Übungen zu Systemnahe Programmierung in C (SPiC)

Sebastian Maier
(Lehrstuhl Informatik 4)

Übung 8

Wintersemester 2016/2017

Inhalt

Prozesse
- System-Schnittstelle
- Minimale Shell
- Einlesen von der Standard-Eingabe
- Stringmanipulation mit strtok

Signale
- Allgemein
- Signale zustellen
- Signale maskieren
- Signale behandeln
- Auf Signale warten
- Signale vs. Interrupts

Aufgabe: mish

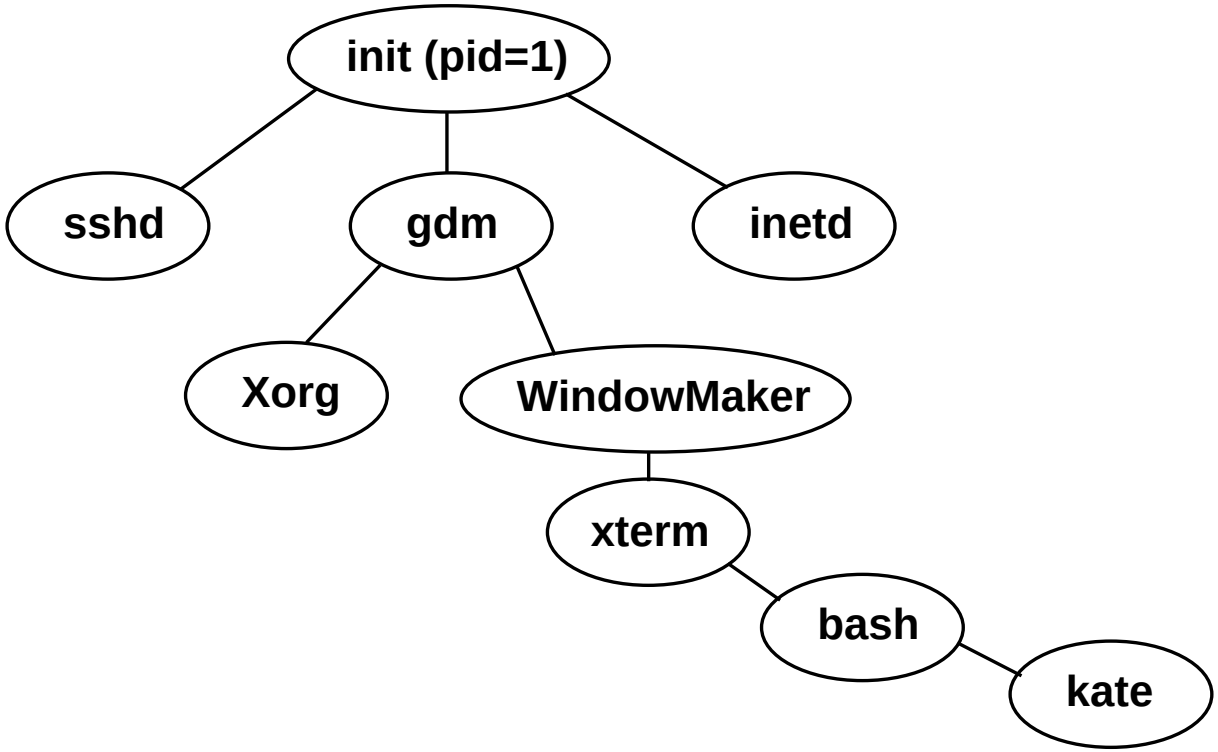
Hands-on: run

Prozesse

- Prozesse sind eine Ausführumgebung 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: `pstree(1)`, `htop(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**

