

# Übungen zu Systemnahe Programmierung in C (SPiC) – Wintersemester 2018/19

---

## Übung 8

Rebecca Felsheim  
Benedict Herzog

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



Lehrstuhl für Verteilte Systeme  
und Betriebssysteme



FRIEDRICH-ALEXANDER  
UNIVERSITÄT  
ERLANGEN-NÜRNBERG  
TECHNISCHE FAKULTÄT

## Prozesse

---

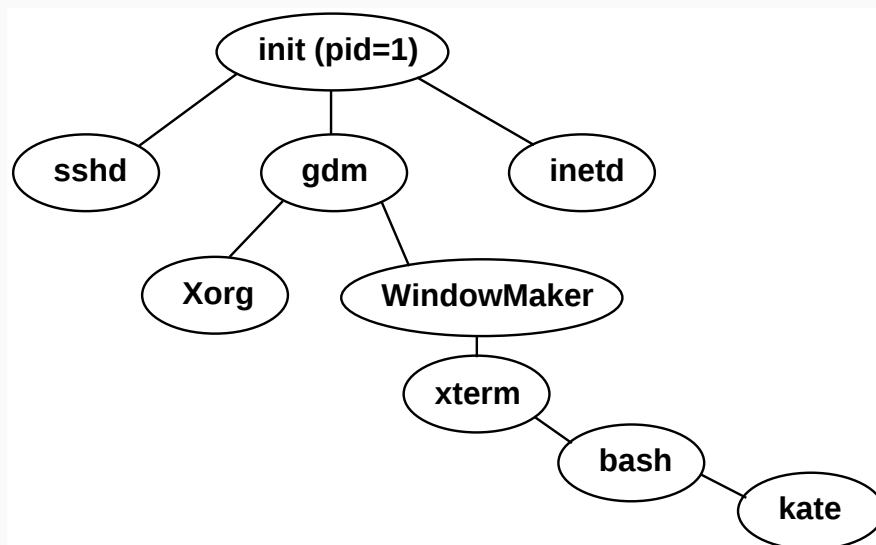
- Prozesse sind eine Ausführungsumgebung für Programme
  - haben eine Prozess-ID (PID, ganzzahlig positiv)
  - führen ein Programm aus
- Mit einem Prozess sind Ressourcen verknüpft
  - Speicher
  - Adressraum
  - geöffnete Dateien
  - ...
- Visualisierung von Prozessen: `ps(1)`, `pstree(1)`, `htop(1)`

1

## Prozesshierarchie



- Zwischen Prozessen bestehen Vater-Kind-Beziehungen
  - der erste Prozess wird direkt vom Systemkern gestartet (z.B. *init*)
  - es entsteht ein Baum von Prozessen bzw. eine Prozesshierarchie



- **kate** ist ein Kind von **bash**, **bash** wiederum ein Kind von **xterm**

2



```
01 pid_t fork(void);
```

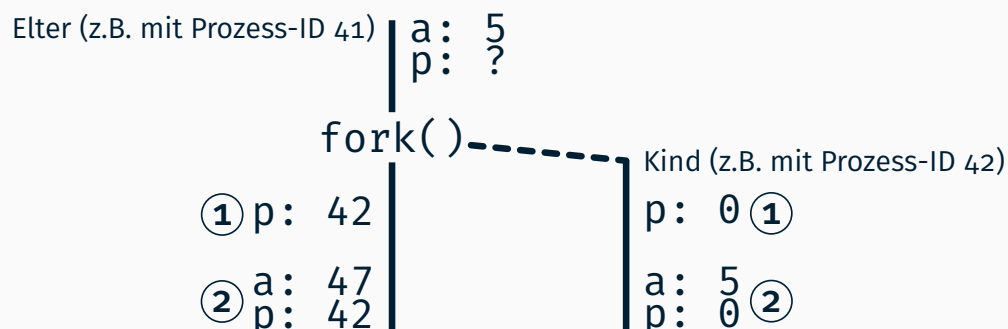
- Erzeugt einen neuen Kindprozess
- Exakte **Kopie** des Vaters...
  - Datensegment (neue Kopie, gleiche Daten)
  - Stacksegment (neue Kopie, gleiche Daten)
  - Textsegment (gemeinsam genutzt, da nur lesbar)
  - Filedeskriptoren (geöffnete Dateien)
  - ...mit Ausnahme der Prozess-ID
- Kind startet Ausführung hinter dem `fork()` mit geerbtem Zustand
- Vater-/Kindprozess am **Rückgabewert** von `fork(2)` unterscheidbar
  - Vater: PID des Kindes
  - Kind: 0
  - Fehler: -1

