

Echtzeitsysteme

Rekapitulation

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

<https://www4.cs.fau.de>

27. Januar 2016



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**



Zusammenspiel Kontrolliertes Objekt \leftrightarrow Kontrollierendes
Rechensystem

- die **Objektdynamik** definiert den zeitlichen Rahmen durch Termine
- die Echtzeitanwendung muss diese Termine einhalten
- ihr Anteil am kontrollierenden Rechensystem ist eher gering



Zusammenspiel Kontrolliertes Objekt \leftrightarrow Kontrollierendes Rechensystem

- die **Objektdynamik** definiert den zeitlichen Rahmen durch Termine
- die Echtzeitanwendung muss diese Termine einhalten
- ihr Anteil am kontrollierenden Rechensystem ist eher gering

Programmunterbrechung in synchroner oder asynchroner Ausprägung

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



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



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



III-2 – Echtzeitanwendung

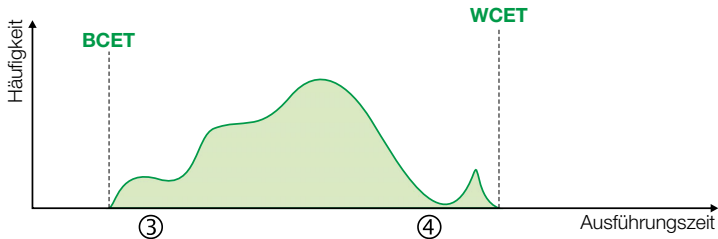
- **Einplanungseinheit** \mapsto Prozedur, Faden und/oder Fadengruppe
 - Aufgaben (*Tasks*) und Arbeitsaufträgen (*Jobs*)
 - Verwaltungsgemeinkosten ein- und mehrfädiger Aufgaben
 - Einplanung als zweiphasiger Prozess
- **Ablaufsteuerung** \mapsto Strategie & Mechanismus
 - Einplanung ist die Strategie,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



III-2 – Echtzeitanwendung

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





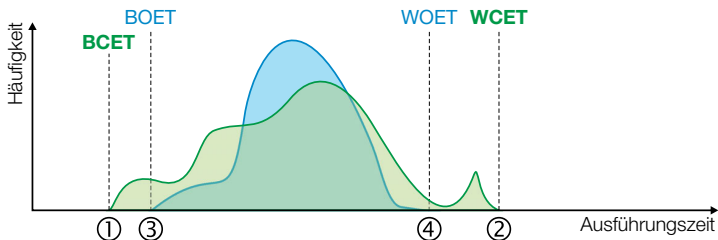
WCET-Bestimmung gliedert sich grob in zwei Teilprobleme

- **Programmiersprachenebene** (makroskopisch) \leadsto finde die längsten Pfade durch ein Programm
- **Maschinenprogrammzebene** (mikroskopisch) \leadsto bestimme die WCET der Elementaroperationen



Tatsächliche Ausführungszeit: **BCET / WCET**





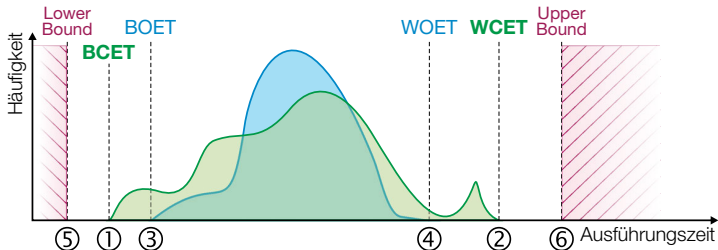
Dynamische Analyse \mapsto Beobachtung der Ausführungszeit

- Messung bezieht beide Ebenen mit ein
- Vollständige Messung im Allgemeinen **nicht möglich** \leadsto
Unterapproximation



