

Echtzeitsysteme

Zeitgesteuerte Ablaufplanung periodischer Echtzeitsysteme

Peter Wägemann

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
<https://sys.cs.fau.de/lehre/ss22/ezs/>

7. Juni 2022



Fragestellungen

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

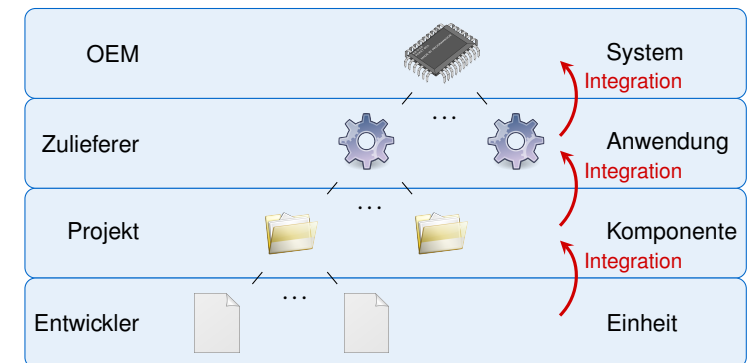


Gliederung

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



Ablaufplanung – Teil des Entwicklungsprozesses



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



Herausforderung Integration

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

- ⚠ Inhärent abhängig von den bereitgestellten Aufgaben
- **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**



Herausforderung Integration (Forts.)

Wenn funktionale Schnittstellenbeschreibungen nicht ausreichen

⚠ **Nachträgliche Änderungen** bedeuten **beträchtlichen Aufwand**

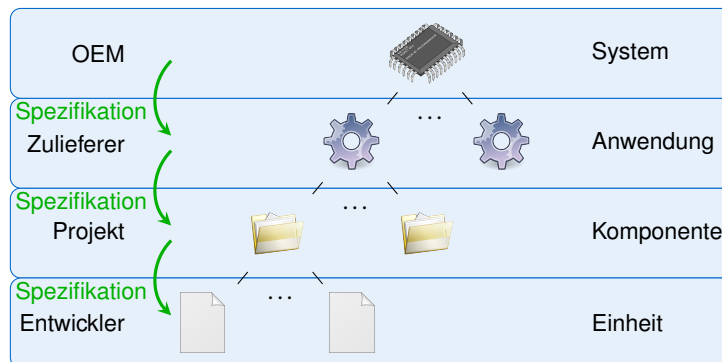
- **Beeinflussung** des Laufzeitverhaltens durch Änderung der
 - Maximalen Ausführungszeit (WCET, e)
 - Abbildung von Arbeitsaufträgen auf Aktivitätsträger
 - Abhängigkeiten zwischen Arbeitsaufträgen
- Überlast z. B. durch ineffiziente Implementierung bzw. Strukturierung
 - Keine **zulässigen** Ablaufpläne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

Spezifikation des zeitlichen Verhaltens von Softwarekomponenten

- Beispielsweise durch vorgezogene/iterative Analyse/Ablaufplanung



Spezifikation zeitlichen Verhaltens



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**



Spezifikation zeitlichen Verhaltens (Forts.)

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

- **Hollywood-Prinzip**: „Don't call us, we'll call you!“
- OEM muss die Anwendungsstruktur **vorgeben**

Globale **Planung** von zeitlichen Abläufen

- Zeitschlitz 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



Gliederung

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



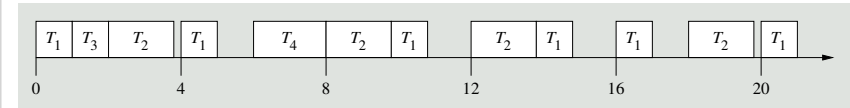
Regelmäßigkeit zyklischer Abläufe (engl. *cyclic executive*) [3]

Die Busy Loop wird erwachsen...



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



Rahmen (engl. *frames*)

Strukturelemente von zyklischen Ablaufplänen

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...



