

Treiberentwicklung, Echtzeit- und Betriebssysteme

Prof. Dr. Peter Gerwinski

6. Juni 2016

4 Echtzeit

4.1 Was ist Echtzeit?

4 Echtzeit

4.1 Was ist Echtzeit?

- Animation in Echtzeit:
schnelle Berechnung anstatt Wiedergabe einer Aufzeichnung

4 Echtzeit

4.1 Was ist Echtzeit?

- Animation in Echtzeit:
schnelle Berechnung anstatt Wiedergabe einer Aufzeichnung
- Fantasy-Rollenspiel in Echtzeit:
Der Zeitverlauf der Spielwelt entspricht dem der realen Welt.

4 Echtzeit

4.1 Was ist Echtzeit?

- Animation in Echtzeit:
schnelle Berechnung anstatt Wiedergabe einer Aufzeichnung
- Fantasy-Rollenspiel in Echtzeit:
Der Zeitverlauf der Spielwelt entspricht dem der realen Welt.
- Datenverarbeitung in Echtzeit:
Die Daten werden so schnell verarbeitet, wie sie anfallen.

4 Echtzeit

4.1 Was ist Echtzeit?

- Animation in Echtzeit:
schnelle Berechnung anstatt Wiedergabe einer Aufzeichnung
- Fantasy-Rollenspiel in Echtzeit:
Der Zeitverlauf der Spielwelt entspricht dem der realen Welt.
- Datenverarbeitung in Echtzeit:
Die Daten werden so schnell verarbeitet, wie sie anfallen.
- speziell: Echtzeit-Steuerung von Maschinen:
Die Berechnung kann mit den physikalischen Vorgängen schritthalten.

4 Echtzeit

4.1 Was ist Echtzeit?

- Animation in Echtzeit:
schnelle Berechnung anstatt Wiedergabe einer Aufzeichnung
- Fantasy-Rollenspiel in Echtzeit:
Der Zeitverlauf der Spielwelt entspricht dem der realen Welt.
- Datenverarbeitung in Echtzeit:
Die Daten werden so schnell verarbeitet, wie sie anfallen.
- speziell: Echtzeit-Steuerung von Maschinen:
Die Berechnung kann mit den physikalischen Vorgängen schritthalten.

→ „Schnell genug.“

4.1 Was ist Echtzeit?

„Schnell genug.“

4.1 Was ist Echtzeit?

„Schnell genug.“ – „Und wenn nicht?“

4.1 Was ist Echtzeit?

„Schnell genug.“ – „Und wenn nicht?“

- „Ganz schlecht.“

4.1 Was ist Echtzeit?

„Schnell genug.“ – „Und wenn nicht?“

- „Ganz schlecht.“ → *harte Echtzeit*

4.1 Was ist Echtzeit?

„Schnell genug.“ – „Und wenn nicht?“

- „Ganz schlecht.“ → *harte Echtzeit*



4.1 Was ist Echtzeit?

„Schnell genug.“ – „Und wenn nicht?“

- „Ganz schlecht.“ → *harte Echtzeit*



4.1 Was ist Echtzeit?

„Schnell genug.“ – „Und wenn nicht?“

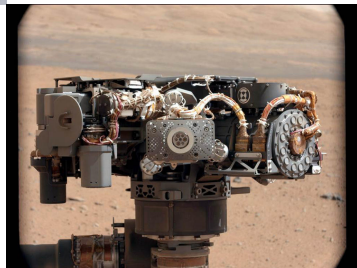
- „Ganz schlecht.“ → *harte Echtzeit*



4.1 Was ist Echtzeit?

„Schnell genug.“ – „Und wenn nicht?“

- „Ganz schlecht.“ → *harte Echtzeit*



4.1 Was ist Echtzeit?

„Schnell genug.“ – „Und wenn nicht?“

- „Ganz schlecht.“ → *harte Echtzeit*
rechtzeitiges Ergebnis funktionsentscheidend

4.1 Was ist Echtzeit?

„Schnell genug.“ – „Und wenn nicht?“

- „Ganz schlecht.“ → *harte Echtzeit*
rechtzeitiges Ergebnis funktionsentscheidend
- „Unschön.“ → *weiche Echtzeit*

4.1 Was ist Echtzeit?

„Schnell genug.“ – „Und wenn nicht?“

- „Ganz schlecht.“ → *harte Echtzeit*
rechtzeitiges Ergebnis funktionsentscheidend
- „Unschön.“ → *weiche Echtzeit*



4.1 Was ist Echtzeit?

„Schnell genug.“ – „Und wenn nicht?“

- „Ganz schlecht.“ → *harte Echtzeit*
rechtzeitiges Ergebnis funktionsentscheidend
- „Unschön.“ → *weiche Echtzeit*



4.1 Was ist Echtzeit?

„Schnell genug.“ – „Und wenn nicht?“

- „Ganz schlecht.“ → *harte Echtzeit*
rechtzeitiges Ergebnis funktionsentscheidend
- „Unschön.“ → *weiche Echtzeit*
verspätetes Ergebnis qualitätsmindernd
 - verwenden und Verzögerung in Kauf nehmen
 - verwerfen und Ausfall in Kauf nehmen

4.1 Was ist Echtzeit?

„Schnell genug.“ – „Und wenn nicht?“

- „Ganz schlecht.“ → *harte Echtzeit*
rechtzeitiges Ergebnis funktionsentscheidend
- „Unschön.“ → *weiche Echtzeit*
verspätetes Ergebnis qualitätsmindernd
 - verwenden und Verzögerung in Kauf nehmen
 - verwerfen und Ausfall in Kauf nehmen
- „Es gibt keinen festen Termin. Möglichst schnell halt.“

4.1 Was ist Echtzeit?

„Schnell genug.“ – „Und wenn nicht?“

- „Ganz schlecht.“ → *harte Echtzeit*
rechtzeitiges Ergebnis funktionsentscheidend
- „Unschön.“ → *weiche Echtzeit*
verspätetes Ergebnis qualitätsmindernd
 - verwenden und Verzögerung in Kauf nehmen
 - verwerfen und Ausfall in Kauf nehmen
- „Es gibt keinen festen Termin. Möglichst schnell halt.“
→ *keine Echtzeit*

4.1 Was ist Echtzeit?

Das Problem:

Harte Echtzeitanforderungen



Ressourcen optimal nutzen

4.1 Was ist Echtzeit?

Das Problem:

Harte Echtzeitanforderungen



Ressourcen optimal nutzen

Beispiel:

- Eine Motorsteuerung benötigt alle $2000\text{ }\mu\text{s}$ einen Steuerimpuls, dessen Berechnung maximal $10\text{ }\mu\text{s}$ dauert.

