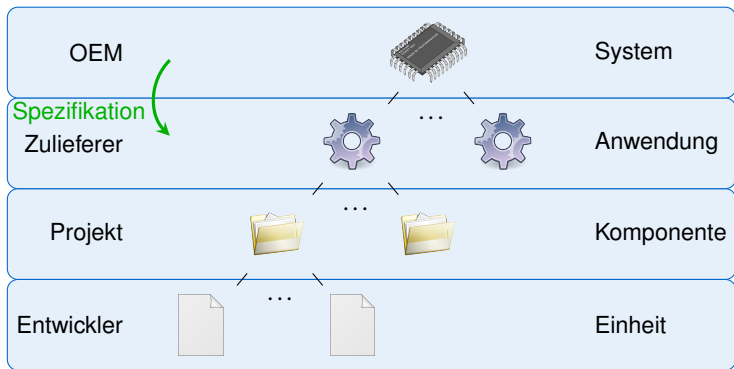
Spezifikation des zeitlichen Verhaltens von Softwarekomponenten

- Beispielsweise durch vorgezogene/iterative Analyse/Ablaufplanung



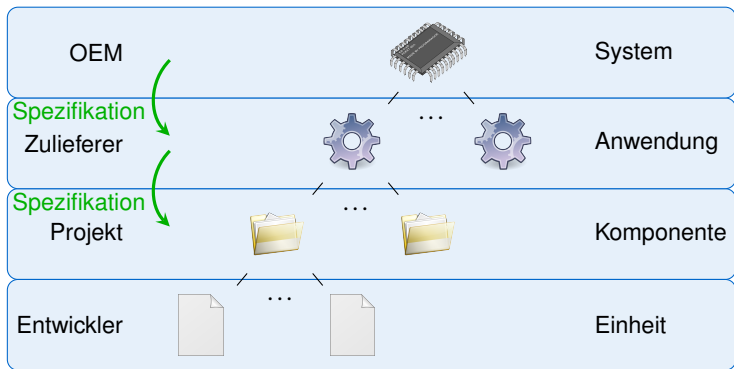


- Die Spezifikation erfolgt *Top-Down*:



Die Spezifikation erfolgt *Top-Down*:

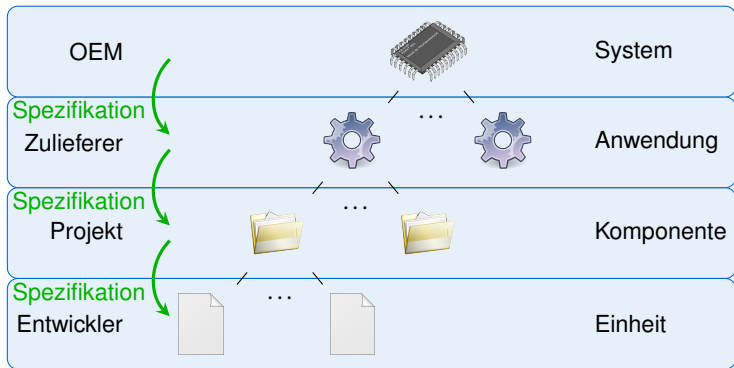
1 OEM weist den Anwendungen Zeitschlitz im Ablaufplan zu



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

- Zeitschlitz 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

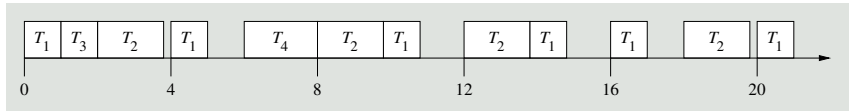
5 Zusammenfassung





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

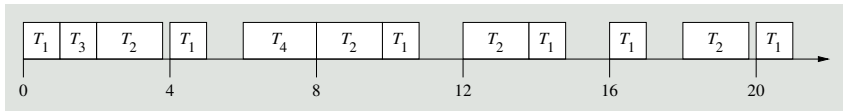
- Beispiel: 0, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18





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



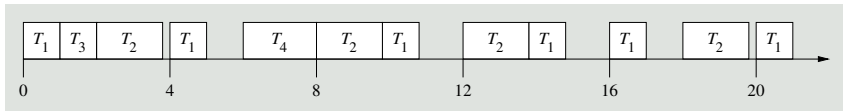
- **Regularität** von Einplanungsentscheidungen trägt wesentlich zu **Determinismus** und **Analysierbarkeit** bei





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 genau richtig wählen...

