

Übungen zu Systemprogrammierung 2

Ü2 – IPC mit Sockets, Signale

Wintersemester 2025/26

Jürgen Kleinöder, Thomas Preisner, Tobias Häberlein, Ole Wiedemann

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



Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware



Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät



- 2.1 IPC-Schnittstelle: Server
- 2.2 UNIX-Signale
- 2.3 Signal-API von UNIX
- 2.4 Einsammeln von Zombies
- 2.5 Makefiles – Teil 3
- 2.6 Aufgabe 2: `sister`
- 2.7 Gelerntes anwenden



2.1 IPC-Schnittstelle: Server

2.2 UNIX-Signale

2.3 Signal-API von UNIX

2.4 Einsammeln von Zombies

2.5 Makefiles – Teil 3

2.6 Aufgabe 2: `sister`

2.7 Gelerntes anwenden



- **Ausgangssituation:** Socket wurde bereits erstellt (`socket(3p)`)
- Nach seiner Erzeugung muss der Socket zunächst an eine Adresse *gebunden* werden, bevor er verwendet werden kann
- `bind(3p)` stellt eine generische Schnittstelle zum Binden von Sockets in unterschiedlichen Domänen bereit:

```
int bind(int sockfd, const struct sockaddr *addr, socklen_t addrlen);
```

- `sockfd`: Socket-Deskriptor
- `addr`: protokollspezifische Adresse
 - Socket-Interface (`<sys/socket.h>`) ist zunächst protokollunabhängig:

```
struct sockaddr {  
    sa_family_t sa_family; // Adressfamilie  
    char sa_data[];       // Adresse (variable Länge)  
};
```

- „Klassenvererbung für Arme“; i. d. R. Cast notwendig
- `addrlen`: Länge der konkret übergebenen Struktur in Bytes

- Name durch IPv4-Adresse und Port-Nummer definiert:

```
struct sockaddr_in {
    sa_family_t    sin_family; // = AF_INET
    in_port_t      sin_port;   // Port
    struct in_addr sin_addr;    // Internet-Adresse
};
```

- `sin_port`: Port-Nummer
- `sin_addr`: IPv4-Adresse
 - `INADDR_ANY`: wenn Socket auf allen lokalen Adressen (z. B. allen Netzwerkschnittstellen) Verbindungen akzeptieren soll
- `sin_port` und `sin_addr` müssen in Netzwerk-Byteorder vorliegen!
 - Umwandlung mittels `htons(3)`, `htonl(3p)`: konvertiert Datenwort von Host-spezifischer Byteorder in Netzwerk-Byteorder – bzw. zurück:

```
uint32_t htonl(uint32_t hostlong);
uint16_t htons(uint16_t hostshort);
uint32_t ntohl(uint32_t netlong);
uint16_t ntohs(uint16_t netshort);
```

- Name durch IPv6-Adresse und Port-Nummer definiert:

```
struct sockaddr_in6 {
    sa_family_t    sin6_family;    // = AF_INET6
    in_port_t      sin6_port;      // Port-Nummer
    uint32_t       sin6_flowinfo;  // = 0
    struct in6_addr sin6_addr;     // IPv6-Adresse
    uint32_t       sin6_scope_id;  // = 0
};

struct in6_addr {
    unsigned char  s6_addr[16];
};
```

- `sin6_port`: Port-Nummer
- `sin6_addr`: IPv6-Adresse
 - `in6addr_any`: auf allen lokalen Adressen Verbindungen akzeptieren
- `sin6_port` muss in Netzwerk-Byteorder vorliegen (`htons(3p)`)
- `in6_addr`-Struktur ist byteweise definiert, deswegen keine Konvertierung nötig



- Verbindungsannahme vorbereiten mit `listen(3p)`:

```
int listen(int sockfd, int backlog);
```

- `backlog`: (Unverbindliche) Größe der Warteschlange, in der eingehende Verbindungswünsche zwischengepuffert werden
 - Bei voller Warteschlange werden Verbindungsanfragen zurückgewiesen
 - Maximal mögliche Größe: `SOMAXCONN`



- Verbindung annehmen mit `accept(3p)`:

```
int accept(int sockfd, struct sockaddr *addr, socklen_t *addrlen);
```