4.1 Was ist Echtzeit?

Das Problem:

Harte Echtzeitanforderungen



Ressourcen optimal nutzen

Beispiel:

- Eine Motorsteuerung benötigt alle $2000\ \mu\text{s}$ einen Steuerimpuls, dessen Berechnung maximal $10\ \mu\text{s}$ dauert.
- Entweder: Der Steuer-Computer macht noch andere Dinge.
→ Risiko der Zeitüberschreitung

4.1 Was ist Echtzeit?

Das Problem:

Harte Echtzeitanforderungen



Ressourcen optimal nutzen

Beispiel:

- Eine Motorsteuerung benötigt alle $2000\ \mu\text{s}$ einen Steuerimpuls, dessen Berechnung maximal $10\ \mu\text{s}$ dauert.
- Entweder: Der Steuer-Computer macht noch andere Dinge.
→ Risiko der Zeitüberschreitung
- Oder: Der Steuer-Computer macht nichts anderes.
→ Verschwendung von Rechenzeit

4.1 Was ist Echtzeit?

Das Problem:

Harte Echtzeitanforderungen



Ressourcen optimal nutzen

Beispiel:

- Eine Motorsteuerung benötigt alle $2000\ \mu\text{s}$ einen Steuerimpuls, dessen Berechnung maximal $10\ \mu\text{s}$ dauert.
- Entweder: Der Steuer-Computer macht noch andere Dinge.
→ Risiko der Zeitüberschreitung
- Oder: Der Steuer-Computer macht nichts anderes.
→ Verschwendung von Rechenzeit
→ Na und?

4.1 Was ist Echtzeit?

Das Problem:

Harte Echtzeitanforderungen



Ressourcen optimal nutzen

„Verschwendung von Rechenzeit – na und?“

4.1 Was ist Echtzeit?

Das Problem:

Harte Echtzeitanforderungen



Ressourcen optimal nutzen

„Verschwendung von Rechenzeit – na und?“

Große Stückzahlen

- 138 000 Toyota Prius V von Mai 2011 bis April 2012

4.1 Was ist Echtzeit?

Das Problem:

Harte Echtzeitanforderungen



Ressourcen optimal nutzen

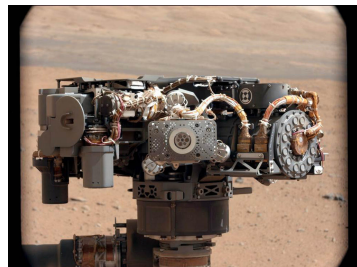
„Verschwendung von Rechenzeit – na und?“

Große Stückzahlen

- 138 000 Toyota Prius V von Mai 2011 bis April 2012

Wertvolle Ressourcen

- Fähigkeiten einer Raumsonde optimieren



4.1 Was ist Echtzeit?

Das Problem:

Harte Echtzeitanforderungen



Ressourcen optimal nutzen

„Verschwendung von Rechenzeit – na und?“

Große Stückzahlen

- 138 000 Toyota Prius V von Mai 2011 bis April 2012

Wertvolle Ressourcen

- Fähigkeiten einer Raumsonde optimieren
- Implantat: Platz- und Stromverbrauch minimieren



4.1 Was ist Echtzeit?

Das Problem:

Harte Echtzeitanforderungen



Ressourcen optimal nutzen

„Verschwendung von Rechenzeit – na und?“

Große Stückzahlen

- 138 000 Toyota Prius V von Mai 2011 bis April 2012

Wertvolle Ressourcen

- Fähigkeiten einer Raumsonde optimieren
- Implantat: Platz- und Stromverbrauch minimieren

→ **Echtzeitprogrammierung**

Echtzeitanforderungen erfüllen, ohne Ressourcen zu verschwenden

4.2 Echtzeitprogrammierung

Echtzeitanforderungen erfüllen, ohne Ressourcen zu verschwenden

Aber wie?

4.2 Echtzeitprogrammierung

Echtzeitanforderungen erfüllen, ohne Ressourcen zu verschwenden

Beispiele für Lösungen:

- ZigBee-Modul:
Funk- vs. UART-Protokoll
→ dedizierte Hardware

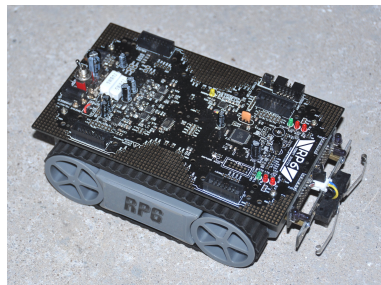


4.2 Echtzeitprogrammierung

Echtzeitanforderungen erfüllen, ohne Ressourcen zu verschwenden

Beispiele für Lösungen:

- ZigBee-Modul:
Funk- vs. UART-Protokoll
→ dedizierte Hardware
- RP6:
Motorsteuerung vs. Anwender-Software
→ spezielle Software



4.2 Echtzeitprogrammierung

Echtzeitanforderungen erfüllen, ohne Ressourcen zu verschwenden

Beispiele für Lösungen:

- ZigBee-Modul:
Funk- vs. UART-Protokoll
→ dedizierte Hardware
- RP6:
Motorsteuerung vs. Anwender-Software
→ spezielle Software
- Quadrocopter:
Motorsteuerung vs. Sensoren-Abfrage
vs. Funk-Fernsteuerung ...
→ spezielle Software



4.2 Echtzeitprogrammierung

Echtzeitanforderungen erfüllen, ohne Ressourcen zu verschwenden

Beispiele für Lösungen:

- ZigBee-Modul:
Funk- vs. UART-Protokoll
→ dedizierte Hardware
- RP6:
Motorsteuerung vs. Anwender-Software
→ spezielle Software
- Quadrocopter:
Motorsteuerung vs. Sensoren-Abfrage
vs. Funk-Fernsteuerung ...
→ spezielle Software
- Flugzeugkabinensimulatortür:
Türsteuerung vs. Bedienung
→ Echtzeitbetriebssystem



4 Echtzeit

4.3 Multitasking

Qualitätssicherung beim Multitasking

- Verschiedene Anforderungen:
Latenz vs. *Jitter*
vs. *Durchsatz*
- Ressourcen reservieren:
Mutexe (= spezielle *Semaphore*)
- Verschiedene Methoden
der Priorisierung
- Umgehung der Probleme durch
speziell geschriebene Software
(MultiWii, RP6, ...)

Qualitätssicherung für Netzwerke:

- Verschiedene Anforderungen:
Latenz vs. *Jitter* vs. *Verluste*
vs. *Durchsatz*
- Ressourcen reservieren:
IntServ mit *Resource Reservation Protocol (RSVP)*
- Klassifizierung und Priorisierung:
DiffServ mit Type-of-Service-Bits
(IPv4) bzw. Traffic-Class-Bits (IPv6)
im IP-Header
- Eigenes Protokoll (Telefondienste):
Asynchronous Transfer Mode (ATM)

Beispiele für Multitasking

Quadrocopter-Steuerung *MultiWii*

- Konfiguration durch bedingte Compilierung (Präprozessor)
- In der Hauptschleife wird 50mal pro Sekunde der RC-Task aufgerufen, ansonsten zyklisch einer von bis zu 5 weiteren Tasks.