- f hinreichend lang \leadsto 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





Randbedingungen für die Rahmenlänge

Rahmenlänge f genau richtig wählen...

- f hinreichend lang \leadsto 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*)





Randbedingungen für die Rahmenlänge

Rahmenlänge f genau richtig wählen...

■ f hinreichend lang \leadsto 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 \leadsto Terminüberwachung unterstützen

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





Randbedingungen für die Rahmenlänge

Rahmenlänge f genau richtig wählen...

■ f hinreichend lang \leadsto 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*)

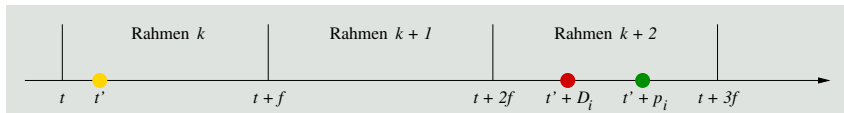
■ f hinreichend kurz \leadsto Terminüberwachung unterstützen

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

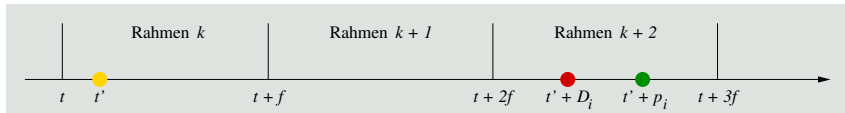


- Feststellung eines passenden Bereichs für f von $T = (p_i, e_i, D_i)$:¹



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

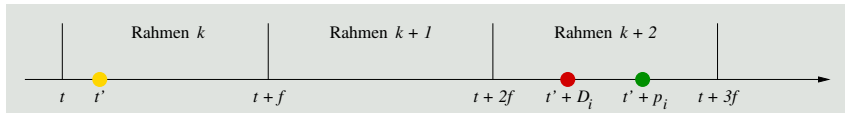
- Feststellung eines passenden Bereichs für f von $T = (p_i, e_i, D_i)$:¹



- 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.

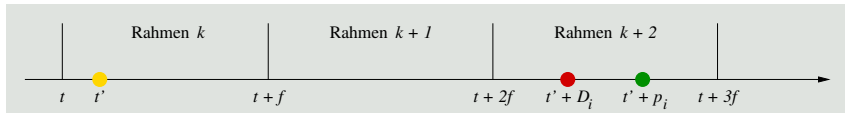
- Feststellung eines passenden Bereichs für f von $T = (p_i, e_i, D_i)$:¹



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

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

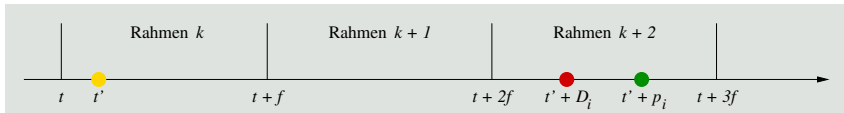
- Feststellung eines passenden Bereichs für f von $T = (p_i, e_i, D_i)$:¹



- 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

¹ Befindet 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

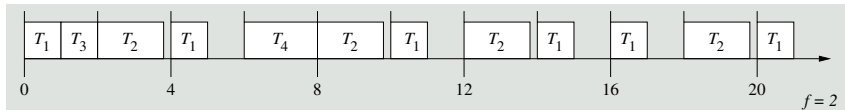


- t : Anfang des Rahmens k in dem ein Auftrag in T_i ausgelöst wird
- t' : Zeitpunkt der Auslösung des betreffenden Auftrags
- Rahmen $k + 1$ erlaubt die Kontrolle des bei t' ausgelösten Jobs
 - Der Rahmen sollte daher zwischen t' und $t' + D_i$ des Jobs liegen
- Dies ist erfüllt, wenn gilt: $t + 2f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

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



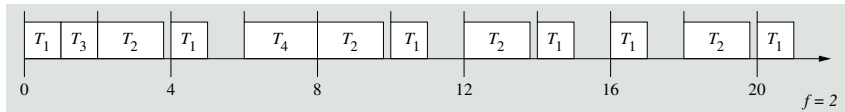
$$T_i = (p_i, e_i), D_i = p_i \text{ und } \phi_i = 0$$



- 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



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



- 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



Konflikte und deren Auflösung

Taskparameter zugunsten einer guten Ablaufplananordnung korrigieren

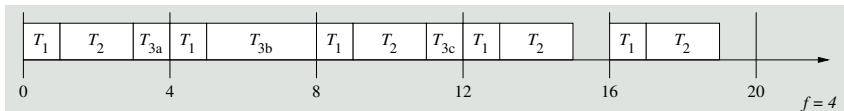


Arbeitsaufträge sind in Scheiben zu schneiden, falls nicht alle Randbedingungen erfüllbar sind