3

## Kindprozess erzeugen – fork



```
01 int a=5;
02 pid_t p = fork(); // (1)
03 a += p;           // (2)
04 switch(p) {
05     case -1: // Fehler - kein Kind
06         ...
07     case 0: // Kind
08         ...
09     default: // Vater
10         ...
11 }
```



4



- Mit Angabe des vollen Pfads der Programm-Datei in path

```
01 int execl(const char *path, const char *arg0, ... /*, NULL */);
02 int execlp(const char *path, char *const argv[]);
```

- Zum Suchen von file wird die Umgebungsvariable PATH verwendet

```
01 int execlp(const char *file, const char *arg0, ... /*, NULL */);
02 int execlvp(const char *file, char *const argv[]);
```

- Lädt **Programm** zur Ausführung in den **aktuellen Prozess**
  - aktuell ausgeführtes Programm wird ersetzt:  
Text-, Daten- und Stacksegment
  - erhalten bleiben:  
Filedeskriptoren (= geöffnete Dateien), Arbeitsverzeichnis, ...
- Aufrufparameter für exec(3)
  - Pfad bzw. Dateiname des neuen Programmes
  - Argumente für die main-Funktion

5

## Beispiele zu exec



- Mit absolutem Pfad und einer statischen Liste

```
01 execl("/bin/cp", "/bin/cp", "x.txt", "y.txt", NULL);
```

- Mit Suche in PATH und einer statischen Liste

```
01 execlp("cp", "cp", "x.txt", "y.txt", NULL);
```

- Mit Suche in PATH und einer veränderbar großen Liste

```
01 char *args[4];
02 args[0] = "cp";
03 args[1] = "x.txt";
04 args[2] = "y.txt";
05 args[3] = NULL;
06 execlvp(args[0], args);
```

- Anmerkungen
  - Alle Varianten von exec(3) erwarten als letzten Eintrag in der Argumentenliste einen NULL-Zeiger
  - Alle Varianten von exec(3) kehren nur im Fehlerfall zurück

6



- Enthält Pfade zu ausführbaren Programmen
- Ausführen von echo:

```
01 $ echo "Foo"
02 Foo
```

- Aber Ausführen von hello\_world:

```
01 $ ./hello_world
02 Hello World
```

- PATH Variable ausgeben:

```
01 $ echo $PATH
02 /proj/i4/bin:/bin:/usr/bin:/usr/local/bin:/sbin:/local/bin
03 $ which -a echo
04 /bin/echo
05 /local/bin/echo
```

- PATH Variable verändern:

```
01 export PATH=/path/to/executables:$PATH
```

7

## Prozess beenden – exit



```
01 void exit(int status);
```

- Beendet aktuellen Prozess mit angegebenem Exitstatus
- Gibt alle Ressourcen frei, die der Prozess belegt hat
  - Speicher
  - Filedeskriptoren (schließt alle offenen Dateien)
  - Kerndaten, die für die Prozessverwaltung verwendet wurden
  - ...
- Prozess geht in den *Zombie*-Zustand über
  - ermöglicht Vater auf Terminieren des Kindes zu reagieren
  - Zombie-Prozesse belegen Ressourcen & sollten zeitnah beseitigt werden
  - ist der Vater schon vor dem Kind terminiert
    1. Zombie-Prozess wird an init-Prozess (PID 1) weitergereicht
    2. init-Prozess beseitigt Zombie sofort

