

Übungen zu Systemprogrammierung 2 (SP2)

Ü3 – UNIX-Signale

Christian Eichler, Jürgen Kleinöder

Lehrstuhl für Informatik 4
Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

WS 2017 – 27. November bis 01. Dezember 2017

http://www4.cs.fau.de/Lehre/WS17/V_SP2

Agenda

- 3.1 Nebenläufigkeit durch Signale
- 3.2 Nebenläufiger Zugriff auf Variablen
- 3.3 Passives Warten auf ein Signal
- 3.4 Mehr Details zu UNIX-Signalen
- 3.5 Umleiten von Dateien
- 3.6 Gelerntes anwenden

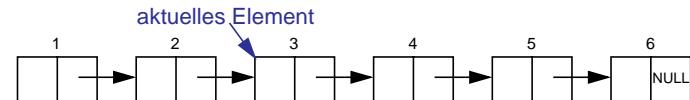


Agenda

- 3.1 Nebenläufigkeit durch Signale
- 3.2 Nebenläufiger Zugriff auf Variablen
- 3.3 Passives Warten auf ein Signal
- 3.4 Mehr Details zu UNIX-Signalen
- 3.5 Umleiten von Dateien
- 3.6 Gelerntes anwenden

Nebenläufigkeit durch Signale

- Signale erzeugen Nebenläufigkeit innerhalb des Prozesses (vgl. Nebenläufigkeit durch Interrupts, Vorlesung B | V.3, Seite 24 ff.)
- Während der Ausführung eines Programms können Teile seines Zustands vorübergehend inkonsistent sein
- Unterbrechung durch eine Signalbehandlungsfunktion ist problematisch, falls diese auf den selben Zustand zugreift
- Beispiel:
 - Programm durchläuft gerade eine verkettete Liste



- Prozess erhält Signal; Signalbehandlung entfernt Elemente 3 und 4 aus der Liste und gibt den Speicher dieser Elemente frei



Grundsätzliche Fragestellung

Nebenläufigkeit durch Signale

? Welche Art von Nebenläufigkeit liegt vor?

- Symmetrische, gleichberechtigte Kontrollflüsse
- Asymmetrische, nicht-gleichberechtigte Kontrollflüsse

? Welche Art von Synchronisation sollte verwendet werden?

(→ Vorlesung C | X-1, Seite 22 ff.)

- Mehrseitige Synchronisation
- Einseitige Synchronisation

Grundsätzliche Fragestellung

Nebenläufigkeit durch Signale

? Welche Art von Nebenläufigkeit liegt vor?

- Symmetrische, gleichberechtigte Kontrollflüsse
- Asymmetrische, nicht-gleichberechtigte Kontrollflüsse:

1. Hauptprogramm (jederzeit unterbrechbar)
2. Signalbehandlung (nicht unterbrechbar, *Run-to-Completion-Semantik*)

? Welche Art von Synchronisation sollte verwendet werden?

(→ Vorlesung C | X-1, Seite 22 ff.)

- Mehrseitige Synchronisation
- Einseitige Synchronisation:
 - Signal während der Ausführung des kritischen Abschnitts blockieren
 - Nur kritische Signale blockieren
 - Kritische Abschnitte so kurz wie möglich halten (Risiko: Verlust von Signalen)

Signale blockieren

Nebenläufigkeit durch Signale

- Die prozessweite Signalmaske enthält die aktuell blockierten Signale
 - Diese werden erst behandelt, sobald sie wieder deblockiert wurden
- Ändern der Maske mittels `sigprocmask(2)`:
`int sigprocmask(int how, const sigset_t *set, sigset_t *oldset);`
 - `how`: Verknüpfungsmodus
 - `SIG_BLOCK`: setzt Vereinigungsmenge aus alter Maske und `set`
 - `SIG_UNBLOCK`: setzt Schnittmenge aus alter Maske und invertiertem `set`
 - `SIG_SETMASK`: setzt `set` als neue prozessweite Maske
 - `oldset`: bisherige prozessweite Signalmaske (Ausgabeparameter); bei Desinteresse `NULL` übergeben
- **Beispiel:** Blockieren von `SIGUSR1` zusätzlich zu bereits blockierten Signalen

```
sigset_t set;
sigemptyset(&set);
sigaddset(&set, SIGUSR1);
sigprocmask(SIG_BLOCK, &set, NULL);
```

3–5

Vorsicht bei Bibliotheksfunktionen!