Konflikte und deren Auflösung

Taskparameter zugunsten einer guten Ablaufplananordnung korrigieren



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

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

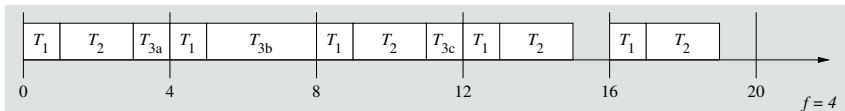
– $f \geq \max(e_i)$ gilt für $f \geq 5$ und $2f - \gcd(p_i, f) \leq D_i$ gilt für $f \leq 4$

!?



Konflikte und deren Auflösung

Taskparameter zugunsten einer guten Ablaufplananordnung korrigieren



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

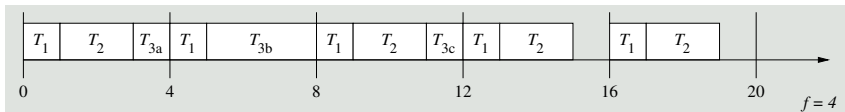
- Beispiel: $\mathbf{T} = \{(4, 1), (5, 2, 7), (20, 5)\}$:
 - $f \geq \max(e_i)$ gilt für $f \geq 5$ und $2f - \gcd(p_i, f) \leq D_i$ gilt für $f \leq 4$
- $T_3 = (20, 5)$ ist aufzuteilen in $T'_3 = \{(20, 1), (20, 3), (20, 1)\}$
 - Drei Teilaufgaben $T_{3a} = (20, 1)$, $T_{3b} = (20, 3)$, $T_{3c} =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

!?



Konflikte und deren Auflösung

Taskparameter zugunsten einer guten Ablaufplananordnung korrigieren



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

- Beispiel: $T = \{(4, 1), (5, 2, 7), (20, 5)\}$:
 - $f \geq \max(e_i)$ 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



- 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



- 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-2/29)

- 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-2/29)

- 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**

...





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** \mapsto effizient, finden u.U. keine (existierende) Lösung
 - Genetische Algorithmen, **List-Scheduling** [5], ...
- **Optimale Verfahren** \mapsto finden eine Lösung, sofern existierend
 - Lineare Programmierung [8], **Branch&Bound** [1], ...
 - \rightarrow Exponentiell wachsende Laufzeit im schlimmsten Fall



Folie 21



Optimale Suche mittels Branch&Bound



Planungsproblem \mapsto Suchproblem in einem Suchbaum

- Potentiell Betrachtung des kompletten Suchraums \leadsto exp. Laufzeit

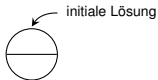


Optimale Suche mittels Branch&Bound



Planungsproblem \mapsto Suchproblem in einem Suchbaum

- Potentiell Betrachtung des kompletten Suchraums \leadsto exp. Laufzeit



1 Berechne eine initiale Lösung

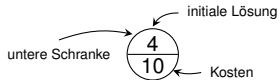


Optimale Suche mittels Branch&Bound



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

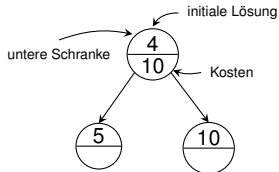


Optimale Suche mittels Branch&Bound



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

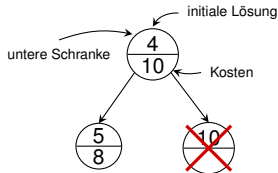


Optimale Suche mittels Branch&Bound



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

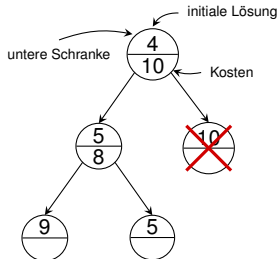


Optimale Suche mittels Branch&Bound



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 ...

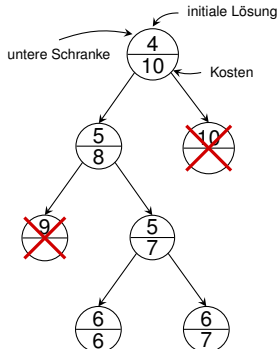


Optimale Suche mittels Branch&Bound



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 ...

