

Echtzeitsysteme

Grundlegende Abfertigung nicht-periodischer Echtzeitsysteme

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS19/V_EZS/

02. Dezember 2019



Gliederung

- 1 Nicht-periodische Aufgaben
 - Nicht-periodische Echtzeitanwendungen
 - Zeitliche Parameter
 - Herausforderung: Mischbetrieb
- 2 Erweiterte Behandlung nicht-periodischer Aufgaben
 - Unterbrecherbetrieb
 - Hintergrundbetrieb
 - Periodischer Zusteller
- 3 Slack-Stealing
 - Taktgesteuerte Systeme
 - Ereignisgesteuerte Systeme
- 4 Zusammenfassung



Fragestellungen

- Unterschied periodische und **nicht-periodische Aufgaben**?
 - Wo spielen nicht-periodische Aufgaben eine Rolle?
 - Welche Herausforderungen ergeben sich für ihre Abfertigung?
- **Basistechniken** für ihre Abarbeitung?
 - Sind diese Techniken auf Anwendungsebene umsetzbar?
 - Benötigt man spezielle Unterstützung des Betriebssystems?
 - Welche **Risiken, Vorteile und Nachteile** beinhalten diese Techniken?
- **Schlupfzeit** – Verwendung für nicht-periodische Aufgaben?
 - Wie bestimmt man die Schlupfzeit?



Nicht-periodische Aufgaben in der Praxis

Quelle nicht-periodischer Aufgaben

Nicht-periodische Aufgaben behandeln Ereignisse, die sich aus **Zustandsänderungen** des zu kontrollierenden Systems ableiten (vgl. *event trigger*, Folie III-2/5).

- Beispiele für Zustandsänderungen:
 - Mensch-Maschine-Interaktion
 - ⚠ Menschliches Verhalten ist kaum quantifizierbar
 - Kommunikation
 - Fehlerbehandlung



Beispiel I4Copter:

- Steuerkommandos
 - Empfang über die Fernbedienung
 - Schlimmster Fall: Alle 100 ms
- Telemetriedaten-Übertragung
 - Füllen eines internen Puffers
 - Schlimmster Fall: Alle 9 ms



Restriktionen des periodischen Modells

Lockung der Restriktion A1 (vgl. IV-1/9)

⚠ Mathematische Ansätze zur **zeitlichen Analyse** periodischer Echtzeitssysteme bedingen häufig **starke Einschränkungen**:

A1 Alle Aufgaben sind periodisch

A2 Alle Arbeitsaufträge können an ihren Auslösezeitpunkten eingeplant und ausgeführt werden

A3 Termine und Perioden sind identisch

A4 Kein Arbeitsauftrag gibt die Kontrolle über den Prozessor ab

A5 Alle Aufgaben sind unabhängig¹

A6 Die Kosten durch Unterbrechungen, Ablaufplanung und Verdrängung sind vernachlässigbar

A7 Alle Aufgaben verhalten sich voll-präemptiv

¹D.h. die einzige gemeinsame Ressource ist die CPU und es existieren keine Einschränkungen hinsichtlich der Auslösezeiten der Arbeitsaufträge voneinander.

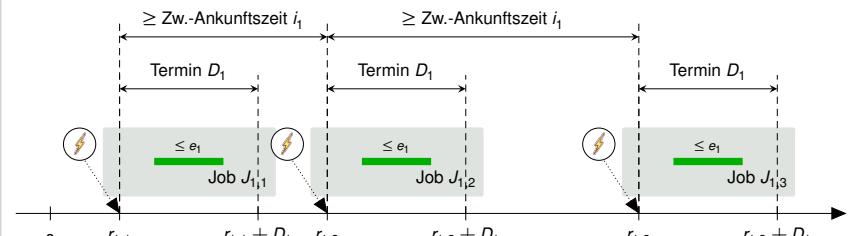


Nicht-periodische Aufgaben (engl. *non-periodic tasks*)

Nicht-periodische Aufgaben

Erbringen in **unregelmäßigen Zeitintervallen** eine vorgegebene Systemfunktion. Jede nicht-periodische Aufgabe (T_i^S) ist eine Abfolge von Arbeitsaufträgen ($J_{i,j}$) mit vorgegebenen zeitlichen Eigenschaften.

- **Weiche/feste Termine** \mapsto **Aperiodische Aufgabe** (engl. *aperiodic task*)
- **Harte Termine** \mapsto **Sporadische Aufgaben** (engl. *sporadic tasks*)
- Besitzen **Minimale Zwischenankunftszeit** (engl. *minimum interarrival-time*) i_i mit $[r_{i,j}; r_{i,j+1}]$ zwischen den Auslösezeiten von T_i^S



Nicht-periodische Aufgaben (Forts.)

