Systemnahe Software II
SS 2016

Andreas F. Borchert
Universität Ulm

4. Juli 2016

Syllabus

Inhalte:

- Prozesse unter UNIX
- Signale
- Interprozess-Kommunikation mit einem besonderen Schwerpunkt auf TCP/IP

Syllabus: Ziele

- Eingehendes Verständnis der POSIX-Schnittstellen und Abstraktionen für Prozesse, Signale, Kommunikation und Synchronisierung.
- Sichere Programmierung mit C in diesen Bereichen und das Erkennen von potentiellen Sicherheitslücken.
- Grundkenntnisse in TCP/IP und der Gestaltung von Internet-Protokollen.
- Eingehendes Verständnis der Muster zur Verarbeitung paralleler Sitzungen über TCP/IP.

Syllabus: Voraussetzungen

- Teilnahme an Systemnahe Software I. Dazu gehören insbesondere
  - Grundlagen in C einschließlich der dynamischen Speicherverwaltung,
  - Grundkenntnisse der POSIX-Schnittstellen im Bereich von Ein- und Ausgabe (*open*, *read*, *write* und die darüber liegende Schicht der *stdio*) und
  - Grundkenntnisse in der sicheren Programmierung in C (mitsamt der *stralloc*-Bibliothek von Dan Bernstein)
- Freude daran, etwas auch an einem Rechner auszuprobieren und genügend Ausdauer, dass nicht beim ersten Fehlversuch aufgegeben wird.

Warum ist sichere Programmierung wichtig?

- Wir beschäftigen uns im Rahmen der Vorlesung auch mit Netzwerkanwendungen und der Umsetzung von Netzwerkprotokollen.
- Kontakte über das Netzwerk sind normalerweise weltweit über das Internet möglich.
- Entsprechend tragen wir die Verantwortung dafür, keine offenen Scheunentore zu hinterlassen.
- Das bedeutet, dass wir bei jeder Code-Zeile und bei jedem Detail genau wissen müssen, was wir da tun, welche Gefahren lauern und wie wir diese abwehren.
- Die Folgen können sonst unabsehbar sein wie beim Heartbleed-Bug...

Intermezzo: Heartbeat-Protokoll

- Das Heartbeat-Protokoll wurde in Ergänzung zum SSL-Protokoll definiert: RFC 6520
- Das Protokoll soll zwei Probleme lösen:
  - Eine schnellere Alternative zu *SO_KEEPALIVE*
  - Ein alternativer Ansatz zur *Path MTU Discovery*, nachdem die ursprünglich dafür gedachten ICMP-Pakete allzu häufig von Firewalls weggefiltert werden
- Im Rahmen des Protokolls können Pings geschickt werden mit Daten (Payload) und einer zufällig gewählten Ergänzung. Solche Pings werden dann beantwortet, wobei der Payload zusammen mit anderen zufälligen Daten zurückgeschickt wird.
- Der Payload hat eine variable Länge. Deswegen findet sich im Header eines Heartbeat-Pakets ein Feld mit zwei Bytes, das den Umfang der Payload-Daten spezifiziert.

ssl/ssl3.h

```
typedef struct ssl3_record_st
        {
/*r */  int type;               /* type of record */
/*rw*/  unsigned int length;    /* How many bytes available */
/*r */  unsigned int off;       /* read/write offset into 'buf' */
/*rw*/  unsigned char *data;    /* pointer to the record data */
/*rw*/  unsigned char *input;   /* where the decode bytes are */
/*r */  unsigned char *comp;    /* only used with decompression - malloc()ed */
/*r */  unsigned long epoch;    /* epoch number, needed by DTLS1 */
/*r */  unsigned char seq_num[8]; /* sequence number, needed by DTLS1 */
        } SSL3_RECORD;
```

- Eine typische Datenstruktur für einen Kommunikationspuffer, entnommen aus openssl-1.0.1f
- *data* zeigt auf (die bereits entschlüsselten) Daten, die wir über das Netzwerk erhalten haben.
- *length* gibt an, wieviele Bytes in *data* zum Lesen zur Verfügung stehen.

ssl/d1-both.c

```
unsigned char *p = &s->s3->rrec.data[0], *pl;
/* ... */
/* Read type and payload length first */
hbtype = *p++;
n2s(p, payload);
pl = p;
```

- *s−>s3−>rrec* ist vom Typ *SSL3_RECORD* und repräsentiert das eingelesene Datenpaket, in dem sich ein Heartbeat-Paket befindet.
- *p* zeigt auf den Anfang des Datenbereichs des eingelesenen Pakets.
- Dort ist zu Beginn der Typ des Heartbeat-Pakets (ein Byte) und der Umfang des beigefügten Payloads (zwei Bytes).
- *n2s* konvertiert zwei Bytes vom Netzwerk in *network byte order* in eine ganze Zahl (*short*).
- *payload* kann hier ein beliebiger Wert zwischen 0 und 65535 sein, der vollkommen frei von der anderen Seite gewählt werden kann.

ssl/d1-both.c

```
buffer = OPENSSL_malloc(1 + 2 + payload + padding);
bp = buffer;

/* Enter response type, length and copy payload */
*bp++ = TLS1_HB_RESPONSE;
s2n(payload, bp);
memcpy(bp, pl, payload);
bp += payload;
/* Random padding */
RAND_pseudo_bytes(bp, padding);

r = dtls1_write_bytes(s, TLS1_RT_HEARTBEAT,
   buffer, 3 + payload + padding);
```

- Hier wird ein Antwort-Paket geschnürt (in Reaktion zu einem Ping), bei der die erhaltene Payload zurückzuschicken ist mitsamt einer Ergänzung aus zufälligen Daten (*padding*).
- Mit Hilfe von *memcpy* wird von *pl* (zeigt an den Anfang der erhaltenen Payload) nach *bp* kopiert.
- Kopiert werden *payload* Bytes. Es wird nirgends überprüft, ob noch *payload* Bytes hinter *pl* belegt sind...

Kann ein Lesen (und Weitergeben) des Speicherinhalts jenseits des Eingabe-Puffers ein Problem darstellen?

- Ja! Ziemlich anschaulich erklärt es Randall Munroe in xkcd: `http://www.xkcd.com/1354/`
- Bruce Schneier dazu:

  "Catastrophic" is the right word. On the scale of 1 to 10, this is an 11.

Syllabus: Struktur

- Jede Woche gibt es zwei Vorlesungsstunden an jedem Montag von 16-18 Uhr in der Helmholtzstraße 18, Raum E.20.
- Die Übungen finden am Dienstag von 16-18 Uhr in der Helmholtzstraße 18, Raum 1.20 statt.
- Da die Vorlesung am Pfingsmontag ausfällt, wird sie am Dienstag, den 17. Mai, am Übungstermin nachgeholt.
- Webseite: `https://www.uni-ulm.de/mawi/mawi-numerik/lehre/sose16/vorlesung-systemnahe-software-ii.html`

Syllabus: Übungen

- Es gibt ein- und gelegentlich auch zweiwöchige Übungsblätter.
- Die Aufgaben werden in Gruppen von idealerweise drei Studenten gelöst und im Rahmen eines gemeinschaftlichen Testats dem zugehörigen Tutor vorgestellt.
- Die Organisation der Tutorenzuteilungen findet bei den Übungen am 12. April statt.
- Bitte melden Sie sich für die Vorlesung bei SLC an.
- Sie sollten, sofern noch nicht vorhanden, sich um einen Shell-Zugang bei uns bemühen.

Syllabus: Prüfung

- Voraussetzung hierfür sind mindestens 50% der Übungspunkte (Vorleistung).
- Eine Probeklausur wird gegen Semesterende zur Verfügung stehen, die in Bezug auf den Umfang, den Schwierigkeitsgrad und die Breite der Aufgabenstellungen mit der schriftlichen Prüfungen übereinstimmen wird.
- Die erste Prüfung findet am Donnerstag, den 21. Juli, statt.
- Für die zweite Prüfung ist Donnerstag, der 6. Oktober, vorgesehen.
- Die Prüfung ist offen, d.h. eine Anmeldung zur zweiten Prüfung ist auch ohne Teilnahme an der ersten möglich.