Nebenläufigkeit

- Während der Ausführung einer Bibliotheksfunktion kann der dazugehörige interne Zustand inkonsistent sein
 - Beispiel `halde`:
 - Suche nach passendem freiem Block in der Freispeicherliste; anschließend Entfernen des gefundenen Blocks aus der Liste
 - Falls `malloc()` zwischen diesen beiden Schritten unterbrochen wird und die Signalbehandlungsfunktion ebenfalls `malloc()` aufruft, wird u. U. derselbe Block zweifach vergeben!
- Greift man im Rahmen der Signalbehandlung auf denselben Zustand zu, müssen geeignete Maßnahmen ergriffen werden:
 - Signal während Ausführung der betreffenden Funktionen im Hauptprogramm blockieren
- **Vorsicht:** Auf den selben Zustand können u. U. auch verschiedene Funktionen zugreifen, z. B. `malloc()` und `free()`
- Funktionen, die in SUSv4 als *async-signal-safe* gekennzeichnet sind, müssen **nicht** geschützt werden

3–6

Weitere Fallstricke

Nebenläufigkeit durch Signale

- Die meisten Bibliotheksfunktionen teilen sich als gemeinsamen Zustand die **errno**-Variable
 - Änderungen der **errno** im Signal-Handler können die Fehlerbehandlung im Hauptprogramm durcheinander bringen
 - **Lösung:** Kontext-Sicherung
 - Beim Betreten der Signalhandler-Funktion die **errno** sichern und vor dem Verlassen wiederherstellen
- Ein-/Ausgabeoperationen auf **FILE*** schützen möglicherweise den Stream mit Hilfe eines Locks vor mehrfändigem Zugriff
 - Deadlock, falls eine E/A-Operation unterbrochen wird und im Signal-Handler auf den selben **FILE*** zugegriffen wird
 - **Lösung:** keine Ein-/Ausgabe mit **FILE*** in Signal-Handlern betreiben

Agenda

- 3.1 Nebenläufigkeit durch Signale
- 3.2 Nebenläufiger Zugriff auf Variablen
- 3.3 Passives Warten auf ein Signal
- 3.4 Mehr Details zu UNIX-Signalen
- 3.5 Umleiten von Dateien
- 3.6 Gelerntes anwenden



Nebenläufiger Zugriff auf Variablen

```
static int event = 0;  
  
static void sigHandler() {  
    event = 1;  
}  
  
void waitForEvent(void) {  
    while (event == 0);  
}
```

- Testen des Programms ohne (-O0) und mit (-O3) Compiler-Optimierungen
- Welches Verhalten lässt sich beobachten?

Nebenläufiger Zugriff auf Variablen

```
static int event = 0;  
  
static void sigHandler() {  
    event = 1;  
}  
  
void waitForEvent(void) {  
    while (event == 0);  
}
```

```
; Ohne Optimierungen  
waitForEvent:  
    nop  
.L3:  
    movl event, %eax  
    testl %eax, %eax  
    je .L3  
    ret
```

```
; Mit Optimierungen  
waitForEvent:  
    movl event, %eax  
    testl %eax, %eax  
    jne .L2  
.L5:  
    jmp .L5  
.L2:  
    rep  
    ret
```

Nebenläufiger Zugriff auf Variablen

- `event` wird nebenläufig verändert
- Der Compiler hat hiervon keine Kenntnis:
 - Innerhalb der Schleife wird `event` nicht verändert
 - Die Schleifenbedingung ist also beim erstmaligen Prüfen wahr oder falsch
 - Bedingung ändert sich aus Sicht des Compilers innerhalb der Schleife nicht
 - Endlosschleife, wenn Bedingung nicht von vornherein falsch
- Abhilfe: Schlüsselwort `volatile` zur Kennzeichnung von Variablen, die extern verändert werden
 - durch andere Kontrollflüsse
 - durch die Hardware (z. B. in den Adressraum eingeblendete Geräteregister)
- Zugriffe auf `volatile`-Variablen werden vom Compiler nicht optimiert

