

Übungen zu Systemnahe Programmierung in C (SPiC) – Sommersemester 2026

Übung 12

Arne Vogel
Maxim Ritter von Onciul
Eva Dengler

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



Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware



Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät

Vorstellung Aufgabe 7

Signale



- Verwendung von Signalen
 - Ereignissignalisierung des Betriebssystemkerns an einen Prozess
 - Ereignissignalisierung zwischen Prozessen
- Vergleichbar mit Interrupts beim AVR
- Zwei Arten von Signalen
 - Synchroner Signale: Durch Prozessaktivität ausgelöst (Trap)
 - ⇒ Zugriff auf ungültigen Speicher, ungültiger Befehl
 - Asynchrone Signale: “Von außen” ausgelöst (Interrupt)
 - ⇒ Timer, Tastatureingabe
- Standardbehandlungen für Signale bereits vorhanden



- 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)`



- 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);
```



- Konfiguration mit Hilfe einer Variablen vom Typ `sigset_t`
- Hilfsfunktionen konfigurieren die Signalmaske
 - `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
- Gesetzte Signale werden blockiert
- AVR-Analogie: EIMSK-Register



- Setzen einer Maske mit

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

- how: Operation

- SIG_SETMASK: Setzt eine absolute Signalmaske
- SIG_BLOCK: Blockiert Signale relativ zur aktuell gesetzten Maske
- SIG_UNBLOCK: Deblokiert Signale relativ zur aktuell gesetzten Maske

- oset: Speichert Kopie der vorherigen Signalmaske (optional)

- Die Signalmaske wird bei `fork(2)/exec(3)` vererbt



Beispiel

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

- AVR-Analogie: Sperren kritischer Abschnitte (`cli()`, `sei()`)



- Konfiguration mit Hilfe der Struktur `sigaction`

```
01 struct sigaction {  
02     void (*sa_handler)(int); // Behandlungsfunktion  
03     sigset_t sa_mask;        // Zusätzlich blockierte Signale  
04     int sa_flags;           // Diverse Einstellungen  
05 }
```

- Signalbehandlung kann über `sa_handler` konfiguriert werden:
 - `SIG_IGN`: Signal ignorieren
 - `SIG_DFL`: Default-Signalbehandlung einstellen
 - Funktionspointer
- `SIG_IGN` und `SIG_DFL` werden über `exec(3)` vererbt, Funktionspointer nicht. Warum?
- AVR-Analogie: `ISR(. .)`, Alarmhandler



- Konfiguration mit Hilfe der Struktur `sigaction`

```
01 struct sigaction {  
02     void (*sa_handler)(int); // Behandlungsfunktion  
03     sigset_t sa_mask;        // Zusätzlich blockierte Signale  
04     int sa_flags;           // Diverse Einstellungen  
05 }
```

- Während Signalbehandlung sind folgende Signale blockiert:
 - Signalmaske bei Eintreffen des Signals
 - Zusätzlich: Auslösendes Signal
 - Zusätzlich: Signale in `sa_mask`

⇒ Synchronisation mehrerer Signalhandler durch `sa_mask`



- Konfiguration mit Hilfe der Struktur `sigaction`

```
01 struct sigaction {  
02     void (*sa_handler)(int); // Behandlungsfunktion  
03     sigset_t sa_mask;        // Zusätzlich blockierte Signale  
04     int sa_flags;           // Diverse Einstellungen  
05 }
```

- `man signal` zeigt die Funktion `signal()`, die NICHT verwendet werden sollte.
- `sa_flags` beeinflussen das Verhalten beim Signalempfang
- Bei uns gilt: `sa_flags=SA_RESTART`



■ Konfiguration mit Hilfe der Struktur `sigaction`

```
01 struct sigaction {  
02     void (*sa_handler)(int); // Behandlungsfunktion  
03     sigset_t sa_mask;        // Zusätzlich blockierte Signale  
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);
```



