

Überblick

Vorrangsteuerung

- Prioritäten
- Prioritätsabbildung
- Repräsentation von Ablaufplänen
- Prioritätsverletzung und Prioritätsumkehr
- Zusammenfassung
- Bibliographie

Echtzeitsysteme Vorrangsteuerung

1./8. Dezember 2008

Ereignisorientierte Einplanung (engl. *event-driven scheduling*)

Einplanung von Arbeitsaufträgen erfolgt zu Ereigniszeitpunkten, die zufällig auftreten und somit nicht vorhersehbar sind

- ▶ die Ereignisverarbeitung unterliegt einer gewissen **Dringlichkeit**
- ▶ Ereignisauslöser sind kontrollierte Objekte/andere Arbeitsaufträge


Ereignisse haben Prioritäten, die dem Ereignisauslöser und/oder der Ereignisverarbeitung zugeordnet sind

feste Zuordnung \mapsto Ereignisverarbeitung/-auslöser

- ▶ gibt Arbeitsaufträgen eine **absolute Priorität**

variable Zuordnung \mapsto Ereignisverarbeitung

- ▶ gibt Arbeitsaufträgen eine **relative Priorität**

 auch: **prioritätsorientierte Einplanung** (engl. *priority-driven scheduling*)

Ereignisorientierter Planer (engl. *event-driven scheduler*)

Einplanung ereignisbedingt ausgelöster Arbeitsaufträge resultiert in eine **dynamische Datenstruktur** \mapsto „sortierte Liste“

- ▶ der Vorgang ist gekoppelt mit der Einlastung: **online scheduling**
- ▶ kritisch ist die **Berechnungskomplexität** und wann sie anfällt
 - ▶ konstant oder variabel, dann jedoch mit oberer Schranke \mapsto WCET
 - ▶ zum Auslöse- oder Auswahlzeitpunkt von Arbeitsaufträgen

Sortierschlüssel (engl. *sort key*) zur Reihung eines Arbeitsauftrags ist die ihm zugeordnete Priorität

- ▶ ergibt sich ggf. erst zum Ereigniszeitpunkt aus der Priorität der von ihm zu verarbeitenden **Klasse von Ereignissen**
- ▶ ist eindeutig abzubilden auf einen endlichen Wertebereich

 auch: **prioritätsorientierter Planer** (engl. *priority-driven scheduler*)

Berechnungskomplexität

Zeitpunkte ihrer Wirksamwerdung

Auslösezeitpunkt (nach dem Ereigniszeitpunkt)

- ▶ konstanter Aufwand, im Falle einer Ablauftabelle
 - ▶ Jobs durch indizierte Adressierung in die Tabelle aufnehmen
 - ▶ ggf. ist ein Tabelleneintrag eine Jobliste (FCFS) gleicher Priorität
- ▶ (beschränkter) linearer Aufwand, im Falle einer Ablaufliste
 - ▶ Vorabwissen zur **WCET des Sortiervorgangs** ist gefordert

Auswahlzeitpunkt (nach dem Auslöse-, vor dem Einlastungszeitpunkt)

- ▶ nahezu konstanter Aufwand, im Falle einer Ablaufliste
 - ▶ Jobs vom Kopf her der (ggf. einfach verketteten) Liste entnehmen
- ▶ beschränkter linearer Aufwand, im Falle einer Ablauftabelle
 - ▶ Vorabwissen zur **WCET des Suchvorgangs** ist gefordert
 - ▶ Tabelleneinträge können leer sein und sind zu überspringen

Berechnungskomplexität (Forts.)

Ablaufliste vs. Ablauftabelle

```
template<class Job>
class Schedule {
    Job* list;
public:
    void release (Job& item) {
        Job* last = 0;
        Job* tail = list;

        while (tail && tail->outrank(item))
            tail = (last = tail)->next();

        if (!last) {
            item.next(list); list = &item;
        } else {
            item.next(tail); last->next(&item);
        }
    }

    Job* extract () {
        Job* item;
        if ((item = list)) list = item->next();
        return item;
    }
};
```

release $O(n)$

extract nahezu $O(1)$

```
template<class Job, unsigned Jobs>
class Schedule {
    Job table[Jobs];
public:
    void release (Job& item) {
        assert((&item >= &table[0])
            && (&item <= &table[Jobs - 1]));
        item.state(Job::Ready);
    }

    Job* extract () {
        for (unsigned slot = 0; slot < Jobs; slot++)
            if (table[slot].state() == Job::Ready) {
                table[slot].state(Job::Selected);
                return &table[slot];
            }
    }

    return 0;
};
```

release $O(1)$

extract $O(n)$, obere Schranke Jobs

Prioritätsorientierte Algorithmen

Klassifikation

Verfahren zur prioritätsorientierten Einplanung periodischer Jobs werden in zwei Gruppen eingeteilt:

feste Priorität (engl. *fixed priority*)

