

Echtzeitsysteme

Zeitgesteuerte Ablaufplanung periodischer Echtzeitsysteme

Peter Wägemann

Lehrstuhl für Systemsoftware

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

<https://sys.cs.fau.de/lehre/ss24/ezs/>

28. Mai 2024



- 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

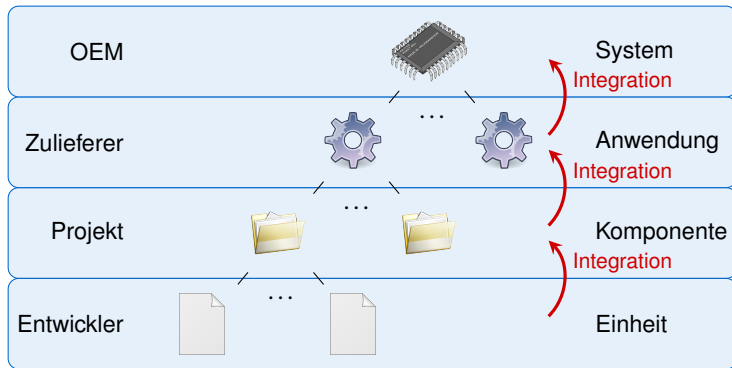
3 Algorithmische Einplanung

- List-Scheduling-Verfahren
- Branch&Bound-Algorithmen

4 Moduswechsel

5 Zusammenfassung





Der Integrationsprozess verläuft *Bottom-Up*:

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



☞ 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**





Nachträgliche Änderungen bedeuten beträchtlichen Aufwand

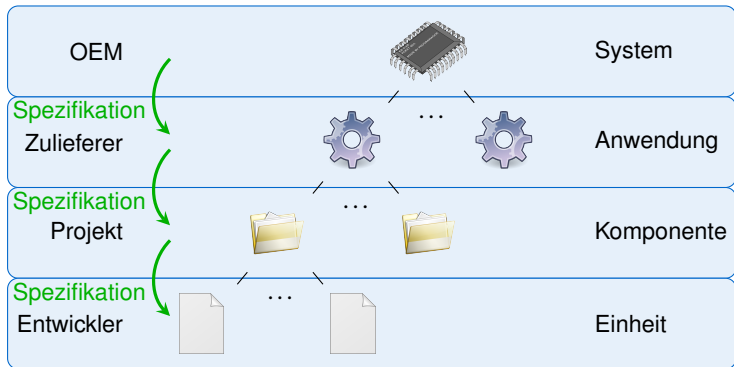
- **Beeinflussung** des Laufzeitverhaltens durch Änderung der
 - Maximalen Ausführungszeit (WCET, e)
 - Abbildung von Arbeitsaufträgen auf Aktivitätsträger
 - Abhängigkeiten zwischen Arbeitsaufträgen
 - Überlast z. B. durch ineffiziente Implementierung bzw. Strukturierung
 - Keine **zulässigen** Ablaufpläne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



Spezifikation des zeitlichen Verhaltens von Softwarekomponenten

- Beispielsweise durch vorgezogene/iterative Analyse/Ablaufplanung





■ Die Spezifikation erfolgt *Top-Down*:

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



■ Idee der Rahmenkonstruktion (engl. *framework*)

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

☞ Globale Planung von zeitlichen Abläufe

- 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



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

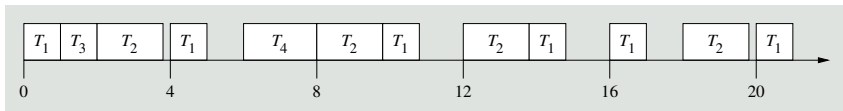
5 Zusammenfassung





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

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



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



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

- Einplanungsentscheidungen nicht zu beliebigen Zeitpunkten treffen





Die Rahmenlänge f

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

☞ Entscheidungen erfolgen nur am Rahmenanfang

- Aufträge einer Aufgabe werden am Anfang eines Rahmens ausgelöst

⚠ Innerhalb eines Rahmens ist Verdrängung ausgeschlossen

→ Phase einer periodischen Aufgabe ist ein Vielfaches von f

■ Verantwortungsbereich des *Dispatchers* erweitert sich

- Einlastung von Arbeitsaufträgen am Rahmenanfang
- **Überwachung/Durchsetzung** von Einplanungsentscheidungen
 - Wurde ein eingeplanter Auftrag tatsächlich **ausgelöst**?
 - Ist dieser Arbeitsauftrag auch zur Ausführung **bereit**?
 - Liegt eine **Terminverletzung** vor → steht eine Fehlerbehandlung an?
- Beeinflusst im hohen Maße den Wert für f





Randbedingungen für die Rahmenlänge

Rahmenlänge f für n Aufgaben genau richtig wählen...



