

# Echtzeitsysteme


## Zustellerkonzepte & Übernahmeprüfung

**Peter Ulbrich**

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
[https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS18/V\\_EZS/](https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS18/V_EZS/)

13. Dezember 2018



- Optimale Behandlung von nicht-periodischen Aufgaben?
    - Das **Stehlen von Schlupf** ist im Allgemeinen zu komplex
    - **Hintergrundbetrieb** und **abfragende Zusteller** sind (zu) träge
    - **Vordergrundbetrieb** beeinflusst periodische Aufgaben (zu) stark
  
  - Der Schlüssel liegt in der **Bewahrung des Budgets**
    - Wie und wann wird das Budget **verbraucht**?
    - Wie und wann wird das Budget **wieder aufgefüllt**?
    - Wie stark ist der **Einfluss auf periodische Aufgaben**?
  
  - Wie lassen sich sporadischen Aufgaben sicher eingliedern?
    - Wie sehen **Akzeptanztests** eigentlich aus?
-  Fokus dieser Vorlesung liegt auf **ereignisgesteuerten Systemen!**



## 1 Bandbreite-bewahrende Zusteller

- Aufschiebbarer Zusteller
- Sporadischer Zusteller
- SpSL Sporadic Server
- POSIX Sporadic Server
- Hierarchische Ablaufplanung

## 2 Übernahmeprüfung

- Dynamische Prioritäten
- Statische Prioritäten





Verhalten einer periodischen Aufgabe im **schlimmsten Fall**

- Beschränkter, exakt quantifizierbarer Einfluss auf andere Aufgaben!
- Vereinfachung der (zeitlichen) Analyse



Abfragende Zusteller liefern **unbefriedigende Antwortzeiten**

- Grund: **Verlust des Ausführungsbudgets** bei Untätigkeit
- Verspätete Aufträge werden auf nächste Periode verschoben

■ Restbudget auch in Phasen der Untätigkeit bewahren?

- Unter Beibehaltung des periodischen



**Bandweite-bewahrende Zusteller** (engl. *bandwidth-preserving servers*)



# Überblick: Bandweite-bewahrende Zusteller

Erhalt des Restbudgets untätig gewordener Zusteller in der Abfrageperiode



## Bandweite-bewahrende Zusteller

- Bewahren Budget (d.h., Bandweite) innerhalb ihrer Abfrageperiode

→ Verbesserung des Abfragebetriebs und der Antwortzeiten

- Erweiterung des Regelwerks:

→ Verbrauchsregeln (engl. *consumption rules*)

- Bedingungen unter denen das Budget bewahrt/verbraucht wird

→ Auffüllregeln (engl. *replenishment rules*)

- Festlegungen wann und wie das Budget aufgefüllt wird

- Erweiterung des Verarbeitungsschemas:

→ Planer (Betriebssystem) führt Buch über den Budgetverbrauch

- Suspendiert den Zusteller, wenn das Budget verbraucht wurde

- Stellt den Zusteller bereit, wenn das Budget aufgefüllt wurde

→ Zusteller setzt sich selbst aus, wenn er untätig wird

- Restbudget zum Zeitpunkt des Untätigwerdens bleibt erhalten

- Wird ausführungsbereit, falls zurückgestellt (vgl. V-1/22)





## Aufschiebbarer Zusteller (engl. *deferrable server*)

Bewahrung des Restbudgets zum Zeitpunkt des Untätigwerdens (vgl. [3, S. 195])



Aufschiebbarer Zusteller (engl. *deferrable server*)  $\mapsto T_{DS} = (p_{DS}, e_{DS})$

- Periodisches Auffüllen von Budget  $e_{DS}$  mit Periode  $p_{DS}$  (vgl. V-1/23)
- Bewahrung des (Rest-)Budgets von  $T_{DS}$  in  $p_{DS}$  bei Untätigkeit

### Aufschiebbarer Zusteller

**Verbrauchsregel** Wann immer der Zusteller ausgeführt wird, verbraucht er sein Ausführungsbudget mit einer Rate  $1/\text{Zeiteinheit}$ .

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



Keine Akkumulation des Restbudgets von Periode zu Periode

→ Restbudget verfällt ggf. am Ende der Abfrageperiode

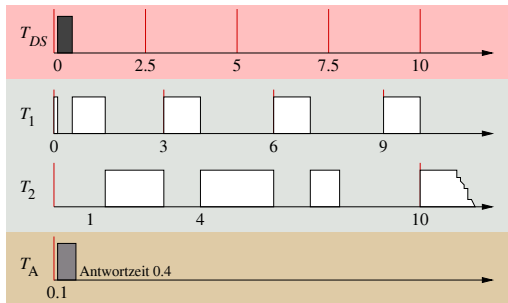


# Beispiel: Aufschiebbarer Zusteller (1)

Optimiertes Antwortverhalten im Vergleich zu abfragendem Zusteller (V-1/25)

## Aufgabensystem:

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



☞ Budget von 0.5 Zeiteinheiten bleibt  $T_{DS}$  erhalten

- Obwohl  $T_{DS}$  zum Zeitpunkt  $t_0$  untätig ist
- Unmittelbare Abarbeitung von  $T_A^S$  zum Zeitpunkt  $t_{0.1}$