- Warten auf die Beendigung von Kind-Prozessen (Rückgabe: PID)

```
01 pid_t wait(int *statusbits);
```

- Beispiel

```
01 int main(int argc, char *argv[]) {
02     pid_t pid;
03     pid = fork();
04     if (pid > 0) { /* Vater */
05         int stbits;
06         wait(&stbits); /* Fehlerbehandlung nicht vergessen! */
07         printf("Kindstatus: %x", stbits); // nackte Status-Bits
08     } else if (pid == 0) { /* Kind */
09         execl("/bin/cp", "/bin/cp", "x.txt", "y.txt", NULL);
10         /* diese Stelle wird nur im Fehlerfall erreicht */
11         perror("exec /bin/cp"); exit(EXIT_FAILURE);
12     } else {
13         /* pid == -1 --> Fehler bei fork */
14     }
15 }
```

9

- `wait(2)` blockiert, bis ein Kind-Prozess terminiert wird
- PID dieses Kind-Prozesses wird als Rückgabewert geliefert
- als Parameter kann ein Zeiger auf einen `int`-Wert mitgegeben werden, in dem u.a. der Exitstatus des Kind-Prozesses abgelegt wird
- Status-Bits enthalten Grund des Terminierens
- Makros erleichtern Abfrage
  - Prozess mit `exit(3)` bzw. `_exit(2)` oder durch `return` aus der `main()` terminiert: `WIFEXITED(stbits)`  
⇒ Exitstatus: `WEXITSTATUS(stbits)`
  - Prozess durch Signal abgebrochen: `WIFSIGNALED(stbits)`  
⇒ Nummer des Signals: `WTERMSIG(stbits)`
- Weitere Makros: siehe Dokumentation `wait(2)`

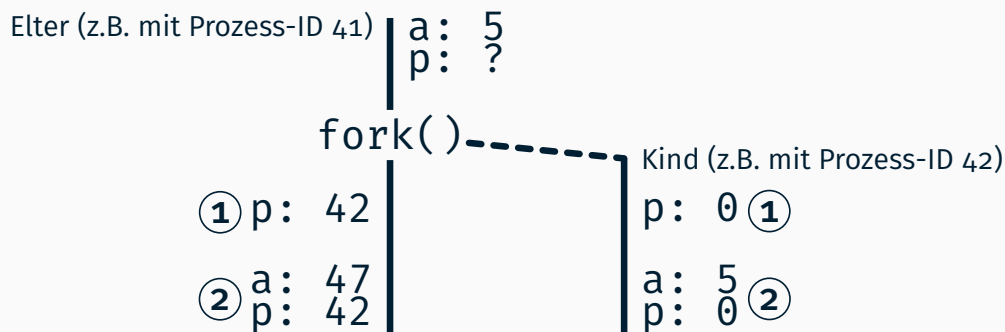
```
01 pid_t waitpid(pid_t pid, int *status, int options);
```

- warten auf bestimmten Prozess
  - `pid > 0` Kindprozess mit Prozess-ID `pid`
  - `pid = -1` Beliebige Kindprozesse
  - ...
- Optionen:
  - WNOHANG** sofort zurückkehren, wenn kein Kind beendet wurde (nicht blockieren)
  - ...
- Rückgabewert
  - > `0` Prozess-ID des Kindprozesses
  - `0` kein Prozess beendet (bei Verwendung von **WNOHANG**)
  - `-1` Fehler – Details siehe `waitpid(2)`

## Minimale Shell

---

- Auf Eingaben vom Benutzer warten
- Neuen Prozess erzeugen
- Kind: Startet Programm
- Vater: Wartet auf die Beendigung des Kindes
- Ausgabe der Kindzustands



