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

Übung 11

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 6

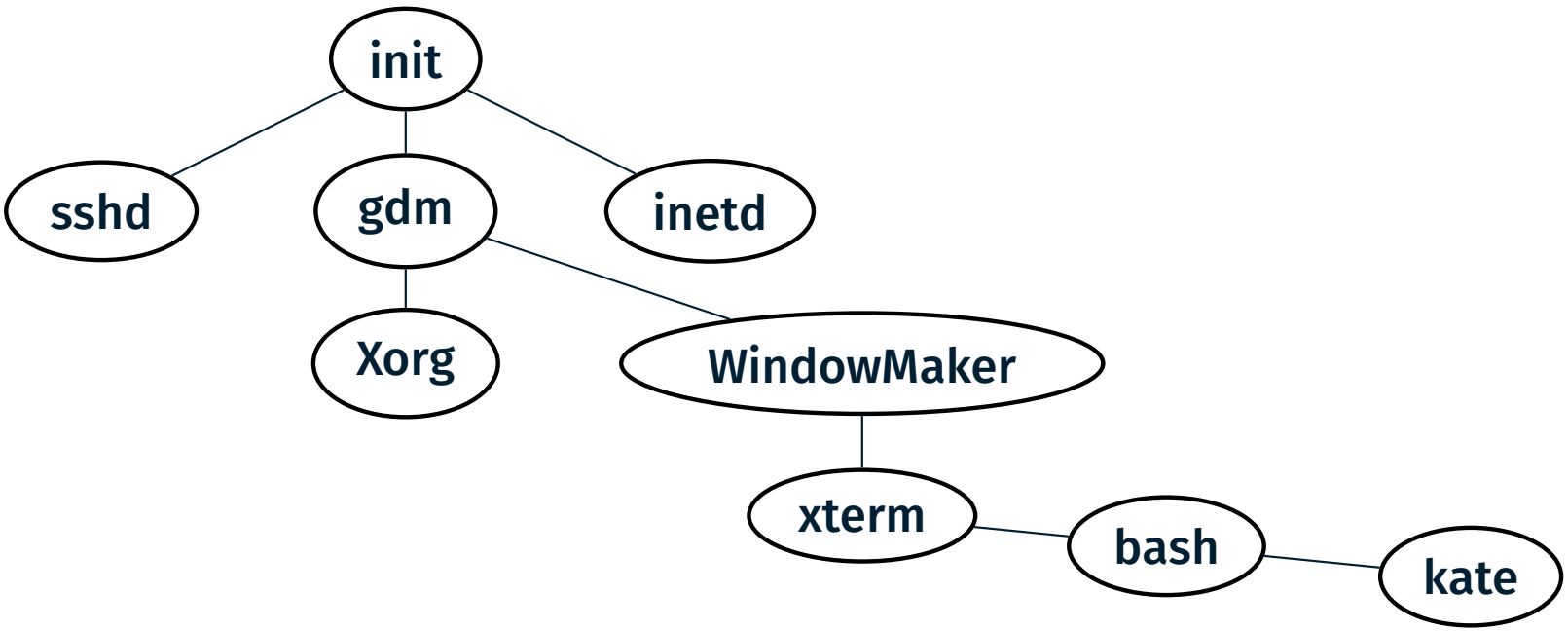
Prozesse

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: `ps(1)`, `pstree(1)`, `htop(1)`

Prozesshierarchie

- Zwischen Prozessen bestehen Eltern-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**