- ▶ alle Jobs einer Task haben dieselbe Priorität
- ▶ d.h., die Taskpriorität ist relativ zu anderen Tasks fest, unabhängig von der Auslösung bzw. Beendigung von Jobs

dynamische Priorität (engl. *dynamic priority*)

- ▶ die Jobs einer Task können verschiedene Prioritäten haben
- ▶ d.h., die Taskpriorität variiert relativ zu anderen Tasks, wenn Jobs ausgelöst bzw. beendet werden

Unterschiede ergeben sich demnach in der Art und Weise, wie Prioritäten den Jobs zugeordnet werden

- ▶ nämlich statisch, wie im Falle fester Prioritäten, oder dynamisch...

Verfeinerte Klassifikation

Ein Frage der Betrachtungsebene...

Praxisrelevanz haben Verfahren, die den Jobs feste Prioritäten zuweisen

- ▶ die Zuweisung erfolgt jedoch zum Auslösezeitpunkt eines Jobs
 - ▶ wenn er ereignisbedingt auf die **Bereitliste** (engl. *ready list*) kommt
- ▶ einmal zugewiesen, bleibt die Priorität eines ausgelösten Jobs gleich
 - ▶ jedoch immer nur in Relation zu allen anderen Jobs auf der Bereitliste
- ▶ auf Jobebene sind die Prioritäten fest, auf Taskebene aber variabel

Konsequenz daraus: verschiedene Kategorien von Einplanungsalgorithmen

feste Priorität wie gehabt (S. 6-6)

dynamische Priorität auf Taskebene (engl. *task-level dynamic-priority*)

feste Priorität auf Jobebene (engl. *job-level fixed-priority*)

dynamische Priorität auf Jobebene (engl. *job-level dynamic-priority*)

☞ **dynamische Priorität** \mapsto dynamisch auf Task- und fest auf Jobebene

Mehrdeutigkeit von Prioritäten

Anwendungsebene vs. Systemebene

Echtzeitrechnungssysteme unterstützen typischerweise nur eine begrenzte Anzahl von Prioritätsebenen:

- 8 im IEEE 802.5 *token ring* [1]
- 32 im alten QNX, im neuen („Neutrino“) 256 [2]
- 140 in Linux 2.5 (mit Ebenen 1–100 reserviert für Echtzeitprozesse)
- 256 in VxWorks [3] und vielen anderen Echtzeitbetriebssystemen
- ▶ **implementierungsbedingter begrenzter Wertebereich:** Bitfeld, char

Echtzeitanwendungen können jedoch mehr Prioritätsebenen benötigen, als die gegebene Systemplattform unterstützt

- uneindeutige Prioritäten** (engl. *nondistinct priorities*) sind die Folge
- ▶ die Anzahl unterschiedlicher (eindeutiger) Task-/Jobprioritäten übersteigt die Anzahl unterschiedlicher Prioritäten im System
 - ▶ die Task-/Jobprioritäten lassen sich nicht eindeutig abbilden

Prinzip der Prioritätsabbildung

Prioritätsraster (engl. *priority grid*)

- ω_n Anzahl (an eine Task/einen Job) zugewiesener Prioritäten
 - ▶ $1, 2, \dots, \omega_n$ mit 1 als höchste und ω_n als niedrigste Priorität
- ω_s Anzahl der Prioritäten des Systems
 - ▶ $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{\omega_s}$ mit π_k ($1 \leq k \leq \omega_s$) im Bereich $[1, \omega_n]$
 - ▶ zusätzlich gilt: $\pi_j < \pi_k$ wenn $j < k$

Menge $\{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{\omega_s}\}$ ist **Prioritätsraster** Π , auf das die zugewiesenen Prioritäten wie folgt abgebildet werden:

- ▶ zugewiesene Prioritäten größer gleich π_1 auf π_1
- ▶ zugewiesene Prioritäten im Bereich $(\pi_{k-1}, \pi_k]$ auf π_k für $1 < k \leq \omega_s$

☞ die Abbildung kann **gleichmäßig** oder **ungleichmäßig** definiert sein

Abbildung durch gleichmäßige Verteilung

(engl. *uniform mapping*)