Syllabus: Skript

- Es gibt ein Skript, das auf der Webseite kapitelweise veröffentlicht wird.
- Parallel gibt es Präsentationen (wie diese), die ebenfalls als PDF zur Verfügung gestellt werden.
- Wenn Sie das Skript oder die Präsentationen ausdrucken möchten, nutzen Sie dazu bitte die entsprechenden Einrichtungen des KIZ. Im Prinzip können Sie dort beliebig viel drucken, wenn Sie genügend Punkte dafür erworben haben.
- Das Druck-Kontingent, das Sie bei uns kostenfrei erhalten (das ist ein Privileg und kein natürliches Recht), darf für die Übungen genutzt werden, jedoch nicht für das Ausdrucken von Skripten oder Präsentationen.

Syllabus: Sprechstunden

- Sie sind eingeladen, mich jederzeit per E-Mail zu kontaktieren:
  E-Mail: `andreas.borchert@uni-ulm.de`
- Meine reguläre Sprechzeit ist am Mittwoch 10:00-11:30 Uhr. Zu finden bin ich in der Helmholtzstraße 20, Zimmer 1.22.
- Zu anderen Zeiten können Sie auch gerne vorbeischauen, aber es ist dann nicht immer garantiert, dass ich Zeit habe. Gegebenenfalls lohnt sich vorher ein Telefonanruf: 23572.

Syllabus: Nicht verzweifeln!

- Immer wieder kann es mal vorkommen, dass es zu scheinbar unlösbaren Problemen bei einer Übungsaufgabe kommt.
- Geben Sie dann bitte nicht auf. Nutzen Sie unsere Hilfsangebote.
- Sie können (und sollen) dazu gerne Ihren Tutor oder Tutorin kontaktieren oder bei Bedarf gerne auch mich.
- Schicken Sie bitte in so einem Fall alle Quellen zu und vergessen Sie nicht, eine präzise Beschreibung des Problems mitzuliefern.
- Das kann auch am Wochenende funktionieren.

Syllabus: Feedback

- Feedback ist ausdrücklich erwünscht.
- Es besteht insbesondere auch immer die Möglichkeit, auf Punkte noch einmal einzugehen, die zunächst noch nicht klar geworden sind.
- Vertiefende Fragen und Anregungen sind auch willkommen.
- Ich spule hier nicht immer das gleiche Programm ab. Jede Vorlesung und jedes Semester verläuft anders und das hängt auch von Ihnen ab!

Prozesse unter UNIX

- Definition von Ritchie und Thompson, den Hauptentwicklern von UNIX:
  A process is the execution of an image.
- Zum *image* zählen der übersetzte Programmtext (Maschinencode und vorinitialisierte Daten) und der Ausführungskontext.

Ausführungskontext

Ein Programm wird in einem bestimmten Kontext ausgeführt. Zu diesem Kontext gehören

- der Adressraum, in dem unter anderem der Programmtext (als Maschinencode) und die Daten untergebracht sind,
- pro Thread ein Satz Maschinenregister einschließlich der Stackverwaltung (Stack-Zeiger, Frame-Zeiger) und dem PC (*program counter*, verweist auf die nächste auszuführende Instruktion) und
- weitere Statusinformationen, die vom Betriebssystem verwaltet werden wie beispielsweise Informationen über geöffnete Dateien.

Prozesse als Rechtegemeinschaft

- Zu einem Prozess können mehrere Ausführungsfäden (*Threads*) gehören, die ebenfalls vom Betriebssystem verwaltet werden. Entsprechend gibt es nicht nur Status-Informationen auf Prozess-Ebene, sondern auch (in einem geringeren Umfang) auf Thread-Ebene.
- Alle wesentlichen Status-Informationen wie etwa User-ID, die Gruppenzugehörigkeiten, die geöffneten Dateien und der Adressraum sind allen Threads eines Prozesses gemein.
- Deswegen wird ein Prozess auch als Rechtegemeinschaft betrachtet.

printpid.c

```
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>

int main() {
   printf("%d\n", (int) getpid());
}
```

- Jeder Prozess hat unter UNIX eine gleichbeibende identifizierende positive ganze Zahl, die mit *getpid*() abgefragt werden kann.
- Bei der Mehrheit der UNIX-Systeme liegt die Prozess-ID im Bereich von 1 bis 32767. Die Eindeutigkeit ist jedoch nur zu Lebzeiten garantiert. Sobald ein Prozess beendet wird, kann die gleiche Prozess-ID später einem neuen Prozess zugeordnet werden. Alle gängigen UNIX-Systeme vergeben Prozess-IDs reihum, wobei bereits vergebene Prozess-IDs übersprungen werden.

Terminierung eines Prozesses

- Ein Prozess kann sich jederzeit mit *exit*() beenden und dabei einen Statuswert im Bereich von 0 bis 255 angeben.
- Die *exit*-Funktion kann in C-Programmen auch implizit aufgerufen werden: Ein **return** in der *main*-Funktion führt zu einem entsprechenden *exit* und wenn das Ende der *main*-Funktion erreicht wird, entspricht dies einem *exit*(0).
- Ein Exit-Wert von 0 deutet dabei eine erfolgreiche Terminierung an; andere Werte, insbesondere *EXIT_FAILURE*, werden als Misserfolg gewertet. Diese Konventionen orientieren sich zwar an UNIX, sind aber auch Bestandteil der ISO-Standards 9899-1999 und 9899-2011.

Das Erzeugen neuer Prozesse

- Neue Prozesse können nur in Form eines Klon-Vorganges mit Hilfe des Systemaufrufs *fork*() erzeugt werden.
- Der Adressraum, die Maschinenregister und fast der gesamte Status des Betriebssystems für den erzeugenden Prozess werden dupliziert.
- Das bedeutet, dass beide Prozesse (der *fork*() aufrufende Prozess und der neu erzeugte Prozess) einen zu Beginn gleich aussehenden Adressraum vorfinden. Änderungen werden jedoch nur bei jeweils einem der beiden Prozesse wirksam.
- Um dies effizient umzusetzen und um einen hohen Kopieraufwand bei der *fork*-Operation zu vermeiden, kommt hier eine Verzögerungstechnik zum Zuge: *copy on write*.

- Einige Statusinformationen beim Betriebssystem betreffen beide Prozesse. So werden offene Dateiverbindungen vererbt und können nach dem Aufruf von *fork* gemeinsam genutzt werden.
- Dies bezieht sich aber nur auf Dateiverbindungen, die zum Zeitpunkt des *fork*-Aufrufs eröffnet waren und nicht auf Dateien, die später von einem der beiden Prozesse neu eröffnet werden.
- Einige Statusinformationen des Betriebssystems werden *nicht* weitergegeben. Dazu gehören beispielsweise Locks und anhängige Signale.
- Die Manualseite *fork(2)* zählt alle Statusinformationen auf, die weitergegeben werden.

Neuer Prozess als Klon des alten Prozesses

clones.c

```
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
int main() {
   printf("I am feeling lonely!\n");
   fork();
   printf("Hey, I am cloned!\n");
}
```

- Ein neuer Prozess beginnt nicht irgendwo mit einem neuen Programmtext bei *main*().
- Stattdessen finden wir nach *fork*() zwei weitgehend übereinstimmende Kopien eines Prozesses vor, die alle den gleichen Programmtext hinter dem Aufruf von *fork*() fortsetzen.
- Deswegen wird in diesem Beispiel das zweite *printf* doppelt ausgeführt.