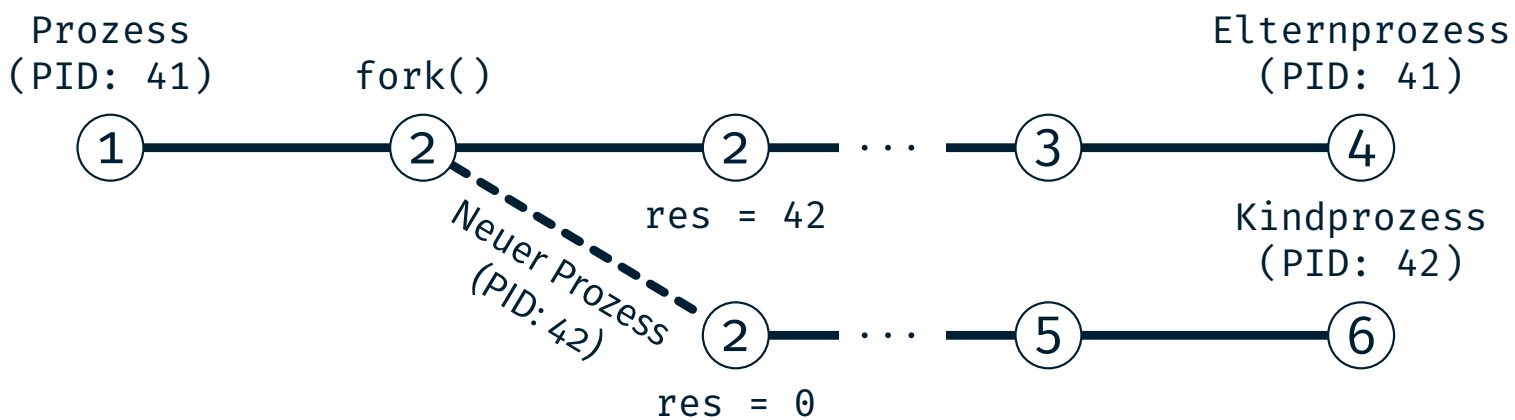
Kindprozess erzeugen (1)

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

- Erzeugt einen neuen Kindprozess
- Exakte Kopie des Elternteils:
  - Daten- und Stacksegment (Kopie)
  - Textsegment (gemeinsam genutzt)
  - Dateideskriptoren (geöffnete Dateien)
  - **Ausnahme:** Prozess-ID
- Eltern-/Kindprozess kehren beide aus dem `fork(2)` zurück
- Unterscheidbar am Rückgabewert von `fork(2)`
  - Elternteil: PID des Kindes
  - Kind: 0
  - Fehler: -1

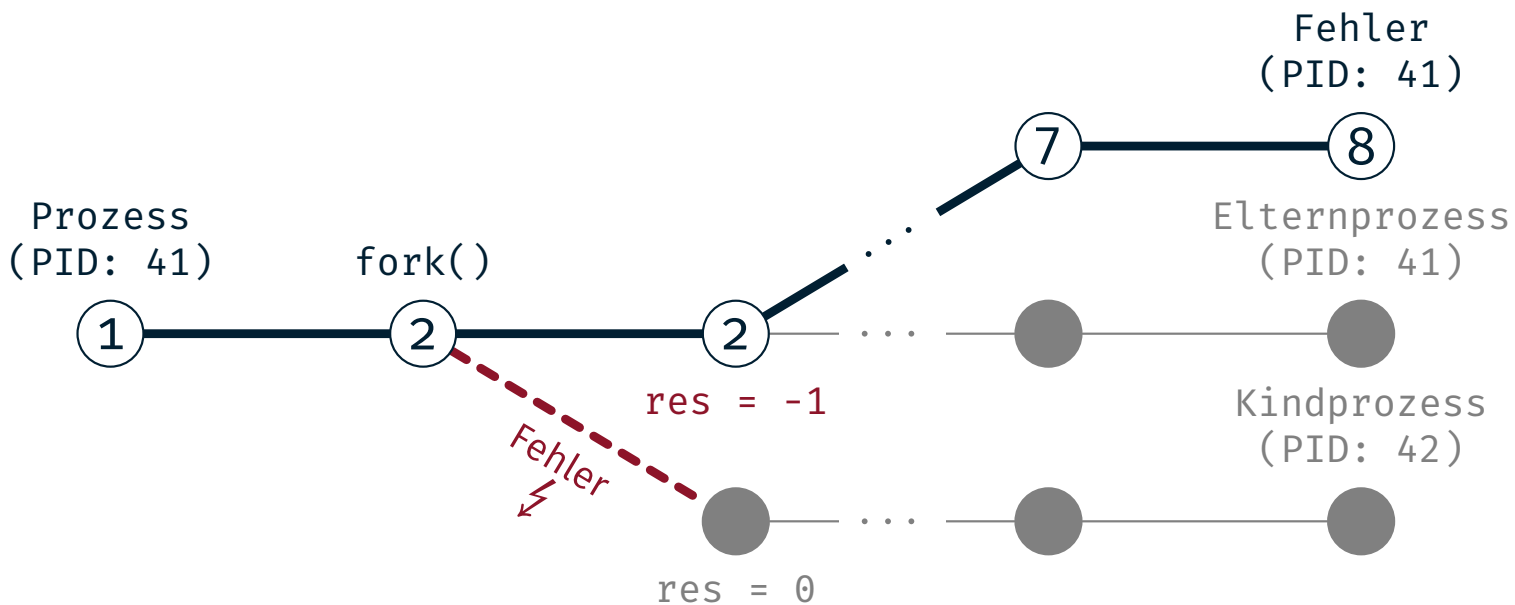
Kindprozess erzeugen (2)

```c
printf("Prozess (PID: %d)", getpid());
pid_t res = fork();
if(res > 0) {
    printf("Elternprozess (PID: %d)", getpid());
} else if(res == 0) {
    printf("Kindprozess (PID: %d)", getpid());
} else {
    printf("Fehler (PID: %d)", getpid());
    // [...] Fehlerbehandlung
}
```