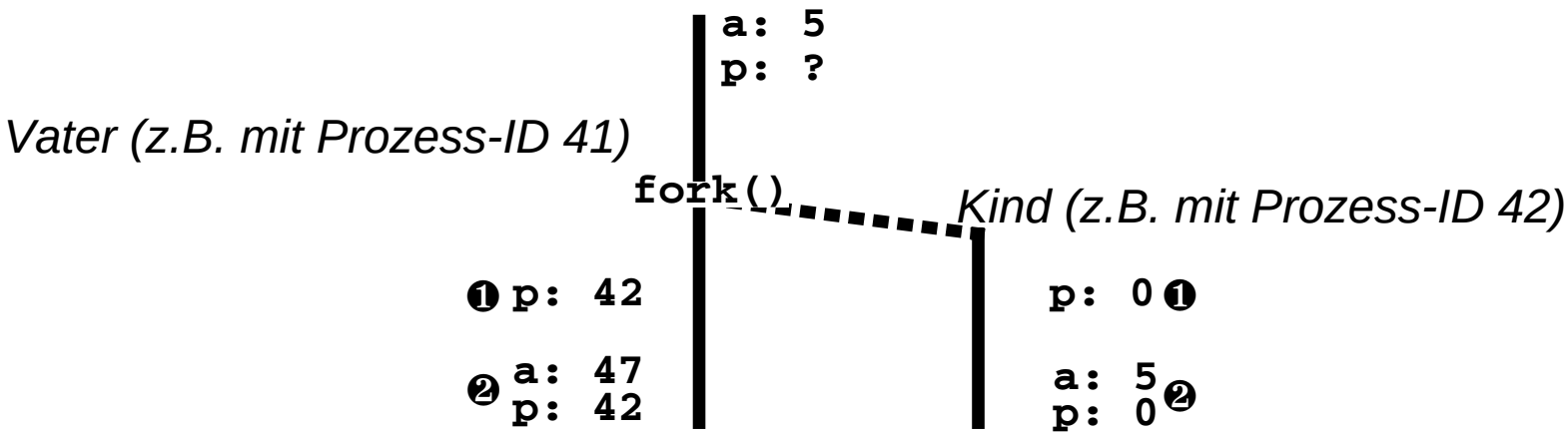
Kindprozess erzeugen – fork

```
1 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

Kindprozess erzeugen – fork

```
1   int a=5;
2   pid_t p = fork(); // (1)
3   a += p;           // (2)
4   switch(p) {
5       case -1: // Fehler - kein Kind
6           ...
7       case 0: //  Kind
8           ...
9      default: // Vater
10          ...
11  }
```



Programm ausführen – exec

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

```
1 int execl(const char *path, const char *arg0, ... /*, NULL */);
2 int execv(const char *path, char *const argv[]);
```

- Zum Suchen von `file` wird die Umgebungsvariable `PATH` verwendet

```
1 int execlp(const char *file, const char *arg0, ... /*, NULL */);
2 int execvp(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

Beispiele zu exec

- Mit absolutem Pfad und einer statischen Liste

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

- Mit Suche in PATH und einer statischen Liste

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

- Mit Suche in PATH und einer veränderbar großen Liste

```
1 char *args[4];
2 args[0] = "cp";
3 args[1] = "x.txt";
4 args[2] = "y.txt";
5 args[3] = NULL;
6 execvp(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

PATH Umgebungsvariable

- Enthält Pfade zu ausführbaren Programmen
- Ausführen von `echo`:

```
$ echo "Foo"
Foo
```

- Aber Ausführen von `hello_world`:

```
$ ./hello_world
Hello World
```

- `PATH` Variable ausgeben:

```
$ echo $PATH
/proj/i4/bin:/bin:/usr/bin:/usr/local/bin:/sbin:/local/bin
$ which -a echo
/bin/echo
/local/bin/echo
```

- `PATH` Variable verändern:

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

Prozess beenden – exit