Tücken bei *fork*

clones.c

```
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
int main() {
   printf("I am feeling lonely!\n");
   fork();
   printf("Hey, I am cloned!\n");
}
```

```
doolin$ clones | cat
I am feeling lonely!
Hey, I am cloned!
I am feeling lonely!
Hey, I am cloned!
doolin$
```

- Warum erhalten wir jetzt die Ausgabe „I am feeling lonely!“ nun doppelt?

fork und die Pufferung der *stdio*-Bibliothek

clones.c

```
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
int main() {
   printf("I am feeling lonely!\n");
   fork();
   printf("Hey, I am cloned!\n");
}
```

- Erfolgt die Ausgabe direkt auf ein Terminal, wird zeilenweise gepuffert. In diesem Falle erfolgt die Ausgabe des ersten *printf*() noch vor dem Aufruf von *fork*().
- Falls jedoch voll gepuffert wird — dies ist bei der Ausgabe in eine Datei oder in eine Pipeline der Fall — dann erfolgt vor dem *fork*() noch keine Ausgabe. Stattdessen wird der Puffer von *stdout* durch *fork*() dupliziert, womit die doppelte Ausgabe der ersten Zeile provoziert wird.

clones2.c

```
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
int main() {
   printf("I am feeling lonely!\n");
   fork();
   fork();
   fork();
   printf("Hey, I am cloned!\n");
}
```

- Die doppelte Ausgabe eines ungeleerten Puffers lässt sich durch die rechtzeitige Leerung des Puffers mit Hilfe von *fflush*() vermeiden.

Wie können Ursprungsprozess und Klon getrennte Wege gehen?

clones3.c

```
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
int main() {
   pid_t parent;

   printf("I am feeling lonely!\n"); fflush(stdout);
   parent = getpid();
   fork();
   if (getpid() == parent) {
      printf("I am the parent process!\n");
   } else {
      printf("I am the child process!\n");
   }
}
```

- Damit der ursprüngliche Prozess und der mit *fork* erzeugte Klon getrennte Wege verfolgen können, müssen sie sich voneinander unterscheiden können. Ein naheliegendes Mittel ist hier die Prozess-ID, da der ursprüngliche Prozess seine behält und der Klon eine neue erhält.

Der Rückgabewert von *fork*

fork.c

```
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
int main() {
   pid_t pid;

   pid = fork();
   if (pid == -1) {
      perror("unable to fork"); exit(1);
   }
   if (pid == 0) {
      /* child process */
      printf("I am the child process: %d.\n", (int) getpid());
      exit(0);
   }
   /* parent process */
   printf("The pid of my child process is %d.\n", (int) pid);
}
```

- *fork*() liefert -1 im Falle von Fehlern, 0 für den neu erzeugten Prozess und die Prozess-ID des neu erzeugten Prozesses beim alten Prozess.

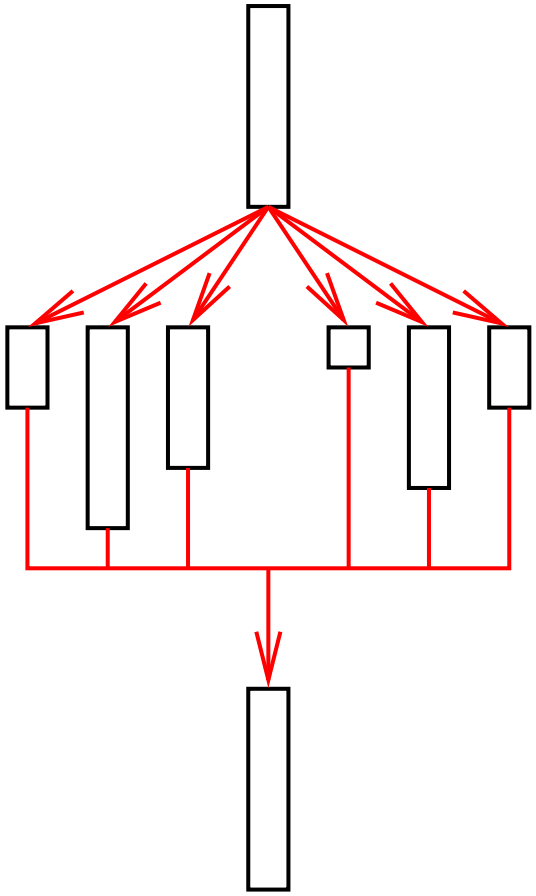
Der Rückgabewert von *fork*

fork.c

```
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
int main() {
   pid_t pid;

   pid = fork();
   if (pid == -1) {
      perror("unable to fork"); exit(1);
   }
   if (pid == 0) {
      /* child process */
      printf("I am the child process: %d.\n", (int) getpid());
      exit(0);
   }
   /* parent process */
   printf("The pid of my child process is %d.\n", (int) pid);
}
```

- Ein explizites *exit*() beim neu erzeugten Prozess verhindert, dass der Klon hinter der **if**-Anweisung den für den Erzeuger vorgesehenen Programmtext ausführt.

Synchronisierung bei der Prozessterminierung



zu Beginn nur ein Prozeß

Erzeugen neuer Prozesse

Warten, bis alle neu erzeugten Prozesse beendet sind

Synchronisierung bei der Prozessterminierung

- Es mag Fälle geben, bei denen neue Prozesse erzeugt und dann „vergessen“ werden. Im Normalfall jedoch stößt das weitere Schicksal des neuen Prozesses auf Interesse und insbesondere ist es nicht unüblich, dass der erzeugende Prozess auf das Ende der von ihm erzeugten Prozesse warten möchte.
- Dies macht insbesondere dann Sinn, wenn mehrere Prozesse erzeugt werden, die parallel Teilprobleme des Gesamtproblems lösen. Dann wartet der erzeugende Prozess nach Erzeugung all der Unterprozesse, bis sie alle ihre Teilaufgaben erledigt haben. Dieses Muster wird „Fork and Join“ genannt.

Synchronisierung bei der Prozessterminierung

forkandwait.c

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <unistd.h>
#include <sys/wait.h>

int main() {
   pid_t child, pid; int stat;

   child = fork();
   if (child == -1) {
      perror("unable to fork"); exit(1);
   }
   if (child == 0) {
      /* child process */
      srand(getpid());
      exit(rand());
   }

   /* parent process */
   pid = wait(&stat);
   if (pid == child) {
      if (WIFEXITED(stat)) {
         printf("exit code of child = %d\n", WEXITSTATUS(stat));
      } else {
         printf("child terminated abnormally\n");
      }
   } else {
      perror("wait");
   }
}
```

forkandwait.c

```
if (child == 0) {
   /* child process */
   srand(getpid());
   exit(rand());
}
```

- Der neu erzeugte Prozess initialisiert den Pseudo-Zufallszahlengenerator mit *srand* und holt sich dann mit *rand* eine pseudo-zufällige Zahl ab.
- Da der Exit-Wert nur 8 Bit und entsprechend nur die Werte von 0 bis 255 umfasst, werden die höherwertigen Bits der Pseudo-Zufallszahl implizit weggeblendet.

forkandwait.c

```
/* parent process */
pid = wait(&stat);
if (pid == child) {
   if (WIFEXITED(stat)) {
      printf("exit code of child = %d\n", WEXITSTATUS(stat));
   } else {
      printf("child terminated abnormally\n");
   }
} else {
   perror("wait");
}
```

- Die Funktion *wait* wartet auf die Terminierung eines beliebigen Unterprozesses, der noch *nicht* von *wait* zurückgeliefert wurde.
- Falls es einen solchen Prozess nicht mehr gibt, wird -1 zurückgeliefert.
- Ansonsten liefert *wait* die Prozess-ID des terminierten Prozesses und innerhalb von *stat* den zugehörigen Status.

Zurückgelieferter Status bei *wait*

Der in *stat* abgelegte Status des Unterprozesses besteht aus mehreren Komponenten, die angeben,

- wie ein Prozess sein Leben beendete (durch *exit*() oder durch ein Signal (bei einem Crash oder Verwendung von *kill*()) oder ob der Prozess nur gestoppt wurde,
- welcher Wert bei *exit*() angegeben wurde, falls *exit*() benutzt wurde und
- welches Signal das Leben des Prozesses terminierte bzw. stoppte, falls der Prozess nicht mit *exit*() endete.

Zombies

- Was geschieht mit dem Rückgabewert bei *exit*() und dem sonstigen Endstatus eines Prozesses, wenn der übergeordnete Prozess nicht zeitig *wait*() aufruft?
- Das UNIX-System lässt solche toten Prozesse noch in seiner Verwaltung weiterleben, so dass der Endstatus noch bewahrt wird, aber die nicht mehr benötigten Ressourcen freigegeben werden.
- Prozesse, die sich in diesem Stadium befinden, werden als Zombies bezeichnet.

genzombie.c

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <unistd.h>

int main() {
   pid_t child = fork();
   if (child == -1) {
      perror("fork"); exit(1);
   }
   if (child == 0) exit(0);
   printf("%d\n", child);
   sleep(60);
}
```