Kindprozess erzeugen (2)

```
01 printf("Prozess (PID: %d)", getpid());
02 pid_t res = fork();  // Schlägt fehl ↯
03 if(res > 0) {
04     printf("Elternprozess (PID: %d)", getpid());
05 } else if(res == 0) {
06     printf("Kindprozess (PID: %d)", getpid());
07 } else {
08     printf("Fehler (PID: %d)", getpid());
09     // [...] Fehlerbehandlung
10 }
```



Auf Kindprozess warten (1)

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

- `wait(2)` blockiert bis ein beliebiger Kind-Prozess terminiert
- Rückgabewert
  - `> 0` Prozess-ID des Kindprozesses
  - `-1` Fehler
- Status enthält Grund des Terminierens:
  - `WIFEXITED(status)` `exit(3)` oder return aus `main()`
  - `WIFSIGNALED(status)` Prozess durch Signal abgebrochen
  - `WEXITSTATUS(status)` Exitstatus
  - `WTERMSIG(status)` Signalnummer
- Weitere Makros: siehe Dokumentation `wait(2)`

Auf Kindprozess warten (2)

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

- `waitpid(2)` blockiert bis bestimmter Kind-Prozess terminiert

  `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)`

Prozess beenden

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

- Beendet aktuellen Prozess mit angegebenem Exitstatus
- Gibt alle Ressourcen frei, die der Prozess belegt hat
  - Speicher
  - Dateideskriptoren
  - Prozessverwaltungsdaten
  - …
- Prozess geht in den *Zombie*-Zustand über
  - Ermöglicht Elternteil, auf Terminieren des Kindes zu reagieren
  - Zombie-Prozesse belegen Ressourcen

  ⇒ Elternprozess muss seine Zombies aufräumen
- Ist der Elternteil schon vor dem Kind terminiert:

⇒ Weiterreichen an `init`-Prozess und von diesem weggeräumt

Programm ausführen (1)

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

- Ersetzt das aktuell ausgeführte Programm im Prozess
  - **Wird ersetzt:** Text-, Daten- und Stacksegment
  - **Bleibt erhalten:** Dateideskriptoren, Arbeitsverzeichnis, …
- Aufrufparameter für `exec(3)`
  - Pfad des neuen Programmes
  - Argumente für die `main()`-Funktion
- Statische Zahl von Argumenten: `execl(3)`
- Dynamische Zahl von Argumenten: `execv(3)`
- Letztes Argument: `NULL`-Zeiger
- `exec(3)` kehrt nur im Fehlerfall zurück