```
1 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

Auf Kindprozess warten – `wait`

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

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

- Beispiel

```
1  int main(int argc, char *argv[]) {
2      pid_t pid;
3      pid = fork();
4      if (pid > 0) { /* Vater */
5          int stbits;
6          wait(&stbits); /* Fehlerbehandlung nicht vergessen! */
7          printf("Kindstatus: %x", stbits); /* nackte Status-Bits */
8      } else if (pid == 0) { /* Kind */
9          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 }
```

Auf Kindprozess warten – `wait`

- `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)` terminiert: `WIFEXITED(stbits)`
    ⇒ Exitstatus: `WEXITSTATUS(stbits)`
  - Prozess durch Signal abgebrochen: `WIFSIGNALED(stbits)`
    ⇒ Nummer des Signals: `WTERMSIG(stbits)`
- Weitere Makros: siehe Dokumentation `wait(2)`

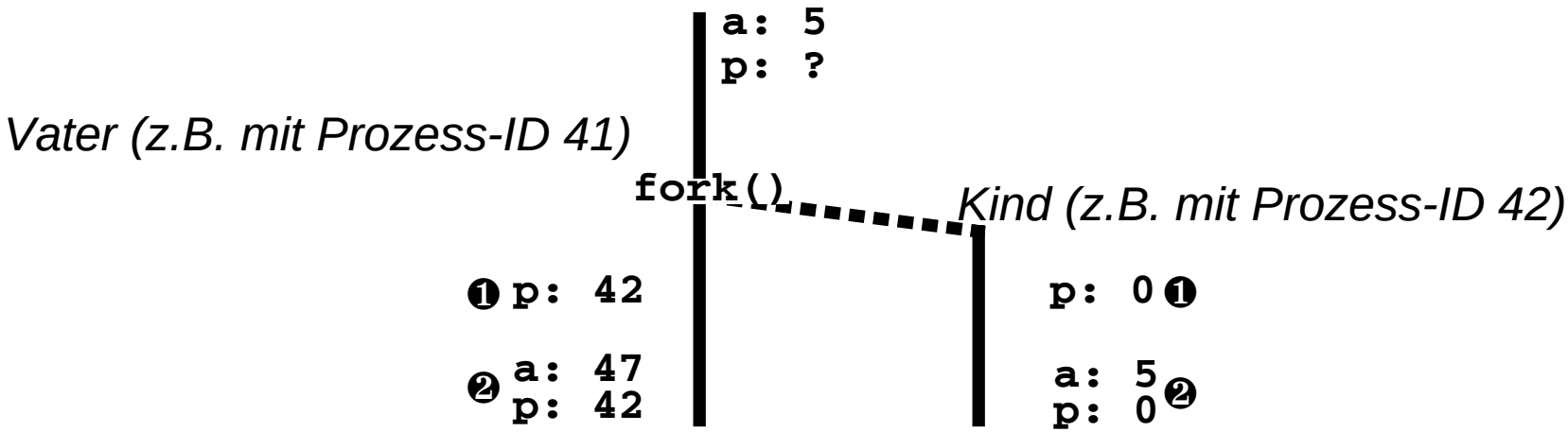
Auf Kindprozess warten – `waitpid`

```
1 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)`

Funktionsweise einer minimalen Shell

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



Einlesen von der Standard-Eingabe mit fgets

```
1 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
  $\Rightarrow$ Unterscheidung End-Of-File und Fehler mit `feof(3)` oder `ferror(3)`
- Beispiel