RP6-Steuerung

- Konfiguration durch bedingte Compilierung (Präprozessor)
- Lichtschranken an Encoder-Scheiben lösen bei Bewegung Interrupts aus. Die Interrupt-Handler zählen Variable hoch.
- 10000mal pro Sekunde: Timer-Interrupt
verschiedene Tasks werden unterschiedlich häufig aufgerufen
- Nebenbei: 1 Benutzerprogramm

Linux 0.01

- Timer-Interrupt:
Task mit höchstem Zähler bekommt Rechenzeit.
- Wenn es keinen laufbereiten Task mit positivem Zähler gibt, bekommen alle Tasks gemäß ihrer Priorität neue Zähler zugewiesen.

Beispiele für Multitasking

Quadrocopter-Steuerung *MultiWii*

- Konfiguration durch bedingte Compilierung (Präprozessor)
- In der Hauptschleife wird 50mal pro Sekunde der RC-Task aufgerufen, ansonsten zyklisch einer von bis zu 5 weiteren Tasks.

RP6-Steuerung

- Konfiguration durch bedingte Compilierung (Präprozessor)
- Lichtschranken an Encoder-Scheiben lösen bei Bewegung Interrupts aus. Die Interrupt-Handler zählen Variable hoch.
- 10000mal pro Sekunde: Timer-Interrupt
verschiedene Tasks werden unterschiedlich häufig aufgerufen
- Nebenbei: 1 Benutzerprogramm

Linux 0.01

- Timer-Interrupt: Zähler des aktuellen Tasks wird dekrementiert; Task mit höchstem Zähler bekommt Rechenzeit.
- Wenn es keinen laufbereiten Task mit positivem Zähler gibt, bekommen alle Tasks gemäß ihrer Priorität neue Zähler zugewiesen.

Beispiele für Multitasking

Quadrocopter-Steuerung *MultiWii*

- Konfiguration durch bedingte Compilierung (Präprozessor)
- In der Hauptschleife wird 50mal pro Sekunde der RC-Task aufgerufen, ansonsten zyklisch einer von bis zu 5 weiteren Tasks.

RP6-Steuerung

- Konfiguration durch bedingte Compilierung (Präprozessor)
- Lichtschranken an Encoder-Scheiben lösen bei Bewegung Interrupts aus. Die Interrupt-Handler zählen Variable hoch.
- 10000mal pro Sekunde: Timer-Interrupt
verschiedene Tasks werden unterschiedlich häufig aufgerufen
- Nebenbei: 1 Benutzerprogramm

Linux 0.01

- Timer-Interrupt: Zähler des aktuellen Tasks wird dekrementiert; Task mit höchstem Zähler bekommt Rechenzeit.
- Wenn es keinen laufbereiten Task mit positivem Zähler gibt, bekommen alle Tasks gemäß ihrer Priorität neue Zähler zugewiesen.
- *keine* harte Echtzeit

4 Echtzeit

4.4 Ressourcen

Ressourcen reservieren

- *Semaphor*
gemeinsame Variable mehrerer Prozesse
zur Regelung des Zugriffs auf eine Ressource
Ressource belegt → Kontextwechsel

griechisch: *sema* – Zeichen, *pherein* – tragen
„Eisenbahnsignal“

4 Echtzeit

4.4 Ressourcen

Ressourcen reservieren

- *Semaphor*
gemeinsame Variable mehrerer Prozesse
zur Regelung des Zugriffs auf eine Ressource
Ressource belegt \longrightarrow Kontextwechsel
- *Mutex*
Mechanismus, damit immer nur ein Prozeß gleichzeitig
auf eine Ressource zugreifen kann

englisch: *mutual exclusion* – wechselseitiger Ausschluß
spezieller binärer Semaphor: nur „Besitzer“ darf freigeben

4 Echtzeit

4.4 Ressourcen

Ressourcen reservieren

- *Semaphor*

gemeinsame Variable mehrerer Prozesse
zur Regelung des Zugriffs auf eine Ressource
Ressource belegt \longrightarrow Kontextwechsel

- *Mutex*

Mechanismus, damit immer nur ein Prozeß gleichzeitig
auf eine Ressource zugreifen kann

- *Spinlock (busy waiting)*

leichtgewichtige Alternative zu Kontextwechsel

englisch: *spin* – rotieren, *lock* Sperre

busy waiting auf etwas Schnelles, z. B. auf einen Semaphor

Hardware-Unterstützung: Prüfen, ob Variable bestimmten Wert hat;
wenn ja, auf anderen Wert setzen; andere Prozessoren solange anhalten

4 Echtzeit

4.4 Ressourcen

Ressourcen reservieren

- *Semaphor*
gemeinsame Variable mehrerer Prozesse
zur Regelung des Zugriffs auf eine Ressource
Ressource belegt → Kontextwechsel
- *Mutex*
Mechanismus, damit immer nur ein Prozeß gleichzeitig
auf eine Ressource zugreifen kann
- *Spinlock (busy waiting)*
leichtgewichtige Alternative zu Kontextwechsel
- *Kritischer Abschnitt – critical section*
Programmabschnitt zwischen Reservierung
und Freigabe einer Ressource
→ sollte immer so kurz wie möglich sein

4 Echtzeit

4.4 Ressourcen

Ressourcen reservieren: Beispiele

- *Semaphor*
linux-3.7-rc1/kernel/semaphor.c
linux-3.7-rc1/drivers/usb/core/file.c
- *Mutex*
linux-3.7-rc1/kernel/mutex.c
linux-3.7-rc1/drivers/usb/serial/usb-serial.c
- *Spinlock*
linux-3.7-rc1/kernel/spinlock.c
linux-3.7-rc1/kernel/semaphor.c, linux-3.7-rc1/kernel/mutex.c

Beispiel: `usb_serial_get_by_index()` – serielle Schnittstelle reservieren
Datei `linux-3.7-rc1/drivers/usb/serial/usb-serial.c`, ab Zeile 62

```
struct usb_serial *usb_serial_get_by_index (unsigned index)
{
    struct usb_serial *serial;
    mutex_lock (&table_lock); ← exklusiven Zugriff auf Tabelle sichern
    serial = serial_table[index];
    if (serial)
    {
        mutex_lock (&serial->disc_mutex);
        if (serial->disconnected)
        {
            mutex_unlock (&serial->disc_mutex);
            serial = NULL;
        }
        else
            kref_get (&serial->kref);
    }
    mutex_unlock (&table_lock); ← exklusiven Zugriff auf Tabelle wieder freigeben
    return serial;
}
```

mutex_lock() – Ressource beanspruchen, notfalls warten
Datei linux-3.7-rc1/drivers/usb/serial/usb-serial.c, ab Zeile 62

```
void __sched mutex_lock (struct mutex *lock)
{
    might_sleep ();
    __mutex_fastpath_lock (&lock->count, __mutex_lock_slowpath);
    mutex_set_owner (lock);
}
```

