

Echtzeitsysteme

Zustellerkonzepte

15. Dezember 2008 & 12. Januar 2009

Überblick

Zustellerkonzepte

Einführung

Problemfälle

Periodische Zusteller

Bandweite verlierende Zusteller

Bandweite bewahrende Zusteller

Zusammenfassung

Bibliographie

Mischbetrieb: periodisch \leftrightarrow aperiodisch bzw. sporadisch

Prioritätsorientierte Einplanung nichtperiodischer Arbeitsaufträge

Übernahmeprüfung (S. 5-28) sporadischer Arbeitsaufträge

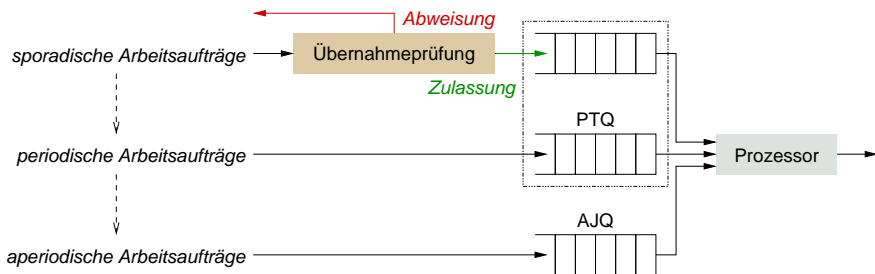
- ▶ Entscheidung über Zulassung oder Abweisung des Arbeitsauftrags:
 1. Einplanung eines zugelassenen sporadischen Arbeitsauftrags, so dass sein Abschluss zum vorgegebenen Termin sichergestellt ist
 2. Zusicherung der Termineinhaltung aller periodischen Aufgaben und anderen zuvor bereits zugelassenen sporadischen Arbeitsaufträge
- ▶ Parameter: **Ausführungszeit** und **Termin** des Arbeitsauftrags

Anwortzeitminimierung aperiodischer Arbeitsaufträge

- ▶ bei Termineinhaltung aller periodischen Aufgaben sowie der bereits zugelassenen (eingeplanten) sporadischen Arbeitsaufträge

Prioritätswarteschlangen im Betriebssystem

Variante von MLQ (*multi-level queue*, S. 6-16)



- ▶ bereitgestellte periodische Arbeitsaufträge \leadsto *Periodic Task Queue*
- ▶ sporadische Arbeitsaufträge durchlaufen ein/zwei Warteschlangen:
 1. ausgelöste Arbeitsaufträge müssen ggf. auf Übernahmeprüfung warten
 2. zugelassene Arbeitsaufträge kommen in eine eigene oder die PTQ
- ▶ bereitgestellte aperiodische Arbeitsaufträge \leadsto *Aperiodic Job Queue*

Korrektheit und Optimalität

Einplanungsverfahren terminabhängiger Arbeitsaufträge

korrekter Ablaufplan \mapsto periodische/sporadische Arbeitsaufträge

- ▶ **analytischer Aspekt:** periodische sowie zugelassene sporadische Arbeitsaufträge verpassen niemals ihre Termine
- ▶ **konstruktiver Aspekt:** die Aktionen des Gesamtsystems bewirken für diese Arbeitsaufträge keine Terminverletzungen

optimaler Ablaufplan \mapsto aperiodische/sporadische Arbeitsaufträge

- ▶ minimiert die **Antwortzeit** des aperiodischen Arbeitsauftrags am Kopf oder die **mittlere Antwortzeit** aller Arbeitsaufträge in der AJQ
- ▶ lässt jeden neu ausgelösten sporadischen Arbeitsauftrag zu und plant diesen korrekt ein¹
 - ▶ d.h., dass sein Abschluss zum vorgegebenen Termin sichergestellt ist

¹Optimal ist das Verfahren (*online*) nur, falls *alle* sporadischen Arbeitsaufträge planbar sind. Wird nur einer abgewiesen, gilt es als „nicht optimal“. [1, S. 192]

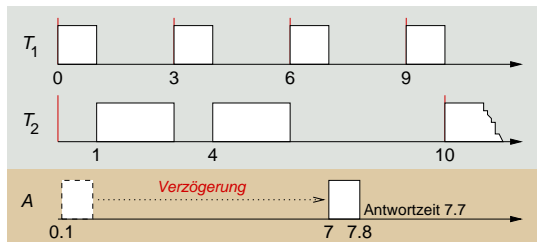
Hintergrundbetrieb

Korrektter Ablaufplan — auf Kosten des Antwortverhaltens

- ▶ aperiodische Arbeitsaufträge werden nur ausgeführt, falls keine periodischen/sporadischen Arbeitsaufträge zur Ausführung anstehen