- `addr, addrlen`: Ausgabeparameter zum Ermitteln der Adresse des Clients
 - Bei Desinteresse zweimal `NULL` übergeben
- Entnimmt die vorderste Verbindungsanfrage aus der Warteschlange
 - Blockiert bei leerer Warteschlange
- Erzeugt einen neuen Socket und liefert ihn als Rückgabewert
 - Kommunikation mit dem Client über diesen neuen Socket
 - Annahme weiterer Verbindungen über den ursprünglichen Socket



Server

Client

socket(3p)

getaddrinfo(3p)

bind(3p)

socket(3p)

listen(3p)

accept(3p)

Verbindungsaufbau



connect(3p)

read(3p) /
write(3p)

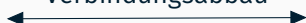
Kommunikation



read(3p) /
write(3p)

close(3p)

Verbindungsabbau



close(3p)

Nicht vergessen

Fehlerabfragen

```
int listenSock = socket(AF_INET6, SOCK_STREAM, 0);  
  
// AF_INET6 akzeptiert auch automatisch IPv4-Verbindungen,  
// falls vom OS unterstützt (z.B. Linux)  
struct sockaddr_in6 name = {  
    .sin6_family = AF_INET6,  
    .sin6_port   = htons(1112),  
    .sin6_addr   = in6addr_any,  
};  
bind(listenSock, (struct sockaddr *) &name, sizeof(name));  
  
listen(listenSock, SOMAXCONN);  
  
while (1) {  
    int clientSock = accept(listenSock, NULL, NULL);  
    // handle connection  
    close(clientSock);  
}
```

```
while (1) {  
    int clientSock = accept(listenSock, NULL, NULL);  
    // handle connection  
    close(clientSock);  
}
```

■ Limitierungen:

- Neue Verbindung kann erst nach vollständiger Abarbeitung der vorherigen Anfrage angenommen werden
- Monopolisierung des Dienstes möglich (*Denial of Service*)!

■ Mögliche Ansätze zur Abhilfe:

1. Mehrere Prozesse

- Anfrage wird durch Kindprozess bearbeitet

2. Mehrere Threads

- Anfrage wird durch einen Thread im gleichen Prozess bearbeitet



- Nach Beendigung des Server-Prozesses erlaubt das Betriebssystem kein sofortiges `bind(3p)` an den selben Port
 - Erst nach Timeout erneut möglich
- Testen und Debuggen eines Server-Programms dadurch stark erschwert
- Lösungsmöglichkeiten:
 1. Bei jedem Start einen anderen Port verwenden – doof!
 2. Sofortige Wiederverwendung des Ports forcieren:

```
int sock = socket(...);  
...  
int flag = 1;  
setsockopt(sock, SOL_SOCKET, SO_REUSEADDR, &flag, sizeof(flag));  
// Fehlerbehandlung!  
...  
bind(sock, ...);
```



2.1 IPC-Schnittstelle: Server

2.2 UNIX-Signale

2.3 Signal-API von UNIX

2.4 Einsammeln von Zombies

2.5 Makefiles – Teil 3

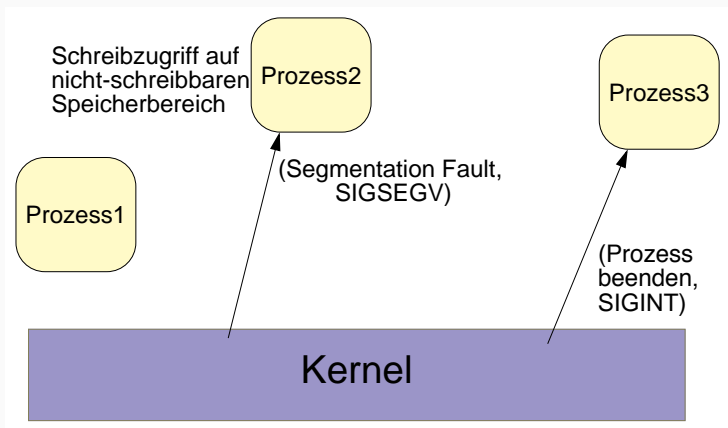
2.6 Aufgabe 2: `sister`

2.7 Gelerntes anwenden



- Essenzielles Betriebssystemkonzept: synchrone/asynchrone Programmunterbrechungen (*Traps* bzw. *Interrupts*)
 - Zweck: Signalisierung von Ereignissen
 - Abwicklung zwischen Hardware und Betriebssystem
 - Transparent für die Anwendung
- **UNIX-Signale:** Nachbildung des Konzepts auf Anwendungsebene
 - Abwicklung zwischen Betriebssystem und Anwendung
 - Unabhängig von der Hardware

