

Übungen zu Systemnahe Programmierung in C (SPiC)

Sebastian Maier, Heiko Janker
(Lehrstuhl Informatik 4)

Übung 8



Wintersemester 2015/2016



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 tree(1)`, `htop(1)`



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

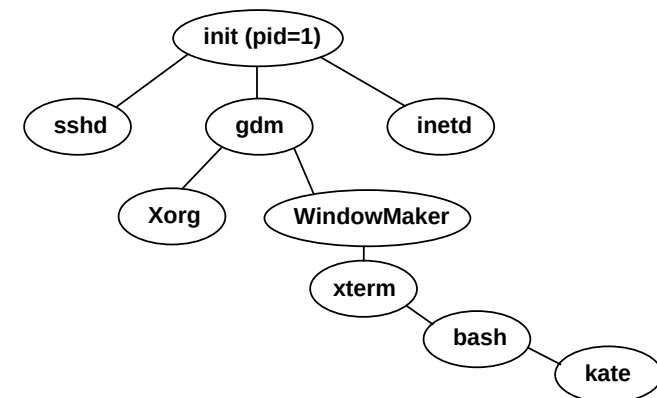
Aufgabe: `tbsh`

Hands-on: `run`



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

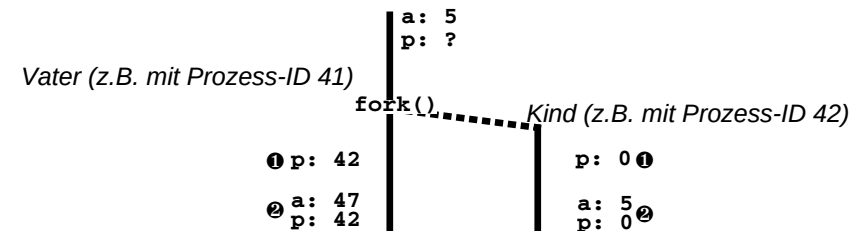
```
1 pid_t fork(void);
```

- 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:

```
1 $ echo "Foo"
2 Foo
```

- Aber Ausführen von hello_world:

```
1 $ ./hello_world
2 Hello World
```

- PATH Variable ausgeben:

```
1 $ echo $PATH
2 /proj/i4/bin:/bin:/usr/bin:/usr/local/bin:/sbin:/local/bin
3 $ which -a echo
4 /bin/echo
5 /local/bin/echo
```

- PATH Variable verändern:

```
1 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 }
```



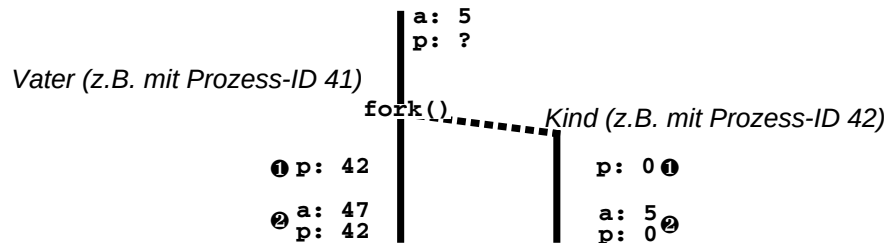
Auf Kindprozess warten – wait

- 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)



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
⇒ 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);
```

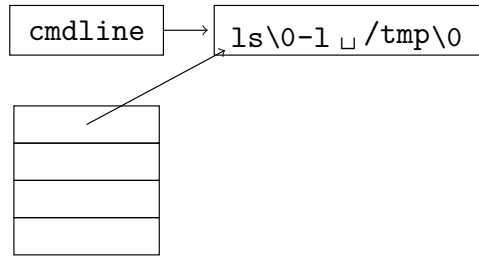
- strtok(3) teilt einen String in Tokens auf, die durch bestimmte Trennzeichen (engl. delimiter) getrennt sind
- Wird sukzessive aufgerufen und liefert jeweils einen Zeiger auf das nächste Token
 - str ist im ersten Aufruf ein Zeiger auf den zu teilenden String, in allen Folgeaufrufen NULL
 - delim ist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

cmdline → ls -l /tmp\0


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

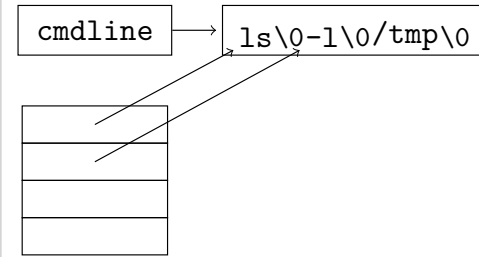
Stringmanipulation mit strtok



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



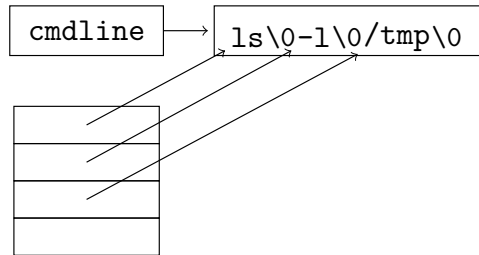
Stringmanipulation mit strtok



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



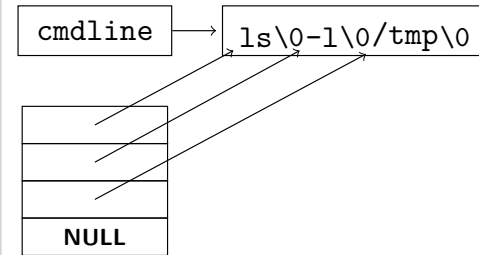
Stringmanipulation mit strtok



```
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, " ");
```



Prozesse

Signale

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

Aufgabe: tbsh

Hands-on: run



- 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



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    ....
14 }
```



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



■ 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



Prozesse

Signale

Aufgabe: tbsh

Hands-on: run



Aufgabe: tbsh - Teil a

- Einfache 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 des Prozesses und Ausgabe des Exitstatus: wait(2)
- Anpassen der Signalbehandlungen für SIGINT (sigaction(2))
 - Vater: Signal ignorieren (SIG_IGN)
 - Kind: Default-Behandlung (SIG_DFL)



Aufgabe: tbsh - Teil b

- Begrenzung der max. Prozessanzahl pro Zeiteinheit
 - Shellaufruf: ./tbsh [refresh_interval max_tokens]
 - Benutzer erhält bei Start und nach jedem Zeitintervall refresh_interval ein Token
 - Benutzer kann maximal max_tokens Tokens ansammeln
 - eine Prozesserzeugung kostet ein Token; ggf. Fehlermeldung ausgeben
 - Bibliotheksfunktionen: atoi(3), alarm(3), sigaction(2), sigprocmask(2)
- Shell-Prompt Anpassung
 - mit Beschränkung: tbsh[TOKENS]> ¹
 - ohne Beschränkung: tbsh[unlimited]>

¹TOKENS: Aktuelle Anzahl Tokens



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! */
```

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);
```

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 */
```



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