- ☞ **Tupeldefinition** einer nicht-periodischen Aufgabe $T_i^S = (i_i, e_i, D_i)$
- i_i Minimale Zwischenankunftszeit (engl. *minimum interarrival-time*)
 - e_i Maximale Ausführungszeit (WCET)
 - D_i Relativer Termin (engl. *deadline*), optional

- **Alternative Definition** über mögliche Auslösezeitpunkte

- Intervall $[r_i^{nach}; r_i^{vor}]$ (frühester/spätester Zeitpunkt)
- $T_i^S = ([r_i^{nach}; r_i^{vor}], e_i, D_i)$
- Beachte: $i_{i+1} = [r_{i,nach}; \infty[$
- Bei unbekanntem spätesten Auslösezeitpunkt sind Absolutwert und Intervallschreibweise äquivalent

- **Arbeitsaufträge** der Aufgabe: $J_{i,j} = (r_{i,j}, e_{i,j}, d_{i,j})$

- ⚠ Aussagen zum **Zeitpunkt ihrer Auslösung** sind schwierig

- A-priori deutlich **weniger Wissen** als für periodische Aufgaben verfügbar



Mischbetrieb: periodisch \leftrightarrow nicht-periodische

- ⚠ **Erhaltung statischer Garantien** für periodische Arbeitsaufträge

- Einfluss nicht-periodischer Arbeitsaufträge begrenzen

- ☞ **Koexistenz** periodischer und nicht-periodischer Arbeitsaufträge

- Einordnung in das (periodische) Prioritätsgefüge
- Gekoppelte Einplanung nicht-periodischer Arbeitsaufträge

- **Aperiodische Arbeitsaufträge** \mapsto **Antwortzeitminimierung**

- Zusicherungen an periodische und bereits zugelassene sporadische Aufträge bleiben erhalten

- **Sporadische Arbeitsaufträge** \mapsto **Termingarantie**

- Einplanung unter Sicherstellung des vorgegebenen Termins
- Zusicherungen an periodische und bereits zugelassene sporadische Aufträge bleiben erhalten
- **Zulassung** oder **Abweisung** des sporadischen Arbeitsauftrags





Zulassung sporadischer Arbeitsaufträge

Wann lassen sich die Zusicherungen einhalten?

- ☞ Übernahmeprüfung (engl. *acceptance test*) für sporadische Aufträge bei ereignisbedingter Auslösung
- Arbeitsauftrag wird **angenommen** falls gemeinsame Ausführung mit allen anderen Aufträgen machbar ist:
 - Test ist **gekoppelt mit der Einplanung** \rightarrow *online*
 - Gegenwärtige Ablaufplan muss **genügend Schlupf** aufweisen
 - Schlupf $\sigma \geq \text{WCET } e$ des sporadischen Auftrags
 - Ausführungszeit ggf. erst zum Auslösezeitpunkt bekannt
- ⚠ Nur **Schlupf vor dem Termin** ist von Relevanz
- Der sporadische Auftrag wird bei negativem Test **abgewiesen**
 - Anwendung wird eine **schwerwiegende Ausnahmesituation** angezeigt
 - \rightarrow Fehlerfall und Ausnahmebehandlung



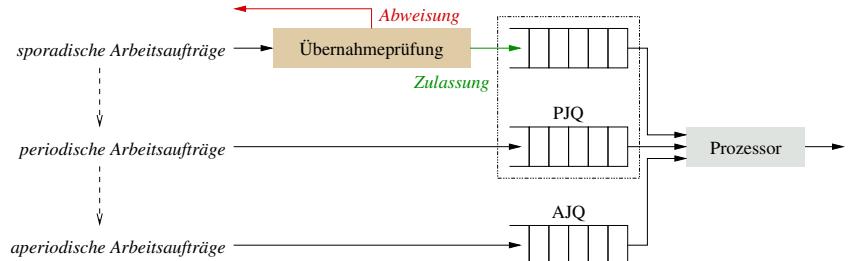
Gleichzeitige sporadische Aufträge werden oft nach EDF getestet



pu Echtzeitssysteme (WS 19/20) – Kapitel V-1 Abfertigung nicht-periodischer EZS
2 Nicht-periodische Aufgaben – 2.3 Herausforderung: Mischbetrieb

9/38

Prioritätswarteschlangen im Betriebssystem



Erweiterung des MLQ-Schedulers (vgl. IV-1/33)

- Periodische Arbeitsaufträge \mapsto **Periodic Job Queue**
 - Implementierung durch Ablauftabelle oder -liste
- Sporadische Arbeitsaufträge \mapsto **Zweistufiger Prozess:**
 - 1 Ausgelöste Arbeitsaufträge warten auf Übernahmeprüfung
 - 2 Zugelassene Arbeitsaufträge \mapsto Eigene Queue oder PJQ
- Aperiodische Arbeitsaufträge \mapsto **Aperiodic Job Queue**



pu Echtzeitssysteme (WS 19/20) – Kapitel V-1 Abfertigung nicht-periodischer EZS
2 Nicht-periodische Aufgaben – 2.3 Herausforderung: Mischbetrieb