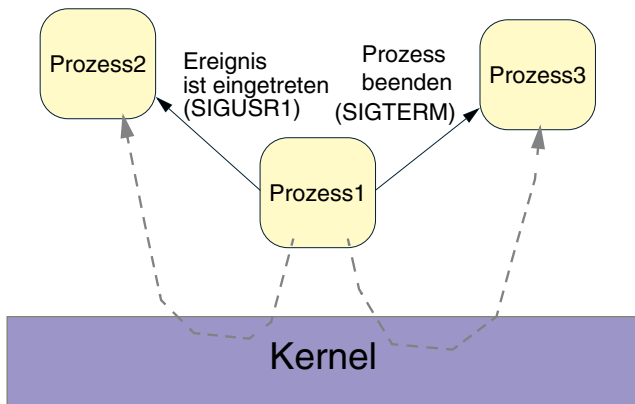
■ Anwendungsfall 1: Signalisierungen durch den Betriebssystemkern



- Synchrone Signale: unmittelbar durch Aktivität des Prozesses ausgelöst
- Asynchrone Signale: „von außen“ ausgelöst

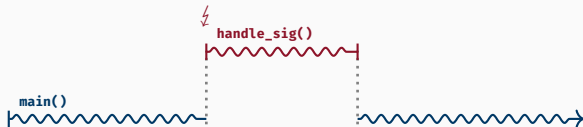


- **Anwendungsfall 2:** primitive „Kommunikation“ zwischen Prozessen



- Asynchron zum eigentlichen Programmablauf

- *Ign*
 - Ignorieren des Signals
- *Core*
 - Erzeugen eines Core-Dumps (Speicherabbild + Registerkontext) und Beenden des Prozesses
- *Term*
 - Beenden des Prozesses, ohne einen Core-Dump zu erzeugen
 - Standardreaktion für die meisten Signale
- Signal-Behandlungsfunktion
 - Aufruf einer vorher festgelegten Funktion, danach Fortsetzen des Prozesses:





Standardverhalten: *Term*

SIGINT	Beenden durchs Terminal (Ctrl-C)
SIGTERM	Standardsignal von kill(1)
SIGKILL	„Tötet“ den Prozess; nicht abfangbar
SIGPIPE	Schreiben auf Pipe oder Socket, nachdem die Gegenseite geschlossen wurde

Standardverhalten: *Core Dump*

SIGSEGV	Segmentation Violation; illegaler Speicherzugriff
SIGABRT	Abort-Signal; entsteht z. B. durch Aufruf von abort(3p)
SIGFPE	Floating-Point Exception (Division durch 0, Überlauf, ...)

Standardverhalten: *Ignore*

SIGCHLD	Status eines Kindprozesses hat sich geändert
----------------	--



2.1 IPC-Schnittstelle: Server

2.2 UNIX-Signale

2.3 Signal-API von UNIX

2.4 Einsammeln von Zombies

2.5 Makefiles – Teil 3

2.6 Aufgabe 2: `sister`

2.7 Gelerntes anwenden

■ Prototyp:

```
#include <signal.h>

int sigaction(int signum, const struct sigaction *act,
              struct sigaction *oldact);
```

- `signum`: Signalnummer
 - `act`: Neue Behandlung für dieses Signal
 - `oldact`: Bisherige Behandlung dieses Signals (Ausgabeparameter)
- Behandlung bleibt aktiv bis neue mit `sigaction()` installiert wird
- `sigaction`-Struktur:

```
struct sigaction {
    void (*sa_handler)(int); // Behandlungsfunktion
    sigset_t sa_mask; // Blockierte Signale
    int sa_flags; // Optionen
};
```

■ sigaction-Struktur:

```
struct sigaction {  
    void (*sa_handler)(int); // Behandlungsfunktion  
    sigset_t sa_mask; // Blockierte Signale  
    int sa_flags; // Optionen  
};
```

■ Über sa_handler kann die Signalbehandlung eingestellt werden:

- **SIG_IGN:** Signal ignorieren
- **SIG_DFL:** Standard-Signalbehandlung einstellen
- *Funktionsadresse:* Funktion wird in der Signalbehandlung aufgerufen

■ sigaction-Struktur:

```
struct sigaction {  
    void (*sa_handler)(int); // Behandlungsfunktion  
    sigset_t sa_mask; // Blockierte Signale  
    int sa_flags; // Optionen  
};
```