Prioritätsraster Π uniform auf den Bereich zugewiesener Prioritäten legen

- ▶ sei Q definiert als Ganzzahl $\lfloor \omega_n / \omega_s \rfloor$, dann ist die Systempriorität $\pi_k = kQ$ für $k = 1, 2, \dots, \omega_s - 1$ und $\pi_{\omega_s} = \omega_n$
- ▶ das bedeutet für einen Block von max. Q zugewiesenen Prioritäten:
 - ▶ die ersten Q höchsten $1, 2, \dots, Q$ werden abgebildet auf $\pi_1 = Q$
 - ▶ die nächsten Q höchsten werden abgebildet auf $\pi_2 = 2Q$
 - ▶ usw., bis alle zugewiesenen Prioritäten „gerastert“ worden sind
- ▶ Tasks werden dann entsprechend ihrer Systempriorität π_k abgearbeitet

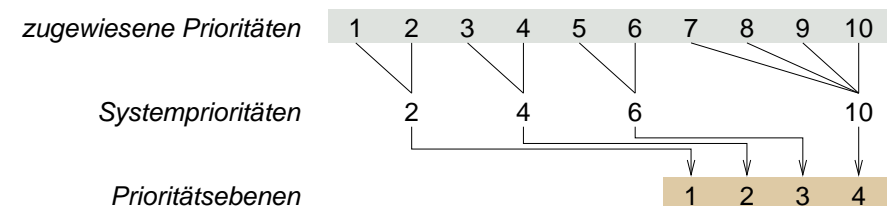
Tasks verschiedener logischer (d.h., zugewiesener) Prioritäten erhalten dieselbe physische Systempriorität, liegen auf einer Prioritätsebene

- ▶ die Jobs dieser Tasks sind einer linearen Abbildung unterworfen
- ▶ Wichtung erhalten sie durch ihre Position in der linearen Ordnung

Abbildung durch gleichmäßige Verteilung (Forts.)

Querschneidender Belang von Anwendung und System

Beispiel: 10 Tasks mit zugewiesenen Prioritäten $1, 2, \dots, 10$ und ein System, das nur die Prioritätsebenen $1, 2, 3, 4$ unterstützt



- ▶ $[1, 2] \mapsto \pi_1 = 2$
- ▶ $[3, 4] \mapsto \pi_2 = 4$
- ▶ $[5, 6] \mapsto \pi_3 = 6$
- ▶ $[7, 10] \mapsto \pi_4 = 10$

Problem „Fairness“: Tasks höherer zugewiesener Prioritäten werden gleich behandelt wie Tasks mit niedrigeren zugewiesenen Prioritäten.

Abbildung durch ungleichmäßige Verteilung

(engl. *non-uniform mapping*)

Prioritätsraster Π derart auf den Bereich zugewiesener Prioritäten legen, so dass das Verhältnis $(\pi_{i-1} + 1)/\pi_i$ für $i = 2, 3, \dots, \omega_s$ gleich bleibt

- ▶ die Methode wird auch als *constant ratio mapping* [4] bezeichnet
- ▶ für höhere zugewiesene Prioritäten werden mehr Prioritätsebenen reserviert als für niedrigere zugewiesene Prioritäten
- ▶ resultiert in eine bessere Feinabstufung höher priorisierter Tasks

Beispiel (wie gehabt, S. 6-11): $\omega_n = 10$, $\omega_s = 4$

- | | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| ▶ [1, 1] $\mapsto \pi_1 = 1$ | | ▶ 1:1 \mapsto Ebene $_1$ |
| ▶ [2, 3] $\mapsto \pi_2 = 3$ | ▶ $(\pi_1 + 1)/\pi_2 = 2/3$ | ▶ 2:1 \mapsto Ebene $_2$ |
| ▶ [4, 6] $\mapsto \pi_3 = 6$ | ▶ $(\pi_2 + 1)/\pi_3 = 2/3$ | ▶ 3:1 \mapsto Ebene $_3$ |
| ▶ [7, 10] $\mapsto \pi_4 = 10$ | ▶ $(\pi_3 + 1)/\pi_4 \approx 2/3$ | ▶ 4:1 \mapsto Ebene $_4$ |

Relative Planbarkeit

Einfluss der Anzahl von Systemprioritäten auf die Planbarkeit eines Systems

Verschlechterung der Planbarkeit ist zu erwarten, wenn insgesamt zu wenig Systemprioritäten zur Verfügung stehen, d.h., wenn gilt: $\omega_n > \omega_s$

- ▶ sei g das Minimum von Verhältniswerten des Prioritätsrasters
 - ▶ d.h., $g = \min_{2 \leq i \leq \omega_s} (\pi_{i-1} + 1)/\pi_i$
- ▶ im Falle von RM für große n und $D_i = p_i$ für alle i wurde gezeigt [4], dass für die **planbare Auslastung** (engl. *schedulable utilization*) gilt:
 - $\ln(2g) + 1 - g$ falls $g > 1/2$
 - g falls $g \leq 1/2$
- ▶ das Verhältnis dieser Auslastung zu $\ln 2$ ist ein Maß für die **relative Planbarkeit** des gegebenen Systems