Terminüberwachung ermöglichen $\mapsto f$ **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

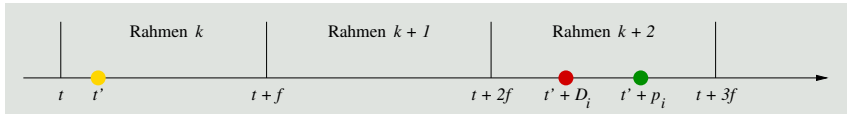
- 3 f teilt die Hyperperiode H so, dass gilt: $\lfloor p_i/f \rfloor - p_i/f = 0$, für ein $1 \leq i \leq n$
 - Ermöglicht die zyklische Ausführung des Ablaufplans
- Das Intervall H heißt **großer Durchlauf** (engl. *major cycle*)
 - Intervall der Länge f heißt **kleiner Durchlauf** (engl. *minor cycle*)



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



- 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 $\mapsto f$ **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

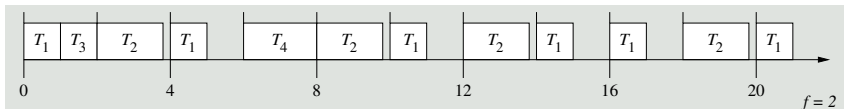
- Regel 1-3 sind **notwendige Bedingungen** $\mapsto$ zu testende Rahmenlängen
- Fragestellung: Welcher Auftrag kommt in welchem Rahmen?
 - Kann erst durch konkrete Ablaufplanung beantwortet werden
- Iterativer Prozess $\mapsto$ Wiederholung für **jedes potentielle f**



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

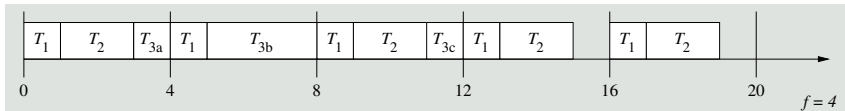


$$T_i = (p_i, e_i), D_i = p_i \text{ und } \phi_i = 0$$



- Beispiel: $T_1 = (4, 1)$, $T_2 = (5, 1.8)$, $T_3 = (20, 1)$, $T_4 = (20, 2)$
 - 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





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 $T_{3a} = (20, 1)$, $T_{3b} = (20, 3)$, $T_{3c} = (20, 1)$
 - Das resultierende System hat fünf Tasks und die Rahmenlänge $f = 4$
- $T_3 = (20, 5)$ in zwei Teilaufgaben aufzuteilen, bleibt erfolglos:
 - $\{(20, 4), (20, 1)\}$ geht nicht, wegen $T_1 = (4, 1)$
 - $\{(20, 3), (20, 2)\}$ geht nicht, da für $T_{3b} = (20, 2)$ kein Platz bleibt

!?



- 1 Rahmenlänge festlegen (vgl. IV-3/12)
 - Mögliche Konflikte erkennen

- 2 Arbeitsaufträge in Scheiben aufteilen (vgl. IV-3/16)
 - 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 ($\mapsto$ 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

- List-Scheduling-Verfahren
- Branch&Bound-Algorithmen

4 Moduswechsel

5 Zusammenfassung





Statische Ablaufpläne werden sehr schnell **umfangreich**

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

■ Algorithmische Ablaufplanung ist schwierig (vgl. IV-2/34)

- 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





Grundlegende Aufgabenstellung: Berechnung einer statischen Ablauftabelle für eine Menge periodischer Aufgaben (vgl. IV-2/29)

■ 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** [4], ...
- **Optimale Verfahren** $\mapsto$ finden eine Lösung, sofern existierend
 - Lineare Programmierung [7], **Branch&Bound** [1], ...
 - $\rightarrow$ Exponentiell wachsende Laufzeit im schlimmsten Fall