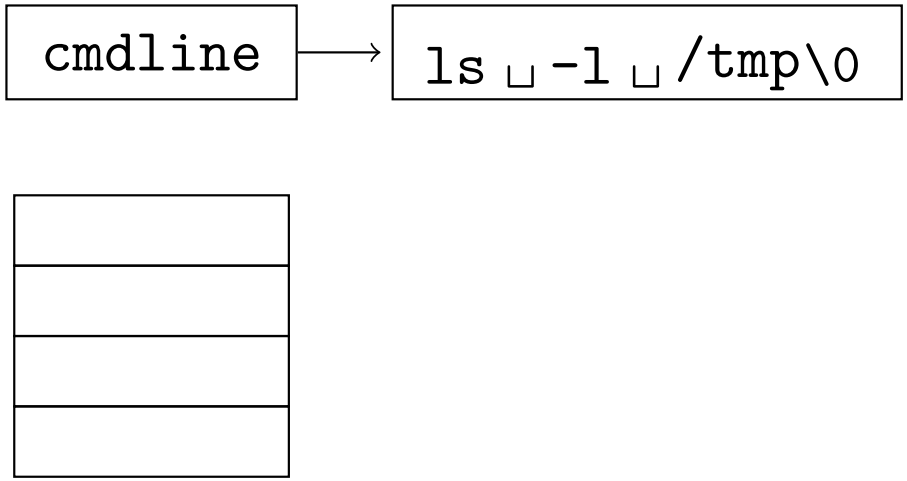
```
1 char buf[23];
2 while (fgets(buf, 23, stdin) != NULL) {  /* Fehlerüberprüfung! */
3     /* buf enthält die eingelesene Zeile */
4 }
```

Stringmanipulation mit `strtok`

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

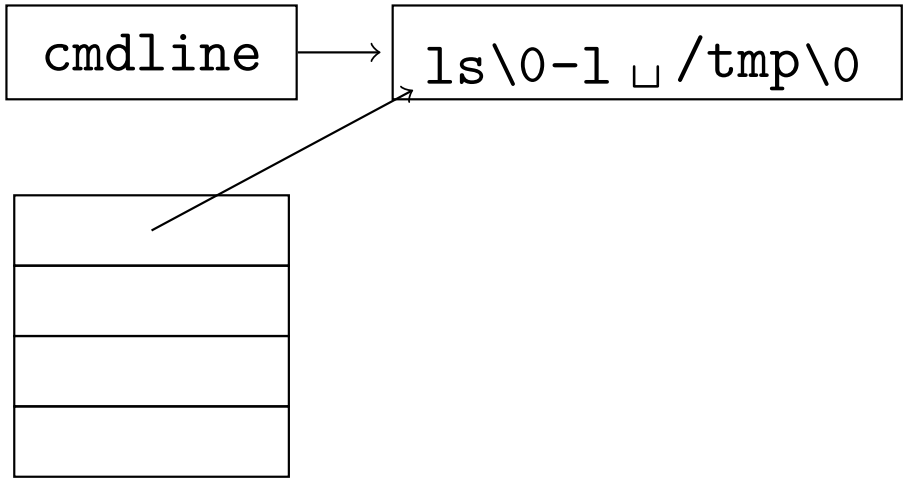
- `strtok(3)` teilt einen String in Tokens auf, die durch bestimmte Trennzeichen (engl. delimiter) getrennt sind
- Wird sukzessive aufgerufen und liefert jeweils einen Zeiger auf das nächste Token
  - `str` ist im ersten Aufruf ein Zeiger auf den zu teilenden String, in allen Folgeaufrufen `NULL`
  - `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