10/38

Gliederung

- 1 Nicht-periodische Aufgaben
 - Nicht-periodische Echtzeitanwendungen
 - Zeitliche Parameter
 - Herausforderung: Mischbetrieb
- 2 Erweiterte Behandlung nicht-periodischer Aufgaben
 - Unterbrecherbetrieb
 - Hintergrundbetrieb
 - Periodischer Zusteller
- 3 Slack-Stealing
 - Taktgesteuerte Systeme
 - Ereignisgesteuerte Systeme
- 4 Zusammenfassung



pu Echtzeitssysteme (WS 19/20) – Kapitel V-1 Abfertigung nicht-periodischer EZS
3 Erweiterte Behandlung nicht-periodischer Aufgaben

11/38

Überblick

Behandlung nicht-periodischer Aufgaben

Grundlegende Behandlungsmethoden für nicht-periodische Ereignisse lassen sich mit minimaler **Unterstützung des Laufzeitssystems** umsetzen. Sie sind sowohl **für zeit- als auch für ereignisgesteuerte Systeme** geeignet und teilweise vollständig auf Anwendungsebene umsetzbar.

- **Unterbrecherbetrieb** \sim **Nicht-periodische Aufgaben haben Vorfahrt**
 - Ereignisbehandlung direkt in der Unterbrechungsbehandlung
 - \rightarrow Mittels **Ausnahmebehandlungen** (vgl. III-1/17 ff)
- **Hintergrundbetrieb** \sim **Periodische Aufgaben haben Vorfahrt**
 - Phasen der Untätigkeit für nicht-periodische Aufgaben nutzen
 - \rightarrow Mittels **Verdrängung** (vgl. III-2/12 ff)
- **Periodischer Zusteller** \sim **Alles ist eine periodische Aufgabe**
 - Abfragen nicht-periodische Ereignisse durch periodische Aufgaben
 - \rightarrow **Einphasen** nicht-periodischer Aufträge mit bekannten Mitteln



pu Echtzeitssysteme (WS 19/20) – Kapitel V-1 Abfertigung nicht-periodischer EZS
3 Erweiterte Behandlung nicht-periodischer Aufgaben

12/38

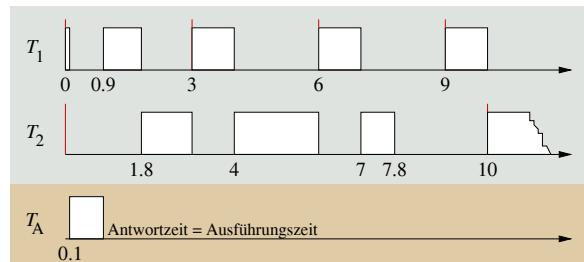


Unterbrecherbetrieb

Antwortzeitminimierung – auf Kosten eines gut geordneten Ablaufplans



Nicht-periodische Arbeitsaufträge werden sofort ausgeführt



■ Beispiel:

- Periodische Aufgaben $T_1 = (3, 1)$ und $T_2 = (10, 4)$ (nach RMA)
- Aperiodische Aufgabe T_A^S mit $r_A = [0.1, \infty[$, $e_A = 0.8$



Verdrängung in Ausführung befindlicher periodischer Aufträge

- Erhöht das Risiko von **Schwankungen** (engl. *jitter*) im Ablauf periodischer Aufgaben



Unterbrecherbetrieb (Forts.)

Antwortzeitminimierung – auf Kosten eines korrekten Ablaufplans



Bevorzugung nicht-periodischer Arbeitsaufträge

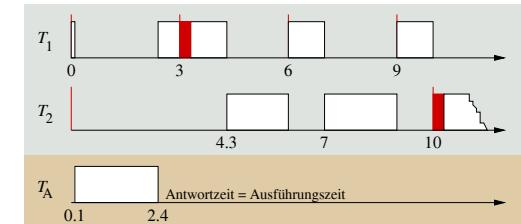
~ **Termineinhaltung** periodischer Aufgaben nicht gesichert

■ Beispiel (vgl. Folie 13):

- WCET $e_A = 2.3$
- *run to completion*

■ periodische Tasks

- Terminverletzung T_1
- Terminverletzung T_2



Fortsetzung der unterbrochenen periodischen Aufgabe nach Ablauf der **Schlupfzeit** (vgl. III-2/27)



Apollo 11, Mondlandung

Folklore zum Bordcomputer der Landefähre [2, 6]