- Der neu erzeugte Prozess verabschiedet sich hier sofort mit *exit*(), während der übergeordnete Prozess mit Hilfe eines *sleep*()-Aufrufes sich für 60 Sekunden zur Ruhe legt.
- Während dieser Zeit verbleibt der Unterprozeß im Zombie-Status.

```
doolin$ genzombie&
[1]     24489
doolin$ 24490

doolin$ ps -ylp 24489,24490
 S   UID   PID  PPID  C PRI NI   RSS     SZ    WCHAN TTY      TIME CMD
 S   120 24489 23591  0  64 28   616    936        ? pts/31   0:00 genzombi
 Z   120 24490 24489  0   0                                   0:00 <defunct>
doolin$
```

- In der ersten Spalte gibt *ps* bei dieser Aufrufvariante den Status eines Prozesses an.
- „*Z*“ steht dabei für Zombie, „*S*“ für schlafend.
- Weitere Varianten sind „*O*“ für gerade arbeitend, „*R*“ für arbeitsbereit und „*T*“ für gestoppt.

Waisenkinder und der *init*-Prozess

orphan.c

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <unistd.h>

int main() {
   pid_t child;
   child = fork();
   if (child == -1) {
      perror("fork"); exit(1);
   }
   if (child == 0) {
      printf("Hi, my parent is %d\n", (int) getppid());
      sleep(5);
      printf("My parent is now %d\n", (int) getppid());
      exit(0);
   }
   sleep(3);
   exit(0);
}
```

- Wenn sich der übergeordnete Prozess verabschiedet, dann wird ihm der Prozess mit der Prozess-ID 1 als neuer übergeordneter Prozess zugewiesen.

Der *init*-Prozess

- Der Prozess mit der Prozess-ID 1 spielt eine besondere Rolle unter UNIX. Es ist der erste Prozess, der vom Betriebssystem selbst erzeugt wird. Er führt den unter */etc/init* oder /sbin/init zu findenden Programmtext aus.
- Dieser Prozess startet weitere Prozesse anhand einer Konfigurationsdatei (bei uns unter */etc/inittab*) und ruft ansonsten *wait*() auf, um den Status der von ihm selbst erzeugten Prozesse oder den von Waisenkindern entgegenzunehmen.
- Auf diese Weise wird dann auch der Zombie-Status eines Prozesses beendet, wenn es zum Waisenkind wird.

Der Wechsel zu einem anderen Programm

Mit *fork*() ist es möglich, neue Prozesse zu erzeugen. Allerdings teilen die neuen Prozesse sich den Programmtext mit ihrem Erzeuger. Wie ist nun der Wechsel zu einem anderen Programmtext möglich? Die Lösung dafür ist der Systemaufruf *exec*(), der

- den gesamten virtuellen Adressraum des aufrufenden Prozesses auflöst,
- an seiner Stelle einen neuen einrichtet mit einem angegebenen Programmtext,
- sämtliche Maschinenregister für den Prozess neu initialisiert und
- Statusinformationen des Betriebssystems weitgehend unverändert belässt

Wechsel zum Programm *date*

datum.c

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <unistd.h>

int main() {
   execl(
      "/usr/bin/date",  /* path of the program */
      "/usr/bin/date",  /* name of the program, i.e. argv[0] */
      "+%d.%m.%Y",      /* first argument, i.e. argv[1] */
      0                 /* terminate list of arguments */
   );
   /* not reached except if execl failed */
   perror("/usr/bin/date"); exit(1);
}
```

- Dieses Programm ersetzt seinen eigenen Programmtext durch den von *date*.

datum.c

```
execl(
   "/usr/bin/date",  /* path of the program */
   "/usr/bin/date",  /* name of the program, i.e. argv[0] */
   "+%d.%m.%Y",      /* first argument, i.e. argv[1] */
   0                 /* terminate list of arguments */
);
```

- *execl* erlaubt die Angabe beliebig vieler Kommandozeilenargumente in der Form einzelner Funktionsparameter. Mit einem Nullzeiger wird die Liste der Parameter beendet.
- Dabei ist zu beachten, dass der Pfadname des auszuführenden Programms und der später unter *argv*[0] zu findende Kommandoname getrennt angegeben werden. Normalerweise sind beide gleich, es gibt aber auch Ausnahmen.

Wechsel zum Programm *date*

datum.c

```
execl(
   "/usr/bin/date",  /* path of the program */
   "/usr/bin/date",  /* name of the program, i.e. argv[0] */
   "+%d.%m.%Y",      /* first argument, i.e. argv[1] */
   0                 /* terminate list of arguments */
);
/* not reached except if execl failed */
perror("/usr/bin/date"); exit(1);
```

- Normalerweise geht es im Programmtext nach einem Aufruf von *execl*() nicht weiter, weil im Erfolgsfalle das Programm ausgetauscht wurde. Nur bei einem Fehler (weil z.B. das *date*-Kommando nicht gefunden wurde) wird das Programm hinter dem Aufruf von *execl*() fortgesetzt.

Das Zusammenspiel von *fork*, *exec*, *exit* und *wait* 47

- Auf den ersten Blick erscheinen diese vier Systemaufrufe seltsam. Warum ist eine Kombination aus *fork*() und *exec*() notwendig, um einen neuen Prozess mit einem neuen Programmtext in Gang zu setzen?
- Wäre es nicht besser und einfacher, nur einen einzigen Systemaufruf dafür zu haben?
- Die Frage verschärft sich, wenn berücksichtigt wird, dass in der Zeit der frühen UNIX-Implementierungen die Technik des „*copy on write*“ noch nicht zur Verfügung stand. Stattdessen war es bei *fork*() notwendig, den gesamten Speicher zu kopieren.
- Bei BSD wurde deswegen zeitweise *fork1*() eingeführt, das diesen Kopiervorgang unterdrückte, um die typische Kombination von *fork*() und *exec*() nicht zu teuer werden zu lassen.

Alternativen zu *fork* und *exec*

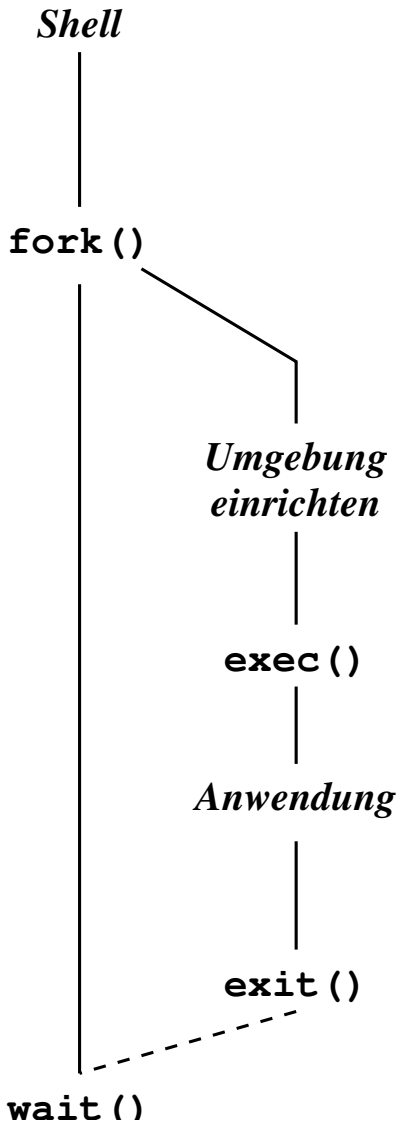

```
//IS198CPY JOB (IS198T30500),'COPY JOB',CLASS=L,MSGCLASS=X
//COPY01   EXEC PGM=IEBGENER
//SYSPRINT DD  SYSOUT=*
//SYSUT1   DD  DSN=OLDFILE,DISP=SHR
//SYSUT2   DD  DSN=NEWFILE,
//           DISP=(NEW,CATLG,DELETE),
//           SPACE=(CYL,(40,5),RLSE),
//           DCB=(LRECL=115,BLKSIZE=1150)
//SYSIN    DD  DUMMY
```