Beispiel:

- ▶ periodische Tasks
 - ▶ $T_1 = (3, 1)$
 - ▶ $T_2 = (10, 4)$
 - ▶ RM
- ▶ aperiodischer Job
 - ▶ $A \mapsto 0.8(0.1, \infty)$



- ▶ minimiert die (mittleren) Antwortzeiten aperiodischer Arbeitsaufträge nur suboptimal \leadsto schlechtes Antwortverhalten

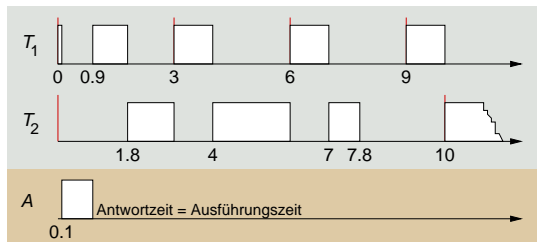
Unterbrecherbetrieb

Antwortzeitminimierung — auf Kosten eines „gut geordneten“ Ablaufplans

- ▶ ausgelöste aperiodische Arbeitsaufträge werden sofort ausgeführt, sie verdrängen die sich in Ausführung befindliche periodische Aufgabe

Beispiel:

- ▶ periodische Tasks
 - ▶ $T_1 = (3, 1)$
 - ▶ $T_2 = (10, 4)$
 - ▶ RM
- ▶ aperiodischer Job
 - ▶ $A \mapsto 0.8(0.1, \infty)$



- ▶ werden aperiodische Arbeitsaufträge immer sofort ausgeführt, erhöht sich das Risiko von **Schwankungen** im Ablauf periodischer Aufgaben

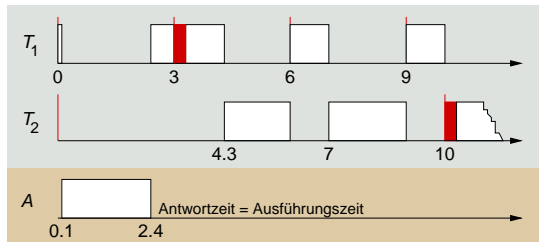
Unterbrecherbetrieb (Forts.)

Antwortzeitminimierung — auf Kosten eines korrekten Ablaufplans

- ▶ werden aperiodische Arbeitsaufträge bevorzugt ausgeführt, ist die **Termineinhaltung** periodischer Aufgaben **nicht gesichert**

Beispiel (vgl. 8-6):

- ▶ aperiodischer Job
 - ▶ $A \mapsto 2.3(0.1, \infty)$
 - ▶ *run to completion*
- ▶ periodische Tasks
 - ▶ T_1 zu spät
 - ▶ T_2 zu spät



- ▶ ist die **Schlupfzeit** (S. 4-9) der unterbrochenen periodischen Aufgabe abgelaufen, muss diese Aufgabe fortgesetzt werden

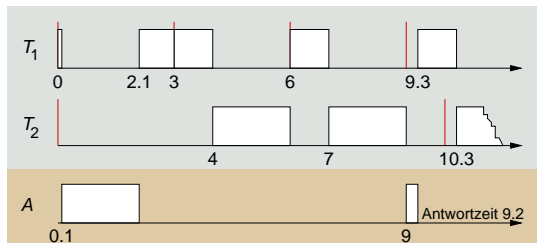
Unterbrecherbetrieb (Forts.)

Korrektter Ablaufplan — auf Kosten des Antwortverhaltens

- ▶ die Ausführung periodischer Aufgaben darf nur dann aufgeschoben werden, wenn der korrekte Ablaufplan weiterhin sicher ist

Beispiel (vgl. 8-7):

- ▶ periodische Tasks
 - ▶ Schlupf stehlen
 - ▶ $slack(T_{1,2}) = 2$
- ▶ aperiodischer Job
 - ▶ Schlupf nutzen
 - ▶ unterbrechen



- ▶ *slack stealing* (S. 5-25) minimiert die Antwortzeiten aperiodischer Arbeitsaufträge nur bedingt: $WCET(A) \leq \min(slack(T_1), slack(T_2))$

Qual der Wahl...