Datei linux-3.7-rc1/arch/x86/include/asm/mutex_32.h, ab Zeile 24
Macro-Definition für __mutex_fastpath_lock (expandiert)

Assembler:

```
lock dec (lock->count)
jns 1
call __mutex_lock_slowpath
1:
```

Datei linux-3.7-rc1/kernel/mutex.c, ab Zeile 398

```
static __used noline void __sched
__mutex_lock_slowpath (atomic_t *lock_count)
{
    struct mutex *lock = container_of (lock_count, struct mutex, count);
    __mutex_lock_common (lock, TASK_UNINTERRUPTIBLE, 0,
                        NULL, _RET_IP_);
}
```

Datei linux-3.7-rc1/kernel/mutex.c, ab Zeile 132

```
static inline int __sched
__mutex_lock_common (struct mutex *lock, long state, unsigned int subclass,
                    struct lockdep_map *nest_lock, unsigned long ip)
{
    struct task_struct *task = current;
    struct mutex_waiter waiter;
    unsigned long flags;

    preempt_disable ();
    mutex_acquire_nest (&lock->dep_map, subclass, 0, nest_lock, ip);

    /* ... */

    spin_lock_mutex (&lock->wait_lock, flags);

    debug_mutex_lock_common (lock, &waiter);
    debug_mutex_add_waiter (lock, &waiter, task_thread_info (task));

    /* add waiting tasks to the end of the waitqueue (FIFO): */
    list_add_tail (&waiter.list, &lock->wait_list);
    waiter.task = task;

    if (atomic_xchg (&lock->count, -1) == 1)
        goto done;

    lock_contended (&lock->dep_map, ip);

    for (;;)
    {
        /*
         * Lets try to take the lock again – this is needed even if
         * we get here for the first time (shortly after failing to
         * acquire the lock), to make sure that we get a wakeup once
         * it's unlocked. Later on, if we sleep, this is the
         * operation that gives us the lock. We xchg it to -1, so
         * that when we release the lock, we properly wake up the
         * other waiters:
         */
        if (atomic_xchg (&lock->count, -1) == 1)
            break;

        /*
         * got a signal? (This code gets eliminated in the
         * TASK_UNINTERRUPTIBLE case.)
         */
        if (unlikely (signal_pending_state (state, task)))
        {
            mutex_remove_waiter (lock, &waiter, task_thread_info (task));
            mutex_release (&lock->dep_map, 1, ip);
            spin_unlock_mutex (&lock->wait_lock, flags);

            debug_mutex_free_waiter (&waiter);
            preempt_enable ();
            return -EINTR;
        }
        __set_task_state (task, state);

        /* didn't get the lock, go to sleep: */
        spin_unlock_mutex (&lock->wait_lock, flags);
        schedule_preempt_disabled ();
        spin_lock_mutex (&lock->wait_lock, flags);
    }

done:
    lock_acquired (&lock->dep_map, ip);
    /* got the lock – rejoice! */
    mutex_remove_waiter (lock, &waiter, current_thread_info ());
    mutex_set_owner (lock);

    /* set it to 0 if there are no waiters left: */
    if (likely (list_empty (&lock->wait_list)))
        atomic_set (&lock->count, 0);

    spin_unlock_mutex (&lock->wait_lock, flags);

    debug_mutex_free_waiter (&waiter);
    preempt_enable ();

    return 0;
}
```

← exklusiven Zugriff auf Mutex sichern

← exklusiven Zugriff auf Mutex wieder freigeben

spin_lock_mutex() – Mutex beanspruchen, notfalls *busy waiting*
Datei linux-3.7-rc1/kernel/mutex.h, ab Zeile 12

```
#define spin_lock_mutex(lock, flags) \
do \
{ \
    spin_lock (lock); \
    (void) (flags); \
} \
while (0)
```

Datei linux-3.7-rc1/kernel/spinlock.h, ab Zeile 283

```
static inline void spin_lock (spinlock_t *lock)
{
    raw_spin_lock (&lock->rlock);
}
```

Datei linux-3.7-rc1/kernel/spinlock.h, Zeile 170

```
#define raw_spin_lock(lock) _raw_spin_lock (lock)
```

Datei linux-3.7-rc1/include/linux/spinlock_api_smp.h, Zeile 47

```
#define _raw_spin_lock(lock) __raw_spin_lock (lock)
```

Datei linux-3.7-rc1/kernel/spinlock.c, ab Zeile 46 (expandiert):

```
void __lockfunc __raw_spin_lock (spinlock_t *lock)
{
    for (;;)
    {
        preempt_disable ();
        if (likely (do_raw_spin_trylock (lock)))
            break;
        preempt_enable ();

        if (!(lock)->break_lock)
            (lock)->break_lock = 1;
        while (lraw_spin_can_lock (lock) && (lock)->break_lock)
            arch_spin_relax (&lock->raw_lock);
    }
    (lock)->break_lock = 0;
}
```

Datei linux-3.7-rc1/include/linux/spinlock.h, ab Zeile 150:

```
static inline int do_raw_spin_trylock (raw_spinlock_t *lock)
{
    return arch_spin_trylock (&(lock)->raw_lock);
}
```

Datei arch/x86/include/asm/spinlock.h, ab Zeile 116:

```
static __always_inline int arch_spin_trylock (arch_spinlock_t *lock)
{
    return __ticket_spin_trylock (lock);
}
```

Datei arch/x86/include/asm/spinlock.h, ab Zeile 65:

```
static __always_inline int __ticket_spin_trylock (arch_spinlock_t *lock)
{
    arch_spinlock_t old, new;

    old.tickets = ACCESS_ONCE (lock->tickets);
    if (old.tickets.head != old.tickets.tail)
        return 0;

    new.head_tail = old.head_tail + (1 << TICKET_SHIFT);

    /* cmpxchg is a full barrier, so nothing can move before it */
    return cmpxchg (&lock->head_tail, old.head_tail, new.head_tail) == old.head_tail;
}
```

Datei arch/x86/include/asm/cmpxchg.h, ab Zeile 147:

```
#define cmpxchg(ptr, old, new) \
__cmpxchg (ptr, old, new, sizeof (*(ptr)))
```

Datei arch/x86/include/asm/cmpxchg.h, ab Zeile 131:

```
#define __cmpxchg(ptr, old, new, size) \
__raw_cmpxchg ((ptr), (old), (new), (size), LOCK_PREFIX)
```

Datei arch/x86/include/asm/cmpxchg.h, ab Zeile 110:

```
asm volatile (lock "cmpxchgl_ %2,%1" \
: "=a" (__ret), "+m" (*__ptr) \
: "r" (__new), "0" (__old) \
: "memory");
```

atomarer und exklusiver
Zugriff auf Spinlock
durch Hardware-Unterstützung

4 Echtzeit

4.4 Ressourcen

Ressourcen reservieren

- *Semaphor*
gemeinsame Variable mehrerer Prozesse
zur Regelung des Zugriffs auf eine Ressource
Ressource belegt → Kontextwechsel
- *Mutex*
Mechanismus, damit immer nur ein Prozeß gleichzeitig
auf eine Ressource zugreifen kann
- *Spinlock (busy waiting)*
leichtgewichtige Alternative zu Kontextwechsel
- *Kritischer Abschnitt – critical section*
Programmabschnitt zwischen Reservierung
und Freigabe einer Ressource
→ sollte immer so kurz wie möglich sein