Keine Übertragung des Restbudgets

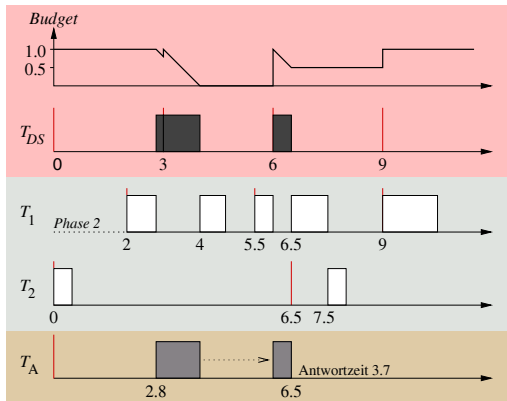
- Budget von 0.1 Zeiteinheiten verfällt mit  $t_{2.5}$



# Beispiel: Aufschiebbarer Zusteller (2)

## Aufgabensystem:

- periodische Tasks
  - $T_{DS} = (3, 1)$
  - $T_1 = (3.5, 1.5, 3.5, 2)$
  - $T_2 = (6.5, 0.5)$
  - RM
- aperiodischer Job
  - $T_A^S \mapsto ([2.8, \infty[, 1.7)$



## Verlauf:

- $t_0$   $T_{DS}$  startet & wartet
- $t_{2.8}$   $T_A^S$  wird zugestellt,  
 $T_{DS}$  verbraucht
- $t_3$   $T_{DS}$  kommt weiter in Frage

- $t_4$   $T_{DS}$  wird vom Planer gestoppt
- $t_6$   $T_{DS}$  kommt erneut in Frage
- $t_{6.5}$   $T_A^S$  ist beendet,  $T_{DS}$  untätig





# Beispiel: Aufschiebbarer Zusteller (3)

Alternatives Einplanungsverfahren mittels EDF

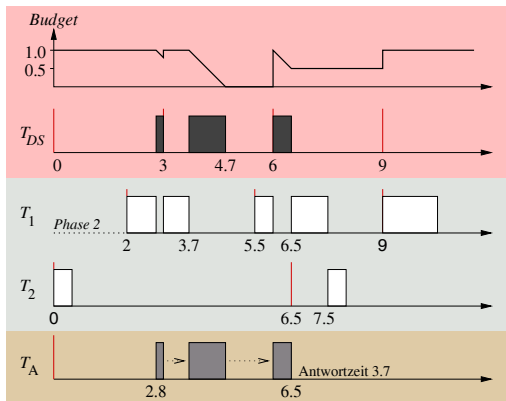
## Aufgabensystem:

### periodische Tasks

- $T_{DS} = (3, 1)$
- $T_1 = (3.5, 1.5, 3.5, 2)$
- $T_2 = (6.5, 0.5)$
- **EDF**

### aperiodischer Job

- $T_A^S \mapsto ([2.8, \infty[, 1.7)$



## Verlauf:

- $t_0$   $T_{DS}$  startet & wartet
- $t_{2.8}$   $T_A^S$  wird zugestellt,  $T_{DS}$  verbraucht
- $t_3$   $T_1$  hat früheren Termin (5.5)
- $t_{3.7}$   $T_{DS}$  wird weiter ausgeführt
- $t_6$   $d_1 = d_{DS}$ ,  $T_{DS}$  wird bevorzugt
- $t_{6.5}$   $T_A^S$  ist beendet,  $T_{DS}$  untätig



# Aufschiebbarer Zusteller $\cup$ Hintergrundzusteller

Budgetverbrauch und -auffüllung — Antwortzeitverbesserung



## Hintergrundzusteller (engl. *background server*)

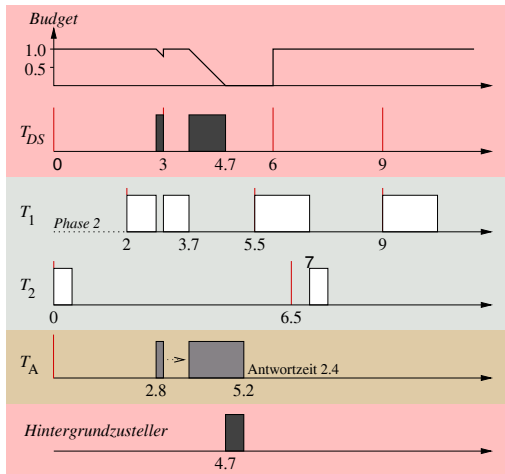
- Verarbeitet die AJQ
- Unterstützt  $T_{DS}$
- Niedrigste Priorität



## Verlauf:

- Beispiel von Folie 9

- $t_{4.7}$  Keine periodischen Aufträge  
     $\leadsto$  Hintergrundbetrieb
- $t_{5.2}$   $T_A^S$  ist beendet,  $T_{DS}$  bleibt  
    untätig



Bessere Antwortzeit, geringeres Zittern ( $T_1$ ,  $T_A^S$ ), weniger Kontextwechsel





# Aufschiebbarer Zusteller — Größenbeschränkung

Einfluss auf die Planbarkeit periodischer Aufgaben

## Aufgabensystem:

### ■ periodische Tasks

- $T_{DS} = (3, 1.5)$
- $T_1 = (3.5, 1.5, 3.5, 2)$
- $T_2 = (6.5, 0.5)$
- RM

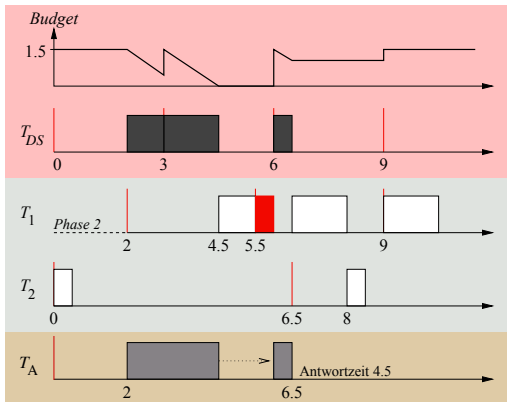
### ■ aperiodischer Job

- $T_A^S \mapsto ([2, \infty[, 3])$

## Verlauf:

$t_{5.5}$   $T_1$  verpasst Termin

$t_{5.2}$   $T_A^S$  ist beendet,  $T_{DS}$  bleibt untätig



Antwortzeitverbesserung durch Vergrößerung des Budgets (anstatt Hintergrundzusteller) ggf. **problematisch**

