

Systemnahe Programmierung in C

31 Nebenläufige Fäden

J. Kleinöder, D. Lohmann, V. Sieh

Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Sommersemester 2024

<http://sys.cs.fau.de/lehre/ss24>



In Multiprozessor-Systemen sind echt-parallele Abläufe möglich

aber

Prozess-Erzeugung, Prozess-Terminierung und
Prozess-Umschaltungen sind teuer

Für die **Praxis** heißt das:

- nur selten Prozesse erzeugen/terminieren
- nicht mehr Prozesse erzeugen als echte Prozessoren vorhanden

oder

statt teuren Prozessen einfache **Fäden (Threads)** verwenden



Lösung: **mehrere** Aktivitätsträger (Fäden, Threads) in **einer** Ausführungsumgebung

- jeder **Faden (Thread)** repräsentiert einen eigenen aktiven Ablauf
 - eigener Programmzähler
 - eigener Registersatz
 - eigener Stack (für lokale Variablen)
- gemeinsame **Ausführungsumgebung** stellt Menge von Betriebsmitteln zur Verfügung
 - Speicherabbildung
 - Rechte
 - offene Dateien
 - Wurzel- und aktuelles Verzeichnis
 - ...



Fäden in einem Prozess (2)

- Das Konzept eines Prozesses wird aufgespalten in eine **Ausführungsumgebung** und ein oder mehrere **Aktivitätsträger**
- Ein klassischer UNIX-Prozess ist ein Aktivitätsträger in einer Ausführungsumgebung



Fäden in einem Prozess (3)

- Erzeugen/Terminieren eines Fadens in einem Prozess erheblich billiger als das Erzeugen/Terminieren eines Prozesses (keine eigenen Betriebsmittel)
- Umschalten zwischen Fäden innerhalb eines Prozesses erheblich billiger als das Umschalten zwischen Prozessen
 - es müssen nur die Register und der Programmzähler gewechselt werden (entspricht in etwa einem Funktionsaufruf)
 - Speicherabbildung muss nicht gewechselt werden (Cache-Inhalte bleiben gültig!)



- Fäden arbeiten nebenläufig/parallel und haben gemeinsamen Speicher
=> alle von Unterbrechungen und Signalen bekannten Probleme beim Zugriff auf gemeinsame Daten treten auch bei Fäden auf
 - Unterschied zwischen Fäden und Interrupt-Service-Routinen bzw. Signal-Handler-Funktionen:
 - „Haupt-Faden“ der Anwendung und eine ISR bzw. ein Signal-Handler sind nicht gleichberechtigt
 - ISR bzw. Signal-Handler unterbricht den Haupt-Faden aber ISR bzw. Signal-Handler werden nicht unterbrochen
 - zwei Fäden sind gleichberechtigt
 - ein Faden kann jederzeit zugunsten eines anderen unterbrochen werden (Scheduler) oder parallel zu einem anderen laufen (MPS)
- => Unterbrechungen sperren oder Signale blockieren hilft nicht!



■ Grundlegende Probleme

- gegenseitiger Ausschluss (**Koordinierung**)

Beispiel:

Ein Faden möchte einen Datensatz lesen und verhindern, dass ein anderer Faden ihn währenddessen verändert.

- gegenseitiges Warten (**Synchronisierung**)

Beispiel:

Ein Faden wartet auf andere Fäden, die jeweils Teilergebnisse berechnen sollen, die dann zusammengefasst werden.



- Komplexe Koordinierungs-/Synchronisierungsprobleme (Beispiel)

- **Bounded Buffer:**

Fäden schreiben Daten in Pufferspeicher, andere entnehmen Daten;
kritische Situationen:

- Zugriff auf den Puffer
- Puffer leer / voll

- **Element einfügen:**

- Warten, bis Platz im Puffer
- Warten, bis kein anderer Faden mehr den Puffer liest/schreibt
- Puffer beschreiben
- Signalisieren, dass neues Element im Puffer

- **Element herausnehmen:**

- Warten, bis Element im Puffer
- Warten, bis kein anderer Faden mehr den Puffer liest/schreibt
- Puffer auslesen
- Signalisieren, dass Platz im Puffer



Gegenseitiger Ausschluss (Mutual Exclusion)

- Einfache Implementierung durch **mutex**-Variablen

```
volatile int m = 0; /* 0: free; 1: locked */
volatile int counter = 0;
```

```
...          /* Thread 1 */
lock(&m);
counter++;
unlock(&m);
...
```

```
...          /* Thread 2 */
lock(&m);
printf("%d\n", counter);
counter = 0;
unlock(&m);
...
```

Nur der Faden, der `lock` aufgerufen hat, darf `unlock` aufrufen!

- Realisierung (nur konzeptionell!)

```
void lock(volatile int *m) {
    while (*m == 1) {
        /* Wait... */
    }
    *m = 1;
}
```

```
void unlock(volatile int *m) {
    *m = 0;
}
```

`lock` (und ggf. `unlock`) müssen **atomar** ausgeführt werden!