4 Echtzeit

4.4 Ressourcen

Verklemmungen: Gegenseitiges Blockieren von Ressourcen

- *Deadlock*: Prozeß wartet
- *Livelock*: Prozeß macht andere Dinge
(z. B. *busy waiting*)

4 Echtzeit

4.4 Ressourcen

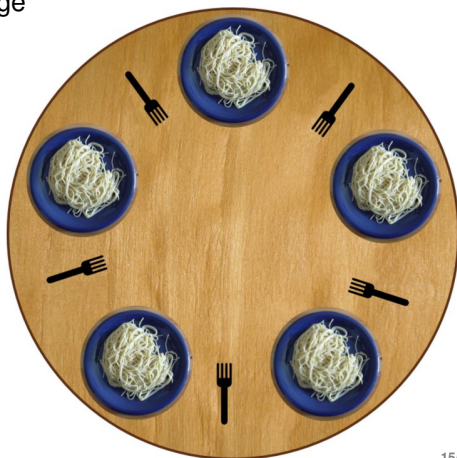
Verklemmungen: Gegenseitiges Blockieren von Ressourcen

- **Deadlock:** Prozeß wartet
- **Livelock:** Prozeß macht andere Dinge
(z. B. *busy waiting*)

Beispiel: Philosophenproblem

- 5 Philosophen, 5 Gabeln
- 2 Gabeln zum Essen notwendig
- Wer essen will, nimmt eine Gabel und wartet notfalls auf die zweite.
- Keiner legt eine einzelne Gabel wieder zurück.

Jeder hält 1 Gabel → **Verklemmung**



4 Echtzeit

4.4 Ressourcen

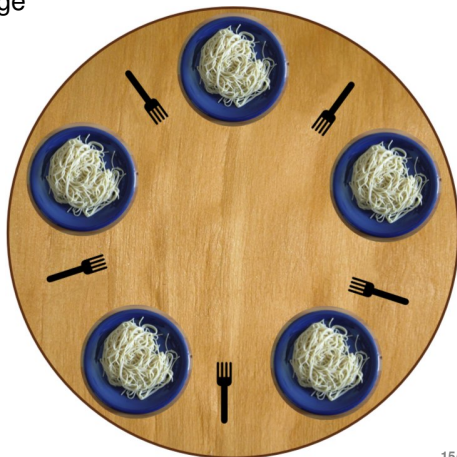
Verklemmungen: Gegenseitiges Blockieren von Ressourcen

- **Deadlock:** Prozeß wartet
- **Livelock:** Prozeß macht andere Dinge
(z. B. *busy waiting*)

Beispiel: Philosophenproblem

- 5 Philosophen, 5 Gabeln
- 2 Gabeln zum Essen notwendig
- Wer essen will, nimmt eine Gabel und wartet notfalls auf die zweite.
- Keiner legt eine einzelne Gabel wieder zurück.

Jeder hält 1 Gabel → **Verklemmung**
schweigen → **Deadlock**
philosophieren weiter → **Livelock**



4 Echtzeit

4.4 Ressourcen

Verklemmungen: Gegenseitiges Blockieren von Ressourcen

- *Deadlock*: Prozeß wartet
- *Livelock*: Prozeß macht andere Dinge
(z. B. *busy waiting*)

Beispiel: Philosophenproblem

Bedingungen für Verklemmungen:

- Exklusivität
- *hold and wait*
- Entzug nicht möglich
- zirkuläre Blockade

4 Echtzeit

4.4 Ressourcen

Verklemmungen: Gegenseitiges Blockieren von Ressourcen

- *Deadlock*: Prozeß wartet
- *Livelock*: Prozeß macht andere Dinge
(z. B. *busy waiting*)

Beispiel: Philosophenproblem

Bedingungen für Verklemmungen:

- | | |
|------------------------|---|
| • Exklusivität | → Spooling |
| • <i>hold and wait</i> | → simultane Zuteilung |
| • Entzug nicht möglich | → Prozesse suspendieren, beenden, <i>Rollback</i> |
| • zirkuläre Blockade | → Reihenfolge abhängig von Ressourcen |

4 Echtzeit

4.5 Prioritäten

Linux 0.01

- Timer-Interrupt: Zähler des aktuellen Prozesses wird dekrementiert; Prozeß mit höchstem Zähler bekommt Rechenzeit.
- Wenn es keinen laufbereiten Prozeß mit positivem Zähler gibt, bekommen alle Prozesse gemäß ihrer *Priorität* neue Zähler zugewiesen.
- *keine* harte Echtzeit

→ *dynamische Prioritätenvergabe*:
Rechenzeit hängt vom Verhalten des Prozesses ab

Echtzeitbetriebssysteme

- Prozesse können einen festen Anteil an Rechenzeit bekommen.
- Bei Ereignissen können Prozesse hoher Priorität Prozesse niedriger Priorität unterbrechen, aber nicht umgekehrt.

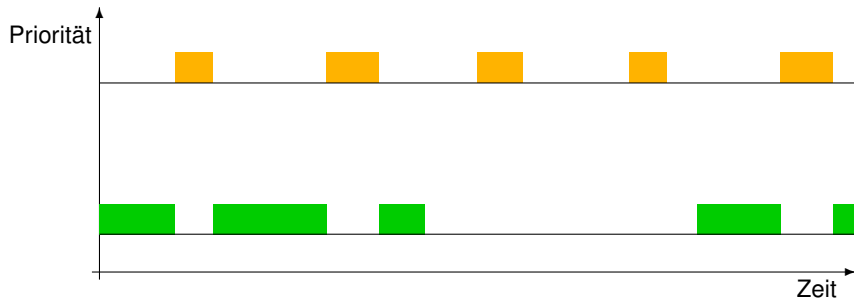
→ *statische Prioritätenvergabe*

4 Echtzeit

4.5 Prioritäten

Echtzeitbetriebssysteme

- Prozesse können einen festen Anteil an Rechenzeit bekommen.
- Bei Ereignissen können Prozesse hoher Priorität Prozesse niedriger Priorität unterbrechen, aber nicht umgekehrt.