12

## Einlesen von der Standard-Eingabe mit `fgets`



```
01 char *fgets(char *s, int size, FILE *stream);
```

- `fgets(3)` liest eine Zeile vom übergebenen Eingabe-Kanal und schreibt diese in einen vorher angelegten Speicherbereich
  - Maximal `size-1` Zeichen werden gelesen und mit `'\0'` abgeschlossen
  - Das `'\n'` am Ende der Zeile wird auch gespeichert
  - Rückgabewert ist der Zeiger auf den übergebenen Speicherbereich; oder `NULL` am Ende der Eingabe oder im Fehlerfall
- ⇒ Unterscheidung End-Of-File und Fehler mit `feof(3)` oder `ferror(3)`

```
01 char buf[23];
02 while (fgets(buf, 23, stdin) != NULL) {          /* Fehlerüberprüfung
    ↳ ! */
03     /* buf enthält die eingelesene Zeile */
04 }
```

13



```
01 char *strtok(char *str, const char *delim);
```

- strtok(3) teilt einen String in Tokens auf, die durch bestimmte Trennzeichen (engl. delimiter) getrennt sind
- Wird sukzessive aufgerufen und liefert jeweils einen Zeiger auf das nächste Token
  - str ist im ersten Aufruf ein Zeiger auf den zu teilenden String, in allen Folgeaufrufen NULL
  - delim ist ein String, der alle Trennzeichen enthält, z.B. " \t\n"
- Direkt aufeinanderfolgende Trennzeichen in str werden übersprungen
- Trennzeichen nach Token werden durch '\0' ersetzt
- Ist das Ende des Strings erreicht, gibt strtok(3) NULL zurück

14

## Stringmanipulation mit strtok()

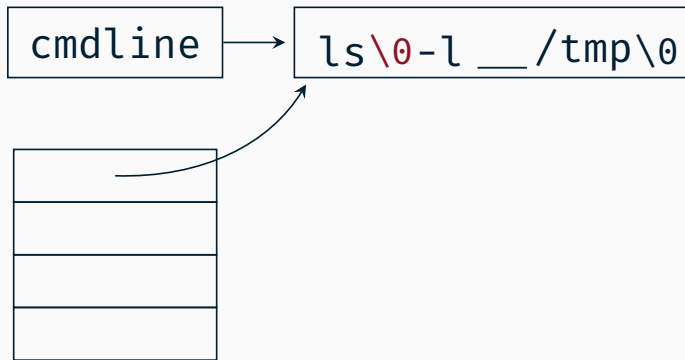


cmdline → ls -l \_\_/tmp\0

|  |
|--|
|  |
|  |
|  |
|  |

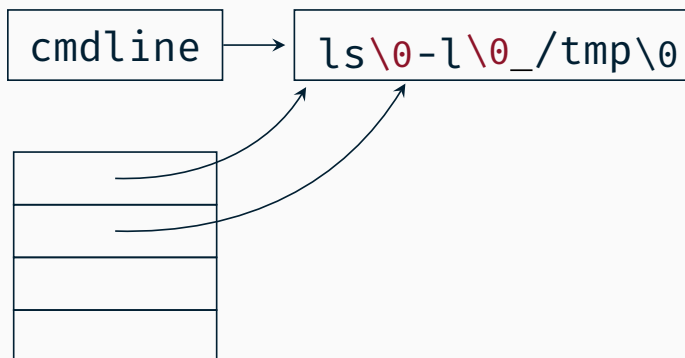
```
01 cmdline = "ls -l /tmp";  
02 a[0] = strtok(cmdline, " ");  
03 a[1] = strtok(NULL, " ");  
04 a[2] = strtok(NULL, " ");  
05 a[3] = strtok(NULL, " ");
```