■ Terminüberwachung ermöglichen → f **hinreichend kurz**

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

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



■ Strukturbedingungen einhalten

- 3 f teilt die Hyperperiode H so, dass gilt: $\lfloor p_i/f \rfloor - p_i/f = 0$, für ein $1 \leq i \leq n$
 - 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*)



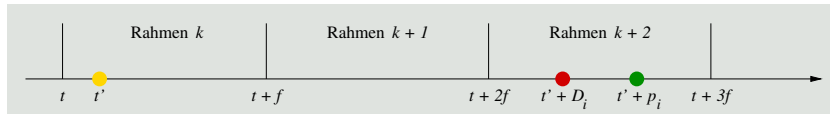
■ Das Regelwerk wird auf Seite 14 mit der 4. Regel abgeschlossen



Randbedingungen für die Rahmenlänge (Forts.)

Platzierung einer Aufgabe auf der Echtzeitachse

- 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 [3]

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



Randbedingungen für die Rahmenlänge (Forts.)

Rahmenlänge f für n Aufgaben genau richtig wählen...

- Verdrängung von Aufträgen vermeiden $\rightarrow f$ **hinreichend lang**

- 4 Erfüllt, wenn gilt: $f \geq \max(e_i^f)$, für $1 \leq i \leq H/f$

- e_i^f gibt die WCET aller Aufträge im Rahmen i an
- Jeder Auftrag läuft in der durch f gegebenen Zeitspanne komplett durch
- Erste Abschätzung nach unten: $f \geq \max(e_i)$, für $1 \leq i \leq n$



Ermittlung von $\max(e_i^f)$ erfolgt nachgelagert

- Regel 1-3 sind **notwendige Bedingungen** \rightarrow zu testende Rahmenlängen
- Fragestellung: Welcher Auftrag kommt in welchem Rahmen?
 - Kann erst durch konkrete Ablaufplanung beantwortet werden
- Iterativer Prozess \rightarrow Wiederholung für **jedes potentielle f**

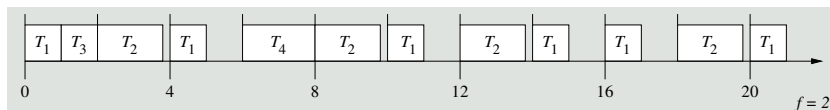


Nicht immer ist eine Lösung möglich \rightarrow Aufträge zerschneiden (S.16)



Randbedingungen für die Rahmenlänge (Forts.)

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

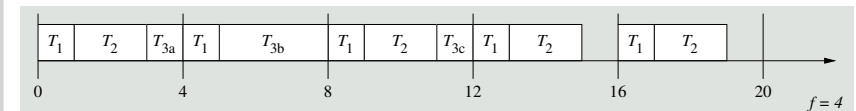


- Beispiel: $T_1 = (4, 1), T_2 = (5, 1.8), T_3 = (20, 1), T_4 = (20, 2)$
 - Ganzzahlige Teiler der Hyperperiode sind 2, 4, 5, 10 und 20 ($H = 20$)
 - Nur $f = 2$ erfüllt jedoch alle Bedingung 1-3 (Folie 12) zugleich
 - Hier $e_i^f \geq 2$ (Bedingung 4) gilt \rightarrow alle Aufträge eines jeden Rahmens laufen durch
- Weiteres Beispiel: $T_x = (15, 1, 14), T_y = (20, 2, 26), T_z = (22, 3)$
 - Mögliche Rahmenlängen in H : 3, 4, 5, 10, 11, 15, 20, 22 ($H = 660$)
 - Nur $f = 3, 4$ oder 5 erfüllt Bedingungen
 - Planung ergibt dass $e_i^f \geq 3$ gilt



Konflikte und deren Auflösung

Taskparameter zugunsten einer guten Ablaufplananordnung korrigieren



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

- Beispiel: $T_1 = (4, 1), T_2 = (5, 2, 7), T_3 = (20, 5)$:
 - $f \geq \max(e_i^f)$ 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 $T_{3a} = (20, 1), T_{3b} = (20, 3), T_{3c} = (20, 1)$
 - \rightarrow 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

!?



