Echtzeitsysteme

Rekapitulation

Peter Wägemann

Lehrstuhl für Systemsoftware

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

`https://sys.cs.fau.de/lehre/ss24/ezs/`

9. Juli 2024

Verlässliche Echtzeitsysteme – Übersicht

☞ Wir haben uns bisher nur um Rechtzeitigkeit gekümmert!

⚠ Fehlerfall übersteigt die Kosten des Normalfalls um Größenordnungen

- Fragestellung: Wie werden verlässliche Echtzeitsysteme entwickelt?
  - Wie wird die Korrektheit von Software sichergestellt?
  - Welche Laufzeitfehler sind insbesondere von Belang?
  - Welche Fehlertoleranzmechanismen werden implementiert?

☞ Ziel: Zuverlässiger Betrieb, minimierte Ausfallwahrscheinlichkeit

Verlässliche Echtzeitsysteme – Termin

- **Vorlesung**
  - Dozent: Peter Wägemann
  - ECTS: 5 oder 7,5
  - Raum: tba (Aquarium)
  - Termin: tba

- **Übungen**
  - Übungsleiter: Eva Dengler
  - Basis + Erweiterte Übungen, Rechnerübung

Raum- und Zeitangaben sind vorläufig!

Gliederung

II – Einleitung

- Echtzeitbetrieb eines Rechensystems in seiner Umgebung
  - Ereignis, Ereignisbehandlung, Ergebnis, Termin
- Komponenten eines Echtzeitsystems
  - Operateur, Echtzeitrechensystem, kontrolliertes Objekt
- Weiche, feste und harte Echtzeitbedingungen
- Determiniertheit, Determinismus, Vorhersagbarkeit
- Verhalten von Echtzeitanwendungen
  - Rein/meist zyklisch
  - Asynchron und irgendwie/nicht vorhersagbar

II – Einleitung

- Echtzeitbetrieb eines Rechensystems in seiner Umgebung
  - Ereignis, Ereignisbehandlung, Ergebnis, Termin
- Komponenten eines Echtzeitsystems
  - Operateur, Echtzeitrechensystem, kontrolliertes Objekt
- Weiche, feste und harte Echtzeitbedingungen
- Determiniertheit, Determinismus, Vorhersagbarkeit
- Verhalten von Echtzeitanwendungen
  - Rein/meist zyklisch
  - Asynchron und irgendwie/nicht vorhersagbar
- Abgrenzung: Fokus dieser Vorlesung liegt auf der Rechtzeitigkeit

III-1 – Zusammenspiel

Zusammenspiel Kontrolliertes Objekt ⟷ Kontrollierendes Rechensystem

- die Objektdynamik definiert den zeitlichen Rahmen durch Termine
- die Echtzeitanwendung muss diese Termine einhalten

III-1 – Zusammenspiel

Zusammenspiel Kontrolliertes Objekt ⟷ Kontrollierendes Rechensystem

- die Objektdynamik definiert den zeitlichen Rahmen durch Termine
- die Echtzeitanwendung muss diese Termine einhalten

Programmunterbrechung in synchroner oder asynchroner Ausprägung

- beeinflussen den Ablauf der Echtzeitanwendung
- Zustandssicherung, Verwaltungsgemeinkosten des schlimmsten Falls

III-2 – Echtzeitanwendung

- Einplanungseinheit ↦ Prozedur, Faden und/oder Fadengruppe
  - Aufgaben (*Tasks*) und Arbeitsaufträgen (*Jobs*)
  - Verwaltungsgemeinkosten ein- und mehrfädiger Aufgaben
  - Einplanung als zweiphasiger Prozess

III-2 – Echtzeitanwendung

- Einplanungseinheit ↦ Prozedur, Faden und/oder Fadengruppe
  - Aufgaben (*Tasks*) und Arbeitsaufträgen (*Jobs*)
  - Verwaltungsgemeinkosten ein- und mehrfädiger Aufgaben
  - Einplanung als zweiphasiger Prozess
- Ablaufsteuerung ↦ Strategie & Mechanismus
  - Einplanung ist die Strategie, Einlastung ist der Mechanismus
  - entkoppelt vs. gekoppelt, Zeitsteuerung vs. Vorrang-/Ereignissteuerung