Beispiel: 100 000 Tasks (evtl. noch vielmehr Jobs), d.h., $\omega_n = 100\,000$

- ▶ die relative Planbarkeit bei $\omega_s = 256$ ist gleich 0.9986

☞ RM: für komplexeste Tasksysteme reichen schon 256 Prioritätsebenen

Reihung von Arbeitsaufträgen

Logische Zusammenhänge im Lichte systembedingter Einschränkungen

Ablaufsteuerung zusammen mit Prioritätsabbildung resultieren in einen zweistufigen Ansatz zur Reihung von Arbeitsaufträgen:

1. je nach Ablaufsteuerungsverfahren werden Tasks (bzw. ihren Jobs) eindeutige Prioritäten zugewiesen

feste Prioritäten \rightsquigarrow RM, DM

dynamische Prioritäten \rightsquigarrow EDF, LRT, LST

- ▶ **Prioritätsschlange** (engl. *priority queue*), als Tabelle von ω_n Joblisten
- ▶ eine Schlange/Liste pro Task, zur Erfassung ausgelöster Jobs der Task
2. die durch logische Zwänge in der Anwendung gegebene Reihung wird unter Berücksichtigung der Systemeinschränkungen umgesetzt
 - ▶ die Tabellenlänge ggf. auf die Anzahl der Prioritätsebenen begrenzen
 - ▶ Schlangen/Listen aufeinanderfolgender Tabelleneinträge vereinen
 - ▶ dabei die den Tasks entsprechenden „Jobgruppen“ beibehalten

☞ Ablaufplan zweidimensional, als **indizierte Bereitliste** repräsentieren

Indizierte Bereitliste

Prioritätswert als strukturierter Sortierschlüssel

Ablaufsteuerungsverfahren erzeugen **lineare Ordnung** von Tasks/Jobs

- ▶ jedes (der betrachteten) Verfahren hat sein eigenes Sortierkriterium:
 - ▶ Periode (RM), relativer Termin (DM)
 - ▶ absoluter Termin (EDF), Auslösezeit (LRT), Schlupfzeit (LST)
- ▶ der **Sortierschlüssel** besteht aus mehreren Strukturelementen:
 1. Index in eine Tabelle von Listendeskriptoren $O(1)$
 - $\omega_n \leq \omega_s \mapsto$ zugewiesene Priorität der Task
 - $\omega_n > \omega_s \mapsto$ Systempriorität bzw. Prioritätsebene der Task
 2. relative Position innerhalb der (indizierten) Liste $O(1)$
 - $\omega_n \leq \omega_s \mapsto$ zugewiesene Priorität des Jobs \rightsquigarrow LIFO/FIFO $O(1)$
 - $\omega_n > \omega_s \mapsto$ zweigeteilte Ordnungszahl des Jobs $O(n)$
 - (a) die zugewiesene Priorität seiner Task
 - (b) die ihm zugewiesene Priorität innerhalb seiner Task
- ▶ der **Sortieraufwand** ist insgesamt gesehen **ehrer sublinear**, $o(n)$

☞ Vorrangsteuerung mit konstantem Aufwand ist nur bedingt möglich !

Indizierte Bereitliste (Forts.)

Ablaufplan segmentieren \rightsquigarrow Aufwand begrenzen

- 1. Dimension** \mapsto statische Datenstruktur: **Tabelle** von Zeiger(paare)n
 - ▶ konstanter Aufwand beim Zugriff auf einen Tabelleneintrag
 - ▶ Indizierung der Tabelle, Index ist die Prioritätsebene eines Jobs
 - ▶ linearer Aufwand bei der Auswahl des nächsten Tabelleneintrags
 - ▶ begrenzt durch ω_s bzw. die Anzahl von Prioritätsebenen
 - ▶ kleine und feste obere Schranke
- 2. Dimension** \mapsto dynamische Datenstruktur: **Liste/Schlange** von Jobs
 - ▶ konstanter Aufwand bei der Auswahl des nächsten Jobs
 - ▶ Fallunterscheidung entfällt: die Liste/Schlange ist nicht leer
 - ▶ linearer Aufwand bei der Bereitstellung eines Jobs
 - ▶ begrenzt durch das Verfahren zur Prioritätsabbildung
 - ▶ feste obere Schranke ω_n (schlimmster Fall)

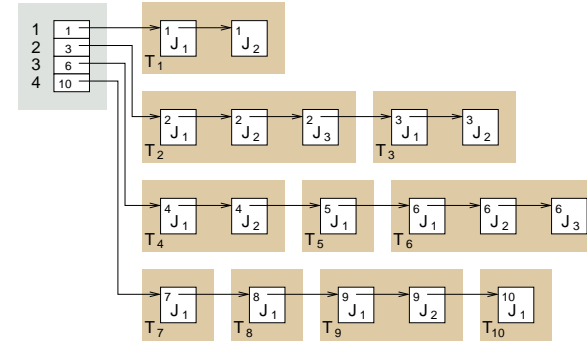
\leftarrow in Ebenen strukturierte Liste/Schlange: *multi-level queue*, MLQ

Indizierte Bereitliste und Prioritätsabbildung

Lineare Ordnung von Tasks/Jobs hinweg über alle Prioritätsebenen

Beispiel (S. 6-12): angenommen, die 10 Tasks kommen mit 18 Jobs. . .