Gemessene Ausführungszeit: **BOET** / **WOET**





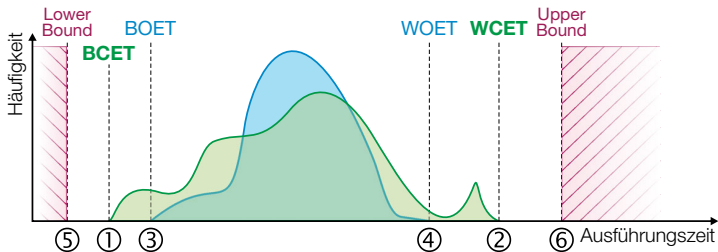
Statische Analyse → schätzt die Ausführungszeit

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



Geschätzte Ausführungszeitgrenzen: **Lower- / Upper Bound**





Hardware-Analyse \mapsto 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



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 Ablauf Tabellen
- Laufzeitkontrolle im Abfrage- und Unterbrecherbetrieb
- stapelbasierte Ablaufplanung

Ereignisgesteuerte Ausführung periodischer Aufgaben

- Ereignis- bzw. prioritätsorientierte Einplanung
- Feste und dynamische Prioritäten auf Task- bzw. Job-Ebene
- Auslösung vs. Auswahl, Ablaufliste vs. Ablauf Tabelle
- *Multi-Level-Queue-Scheduler*, *Prioritätsorientierter $O(1)$ -Scheduler*



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
- 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*, *Prioritätsorientierter $O(1)$ -Scheduler*





Ablaufplanung gebräuchliche, ereignisgesteuerte Verfahren

- **statische Prioritäten** \rightsquigarrow RM, DM
 - **Prioritätsabbildung** im Falle nicht ausreichender Systemprioritäten
- **dynamische Prioritäten** \rightsquigarrow EDF



Ablaufplanung gebräuchliche, ereignisgesteuerte Verfahren

- **statische Prioritäten** \rightsquigarrow RM, DM
 - Prioritätsabbildung im Falle nicht ausreichender Systemprioritäten
- **dynamische Prioritäten** \rightsquigarrow EDF

Optimalität und Nichtoptimalität von RM, DM und EDF

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

Ablaufplanung gebräuchliche, ereignisgesteuerte Verfahren

- **statische Prioritäten** \rightsquigarrow RM, DM
 - Prioritätsabbildung im Falle nicht ausreichender Systemprioritäten
- **dynamische Prioritäten** \rightsquigarrow EDF

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
- relative Planbarkeit im Falle nicht ausreichender Systemprioritäten



IV-3 – Periodische EZS



Ablaufplanung gebräuchliche, ereignisgesteuerte Verfahren

- **statische Prioritäten** \rightsquigarrow RM, DM
 - **Prioritätsabbildung** im Falle nicht ausreichender Systemprioritäten
- **dynamische Prioritäten** \rightsquigarrow EDF

Ablaufplanung gebräuchliche, ereignisgesteuerte Verfahren

- **statische Prioritäten** \rightsquigarrow RM, DM
 - **Prioritätsabbildung** im Falle nicht ausreichender Systemprioritäten
- **dynamische Prioritäten** \rightsquigarrow EDF

Optimalität und Nichtoptimalität von RM, DM und EDF

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

Ablaufplanung gebräuchliche, ereignisgesteuerte Verfahren

- **statische Prioritäten** \rightsquigarrow RM, DM
 - Prioritätsabbildung im Falle nicht ausreichender Systemprioritäten
- **dynamische Prioritäten** \rightsquigarrow EDF

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
- relative Planbarkeit im Falle nicht ausreichender Systemprioritäten



Nicht-periodische Aufgaben werden ereignisgesteuert ausgelöst

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



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



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



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



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 vorrangesteuerten Systemen



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



- **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**



- **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



Rangfolge \rightsquigarrow gerichtete Abhängigkeiten

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

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

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

Ablaufplanung nutzt die Einschränkung des Ablaufverhaltens

- **Nachfolger** \leadsto modifizierte Auslösezeiten
- **Vorgänger** \leadsto 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



- Mehrkernechtzeitsysteme sind die Zukunft
 - 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



- **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

