

Übungen zu Systemprogrammierung 2

Ü3 – UNIX-Signale

Wintersemester 2023/24

Luis Gerhorst, Jonas Rabenstein, Eva Dengler, Dustin Nguyen, Christian Eichler,
Jürgen Kleinöder

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



Lehrstuhl für Verteilte Systeme
und Betriebssysteme



FRIEDRICH-ALEXANDER
UNIVERSITÄT
ERLANGEN-NÜRNBERG

TECHNISCHE FAKULTÄT



- 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



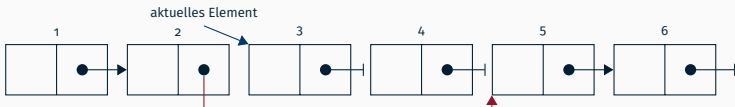
- 3.1 Nebenläufigkeit durch Signale
- 3.2 Nebenläufiger Zugriff auf Variablen
- 3.3 Passives Warten auf ein Signal
- 3.4 Mehr Details zu UNIX-Signalen
- 3.5 Umleiten von Dateien
- 3.6 Gelerntes anwenden

- Signale 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 denselben 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



? 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

? 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)

- 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);
```

- 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 → `signal-safety(7)`

- 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



3.1 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



```
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?



```
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

Lade Variable event

Prüfen auf 0

Sprung, falls gleich 0

Sprung, falls ungleich 0

; Mit Optimierungen

waitForEvent:

 movl event, %eax

 testl %eax, %eax

 jne .L2

.L5: ←

 jmp .L5

.L2: ←

 rep

 ret



- 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



```
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)



- 3.1 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



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

- Nebenläufigkeitsproblem?



```
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?



```
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



- 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



- 3.1 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



- Kindprozess erzeugen mit `fork(2)`:
 - Kindprozess erbt Signalbehandlung und Signalmaske vom Vaterprozess
- Anderes Programm laden mit `exec(3)`:
 - Signalmaske wird beibehalten
 - Signalbehandlung wird beibehalten, falls `SIG_DFL` oder `SIG_IGN`
 - Benutzerdefinierte Signalbehandlung wird auf `SIG_DFL` zurückgesetzt (→ warum?)



- Kindprozess erzeugen mit `fork(2)`:
 - Kindprozess erbt Signalbehandlung und Signalmaske vom Vaterprozess
- Anderes Programm laden mit `exec(3)`:
 - 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)



```
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



- 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



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



- 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



- 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(3)` beibehalten

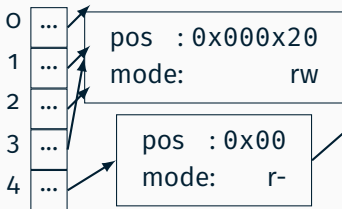


Anwendung

fd_a: 3
fd_b: 4

File Descriptor

Betriebssystem



FD Table

Open-File-Object

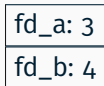
Inode + Name



-rw-r--r--
datei.txt

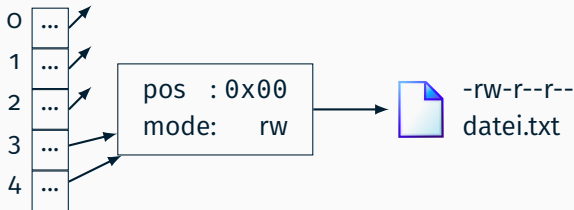
```
int fd_a = open("datei.txt", O_RDWR); // = 3
chmod("datei.txt", S_IRUSR | S_IRGRP | S_IROTH);
int fd_b = open("datei.txt", O_RDONLY); // = 4
write(fd_a, buffer, 0x20); // = 0x20
write(fd_b, buffer, 0x20); // = -EACCES
int fd_c = open("datei.txt", O_RDWR); // = -EACCES
```

Anwendung



File Descriptor

Betriebssystem



FD Table

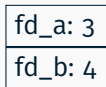
Open-File-Object

Inode + Name

```
int fd_a = open("datei.txt", O_RDWR); // = 3  
int fd_b = dup(fd_a); // = 4
```

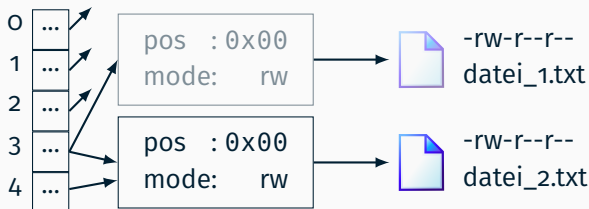
- Der Dateideskriptor wird dupliziert
- aber: die Datei wird **nicht neu geöffnet**

Anwendung



File Descriptor

Betriebssystem



FD Table

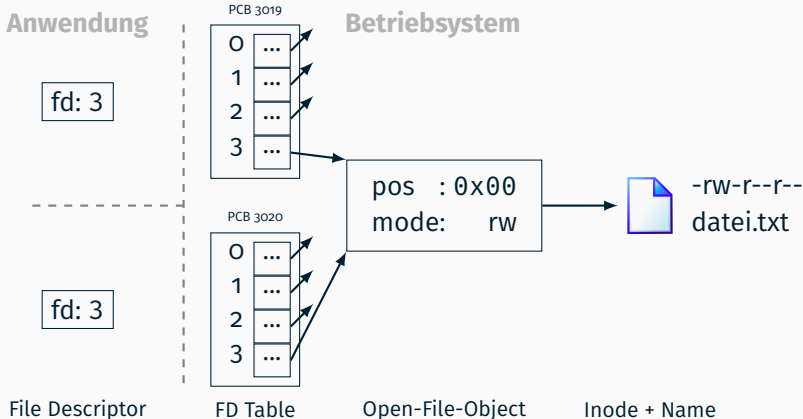
Open-File-Object

Inode + Name

```
int fd_a = open("datei_1.txt", O_RDWR); // = 3
int fd_b = open("datei_2.txt", O_RDWR); // = 4
// int dup2(int oldfd, int newfd);
dup2(fd_b, fd_a); // = 3
```

- Schließt fd_a (≙ newfd) (falls zuvor geöffnet)
- Lässt fd_a auf das Open-File-object von fd_b zeigen

Dateideskriptoren: fork(2)



```
getpid(); // = 3019  
int fd = open("datei.txt", O_RDWR); // = 3  
fork(); // = 3020
```



- 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**



„Aufgabenstellung“

- Programm schreiben, das passiv auf `SIGUSR1` wartet



```
static volatile int event = 0;

static void handleSIGUSR1() {
    event = 1;
}

static void waitForSIGUSR1(void) {
    puts("Waiting for SIGUSR1...");
    sigset_t mask;
    sigset_t oldMask;
    sigemptyset(&mask);
    sigaddset(&mask, SIGUSR1);
    sigprocmask(SIG_BLOCK, &mask, &oldMask);
    while (event == 0) {
        sigsuspend(&oldMask);
    }
    event = 0;
    sigprocmask(SIG_SETMASK, &oldMask, NULL);
    puts("There it is!");
}
```