```
01 struct sigaction {
02     void (*sa_handler)(int); // Behandlungsfunktion
03     sigset_t sa_mask;        // Zusätzlich blockierte Signale
04     int sa_flags;           // Diverse Einstellungen
05 }
```

■ Installieren eines Handlers für SIGUSR1

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



- 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!

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

1. `sigsuspend(2)` setzt temporäre Signalmaske
 2. Prozess blockiert bis zum Eintreffen eines Signals
 3. `sigsuspend(2)` stellt ursprüngliche Signalmaske wieder her
 4. Signalhandler wird ausgeführt
- AVR-Analogie: Schlafschleife, `sleep_cpu()`



- SIGUSR1 im kritischen Abschnitt sperren
- Auf Signal warten

```
01 sigset_t sync_mask, old_mask;
02 sigemptyset(&sync_mask);
03 sigaddset(&sync_mask, SIGUSR1);
04
05 sigprocmask(SIG_BLOCK, &sync_mask, &old_mask);
06 while(!event) {
07     sigsuspend(&old_mask);
08 }
09 sigprocmask(SIG_SETMASK, &old_mask, NULL);
```



Beschreibung	Interrupts	Signale
Behandlung installieren	ISR()-Makro	sigaction(2)
Auslöser	Hardware	Prozesse mit kill(2) oder Betriebssystem
Synchronisation	cli(), sei()	sigprocmask(2)
Warten auf Signale	sei(); sleep_cpu()	sigsuspend(2)

- Signale und Interrupts sind sehr **ähnliche Konzepte**
- Synchronisation ist oft konzeptionell identisch zu lösen



Signalbehandlung von SIGINT

- Anpassen der Signalbehandlungen für CTRL+C
- SIGINT wird allen Prozessen des Terminals zugestellt

```
01 $> ./mish
02 mish> sleep 2
03 Exit status [5321] = 0
04 mish> sleep 10000
05 ^C                # CTRL+C
06 $>
```

⇒ Bei CTRL+C stirbt `sleep` und `mish`

- Anpassen der Signalbehandlung:
 - Elternteil: Signal ignorieren (`SIG_IGN`)
 - Kind: Default-Behandlung (`SIG_DFL`)



Aufsammeln von Zombieprozessen

- Bisher: Aufsammeln durch `waitpid(2)` (blockierend)
- Signal `SIGCHLD` zeigt Statusänderung von Kindprozessen an
 - Kindprozess wurde gestoppt
 - Kindprozess ist terminiert
- Jetzt: Aufsammeln durch `waitpid(2)` (nicht-blockierend)
- Warten auf Statusveränderungen mit `sigsuspend(2)`



Unterstützung von Hintergrundprozessen

- Kommandos mit abschließenden '&'
⇒ Hintergrundprozess
- Beispiel: `./sleep 10 &`
- Ausgabe der Prozess-ID und des Prompts
- Anschließend sofort Entgegennahme neuer Befehle

```
01 # Starten eines Hintergrundprozesses mit &
02 mish> sleep 10 &
03 Started [2110]
04 mish> ls
05 Makefile mish mish.c
06 Exit Status [2115] = 0
07 ...
08 Exit status [2110] = 0
```



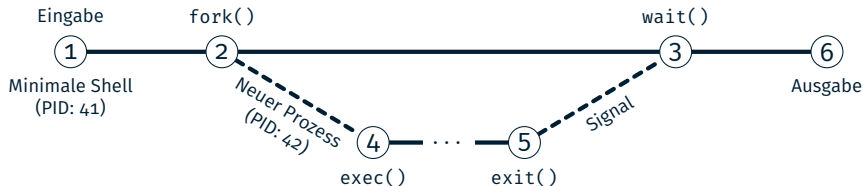
Unterstützung von Hintergrundprozessen

- Beim Warten auf Vordergrundprozesse sollen terminierende Hintergrundprozesse sofort eingesammelt werden