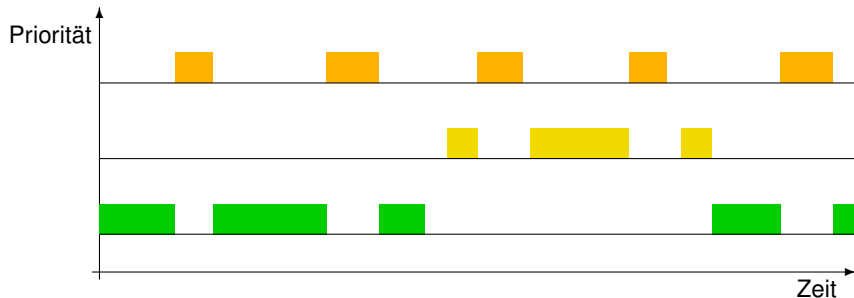


4 Echtzeit

4.5 Prioritäten

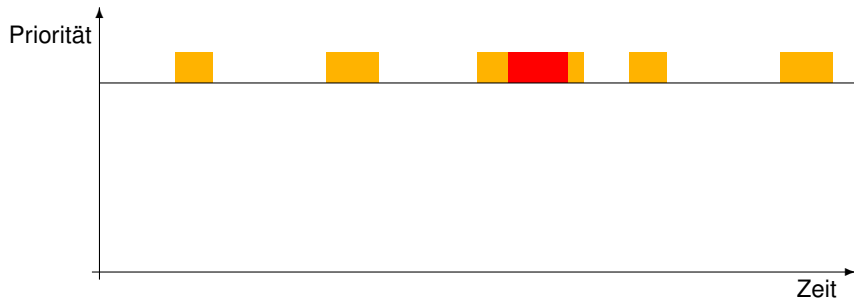
Echtzeitbetriebssysteme

- Prozesse können einen festen Anteil an Rechenzeit bekommen.
- Bei Ereignissen können Prozesse hoher Priorität Prozesse niedriger Priorität unterbrechen, aber nicht umgekehrt.



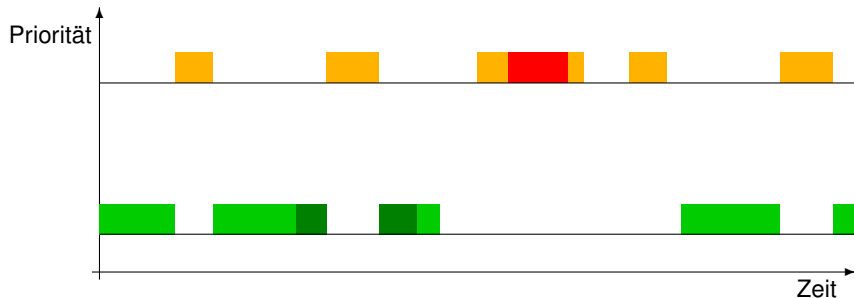
4 Echtzeit

4.5 Prioritäten und Ressourcen



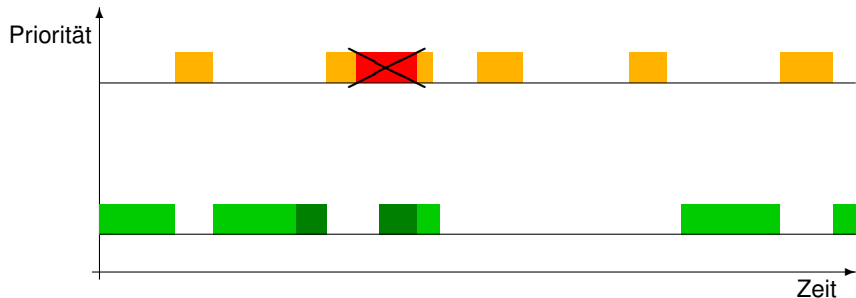
4 Echtzeit

4.5 Prioritäten und Ressourcen



4 Echtzeit

4.5 Prioritäten und Ressourcen



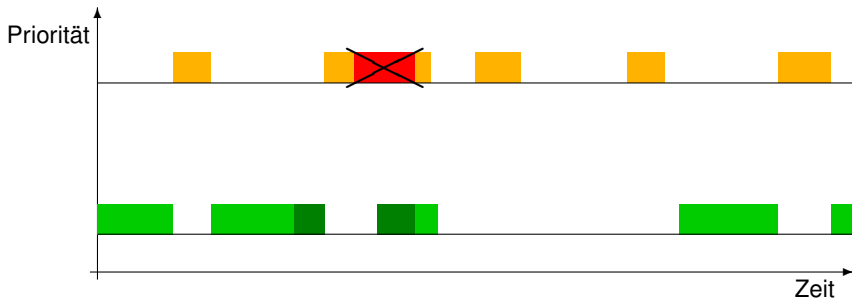
4 Echtzeit

4.5 Prioritäten und Ressourcen

Der höher priorisierte Prozeß bewirkt selbst, daß er eine Ressource verspätet bekommt.

→ *begrenzte Prioritätsinversion*

maximale Verzögerung: Länge des kritischen Bereichs



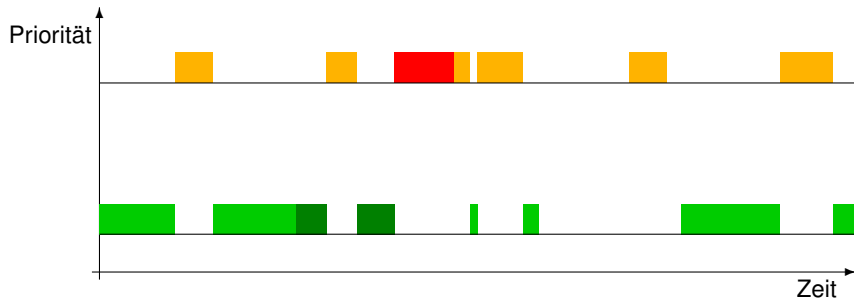
4 Echtzeit

4.5 Prioritäten und Ressourcen

Der höher priorisierte Prozeß bewirkt selbst, daß er eine Ressource verspätet bekommt.