Prioritätsebenen Tasks/Jobs und ihre zugewiesenen Prioritäten



Die relative Ordnung zwischen den Jobs verschiedener Tasks derselben Prioritätsebene muss aufrechterhalten werden, ebenso wie die der ggf. mehreren Jobs innerhalb einer Task:

- ▶ LIFO/FIFO ist nicht garantiert
- ▶ nur bedingt $O(1)$

\leftarrow ω_s steht hier für die Anzahl der Prioritätsebenen = **Tabelleneinträge**

Indizierte Bereitliste und Prioritätsabbildung (Forts.)

Verschmelzung von Ablaufliste und Ablauftabelle (S. 6-5)

```
template<class Job, unsigned Levels>
class Schedule {
    Job* table[Levels];
public:
    void release (Job& item) {
        assert(item.level() < Levels);

        Job* last = 0;
        Job* tail = table[item.level()];

        while (tail && tail->outrank(item)) tail = (last = tail)->next();

        if (!last) {
            item.next(table[item.level()]); table[item.level()] = &item;
        } else {
            item.next(tail); last->next(&item);
        }
    }

    Job* extract () {
        Job* item;
        for (Job** slot = &table[0]; slot < &table[Levels]; slot++)
            if (item = *slot) {
                *slot = item->next();
                return item;
            }
        return 0;
    }
};
```

- ▶ $O(1)$
- ▶ $O(n)$, **begrenzt**

- ▶ $O(n)$, **begrenzt**
- ▶ $O(1)$

Prioritätsorientierter $O(1)$ -Scheduler

Die Tücke liegt oft im Detail. . .

!?

Jobauslösung mit **konstantem Aufwand**, $O(1)$, ist möglich, sofern gilt:

- der Ablaufplan ist eine auf mehrere Prioritätsebenen aufgeteilte dynamische Datenstruktur, repräsentiert als Tabelle von. . .
 - Wartelisten \rightsquigarrow LIFO
 - Warteschlangen \rightsquigarrow FIFO
- alle Jobs, die über denselben Tabelleneintrag erfasst werden, besitzen auch dieselbe Priorität \rightsquigarrow **Prioritätsschlange**
 - ▶ sonst könnte LIFO/FIFO **Prioritätsverletzung** zur Folge haben
- die Anzahl der Tabelleneinträge entspricht mindestens der Anzahl zugewiesener Jobprioritäten: $\omega_s \geq \omega_n$
 - ▶ ggf. werden dann nahezu alle Tabelleneinträge nur einen Job erfassen
 - ▶ hängt ab von der Echtzeitanwendung und dem Einplanungsverfahren

Jobauswahl ist unter diesen Bedingungen nicht in $O(1)$ möglich:

- ▶ begrenzt viele leere Tabelleneinträge sind ggf. zu überspringen

Prioritätsorientierter $O(1)$ -Scheduler (Forts.)

!?

Eine Abwägungsfrage...

Vorrangsteuerung ist mit einem grundsätzlichen Konflikt konfrontiert:

- ▶ **entweder** Jobauslösung **oder** Jobauswahl mit $O(1)$ zu versehen
 - ▶ beides zugleich geht nicht

... für **Jobauslösung in $O(1)$** spricht:

- ▶ ereignisgesteuerte Einplanung/Einlastung benötigen konstante Zeit
 - ▶ als Folge eines *Interrupts* oder der Zustellung eines „Zeitsignals“
 - ▶ bedeutsam für voll-verdrängbare (engl. *full preemptive*) Systeme
- ▶ ereignisbedingte Jobverzögerungen lassen sich exakt bestimmen

... für **Jobauswahl in $O(1)$** spricht:

- ▶ der Übergang zum jew. nachfolgenden Job benötigt konstante Zeit
 - ▶ wenn z.B. der aktuelle Job durchgelaufen ist oder blockiert

☞ Linux 2.6, Mach, QNX, ... , VxWorks verhelfen Jobauslösung zu $O(1)$

Querschneidender Belang „Priorität“

Nichtfunktionale Eigenschaften anderer als einplanender Systemfunktionen

Abstraktion...

de.wikipedia.org/wiki ~ (von lat. abstrahere: abziehen, wegziehen)

bezeichnet den Prozess rationaler Verarbeitung von konkretem Sinnesmaterial, wobei von bestimmten äußeren, individuellen oder zufälligen Merkmalen, Eigenschaften und Beziehungen des betreffenden Objekts abgesehen wird, andere, allgemeingültige (unsichtbare) strukturelle Eigenschaften dagegen als wesentlich herausgehoben und zugleich variabel oder modellhaft betrachtet werden.

