

Übungen zu Systemprogrammierung 2

Ü2 – IPC mit Sockets, Signale

Wintersemester 2023/24

Luis Gerhorst, Jonas Rabenstein, Eva Dengler, Dustin Nguyen, Christian Eichler,
Jürgen Kleinöder

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



Lehrstuhl für Verteilte Systeme
und Betriebssysteme



FRIEDRICH-ALEXANDER
UNIVERSITÄT
ERLANGEN-NÜRNBERG

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(2)`)
- Nach seiner Erzeugung muss der Socket zunächst an eine Adresse *gebunden* werden, bevor er verwendet werden kann
- `bind(2)` 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[14]; // Platzhalter für Adresse  
};
```

- „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(3)`: 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(3)`)
- `in6_addr`-Struktur ist byteweise definiert, deswegen keine Konvertierung nötig



- Verbindungsannahme vorbereiten mit `listen(2)`:

```
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(2)`:

```
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

socket(2)

bind(2)

listen(2)

accept(2)

read(2)/write(2)

close(2)

Client

getaddrinfo(3)

socket(2)

connect(2)

read(2)/write(2)

close(2)

Verbindungsaufbau



Kommunikation



Verbindungsabbau



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(2)` 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`

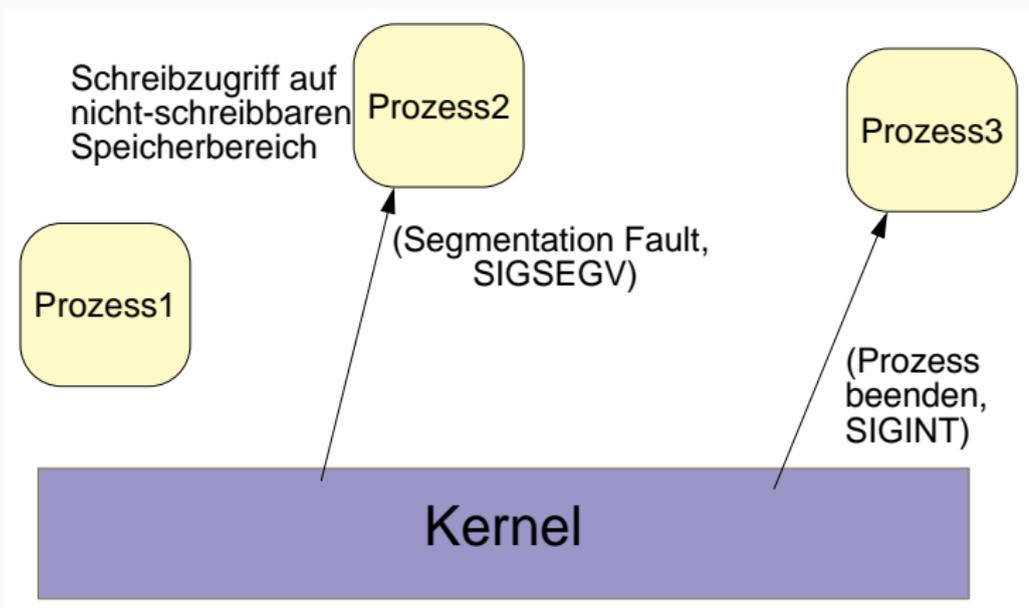
2.7 Gelerntes anwenden



- 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



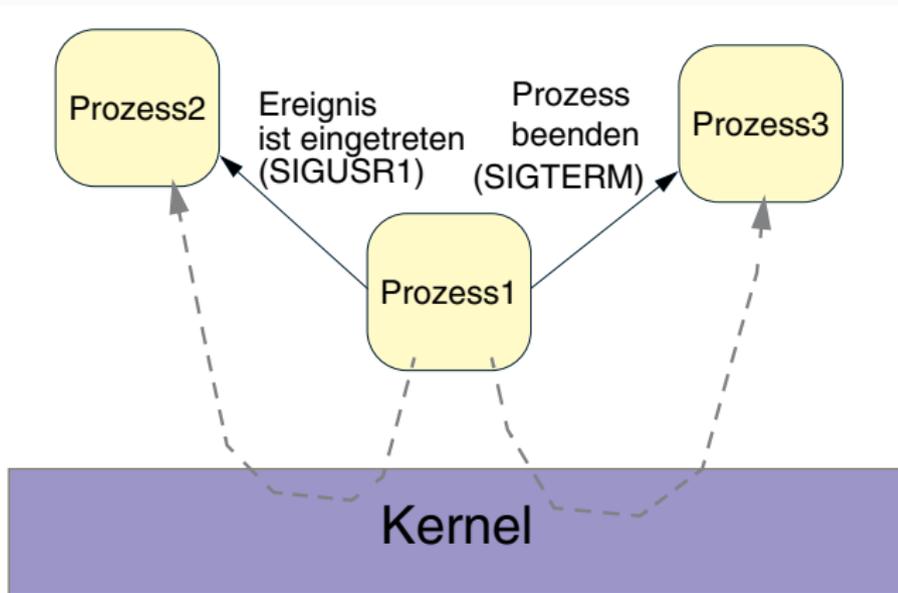
■ Anwendungsfall 1: Signalisierungen durch den Betriebssystemkern



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

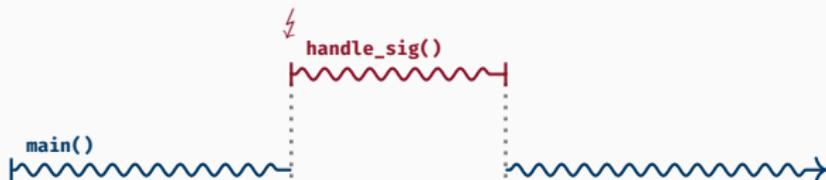


- **Anwendungsfall 2:** primitive „Kommunikation“ zwischen Prozessen



- 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(3)
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

■ Vorsicht: **SIG_DFL** kann vom Verhalten ohne Behandlung abweichen

- **SIGCHLD**: Explizit **SIG_IGN** (oder **SIG_DFL** mit **SA_NOCLDWAIT**) setzen bewirkt, dass Kindprozesse nicht mehr in den Zombie-Zustand übergehen sondern sofort (vom Kernel) eingesammelt wird