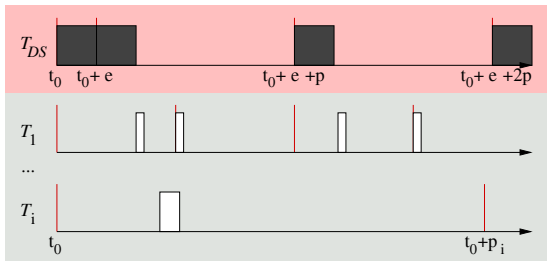
→ Budget ist unter **Berücksichtigung aller möglichen Kombinationen** von Auslösezeiten aller (periodischen) Tasks zu bestimmen





# Aufschiebbarer Zusteller != periodische Aufgabe

## Das Problem des Doppeltreffers



- **Beispiel:** Antwortzeitanalyse für statische Prioritäten (vgl. IV-2/39)
  - $T_{DS} \mapsto$  höchste Priorität aller periodischen Aufgaben<sup>1</sup>
- ☞ **Kritischer Zeitpunkt** (vgl. IV-2/43) von  $T_i$  tritt zum Zeitpunkt  $t_0$  ein:
  - Aufträge aller Aufgaben höherer Priorität  $T_1, \dots, T_{i-1}$  werden ausgelöst
  - Budget von  $T_{DS}$  ist  $e_s$  und  $T_{DS}$  ist zurückgestellt
  - Nächste Auffüllzeitpunkt von  $T_{DS}$  ist  $t_0 + e_s$

⚠ **Doppeltreffer** (engl. *double hit*)  $\leadsto$  Kein periodisches Verhalten

<sup>1</sup>Beachte: Falls  $T_{DS}$  niedrigste Priorität  $\mapsto$  Hintergrundbetrieb (vgl. V-1/20)  $\leadsto$  Keine Beeinflussung periodischer Aufgaben, kein Doppeltreffer.





Erweiterte, iterative Bestimmung der Antwortzeit (vgl. IV-2/40)

$$\omega_i(t) = e_i + e_{DS}(t) + \sum_{k=1}^{i-1} \left\lceil \frac{t}{p_k} \right\rceil e_k; 0 < t \leq p_i$$

- Durch den aufschiebbaren Zusteller  $T_{DS}$  verursachte **Störung**

$$e_{DS}(t) = \begin{cases} e_{DS} + \left\lceil \frac{t - e_{DS}}{p_{DS}} \right\rceil e_{DS} & \text{Priorität } P_i \text{ von } T_i \text{ ist kleiner als } P_{DS} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

→ Störung bis zu  $e_{DS}$  Zeiteinheiten größer als bei einer periodischen Aufgabe mit identischen Parametern



Sporadischer Zusteller (engl. *sporadic server*)





## Sporadischer Zusteller (engl. *sporadic server*)



Sporadischer Zusteller (engl. *sporadic server*)  $\mapsto T_s = (p_s, e_s)$

- Bedarf entspricht in jedem Zeitintervall dem einer periodischen Aufgabe  $T = (p_s, e_s)$  mit gleichen Parametern  
→ Planbarkeitsanalyse reduziert sich erneut auf periodische Aufgaben

- Verschiedene Ausführungen mit unterschiedlichen Verbrauchs- und Auffüllregeln:

einfach (engl. *simple*)

kumulativ (engl. *cumulative*) längere Budgetbewahrung

SpSL (Sprunt, Sha & Lehoczky) aggressiveres Auffüllen ✓

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



- **Prioritätsebenen** ( $P_1 \succ P_2 \succ \dots \succ P_n$ ):

$P_i$  (Beliebige) Prioritätsebene einer Aufgabe  $T_i$

$P_{cur}$  Aktuelle Prioritätsebene des Systems

$P_s$  Prioritätsebene des Zustellers  $T_s$

- **Tätigkeitsintervalle:**

tätig  $P_i: P_{cur} \succcurlyeq P_i$

- Systempriorität entspricht mindestens der Prioritätsebene  $P_i$

untätig  $P_i: P_{cur} \prec P_i$

- Systempriorität ist niedriger als die Prioritätsebene  $P_i$

- **Auffüllzeitpunkt** (engl. *replenishment time*)  $rt_i$  für die Prioritätsebene  $P_i$

- **Verbrauchtes Ausführungsbudget** wird zu diesem Zeitpunkt wiederhergestellt





### Verbrauchsregeln

Wann immer der Zusteller ausgeführt wird verbraucht er sein Ausführungsbudget mit einer Rate  $1/\text{Zeiteinheit}$ .