15



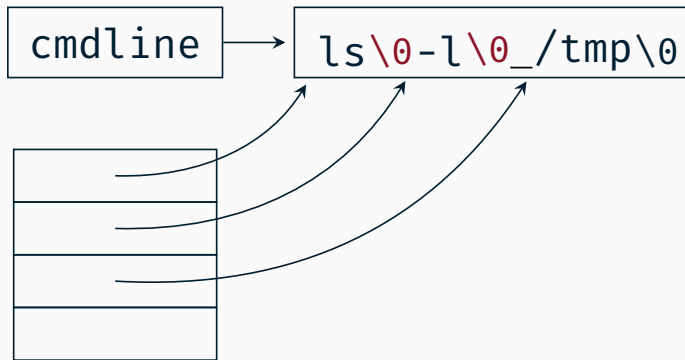
```
01 cmdline = "ls -l /tmp";  
02 a[0] = strtok(cmdline, " ");  
03 a[1] = strtok(NULL, " ");  
04 a[2] = strtok(NULL, " ");  
05 a[3] = strtok(NULL, " ");
```

15



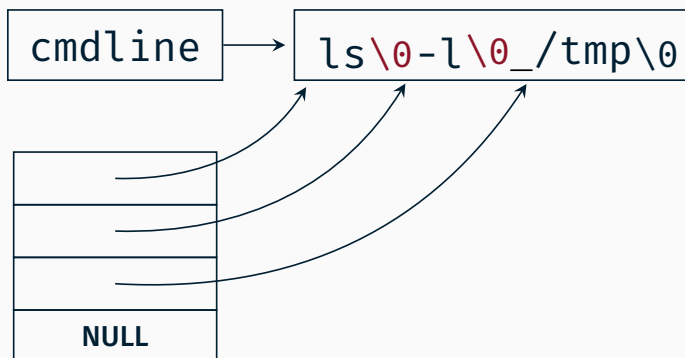
```
01 cmdline = "ls -l /tmp";  
02 a[0] = strtok(cmdline, " ");  
03 a[1] = strtok(NULL, " ");  
04 a[2] = strtok(NULL, " ");  
05 a[3] = strtok(NULL, " ");
```

15



```
01 cmdline = "ls -l /tmp";  
02 a[0] = strtok(cmdline, " ");  
03 a[1] = strtok(NULL, " ");  
04 a[2] = strtok(NULL, " ");  
05 a[3] = strtok(NULL, " ");
```

15



```
01 cmdline = "ls -l /tmp";  
02 a[0] = strtok(cmdline, " ");  
03 a[1] = strtok(NULL, " ");  
04 a[2] = strtok(NULL, " ");  
05 a[3] = strtok(NULL, " ");
```

15

# Signale

---

## Signale



- Vergleichbar mit Interrupts beim AVR
- Standardbehandlungen für Signale bereits vorhanden
- Verwendung von Signalen
  - Ereignissignalisierung des Betriebssystemkerns an einen Prozess
  - Ereignissignalisierung zwischen Prozessen
- Zwei Arten von Signalen
  - synchrone Signale: durch Prozessaktivität ausgelöst (Trap / Falle)
    - ⇒ Zugriff auf ungültigen Speicher, ungültiger Befehl
  - asynchrone Signale: “von außen” ausgelöst (Interrupts / Unterbrechung)
    - ⇒ Timer, Tastatureingabe



- Das Standardverhalten bei den meisten Signalen ist die Terminierung des Prozesses, bei einigen Signalen mit Anlegen eines Core-Dumps
  - SIGALRM (Term): Timer abgelaufen (`alarm(2)`, `setitimer(2)`)
  - SIGCHLD (Ign): Statusänderung eines Kindprozesses
  - SIGINT (Term): Interrupt (Shell: CTRL-C)
  - SIGQUIT (Core): Quit (Shell: CTRL-@)
  - SIGKILL (nicht behandelbar): beendet den Prozess
  - SIGTERM (Term): Terminierung; Standardsignal für `kill(1)`
  - SIGSEGV (Core): Speicherschutzverletzung
  - SIGUSR1, SIGUSR2 (Term): Benutzerdefinierte Signale
- Siehe auch `signal(7)`