- Über sa_handler kann die Signalbehandlung eingestellt werden:
 - SIG_IGN: Signal ignorieren
 - SIG_DFL: Standard-Signalbehandlung einstellen
 - Funktionsadresse: Funktion wird in der Signalbehandlung aufgerufen
- **Achtung:** SIG_IGN \neq Ignorieren als Standardverhalten eines Signals
 - Explizites Setzen von SIG_IGN für SIGCHLD räumt automatisch Zombie-Prozesse auf (Siehe S. 26)
 - Das Standardverhalten (SIG_DFL) ignoriert das Signal zwar auch, räumt aber **keine** Zombie-Prozesse auf

■ sigaction-Struktur:

```
struct sigaction {  
    void      (*sa_handler)(int); // Behandlungsfunktion  
    sigset_t  sa_mask;           // Blockierte Signale  
    int       sa_flags;         // Optionen  
};
```

- Trifft während der Signalbehandlung dasselbe Signal erneut ein, wird dieses bis zum Ende der Behandlung verzögert (*blockiert*)
 - Maximal ein Ereignis wird zwischengespeichert
 - Mit sa_mask kann man **weitere** Signale blockieren
 - sa_mask muss mit sigemptyset(3p) oder sigfillset(3p) initialisiert werden
- Hilfsfunktionen zum Auslesen und Modifizieren einer Signal-Maske:
 - sigaddset(3p)**: Bestimmtes Signal zur Maske hinzufügen
 - sigdelset(3p)**: Bestimmtes Signal aus Maske entfernen
 - sigemptyset(3p)**: Alle Signale aus Maske entfernen
 - sigfillset(3p)**: Alle Signale in Maske aufnehmen
 - sigismember(3p)**: Abfrage, ob bestimmtes Signal in Maske enthalten ist

■ sigaction-Struktur:

```
struct sigaction {  
    void      (*sa_handler)(int); // Behandlungsfunktion  
    sigset_t   sa_mask;           // Blockierte Signale  
    int       sa_flags;           // Optionen  
};
```

- Beeinflussung des Verhaltens bei Signalempfang durch sa_flags (0 oder Veroderung von Flag-Konstanten):
 - SA_NOCLDWAIT und SA_NOCLDSTOP: Siehe S. 26
 - SA_RESTART: durch das Signal unterbrochene Systemaufrufe werden automatisch neu aufgesetzt (siehe nächste Folie)
- Weitere Flags siehe sigaction(3p)

- Signalbehandlung muss im Benutzerkontext durchgeführt werden
- ? Was geschieht, wenn ein Prozess ein Signal erhält, während er sich in einem Systemaufruf befindet?

- Signalbehandlung muss im Benutzerkontext durchgeführt werden
- ? Was geschieht, wenn ein Prozess ein Signal erhält, während er sich in einem Systemaufruf befindet?
- Nicht-blockierender Systemaufruf:
 - Signalbehandlung wird durchgeführt, sobald der Kontrollfluss aus dem Kern zurückkehrt
- Blockierender Systemaufruf:
 - **Problem:** Die Blockade kann beliebig lang dauern, z. B. beim Warten auf eingehende Verbindungen mit `accept(3p)`
 - Die Signalbehandlung indefinit hinauszuzögern, ist keine gute Idee

- Signalbehandlung muss im Benutzerkontext durchgeführt werden
- ? Was geschieht, wenn ein Prozess ein Signal erhält, während er sich in einem Systemaufruf befindet?
- Nicht-blockierender Systemaufruf:
 - Signalbehandlung wird durchgeführt, sobald der Kontrollfluss aus dem Kern zurückkehrt
- Blockierender Systemaufruf:
 - **Problem:** Die Blockade kann beliebig lang dauern, z. B. beim Warten auf eingehende Verbindungen mit `accept(3p)`
 - Die Signalbehandlung indefinit hinauszuzögern, ist keine gute Idee
 - **Lösung:** Systemaufruf wird abgebrochen und kehrt mit `errno = EINTR` zurück, Signal wird sofort behandelt
 - **Vereinfachung:** Setzt man das Flag `SA_RESTART`, kehrt der Systemaufruf nicht mit Fehler zurück, sondern wird nach der Signalbehandlung automatisch wiederholt