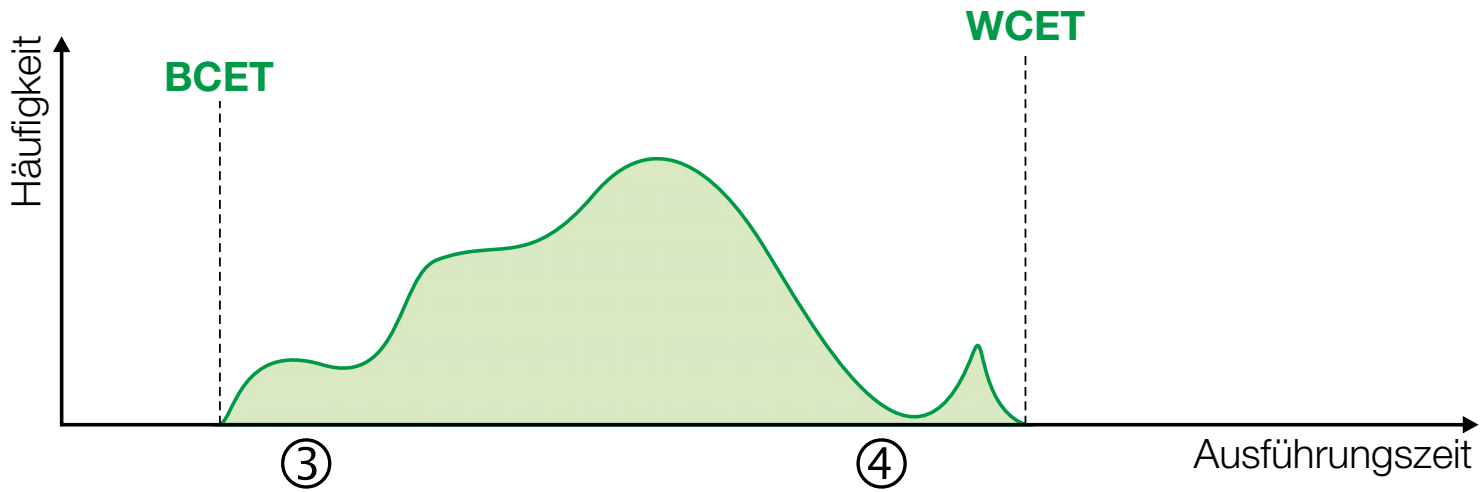
III-2 – Echtzeitanwendung

- Einplanungseinheit ↦ Prozedur, Faden und/oder Fadengruppe
  - Aufgaben (*Tasks*) und Arbeitsaufträgen (*Jobs*)
  - Verwaltungsgemeinkosten ein- und mehrfädiger Aufgaben
  - Einplanung als zweiphasiger Prozess
- Ablaufsteuerung ↦ Strategie & Mechanismus
  - Einplanung ist die Strategie, Einlastung ist der Mechanismus
  - entkoppelt vs. gekoppelt, Zeitsteuerung vs. Vorrang-/Ereignissteuerung
- Zeitparameter sind Punkte und Intervalle auf der Echtzeitachse
  - Auslösezeit, (absoluter) Termin
  - Antwortzeit, relativer Termin, Schlupfzeit, Ausführungszeit

III-2 – Echtzeitanwendung

- Einplanungseinheit ↦ Prozedur, Faden und/oder Fadengruppe
  - Aufgaben (*Tasks*) und Arbeitsaufträgen (*Jobs*)
  - Verwaltungsgemeinkosten ein- und mehrfädiger Aufgaben
  - Einplanung als zweiphasiger Prozess
- Ablaufsteuerung ↦ Strategie & Mechanismus
  - Einplanung ist die Strategie, Einlastung ist der Mechanismus
  - entkoppelt vs. gekoppelt, Zeitsteuerung vs. Vorrang-/Ereignissteuerung
- Zeitparameter sind Punkte und Intervalle auf der Echtzeitachse
  - Auslösezeit, (absoluter) Termin
  - Antwortzeit, relativer Termin, Schlupfzeit, Ausführungszeit
- Planbarkeit sichert Rechtzeitigkeit der Echtzeitanwendung
  - gültige und zulässige Ablaufpläne
  - optimale Einplanungsalgorithmen
  - konstruktive vs. analytische Überprüfung der Planbarkeit