### Auffüllregeln

- R1 Initial wird das Ausführungsbudget auf  $e_s$  gesetzt
- R2 Der nächste Auffüllzeitpunkt  $rt_s$  für  $T_s$  wird jeweils auf  $t_b + p_s$  gesetzt.  $t_b$  ist dabei der Zeitpunkt, an dem
- $T_s$  besitzt Budget  $\leadsto P_s$  wird tätig
  - $T_s$  besitzt kein Budget  $\leadsto T_s$  Budget wird  $> 0$  &  $P_s$  ist tätig
- R3 Die nächste Auffüllung wird zum Zeitpunkt  $rt_s$  eingeplant
- Wenn  $P_s$  untätig wird oder  $T_s$  sein Budget erschöpft
  - So viel Budget wird aufgefüllt, wie  $T_s$  seit  $t_b$  verbraucht hat





- 1 **Überwache Tätigkeit/Untätigkeit** der Prioritätsebenen  $P_i$ 
  - Bestimme den nächsten Auffüllzeitpunkt  $rt_s$  von  $T_s$
- 2 **Überwache** und protokolliere den **Verbrauch** des Budgets von  $T_s$ 
  - Suspendiere  $T_s$ , falls Budget erschöpft
  - Stelle  $T_s$  bereit, falls Budget aufgefüllt wird

→ Protokollierung liefert den wieder aufzufüllenden Betrag des Budgets
- 3 **Verwalte** anstehende **Auffüllungen** (engl. *pending replenishments*)
  - $T_s$  muss sein Budget nicht auf einmal komplett aufbrauchen
    - Jede Etappe wird einzeln aufgefüllt (vgl. Folie 16, Regel R3)
  - Das Budget von  $T_s$  wird in **Scheiben** (engl. *chunks*) zerschnitten
    - Planer muss eine Liste anstehender Auffüllungen verwalten

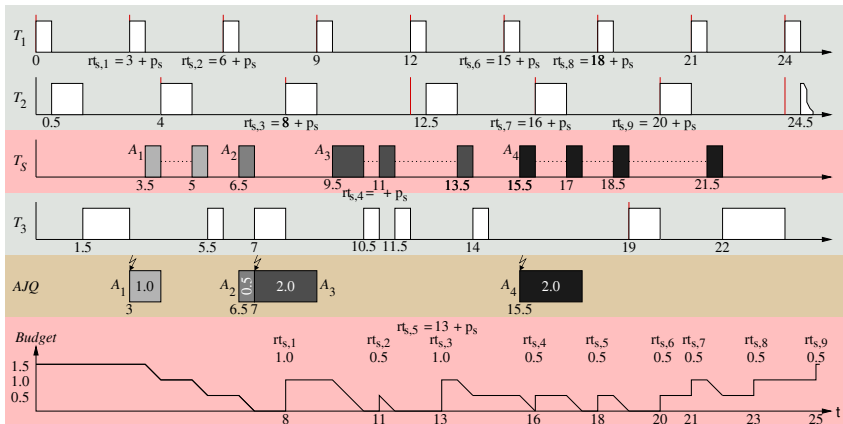
## SpSL Sporadic Server

SpSL Sporadic Server  $\approx$  Menge periodischer Aufgaben  $\{T_k\}$ , hierbei gilt: Periode  $p_k = p_s$ , Ausführungszeit  $\sum_k e_k = e_s$



# Beispiel: SpSL Sporadic Server

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



Jeder Auffüllzeitpunkt  $rt_{s,i}$  entspricht einer Scheibe des Budgets  $e_s$





$t_{3.5}$   $T_s$  startet:  $t_b = 3 \rightsquigarrow rt_{s,1} = 8$  (R2)

- $T_1$  startet zum Zeitpunkt  $t_3 \rightsquigarrow P_s$  wurde tätig

$t_{5.5}$   $T_s$  wird untätig, an  $rt_{s,1}$  wird 1 Zeiteinheit aufgefüllt (R3)

$t_{6.5}$   $T_s$  startet:  $t_b = 6 \rightsquigarrow rt_{s,2} = 11$  (R2)

- $T_1$  startet zum Zeitpunkt  $t_6 \rightsquigarrow P_s$  wurde tätig

$t_7$  Budget erschöpft, an  $rt_{s,2}$  werden 0.5 Einheiten aufgefüllt (R3)

$rt_{s,1} = t_8$  Budgetauffüllung,  $T_s$  wird ausführungsbereit

- $T_1$  und  $T_2$  mit höherer Priorität  $\rightsquigarrow T_s$  wird noch nicht ausgeführt

$t_{9.5}$   $T_s$  startet:  $t_b = 8 \rightsquigarrow rt_{s,3} = 13$  (R2)

- $T_2$  startet zum Zeitpunkt  $t_8 \rightsquigarrow P_s$  wurde tätig

$t_{10.5}$  Budget erschöpft, an  $rt_{s,3}$  wird 1 Einheit aufgefüllt (R3)

$rt_{s,2} = t_{11}$  Budgetauffüllung,  $T_s$  wird ausführungsbereit:  $t_b = 11 \rightsquigarrow rt_{s,4} = 16$  (R2)

- $T_1$  und  $T_2$  nicht ausführungsbereit  $\rightsquigarrow T_s$  startet

$\rightsquigarrow T_s$  wird zum Zeitpunkt  $t_{11}$  tätig

$t_{11.5}$  Budget erschöpft, an  $rt_{s,4}$  werden 0.5 Einheiten aufgefüllt (R3)





$rt_{s,3} = t_{13}$  **Budgetauffüllung**,  $T_s$  wird ausführungsbereit

$t_{13.5}$   $T_s$  startet:  $t_b = 13 \rightsquigarrow rt_{s,5} = 18$  (R2)