Hintergrundbetrieb \iff Unterbrecherbetrieb

Hintergrundbetrieb

- + liefert immer korrekte Ablaufpläne
- + ist einfach zu implementieren
- verlängert Antwortzeiten unnötigerweise

Unterbrecherbetrieb \mapsto *slack stealing*

- + ist methodisch einfach in taktgesteuerten Systemen
 - verkompliziert deren Implementierung jedoch beträchtlich
- erweist sich als höchst komplex in ereignisgesteuerten Systemen

periodischer Zusteller (engl. *periodic server*) schafft Abhilfe

- ▶ eine (im korrekten Ablaufplan aufgestellte) periodische Aufgabe, die die bereitgestellten aperiodischen Arbeitsaufträge ausführt

Periodischer Zusteller (engl. periodic server)

Periodische Abarbeitung aperiodischer Arbeitsaufträge

Spezialisierung einer **periodischen Aufgabe** (S. 4-12) von N aperiodischen Arbeitsaufträgen, $N > 0$ und variabel²

- ▶ definiert durch **Periode** p_s und **Ausführungszeit** e_s
 - ▶ das Verhältnis $u_s = e_s/p_s$ ist die Größe (engl. *size*) des Zustellers
- ▶ mit e_s als sogenanntes **Ausführungsbudget** (engl. *execution budget*)
 - ▶ das Budget wird um bis zu e_s Einheiten aufgefüllt (engl. *replenished*)
 - ▶ der Zeitpunkt wird **Auffüllzeit** (engl. *replenishment time*) genannt
- ▶ innerhalb eines beliebigen Zeitintervalls der Länge p_s niemals länger als e_s Zeiten (aperiodische Arbeitsaufträge) ausführend
 - ▶ Ausnahmen bestätigen diese Regel...
- ▶ verschiedenartig ausgelegt: abfragend, aufschiebbar, sporadisch

² N bestimmt die aktuelle Länge der AJQ.

Periodischer Zusteller (Forts.)

Arbeitsweise

Auslösung, Bereitstellung und Ausführung — der Zusteller...

- ▶ wird „zurückgestellt“ (engl. *backlogged*) wenn:
 1. die AJQ mindestens einen aperiodischen Arbeitsauftrag enthält
 - ▶ bei leerer AJQ ist der Zusteller untätig (engl. *idle*)
 2. der erste aperiodische Arbeitsauftrag in die leere AJQ kommt
- ▶ kommt in Frage (engl. *is eligible*) für die Ausführung wenn er:
 1. einen **Auftragsüberhang** (engl. *backlog*) aufweist *und*
 2. über ein **Ausführungsbudget** verfügt
- ▶ nimmt am Einplanungsverfahren periodischer Aufgaben teil
 - ▶ als „normale“ periodische Aufgabe mit $T_s = (p_s, e_s)$
- ▶ verbraucht (engl. *consumes*) sein Budget während der Ausführung
 - ▶ bis es auf Null abgesunken d.h. aufgebraucht (engl. *exhausted*) ist

Abfragender Zusteller (engl. *polling server*)

Verfall des Restbudgets zum Zeitpunkt des Untätigwerdens

Abfrager (engl. *poller*) $\mapsto T_P = (p_s, e_s)$

- ▶ mit Abfrageperiode p_s (engl. *polling period*)
 - ▶ zyklisch bereitgestellt im Abstand von (ganzzahlig vielfachen) p_s
- ▶ schrittweiser Abbau der AJQ innerhalb einer Abfrageperiode
 - ▶ Abarbeitung des Auftragsüberhangs vom Kopf der AJQ ausgehend
 - ▶ Unterbrechung des laufenden Arbeitsauftrags am Periodenende
- ▶ bei leerer AJQ verfällt das **Budget** unverzüglich
 - ▶ d.h., sobald der Abfrager feststellt, untätig sein zu müssen
 - ▶ auch, wenn dies bereits am Anfang der Abfrageperiode erkannt wird³
- ▶ Antwortzeiten aperiodischer Arbeitsaufträge schwanken ggf. stark
 - ▶ je nach Auslösezeitpunkt eines Auftrags bzw. Zustand des Abfragers

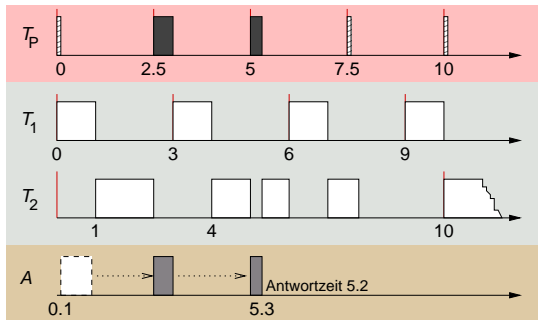
³Eintreffende aperiodische Arbeitsaufträge nachdem der Abfrager seine Untätigkeit festgestellt hat, kommen frühestens in der nächsten Abfrageperiode zum Zuge.

Abfragender Zusteller (Forts.)