- Systemaufruf `kill(3p)`:

```
int kill(pid_t pid, int sig);
```

- Shell-Kommando `kill(1)`:

- Sendet ein Signal an einen bestimmten Prozess
- z.B. `user@host:~$ kill -USR1 <pid>`

- Shell-Kommando `pkill(1)`:

- Sendet ein Signal an alle Prozesse, die ein bestimmtes Programm ausführen
- z.B. `user@host:~$ pkill -USR1 <programmname>`



2.1 IPC-Schnittstelle: Server

2.2 UNIX-Signale

2.3 Signal-API von UNIX

2.4 Einsammeln von Zombies

2.5 Makefiles – Teil 3

2.6 Aufgabe 2: `sister`

2.7 Gelerntes anwenden



- Stirbt ein Kindprozess, so erhält der Elternprozess das Signal **SIGCHLD** vom Kernel
 - Damit ist sofortiges Aufsammeln von Zombieprozessen möglich



- Stirbt ein Kindprozess, so erhält der Elternprozess das Signal **SIGCHLD** vom Kernel
 - Damit ist sofortiges Aufsammeln von Zombieprozessen möglich
- **Variante 1:** Aufruf von `waitpid(3p)` im Signalhandler
 - Aufruf in Schleife notwendig – während der Signalbehandlung könnten weitere Kindprozesse sterben



- Stirbt ein Kindprozess, so erhält der Elternprozess das Signal `SIGCHLD` vom Kernel
 - Damit ist sofortiges Aufsammeln von Zombieprozessen möglich
- **Variante 1:** Aufruf von `waitpid(3p)` im Signalhandler
 - Aufruf in Schleife notwendig – während der Signalbehandlung könnten weitere Kindprozesse sterben
- **Variante 2:** Signalhandler für `SIGCHLD` auf `SIG_DFL` setzen und in den `sa_flags` den Wert `SA_NOCLDWAIT` setzen



- Stirbt ein Kindprozess, so erhält der Elternprozess das Signal `SIGCHLD` vom Kernel
 - Damit ist sofortiges Aufsammeln von Zombieprozessen möglich
- **Variante 1:** Aufruf von `waitpid(3p)` im Signalhandler
 - Aufruf in Schleife notwendig – während der Signalbehandlung könnten weitere Kindprozesse sterben
- **Variante 2:** Signalhandler für `SIGCHLD` auf `SIG_DFL` setzen und in den `sa_flags` den Wert `SA_NOCLDWAIT` setzen
 - Das Flag `SA_NOCLDSTOP` bewirkt, dass `SIGCHLD` nur gesendet wird, wenn ein Kindprozess **terminiert**
 - Signal wird nicht gesendet, wenn Prozess nur gestoppt oder wiederaufgenommen wird



- Stirbt ein Kindprozess, so erhält der Elternprozess das Signal `SIGCHLD` vom Kernel
 - Damit ist sofortiges Aufsammeln von Zombieprozessen möglich
- **Variante 1:** Aufruf von `waitpid(3p)` im Signalhandler
 - Aufruf in Schleife notwendig – während der Signalbehandlung könnten weitere Kindprozesse sterben
- **Variante 2:** Signalhandler für `SIGCHLD` auf `SIG_DFL` setzen und in den `sa_flags` den Wert `SA_NOCLDWAIT` setzen
 - Das Flag `SA_NOCLDSTOP` bewirkt, dass `SIGCHLD` nur gesendet wird, wenn ein Kindprozess **terminiert**
 - Signal wird nicht gesendet, wenn Prozess nur gestoppt oder wiederaufgenommen wird
- **Variante 3:** Signalhandler für `SIGCHLD` auf `SIG_IGN` setzen



2.1 IPC-Schnittstelle: Server

2.2 UNIX-Signale

2.3 Signal-API von UNIX

2.4 Einsammeln von Zombies

2.5 Makefiles – Teil 3

2.6 Aufgabe 2: `sister`

2.7 Gelerntes anwenden



- **\$@** Name des Targets (hier: test)

```
test: test.c
    $(CC) $(CFLAGS) $(LDFLAGS) -o $@ test.c
```

- **\$<** Name der ersten Abhängigkeit (hier: test.c)

```
test.o: test.c test.h
    $(CC) $(CFLAGS) -c $<
```

- **\$^** Namen aller Abhängigkeiten (hier: test.o func.o)
 - Achtung: GNU-Erweiterung, nicht SUSv4-konform!
 - Darf in SP trotzdem verwendet werden

```
test: test.o func.o
    $(CC) $(CFLAGS) $(LDFLAGS) -o $@ $^
```