III-3 – WCET

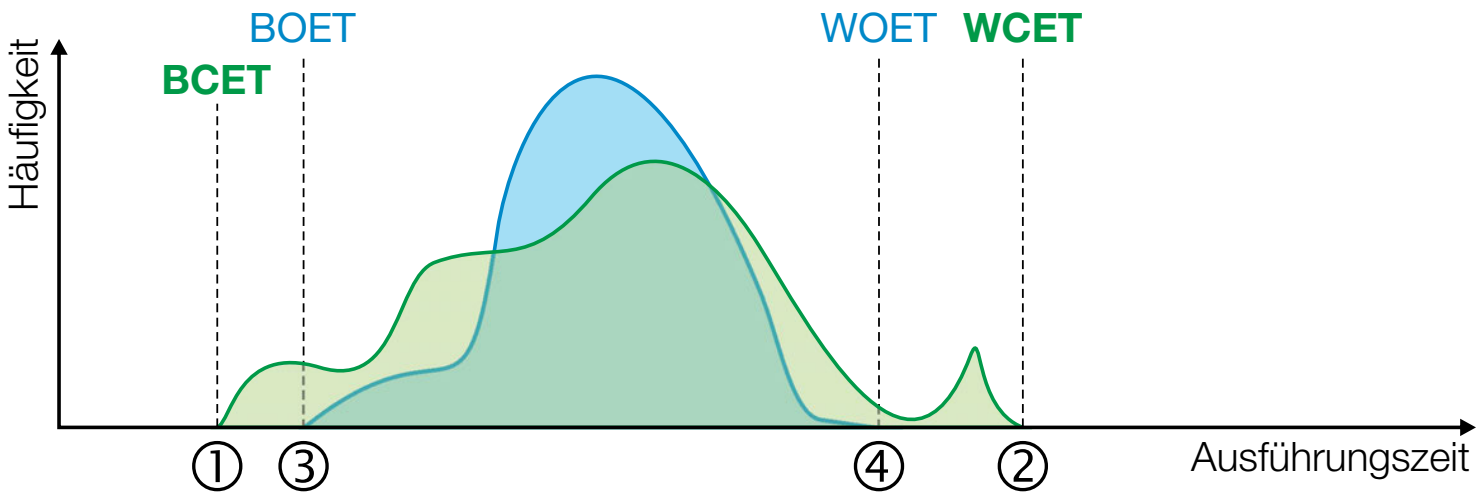


☞ WCET-Bestimmung gliedert sich grob in zwei Teilprobleme

- Programmiersprachenebene (makroskopisch) $\rightsquigarrow$ finde die längsten Pfade durch ein Programm
- Maschinenprogrammebene (mikroskopisch) $\rightsquigarrow$ bestimmte die WCET der Elementaroperationen

⚠ Tatsächliche Ausführungszeit: BCET / WCET

III-3 – WCET

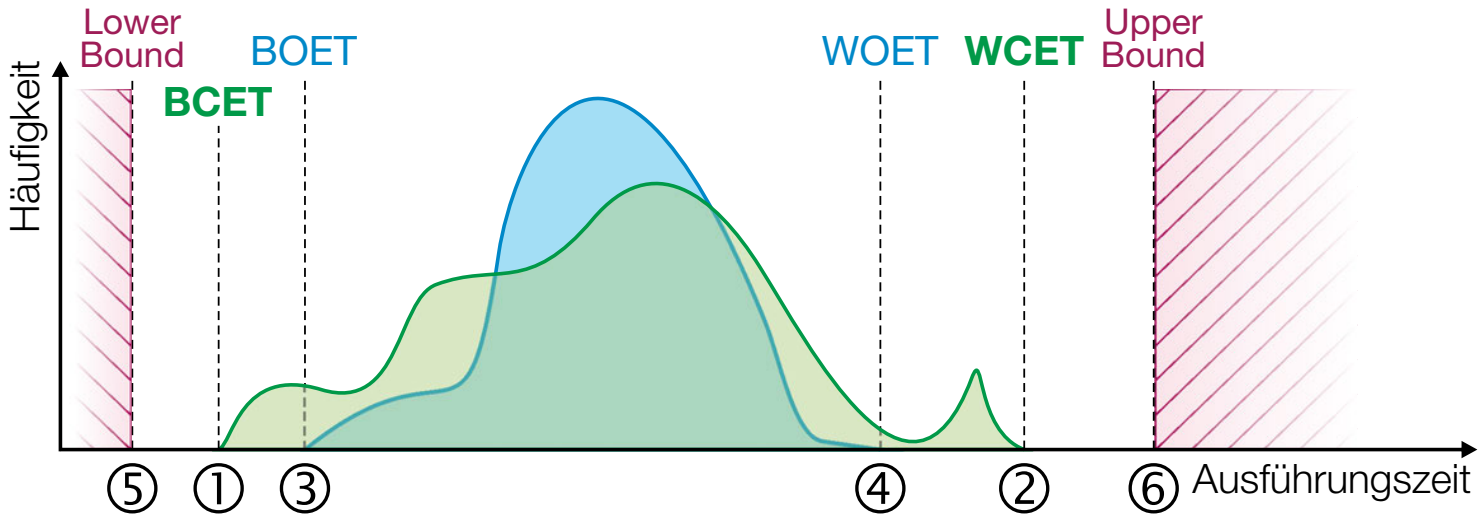


☞ Dynamische Analyse ↦ Beobachtung der Ausführungszeit

- Messung bezieht beide Ebenen mit ein
- Vollständige Messung im Allgemeinen nicht möglich ⇝ Unterapproximation