Verbesserung des Antwortverhaltens

Beispiel (vgl. 8-5):

- ▶ periodische Tasks
 - ▶ $T_P = (2.5, 0.5)$
 - ▶ $T_1 = (3, 1)$
 - ▶ $T_2 = (10, 4)$
 - ▶ RM
- ▶ aperiodischer Job
 - ▶ $A \mapsto 0.8(0.1, \infty)$



- ▶ T_P hat die kürzeste Periode und erhält daher höchste Priorität (RM)
- ▶ zu Beginn der Abfrageperioden t_0 , $t_{7.5}$ und t_{10} ist die AJQ leer
- ▶ die Ausführung von A erfolgt in zwei Schritten:
 - 0.5 Zeiteinheiten (dem Budget von T_P) in Abfrageperiode $t_{2.5}$
 - 0.3 Zeiteinheiten in Abfrageperiode t_5 , bis A beendet (und AJQ leer) ist

Abfragender Zusteller (Forts.)

Verschlechterung des Antwortverhaltens

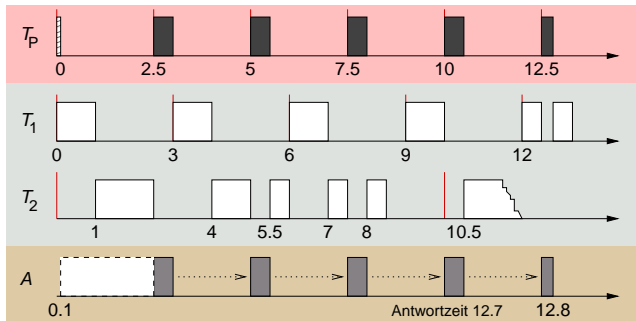
Beispiel (vgl. 8-8):

T_P
 T_1
 T_2

} wie gehabt

RM

$A \mapsto 2.3(0.1, \infty)$




- ▶ die Ausführung von A benötigt (mindestens) fünf Abfrageperioden:
 - 4×0.5 Zeiteinheiten (dem Budget von T_P)
 - ▶ in den Abfrageperioden $t_{2.5}$, t_5 , $t_{7.5}$ und t_{10}
 - 1×0.3 Zeiteinheiten (bis A beendet ist)
 - ▶ in Abfrageperiode $t_{12.5}$; die AJQ ist leer, T_P gibt auf...

Nachteil vom Abfragebetrieb

Schwankungen im Antwortverhalten des Systems

Verfall des noch nicht ganz ausgeschöpften Ausführungsbudgets eines untätigen Abfragers \leadsto ggf. **längere Antwortzeiten**

- ▶ in der laufenden Abfrageperiode dann noch eintreffende aperiodische Arbeitsaufträge bleiben zunächst unberücksichtigt
 - ▶ sie sammeln sich in der AJQ an, der Abfrager wird zurückgestellt
 - ▶ so geschehen mit $A \mapsto 0.8(0.1, \infty)$, vgl. 8-13
- ▶ die „zu spät“ eingetroffenen Aufträge werden frühestens in der nächsten Abfrageperiode (entsprechend Ablaufplan) behandelt

 das **Restbudget** eines Abfragers müsste bewahrt werden können. . .

Verbesserung des Abfragebetriebs

Restbudget untätig gewordener Zusteller in der Abfrageperiode nicht verfallen lassen

Zusteller, die ihr Ausführungsbudget (d.h., ihre Bandweite) innerhalb ihrer Abfrageperiode bewahren \mapsto engl. *bandwidth-preserving server*

- ▶ definieren sich durch bestimmte **Regeln** zum...
 - Verbrauch** (engl. *consumption*)
 - ▶ Bedingungen, unter denen das Budget bewahrt/verbraucht wird
 - Auffüllen** (engl. *replenishment*)
 - ▶ Festlegungen, *wann* und *wie* das Budget aufgefüllt wird
- ▶ werden nach folgendem Schema vom System verarbeitet:
 - ▶ der Planer (Betriebssystem) führt Buch über den Budgetverbrauch
 - ▶ suspendiert den Zusteller, wenn das Budget verbraucht wurde
 - ▶ stellt den Zusteller bereit, wenn das Budget aufgefüllt wurde
 - ▶ der Zusteller setzt sich selbst aus, wenn er eine leere AJQ vorfindet
 - ▶ Restbudget zum Zeitpunkt des Untätigwerdens bleibt ihm erhalten
 - ▶ sobald sich die AJQ wieder füllt, wird der Zusteller bereit gestellt

Aufschiebbarer Zusteller (engl. *deferrable server*)

Bewahrung des Restbudgets zum Zeitpunkt des Untätigwerdens

Deferrable Server $\mapsto T_D = (p_s, e_s)$

- ▶ periodisches Auffüllen von Budget e_s mit Periode p_s (vgl. 8-13)
- ▶ bei leerer AJQ, Bewahrung des (Rest-) Budgets von T_D in p_s
- ▶ keine Akkumulation des Restbudgets von Periode zu Periode
 - ▶ am Ende der Abfrageperiode verfällt ggf. vorhandenes Restbudget

Verbrauchsregel Wann immer der Zusteller ausgeführt wird verbraucht sich das Ausführungsbudget des Zustellers mit einer Rate $1/\text{Zeiteinheit}$.