- Allgemeine Regel zur Erzeugung einer Datei mit einer bestimmten Endung aus einer gleichnamigen Datei mit einer anderen Endung
- Beispiel: Erzeugung von .o-Dateien aus .c-Dateien

```
%o: %.c  
$(CC) $(CFLAGS) -c $<
```

- Regeln ohne Kommandos können Abhängigkeiten ergänzen

```
test.o: test.c test.h func.h
```

- Die Pattern-Regel wird weiterhin zur Erzeugung herangezogen

- Explizite Regeln überschreiben die Pattern-Regeln

```
test.o: test.c test.h func.h  
$(CC) $(CFLAGS) $(LDFLAGS) -DXYZ -c $<
```



Hinweis

Die vorgestellten automatischen Variablen und Pattern-Regeln müssen ab der kommenden Übung verwendet werden.

- Warum?
 - Vermeidung von doppeltem Code
 - Pattern-Regeln sind mächtiges Werkzeug und werden in vielen echten Projekten verwendet



2.1 IPC-Schnittstelle: Server

2.2 UNIX-Signale

2.3 Signal-API von UNIX

2.4 Einsammeln von Zombies

2.5 Makefiles – Teil 3

2.6 Aufgabe 2: sister

2.7 Gelerntes anwenden



- Einfacher HTTP-Webserver zum Ausliefern statischer HTML-Seiten innerhalb eines Verzeichnisbaums (*WWW-Pfad*)
- Abarbeitung der Anfragen erfolgt in eigenem Prozess (`fork(3p)`)
- Modularer Aufbau (vgl. SP1#SS25 A/II 7 Programmstruktur und Module)
 - Wiederverwendung einzelner Module in Aufgabe 5: mother

- **Wiederholung:** Ein Modul besteht aus ...
 - Öffentlicher Schnittstelle (Header-Datei)
 - Konkreter Implementierung dieser Schnittstelle (C-Datei)
- Durch diese Trennung ist es möglich die Implementierung auszutauschen, ohne die Schnittstelle zu verändern
 - Module, die die öffentliche Schnittstelle verwenden, müssen nicht angepasst werden, wenn deren konkrete Implementierung geändert wird

Achtung

Es dürfen keine Annahmen über eine Implementierung getroffen werden, die über die Beschreibung in der Header-Datei hinausgehen. Die Verwendung eines Moduls muss ohne Kenntnis der eigentlichen Implementierung möglich sein.



Hauptmodul (`sister.c`)

- Implementiert die `main()`-Funktion:
 - Initialisierung des Verbindungs- und `cmdline`-Moduls
 - Vorbereiten der Interprozesskommunikation
 - Annehmen von Verbindungen
 - Übergabe angenommener Verbindungen an das Verbindungsmodul

Verbindungsmodul (`connection-fork.c`)

- Implementiert die Schnittstelle aus dem Header `connection.h`:
 - Initialisierung des Anfragemoduls
 - Erstellen eines Kindprozesses zur Abarbeitung der Anfrage
 - Anmerkung: Entstandene Zombie-Prozesse müssen beseitigt werden!
 - Weitergabe der Verbindung an das Anfragemodul



Anfragemodul (`request-http.c`)

- Implementiert die Schnittstelle aus dem Header `request.h`:
 - Einlesen und Auswerten der Anfragezeile
 - Suchen der angeforderten Datei im WWW-Pfad
 - ! **Vorsicht:** Anfragen auf Dateien jenseits des WWW-Pfades stellen ein Sicherheitsrisiko dar. Sie müssen erkannt und abgelehnt werden!
 - Ausliefern der Datei

Hilfsmodule (`cmdline`, `i4httpools`), vorgegeben

- `cmdline`: Schnittstelle zum Parsen der Befehlszeilenargumente
- `i4httpools`: Hilfsfunktionen zum Implementieren eines HTTP-Servers



2.1 IPC-Schnittstelle: Server

2.2 UNIX-Signale

2.3 Signal-API von UNIX

2.4 Einsammeln von Zombies

2.5 Makefiles – Teil 3

2.6 Aufgabe 2: `sister`

2.7 Gelerntes anwenden



„Aufgabenstellung“

- Programm schreiben, welches durch `Ctrl-C` nicht beendet werden kann