- 1 Rendezvousradar² wurde vor Beginn der Landung eingeschaltet
 - ⚠ Falsche Vorgabe der Checkliste an die Astronauten
- 2 Radarsteuerprogramm beanspruchte jedoch zu viel Rechenzeit
 - Netzteile von Radar und Landeeinheit waren nicht synchronisiert
 - Rendezvousradar erzeugte eine Flut von **Scheinunterbrechungen**
 - Dadurch wurden etwa 15 % an unerwarteter Rechenlast erzeugt
 - Verzögerung/Ausfall von Berechnungen zur Landungskontrolle
- 3 Landungskontrolle hatte minimalen Treibstoffverbrauch als Ziel
 - Kontrollprogramm erzeugt alle zwei Sekunden ein Stellwert
 - Stabilisierung durch Autopilot alle 100 ms
- 4 Landephase war mit einer Dauer von 11 Minuten geplant
 - Fehlerbedingt fielen gut eine Minute lang alle Kontrollkommandos aus
 - Erfolgreiche Landung durch Umschaltung auf manuelle Kontrolle

²Messung von Zeitintervallen zwischen bekannten Landmarken und Überprüfung von Position und Geschwindigkeit des Landemoduls relativ zum Kommandomodul.



Maximale Frequenz → Minimale Zwischenankunftszeit



⚠ **Unterbrechungen** erschweren eine deterministische Ausführung periodischer Aufgaben oder machen dies gar unmöglich:

- Zeitpunkt ihres Auftretens ist a-priori **nicht bekannt**
- Sie werden gegenüber aktuell ausgeführten Jobs **bevorzugt**

Quelle	max. Frequenz
Messerschalter	333
loser Draht	500
Kippschalter	1000
Wippschalter	1300
serielle Schnittstelle (115 kbps)	11500
Ethernet (10 Mbps)	14880
CAN-Bus	15000
I2C-Bus	50000
USB	90000
Ethernet (100 Mbps)	148800
Ethernet (1 Gbps)	1488000

max. Raten verschiedener Unterbrechungsquellen [5]



Randnotiz: Unterlast

Maxime in Echtzeitsystemen: Kapazitäten gezielt frei lassen

⚠ Echtzeitrechensysteme sollten in kritischen Situationen nur bis zu einem vorgegebenen Maximum belastet werden

- Deutlich unter 100 % CPU-Auslastung (vgl. IV-2/30)

☞ Bestimmung der kritischen Situationen und freizuhaltende Kapazitäten ist eine große Herausforderung

- Unterbrechungsbedingte Verzögerungen und Last im Voraus einzuplanen benötigt fundiertes Expertenwissen
- Erfordert durchgehende Anforderungsanalyse³

⚠ Der Fehlerfall ist dennoch nie auszuschließen
(Scheinunterbrechungen sind kaum vorherzusagen)

³(engl. *requirements engineering*), Fundament und Teilaktivität systematischer Softwareentwicklung – hier aber nicht nur Software.

Den Schlupf periodischer Arbeitsaufträge nutzen

Nicht-periodische Arbeitsaufträge in deren Hintergrund ausführen

☞ Ausführung aperiodischer Aufträge im Hintergrund

- Wenn keine periodischen Aufträge zur Ausführung anstehen
- Untätigkeits des Prozessors ausnutzen

■ Schlupf auf der gesamten Echtzeitachse kann genutzt werden

- Ruhephasen werden mit nicht-periodischen Aufträgen aufgefüllt
- Verdrängung nicht-periodischer Aufträge
- Einplanungsentscheidung erfolgt zur Laufzeit

⚠ Nicht-periodische Aufträge zugunsten periodischer Aufträge verzögern

- Ihre Antwortzeit verschlechtert sich
- Termineinhaltung bei sporadischen Aufgaben wird schwieriger
- Ansprechempfindlichkeit des Systems lässt nach



Kontrollierter Unterbrecherbetrieb

Eine Überlastsicherung ist unumgänglich! [5]

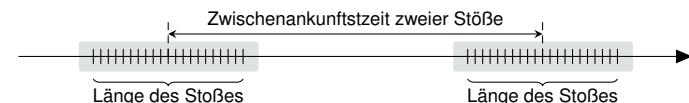
☞ Ansatzpunkt: Beschränkung des Auftretens von Unterbrechungen

1 Überwachung der minimalen Zwischenankunftszeit

- Nächste Unterbrechung wird erst nach Ablauf der minimalen Zwischenankunftszeit angenommen

2 Überwachung von Unterbrechungsstoßen (engl. *bursts*)

- Nach einem Unterbrechungsstoß werden Unterbrechungen eine Zeit lang abgeblckt



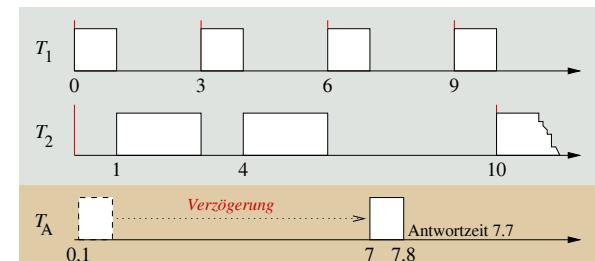
■ Einsatz in der Praxis: OSEKtime [4] und AUTOSAR OS [1] schränken die minimale Zwischenankunftszeit ein oder überwachen sie