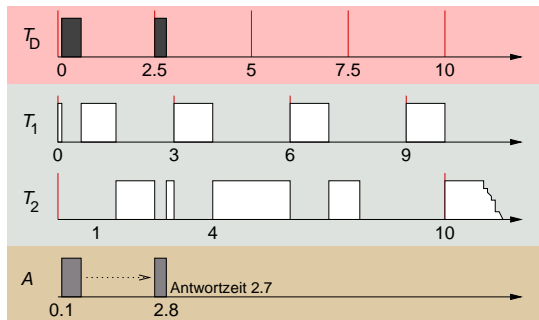
Auffüllregel Das Ausführungsbudget des Zustellers wird zu den Zeitpunkten kp_k auf e_s gesetzt, für $k = 0, 1, 2, \dots$

Aufschiebbarer Zusteller (Forts.)

Optimiertes Antwortverhalten

Beispiel (vgl. 8-13):

- ▶ periodische Tasks
 - ▶ $T_D = (2.5, 0.5)$
 - ▶ $T_1 = (3, 1)$
 - ▶ $T_2 = (10, 4)$
 - ▶ RM
- ▶ aperiodischer Job
 - ▶ $A \mapsto 0.8(0.1, \infty)$



- ▶ die Ausführung von A erfolgt in zwei Schritten:
 - 0.5 Zeiteinheiten (dem Budget von T_D) in Abfrageperiode t_0
 - 0.3 Zeiteinheiten in Abfrageperiode $t_{2.5}$, dann setzt sich A selbst aus
- ▶ das Restbudget von 0.2 Zeiteinheiten bleibt T_D erhalten
 - ▶ es ist für nachrückende Aufträge in Abfrageperiode $t_{2.5}$ nutzbar
 - ▶ eine Übertragung auf Abfrageperiode t_5 ist nicht vorgesehen

Aufschiebbarer Zusteller (Forts.)

Budgetverbrauch und -auffüllung

Beispiel:

- ▶ periodische Tasks
 - ▶ $T_D = (3, 1)$
 - ▶ $T_1 = (2, 3.5, 1.5)$
 - ▶ $T_2 = (6.5, 0.5)$
 - ▶ RM
- ▶ aperiodischer Job
 - ▶ $A \mapsto 1.7(2.8, \infty)$

Verlauf:

t_0 T_D startet & wartet

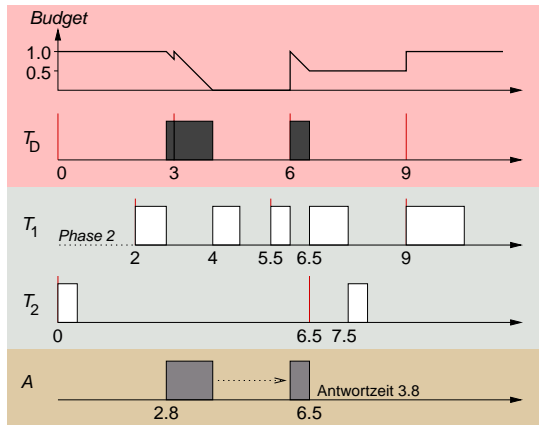
$t_{2.8}$ A wird zugestellt

t_3 T_D kommt weiter in Frage

t_4 T_D wird vom Planer gestoppt

t_6 T_D kommt erneut in Frage

$t_{6.5}$ A ist beendet, T_D untätig



Aufschiebbarer Zusteller (Forts.)