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-3/16)
 - Insbesondere kann dies zur Folge haben, andere Programm- bzw. Modulstrukturen herleiten zu müssen
 - Die erforderlichen **Programmtransformationen** geschehen bestenfalls (semi-) automatisch durch spezielle Kompilatoren
- ⚠ Schlimmstenfalls sind die Programme manuell umzuschreiben
- Aber: Gut geeignet für **Kommunikationssysteme**
 - Nachrichten lassen sich sehr gut und gezielt aufteilen
- 3 Arbeitsaufträge in die Rahmen platzieren

⚠ Rahmenlänge **querschneidende nicht-funktionale Eigenschaft**



Vor-/Nachteile zyklischer Ablaufpläne



Zyklisches Ablaufmodell liefert **wohlgeordnete Ablaufpläne**

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



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

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



+ **Niedrige Verwaltungsgemeinkosten**

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



+ **Hohe Vorhersagbarkeit**

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



Gliederung

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



Handarbeit ist mühsam!



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-2/31)

- Im Allgemeinen ist Ablaufplanung **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 zunehmende Praxisrelevanz
 - Verbesserte WCET-Analyse ebnet den Zugang zu solchen Verfahren



Algorithmische Lösungsverfahren – Überblick

Grundlegende Aufgabenstellung: Berechnung einer statischen Ablauftabelle für eine Menge periodischer Aufgaben (vgl. IV-2/26)

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** \rightarrow effizient, finden u.U. keine (existierende) Lösung
 - Genetische Algorithmen, List-Scheduling [4], ...
- **Optimale Verfahren** \rightarrow finden eine Lösung, sofern existierend
 - Lineare Programmierung [7], Branch&Bound [1], ...
 - \rightarrow Exponentiell wachsende Laufzeit im schlimmsten Fall

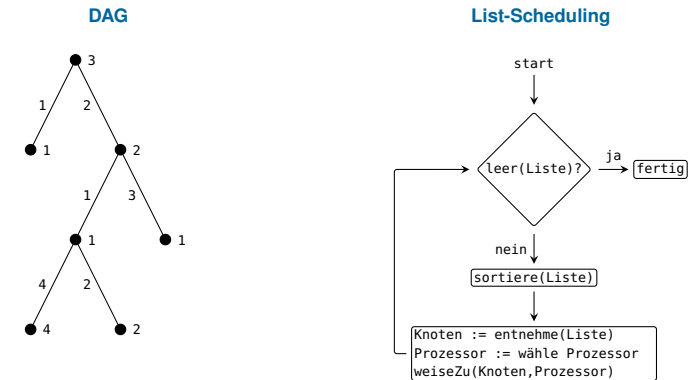
Folie 22

Folie 25



List-Scheduling

- List-Scheduling als Klasse heuristischer Verfahren, die gerichtete, azyklische Graphen (engl. *directed acyclic graph, DAG*) ordnen [6]



Knotengewichte \sim Berechnung (\rightarrow Jobs)

Kantengewichte \sim Kommunikation

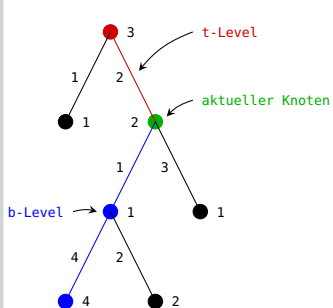
verwaltet Knoten in einer sortierten Liste



b-Level und t-Level

Grundlage der Sortierkriterien beim List-Scheduling

Position eines Knotens im DAG bestimmt die Position in der Liste



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

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

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

- Während der Planung i.d.R. konstant

Pfadlänge Summe der Knoten- und Kantengewichte ohne aktuellen Knoten

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

b-Level \sim Knoten auf dem kritischen Pfad werden bevorzugt

t-Level \sim Plant Knoten entlang der topologischen Ordnung



Beispiele

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

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

ISH (Insertion Scheduling Heuristic) [5]