⚠ Gemessene Ausführungszeit: BOET / WOET

III-3 – WCET

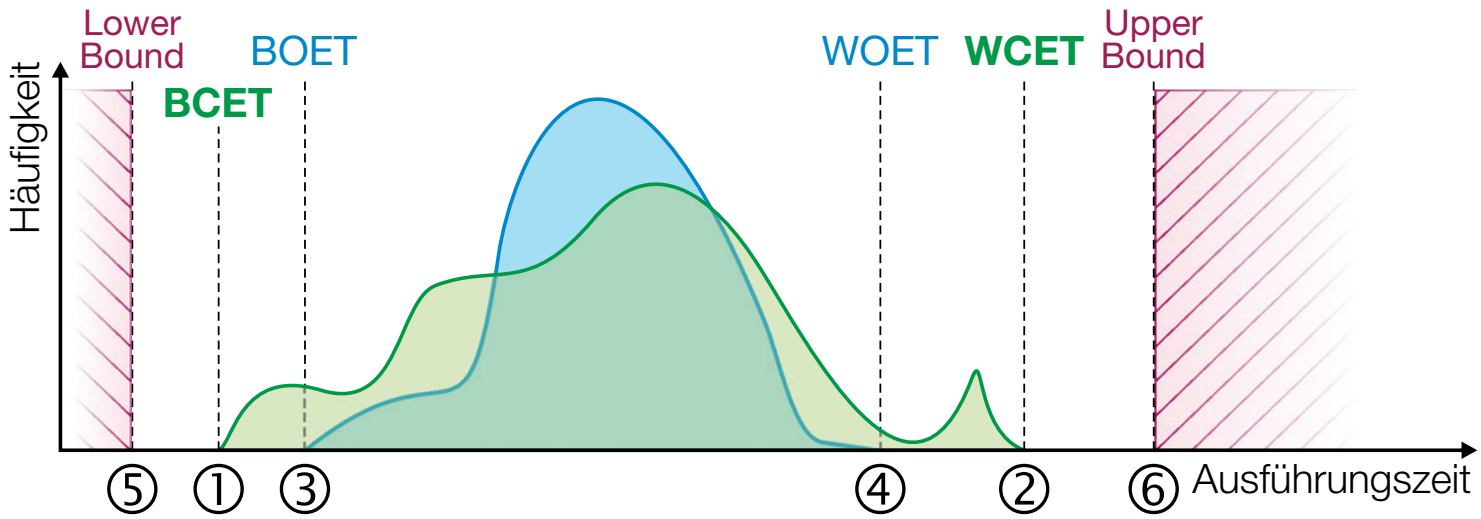


☞ Statische Analyse ↦ schätzt die Ausführungszeit

- Pfadanalyse (Programmiersprachenebene)
- Lösungswege: Abstraktion (Timing Schema vs. IPET)
- Gibt pessimistische Schranken an ⇝ Überapproximation

⚠ Geschätzte Ausführungszeitgrenzen: Lower- / Upper Bound

III-3 – WCET



☞ Hardware-Analyse ↦ Eingaben für die WCET-Berechnung

- Hauptaufgaben: Cache- und Pipeline-Analyse
- must-Approximation und may-Approximation

⚠ Werkzeugunterstützung kombiniert Ebenen und macht die WCET-Analyse handhabbar

IV-1 – Periodische EZS-Ausführung

Periodische Aufgaben haben in Echtzeitsystemen eine weite Verbreitung

- Periode, Phase, Hyperperiode, digitale Kontrollschleife
- Restriktionen periodischer Aufgaben und ihre Einschränkungen

IV-1 – Periodische EZS-Ausführung

Periodische Aufgaben haben in Echtzeitsystemen eine weite Verbreitung

- Periode, Phase, Hyperperiode, digitale Kontrollschleife
- Restriktionen periodischer Aufgaben und ihre Einschränkungen