```
01 # Starten mehrerer Hintergrundprozesse
02 mish> sleep 3 &
03 Started [2110]
04 mish> sleep 5 &
05 Started [2115]
06 mish> sleep 10 &
07 Started [2118]
08
09 # Starten eines Vordergrundprozesses
10 mish> sleep 20
11 Exit Status [2110] = 0      # sleep 3 &
12 Exit Status [2115] = 0      # sleep 5 &
13 Exit Status [2118] = 0      # sleep 10 &
14 Exit Status [2121] = 0      # sleep 20
15 mish>
```



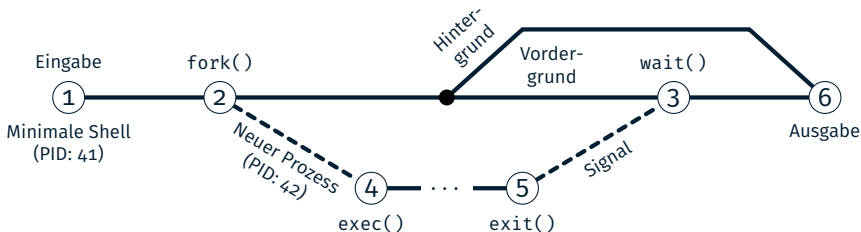
- Erweiterung des Basisablaufs
 1. Auf Eingaben vom Benutzer warten
 2. Neuen Prozess erzeugen
 3. Elternteil: Wartet auf die Beendigung des Kindes
 4. Kind: Startet Programm
 5. Kind: Programm terminiert
 6. Elternteil: Ausgabe der Kindzustands





■ Erweiterung des Basisablaufs

1. Auf Eingaben vom Benutzer warten
2. Neuen Prozess erzeugen
3. Elternteil: Wartet auf die Beendigung des Kindes (*Nur Vordergrund*)
4. Kind: Startet Programm
5. Kind: Programm terminiert
6. Elternteil: Ausgabe der Kindzustands





Welche Klausur wollen wir nächste Woche besprechen?

Hands-on: Stoppuhr

Screencast: <https://www.video.uni-erlangen.de/clip/id/19835>



```
01 $ ./stoppuhr
02 Press Ctrl+C (SIGINT) to start and stop
03 ^CStarted...
04 1 sec
05 2 sec
06 3 sec
07 4 sec
08 ^CStopped.
09 Duration: 4 sec 132 msec
```

■ Ablauf:

- Stoppuhr startet durch SIGINT Signal
 - Gibt jede Sekunde die bisherige Dauer aus (Format: "3 sec")
- Stoppuhr stoppt bei weiterem SIGINT und gibt Dauer aus
 - Gibt Gesamtdauer inkl. Millisekunden aus (Format: "4 sec 132 msec")
 - Beendet sich anschließend
- Verwendet intern SIGALRM und `setitimer(2)`
- Schutz kritischer Abschnitte beachten



1. 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);
```

2. 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 */
```



3. 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 */
```



- Zeitgeber mittels `setitimer(2)` konfigurieren

```
01 #include <sys/time.h>
02
03 int setitimer(int which, const struct itimerval *new_value,
04              struct itimerval *old_value);
```

- Parameter:

which Hier: `ITIMER_REAL` (Physikalische Zeit)

new_value Zu setzende Konfiguration

old_value Zum Auslesen der vorherigen Konfiguration

- `SIGALRM`: Timer ist abgelaufen bzw. Alarm eingetreten
 - Standardbehandlung: Programm beenden
 - Eigenen Signalhandler installieren



■ Strukturen zur Konfiguration

```
01 struct timeval {  
02     time_t      tv_sec;          /* seconds */  
03     suseconds_t tv_usec;        /* microseconds */  
04 };
```

Beschreibt Zeitintervall mit tv_sec s und tv_usec μ s

```
01 struct itimerval {  
02     struct timeval it_interval; /* Interval for periodic timer */  
03     struct timeval it_value;    /* Time until next expiration */  
04 };
```

Erster Alarm nach Intervall it_value
danach periodischer Alarm mit Intervall it_interval

■ Besondere Werte

it_interval = {0, 0} Singleshot Alarm

it_value = {0, 0} Alarm abbrechen