- UNIX ist keinesfalls das erste Betriebssystem, das Prozesse unterstützte. Die älteren Systeme boten in der Tat die Kombination aus *fork*() und *exec*() in einem Systemaufruf an.
- Das Beispiel zeigt ein Kopierkommando in der JCL (Job Command Language) aus der IBM-Mainframe-Welt (von der Wikipedia übernommen). Hieran zeigt sich, dass dies die Kommandosprache deutlich verkompliziert. Der Haken liegt darin, dass Prozesse häufig eine Umgebung erwarten, die mehr umfaßt als eine Kommandozeile. Wichtiger Bestandteil der Umgebung sind bereits im Vorfeld eingerichtete Ein- und Ausgabeverbindungen und die Zuteilung von Ressourcen.

Alternativen zu *fork* und *exec*

- So sieht die traditionelle Erzeugung eines Prozesses aus:
  - Erzeuge einen neuen Prozess mit einem gegebenen Programmtext mit einem Systemaufruf, der *fork*() und *exec*() kombiniert.
  - Einrichtung der Umgebung für den neuen Prozess.
  - Start des neuen Prozesses.
- Entsprechend ist es notwendig, alle wichtigen Systemaufrufe für die Einrichtung einer Umgebung einschließlich dem Öffnen von Ein- und Ausgabeverbindungen in zwei Varianten zu unterstützen: Die eine Variante bezieht sich auf den eigenen Prozess, die andere für einen untergeordneten Prozess, der noch nicht gestartet wurde.

Prozesserzeugung bei der UNIX-Shell



- Die Trennung in *fork*() und *exec*() erlaubt die Konfiguration der Umgebung des aufzurufenden Programms innerhalb der Shell mit ganz normalen Systemaufrufen.

```
clonard$ tinysh
% date
Mon Apr 28 13:10:54 MEST 2008
% date >out
% cat out
Mon Apr 28 13:11:06 MEST 2008
% awk {print$4} <out
13:11:06
% clonard$
```

- Die kleine Shell *tinysh* erlaubt
  - den Aufruf von Kommandos mit beliebig vielen Parametern, die durch Leerzeichen getrennt werden,
  - die Umlenkung der Standard-Ein- und Ausgabe, wobei auch das Anhängen unterstützt wird und
  - die Auswertung des *wait*-Systemaufrufs.
- Die Konfiguration des aufzurufenden Programms erfolgt hier zwischen *fork* und *exec*.

Eine kleine Shell: *tinysh*

tinysh.c

```
int main() {
   stralloc line = {0};
   while (printf("%% "), readline(stdin, &line)) {
      strlist tokens = {0};
      stralloc_0(&line); /* required by tokenizer() */
      if (!tokenizer(&line, &tokens)) break;
      if (tokens.len == 0) continue;
      pid_t child = fork();
      if (child == -1) {
         perror("fork"); continue;
      }
      if (child == 0) {
         // setup child and argv.list ...
         execvp(cmdname, argv.list);
         perror(cmdname);
         exit(255);
      }

      /* wait for termination of child */
      // ...
   }
} // main
```

sareadline.c

```
bool readline(FILE* fp, stralloc* sa) {
   sa->len = 0;
   for(;;) {
      if (!stralloc_readyplus(sa, 1)) return false;
      int ch = getc(fp);
      if (ch == EOF) return sa->len > 0;
      if (ch == '\n') break;
      sa->s[sa->len++] = ch;
   }
   return true;
} // readline
```

- Diese *readline*-Funktion erlaubt das Einlesen beliebig langer Zeilen.
- Mit *stralloc_readyplus* wird jeweils Platz für mindestens ein weiteres Zeichen geschaffen.
- Die resultierende Zeichenkette ist *nicht* durch ein Nullbyte terminiert.

Erzeugung der Liste mit Kommandozeilenparametern 54

- Die Funktion *execl* ist für die *tinysh* ungeeignet, da die Zahl der Kommandozeilenparameter nicht feststeht. Diese soll auch nicht durch das Programm künstlich begrenzt werden.
- Alternativ zu *execl* gibt es *execv*, das einen Zeiger auf eine Liste mit Zeigern auf Zeichenketten erwartet, die am Ende mit einem Null-Zeiger abzuschliessen ist.
- Die in der *tinysh* verwendete Funktion *execvp* (mit zusätzlichem p) sucht im Gegensatz zu *execv* nach dem Programm in allen Verzeichnissen, die die Umgebungsvariable *PATH* aufzählt.

Erzeugung einer Liste mit Zeigern auf Zeichenketten 55

strlist.h

```
#ifndef STRLIST_H
#define STRLIST_H

#include <stddef.h>
#include <stdbool.h>

typedef struct strlist {
   char** list;
   size_t len; /* # of strings in list */
   size_t allocated; /* allocated length for list */
} strlist;

/* assure that there is at least room for len list entries */
bool strlist_ready(strlist* list, size_t len);

/* assure that there is room for len additional list entries */
bool strlist_readyplus(strlist* list, size_t len);

/* truncate the list to zero length */
void strlist_clear(strlist* list);

/* append the string pointer to the list */
bool strlist_push(strlist* list, char* string);
#define strlist_push0(list) strlist_push((list), 0)

/* free the strlist data structure but not the strings */
void strlist_free(strlist* list);

#endif
```

Erzeugung einer Liste mit Zeigern auf Zeichenketten 56

strlist.h

```
typedef struct strlist {
   char** list;
   size_t len; /* # of strings in list */
   size_t allocated; /* allocated length for list */
} strlist;

bool strlist_ready(strlist* list, size_t len);
bool strlist_readyplus(strlist* list, size_t len);
void strlist_clear(strlist* list);
bool strlist_push(strlist* list, char* string);
void strlist_free(strlist* list);
```

- Die *strlist*-Bibliothek folgt weitgehend dem Vorbild der *stralloc*-Bibliothek.

Erzeugung einer Liste mit Zeigern auf Zeichenketten 57

strlist.c

```
/* assure that there is at least room for len list entries */
bool strlist_ready(strlist* list, size_t len) {
   if (list->allocated < len) {
      size_t wanted = len + (len>>3) + 8;
      char** newlist = (char**) realloc(list->list,
         sizeof(char*) * wanted);
      if (newlist == 0) return false;
      list->list = newlist;
      list->allocated = wanted;
   }
   return true;
}

/* assure that there is room for len additional list entries */
bool strlist_readyplus(strlist* list, size_t len) {
   return strlist_ready(list, list->len + len);
}
```