17

## Signal zustellen



- Kommando `kill(1)` aus der Shell

```
01 kill -USR1 <pid>
```

- Parameter: Signalnummer oder Signal ohne "SIG"

- Systemaufruf `kill(2)`

```
01 int kill(pid_t pid, int signo);
```

18



- Konfiguration mit Hilfe einer Variablen vom Typ `sigset_t`
- Hilfsfunktionen konfigurieren das Signalset
  - `sigemptyset(3)`: alle Signale aus Maske entfernen
  - `sigfillset(3)`: alle Signale in Maske aufnehmen
  - `sigaddset(3)`: Signal zur Maske hinzufügen
  - `sigdelset(3)`: Signal aus Maske entfernen
  - `sigismember(3)`: Abfrage, ob Signal in Maske enthalten ist
- Analogie zum AVR: EIMSK-Register

19

## Setzen der prozessweiten Signal-Maske



- Setzen einer Maske mit

```
01 int sigprocmask(int how, const sigset_t *set, sigset_t *oset);
```

- `how`: Operation
  - `SIG_SETMASK`: setzt `set`
  - `SIG_BLOCK`: blockiert zusätzlich die in `set` gesetzten Signale
  - `SIG_UNBLOCK`: deblockiert die in `set` gesetzten Signale
- `set`: Parameter für die Operation
- `oset`: Speicher für aktuell installierte Maske

- Beispiel

```
01 sigset_t set;  
02 sigemptyset(&set);  
03 sigaddset(&set, SIGUSR1);  
04 sigprocmask(SIG_BLOCK, &set, NULL); /* Blockiert SIGUSR1 */
```

- Anwendung: z.B. kritische Abschnitte (vgl. `cli()`, `sei()`)
- **!!** Die prozessweite Signal-Maske wird über `fork(2)/exec(3)` vererbt **!!**

20

- AVR-Analogie: ISR( . . ), Alarmhandler
- Konfiguration mit Hilfe der Struktur sigaction

```
01 struct sigaction {  
02     void (*sa_handler)(int); /* Behandlungsfunktion */  
03     sigset_t sa_mask; /* Signalmaske während der Behandlung */  
04     int sa_flags;      /* Diverse Einstellungen */  
05 }
```

- Signalbehandlung kann über sa\_handler konfiguriert werden:
  - SIG\_IGN: Signal ignorieren
  - SIG\_DFL: Default-Signalbehandlung einstellen
  - Funktionsadresse: Funktion wird in der Signalbehandlung aufgerufen  
Als Parameter wird die Signalnummer übergeben
- SIG\_IGN und SIG\_DFL werden über exec(3) vererbt, nicht aber eine Behandlungsfunktion (nicht möglich, warum?)

21

- Konfiguration mit Hilfe der Struktur sigaction

```
01 struct sigaction {  
02     void (*sa_handler)(int); /* Behandlungsfunktion */  
03     sigset_t sa_mask; /* Signalmaske während der Behandlung */  
04     int sa_flags;      /* Diverse Einstellungen */  
05 }
```

- sa\_mask wird während der Ausführung des Signalhandlers gesetzt  
⇒ sigprocmask()

22

- Konfiguration mit Hilfe der Struktur sigaction

```
01 struct sigaction {  
02     void (*sa_handler)(int); /* Behandlungsfunktion */  
03     sigset_t sa_mask; /* Signalmaske während der Behandlung */  
04     int sa_flags; /* Diverse Einstellungen */  
05 }
```

- sa\_flags beeinflussen das Verhalten beim Signalempfang
- Bei uns gilt: sa\_flags=SA\_RESTART

