Echtzeitsysteme

Zeitgesteuerte Ablaufplanung periodischer Echtzeitsysteme

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

`https://www4.cs.fau.de`

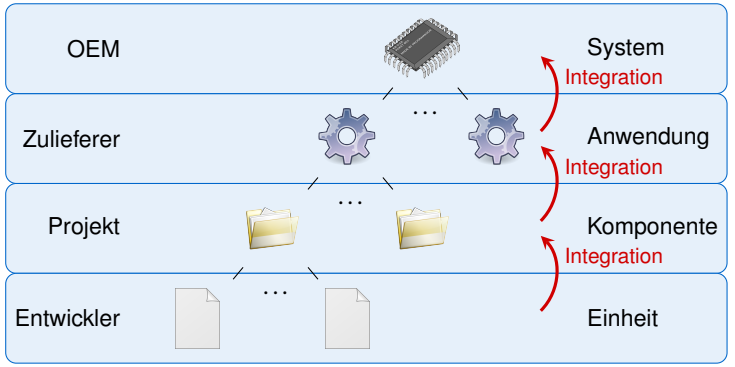
04. Dezember 2017

Fragestellungen

- 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?

Gliederung

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 Ablauftabelle

Herausforderung Integration

☞ 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

Herausforderung Integration (Forts.)

Wenn funktionale Schnittstellenbeschreibungen nicht ausreichen

⚠ Nachträgliche Änderungen bedeuten beträchtlichen Aufwand

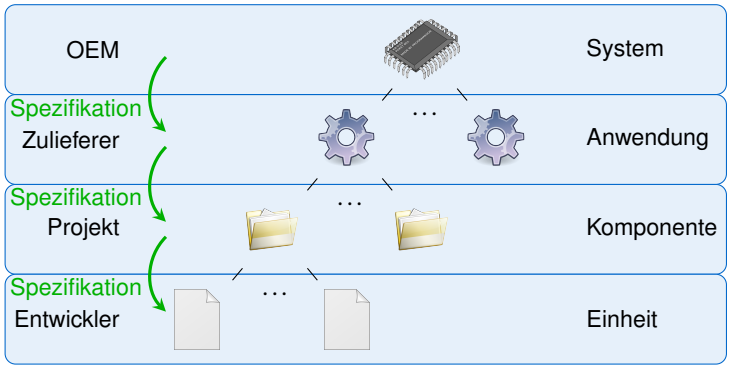
- Beeinflussung des Laufzeitverhaltens durch Änderung der
  - Maximalen Ausführungszeit (WCET, e)
  - Abbildung von Arbeitsaufträgen auf Aktivitätsträger
  - Abhängigkeiten zwischen Arbeitsaufträgen
- Überlast z. B. durch ineffiziente Implementierung bzw. Strukturierung
  - Keine zulässigen Ablaufpläne 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 Zeitschlitze 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 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

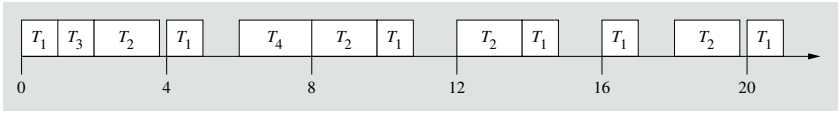
☞ Leitlinien für die Erstellung gut strukturierter, zyklischer Ablaufpläne sind wünschenswert und sinnvoll

Gliederung

Regelmäßigkeit zyklischer Abläufe (engl. *cyclic executive*) [2]

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 unterteilten die Echtzeitachse in Intervalle fester Länge f (engl. *frame size*)

☞ Entscheidungen erfolgen nur am Rahmenanfang
- Aufträge einer Aufgabe werden am Anfang eines Rahmens ausgelöst

⚠ Innerhalb eines Rahmens ist Verdrängung ausgeschlossen

→ Phase einer periodischen Aufgabe ist ein Vielfaches von f

- Verantwortungsbereich des *Dispatchers* erweitert sich
  - Einlastung von Arbeitsaufträgen am Rahmenanfang
  - Überwachung/Durchsetzung von Einplanungsentscheidungen
    - Wurde ein eingeplanter Auftrag tatsächlich ausgelöst?
    - Ist dieser Arbeitsauftrag auch zur Ausführung bereit?
    - Liegt eine Terminverletzung vor ↦ steht eine Fehlerbehandlung an?

  → Beeinflusst im hohen Maße den Wert für f

Randbedingungen für die Rahmenlänge

Rahmenlänge f für n Aufgaben genau richtig wählen...