PATH Umgebungsvariable

- Finden von ausführbaren Programmen mit PATH

```
01 $> cp dat dat-copy
02 $> ls
03 dat dat-copy                    # keine Datei 'cp'
04
05 $> echo $PATH                   # PATH enthält
06 /usr/local/bin:/usr/bin:/bin    #    - /usr/local/bin/
07                                 #    - /usr/bin/
08                                 #    - /bin/
09 $> which cp
10 /bin/cp                         # 'cp' liegt also in /bin/
11
12 $> ls /bin/                     # /bin/ enthält noch viele
13 [...]                           # weitere bekannte Programme
14 rm
15 cp
16 ls
17 [...]
```

Programm ausführen (2)

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

- Wie `execl(3)`/`execv(3)` mit Suche in PATH

Beispiele:

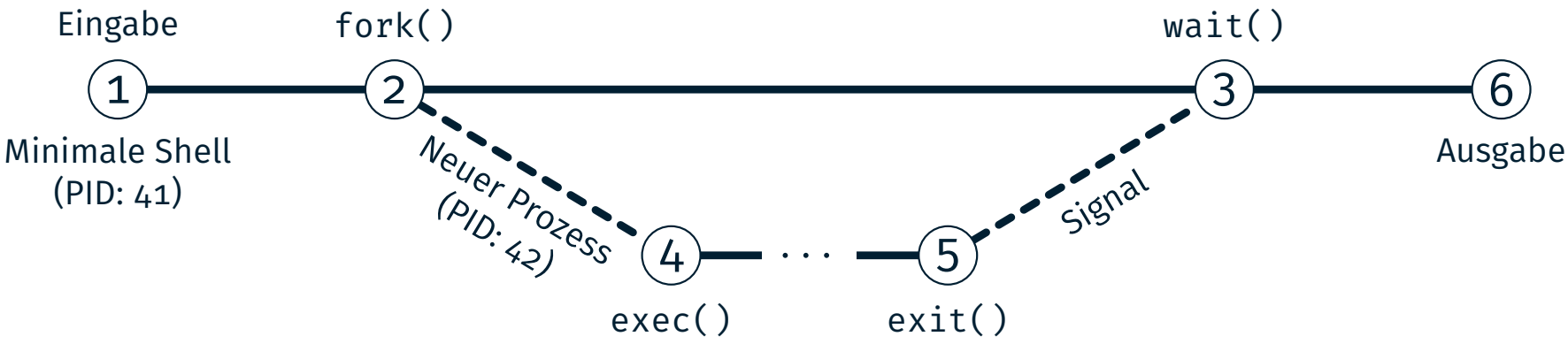
```
01 // absoluter Pfad und statische Liste von Argumenten
02 execl("/bin/cp", "/bin/cp", "x.txt", "y.txt", NULL);
03
04 // Suche in PATH und statischer Liste von Argumenten
05 execlp("cp", "cp", "x.txt", "y.txt", NULL);
06
07 // Suche in PATH und dynamischer Liste von Argumenten
08 char *args[] = { "cp", "dat", ..., "copy/", NULL };
09 execvp(args[0], args);
```

Beispiel: fork(2), exec(3) und wait(2)

```
01 static void die(const char *reason) {
02     perror(reason); exit(EXIT_FAILURE);
03 }
04
05 // [...] Prozess läuft
06 pid_t res = fork();
07 if(res > 0) { // Elternprozess
08     int status;
09     pid_t term_pid = wait(&status);
10     if(term_pid == -1) { // Fehler in wait()
11         die("wait");
12     } else {
13         printf("Child %d terminated\n", term_pid);
14     }
15 } else if(res == 0) { // Kindprozess
16     execlp("cp", "cp", "dat", "dat-copy", NULL);
17     // Fehler in execlp(3)
18     die("execlp");
19 } else {  // Fehler -- Kein Kindprozess erzeugt
20     die("fork");
21 }
```

Funktionsweise einer minimalen Shell

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



Einlesen von der Standard-Eingabe mit fgets

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

- `fgets(3)` liest eine Zeile vom übergebenen Kanal
- `'\n'` wird mitgespeichert
- Maximal `size-1` Zeichen + finales `'\0'`
- Im Fehlerfall oder EOF wird `NULL` zurückgegeben