... ist im Kontext von Echtzeitrechensystemen mit Bedacht umzusetzen

- ▶ ein Beispiel lieferte die Diskussion zum $O(1)$ -Scheduler auf S. 6-19:
 - ▶ die Gefahr von **Prioritätsverletzung** bei LIFO/FIFO, wenn nicht alle Jobs in der Liste dieselbe Priorität besitzen
 - ▶ den Listenanfang hat dann nicht zwingend der höchst priorisierte Job
- ▶ überall, wo Jobs auf Warteschlangen stehen, ist dieses Problem akut

Fehlgeleitete Auslösung

Prioritätsverletzung (engl. *priority violation*)

Beispiel: Vergabe wiederverwendbarer/konsumierbarer Betriebsmittel

- ▶ jede Betriebsmittelklasse K_i verwaltet eine Warteliste für suspendierte Jobs entsprechend **FIFO** (bzw. FCFS)
 - ▶ z.B. durch einen **Semaphor** (engl. *semaphore*[5])
- ▶ ein anfordernder Job J_i wird suspendiert, wenn zum Zeitpunkt der Anforderung kein Betriebsmittel in K_i verfügbar ist
 - ▶ J_i hat eine niedrige Priorität, nimmt Platz i der Warteliste ein
- ▶ ereignisbedingt wird ein Job J_h ausgelöst und eingelastet, der ebenfalls wegen Betriebsmittelmangel in K_i bei Anforderung suspendiert wird
 - ▶ J_h hat eine hohe Priorität, nimmt Platz $j > i$ der Warteliste ein
- ▶ bei Freigabe eines Betriebsmittels in K_i wird der nächste auf dieses Ereignis wartende Job ausgelöst
 - ▶ J_i wird vor J_h ausgewählt, die Priorität von J_h wird verletzt

☞ Jobwarteschlangen konform zum Einplanungsverfahren bedienen

Fehlgeleitete Auslösung (Forts.)

Nichtfunktionale Eigenschaft im Beispiel „FIFO-Semaphor“

Funktion eines Semaphors ist die **Signalisierung von Ereignissen** zwischen gleichzeitigen Prozessen¹: Prozess \mapsto Job

- ▶ ein **abstrakter Datentyp**, auf dem zwei Operationen definiert sind:
 - P** signalisiert die **Blockade** eines Prozesses, wenn zum gegebenen Zeitpunkt $s = 0$ gilt
 - ▶ s wird sonst um 1 erniedrigt oder auf 0 gesetzt
 - V** signalisiert die **Deblockade** eines Prozesses, wenn zum gegebenen Zeitpunkt ein auf s blockierter Prozess existiert
 - ▶ s wird sonst um 1 erhöht oder auf 1 gesetzt
- ▶ Aufgabe ist nicht die Umsetzung von Prozessblockade/-deblockade
 - ▶ ebensowenig, wie Buch über die auf s blockierten Prozesse zu führen
- ▶ Buchführung blockierter Prozesse ist eine **Optimierungsmaßnahme**
 - ▶ bei der eine FIFO-Warteschlange für die Semaphorfunktion ideal ist

¹Prozesse, deren Ausführung sich zeitlich überschneidet.

Abhängigkeit von Aufgaben niedriger Priorität

Selbstausssetzung (engl. *self-suspension*)

Beispiel: ein **Fernaufauf** (engl. *remote procedure call*[6]) bzw. aus Klient/Anbieter (engl. *client/server*) bestehende Rechensysteme

Klient \mapsto ein Job höherer Priorität

- ▶ ruft eine Funktion auf, die von einem anderen Job (ggf. auf einem anderen Rechner) ausgeführt wird
- ▶ setzt „freiwillig“ (indirekt) seine weitere Ausführung aus

Anbieter \mapsto ein Job niedrigerer Priorität

- ▶ führt eine Funktion aus, die von einem anderen Job (ggf. auf einem anderen Rechner) aufgerufen wird
- ▶ verzögert den aufrufenden Job ggf. unbestimmt lang
- ▶ ein **Rückruf** (engl. *callback*) ist mit ähnlicher Problematik behaftet
 - ▶ beide Konzepte sind nur **bedingt transparent** für die involvierten Jobs