23

## Setzen der Signalbehandlung



- Konfiguration mit Hilfe der Struktur sigaction

```
01 struct sigaction {  
02     void (*sa_handler)(int); /* Behandlungsfunktion */  
03     sigset_t sa_mask; /* Signalmaske während der Behandlung */  
04     int sa_flags; /* Diverse Einstellungen */  
05 }
```

- Konfiguration Setzen

```
01 #include <signal.h>  
02  
03 int sigaction(int sig, const struct sigaction *act,  
04               struct sigaction *oact);
```

- sig: Signalnummer
- act: Zu installierende Konfiguration
- oact: Speicher für die aktuell installierte Konfiguration

24

```
01 struct sigaction {
02     void (*sa_handler)(int); /* Behandlungsfunktion */
03     sigset_t sa_mask; /* Signalmaske während der Behandlung */
04     int sa_flags;      /* Diverse Einstellungen */
05 }
```

### ■ Installieren eines Handlers für SIGUSR1

```
01 #include <signal.h>
02
03 void my_handler(int sig) {
04     ...
05 }
06
07 int main(int argv, char * argv[]){
08     struct sigaction action;
09     action.sa_handler = my_handler;
10     sigemptyset(&action.sa_mask);
11     action.sa_flags = SA_RESTART;
12     sigaction(SIGUSR1, &action, NULL);
13     ....
}
```

25

## Warten auf Signale



- Problem: In einem kritischen Abschnitt auf ein Signal warten
  1. Signal deblockieren
  2. *Passiv* auf Signal warten (*schlafen* legen)
  3. Signal blockieren
  4. Kritischen Abschnitt bearbeiten
- Operationen müssen atomar am Stück ausgeführt werden!
  - ⇒ gleiche Problematik wie bei den Stromsparmodi des AVR-Prozessors
- Sigsuspend

```
01 #include <signal.h>
02 int sigsuspend(const sigset_t *mask);
```

1. sigsuspend(mask) setzt mask als Signal-Maske
2. Der Prozess blockiert bis zum Eintreffen eines Signals
3. Der Signalhandler wird ausgeführt
4. sigsuspend( ) setzt die ursprüngliche Signal-Maske und kehrt zurück

26

## ■ Vergleich

|                         | Interrupts         | Signale                                    |
|-------------------------|--------------------|--------------------------------------------|
| Behandlung installieren | ISR()-Makro        | sigaction(2)                               |
| Auslösung               | Hardware           | Prozesse mit kill()<br>oder Betriebssystem |
| Synchronisation         | cli(), sei()       | sigprocmask(2)                             |
| Warten auf Signale      | sei(); sleep_cpu() | sigsuspend(2)                              |

- Signale und Interrupts sind sehr **ähnliche Konzepte** auf unterschiedlichen Ebenen
- Viele Probleme treten in beiden Fällen auf und sind konzeptionell identisch zu lösen

## Aufgabe: mish

---



- Einfache Shell ("mini shell") zum Ausführen von Kommandos
  - Ausgabe des Shell-Prompt und Warten auf Eingaben: `fgets(3)`
  - Zerlegen der Eingaben in Kommandoname und Argumente: `strtok(3)`
  - Starten des Kommandos in neuem Prozess: `fork(2)`, `execvp(3)`
  - Warten auf Terminierung & Ausgabe des Exitstatus: `wait(2)`

```
01 # Reguläre Beendigung durch Exit (Exitstatus = 0)
02 mish> ls -l
03 ...
04 Exit status [2110] = 0
05
06 # Beendigung durch Signal (hier SIGINT = 2)
07 mish> sleep 10
08 Signal [1302] = 2
```

- Anpassen der Signalbehandlungen für SIGINT (`sigaction(2)`)
  - Vater: Signal ignorieren (`SIG_IGN`)
  - Kind: Default-Behandlung (`SIG_DFL`)