⇒ Unterscheidung `ferror(3)` oder `feof(3)`

```
01 char buf[23];
02 while (fgets(buf, 23, stdin) != NULL) {
03     // buf enthält Zeile
04 }
05
06 if(ferror(stdin)) {  // Fehler
07     [...]
08 }
```

Stringmanipulation mit `strtok(3)`

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

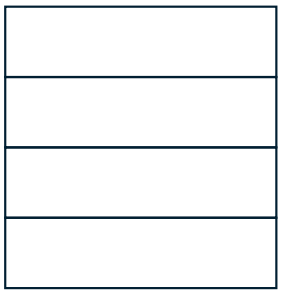
- `strtok(3)` teilt einen String in Tokens auf
- Tokens werden durch Trennzeichen getrennt
- Liefert bei jedem Aufruf Zeiger auf nächsten Token
- `delim:` String, der alle Trennzeichen enthält (z.B. `" \t\n"`)
- `str:`

  erster Aufruf Zeiger auf zu teilenden String

  alle Folgeaufrufe `NULL`

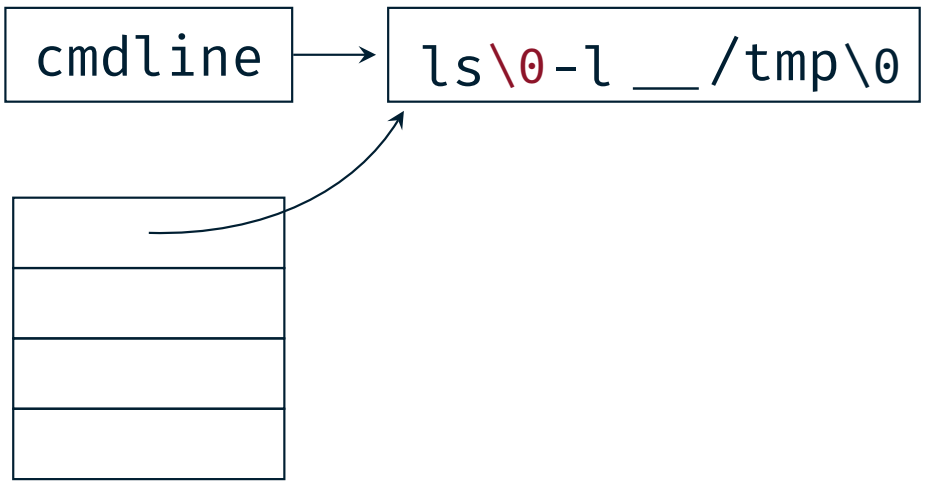
- Aufeinanderfolgende Trennzeichen werden übersprungen
- Trennzeichen nach Token werden durch `'\0'` ersetzt
- Am Ende des Strings: `strtok(3)` gibt `NULL` zurück

Stringmanipulation mit `strtok(3)`



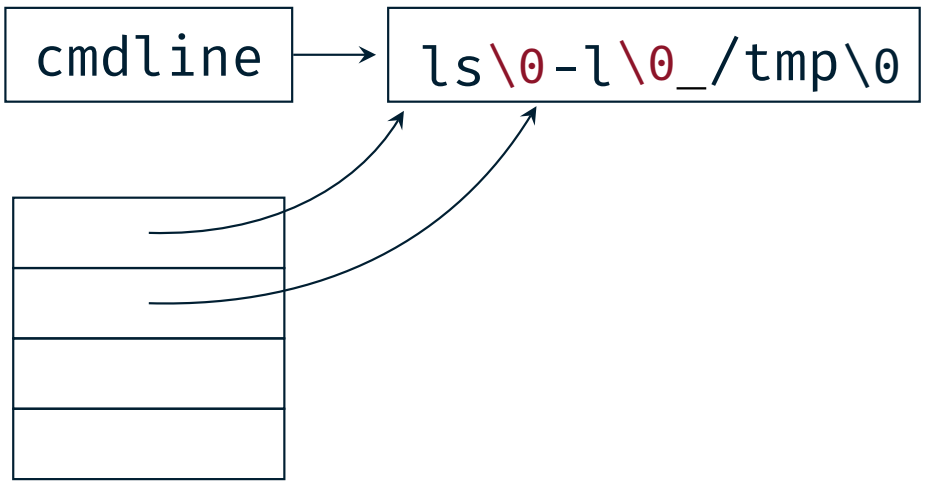
```
01 char cmdline[] = "ls -l  /tmp";
02 char *a[4];
03 a[0] = strtok(cmdline, " ");
04 a[1] = strtok(NULL, " ");
05 a[2] = strtok(NULL, " ");
06 a[3] = strtok(NULL, " ");
```