Stringmanipulation mit `strtok`



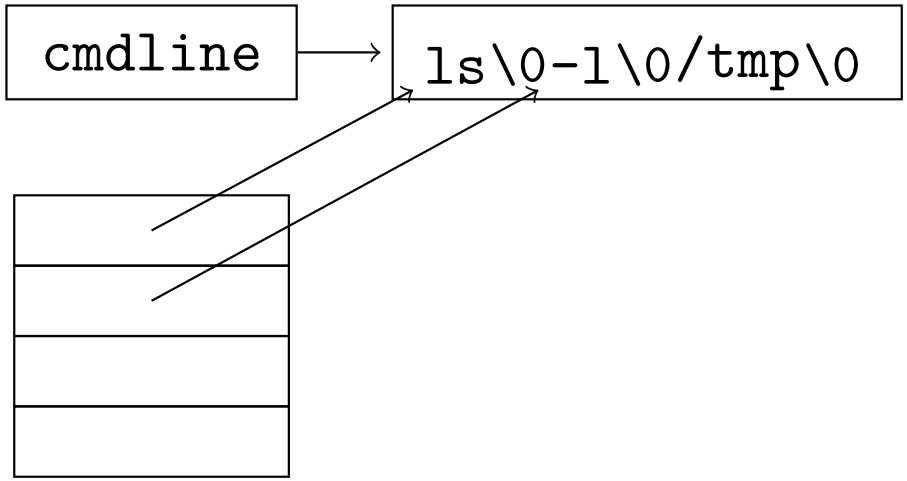

```
1  a[0] = strtok(cmdline, " ");
2  a[1] = strtok(NULL, " ");
3  a[2] = strtok(NULL, " ");
4  a[3] = strtok(NULL, " ");
```

Stringmanipulation mit `strtok`



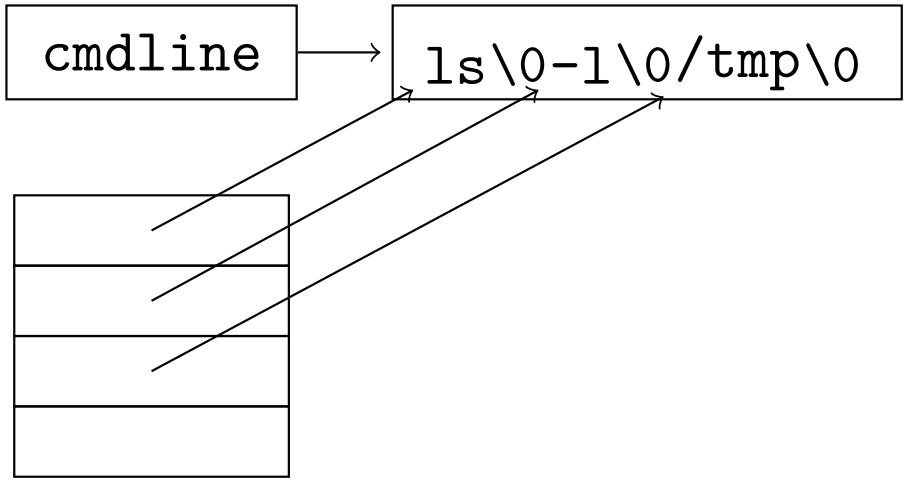

```
1  a[0] = strtok(cmdline, " ");
2  a[1] = strtok(NULL, " ");
3  a[2] = strtok(NULL, " ");
4  a[3] = strtok(NULL, " ");
```

Stringmanipulation mit `strtok`



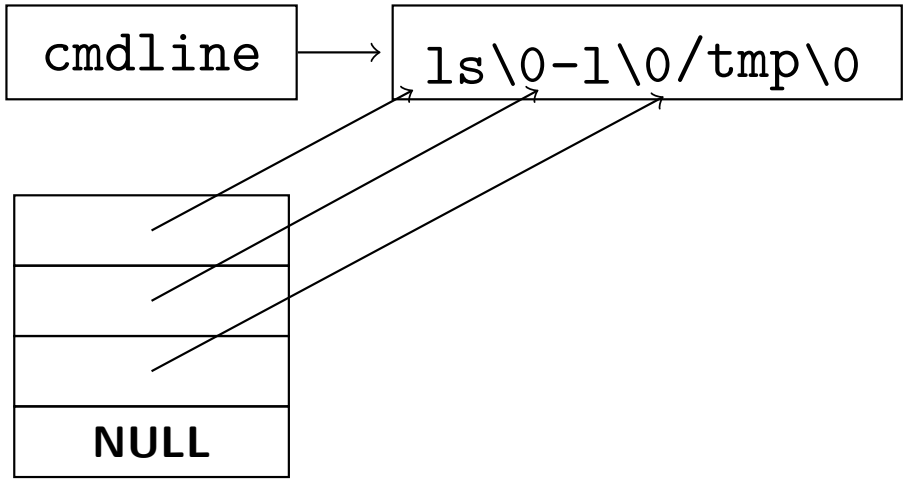

```
1  a[0] = strtok(cmdline, " ");
2  a[1] = strtok(NULL, " ");
3  a[2] = strtok(NULL, " ");
4  a[3] = strtok(NULL, " ");
```