Zeitgesteuerte Ausführung periodischer Aufgaben

- naive „*Busy Loop*“-Implementierung und Ablauftabellen
- Laufzeitkontrolle im Abfrage- und Unterbrecherbetrieb
- Tickless Systeme
- stapelbasierte Ablaufplanung

Ereignisgesteuerte Ausführung periodischer Aufgaben

- Ereignis- bzw. prioritätsorientierte Einplanung
- Feste und dynamische Prioritäten auf Task- bzw. Job-Ebene
- Auslösung vs. Auswahl, Ablaufliste vs. Ablauftabelle
- *Multi-Level-Queue-Scheduler*

IV-1 – Periodische EZS-Ausführung

Periodische Aufgaben haben in Echtzeitsystemen eine weite Verbreitung

- Periode, Phase, Hyperperiode, digitale Kontrollschleife
- Restriktionen periodischer Aufgaben und ihre Einschränkungen

Zeitgesteuerte Ausführung periodischer Aufgaben

- naive „*Busy Loop*“-Implementierung und Ablauftabellen
- Laufzeitkontrolle im Abfrage- und Unterbrecherbetrieb
- Tickless Systeme
- stapelbasierte Ablaufplanung

Ereignisgesteuerte Ausführung periodischer Aufgaben

- Ereignis- bzw. prioritätsorientierte Einplanung
- Feste und dynamische Prioritäten auf Task- bzw. Job-Ebene
- Auslösung vs. Auswahl, Ablaufliste vs. Ablauftabelle
- *Multi-Level-Queue-Scheduler*

IV-2 – Periodische EZS

Ablaufplanung gebräuchliche, ereignisgesteuerte Verfahren

- statische Prioritäten $\leadsto$ RM, DM
  - Prioritätsabbildung im Falle nicht ausreichender Systemprioritäten
- dynamische Prioritäten $\leadsto$ EDF
- Priorität/Dringlichkeit $\neq$ Wichtigkeit/Kritikalität
- Systeme mit gemischten Kritikalitäten (*LO*, *HI*)

Ablaufplanung gebräuchliche, ereignisgesteuerte Verfahren

- statische Prioritäten $\rightsquigarrow$ RM, DM
  - Prioritätsabbildung im Falle nicht ausreichender Systemprioritäten
- dynamische Prioritäten $\rightsquigarrow$ EDF
- Priorität/Dringlichkeit $\neq$ Wichtigkeit/Kritikalität
- Systeme mit gemischten Kritikalitäten (*LO*, *HI*)

Optimalität und Nichtoptimalität von RM, DM und EDF

- Hängt von den Eigenschaften der betrachteten Aufgaben ab
- Nichtoptimalität von statischen Prioritäten und Ereignissteuerung

IV-2 – Periodische EZS

Ablaufplanung gebräuchliche, ereignisgesteuerte Verfahren

- statische Prioritäten $\rightsquigarrow$ RM, DM
  - Prioritätsabbildung im Falle nicht ausreichender Systemprioritäten
- dynamische Prioritäten $\rightsquigarrow$ EDF
- Priorität/Dringlichkeit $\neq$ Wichtigkeit/Kritikalität
- Systeme mit gemischten Kritikalitäten (*LO*, *HI*)

Optimalität und Nichtoptimalität von RM, DM und EDF

- Hängt von den Eigenschaften der betrachteten Aufgaben ab
- Nichtoptimalität von statischen Prioritäten und Ereignissteuerung

Planbarkeitsanalyse ereignisgesteuerter Ablaufplanungsverfahren

- maximalen, kumulativen CPU-Auslastung und Antwortzeitanalyse

IV-3 – Periodische EZS

- 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

IV-3 – Periodische EZS

- Entwicklungsprozesse führen verschiedenste Akteure zusammen
  - Firmen/Arbeitsgruppen sind u.U. über den ganzen Globus verstreut

  → Eine zeitliche Spezifikation der Abläufe ist wünschenswert
    - Sie ermöglicht die Entwicklung top-down zu strukturieren
    - Wird durch eine manuelle, statische Ablaufplanung unterstützt

- Struktur zyklischer Ablaufpläne $\rightsquigarrow$ gute Anordnung, Determinismus
  - Rahmen, Rahmenlänge, Scheiben; *major/minor cycle*

IV-3 – Periodische EZS

- Entwicklungsprozesse führen verschiedenste Akteure zusammen
  - Firmen/Arbeitsgruppen sind u.U. über den ganzen Globus verstreut