Erzeugung einer Liste mit Zeigern auf Zeichenketten 58

strlist.c

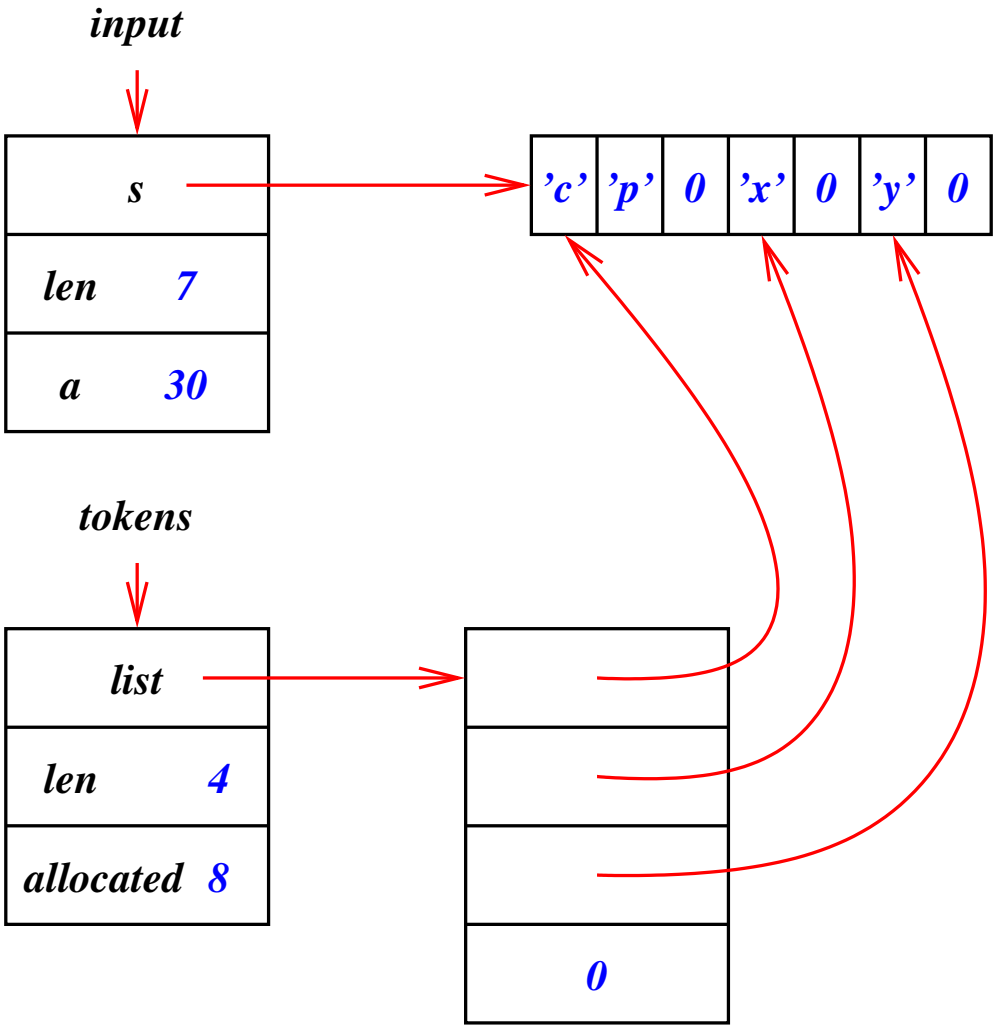
```
void strlist_clear(strlist* list) {
   list->len = 0;
}

/* append the string pointer to the list */
bool strlist_push(strlist* list, char* string) {
   if (!strlist_ready(list, list->len + 1)) return false;
   list->list[list->len++] = string;
   return true;
}

/* free the strlist data structure but not the strings */
void strlist_free(strlist* list) {
   free(list->list); list->list = 0;
   list->allocated = 0;
   list->len = 0;
}
```

tokenizer.h

```
#ifndef TOKENIZER_H

#define TOKENIZER_H
#include <stralloc.h>
#include "strlist.h"
bool tokenizer(stralloc* input, strlist* tokens);

#endif
```

- Die Funktion *tokenizer* zerlegt die Eingabezeile in *input* in einzelne (durch Leerzeichen getrennte) Wörter und fügt diese in die Liste *tokens*.
- Wesentlich ist hier, dass die einzelnen Zeichenketten nicht dupliziert werden, sondern innerhalb der Eingabezeile verbleiben. Zu diesem Zweck werden Leerzeichen durch Nullbytes ersetzt.

Zerlegung einer Eingabezeile



- Das Diagramm zeigt die resultierende Datenstruktur des Wortzerlegers am Beispiel „cp x y“.

Zerlegung einer Eingabezeile

tokenizer.c

```
/*
 * Simple tokenizer: Take a 0-terminated stralloc object and return a
 * list of pointers in tokens that point to the individual tokens.
 * Whitespace is taken as token-separator and all whitespaces within
 * the input are replaced by null bytes.
 * afb 4/2003
 */

#include <ctype.h>
#include <stdlib.h>
#include <stralloc.h>
#include "strlist.h"
#include "tokenizer.h"

bool tokenizer(stralloc* input, strlist* tokens) {
   char* cp;
   int white = 1;

   strlist_clear(tokens);
   for (cp = input->s; *cp && cp < input->s + input->len; ++cp) {
      if (isspace((int) *cp)) {
         *cp = '\0'; white = 1; continue;
      }
      if (!white) continue;
      white = 0;
      if (!strlist_push(tokens, cp)) return false;
   }
   return true;
}
```

tinysh.c

```
while (printf("%% "), readline(stdin, &line)) {
   strlist tokens = {0};
   stralloc_0(&line); /* required by tokenizer() */
   if (!tokenizer(&line, &tokens)) break;
   if (tokens.len == 0) continue;
   // ...
}
```

- Da der Wortzerleger nullbyte-terminierte Zeichenketten liefert, muss mit *stralloc_0* noch ein Nullbyte angehängt werden.
- Falls keine Wörter zu finden sind, wird sofort die nächste Zeile eingelesen.
- Die Erzeugung der Kommandozeilenparameterliste wird dem neu zu erzeugenden Prozess überlassen.

Konfiguration des neuen Prozesses

tinysh.c

```
if (child == 0) {
   strlist argv = {0}; /* list of arguments */
   char* cmdname = 0; /* first argument */
   char* path; /* of output files */
   int oflags;

   for (int i = 0; i < tokens.len; ++i) {
      switch (tokens.list[i][0]) {
         case '<':
            fassign(0, &tokens.list[i][1], O_RDONLY, 0);
            break;
         case '>':
            path = &tokens.list[i][1];
            oflags = O_WRONLY|O_CREAT;
            if (*path == '>') {
               ++path; oflags |= O_APPEND;
            } else {
               oflags |= O_TRUNC;
            }
            fassign(1, path, oflags, 0666);
            break;
         default:
            strlist_push(&argv, tokens.list[i]);
            if (cmdname == 0) cmdname = tokens.list[i];
      }
   }
   if (cmdname == 0) exit(0);
   strlist_push0(&argv);
   execvp(cmdname, argv.list);
   perror(cmdname); exit(255);
}
```

tinysh.c

```
/*
 * assign an opened file with the given flags and mode to fd
 */
void fassign(int fd, char* path, int oflags, mode_t mode) {
   int newfd = open(path, oflags, mode);
   if (newfd < 0) {
      perror(path); exit(255);
   }
   if (dup2(newfd, fd) < 0) {
      perror("dup2"); exit(255);
   }
   close(newfd);
} // fassign
```

- Mit dem Systemaufruf *dup2* lässt sich ein Dateideskriptor auf einen gegebenen anderen Deskriptor duplizieren, die dann beide auf den gleichen Eintrag in der *Open File Table* verweisen.
- So lassen sich neu eröffnete Datei-Verbindungen mit vorgegebenen Dateideskriptoren wie etwa 0 (stdin) oder 1 (stdout) verknüpfen.

Signale werden für vielfältige Zwecke eingesetzt. Sie können verwendet werden,

- um den normalen Ablauf eines Prozesses für einen wichtigen Hinweis zu unterbrechen,
- um die Ausführung eines Prozesses zu suspendieren,
- um die Terminierung eines Prozesses zu erbitten oder zu erzwingen und
- um schwerwiegende Fehler bei der Ausführung zu behandeln wie z.B. den Verweis durch einen invaliden Zeiger.

Signale als Unterbrechung

- Signale sind unter UNIX die einzige Möglichkeit, den normalen Programmablauf eines Prozesses zu unterbrechen.
- Signale werden durch kleine natürliche Zahlen repräsentiert, die in jeder UNIX-Umgebung fest vordefiniert sind.
- Darüber hinaus stehen kaum weitere Informationen zur Verfügung. Signale ersetzen daher keine Interprozeßkommunikation.
- Signale können von verschiedenen Parteien ausgelöst werden: Von anderen Prozessen, die die dafür notwendige Berechtigung haben (entweder der gleiche Benutzer oder der Super-User), durch den Prozess selbst entweder indirekt (durch einen schwerwiegenden Fehler) oder explizit oder auch durch das Betriebssystem.