■ zwar ist  $P_s$  bereits seit  $t_{12}$  tätig, aber  $T_s$  besitzt kein Budget

$\rightsquigarrow$  Auffüllzeitpunkt  $rt_{s,3}$  dient als Basis für  $rt_{s,5}$

$t_{14}$   $T_s$  wird untätig, an  $rt_{s,5}$  werden 0.5 Einheiten aufgefüllt (R3)

$t_{15.5}$   $T_s$  startet:  $t_b = 15 \rightsquigarrow rt_{s,6} = 20$  (R2)

■  $T_1$  startet zum Zeitpunkt  $t_{15} \rightsquigarrow P_s$  wurde tätig

$t_{16}$  **Budget erschöpft**, an  $rt_{s,6}$  werden 0.5 Einheiten aufgefüllt (R3)

$rt_{s,4} = t_{16}$  **Budgetauffüllung**,  $T_s$  wird ausführungsbereit

$t_{17}$   $T_s$  startet:  $t_b = 16 \rightsquigarrow rt_{s,7} = 21$  (R2)

■  $T_2$  startet zum Zeitpunkt  $t_{16} \rightsquigarrow P_s$  wurde tätig

$t_{17.5}$  **Budget erschöpft**, an  $rt_{s,7}$  werden 0.5 Einheiten aufgefüllt (R3)

$rt_{s,5} = t_{18}$  **Budgetauffüllung**,  $T_s$  wird ausführungsbereit

$t_{18.5}$   $T_s$  startet:  $t_b = 18 \rightsquigarrow rt_{s,8} = 23$  (R2)

■  $T_1$  startet zum Zeitpunkt  $t_{18} \rightsquigarrow P_s$  wurde tätig

$t_{19}$  **Budget erschöpft**, an  $rt_{s,8}$  werden 0.5 Einheiten aufgefüllt (R3) ...





In Anlehnung an den SpSL Sporadic Server wurde im Standard POSIX 1003.1d [2] der **POSIX Sporadic Server (PSS)** spezifiziert

→ Einplanungsvariante **SCHED\_SPORADIC**

■ Bekannte Echtzeitbetriebssysteme implementieren den PSS

- Wind River – VxWorks
- QNX Software Systems – QNX Neutrino RTOS
- Xenomai – eine Echtzeiterweiterung für Linux



Dummerweise ist der PSS-Algorithmus **fehlerhaft** [5]

→ PSS verhält sich nicht immer wie eine periodische Aufgabe

■ **Fehlersymptome:**

- Anhäufung des Ausführungsbudgets (engl. *budget amplification*)
- Verfrühte Auffüllung des Budgets (engl. *premature replenishment*)
- Unzureichende zeitliche Isolation (engl. *unreliable temporal isolation*)





Exakte Überwachung des Ausführungsbudgets ist sehr aufwendig

- POSIX beschränkt die Ausführungszeit eines PSS

*... to at most its available execution capacity, plus the resolution of the execution time clock used for this scheduling policy*

- Effiziente Implementierung auf Kosten der Überwachungsgenauigkeit
- Kleine Überläufe werden in Kauf genommen
- Weitere irrtümlichen Annahmen:

*... reaches the limit imposed on its execution time ... the execution time consumed is subtracted from the available execution capacity. If the available execution capacity would become negative by this operation ... it shall be set to zero.*

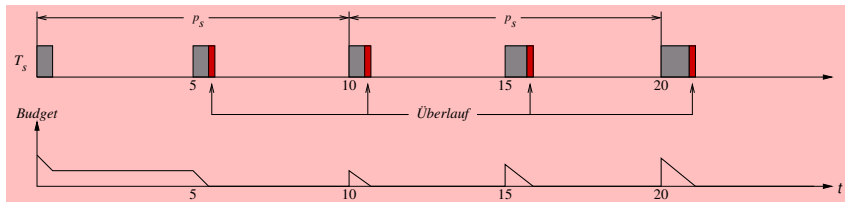
*... the execution capacity would become larger than ...\_initial\_budget, it shall be rounded down to a value equal to ...\_initial\_budget.*





## ⚠ Konsequenz ist **Ausweitung des Ausführungsbudgets**

- Bei Überläufen kann das Ausführungsbudget negativ werden
- Das nominelle Budget muss nicht unbedingt überschritten werden



## ■ Realistisches Fehlerbild des PSS

- Überläufe z.B. aus der vereinfachten Budget-Überwachung
- Anhäufung resultiert aus Auffüllung des verbrauchten Budgets
  - Budget wurde überzogen, also wird auch zu viel aufgefüllt



## Lösungsansatz: Überläufe von der nächsten Auffüllung borgen

- Überlauf beim nächsten Auffüllzeitpunkt verrechnen
- Erfordert ein negatives Ausführungsbudget





# Verfrühte Auffüllung des Budgets



Fragmentiertes Ausführungsbudget bedeutet **enormen Aufwand**

→ Verwaltung vieler Scheiben und anstehender Auffüllzeitpunkte

- Anstehende Auffüllungen speichern  $\leadsto$  **Speicheraufwand**
- Viele Auffüllungen abarbeiten  $\leadsto$  **viele Unterbrechungen**



POSIX vereinfacht die Verwaltung von Scheiben

*a replenishment operation consists of adding the corresponding replenishment\_amount to the available execution capacity at **the scheduled time***

- Für das gesamte Budget wird derselbe Aktivierungszeitpunkt  $t_b$  des Zustellers angenommen (vgl. Folie 16)



