

Übungen zu Systemprogrammierung 2

Ü3 – UNIX-Signale

Sommersemester 2018

Christian Eichler, Jürgen Kleinöder

Lehrstuhl für Informatik 4
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg



Lehrstuhl für Verteilte Systeme
und Betriebssysteme



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

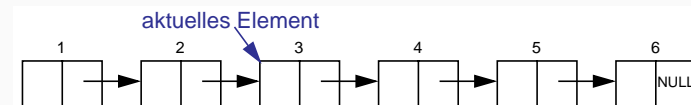
3.4 Mehr Details zu UNIX-Signalen

3.5 Umleiten von Dateien

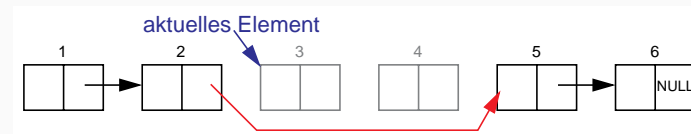
3.6 Gelerntes anwenden

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

? 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

? 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

- 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);
```

3-4

Vorsicht bei Bibliotheksfunktionen!

- 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

3-5

Weitere Fallstricke

- 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 mehrfädigem 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

3-6

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?

3-8

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
```

3-9

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 Gerätereister)
- Zugriffe auf `volatile`-Variablen werden vom Compiler nicht optimiert

3-10

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)

3-11

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
    }
    UNBLOCK_SIGNALS();
}
```

- 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?

3-13

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

3-13

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

3-14

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

3-17

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

3-18

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

3-19

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

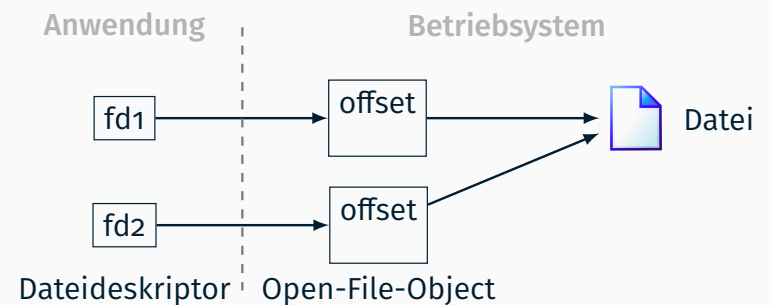
Umleiten von Dateien

- 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

3-21

Dateideskriptoren: Erneutes Öffnen einer Datei

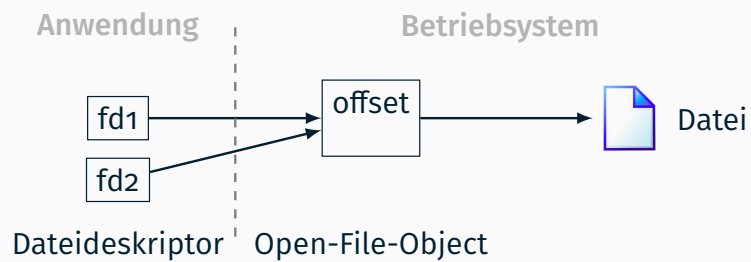


```
int fd1 = open("datei.txt", /* ... */);
int fd2 = open("datei.txt", /* ... */);
```

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

3-22

Dateideskriptoren: dup(2)

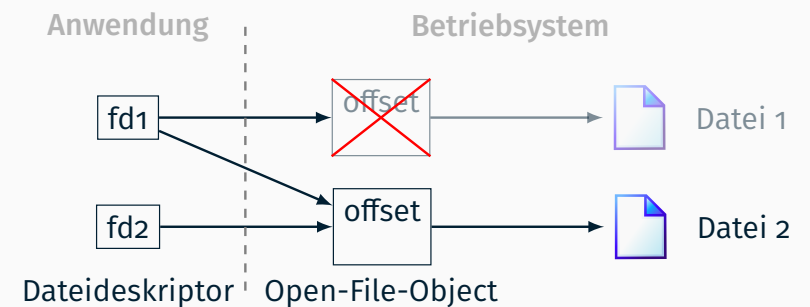


```
int fd1 = open(/* ... */);  
int fd2 = dup(fd1);
```

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

3-23

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

3-24

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