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

DLS (Dynamic Level Scheduling) [8]

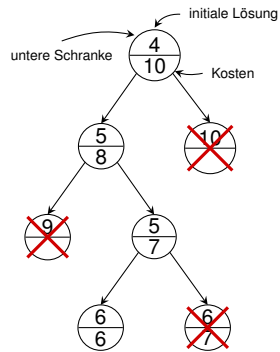
- Sortierkriterium: *Dynamic Level*
 - Differenz: b-Level – frühestem Startzeitpunkt für einen Prozessor
 - Wird nach jedem Durchlauf neu berechnet
- Bereitliste enthält zunächst nur die Wurzelknoten des DAG
 - Hinzufügen von Knoten nach Einplanung des Vorgängers



Optimale Suche mittels Branch&Bound

Planungsproblem \rightarrow Suchproblem in einem Suchbaum

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



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

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



Branch&Bound – Statische Ablaufplanung

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

- **Initiale Lösungen** sind bereits vollständige gültige Ablaufpläne
 - Diese können aber noch Termine verletzen, sind also nicht zulässig
 - \rightarrow Ein Verfahren für deren Bestimmung wird benötigt
- **Kosten** einer Lösung sind die vorhandenen **Verspätungen**
 - \rightarrow 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
 - \rightarrow Verspätung ohne Verletzung der ursprünglichen Vorgaben reduzieren

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



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
- \rightarrow Für obiges Planungsproblem **nicht optimal**

Kosten: Ablaufplan mittels EDF bestimmen

Untere Schranke: Vereinfachung bis EDF optimal ist!

- \rightarrow Entfernen ungerichteter oder kernübergreifender Abhängigkeiten

Verbesserung: durch gezieltes Hinzufügen von Abhängigkeiten



Gliederung

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



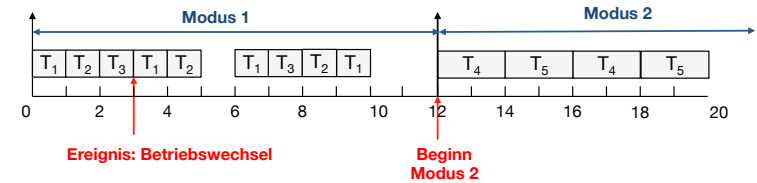
Moduswechsel: Flexibilität in zeitgesteuerten Systemen

- ⚠ 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:
 - 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



Arten von Betriebswechsel

Aperiodischer oder sporadischer Job

- 🔗 Wechsel vom speziellen Arbeitsauftrag (engl. *mode-change job*) durchführen lassen → **nicht-periodische 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) Übernahmepfung 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



Gliederung

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



Resümee

- **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** ↪ 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



Literaturverzeichnis

- [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
- [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 Real-Time Systems Symposium (RTSS '88)*, IEEE Computer Society Press, 1988, S. 120–129
- [4] Casavant, T. L. ; Kuhl, J. G.:
A taxonomy of scheduling in general-purpose distributed computing systems.
In: *IEEE Transactions on Software Engineering* 14 (1988), Nr. 2, S. 141–154.
<http://dx.doi.org/10.1109/32.4634>. –
DOI 10.1109/32.4634. –
ISSN 0098–5589



Literaturverzeichnis (Forts.)

- [5] 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
- [6] 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
- [7] 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



Literaturverzeichnis (Forts.)

- [8] 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



EZS – Cheat Sheet

Typographische Konvention

Der erste Index gibt die Aufgabe an (z. B. D_i), der Zweite (optional) bezieht sich auf den Arbeitsauftrag (z. B. $d_{i,j}$). Exponenten zeigen verschiedene Varianten einer Eigenschaft an (z. B. T^{HW} , T^{MED} , T^{CD}). 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

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

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)
 e'_i WCET aller Aufträge im Rahmen i