☞ **Prioritätsvererbung** (engl. *priority inheritance*) muss betrieben werden

Nebenläufige Zugriffe auf gemeinsame Betriebsmittel

Prioritätsumkehr (engl. *priority inversion*)

Prioritätsumkehr [7] ist Folge der Blockierung eines höher priorisierten Jobs durch einen niedriger priorisierten Job

1. der niedrig priorisierte Job durchläuft einen kritischen Abschnitt und wird vom höher priorisierten Job verdrängt
2. der höher priorisierte Job möchte denselben kritischen Abschnitt betreten, wird vom niedrig priorisierten Job jedoch daran gehindert
3. der niedrig priorisierte Job kann weiter ausgeführt werden, obwohl ein höher priorisierter Job wartet

...die das Problem verschärfende Variante bringt weitere Jobs ins Spiel:

4. mittel priorisierte Jobs verdrängen den niedrig priorisierten Job und blockieren indirekt den höher priorisierten Job noch länger

☞ kritischer Abschnitt oder Betriebsmittel: **Unteilbarkeit** ist das Problem

Intervalle von Unverdrängbarkeit

Blockierung, Hemmung (engl. *blocking*)

Beispiel: ein (zeit-) kritischer Abschnitt (engl. *critical section*)

- ▶ eine Folge von Anweisungen, deren Ausführung einen gegenseitigen Ausschluss erfordern \leadsto **mehrseitige Synchronisation**
 - (a) sich vor Überlappung schützen \mapsto binärer Semaphor
 - (b) sich vor Verdrängung schützen \mapsto Einlastung abschalten
- ▶ manche Betriebssysteme unterbinden während der Ausführung von Systemaufrufen die Verdrängung des laufenden Prozesses
 - ▶ klassisches UNIX-Modell (*runrun*-Flag) und das von UNIX *look-alikes*
- ▶ Job J_l läuft auf solch einer Plattform und tätigt einen Systemaufruf
 - ▶ J_l hat eine niedrige Priorität, durchläuft unverdrängbar den Kern
- ▶ während des Systemaufrufs, wird Job J_h ereignisbedingt ausgelöst
 - ▶ J_h hat eine hohe Priorität, wird eingeplant aber nicht eingelastet
- ▶ J_l blockiert bzw. hemmt J_h , die Priorität von J_h wird verletzt

☞ Synchronisation ist **nicht-funktionale Eigenschaft** eines Systemaufrufs

What really happened on Mars?

Prioritätsumkehr beim *Mars Pathfinder*[8, 9]

bc_sched \mapsto Task mit höchster Priorität (mit Ausnahme der VxWorks Task „tExec“)

- ▶ kontrollierte den Aufbau der Transaktionen über den „1553“-Bus
- ▶ dieser Bus koppelte Fahr- und Landeeinheit der Raumsonde

bc_dist \mapsto Task mit dritthöchster Priorität

- ▶ steuerte die Einsammlung der Transaktionsergebnisse
- ▶ Dateneingabe über doppelt gepufferten gemeinsamen Speicher

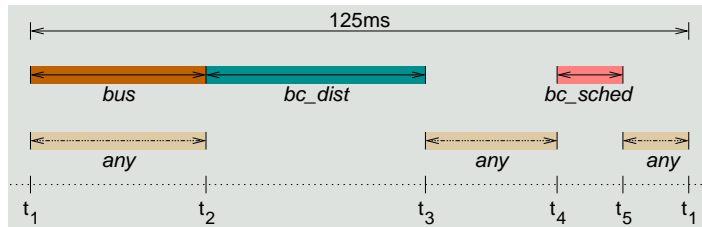
ASI/MET \mapsto Task mit sehr niedriger Priorität

- ▶ sammelte in seltenen Durchläufen meteorologische Daten ein
- ▶ interoperierte mit *bc_dist* (blockierend) auf IPC-Basis

☞ die Hardware gab eine Periodenlänge von 8 Hz (d.h., 125 ms) vor

What really happened on Mars? (Forts.)

Aufbau eines Buszyklus



- t_1 Transaktion startet hardware-kontrolliert an einer 8 Hz Grenze
 - t_2 Busverkehr ist zur Ruhe gekommen, *bc_dist* wird ausgelöst
 - t_3 *bc_dist* hat die Datenverteilung abgeschlossen
 - t_4 *bc_sched* wird ausgelöst, setzt Transaktion für nächsten Buszyklus auf
 - t_5 *bc_sched* hat seine Aufgabe für diesen Zyklus beendet
- ☞ Intervalle $[t_1, t_2)$, $[t_3, t_4)$, $[t_5, t_1)$ standen u.a. *ASI/MET* zur Verfügung

What really happened on Mars? (Forts.)