Stringmanipulation mit `strtok(3)`



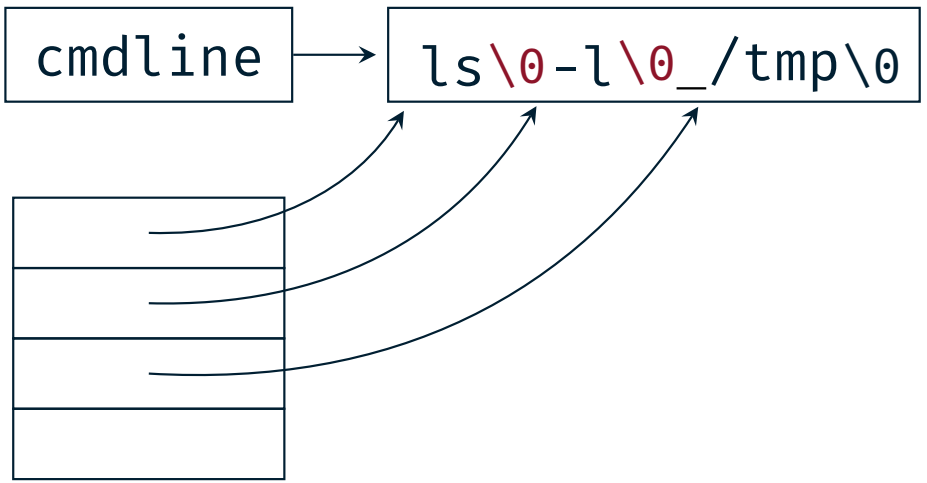

```
01 char cmdline[] = "ls -l  /tmp";
02 char *a[4];
03 a[0] = strtok(cmdline, " ");
04 a[1] = strtok(NULL, " ");
05 a[2] = strtok(NULL, " ");
06 a[3] = strtok(NULL, " ");
```

Stringmanipulation mit `strtok(3)`



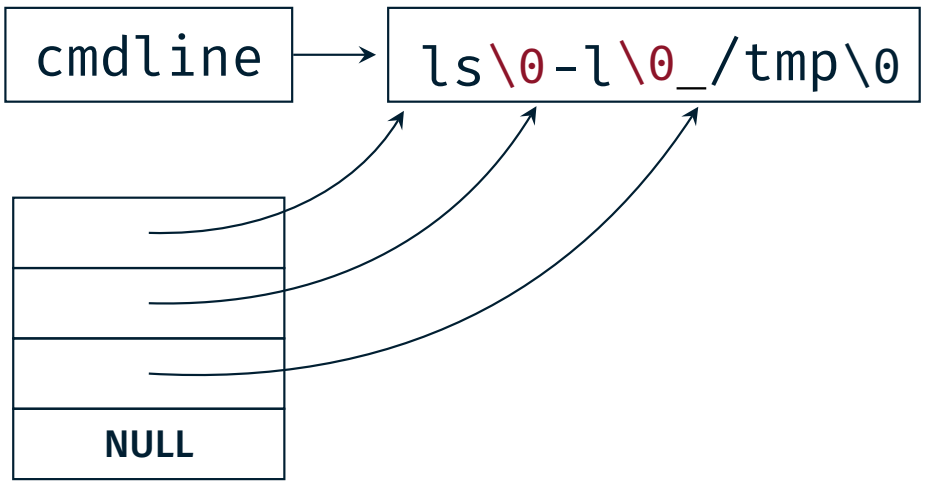

```
01 char cmdline[] = "ls -l  /tmp";
02 char *a[4];
03 a[0] = strtok(cmdline, " ");
04 a[1] = strtok(NULL, " ");
05 a[2] = strtok(NULL, " ");
06 a[3] = strtok(NULL, " ");
```