Budgetverbrauch und -auffüllung — alternatives Einplanungsverfahren

Beispiel:

- ▶ periodische Tasks
 - ▶ $T_{D,1,2}$ vgl. 8-19
 - ▶ EDF
 - ▶ $d_D = T_{replenishment}$
 - ▶ $d_{1,2} = p_{1,2}$
- ▶ aperiodischer Job
 - ▶ $A \mapsto 1.7(2.8, \infty)$

Verlauf:

t_0 T_D startet & wartet

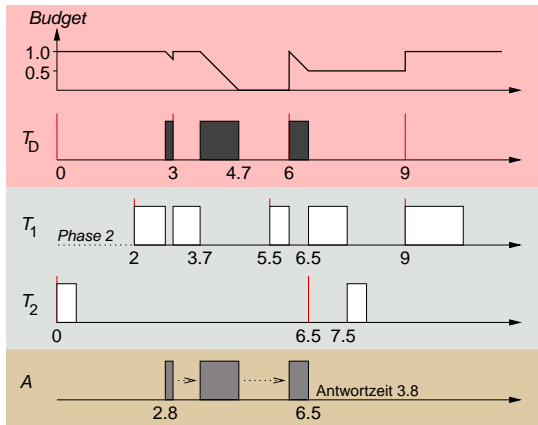
$t_{2.8}$ A wird zugestellt

t_3 T_1 hat früheren Termin (5.5)

t_4 T_D wird weiter ausgeführt

t_6 $d_1 = d_D$, T_D wird bevorzugt

$t_{6.5}$ A ist beendet, T_D untätig



Aufschiebbarer Zusteller \cup Hintergrundzusteller

Budgetverbrauch und -auffüllung — Antwortzeitverbesserung

Beispiel (vgl. 8-20):

Background Server

- ▶ verarbeitet die AJQ
 - ▶ unterstützt T_D
 - ▶ Abfragervariante
- ▶ niedrigste Priorität

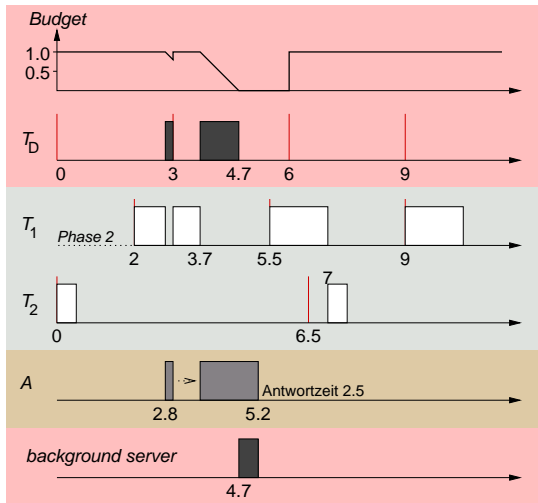
Verlauf:

$t_{4.7}$ keine periodische Task
ist ausführbar

- ▶ Hintergrundbetr.

$t_{5.2}$ A ist beendet

- ▶ T_D bleibt untätig



Aufschiebbarer Zusteller — Größenbeschränkung

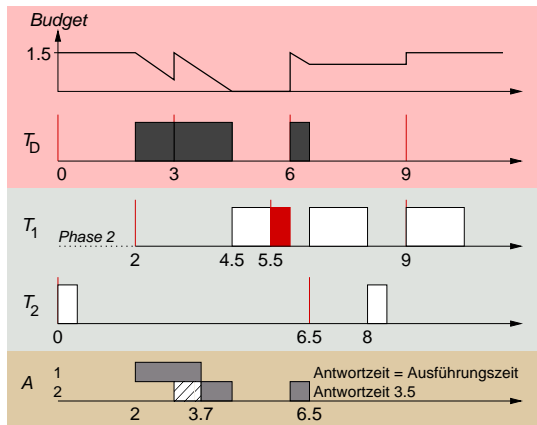
Einfluss auf die Planbarkeit periodischer Aufgaben

Verbesserung der Ansprechempfindlichkeit durch eine Vergrößerung des Budgets, anstatt Einsatz eines Hintergrundzusteller, ist problematisch:

Beispiel (vgl. 8-19):

- ▶ $T_D = (3, 1.5)$
- ▶ $A \mapsto 3(2, \infty)$
- ▶ T_1 verpasst Termin

Das Budget ist unter Berücksichtigung **aller möglichen Kombinationen** von Auslösezeiten aller (periodischen) Tasks zu bestimmen.



Sporadischer Zusteller (engl. *sporadic server*)

Taskssysteme fester Priorität (engl. *fixed-priority systems*)

Sporadic Server $\mapsto T_S = (p_s, e_s)$

- ▶ beansprucht niemals mehr Prozessorzeit als die periodische Aufgabe $T = (p_s, e_s)$ in jedem Zeitintervall
- ▶ kann daher auch genau wie die periodische Aufgabe T behandelt werden, wenn auf Planbarkeit des Tasksystems geprüft wird
- ▶ ermöglicht Planbarkeit eines Systems periodischer Aufgaben, das bei Verwendung eines aufschiebbaren Zustellers nicht planbar wäre
- ▶ kommt in verschiedenen Ausführungen vor, die sich vor allem in ihren Verbrauchs- und Auffüllregeln unterscheiden:

einfach (engl. *simple*) ✓

kumulativ (engl. *cumulative*) längere Budgetbewahrung

SpSL (Sprunt, Sha & Lehoczky) aggressiveres Auffüllen

termingesteuert (engl. *deadline-driven*) läuft mit höherer Priorität

Sporadischer Zusteller (Forts.)