Stringmanipulation mit `strtok`




```
1  a[0] = strtok(cmdline, " ");
2  a[1] = strtok(NULL, " ");
3  a[2] = strtok(NULL, " ");
4  a[3] = strtok(NULL, " ");
```

Stringmanipulation mit `strtok`




```
1  a[0] = strtok(cmdline, " ");
2  a[1] = strtok(NULL, " ");
3  a[2] = strtok(NULL, " ");
4  a[3] = strtok(NULL, " ");
```

Inhalt

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)
    $\Rightarrow$ Zugriff auf ungültigen Speicher, ungültiger Befehl
  - asynchrone Signale: "von außen" ausgelöst (Interrupts / Unterbrechung)
    $\Rightarrow$ Timer, Tastatureingabe

Ausgewählte POSIX-Signale

- 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)`

Signal zustellen

- Kommando `kill(1)` aus der Shell

```
1 kill -USR1 <pid>
```

  - Parameter: Signalnummer oder Signal ohne “SIG”

- Systemaufruf `kill(2)`

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

Setzen der prozessweiten Signal-Maske

- 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: `GICR`-Register

Setzen der prozessweiten Signal-Maske

- Setzen einer Maske mit

```
1 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

```
1 sigset_t set;
2 sigemptyset(&set);
3 sigaddset(&set, SIGUSR1);
4 sigprocmask(SIG_BLOCK, &set, NULL); /* Blockiert SIGUSR1 */
```

- Anwendung: z.B. kritische Abschnitte (vgl. cli(), sei())

!! Die prozessweite Signal-Maske wird über exec(3) vererbt !!

sigaction - Signalhandler

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

```
1 struct sigaction {
2     void (*sa_handler)(int); /* Behandlungsfunktion */
3     sigset_t sa_mask;        /* Signalmaske während der Behandlung */
4     int sa_flags;            /* Diverse Einstellungen */
5 }
```

- 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?)

sigaction - Maske

- Konfiguration mit Hilfe der Struktur `sigaction`

```
1  struct sigaction {
2      void (*sa_handler)(int); /* Behandlungsfunktion */
3      sigset_t sa_mask;        /* Signalmaske während der Behandlung */
4      int sa_flags;            /* Diverse Einstellungen */
5  }
```

- `sa_mask` wird während der Ausführung des Signalhandlers gesetzt

⇒ `sigprocmask()`

sigaction - Flags

- Konfiguration mit Hilfe der Struktur `sigaction`

```
1  struct sigaction {
2      void (*sa_handler)(int); /* Behandlungsfunktion */
3      sigset_t sa_mask;        /* Signalmaske während der Behandlung */
4      int sa_flags;            /* Diverse Einstellungen */
5  }
```

- `sa_flags` beeinflussen das Verhalten beim Signalempfang
- Bei uns gilt: `sa_flags=SA_RESTART`

Setzen der Signalbehandlung

- Konfiguration mit Hilfe der Struktur `sigaction`

```
1  struct sigaction {
2      void (*sa_handler)(int); /* Behandlungsfunktion */
3      sigset_t sa_mask;        /* Signalmaske während der Behandlung */
4      int sa_flags;            /* Diverse Einstellungen */
5  }
```

- Konfiguration Setzen

```
1  #include <signal.h>
2
3  int sigaction(int sig, const struct sigaction *act,
4      struct sigaction *oact);
```

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

sigaction - Beispiel

sigaction