Stringmanipulation mit `strtok(3)`




```
01 char cmdline[] = "ls -l  /tmp";
02 char *a[4];
03 a[0] = strtok(cmdline, " ");
04 a[1] = strtok(NULL, " ");
05 a[2] = strtok(NULL, " ");
06 a[3] = strtok(NULL, " ");
```

Stringmanipulation mit `strtok(3)`




```
01 char cmdline[] = "ls -l  /tmp";
02 char *a[4];
03 a[0] = strtok(cmdline, " ");
04 a[1] = strtok(NULL, " ");
05 a[2] = strtok(NULL, " ");
06 a[3] = strtok(NULL, " ");
```

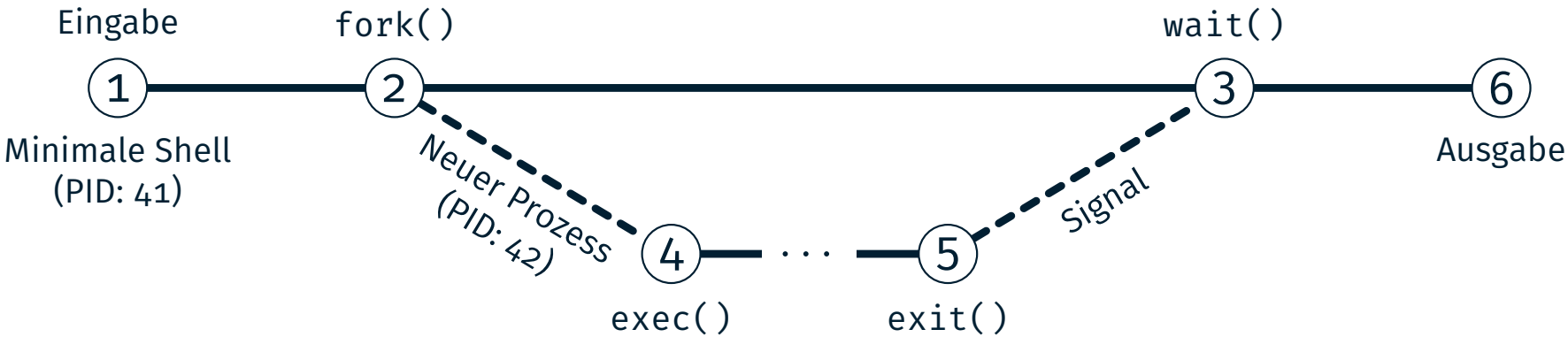
Aufgabe: `mish` - Teil a)

- Einfache Shell (**mi**ni **sh**ell) zum Ausführen von Kommandos
- Typischer Ablauf:
  - Ausgabe des Prompts
  - Warten auf Eingaben
  - Zerlegen der Eingaben
    - Kommandoname
    - Argumente
  - Neuen Prozess erstellen
    - **Elternteil:** Warten auf Terminierung des Kindes
    - **Kind:** Ausführen des Kommandos
  - Ausgabe des Exitstatus

Aufgabe: `mish` - Teil a)

- Wiederholung: Basisablauf einer minimalen Shell

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



Aufgabe: mish - Teil a)

Beispiele:

```
01 # Reguläre Beendigung durch Exit (Exitstatus = 0)
02 mish> ls -l
03 ...
04 Exit status [2110] = 0
05
06 # Ungültige/Leere Eingaben
07 mish>
08 mish> foo
09 foo: No such file or directory
10 Exit status [7342] = 1
11
12 # Beendigung durch Signal (hier SIGINT = 2)
13 mish> sleep 10
14 Signal [1302] = 2
```