☞ Verdrängung von Aufträgen vermeiden ↦ f hinreichend lang

1. Erfüllt, wenn gilt: $f \geq \max(e_i)$, für $1 \leq i \leq n$
   - Jeder Auftrag läuft in der durch f gegebenen Zeitspanne komplett durch
2. f teilt die Hyperperiode H so, dass gilt: $\lfloor p_i/f \rfloor - p_i/f = 0$, für $1 \leq i \leq n$
   - Ermöglicht die zyklische Ausführung des Ablaufplans

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

☞ Terminüberwachung ermöglichen ↦ f hinreichend kurz

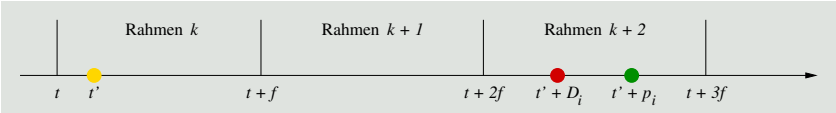
3. Erfordert eine rechtzeitige Auslösung: $f \leq p_i$, für $1 \leq i \leq n$
4. Möglich unter der Bedingung: $2f - ggT(p_i, f) \leq D_i$

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

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]

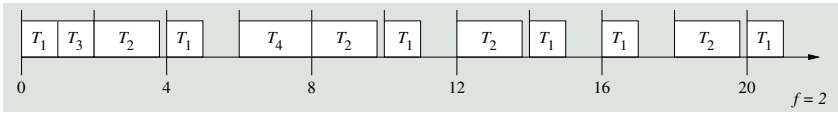


- t: Anfang des Rahmens k in dem ein Auftrag in T_i ausgelöst wird
- t': Zeitpunkt der Auslösung des betreffenden Auftrags
- Rahmen $k+1$ erlaubt die Kontrolle des bei t' ausgelösten Jobs
  - Der Rahmen sollte daher zwischen t' und $t' + D_i$ des Jobs liegen
- Dies ist erfüllt, wenn gilt: $t + 2f \leq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

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

Randbedingungen für die Rahmenlänge (Forts.)

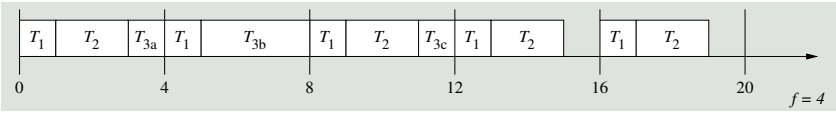
$T_i = (p_i, e_i)$, $D_i = p_i$ und $\phi_i = 0$



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

Konflikte und deren Auflösung

Taskparameter zugunsten einer guten Ablaufplananordnung korrigieren



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

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

Entstehungsprozess eines zyklischer Ablaufplans

Gegenseitige Abhängigkeit von Entwurfsentscheidungen

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

⚠ Rahmenlänge querschneidende nicht-funktionale Eigenschaft

Vor-/Nachteile zyklischer Ablaufpläne

☞ Zyklisches Ablaufmodell liefert wohlgeordnete Ablaufpläne
- Eine feste Rahmengröße mit definierten Schranken
- Ablaufplanung (↦ Zuteilung Aufträge zu Rahmen) findet offline statt

→ Einlastung und Terminüberwachung zu definierten Zeitpunkten

– 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

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-2/33)
- Im Allgemeinen ist Ablaufplanung stark NP-hart

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

Algorithmische Lösungsverfahren – Überblick

☞ Grundlegende Aufgabenstellung: Berechnung einer statischen Ablauftabelle für eine Menge periodischer Aufgaben (vgl. IV-2/28)

■ Existierende Verfahren erfüllen deutlich mehr Anforderungen:
- Berücksichtigung gerichteter und ungerichteter Abhängigkeiten
- Verteilte Systeme und Mehrkern- sowie Mehrprozessorsysteme
- Beschleunigung von Arbeitsaufträgen durch Duplizierung

  ...

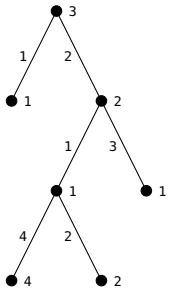
■ Kategorien algorithmischer Lösungsverfahren:
- Heuristiken ↦ effizient, finden u.U. keine (existierende) Lösung Folie 21
  - Genetische Algorithmen, List-Scheduling [3], ...
- Optimale Verfahren ↦ finden eine Lösung, sofern existierend Folie 24
  - Lineare Programmierung [4], Branch&Bound [1], ...