Signale in den Standards zu C

- Der ISO-Standard 9899-2011 für die Programmiersprache C definiert eine einfache und damit recht portable Schnittstelle für die Behandlung von Signalen. Hier gibt es neben der Signalnummer selbst keine weiteren Informationen.
- Der IEEE Standard 1003.1 (POSIX) bietet eine Obermenge der Schnittstelle des ISO-Standards an, bei der wenige zusätzliche Informationen (wie z.B. die Angabe des invaliden Zeigers) dabei sein können und der insbesondere eine sehr viel feinere Kontrolle der Signalbehandlung erlaubt.

Signale der Terminalschnittstelle unter UNIX

Die Terminalschnittstelle unter UNIX wurde ursprünglich für ASCII-Terminals mit serieller Schnittstelle entwickelt, die nur folgende Eingabemöglichkeiten anboten:

- Einzelne ASCII-Zeichen, jeweils ein Byte (zusammen mit etwas Extra-Kodierung wie Prüf- und Stop-Bits).
- Ein BREAK, das als spezielles Signal repräsentiert wird, das länger als die Kodierung für ein ASCII-Zeichen währt.
- Ein HANGUP, bei dem ein Signal wegfällt, das zuvor die Existenz der Leitung bestätigt hat. Dies benötigt einen weiteren Draht in der seriellen Leitung.

Diese Eingaben werden auf der Seite des Betriebssystems vom Terminal-Treiber bearbeitet, der in Abhängigkeit von den getroffenen Einstellungen

- die eingegebenen Zeichen puffert und das Editieren der Eingabe ermöglicht (beispielsweise mittels BACKSPACE, CTRL-u und CTRL-w) und
- bei besonderen Eingaben Signale an alle Prozesse schickt, die mit diesem Terminal verbunden sind.

Ziel war es, dass im Normalfall ein BREAK zu dem Abbruch oder zumindest der Unterbrechung der gerade laufenden Anwendung führt. Und ein HANGUP sollte zu dem Abbruch der gesamten Sitzung führen, da bei einem Wegfall der Leitung keine Möglichkeit eines regulären Abmeldens besteht.

Übergang zu Pseudo-Terminals

Heute sind serielle Terminals rar geworden, aber das Konzept wurde dennoch beibehalten:

- Zwischen einem virtuellen Terminal (beispielsweise einem xterm) und den Prozessen, die zur zugehörigen Sitzung gehören, ist ein sogenanntes Pseudo-Terminal im Betriebssystem geschaltet, das der Sitzung die Verwendung eines klassischen Terminals vorspielt.
- Da es BREAK in diesem Umfeld nicht mehr gibt, wird es durch ein beliebiges Zeichen ersetzt wie beispielsweise CTRL-c.
- Wenn das virtuelle Terminal wegfällt (z.B. durch eine gewaltsame Beendigung der xterm-Anwendung), dann gibt es weiterhin ein HANGUP für die Sitzung.

Reaktionsmöglichkeiten bei Signalen

- Auf fast alle Signale können Prozesse, die sie erhalten, auf dreierlei Weise reagieren:
  - Voreinstellung: Normalerweise die Terminierung des Prozesses. (*SIG_DFL*)
  - Ignorieren. (*SIG_IGN*)
  - Bearbeitung durch einen Signalbehandler.
- Es mag harsch erscheinen, dass die Voreinstellung fast durchweg zur Terminierung eines Prozesses führt. Aber genau dies führt bei normalen Anwendungen genau zu den gewünschten Effekten wie Abbruch des laufenden Programms bei BREAK (die Shell ignoriert das Signal) und Abbau der Sitzung bei HANGUP.
- Wenn ein Prozess diese Signale ignoriert, sollte es genau wissen, was es tut, da der Nutzer auf diese Weise eine wichtige Kontrollmöglichkeit seiner Sitzung verliert.

sigint.c

```
#include <signal.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

volatile sig_atomic_t signal_caught = 0;

void signal_handler(int signal) {
   signal_caught = signal;
}

int main() {
   if (signal(SIGINT, signal_handler) == SIG_ERR) {
      perror("unable to setup signal handler for SIGINT");
      exit(1);
   }
   printf("Try to send a SIGINT signal!\n");
   int counter = 0;
   while (!signal_caught) {
      for (int i = 0; i < counter; ++i);
      ++counter;
   }
   printf("Got signal %d after %d steps!\n", signal_caught, counter);
}
```

- Dieses Beispiel demonstriert die Behandlung des Signals *SIGINT*, das dem BREAK entspricht.

sigint.c

```
volatile sig_atomic_t signal_caught = 0;

void signal_handler(int signal) {
   signal_caught = signal;
}
```

- Die Deklaration für *signal_caught* wird noch genauer diskutiert. Zunächst kann davon ausgegangen werden, dass es sich dabei um eine globale ganzzahlige Variable handelt, die zu Beginn mit 0 initialisiert wird.
- Die Funktion *signal_handler* ist ein Signalbehandler. Als einziges Argument erhält sie die Nummer des eingetroffenen Signals, das es zu behandeln gilt. Einen Rückgabewert gibt es nicht.

sigint.c

```
if (signal(SIGINT, signal_handler) == SIG_ERR) {
   perror("unable to setup signal handler for SIGINT");
   exit(1);
}
```

- Mit der Funktion *signal* kann für eine Signalnummer (hier *SIGINT*) ein Signalbehandler (hier *signal_handler*) spezifiziert werden.
- Wenn die Operation erfolgreich war, wird der zuletzt eingesetzte Signalbehandler zurückgeliefert.
- Im Fehlerfall liefert *signal* den Wert *SIG_ERR*. (Damit ist normalerweise nicht zu rechnen, es sei denn, es werden nicht zulässige Einstellungen vorgenommen, wie etwa das Ignorieren von *SIG_KILL*.)

sigint.c

```
printf("Try to send a SIGINT signal!\n");
int counter = 0;
while (!signal_caught) {
   for (int i = 0; i < counter; ++i);
   ++counter;
}
printf("Got signal %d after %d steps!\n", signal_caught, counter);
```

- Das Hauptprogramm arbeitet eine Endlosschleife ab, die nur beendet werden kann, wenn auf „magische“ Weise die Variable *signal_caught* einen Wert ungleich 0 erhält.

Die Falle eines optimierenden Übersetzers

sigint.c

```
while (!signal_caught) {
   for (int i = 0; i < counter; ++i);
   ++counter;
}
```

- Wenn ein optimierender Übersetzer die Schleife analysiert, könnten folgende Punkte auffallen:
  - Die Schleife ruft keine externen Funktionen auf.
  - Innerhalb der Schleife wird *signal_caught* nirgends verändert.
- Daraus könnte vom Übersetzer der Schluss gezogen werden, dass die Schleifenbedingung nur zu Beginn einmal überprüft werden muss. Findet der Eintritt in die Schleife statt, könnte der weitere Test der Bedingung ersatzlos wegfallen.
- Analysen wie diese sind für heutige optimierende Übersetzer Pflicht, um guten Maschinen-Code erzeugen zu können.
- Es wäre fatal, wenn darauf nur wegen der Existenz von asynchron aufgerufenen Signalbehandlern verzichtet werden würde.

Speicherklasse volatile

sigint.c

```
volatile sig_atomic_t signal_caught = 0;
```

- Um beides zu haben, die fortgeschrittenen Optimierungstechniken und die Möglichkeit, Variablen innerhalb von Signalbehandlern setzen zu können, wurde in C die Speicherklasse **volatile** eingeführt.
- Damit lassen sich Variablen kennzeichnen, deren Wert sich jederzeit ändern kann — selbst dann, wenn dies aus dem vorliegenden Programmtext nicht ersichtlich ist.
- Entsprechend gilt dann auch in C, dass alle anderen Variablen, die nicht als **volatile** klassifiziert sind, sich nicht durch „magische“ Effekte verändern dürfen.