Folge ist eine **verfrühte Auffüllung** von Teilen des Budgets





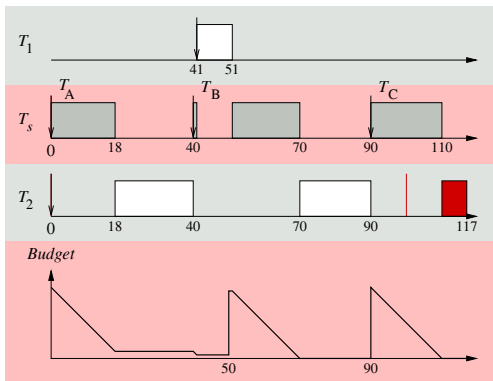


## ■ Periodische Aufgaben:

- $T_1 = (200, 10, 20, 41)$
- $T_2 = (200, 49, 100, 0)$
- $T_s = (50, 20)$  (PSS)
- DM:  $T_1 \succ T_s \succ T_2$

## ■ Aperiodische Aufgaben:

- $T_A^S \mapsto ([0, \infty[, 18)$
- $T_B^S \mapsto ([40, \infty[, 20)$
- $T_C^S \mapsto ([90, \infty[, 20)$



## ■ Eigentlich ist eine rechtzeitige Fertigstellung von $T_2$ möglich

- Antwortzeitanalyse (vgl. IV-2/39) liefert:  $\omega_2 = 99$



Problem ist die Auffüllung des Budgets zum Zeitpunkt  $t_{90}$

- Dieser erhält ebenso wie das Restbudget den Startzeitpunkt  $t_{40}$

→ Ungültige Vereinigung zweier Scheiben





POSIX unterstützt folgende Planungsverfahren für terminbehaftete Arbeitsaufträge:

`SCHED_FIFO` MLQ-Planer, stat. Prioritäten (vgl. IV-1/33)

`SCHED_RR` Reihum-Verfahren (engl. *round robin*)

`SCHED_SPORADIC` `SCHED_FIFO`  $\cap$  POSIX Sporadic Server

`SCHED_OTHER` standardmäßiger Zeitmultiplexbetrieb



Problem ist ein **ungünstige Verteilung** der globalen Prioritätsebenen:

$\geq 1$   $\mapsto$  `SCHED_FIFO`, `SCHED_RR` und `SCHED_SPORADIC`

0  $\mapsto$  `SCHED_OTHER`

■ Der PSS arbeitet auch im **Hintergrundbetrieb**

■ Bei Budgeterschöpfung sinkt der PSS auf eine **Hintergrundpriorität**

■ Diese wird aber gegenüber `SCHED_OTHER` bevorzugt

→ PSS kann Jobs in `SCHED_OTHER` **beliebig verzögern**



# Hierarchische Ablaufplanung

- Wiederholung: Ablaufplanungsverfahren (vgl. IV-1/28)
  - Einplanungsalgorithmen: RM, DM, EDF, ...
  - Statische oder dynamische Prioritäten auf Task bzw. Job-Ebene
- Zusteller stellen eine **allgemeine Rechenzeitressource** dar
  - Durch  $T_s = (20, 4)$  werden z.B. 20% Rechenzeit **reserviert**
  - Innerhalb des Zustellers freie Verfügung über Rechenzeit
- ☞ Ermöglicht **Hierarchische Ablaufplanung** (engl. *hierarchical scheduling*)
  - Beispielsweise global RM und EDF innerhalb des Zustellers
  - Implementierung des Planers im Nutzerland (engl. *user land*)
  - **Auswahl des jeweils optimalen Verfahrens**
- ⚠ Planbarkeitsanalyse wird ebenfalls hierarchisch
  - Antwortzeit hängt ggf. von mehreren Ebenen ab
  - Insgesamt steigen die Gemeinkosten an



- **Sporadische Zusteller** sind wichtig
  - Stellen eine **allgemeine Rechenzeitressource** dar
  - $T_s = (20, 4)$  werden z.B. 20% Rechenzeit **reserviert**
    - Freie Verfügung über diese Rechenzeit
    - Grundlage zahlreicher Ansätze für **hierarchische Ablaufplanung**
  - Implementierung ist **sehr, sehr komplex**
    - **Achtung:** Auch der SpSL Sporadic Server ist **fehlerhaft!**
    - Es existieren diverse korrigierte Varianten, siehe z.B. [3, S. 212 ff]
- **Aufschiebbare Zusteller vs. sporadische Zusteller**
  - Lange Zeit galt: sporadische sind **besser** als aufschiebbare Zusteller
  - Für statische Prioritäten wurde dies aber größtenteils widerlegt [1]
    - Meistens sind aufschiebbare und sporadische Zusteller ebenbürtig
    - Aufschiebbare Zusteller liefern oft bessere Antwortzeiten (double hit)
    - Sie sind einfacher zu implementieren und erzeugen weniger Overhead
- **POSIX Sporadic Server** ist wichtig für POSIX
  - Einzige Möglichkeit in POSIX, um Rechenzeit einzuschränken
  - Behebung der Fehler ist daher wünschenswert



## 1 Bandweite-bewahrende Zusteller

- Aufschiebbarer Zusteller
- Sporadischer Zusteller
- SpSL Sporadic Server
- POSIX Sporadic Server
- Hierarchische Ablaufplanung

## 2 Übernahmeprüfung

- Dynamische Prioritäten
- Statische Prioritäten



☞ Bisher: Abfertigung aperiodischer Arbeitsaufträge

- Minimierung der **durchschnittlichen Antwortzeit**
- **Kontrollierbare Interferenz** mit periodischen Arbeitsaufträgen