  → Eine zeitliche Spezifikation der Abläufe ist wünschenswert
  - Sie ermöglicht die Entwicklung top-down zu strukturieren
  - Wird durch eine manuelle, statische Ablaufplanung unterstützt

- Struktur zyklischer Ablaufpläne $\rightsquigarrow$ gute Anordnung, Determinismus
  - Rahmen, Rahmenlänge, Scheiben; *major/minor cycle*

- Algorithmische Einplanung ordnet gerichtete, azyklische Graphen

  → Entlastung bei der Lösung eines komplexen Problems
  - List-Scheduling- und Branch&Bound-Algorithmen

IV-3 – Periodische EZS

- Entwicklungsprozesse führen verschiedenste Akteure zusammen
  - Firmen/Arbeitsgruppen sind u.U. über den ganzen Globus verstreut

  → Eine zeitliche Spezifikation der Abläufe ist wünschenswert
  - Sie ermöglicht die Entwicklung top-down zu strukturieren
  - Wird durch eine manuelle, statische Ablaufplanung unterstützt
- Struktur zyklischer Ablaufpläne $\rightsquigarrow$ gute Anordnung, Determinismus
  - Rahmen, Rahmenlänge, Scheiben; *major/minor cycle*
- Algorithmische Einplanung ordnet gerichtete, azyklische Graphen

  → Entlastung bei der Lösung eines komplexen Problems
  - List-Scheduling- und Branch&Bound-Algorithmen
- Moduswechsel durch aperiodischen oder sporadischen Auftrag
  - Tabellenwechsel, Betriebsmittelfreigabe/-anforderung, Nachladen

V-1 – Nicht-periodische EZS

Nicht-periodische Aufgaben werden ereignisgesteuert ausgelöst

- Harte o. feste/weiche Termine (sporadische/aperiodische Aufgaben)
- Mischbetrieb ist eine Herausforderung

V-1 – Nicht-periodische EZS

Nicht-periodische Aufgaben werden ereignisgesteuert ausgelöst

- Harte o. feste/weiche Termine (sporadische/aperiodische Aufgaben)
- Mischbetrieb ist eine Herausforderung

Unterbrecherbetrieb bevorzugt nicht-periodische Aufgaben

- Sehr gut Antwortzeiten, anfällig für Überlast
- Gefährdet statische Garantien $\rightsquigarrow$ kontrollierter Unterbrecherbetrieb

V-1 – Nicht-periodische EZS

Nicht-periodische Aufgaben werden ereignisgesteuert ausgelöst

- Harte o. feste/weiche Termine (sporadische/aperiodische Aufgaben)
- Mischbetrieb ist eine Herausforderung

Unterbrecherbetrieb bevorzugt nicht-periodische Aufgaben

- Sehr gut Antwortzeiten, anfällig für Überlast
- Gefährdet statische Garantien $\rightsquigarrow$ kontrollierter Unterbrecherbetrieb

Hintergrundbetrieb stellt nicht-periodische Aufgaben hinten an

- Antwortzeiten hängen von der Last periodischer Aufgaben ab

V-1 – Nicht-periodische EZS

Nicht-periodische Aufgaben werden ereignisgesteuert ausgelöst

- Harte o. feste/weiche Termine (sporadische/aperiodische Aufgaben)
- Mischbetrieb ist eine Herausforderung

Unterbrecherbetrieb bevorzugt nicht-periodische Aufgaben

- Sehr gut Antwortzeiten, anfällig für Überlast
- Gefährdet statische Garantien $\rightsquigarrow$ kontrollierter Unterbrecherbetrieb

Hintergrundbetrieb stellt nicht-periodische Aufgaben hinten an

- Antwortzeiten hängen von der Last periodischer Aufgaben ab

Abfragende Zusteller konvertieren sie in periodische Aufgaben

- Schlechte Antwortzeiten, Ausführungsbudget, Auffüllperiode

V-1 – Nicht-periodische EZS

Nicht-periodische Aufgaben werden ereignisgesteuert ausgelöst

- Harte o. feste/weiche Termine (sporadische/aperiodische Aufgaben)
- Mischbetrieb ist eine Herausforderung

Unterbrecherbetrieb bevorzugt nicht-periodische Aufgaben

- Sehr gut Antwortzeiten, anfällig für Überlast
- Gefährdet statische Garantien $\leadsto$ kontrollierter Unterbrecherbetrieb