Nebenläufiger Zugriff auf Variablen

```
static volatile int event = 0;  
  
static void sigHandler() {  
    event = 1;  
}  
  
void waitForEvent(void) {  
    while (event == 0);  
}
```

- Deklaration als `volatile` erzwingt erneutes Laden von `event` in jedem Schleifendurchlauf
- **Randnotiz:** Semantik von `volatile` ist in C/C++ schwächer als in Java (keine Speicherbarriere)

Agenda

- 3.1 Nebenläufigkeit durch Signale
- 3.2 Nebenläufiger Zugriff auf Variablen
- 3.3 Passives Warten auf ein Signal
- 3.4 Mehr Details zu UNIX-Signalen
- 3.5 Umleiten von Dateien
- 3.6 Gelerntes anwenden

Passives Warten auf ein Signal

```
static volatile int event = 0;  
  
static void sigHandler() {  
    event = 1;  
}  
  
void waitForEvent(void) {  
  
    while (event == 0) {  
  
        SUSPEND(); // Schlafen, bis ein Signal eintrifft  
    }  
}
```

- Nebenläufigkeitsproblem?



Passives Warten auf ein Signal

```
static volatile int event = 0;  
  
static void sigHandler() {  
    event = 1;  
}  
  
void waitForEvent(void) {  
    BLOCK_SIGNAL();  
    while (event == 0) {  
        UNBLOCK_SIGNAL();  
        SUSPEND(); // Schlafen, bis ein Signal eintrifft  
        BLOCK_SIGNAL();  
    }  
    UNBLOCK_SIGNAL();  
}
```

- Nebenläufigkeitsproblem: Prüfen der Wartebedingung + Schlafenlegen ist ein kritischer Abschnitt!
- Nebenläufigkeitsproblem (*Lost Wakeup*) jetzt gelöst?

Passives Warten auf ein Signal

```
static volatile int event = 0;  
  
static void sigHandler() {  
    event = 1;  
}  
  
void waitForEvent(void) {  
    BLOCK_SIGNAL();  
    while (event == 0) {  
        UNBLOCK_SIGNAL();  
        SUSPEND(); // Schlafen, bis ein Signal eintrifft  
        BLOCK_SIGNAL();  
    }  
    UNBLOCK_SIGNAL();  
}
```

- Prüfen der Wartebedingung + Schlafenlegen ist ein kritischer Abschnitt!
- Deblockieren des Signals und Schlafenlegen müssen atomar erfolgen
- Betriebssystemschnittstelle muss entsprechende Operation anbieten

Passives Warten auf ein Signal

- Die Kombination der Pseudo-Operationen `UNBLOCK_SIGNAL()` + `SUSPEND()` + `BLOCK_SIGNAL()` lässt sich durch Aufruf von `sigsuspend()` realisieren
- Prototyp:
`int sigsuspend(const sigset_t *mask);`
 - `sigsuspend()` merkt sich die aktuelle prozessweite Signalmaske, setzt `mask` als neue Signalmaske und legt den Prozess schlafen
 - Ein Signal, das nicht in `mask` enthalten ist, führt zur Ausführung der vorher festgelegten Signalbehandlung
 - `sigsuspend()` stellt nach Ende der Signalbehandlung die ursprüngliche Signalmaske wieder her und kehrt zurück
- Es ist garantiert, dass das Setzen der Maske und das Schlafenlegen atomar erfolgen

Agenda

- 3.1 Nebenläufigkeit durch Signale
- 3.2 Nebenläufiger Zugriff auf Variablen
- 3.3 Passives Warten auf ein Signal
- 3.4 Mehr Details zu UNIX-Signalen
- 3.5 Umleiten von Dateien
- 3.6 Gelerntes anwenden

Signale und fork(2)/exec(2)

- Kindprozess erzeugen mit **fork(2)**:
 - Kindprozess erbt Signalbehandlung und Signalmaske vom Vaterprozess
- Anderes Programm laden mit **exec(2)**:
 - Signalmaske wird beibehalten
 - Signalbehandlung wird beibehalten, falls **SIG_DFL** oder **SIG_IGN**
 - Benutzerdefinierte Signalbehandlung wird auf **SIG_DFL** zurückgesetzt
(→ warum?)