Einschub: `fflush(3)`

- Prompt druckt kein `'\n'`
- Standardbibliothek puffert `stdout` zeilenweise

⇒ Nach Ausgabe den Zeilenpuffers mittels `fflush(3)` leeren

Testprogramme

- Testprogramme: `/proj/i4spic/<idm>/pub/aufgabe8/`
- `spic-wait` (ohne Parameter)

```
01 mish> /proj/i4spic/[...]/spic-wait
02 [...]
03 - send 'SIGPIPE' to this process
04   Command: kill -PIPE 3372
05   Expected Output: Signal [3372] = 13
06
07 [...]
08
09 Signal [3372] = 13
10 mish>
```

```
01
02
03
04
05
06
07
08 $> kill -PIPE 3372
09
10
```

- `spic-wait (mit Parameter)`

```
01 mish> /proj/i4spic/<idm>/pub/aufgabe8/spic-wait 15
02 Sending signal 15 (Terminated) to myself (PID: 4239)
03 Signal [4239] = 15
04 mish>
```

Testprogramme

- Testprogramme: `/proj/i4spic/<idm>/pub/aufgabe8/`
- `spic-wait` (ohne Parameter)

```
01 mish> /proj/i4spic/[...]/spic-wait
02 [...]
03 - send 'SIGPIPE' to this process
04   Command: kill -PIPE 3372
05   Expected Output: Signal [3372] = 13
06
07 [...]
08
09 Signal [3372] = 13
10 mish>
```

```
01
02
03
04
05
06
07
08 $> kill -PIPE 3372
09
10
```

- `spic-wait (mit Parameter)`

```
01 mish> /proj/i4spic/<idm>/pub/aufgabe8/spic-wait 15
02 Sending signal 15 (Terminated) to myself (PID: 4239)
03 Signal [4239] = 15
04 mish>
```

Testprogramme

- Testprogramme: `/proj/i4spic/<idm>/pub/aufgabe8/`
- `spic-wait` (ohne Parameter)

```
01 mish> /proj/i4spic/[...]/spic-wait
02 [...]
03 - send 'SIGPIPE' to this process
04   Command: kill -PIPE 3372
05   Expected Output: Signal [3372] = 13
06
07 [...]
08
09 Signal [3372] = 13
10 mish>
```

```
01
02
03
04
05
06
07
08 $> kill -PIPE 3372
09
10
```

- `spic-wait (mit Parameter)`

```
01 mish> /proj/i4spic/<idm>/pub/aufgabe8/spic-wait 15
02 Sending signal 15 (Terminated) to myself (PID: 4239)
03 Signal [4239] = 15
04 mish>
```

Testprogramme

- `spic-exit`

```
01 mish> /proj/i4spic/<idm>/pub/aufgabe8/spic-exit 12
02 Exiting with status 12
03 Exit status [6272] = 12
04 mish>
```

Vorlage

```
01 // DESCRIPTION:
02 //   printStatus() examines the termination of a process and
03 //   prints the source of the exit (signal or exit) and the
04 //   exit code or signal number, respectively.
05 //
06 // PARAMETER:
07 //   pid:    PID of the exited child process
08 //   status: Status bits as retrieved from waitpid(2)
09 //
10 static void printStatus(pid_t pid, int status) {
11     // TODO IMPLEMENT
12 }
```

- `/proj/i4spic/<idm>/pub/aufgabe8/mish_vorlage.c`
- Die Vorlage enthält jedoch **nicht**:
  - Alle Funktionen, Funktionalitätsbeschreibungen, Variablen etc.
- Vorlage ersetzt nicht eigenständiges Nachdenken zur Struktur
- Während der Entwicklung kann es sinnvoll sein, das `Werror` Flag im Makefile wegzulassen

Hands-on: run

Screencast: `https://www.video.uni-erlangen.de/clip/id/19832`

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`
- (System-) Aufrufe: `fork(2)`, `exec(3)`, `wait(2)`
- Fehlerbehandlung beachten