Hintergrundbetrieb stellt nicht-periodische Aufgaben hinten an

- Antwortzeiten hängen von der Last periodischer Aufgaben ab

Abfragende Zusteller konvertieren sie in periodische Aufgaben

- Schlechte Antwortzeiten, Ausführungsbudget, Auffüllperiode

Slack-Stealing ist ein guter Kompromiss

- Einfache Umsetzung in gut strukturierten, zeitgesteuerten Systemen
- Nicht praktikabel in ereignisgesteuerten Systemen

V-2 – Nicht-periodische EZS

- Bandweite bewahrende Zusteller $\rightsquigarrow$ Verbrauchs-/Auffüllregeln
  - Aufschiebbar: ohne/mit Hintergrundzusteller, Doppeltreffer
  - Sporadisch: SpSL Sporadic Server, Komplexität

V-2 – Nicht-periodische EZS

- Bandweite bewahrende Zusteller $\rightsquigarrow$ Verbrauchs-/Auffüllregeln
  - Aufschiebbar: ohne/mit Hintergrundzusteller, Doppeltreffer
  - Sporadisch: SpSL Sporadic Server, Komplexität
- POSIX Sporadic Server: Umsetzung des SpSL Sporadic Server
  - Bedeutung innerhalb des POSIX-Standard
  - Ausweitung des Budgets, verfrühte Auffüllung
  - Unzureichende zeitliche Isolation

V-2 – Nicht-periodische EZS

- Bandweite bewahrende Zusteller $\leadsto$ Verbrauchs-/Auffüllregeln
  - Aufschiebbar: ohne/mit Hintergrundzusteller, Doppeltreffer
  - Sporadisch: SpSL Sporadic Server, Komplexität
- POSIX Sporadic Server: Umsetzung des SpSL Sporadic Server
  - Bedeutung innerhalb des POSIX-Standard
  - Ausweitung des Budgets, verfrühte Auffüllung
  - Unzureichende zeitliche Isolation
- Übernahmeprüfungen für dynamische und statische Prioritäten
  - Dichte-basierter Akzeptanztest für die EDF-Ablaufplanung
  - Schlupf-basierter Akzeptanztest für sporadische Zusteller

VI – Rangfolge

Rangfolge $\rightsquigarrow$ gerichtete Abhängigkeiten

- resultieren oft aus Datenabhängigkeiten
- gerichtete Abhängigkeiten in nebenläufigen Ausführungsumgebungen erfordern Koordinierung

VI – Rangfolge

Rangfolge $\leadsto$ gerichtete Abhängigkeiten

- resultieren oft aus Datenabhängigkeiten
- gerichtete Abhängigkeiten in nebenläufigen Ausführungsumgebungen erfordern Koordinierung

Umsetzung gerichteter Abhängigkeiten $\leadsto$ Koordinierung

- wohlgeordneter Ablauf von Produzent und Konsument
- Übergang zwischen zeitlichen Domänen
- Implementierung gerichteter Abhängigkeiten

  implizit $\leadsto$ statische Ablauftabellen, Phasenverschiebung

  explizit $\leadsto$ Aktivierung, Zeitsignale, Nachrichten

VI – Rangfolge

Rangfolge $\rightsquigarrow$ gerichtete Abhängigkeiten

- resultieren oft aus Datenabhängigkeiten
- gerichtete Abhängigkeiten in nebenläufigen Ausführungsumgebungen erfordern Koordinierung

Umsetzung gerichteter Abhängigkeiten $\rightsquigarrow$ Koordinierung

- wohlgeordneter Ablauf von Produzent und Konsument
- Übergang zwischen zeitlichen Domänen
- Implementierung gerichteter Abhängigkeiten

  implizit $\rightsquigarrow$ statische Ablauftabellen, Phasenverschiebung

  explizit $\rightsquigarrow$ Aktivierung, Zeitsignale, Nachrichten

Ablaufplanung nutzt die Einschränkung des Ablaufverhaltens

- Nachfolger $\rightsquigarrow$ modifizierte Auslösezeiten
- Vorgänger $\rightsquigarrow$ modifizierte Termine

VII – Zugriffskontrolle

Konkurrenz und Koordination nebenläufiger Aktivitäten

- Nebenläufigkeit, Kausalität, Kausalordnung
- Konfliktsituationen $\rightsquigarrow$ synchronisieren ohne Prioritätsumkehr

VII – Zugriffskontrolle

Konkurrenz und Koordination nebenläufiger Aktivitäten

- Nebenläufigkeit, Kausalität, Kausalordnung
- Konfliktsituationen $\rightsquigarrow$ synchronisieren ohne Prioritätsumkehr