```
1  struct sigaction {
2      void (*sa_handler)(int); /* Behandlungsfunktion */
3      sigset_t sa_mask;        /* Signalmaske während der Behandlung */
4      int sa_flags;            /* Diverse Einstellungen */
5  }
```

Installieren eines Handlers für SIGUSR1

```
1  #include <signal.h>
2
3  void my_handler(int sig) {
4      ...
5  }
6
7  int main(int argv, char * argv[]){
8      struct sigaction action;
9      action.sa_handler = my_handler;
10     sigemptyset(&action.sa_mask);
11     action.sa_flags = SA_RESTART;
12     sigaction(SIGUSR1, &action, NULL);
13     ....
```

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`

```
1 #include <signal.h>
2 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

POSIX-Signale vs. AVR-Interrupts

- Vergleich

	Interrupts	Signale
Behandlung installieren	`ISR()`-Makro	`sigaction(2)`
Auslösung	Hardware	Prozesse mit `kill()` 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

Inhalt

Aufgabe: mish - Teil a

- 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)`

```
1  # Reguläre Beendigung durch Exit (Exitstatus = 0)
2  mish> ls -l
3  ...
4  Exitstatus [2110] = 0
5
6  # Beendigung durch Signal (hier SIGINT = 2)
7  mish> sleep 10
8  Signal [1302] = 2
```

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

Aufgabe: mish - Teil b

- 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)`

```
1 # Starte eines Hintergrundprozesses mit &
2 mish> sleep 10 &
3 Started [2110]
4 mish> ...
5 ...
6 Exitstatus [2110] = 0
```

Übersicht der Konzepte (1)

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

```
1  pid_t p = fork();
2  switch(p) {
3    case -1: // Fehler - kein Kind
4         ...
5    case 0: //  Kind
6         ...
7   default: // Vater
8         ...
9  }
```

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

```
1  char *args[4];
2  args[0] = "cp";
3  args[1] = "x.txt";
4  args[2] = "y.txt";
5  args[3] = NULL;
6  execvp(args[0], args);
```

Übersicht der Konzepte (2)

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

```
1 int stbits;
2 wait(&stbits); /* Fehlerbehandlung nicht vergessen! */
```

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

4. Signalhandler installieren: `sigaction(2)`

```
1 struct sigaction act;
2 act.sa_handler = SIG_DFL; // Handlersignatur: void f(int signum)
3 act.sa_flags = SA_RESTART;
4 sigemptyset(&act.sa_mask);
5 sigaction(SIGINT, &act, NULL);
```

Übersicht der Konzepte (3)

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

```
1 sigset_t set;
2 sigemptyset(&set);
3 sigaddset(&set, SIGUSR1);
4 sigprocmask(SIG_BLOCK, &set, NULL); /* Blockiert SIGUSR1 */
5 // kritischer Abschnitt
6 sigprocmask(SIG_UNBLOCK, &set, NULL); /* Deblockiert SIGUSR1 */
```

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

```
1 sigprocmask(SIG_BLOCK, &set, &old); /* Blockiert Signale */
2 while(event == 0){
3   sigsuspend(&old); /* Wartet auf Signale */
4 }
5 sigprocmask(SIG_SETMASK, &old, NULL); /* Deblockiert Signale */
```

Testprogramme

- Testprogramme unter /proj/i4spic/pub/aufgabe8

- spic-wait

```
1 /proj/i4spic/pub/aufgabe8/spic-wait
2 My PID: 20746
3 Try
4  kill 20746
5   to terminate without core dump (SIGTERM)
6  kill -QUIT 20746
7   to terminate with core dump (SIGQUIT)
```

- spic-exit

```
1 /proj/i4spic/pub/aufgabe8/spic-exit 12
2 Exiting with status 12
```

Hands-on: run

```
1 ./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