■ 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
- Hilfsfunktionen zum Auslesen und Modifizieren einer Signal-Maske:
 - sigaddset(3)**: Bestimmtes Signal zur Maske hinzufügen
 - sigdelset(3)**: Bestimmtes Signal aus Maske entfernen
 - sigemptyset(3)**: Alle Signale aus Maske entfernen
 - sigfillset(3)**: Alle Signale in Maske aufnehmen
 - sigismember(3)**: 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_NOCLDSTOP: SIGCHLD wird nur zugestellt, wenn ein Kindprozess terminiert, nicht wenn er gestoppt wird
 - SA_RESTART: durch das Signal unterbrochene Systemaufrufe werden automatisch neu aufgesetzt (siehe nächste Folie)
- Weitere Flags siehe sigaction(2)

- 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(2)`
 - 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(2):

```
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 Vater das Signal `SIGCHLD` vom Kernel
 - Damit ist sofortiges Aufsammeln von Zombieprozessen möglich
- **Variante 1:** Aufruf von `waitpid(2)` 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
- **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) $(CPPFLAGS) $(CFLAGS) $(LDFLAGS) -o $@ test.c
```

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

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

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

```
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) $(CPPFLAGS) $(CFLAGS) -c $<
```

- Regeln ohne Kommandos können Abhängigkeiten überschreiben

```
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  
$(CC) $(CPPFLAGS) $(CFLAGS) -DXYZ -c $<
```



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(2)`)
- Modularer Aufbau (vgl. SP1#SS17 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



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

```
#include <signal.h>
#include <stdio.h>
static void handleSIGINT(int sig) {
    const char buf[] = "haha!\n";
    write(STDOUT_FILENO, buf, strlen(buf));
    ...
}
int main(void) {
    struct sigaction action = {
        .sa_handler = handleSIGINT,
        .sa_flags = SA_RESTART,
    };
    sigemptyset(&action.sa_mask);
    sigaction(SIGINT, &action, NULL);
    ...
}
```