Hintergrundbetrieb

Korrechter Ablaufplan – auf Kosten des Antwortverhaltens

☞ Aperiodische Arbeitsaufträge werden nur ausgeführt falls keine periodischen/sporadischen Aufträge zur Ausführung anstehen



■ Beispiel:

- Periodische Aufgaben $T_1 = (3, 1)$ und $T_2 = (10, 4)$ (nach RM)
- Aperiodische Aufgabe T_A^S mit $r_A = [0.1, \infty[, e_A = 0.8$

⚠ Antwortzeiten nicht-periodischer Arbeitsaufträge bleibt unberücksichtigt → schlechtes Antwortverhalten





Periodischer Zusteller (engl. periodic server)

Periodische Abarbeitung aperiodischer Arbeitsaufträge

☞ **Zusteller:** Spezialisierung einer periodischen Aufgabe

- Definiert durch **Periode** p_{srv} und **Ausführungsbudget** e_{srv}
 - Verhältnis $u_{srv} = e_{srv}/p_{srv} \mapsto$ Größe (engl. *size*) des Zustellers
- Ausführungsbudget** (engl. *execution budget*) in Form der e_{srv}
 - Budget wird um bis zu e_{srv} Einheiten aufgefüllt (engl. *replenished*)
- Auffüllperiode** p_{srv} (engl. *replenishment period*)
 - Das Budget des Zustellers wird regelmäßig erneuert
 - **Auffüllzeit** (engl. *replenishment time*)

■ Begrenzung der Ausführungszeit nicht-periodischer Arbeitsaufträge im Zeitintervall p_{srv} auf maximal e_{srv} Zeiteinheiten

☞ Verschiedene Varianten: abfragend, aufschiebbar, sporadisch

⚠ Ein periodischer Zusteller ist i.d.R. für die Ausführung der Aufträge **mehrerer sporadischer/aperiodischer Aufgaben** zuständig



Abfragender Zusteller (engl. polling server)

Einfachste Form eines periodischen Zustellers

☞ **Abfrager** (engl. *poller*) $\mapsto T_{PS} = (p_{PS}, e_{PS})$

- Abfrageperiode** (engl. *polling period*) p_{PS}
- Zyklisch bereitgestelltes Budget von e_{PS} Zeiteinheiten
- Schrittweise Abfertigung von nicht-periodischen Aufträgen

⚠ Ohne Auftragsüberhang **verfällt das Budget unverzüglich**

- Sobald der Abfrager Untätigkeit feststellt
- Prüfung erfolgt nur am Anfang der Abfrageperiode⁴

⚠ Antwortzeiten nicht-periodischer Arbeitsaufträge unterliegen mitunter **starken Schwankungen**

- Abhängig vom Auslösezeitpunkt des Auftrag / Zustand des Abfragers



Periodischer Zusteller – Phasen

Phasen der Auslösung, Bereitstellung und Ausführung eines Zustellers:

- 1 **Untätig** (engl. *idle*):
 - Warteschlange des Zusteller ist leer
- 2 **Zurückgestellt** (engl. *backlogged*):
 - Mit Auslösung eines nicht-periodischen Arbeitsauftrags
 - Mindestens ein nicht-periodischer Auftrag ist ausführungsbereit
- 3 **Kommt in Frage** (engl. *is eligible*):
 - Ist zurückgestellt und weist **Auftragsüberhang** (engl. *backlog*) auf
 - Ausführungsbudget** ist vorhanden
- 4 **In Einplanung** (engl. *scheduling*):
 - Teilnahme am Einplanungsverfahren periodischer Aufgaben
 - Reguläre periodische Aufgabe mit $T_s = (p_s, e_s)$
- 5 **Verbraucht** (engl. *consumes*):
 - Budget sinkt mit der Ausführung
- 6 **Erschöpft** (engl. *exhausted*):
 - Ausführungsbudget ist auf Null abgesunken
 - Wechsel zu zurückgestellt, warten auf Wiederauffüllung

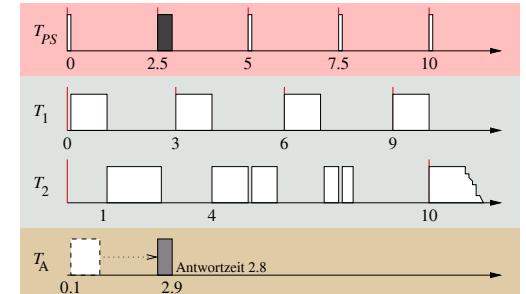


Abfragender Zusteller – Beispiel (1)