🏠 Folie 22

Folie 25

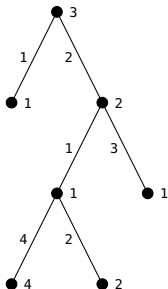




List-Scheduling

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

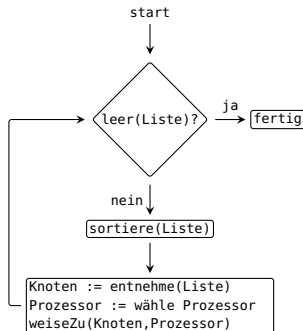
DAG



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

Kantengewichte $\leadsto$ Kommunikation

List-Scheduling

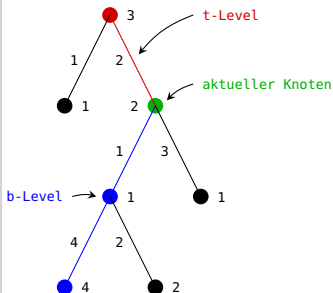


verwaltet Knoten in einer sortierten Liste





Position eines Knotens im DAG bestimmt die Position in der Liste



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

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

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

- Während der Planung i.d.R. konstant

Pfadlänge Summe der Knoten- und Kantengewichte ohne aktuellen Knoten



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

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

t-Level $\leadsto$ plant Knoten entlang der **topologischen Ordnung**





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

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

ISH (Insertion Scheduling Heuristic) [5]

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

DLS (Dynamic Level Scheduling) [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

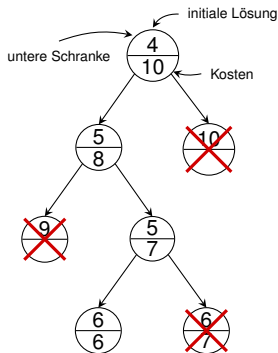


Optimale Suche mittels Branch&Bound



Planungsproblem $\mapsto$ 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

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





Leistungsumfang des Algorithmus

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



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

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

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

Kosten: Ablaufplan mittels EDF bestimmen

Untere Schranke : Vereinfachung bis EDF optimal ist!

- Entfernen ungerichteter oder kernübergreifender Abhängigkeiten

Verbesserung: durch gezieltes Hinzufügen von Abhängigkeiten



1 Entwicklung – Herangehensweise

- Ablaufplanung – Bottom-Up
- Spezifikation – Top-Down

2 Manuelle Einplanung

- Struktur zyklischer Ablaufpläne

3 Algorithmische Einplanung

- List-Scheduling-Verfahren
- 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

■ Entflechtung der Arbeitsaufträge ist das Ziel

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

■ Notwendig für Ablaufplanung mit gemischten Kritikalitäten (mixed-criticality scheduling)



Gruppierungen von Arbeitsaufträgen definieren Betriebszustände

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

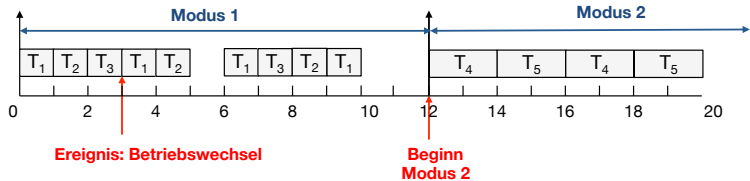


Betriebswechsel erfordert ein systemweit koordiniertes Vorgehen



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





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) 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

- List-Scheduling-Verfahren
- Branch&Bound-Algorithmen

4 Moduswechsel

5 Zusammenfassung



- **Entwicklungsprozesse** führen verschiedenste Akteure zusammen
 - Firmen/Arbeitsgruppen sind u.U. über den ganzen Globus verstreut
 - Eine **zeitliche Spezifikation** der Abläufe ist wünschenswert
 - Sie ermöglicht die Entwicklung **top-down** zu strukturieren
 - Wird durch eine manuelle, statische Ablaufplanung unterstützt
- **Struktur zyklischer Ablaufpläne** $\leadsto$ 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
- [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



- [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



[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



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

$J_{i,j} = (r_{i,j}, e_{i,j}, d_{i,j})$ 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^f WCET aller Aufträge im Rahmen i