Definitionen

T Tasksystem fester Priorität

- ▶ von n unabhängigen, verdrängbaren periodischen Aufgaben

π_S beliebige Priorität des Zustellers T_S

- ▶ bei gleicher Priorität wird zu Gunsten von T_S entschieden

T_H Teilmenge von Tasks mit Prioritäten höher als π_S

- ▶ bleibt tätig⁴ in jedem Tätigkeitsintervall von **T_H**

Tätigkeitsintervall des Zustellers (engl. *server busy interval*)

beginnt mit Einspeisung eines Arbeitsauftrags in die leere AJQ

endet bei erneut leergelaufener AJQ

⁴**T** (oder **T_H**) ist untätig, wenn kein Arbeitsauftrag in **T** (oder **T_H**) ausführbereit ist; sonst ist **T** (oder **T_H**) tätig.

Sporadischer Zusteller (Forts.)

Notationen

t_r späteste (aktuelle) Auffüllzeit

t_f erster Moment nach t_r , wenn die Ausführung von T_S beginnt

t_e späteste effektive Auffüllzeit

Zu jedem Zeitpunkt t ist:

- t_{begin} der Anfang des frühesten Tätigkeitsintervalls der vor t liegenden spätesten zusammenhängenden Folge solcher Intervalle von \mathbf{T}_H
- ▶ zwei Tätigkeitsintervalle sind zusammenhängend, wenn das spätere direkt nach dem Ende des früheren startet
- t_{end}
- ▶ das Ende des spätesten Tätigkeitsintervalls (der oben definierten Folge), wenn dieses Intervall vor t endet
 - ▶ gleich ∞ , wenn dieses Intervall nach t endet

Sporadischer Zusteller (Forts.)

Aktionen des Planers

1. t_r nimmt die aktuelle Zeit $t_{current}$ an, jedesmal wenn das Budget von T_S aufgefüllt wird
2. wenn T_S das erste Mal nach Auffüllung seines Budgets mit der Ausführung startet, wird:
 - 2.1 t_e auf Basis der **Historie** des Tasksystems bestimmt
 - 2.2 die nächste Auffüllzeit auf $t_e + p_s$ gesetzt

Mit anderen Worten: die nächste Auffüllzeit ist p_s Zeiteinheiten entfernt von t_e ,

- ▶ als wenn das Budget zuletzt zum Zeitpunkt t_e aufgefüllt worden wäre
- ▶ daher der Begriff „effektive Auffüllzeit“

Einfacher sporadischer Zusteller

Implementierungsmöglichkeit und Verbrauchsregel

- Planer**
- ▶ überwacht die Tätigkeitsintervalle von \mathbf{T}_H
 - ▶ pflegt Informationen über t_{begin} und t_{end}

Verbrauchsregel zu jedem Zeitpunkt $t > t_r$ (bis das Budget erschöpft ist) verbraucht sich das Ausführungsbudget des Zustellers mit einer Rate $1/\text{Zeiteinheit}$, wenn gilt:

V1 der Zusteller wird ausgeführt

V2 der Zusteller wurde seit t_r ausgeführt und $t_{end} < t$

Ansonsten behält der Zusteller sein Budget.

Einfacher sporadischer Zusteller (Forts.)

Auffüllregel

Auffüllregel (engl. *replenishment rule*)

A1 initial (d.h., wenn die Ausführung von **T** beginnt) und jedesmal, wenn das Budget aufgefüllt wird:

▶ $Budget = e_s$ und $t_r = t_{current}$

A2 zum Zeitpunkt t_f , $t_e = \begin{cases} \max(t_r, t_{begin}) & \text{wenn } t_{end} = t_f \\ t_f & \text{wenn } t_{end} < t_f \end{cases}$

▶ $t_e + p_s$ ist nächste Auffüllzeit

A3 nächste Auffüllung erfolgt bei $t_e + p_s$, es sei denn,

(a) $t_e + p_s < t_f$: Auffüllung, wenn Budget erschöpft ist

(b) **T** wird untätig vor $t_e + p_s$ und wieder tätig bei t_b : Auffüllung zum Zeitpunkt $\min(t_e + p_s, t_b)$

Einfacher sporadischer Zusteller (Forts.)