Grundlegende Funktionsweise abfragender Zusteller

■ **Aufgabensystem:**

- periodische Aufgabe
 - $T_{PS} = (2.5, 0.5)$
 - $T_1 = (3, 1)$
 - $T_2 = (10, 4)$
- aperiodischer Aufgabe
 - $T_A^S \mapsto ([0.1, \infty[, 0.4)$



1 Zusteller T_{PS} hat kürzeste Periode \leadsto höchste Priorität (RMA)

2 Zu Beginn der Abfrageperioden t_0 ist die AJQ leer
→ Das Budget von T_{PS} **verfällt**

3 Auslösezeitpunkt r_A ist $t_{0,1}$

- Kurz nach dem Abfragezeitpunkt t_0
- Ausführung von T_A^S erfolgt in Abfrageperiode $t_{2,5}$

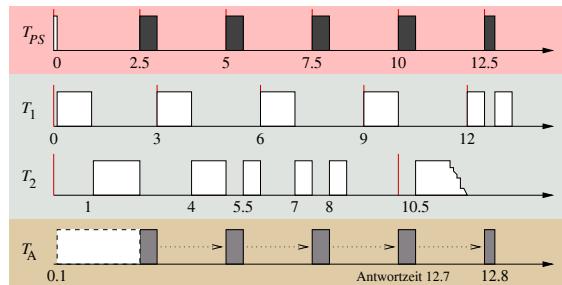
4 Hier kommt das Laufzeitsystem ohne Verdrängung aus

- Budget erlaubt dem Zusteller vollständige Abarbeitung von T_A^S



Abfragender Zusteller – Beispiel (2)

Aufteilung eines aperiodischen Arbeitsauftrags auf mehrere Auffüllperioden



Aufgabensystem:

$$\left. \begin{array}{l} T_{PS} \\ T_1 \\ T_2 \end{array} \right\} \text{wie gehabt}$$

$$T_A^S \mapsto ([0.1, \infty[, 2.3)$$

Ausführung von A benötigt (mindestens) fünf Abfrageperioden:

4×0.5 Zeiteinheiten (dem Budget von T_{PS})

- Abfrageperioden $t_{2.5}, t_5, t_{7.5}$ und t_{10}

1×0.3 Zeiteinheiten (bis A beendet ist)

- Abfrageperiode $t_{12.5} \sim \text{AJQ ist leer, } T_{PS} \text{ wird unätig}$

⚠ Das Laufzeitsystem muss Verdrängung unterstützen



Nachteile des Abfragebetriebs

⚠ Verfall des noch nicht vollständig ausgeschöpften Ausführungsbudgets eines unätigten Abfragers

→ Längere Antwortzeiten im Falle aperiodischer Aufgaben

→ Überlast im Fall sporadischer Aufgaben

- Sporadische Ereignisse müssen sehr hochfrequent abgefragt werden

■ Eintreffende nicht-periodische Arbeitsaufträge bleiben in der laufenden Abfrageperiode unberücksichtigt

- Behandlung verspäteter Aufträge frühestens zur nächsten Abfrageperiode
- Vergleiche Beispiel Folie 24
- Ansammlung in der Warteschlange, der Abfrager wird zurückgestellt

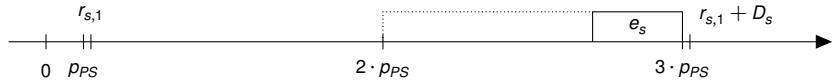
⚠ Restbudget eines Abfragers müsste bewahrt werden



Abfragende Zusteller und sporadische Aufgaben

Wenn der Abfragebetrieb in der Ereignissesteuerung an seine Grenzen stößt...

■ Periodische Zusteller $T_{PS} = (p_{PS}, e_{PS})$ behandelt sporadische Aufgabe $T_s^S = (i_s, e_s, D_s)$ mit Auslösezeitpunkt $r_{s,1}$ von $J_{s,1}$



■ Schlimmstenfalls wird der erste Abtastzeitpunkt verpasst: $r_{s,1} > p_{PS}$
→ Abarbeitung von $J_{s,1}$ beginnt mit der zweiten Abfrageperiode

⚠ T_{PS} kann durch prioritätsorientierte Einplanung verzögert werden

- Fertigstellung zur 3. Abfrageperiode

⚠ Termin von T_s^S muss aber gehalten werden: $2 \cdot p_{PS} \leq r_{s,1} + D_s$

▪ Termin D_s begrenzt die Auffüllperiode: $p_{PS} \leq D_s/2$

- $D_s \leq i_s$, falls $J_{s,1}$ vor $r_{s,2}$ fertiggestellt sein muss

⚠ Gefahr der Überlast – normalerweise gilt: $i_s \ll r_{s,i+1} - r_{s,i}$

- Minimale Zwischenankunftszeiten sind u.U. sehr kurz! (vgl. Folie 16)



Qual der Wahl...