→ *begrenzte Prioritätsinversion*

maximale Verzögerung: Länge des kritischen Bereichs



4 Echtzeit

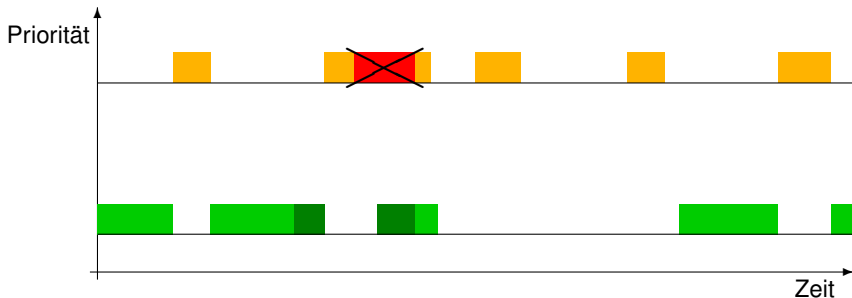
4.5 Prioritäten und Ressourcen

unbegrenzte Prioritätsinversion

4 Echtzeit

4.5 Prioritäten und Ressourcen

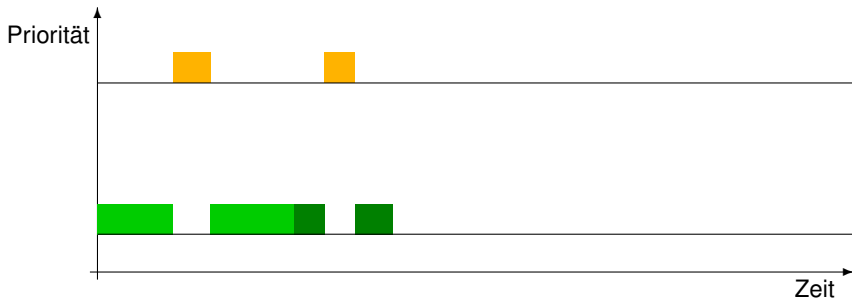
unbegrenzte Prioritätsinversion



4 Echtzeit

4.5 Prioritäten und Ressourcen

unbegrenzte Prioritätsinversion

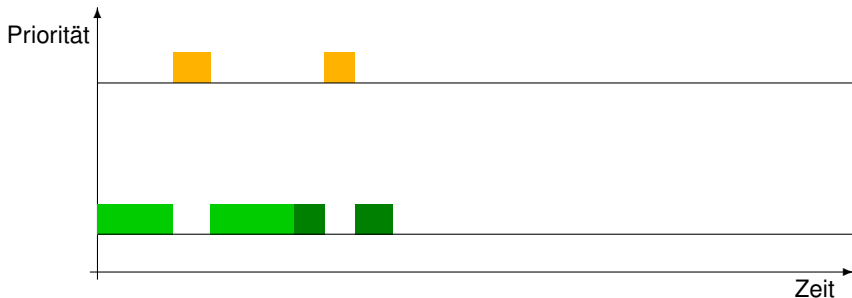


4 Echtzeit

4.5 Prioritäten und Ressourcen

Ein Prozeß mit mittlerer Priorität bewirkt, daß ein Prozeß mit hoher Priorität eine Ressource überhaupt nicht bekommt.

→ *unbegrenzte Prioritätsinversion*

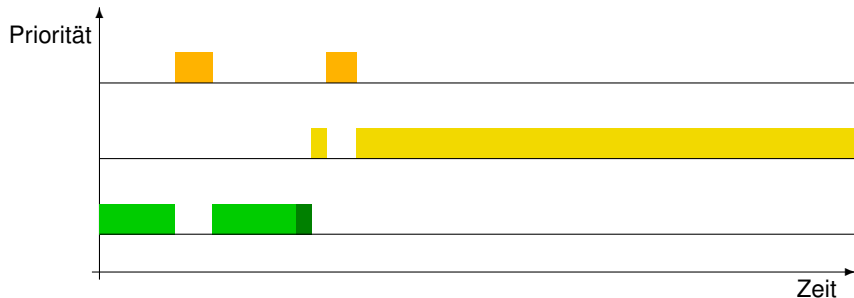


4 Echtzeit

4.5 Prioritäten und Ressourcen

Ein Prozeß mit mittlerer Priorität bewirkt, daß ein Prozeß mit hoher Priorität eine Ressource überhaupt nicht bekommt.

→ *unbegrenzte Prioritätsinversion*



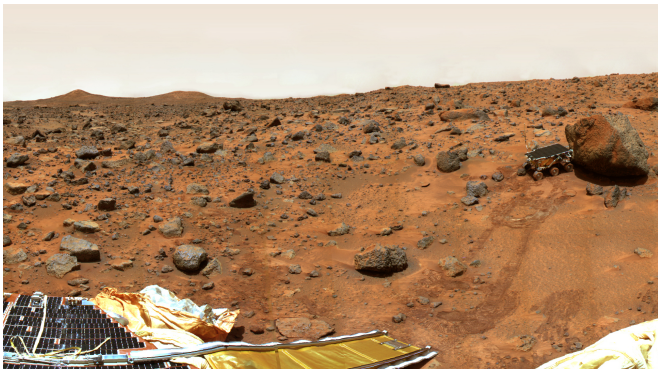
4 Echtzeit

4.5 Prioritäten und Ressourcen

Ein Prozeß mit mittlerer Priorität bewirkt, daß ein Prozeß mit hoher Priorität eine Ressource überhaupt nicht bekommt.

—→ *unbegrenzte Prioritätsinversion*

Beispiel: Beinahe-Verlust der Marssonde *Pathfinder* im Juli 1997



4 Echtzeit

4.5 Prioritäten und Ressourcen

Ein Prozeß mit mittlerer Priorität bewirkt, daß ein Prozeß mit hoher Priorität eine Ressource überhaupt nicht bekommt.

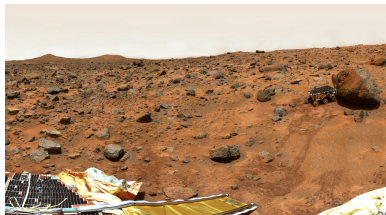
—→ *unbegrenzte Prioritätsinversion*

Beispiel: Beinahe-Verlust der Marssonde *Pathfinder* im Juli 1997

Gegenmaßnahmen

- *Priority Inheritance – Prioritätsvererbung*
Der Besitzer des Mutex erbt die Priorität des Prozesses, der auf den Mutex wartet.

http://research.microsoft.com/en-us/um/people/mbj/Mars_Pathfinder/



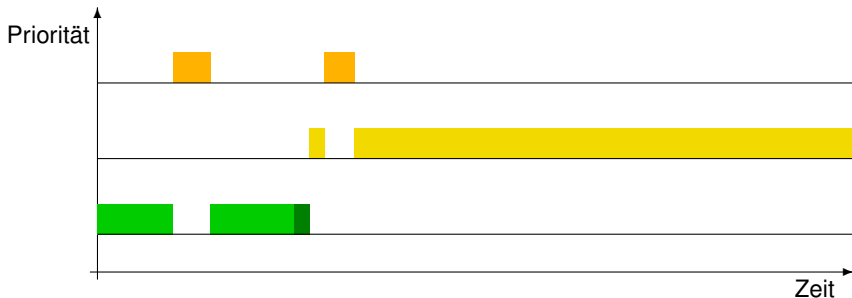
4 Echtzeit

4.5 Prioritäten und Ressourcen

Ein Prozeß mit mittlerer Priorität bewirkt, daß ein Prozeß mit hoher Priorität eine Ressource überhaupt nicht bekommt.