Zählende Semaphore

- Ein **Semaphor** (griech. Zeichenträger) ist eine Datenstruktur mit zwei Operationen (nach *Dijkstra*):
 - P-Operation (*proberen; passeren; wait; down*)

```
void P(volatile int *s) {  
    while (*s <= 0) {  
        /* Wait/sleep... */  
    }  
    *s -= 1;  
}
```

- V-Operation (*verhogen; vrijgeven; signal; up*)

```
void V(volatile int *s) {  
    *s += 1;  
    /* Wakeup... */  
}
```

P und V müssen **atomar** ausgeführt werden!

P und V müssen nicht vom selben Faden aufgerufen werden.



Bounded Buffer (2)

Bounded-Integer-Buffer-Beispiel:

```
#define N 1000
volatile int mutex = 0;
volatile int alloc = 0, free = N;
volatile int head = 0, tail = 0;
volatile int buf[N];
```

Element einfügen:

```
void put(int x) {
    P(&free);
    lock(&mutex);
    buf[head] = x;
    head = (head + 1) % N;
    unlock(&mutex);
    V(&alloc);
}
```

Element herausnehmen:

```
int get(void) {
    int x;
    P(&alloc);
    lock(&mutex);
    x = buf[tail];
    tail = (tail + 1) % N;
    unlock(&mutex);
    V(&free);
    return x;
}
```



■ Spin Lock

- aktives Warten, bis Mutex-Variable frei ($= 0$) wird
- entspricht konzeptionell einem Pollen
- Faden bleibt im Zustand „laufend“

Problem: wenn nur ein Prozessor verfügbar ist, wird Rechenzeit vergeudet, bis durch den Scheduler eine Umschaltung erfolgt

- nur ein anderer, laufender Faden kann den Mutex freigeben

■ Sleeping Lock

- passives Warten
- Faden geht in den Zustand „blockiert“
- im Rahmen von `unlock` wird der blockierte Faden in den Zustand „bereit“ zurückgeführt

Problem: bei sehr kurzen kritischen Abschnitten ist der Aufwand für das Blockieren/Aufwecken und die Umschaltung unverhältnismäßig teuer



Implementierung Spin Lock

- zentrales Problem: Atomarität von mutex-Abfrage und -Setzen

```
void lock(volatile int *m) {
```

```
    while (*m == 1) {  
        /* Wait... */  
    }  
    *m = 1;
```

kritischer Abschnitt

```
}
```

- Lösung: spezielle Maschinenbefehle, die atomar eine Abfrage und eine Modifikation einer Hauptspeicherzelle ermöglichen
 - *Test-and-Set, Compare-and-Swap, Load-Link/Store-Conditional, ...*



Implementierung Sleeping Lock

- zwei Probleme:

1. Konflikt mit einer zweiten lock-Operation:
Atomarität von mutex-Abfrage und -Setzen

```
void lock(volatile int *m) {  
    while (*m == 1) {  
        sleep();  
    }  
    *m = 1;  
}
```

kritischer Abschnitt 1

2. Konflikt mit einem unlock: *lost-wakeup*-Problem

```
void lock(volatile int *m) {  
    while (*m == 1) {  
        sleep();  
    }  
    *m = 1;  
}
```

kritischer Abschnitt 2

- Ursachen:

1. Prozessumschaltung während der lock-Operation
2. Echt-parallel laufende lock- und/oder unlock-Operationen



Implementierung Sleeping Lock (2)

- Behebung von Ursache (1):
Prozessumschaltungen verhindern
 - Prozessumschaltung ist eine Funktion des BS-Kerns
 - erfolgt im Rahmen eines BS-Aufrufs (z.B. `exit`)
 - oder im Rahmen einer Unterbrechungs-Behandlung (z.B. Zeitscheiben-Unterbrechung)
- => `lock/unlock` werden ebenfalls im BS-Kern implementiert; BS-Kern mit Unterbrechungs-Sperre

```
void lock(volatile int *m)
{
    enter_OS();
    cli();
    while (*m == 1) {
        block_thread_and_schedule();
    }
    *m = 1;
    sei();
    leave_OS();
}
```

```
void unlock(volatile int *m)
{
    enter_OS();
    cli();
    *m = 0;
    wakeup_waiting_threads();
    sei();
    leave_OS();
}
```



Implementierung Sleeping Lock (3)

- Behebung von Ursache (2):
Parallele Ausführung auf anderem Prozessor verhindern

```
void lock(volatile int *m)
{
    enter_OS();
    cli();
    spin_lock();
    while (*m == 1) {
        block_thread_and_schedule();
    }
    *m = 1;
    spin_unlock();
    sei();
    leave_OS();
}
```

```
void unlock(volatile int *m)
{
    enter_OS();
    cli();
    spin_lock();
    *m = 0;
    wakeup_waiting_threads();
    spin_unlock();
    sei();
    leave_OS();
}
```

- P() und V() ähnlich