Abfragender Zusteller \iff Unterbrecherbetrieb \iff Hintergrundbetrieb

Unterbrecherbetrieb:

- + Sehr gute Antwortzeiten für nicht-periodische Arbeitsaufträge
- Erfordert die Behandlung von Unterbrechungen
- Verzögert periodische Arbeitsaufträge \sim Überlastgefahr

Hintergrundbetrieb:

- + Liefert korrekte Ablaufpläne⁵
- Benötigt Verdrängung
- Lange Antwortzeiten für nicht-periodische Arbeitsaufträge

Abfragender Zusteller:

- + Einfache Implementierung auf Anwendungsebene
 - Nicht-periodischer Arbeitsaufträge \mapsto periodische Aufgabe
- + Liefert korrekte Ablaufpläne⁵
- Lange Antwortzeiten durch Aufgabe des Ausführungsbudgets
- Hoher Overhead durch den Abfragebetrieb

⁵ Aus Sicht der periodischen Aufgaben und deren mathematischen Annahmen.



Gliederung

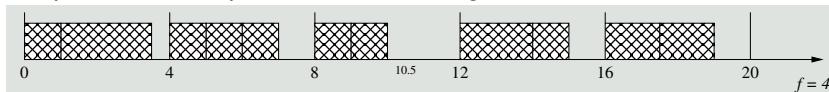
- 1 Nicht-periodische Aufgaben
 - Nicht-periodische Echtzeitanwendungen
 - Zeitliche Parameter
 - Herausforderung: Mischbetrieb
- 2 Erweiterte Behandlung nicht-periodischer Aufgaben
 - Unterbrecherbetrieb
 - Hintergrundbetrieb
 - Periodischer Zusteller
- 3 Slack-Stealing
 - Taktgesteuerte Systeme
 - Ereignisgesteuerte Systeme
- 4 Zusammenfassung



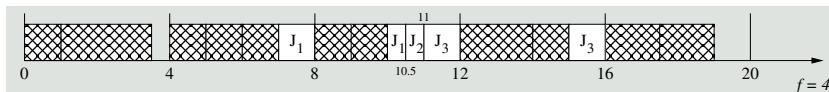
Ausgangspunkt: Taktsteuerung

Beispiel: *Major Cycle* eines zyklischen Ablaufplans (vgl. IV-3/10)

- Beispiel: Fünf Schlupfbereiche im ersten große Durchlauf



- Schraffierte Bereiche \rightarrow statisch eingeplante periodische Aufträge
- Jobs $J_1 \mapsto [4, \infty[, 1.5]$, $J_2 \mapsto [9.5, \infty[, 0.5]$, $J_3 \mapsto [10.5, \infty[, 2]$



- Ausführungszeiten 1.5, 0.5 und 2
- Zulässige Ausführungsintervalle [*earliest, latest*]
- Jobs haben keinen harten Termin

$$\text{Mittlere Antwortzeit: } ((10.5 - 4) + (11 - 9.5) + (16 - 10.5)) / 3 = 4.5$$



Slack-Stealing

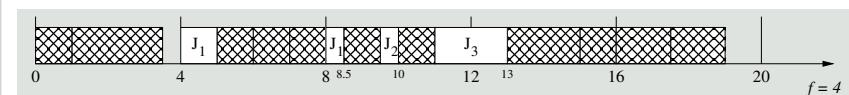
Die Abfertigung nicht-periodischer Jobs durch Nutzung der Schlupfzeit optimieren

- Echtzeitbetrieb bedeutet **Rechtzeitigkeit** (vgl. Folie II/10)
- Fertigstellung von Arbeitsaufträgen **vor ihrem Termin** unnötig
 - Kurz vor oder genau zum Termin ausreichend
- Verschiebung periodischer Aufträge um ihre Schlupfzeit
 - Ausführung nicht-periodischer Aufträge in den entstehenden Lücken
 - **Slupfdieb** (engl. *slack stealing*)
- ⚠ Termine periodischer Aufträge dürfen nicht gefährdet werden
 - Nach dem Aufbrauchen des Schlups
 - Suspendierung des gerade ausgeführten nicht-periodischen Auftrags
 - Direkte Einlastung des verzögerten periodischen Auftrags
- Slack-Stealing existiert für **takt-** und für **ereignisgesteuerte Systeme**



Taktsteuerung und Slack-Stealing

- Schlupf in Rahmen k ist die **Zeitspanne $f - e_P$** , mit e_P Zeiteinheiten für periodische Aufträge in k
- Periodischen Aufträgen **Zeitpuffer am Rahmenende entziehen**
 - Berechnung des Schlupfes geschieht einmal vor der Laufzeit und hängt nur vom aktuellen Rahmen ab
 - Periodische Aufträge werden ans Ende ihres Rahmens geschoben
- Jobs J_1, J_2 und J_3 , wie gehabt (vgl. Folie 31):