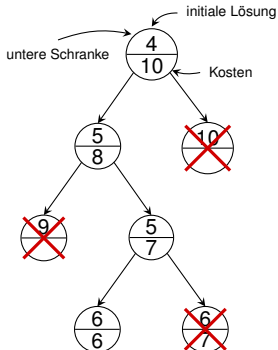


Optimale Suche mittels Branch&Bound



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



- **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!





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 Ablauftabellen

- 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 Ablauftabellen 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 Ablauftabellen

- 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 Ablauftabellen 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 Ablauftabelle, wenn sie auch zusammen ausgelöst werden können





Eine für alle Lastsituationen passende statische Ablauftabellen

- 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 Ablauftabellen 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 Ablauftabelle, wenn sie auch zusammen ausgelöst werden können



Gruppierungen von Arbeitsaufträgen definieren Betriebszustände

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





Eine für alle Lastsituationen passende statische Ablauftabellen

- 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 Ablauftabellen 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 Ablauftabelle, wenn sie auch zusammen ausgelöst werden können



Gruppierungen von Arbeitsaufträgen definieren Betriebszustände

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

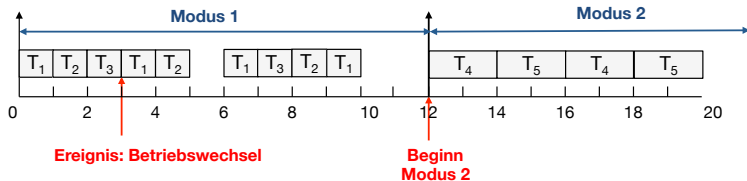


Betriebswechsel erfordert ein systemweit koordiniertes Vorgehen



Rekonfiguration des Aufgabensystems

Änderung von Aufgabenanzahl und -parametern

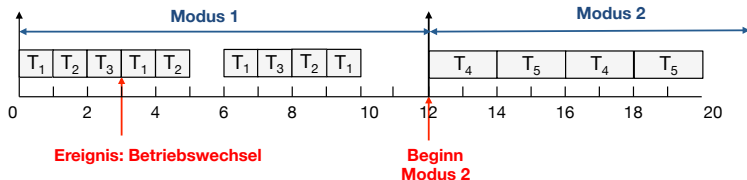


Umstellen auf einen neuen statischen Ablaufplan bedeutet mehr als nur einen **Tabellenwechsel** zu vollziehen:



Rekonfiguration des Aufgabensystems

Änderung von Aufgabenanzahl und -parametern



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

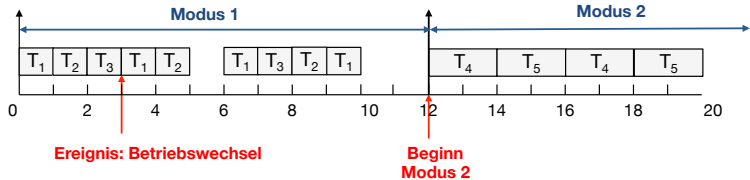
1 Zerstörung und Erzeugung von periodischen Aufgaben

- 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** \leadsto 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** \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**



- **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] Adam, T. L. ; Chandy, K. M. ; Dickson, J. R.:
A comparison of list schedules for parallel processing systems.
In: *Communications of the ACM* 17 (1974), Nr. 12, S. 685–690.
<http://dx.doi.org/10.1145/361604.361619>. –
DOI 10.1145/361604.361619. –
ISSN 0001–0782

- [3] 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

- [4] 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



- [5] 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
- [6] Kruatrachue, B. ; Lewis, T. G.:
Duplication Scheduling Heuristics (DSH): A New Precedence Task Scheduler for Parallel
Processor Systems / Oregon State University.
Corvallis, OR, USA, 1976. –
Forschungsbericht
- [7] Kwok, Y.-K. ; Ahmad, I. :
Static scheduling algorithms for allocating directed task graphs to multiprocessors.
In: *ACM Computing Surveys* 31 (1999), Nr. 4, S. 406–471.
<http://dx.doi.org/10.1145/344588.344618>. –
DOI 10.1145/344588.344618. –
ISSN 0360–0300



- [8] 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

- [9] Sih, G. C. ; Lee, E. A.:

A Compile-Time Scheduling Heuristic for Interconnection-Constrained Heterogeneous Processor Architectures.

In: *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 4 (1993), Nr. 2, S. 175–187.

<http://dx.doi.org/10.1109/71.207593>. –

DOI 10.1109/71.207593. –

ISSN 1045–9219



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), $D = p$ 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)