→ *unbegrenzte Prioritätsinversion*

Gegenmaßnahme: *Priority Inheritance – Prioritätsvererbung*



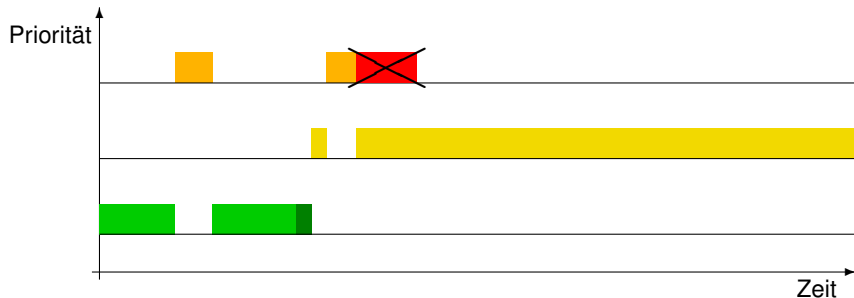
4 Echtzeit

4.5 Prioritäten und Ressourcen

Ein Prozeß mit mittlerer Priorität bewirkt, daß ein Prozeß mit hoher Priorität eine Ressource überhaupt nicht bekommt.

→ *unbegrenzte Prioritätsinversion*

Gegenmaßnahme: *Priority Inheritance – Prioritätsvererbung*



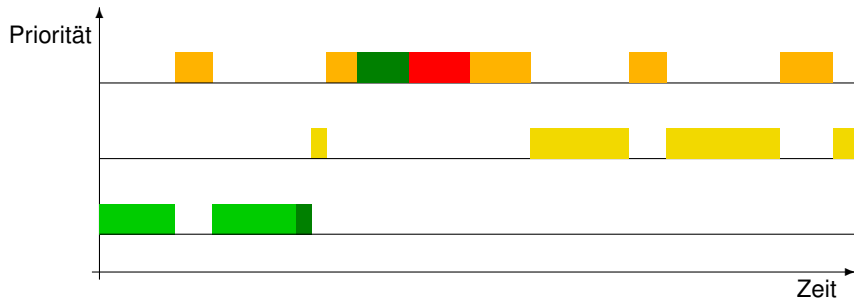
4 Echtzeit

4.5 Prioritäten und Ressourcen

Ein Prozeß mit mittlerer Priorität bewirkt, daß ein Prozeß mit hoher Priorität eine Ressource überhaupt nicht bekommt.

→ *unbegrenzte Prioritätsinversion*

Gegenmaßnahme: *Priority Inheritance – Prioritätsvererbung*



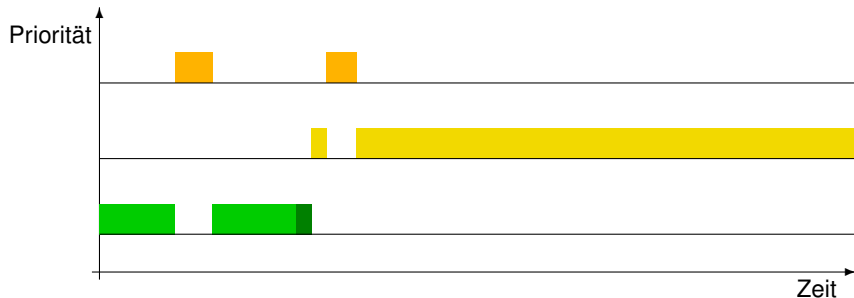
4 Echtzeit

4.5 Prioritäten und Ressourcen

Ein Prozeß mit mittlerer Priorität bewirkt, daß ein Prozeß mit hoher Priorität eine Ressource überhaupt nicht bekommt.

→ *unbegrenzte Prioritätsinversion*

Gegenmaßnahme: *Priority Ceiling – Prioritätsobergrenze*



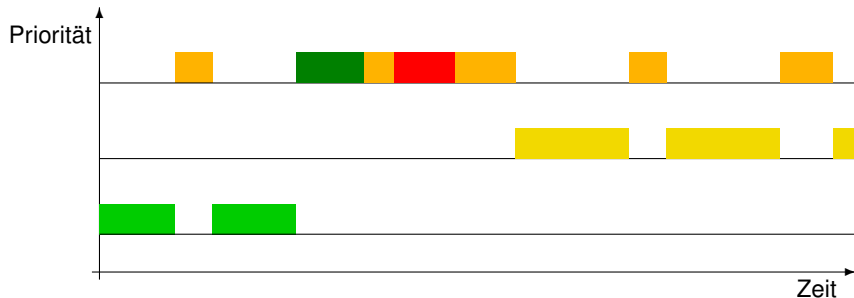
4 Echtzeit

4.5 Prioritäten und Ressourcen

Ein Prozeß mit mittlerer Priorität bewirkt, daß ein Prozeß mit hoher Priorität eine Ressource überhaupt nicht bekommt.

→ *unbegrenzte Prioritätsinversion*

Gegenmaßnahme: *Priority Ceiling – Prioritätsobergrenze*



4 Echtzeit

4.5 Prioritäten und Ressourcen

Ein Prozeß mit mittlerer Priorität bewirkt, daß ein Prozeß mit hoher Priorität eine Ressource überhaupt nicht bekommt.

—→ *unbegrenzte Prioritätsinversion*

Beispiel: Beinahe-Verlust der Marssonde *Pathfinder* im Juli 1997

Gegenmaßnahmen

- *Priority Inheritance – Prioritätsvererbung*
Der Besitzer des Mutex erbt die Priorität des Prozesses, der auf den Mutex wartet.
- *Priority Ceiling – Prioritätsobergrenze*
Der Besitzer des Mutex bekommt sofort die Priorität des höchstmöglichen Prozesses, der evtl. den Mutex benötigen könnte.

4 Echtzeit

4.5 Prioritäten und Ressourcen

Ein Prozeß mit mittlerer Priorität bewirkt, daß ein Prozeß mit hoher Priorität eine Ressource überhaupt nicht bekommt.

—→ *unbegrenzte Prioritätsinversion*

Beispiel: Beinahe-Verlust der Marssonde *Pathfinder* im Juli 1997

Gegenmaßnahmen

- *Priority Inheritance – Prioritätsvererbung*
Der Besitzer des Mutex erbt die Priorität des Prozesses, der auf den Mutex wartet.
 - *Priority Ceiling – Prioritätsobergrenze*
Der Besitzer des Mutex bekommt sofort die Priorität des höchstmöglichen Prozesses, der evtl. den Mutex benötigen könnte.
- } nur möglich, wenn
Mutexe im Spiel sind

4 Echtzeit

4.5 Prioritäten und Ressourcen

Ein Prozeß mit mittlerer Priorität bewirkt, daß ein Prozeß mit hoher Priorität eine Ressource überhaupt nicht bekommt.

—→ *unbegrenzte Prioritätsinversion*

Beispiel: Beinahe-Verlust der Marssonde *Pathfinder* im Juli 1997

Gegenmaßnahmen

- *Priority Inheritance – Prioritätsvererbung*
Der Besitzer des Mutex erbt die Priorität des Prozesses, der auf den Mutex wartet.
 - *Priority Ceiling – Prioritätsobergrenze*
Der Besitzer des Mutex bekommt sofort die Priorität des höchstmöglichen Prozesses, der evtl. den Mutex benötigen könnte.
 - *Priority Aging*
Die Priorität wächst mit der Wartezeit.
- } nur möglich, wenn
Mutexe im Spiel sind