Feste Randbedingung

bc_dist muss die Datenverteilung abgeschlossen haben, wenn *bc_sched* ausgelöst wird, um die Transaktion des nächsten Zyklus aufzusetzen:

- ▶ stellt *bc_sched* fest, dass *bc_dist* noch nicht abgeschlossen ist, wird ein Total-reset durchgeführt
- ▶ der reset hat die Initialisierung der gesamten Hard- und Software zur Folge, insbesondere den Abbruch aller bodengesteuerten Aktivitäten
 - ▶ bereits aufgezeichnete wiss. Daten sind dann zwar gesichert, aber die noch anstehende Tagesarbeit kann nicht mehr vollbracht werden

Kategorie „feste Echtzeit“ (engl. *firm real-time*); zur Erinnerung: fest (engl. *firm*) auch „stark“

- ▶ das Ergebnis einer zu einem vorgegebenen Termin nicht geleisteten Arbeit ist wertlos und wird verworfen
- ▶ Terminverletzung ist tolerierbar, führt zum Arbeitsabbruch

What really happened on Mars? (Forts.)

Fehlersituation

ASI/MET (niedrige Priorität) hat *bc_dist* (hohe Priorität) blockiert:

- ▶ *ASI/MET* belegte wiederverwendbares, unteilbares Betriebsmittel
 - ▶ das von *bc_dist* angefordert wurde, bevor *ASI/MET* es wieder frei gab
- ▶ im weiteren Verlauf verdrängten Tasks mittlerer Priorität *ASI/MET*
 - ▶ dadurch verlängerte sich die Blockierungszeit für *bc_dist*
 - ▶ als Folge war *bc_dist* noch nicht abgeschlossen als *bc_sched* startete
- ▶ *bc_sched* stellte die Zeitverletzung fest und löste einen reset aus

Fehlererkennung und -beseitigung:

- ▶ die Semaphorinitialisierung war in VxWorks falsch eingestellt
- ▶ sie wurde bodengesteuert (durch ein Skriptprogramm) korrigiert
 - ▶ der Semaphor wurde auf **Prioritätsvererbung** umgestellt

Resümee

Prioritäten gebunden an Ereignisauslöser oder -verarbeiter

- ▶ fest auf Task- und/oder Jobebene, ggf. dynamisch auf Taskebene
- ▶ Einplanungsaufwand: Auslöse- vs. Auswahlzeitpunkt von Jobs

Prioritätsabbildung mangels Systemprioritäten bzw. Prioritätsebenen

- ▶ gleichmäßig oder ungleichmäßig, *constant ratio mapping*
- ▶ Einfluss auf die Planbarkeit (engl. *schedulability*) eines Systems

Repräsentation von Ablaufplänen \mapsto Prioritätsschlange auf Tabellenbasis

- ▶ indizierte Bereitliste (*multi-level queue*), Aufwand begrenzen
- ▶ *O(1)*-Scheduler: Jobsauslösung vs. Jobauswahl

Prioritätsverletzung und Prioritätsumkehr Selbstaussetzung/Hemmung

- ▶ kritische Abschnitte, unteilbare Betriebsmittel, Fernaufrufe
- ▶ Abstraktion „*considered harmful*“, nichtfunktionale Eigenschaften

Literaturverzeichnis

- [1] IEEE Standard 802.5.
Token Ring Access Method and Physical Layer Specification, 1989.
- [2] Dan Hildebrand.
An architectural overview of QNX.
In *Proceedings of the USENIX Workshop on Microkernels and Other Kernel Architectures*, pages 113–126, Seattle, WA, USA, April 27–28, 1992.
- [3] Wind River Systems, Inc.
<http://www.windriver.com>.
- [4] John P. Lehoczky and Lui Sha.
Performance of real-time bus scheduling algorithms.
ACM Performance Evaluation Review, 14(1):44–55, May 1986.

Literaturverzeichnis (Forts.)

- [5] Edsger Wybe Dijkstra.
Cooperating sequential processes.
Technical report, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, The Netherlands, 1965.
(Reprinted in *Great Papers in Computer Science*, P. Laplante, ed., IEEE Press, New York, NY, 1996).
- [6] Bruce Jay Nelson.
Remote Procedure Call.
PhD thesis, Department of Computer Science, Carnegie-Mellon University, Pittsburg, PA, USA, May 1981.
Technical Report CMU–81–119.
- [7] Butler W. Lampson and David D. Redell.
Experiences with processes and monitors in mesa.
Communications of the ACM, 23(2):105–117, 1980.

Literaturverzeichnis (Forts.)

- [8] David Wilner.
Vx-files: What really happened on mars?
Keynote at the 18th IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS '97), December 1997.
- [9] Michael B. Jones.
http://www.research.microsoft.com/~mbj/Mars_Path-finder, 1997.