Signale und fork(2)/exec(2)

- Kindprozess erzeugen mit **fork(2)**:
 - Kindprozess erbt Signalbehandlung und Signalmaske vom Vaterprozess
- Anderes Programm laden mit **exec(2)**:
 - Signalmaske wird beibehalten
 - Signalbehandlung wird beibehalten, falls **SIG_DFL** oder **SIG_IGN**
 - Benutzerdefinierte Signalbehandlung wird auf **SIG_DFL** zurückgesetzt
(→ nach dem Laden des neuen Programms existiert die alte
Signalbehandlungsfunktion nicht mehr)



Nachtrag zu `waitpid(2)`

```
pid_t waitpid(pid_t pid, int *status, int options);
```

- Kehrt optional auch zurück, wenn ein Kindprozess
 - ... gestoppt wird (Option `WUNTRACED`)
 - ... fortgesetzt wird (Option `WCONTINUED`)
- Auswertung von `status` mit Makros (`if`-Kaskade notwendig!):
 - `WIFEXITED(status)`: Kind hat sich normal beendet
 - Ermitteln des Exitstatus mit `WEXITSTATUS(status)`
 - `WIFSIGNALED(status)`: Kind wurde durch ein Signal terminiert
 - Ermitteln des Signals mit `WTERMSIG(status)`
 - `WIFSTOPPED(status)`: Kind wurde gestoppt
 - Ermitteln des Signals mit `WSTOPSIG(status)`
 - `WIFCONTINUED(status)`: gestopptes Kind wurde fortgesetzt

`waitpid()` und `SIGCHLD`

- Szenario: `waitpid()`-Aufruf sowohl im Hauptprogramm als auch im Signal-Handler für `SIGCHLD`
 - Welcher der beiden `waitpid()`-Aufrufe räumt den Zombie ab und erhält dessen Status?
 - Das Verhalten in diesem Fall ist betriebssystemspezifisch – es existiert keine portable Lösung!
 - Daher darf `waitpid()` nur im Signal-Handler aufgerufen werden
 - Das Warten auf Vordergrundprozesse muss mit Hilfe von `sigsuspend()` realisiert werden



sleep(3) und Signale

- Prototyp:

```
unsigned int sleep(unsigned int seconds);
```

- Legt den aufrufenden Prozess für **seconds** Sekunden schlafen
- Falls während des Schlafens ein Signal eintrifft, kehrt **sleep()** sofort zurück

- Rückgabewert:

- 0, falls volle Wartezeit absolviert
- Verbleibende Wartezeit, falls zwischendrin durch ein Signal unterbrochen

- Signale, die mit **sigprocmask()** blockiert sind, können **nicht** für ein vorzeitiges Aufwachen sorgen

Agenda

- 3.1 Nebenläufigkeit durch Signale
- 3.2 Nebenläufiger Zugriff auf Variablen
- 3.3 Passives Warten auf ein Signal
- 3.4 Mehr Details zu UNIX-Signalen
- 3.5 Umleiten von Dateien
- 3.6 Gelerntes anwenden