→ Exponentiell wachsende Laufzeit im schlimmsten Fall

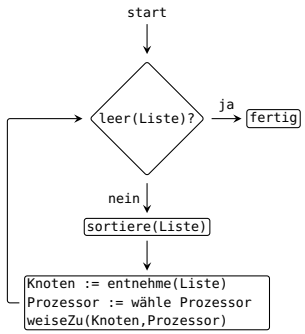
List-Scheduling

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

DAG



List-Scheduling



Knotengewichte ⇝ Berechnung (↦ Jobs)

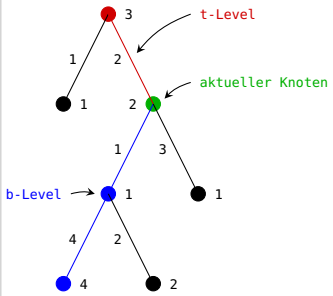
Kantengewichte ⇝ Kommunikation

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 ⇝ Knoten auf dem kritischen Pfad werden bevorzugt

t-Level ⇝ Plant Knoten entlang der topologischen Ordnung

Beispiele

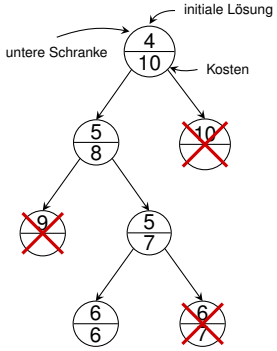
HLFET (**H**ighest **L**evel **F**irst with **E**stimated **T**imes) [**?**]
- Vernachlässigt Kommunikation ⇝ Kantengewichte = 0
- Verwendet b-Level als alleiniges Sortierkriterium

ISH (**I**nsertion **S**cheduling **H**euristic) [**?**]
- Sortierkriterium ⇝ wie HLFET
- Evtl. entstehen Intervalle der Untätigkeit (engl. *idle time slots*)
  - Auffüllung durch Knoten aus der Bereitliste falls möglich

DLS (**D**ynamic **L**evel **S**cheduling) [**?**]
- 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 ↦ Suchproblem in einem Suchbaum
- Potentiell Betrachtung des kompletten Suchraums ⇝ exp. Laufzeit



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

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

Branch&Bound – Statische Ablaufplanung

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

- Initiale Lösungen sind bereits vollständige gültige Ablaufpläne
  - Diese können aber noch Termine verletzen, sind also nicht zulässig
  - → Ein Verfahren für deren Bestimmung wird benötigt
- Kosten einer Lösung sind die vorhandenen Verspätungen
  - → Maximale Terminüberschreitung aller Jobs
- Untere Schranken durch Vereinfachung des Planungsproblems
  - Ohne die Optimalität des Algorithmus zu verletzten
- 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.

Der Algorithmus von Abdelzaher und Shin [1]

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

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

⚠ Der Algorithmus führt jedoch keine Allokation durch!

Initiale Lösung: Globaler EDF-Algorithmus (G-EDF)
- Erweitert um die Behandlung ungerichteter Abhängigkeiten
- → Für obiges Planungsproblem nicht optimal

Kosten: Ablaufplan mittels EDF bestimmen

Untere Schranke : Vereinfachung bis EDF optimal ist!
- → Entfernen ungerichteter oder kernübergreifender Abhängigkeiten

Verbesserung: Durch gezieltes Hinzufügen von Abhängigkeiten

Gliederung

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

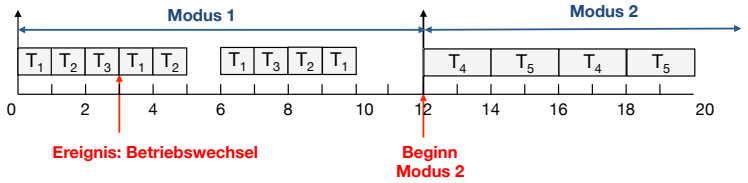
- Entflechtung der Arbeitsaufträge ist das Ziel
  - Arbeitsaufträge befinden sich nur in einer gemeinsamen Ablauftabelle, wenn sie auch zusammen ausgelöst werden können

☞ 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 überdaueren 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 ↦ 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

Gliederung

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. –
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

Literaturverzeichnis (Forts.)

[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

Literaturverzeichnis (Forts.)

[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

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^{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)
$h_{\Delta t}$ Rechenzeitbedarf (engl. demand)
$u_{\Delta t}$ CPU-Auslastung (engl. utilisation)
U Absolute CPU-Auslastung
H Hyperperiode (großer Durchlauf, engl. major cycle)
f Rahmenlänge (kleiner Durchlauf, engl. minor cycle)