- J_1 wird sofort eingelastet, muss jedoch verdrängt werden
- J_2 wird ebenso behandelt, kann aber komplett durchlaufen
- J_3 wird verzögert bis der laufende periodische Auftrag fertig ist
- Mittlere Antwortzeit: $((8.5 - 4) + (10 - 9.5) + (13 - 10.5)) / 3 = 2.5$



Ereignissteuerung und Slack-Stealing

- Konzeptionell ist Slack-Stealing auch hier einfach
 - **Schlupfzeit-Dieb** (engl. *slack-stealer*) arbeitet anstehende nicht-periodische Arbeitsaufträge ab, auf:
 - höchster Priorität, wenn Schlupfzeit vorhanden ist, und auf niedrigster Priorität, wenn keine Schlupfzeit vorhanden ist

⚠ Aufwändige Berechnung der Schlupfzeit [3, S. 233 ff.]

- EDF mit **dynamischen Prioritäten**
 - **Statische** vorberechnete Schlupfzeiten
 - Berücksichtigung der **kompletten Hyperperiode**
 - **Dynamischen Berechnung**
 - Betrachtung des **aktuellen Tätigkeitsintervalls**⁶
 - Buchführung über **Untätigkeit, gestohlenen Schlupf** und **bereits verbrauchte Rechenzeit** der periodischen Aufträge notwendig
- RM mit **statischen Prioritäten**
 - Schlupfzeit hängt von ihrem Verwendungszeitpunkt ab
 - Schlupfzeit-Dieb darf daher nicht **gierig** (engl. *greedy*) sein

⁶Dessen Länge zunächst mit Hilfe der Zeitbedarfsanalyse (vgl. IV-2/27 ff) bestimmt werden muss.

Resümee

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** → 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 vorrangig gesteuerten Systemen

Gliederung

- 1 Nicht-periodische Aufgaben
 - Nicht-periodische Echtzeitanwendungen
 - Zeitliche Parameter
 - Herausforderung: Mischbetrieb
- 2 Erweiterte Behandlung nicht-periodischer Aufgaben
 - Unterbrecherbetrieb
 - Hintergrundbetrieb
 - Periodischer Zusteller
- 3 Slack-Stealing
 - Taktgesteuerte Systeme
 - Ereignisgesteuerte Systeme
- 4 Zusammenfassung

Literaturverzeichnis

- [1] AUTOSAR:
Specification of Operating System (Version 4.0.0) / Automotive Open System Architecture GbR.
2009. –
Forschungsbericht
- [2] Jr., S. R. M.:
My Fascinating Interview with Allan Klump.
http://www.unt.edu/UNT/departments/CC/Benchmarks/benchmarks_html/sepoct95/lunar.htm, 1995
- [3] Liu, J. W. S.:
Real-Time Systems.
Englewood Cliffs, NJ, USA : Prentice Hall PTR, 2000. –
ISBN 0-13-099651-3
- [4] OSEK/VDX Group:
Time Triggered Operating System Specification 1.0 / OSEK/VDX Group.
2001. –
Forschungsbericht. –
<http://portal.osek-vdx.org/files/pdf/specs/ttos10.pdf>

- [5] Regehr, J. ; Duongsaa, U. : Preventing interrupt overload. In: *Proceedings of the 2005 ACM SIGPLAN/SIGBED Conference on Languages, Compilers and Tools for Embedded Systems (LCTES '05)*. New York, NY, USA : ACM Press, 2005. – ISBN 1-59593-018-3, S. 50–58
- [6] Zühlsdorf, R. : Protokoll des Funkverkehrs bei der ersten Landung auf dem Mond. <http://members.fortunecity.de/rogerzuehlsdorf/AP11d.htm>, 1999



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 varierende 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)

T_i Priorität (engl. priority) der Aufgabe
 Ω_i Prioritätsebenen (engl. number of priorities)
 $h_{\Delta i}$ Rechenzeitbedarf (engl. demand)
 $u_{\Delta i}$ 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

Zusteller
 T_{PS} Abfragender Zusteller (engl. polling server)

Nicht-Periodische Aufgaben

i Minimale Zwischenankunftszeit (engl. minimal interarrival-time)

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

$T_i^S = (i, e_i, D_i)$ Nicht-periodische Aufgabe (Schreibweise mit i)
 $T_i^S = (r_i^{nach}, r_i^{vor}, e_i, D_i)$ Nicht-periodische Aufgabe (Schreibweise mit Auslöseintervall)

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

Ablaufplanung

P_i Priorität (engl. priority) der Aufgabe
 T_i
 Ω_i Prioritätsebenen (engl. number of priorities)
 $h_{\Delta i}$ Rechenzeitbedarf (engl. demand)
 $u_{\Delta i}$ 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

Zusteller
 T_{PS} Abfragender Zusteller (engl. polling server)