Interpretation von Verbrauchs- und Auffüllregel

V1 ist selbsterklärend

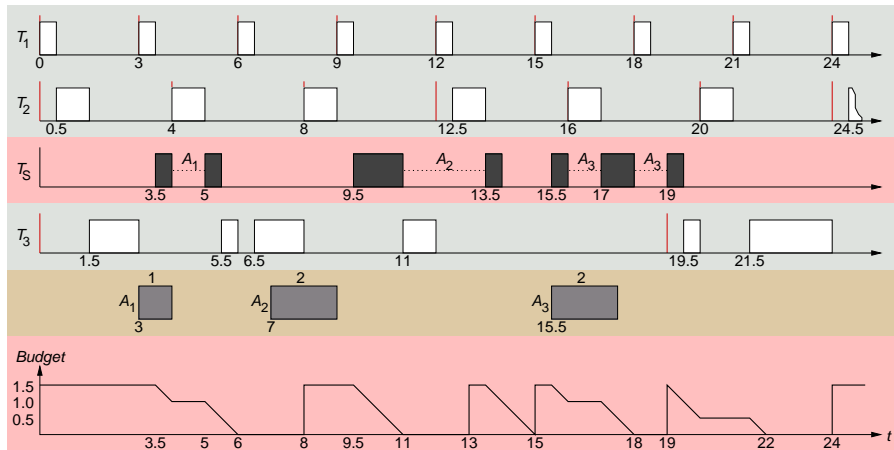
- V2
- ▶ T_S verbraucht sein Budget bis zu einem beliebigen Zeitpunkt t , wenn er seit t_r tätig war
 - ▶ aber zum Zeitpunkt t wird T_S suspendiert und \mathbf{T}_H untätig

A1 ist selbsterklärend

- A2
- ▶ die nächste Budgetauffüllung erfolgt p_s Zeiteinheiten nach t_r , wenn \mathbf{T}_H im Intervall (t_r, t_f) tätig war
 - ▶ sonst liegt t_e später; t_e ist spätestes Moment in (t_r, t_f) , zu dem:
 - ▶ eine gleich- oder niederprioritäre Task ausgeführt wird *oder*
 - ▶ \mathbf{T} untätig ist

A3 siehe Beispiel 8-30

Einfacher sporadischer Zusteller — Beispiel

 $T_1 = (3, 0.5)$, $T_2 = (4, 1)$, $T_3 = (19, 4.5)$ und $T_S = (5, 1.5)$; RM


Einfacher sporadischer Zusteller — Beispiel (Forts.)

Budgetverbrauch und -auffüllung

- $t_{3.5}$ T_S startet: $t_r = 0$, $t_{begin} = 3$, $t_{end} = 3.5$
- ▶ wegen A2 gilt: $t_e = \max(0, 3) = 3$, nächste Auffüllung bei $t = 8$
- t_4 T_2 verdrängt T_S , der sein Budget bewahrt
- t_5 T_S wird fortgesetzt und verbraucht sein Budget komplett
- ▶ da er läuft (V1) und, wenn er wieder suspendiert wird, T_1 und T_2 untätig sind bzw. $t_{end} = 5 < t_{current}$ (V2)
- t_8 Budgetauffüllung (A3), T_S ausführbereit
- $t_{9.5}$ T_S startet zum ersten Mal seit $t = 8$
- ▶ $t_e = 8$, nächste Auffüllung bei $t = t_e + p_s = 13$
- t_{14} \mathbf{T} untätig; nächste Auffüllung bei $t = 15$
- ▶ wenn das nächste Tätigkeitsintervall von \mathbf{T} beginnt
 - ▶ $t_e = 18$, $t_b = 15$: $\min(t_e + p_s, t_b) = 15$ (A3(b))
- t_{19} Budgetauffüllung (A3(b))

Resümee

Einführung

- ▶ Übernahmeprüfung, Antwortzeitminimierung
- ▶ Warteschlangen, AJQ; korrekter/optimaler Ablaufplan

Problemfälle

- ▶ Hintergrundbetrieb, Unterbrecherbetrieb

periodische Zusteller

- ▶ Arbeitsweise: Auslösung, Bereitstellung, Ausführung

Bandweite verlierende Zusteller \mapsto Abfrager

- ▶ Problem: Verfall des Restbudgets bei Untätigkeit

Bandweite bewahrende Zusteller \rightsquigarrow Verbrauchs-/Auffüllregeln

- ▶ aufschiebbare: ohne/mit Hintergrundzusteller, Planbarkeit
- ▶ sporadische: *einfach*; kumulativ, SpSL, termingesteuert

Literaturverzeichnis

- [1] Jane W. S. Liu.
Real-Time Systems.
Prentice-Hall, Inc., 2000.