28



- Unterstützung von Hintergrundprozessen
  - Starten im Hintergrund mit "&" am Ende des Befehls
  - Beispiel: `./sleep 10 &`
  - Ausgabe der Prozess-ID und des Prompts
  - Anschließend sofort neue Befehle entgegennehmen
- Aufsammeln der Zombie-Prozesse
  - Signal `SIGCHLD` zeigt Statusänderung von Kindprozessen an
  - Aufsammeln mit `waitpid(2)` im Hauptprogramm
  - Weitere relevante Bibliotheksfunktionen:  
`sigaction(2)`, `sigprocmask(2)`, `sigsuspend(2)`

```
01 # Starten eines Hintergrundprozesses mit &
02 mish> sleep 10 &
03 Started [2110]
04 mish> ...
05 ...
06 Exit status [2110] = 0
```

29



## 1. Neuen Prozess erstellen: fork(2)

```
01 pid_t p = fork();
02 switch(p) {
03     case -1: // Fehler - kein Kind
04         ...
05     case 0: // Kind
06         ...
07     default: // Vater
08         ...
09 }
```

## 2. Programm im aktuellen Prozess starten: exec(3)

```
01 char *args[4];
02 args[0] = "cp";
03 args[1] = "x.txt";
04 args[2] = "y.txt";
05 args[3] = NULL;
06 execvp(args[0], args);
```

30



## 3. Auf Prozessbeendigung warten: wait(2)

```
01 int stbits;
02 wait(&stbits); /* Fehlerbehandlung nicht vergessen! */
```

```
01 int stbits;
02 pid_t pid = waitpid(-1, &stbits, WNOHANG);
03 /* beliebiger Kindprozess; nicht blockieren */
```

## 4. Signalhandler installieren: sigaction(2)

```
01 struct sigaction act;
02 act.sa_handler = SIG_DFL; // Handlersignatur: void f(int signum)
03 act.sa_flags = SA_RESTART;
04 sigemptyset(&act.sa_mask);
05 sigaction(SIGINT, &act, NULL);
```

31

## 5. Signale blockieren/deblockieren: sigprocmask(2)

```
01 sigset_t set;
02 sigemptyset(&set);
03 sigaddset(&set, SIGUSR1);
04 sigprocmask(SIG_BLOCK, &set, NULL); /* Blockiert SIGUSR1 */
05 // kritischer Abschnitt
06 sigprocmask(SIG_UNBLOCK, &set, NULL); /* Deblockiert SIGUSR1 */
```

## 6. Auf Signale warten: sigsuspend(2)

```
01 sigprocmask(SIG_BLOCK, &set, &old); /* Blockiert Signale */
02 while(event == 0){
03     sigsuspend(&old); /* Wartet auf Signale */
04 }
05 sigprocmask(SIG_SETMASK, &old, NULL); /* Deblockiert Signale */
```

32

# Testprogramme



- Testprogramme unter /proj/i4spic/pub/aufgabe8
- spic-wait

```
01 /proj/i4spic/pub/aufgabe8/spic-wait
02 My PID: 20746
03 Try
04     kill 20746
05     to terminate without core dump (SIGTERM)
06     kill -QUIT 20746
07     to terminate with core dump (SIGQUIT)
```

- spic-exit

```
01 /proj/i4spic/pub/aufgabe#\aufgabenr#/spic-exit 12
02 Exiting with status 12
```

33

## Hands-on: run

---

### Hands-on: run



```
01 ./run <programm> <param0> [<params> ...]
```

- run erhält einen Programmnamen und eine Liste mit Parametern
  - erstellt für jeden Parameter einen neuen Prozess
  - führt das angegebene Programm aus und übergibt den zugehörigen Parameter
  - wartet auf dessen Beendigung und behandelt nächsten Parameter
- Aufrufbeispiel: `./run echo Auto Haus Katze`
- Generierte Programmaufrufe:
  - `echo Auto`
  - `echo Haus`
  - `echo Katze`
- Bibliotheksfunktionen: `fork(2)`, `exec(3)`, `wait(2)`
- Fehlerbehandlung beachten