⚠ **Übernahmeprüfung** für sporadische Arbeitsaufträge erforderlich

- Kann der Termin des Arbeitsauftrags eingehalten werden?
  - Überprüfung läuft gekoppelt zur Laufzeit ab
  - **Aufwand** ist daher ein entscheidendes Kriterium

■ Je nach Ergebnis der Übernahmeprüfung

**positiv** Zulassung und Einplanung des sporadischen Jobs

**negativ** Abweisung und Anzeige einer Ausnahmesituation

☞ Im Folgenden: Akzeptanztests für die Übernahmeprüfung

**Folie 31 ff.** in Systemen mit dynamischen Prioritäten

**Folie 35 ff.** in Systemen mit statischen Prioritäten





Einplanung sporadischer Aufträge mittels EDF (vgl. IV-2/13)

- Idee: Keine Unterscheidung periodischer und sporadischer Jobs
- Alle Arbeitsaufträge sind sporadisch

- Akzeptanztest basiert auf dem EDF-Planbarkeitskriterium (vgl. IV-2/32)

$$U = \sum_{i=1}^n u_i = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{p_i} \leq 1$$



Betrachtung der **Dichte** (engl. *density*) anstatt der Auslastung

- Dichte  $\Delta_i$  eines sporadischen Auftrags  $T_i^S$  ist  $e_i / (D_i - r_i)$

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \Delta_i = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{D_i - r_i} \leq 1$$

- bezieht sich auf alle derzeit aktiven, sporadischen Jobs
- ist **hinreichend**, aber **nicht notwendig** ☹



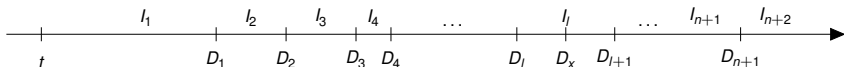


# Dichte-basierter Akzeptanztest



Bestimmung der Dichte  $\Delta_s$  der sporadischen Aufträge

- $\Delta$  ist die durch periodische Aufgaben verursachte (Grund-)Dichte
- $\Delta_s$  darf  $1 - \Delta$  nie überschreiten



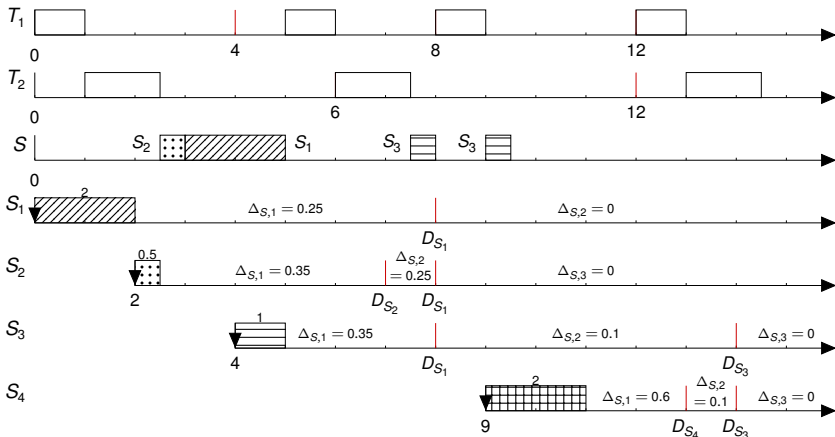
- Beispiel: Bei  $t$  trifft der sporadische Auftrag  $T_1^S = (e_1, D_1)$  ein
  - $D_j$  teilt die Zeitachse in Intervalle  $I_1 = ]t; D_1]$  und  $I_2 = ]D_1; \infty[$
  - Dichte  $\Delta_{s,1}$  im Intervall  $I_1$  ist  $e_1 / (D_1 - t)$  und  $\Delta_{s,2} = 0$  in  $I_2$
  - Verallgemeinerung auf  $n$  sporadische Jobs und  $n + 1$  Intervalle
    - In Intervall  $I_k$  ist die Dichte  $\Delta_{s,k} = \sum_{j \geq k} \Delta_j = \sum_{j \geq k} e_j / (D_j - t)$
- Zum Zeitpunkt  $t$  trifft nun ein Auftrag  $T_x^S = (e_x, D_x)$  ein  $\rightsquigarrow$  **Test!**
  - Der Termin  $D_x$  liege dabei im Intervall  $I_l$
  - Zulassung ist möglich falls:  $\forall_{k=1, \dots, l} : \Delta_x + \Delta_{s,k} \leq 1 - \Delta$ 
    - die Gesamtdichte überschreitet also in keinem Intervall den Wert 1





# Beispiel: Dichte-basierter Akzeptanztest [3, S. 252]

$T_1 = (4, 1)$ ,  $T_2 = (6, 1.5) \rightsquigarrow \Delta = 0.5$ , EDF-Ablaufplanung





$t_0$   $T_1 = (4, 1)$  und  $T_2 = (6, 1.5)$  werden periodisch ausgeführt

- $T_1^S = 2(0, 8]$  trifft ein  $\leadsto D_{T_1^S} = 8$
- $I_1 = (0, 8] : \Delta_{S,1} = 0.25, I_2 = (8, \infty] : \Delta_{S,2} = 0$

$t_2$   $T_2^S = 0.5(2, 7]$  trifft ein  $\leadsto D_{T_2^S} = 7$

- $I_1 = (0, 7] : \Delta_{S,1} = 0.35, I_2 = (7, 8] : \Delta_{S,2} = 0.25, I_3 = (8, \infty] : \Delta_{S,3} = 0$