Verdrängungssteuerung $\mapsto$ verdrängungsfreie kritische Abschnitte

- benötigt kein *à priori* Wissen; Verklemmungsvorbeugung
- pragmatisch/effektiv, beeinträchtigt unabhängige Jobs

VII – Zugriffskontrolle

Konkurrenz und Koordination nebenläufiger Aktivitäten

- Nebenläufigkeit, Kausalität, Kausalordnung
- Konfliktsituationen $\rightsquigarrow$ synchronisieren ohne Prioritätsumkehr

Verdrängungssteuerung $\mapsto$ verdrängungsfreie kritische Abschnitte

- benötigt kein *à priori* Wissen; Verklemmungsvorbeugung
- pragmatisch/effektiv, beeinträchtigt unabhängige Jobs

Prioritätsvererbung $\mapsto$ Priorität zeitweise erhöhen

- benötigt kein *à priori* Wissen
- direkte Blockierung, Blockierung durch Vererbung; transitiv

VII – Zugriffskontrolle

Konkurrenz und Koordination nebenläufiger Aktivitäten

- Nebenläufigkeit, Kausalität, Kausalordnung
- Konfliktsituationen $\rightsquigarrow$ synchronisieren ohne Prioritätsumkehr

Verdrängungssteuerung $\mapsto$ verdrängungsfreie kritische Abschnitte

- benötigt kein *à priori* Wissen; Verklemmungsvorbeugung
- pragmatisch/effektiv, beeinträchtigt unabhängige Jobs

Prioritätsvererbung $\mapsto$ Priorität zeitweise erhöhen

- benötigt kein *à priori* Wissen
- direkte Blockierung, Blockierung durch Vererbung; transitiv

Prioritätsobergrenzen $\mapsto$ Priorität zeitweise deckeln

- benötigt *à priori* Wissen; Verklemmungsvorbeugung
- Grundmodell vs. (einfachere) stapelorientierte Variante

VII – Zugriffskontrolle

Konkurrenz und Koordination nebenläufiger Aktivitäten

- Nebenläufigkeit, Kausalität, Kausalordnung
- Konfliktsituationen $\rightsquigarrow$ synchronisieren ohne Prioritätsumkehr

Verdrängungssteuerung $\mapsto$ verdrängungsfreie kritische Abschnitte

- benötigt kein *à priori* Wissen; Verklemmungsvorbeugung
- pragmatisch/effektiv, beeinträchtigt unabhängige Jobs

Prioritätsvererbung $\mapsto$ Priorität zeitweise erhöhen

- benötigt kein *à priori* Wissen
- direkte Blockierung, Blockierung durch Vererbung; transitiv

Prioritätsobergrenzen $\mapsto$ Priorität zeitweise deckeln

- benötigt *à priori* Wissen; Verklemmungsvorbeugung
- Grundmodell vs. (einfachere) stapelorientierte Variante

Ablaufplanung $\mapsto$ berücksichtigt Blockierungszeit

- Verzicht auf den Prozessor ermöglicht eine mehrfache Blockierung

VIII – Mehrkernechtzeitsysteme

- Mehrkernechtzeitsysteme von großer Relevanz
  - Leistungssteigerung durch Parallelisierung
- Ablaufplanung ist eine Herausforderung
  - Wissen aus Einkernsystemen im Allgemeinen nicht übertragbar
  - Zeitliche Anomalien $\rightsquigarrow$ Kritischer Zeitpunkt, Prioritätsordnung
  - Prioritätsproblem und Allokationsproblem
- Partitionierte Ablaufplanung
  - Verteilen der Aufgaben auf Kerne zum Entwurfszeitpunkt
  - Transformation in mehrere Einkernsysteme

  → Bekannte Techniken und Algorithmen sind wieder anwendbar

  → Garantiert planbare Auslastung sehr schlecht
- Globale Ablaufplanung
  - Findet zur Laufzeit statt und erfordert Migration
  - Verfahren mit dynamischen Prioritäten auf Auftragsebene erlauben vollständige Auslastung

  → In der Praxis mit hohen Kosten und Unwägbarkeiten behaftet

VIII – Mehrkernechtzeitsysteme (Forts.)

- Hybride Ablaufplanung
  - Verbinden die Vor- und Nachteile der anderen Verfahren
  - Teilpartitionierte und gruppierende Ablaufplanung
- WCET-Analyse
  - Komplexität nimmt stark zu
  - Zusätzliche Kosten durch Migration und Synchronisation
  - Erstellen von mehreren Einkern-Äquivalenten
  - Cache-Coloring zur Verhinderung von False-Sharing