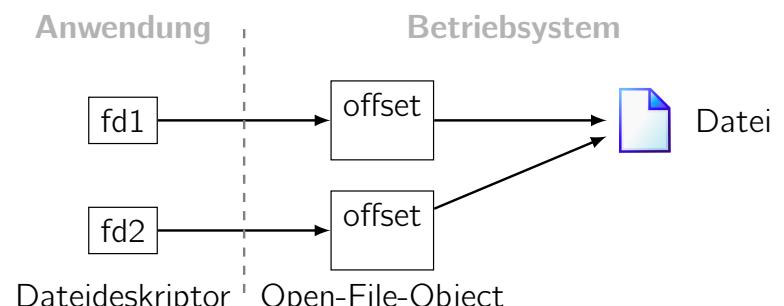


Umleiten von Dateien

- Ziel: geöffnete Datei soll als **stdout/stdin** verwendet werden
- **newfd = dup(fd)**: Dupliziert Dateideskriptor **fd**, d. h.
Lesen/Schreiben auf **newfd** ist wie Lesen/Schreiben auf **fd**
 - Die Nummer von **newfd** wird vom System gewählt
- **dup2(fd, newfd)**: Dupliziert Dateideskriptor **fd** in anderen Dateideskriptor (**newfd**); falls **newfd** schon geöffnet ist, wird **newfd** erst geschlossen
 - Die Nummer von **newfd** wird vom Benutzer vorgegeben
- Verwenden von **dup2()**, um **stdout** umzuleiten:

```
int fd = open("/dev/null", O_WRONLY);
dup2(fd, STDOUT_FILENO);
printf("Hallo\n"); // Wird nach /dev/null geschrieben
```
- Erinnerung: offene Dateideskriptoren werden bei **fork(2)** vererbt und bei **exec(2)** beibehalten

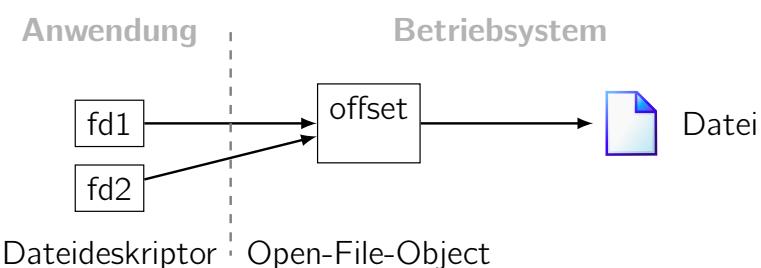
Dateideskriptoren: Erneutes Öffnen einer Datei



```
int fd1 = open("datei.txt", /*... */);
int fd2 = open("datei.txt", /*... */);
```

- Erzeugen eines neuen Open-File-Objects und eines neuen Dateideskriptors

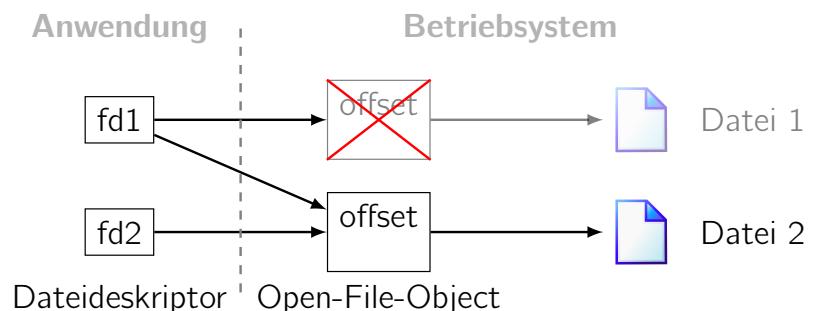
Dateideskriptoren: dup(2)



```
int fd1 = open(/*... */);
int fd2 = dup(fd1);
```

- Der Dateideskriptor wird dupliziert
- aber: die Datei wird **nicht neu geöffnet**

Dateideskriptoren: dup2(2)



```
int fd1 = open("datei1.txt", /*... */);
int fd2 = open("datei2.txt", /*... */);
// int dup2(int oldfd, int newfd);
dup2(fd2, fd1);
```

- Schließt newfd (falls zuvor geöffnet)
- Nutzt newfd als Wert für neuen Dateideskriptor

Agenda

- 3.1 Nebenläufigkeit durch Signale
- 3.2 Nebenläufiger Zugriff auf Variablen
- 3.3 Passives Warten auf ein Signal
- 3.4 Mehr Details zu UNIX-Signalen
- 3.5 Umleiten von Dateien
- 3.6 Gelerntes anwenden

Aktive Mitarbeit!

„Aufgabenstellung“

- Programm schreiben, das passiv auf **SIGUSR1** wartet