$t_{2.5}$   $T_2^S$  startet und beendet sich bei  $t_3$

$t_3$   $T_1^S$  startet und beendet sich bei  $t_5$

$t_4$   $T_3^S = 1(4, 14]$  trifft ein  $\leadsto D_{T_3^S} = 14$

- $T_2^S$  hat die Ausführung bereits beendet  $\leadsto I_2 (\Delta_{S,2})$  kann entfallen
- $I_1 = (4, 8] : \Delta_{S,1} = 0.35, I_2 = (8, 14] : \Delta_{S,2} = 0.1, I_3 = (14, \infty] : \Delta_{S,3} = 0$

$t_{7.5}$   $T_3^S$  startet und wird bei  $t_8$  von  $J_{1,3}$  unterbrochen

$t_9$   $T_3^S$  wird fortgesetzt und endet bei  $t_{9.5}$

- $T_4^S = 2(9, 13]$  trifft ein  $\leadsto D_{T_4^S} = 13$
- $I_1 = (9, 13] : \Delta_{S,1} = 0.6, I_2 = (13, 14] : \Delta_{S,2} = 0.1, I_3 = (14, \infty] : \Delta_{S,3} = 0$
- $\Delta_{S,1} = 0.6 \geq 1 - \Delta$ : Abweisung von  $T_4^S$



# Schlupf-basierter Akzeptanztest [3, S. 258]

Sporadische Zusteller ermöglichen einfache Akzeptanztest für statische Prioritäten

- Abfertigung sporadischer Aufträge durch **Sporadische Zusteller**
  - Innerhalb von  $T_s = (p_s, e_s)$  Einplanung nach **EDF**

☞ Berechnung des Schlupfs wird hierdurch stark vereinfacht

- Beispiel: Auftrag  $T_1^S = (e_1, d_1)$  trifft zum Zeitpunkt  $t$  ein
  - $T_s$  verfügt bis  $d_1$  über mindestens  $\lfloor (d_1 - t) / p_s \rfloor e_s$  Budget
  - Schlupf  $\sigma_1(t)$  von  $T_1^S$  ist also  $\sigma_1(t) = \lfloor (D_1 - t) / p_s \rfloor e_s - e_1$
- Zulassung von  $T_1^S$  erfordert Schlupf  $\sigma_1(t) \geq 0$

⚠ Vor  $T_i^S$  können  $n$  sporadische Aufträge zugelassen worden sein  
→ Berücksichtigung bei der Berechnung des Schlupfs

$$\sigma_i(t) = \lfloor (D_i - t) / p_s \rfloor e_s - e_i - \sum_{D_k < D_i} (e_k - c_k(t))$$

- $c_k(t)$  beschreibt den bereits abgearbeiteten Teil von  $T_k^S$
- Aufträge  $T_k^S$  mit späterem Termin  $D_k \geq D_i$  werden explizit geprüft



- **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**
  
- **Übernahmeprüfungen** für dynamische und statische Prioritäten
  - Dichte-basierter Akzeptanztest für die EDF-Ablaufplanung
  - Schlupf-basierter Akzeptanztest für sporadische Zusteller



- [1] Bernat, G. ; Burns, A. :  
New results on fixed priority aperiodic servers.  
In: *Proceedings of the 20th IEEE Real-Time Systems Symposium, (RTSS '99)*.  
IEEE, New York : IEEE, Dez. 1999, S. 68–78
- [2] IEEE:  
*1003.1d-1999 Information Technology — Portable Operating System Interface (POSIX®) — Part 1: System Application Program Interface (API) — Amendment x: Additional Realtime Extensions [C Language]*.  
IEEE, New York : IEEE, 1999
- [3] Liu, J. W. S.:  
*Real-Time Systems*.  
Englewood Cliffs, NJ, USA : Prentice Hall PTR, 2000. –  
ISBN 0–13–099651–3
- [4] Sprunt, B. ; Sha, L. ; Lehoczky, J. P.:  
Aperiodic Task Scheduling for Hard Real-Time Systems.  
In: *Real-Time Systems Journal* 1 (1989), Nr. 1, S. 27–60. –  
ISSN 0922–6443



- [5] Stanovich, M. ; Baker, T. ; Wang, A.-I. ; Harbour, M. :  
Defects of the POSIX Sporadic Server and How to Correct Them.  
In: *16th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS '10)*.  
IEEE, New York : IEEE, april 2010. –  
ISSN 1080–1812, S. 35–45



# 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  
 $\omega_i$  Antwortzeit (engl. response time)  
 $\sigma_i$  Schlupf (engl. slack)

Periodische Aufgaben

$p_i$  Periode (engl. period)  
 $\phi_i$  Phase (engl. phase)

## Nicht-Periodische Aufgaben

$i_j$  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

$T_i^S = (i_j, e_i, D_i)$  Nicht-periodische Aufgabe (Schreibweise mit  $i_j$ )

$T_i^S = ([r_i^{nach}, r_i^{vor}], e_i, D_i)$  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  $T_i$

$\Omega_i$  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  $i$

$I_i$  Intervall (engl. interval)

$\Delta_i$  Dichte (engl. density) von  $I_i$

## Zusteller

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

$T_{DS}$  Aufschiebbarer Zusteller (engl. deferable server)

$T_s$  Sporadischer Zusteller (engl. sporadic server)

$T_s$  Sporadischer Zusteller (engl. sporadic server)

$rt_i$  Wiederauffüllzeitpunkt (engl. replenishment time)