Zulässige Aktionen in einem Signalbehandler

Damit die Effekte eines Signalbehandlers wohldefiniert sind, schränken sich die Möglichkeiten stark ein. So ist es nur zulässig,

- lokale Variablen zu verwenden,
- mit **volatile** deklarierte Variablen zu benutzen und
- Funktionen aufzurufen, die sich an die gleichen Spielregeln halten.

Zulässige Aktionen in einem Signalbehandler

- Die Verwendung von Ein- und Ausgabe innerhalb eines Signalbehandlers ist nicht zulässig.
- Der ISO-Standard 9899-2011 nennt nur *abort*(), *_Exit*(), *quick_exit*() und *signal*() als zulässige Bibliotheksfunktionen.
- Beim POSIX-Standard werden noch zahlreiche weitere Systemaufrufe genannt.
- Auf den Manualseiten von Solaris wird dies dokumentiert durch die Angabe „Async-Signal-Safe“ bei „MT-Level“.
- Ansonsten ist nach expliziten Hinweisen zu suchen, ob eine Funktion mehrfach parallel ausgeführt werden darf, d.h. ob sie *reentrant* ist.

Atomizität bei Variablenzugriffen

- Variablenzugriffe sind nicht notwendigerweise atomar.
- Das hat zur Konsequenz, dass eine unterbrochende Variablenzuweisung möglicherweise nur teilweise durchgeführt worden ist. Auf einer 32-Bit-Maschine mit einem 32 Bit breiten Datenbus wäre es etwa denkbar, dass eine 64-Bit-Größe (etwa **long long** oder **double**) nur zur Hälfte kopiert ist, wenn eine Unterbrechung eintrifft.
- Dies bedeutet, dass im Falle einer Unterbrechung eine Variable nicht nur einen alten oder neuen Wert haben kann, sondern auch einen undefinierten.
- Um solche Probleme auszuschließen, bietet der ISO-Standard 9899-1999 den ganzzahligen Datentyp *sig_atomic_t* an, der in <*signal.h*> definiert ist.
- Bei Zugriffen auf Variablen dieses Typs wird im Falle einer Unterbrechung nur der alte oder der neue Wert beobachtet, jedoch nie ein undefinierter.
- *sig_atomic_t* wird typischerweise in Kombination mit **volatile** verwendet.

Wecksignale mit *alarm*

sigalrm.c

```
#include <signal.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <unistd.h>

static volatile sig_atomic_t time_exceeded = 0;

static void alarm_handler(int signal) {
   time_exceeded = 1;
}

int main() {
   if (signal(SIGALRM, alarm_handler) == SIG_ERR) {
      perror("unable to setup signal handler for SIGALRM");
      exit(1);
   }
   alarm(2);
   puts("Na, koennen Sie innerhalb von zwei Sekunden etwas eingeben?");
   int ch = getchar();
   if (time_exceeded) {
      puts("Das war wohl nichts.");
   } else {
      puts("Gut!");
   }
}
```

sigalrm.c

```
if (signal(SIGALRM, alarm_handler) == SIG_ERR) {
   perror("unable to setup signal handler for SIGALRM");
   exit(1);
}
alarm(2);
```

- Für jeden Prozess verwaltet UNIX einen Wecker, der entweder ruht oder zu einem spezifizierten Zeitpunkt sich mit dem Signal *SIGALRM* meldet.
- Der Wecker wird mit *alarm* gestellt. Dabei wird die zu verstreichende Zeit in Sekunden angegeben.
- Mit einer Angabe von 0 lässt sich der Wecker ausschalten.

tread.h

```
#ifndef TREAD_H
#define TREAD_H

#include <unistd.h>

int timed_read(int fd, void* buf, size_t nbytes, unsigned seconds);

#endif
```

- Mit Hilfe des Weckers lässt sich der Systemaufruf *read* zu *timed_read* erweitern, das ein Zeitlimit berücksichtigt.
- Falls das Zeitlimit erreicht wird, ist kein Fehler, sondern es wird ganz schlicht 0 zurückzugeben.
- Wie bereits beim vorherigen Beispiel wird hier ausgenutzt, dass nicht nur normale Programmabläufe, sondern auch einige Systemaufrufe wie etwa *read* unterbrechbar sind.

tread.c

```
#include <signal.h>
#include <unistd.h>
#include "tread.h"

static volatile sig_atomic_t time_exceeded = 0;

static void alarm_handler(int signal) {
   time_exceeded = 1;
}
```

- Der Signalbehandler für *SIGALRM* arbeitet wie gehabt. Allerdings wird im Unterschied zu zuvor die Variable und der Behandler **static** deklariert, damit diese Deklarationen privat bleiben und nicht in Konflikt zu anderen Deklarationen stehen.

Lese-Operationen mit Zeitlimit

tread.c

```
int timed_read(int fd, void* buf, size_t nbytes, unsigned seconds) {
   if (seconds == 0) return 0;
   /*
    * setup signal handler and alarm clock but
    * remember the previous settings
    */
   void (*previous_handler)(int) = signal(SIGALRM, alarm_handler);
   if (previous_handler == SIG_ERR) return -1;
   time_exceeded = 0;
   int remaining_seconds = alarm(seconds);
   if (remaining_seconds > 0) {
      if (remaining_seconds <= seconds) {
         remaining_seconds = 1;
      } else {
         remaining_seconds -= seconds;
      }
   }

   int bytes_read = read(fd, buf, nbytes);

   /* restore previous settings */
   if (!time_exceeded) alarm(0);
   signal(SIGALRM, previous_handler);
   if (remaining_seconds) alarm(remaining_seconds);

   if (time_exceeded) return 0;
   return bytes_read;
}
```

tread.c

```
void (*previous_handler)(int) = signal(SIGALRM, alarm_handler);
```

- Aus der Sicht einer Bibliotheksfunktion muss damit gerechnet werden, dass auch noch andere Parteien einen Wecker benötigen und deswegen *alarm* aufrufen.
- Deswegen ist es sinnvoll, die eigene Nutzung so zu gestalten, dass die Weckfunktion für die anderen nicht sabotiert wird.
- Dies ist prinzipiell möglich, weil *signal* den gerade eingesetzten Signalbehandler im Erfolgsfalle zurückliefert. Dieser wird hier der Variablen *previous_handler* zugewiesen.

tread.c

```
time_exceeded = 0;
int remaining_seconds = alarm(seconds);
if (remaining_seconds > 0) {
   if (remaining_seconds <= seconds) {
      remaining_seconds = 1;
   } else {
      remaining_seconds -= seconds;
   }
}
```

- Die gleiche Rücksichtnahme erfolgt bei dem Aufruf von *alarm*.
- Im Erfolgsfalle liefert *alarm* den Wert 0, falls zuvor der Wecker ruhte oder einen positiven Wert, der die zuvor noch verbliebenen Sekunden bis zum Signal spezifiziert.
- Die Variable *remaining_seconds* wird auf den Wert gesetzt, den wir abschließend verwenden, um den Wecker neu zu stellen, nachdem er in dieser Funktion nicht mehr benötigt wird.

- *read* hat in diesem Szenario verschiedene Möglichkeiten, zurückzukommen. Erstens kann *read* ganz normal etwas einlesen (positiver Rückgabewert), es kann ein Eingabeende vorliegen (Rückgabewert gleich 0) oder es kann ein Fehler eintreten (negativer Rückgabewert).
- Im Falle einer Unterbrechung durch ein Signal bricht der Systemaufruf mit einem Fehler ab, d.h. es wird -1 zurückgeliefert. Die Variable *errno* hat dann den Wert *EINTR*.
- Wenn *read* unterbrochen wird und mit -1 endet, wurde nichts weggelesen. Ein unterbrochener *write*-Systemaufruf, der -1 liefert, hat nichts geschrieben. Wenn *read* bzw. *write* bereits gelesen bzw. geschrieben haben, wenn sie unterbrochen werden, dann liefern sie nicht -1, sondern die Zahl der bereits gelesenen bzw. geschriebenen Bytes zurück.
- In diesem Beispiel wird jedoch nicht *errno* überprüft, sondern die Variable *time_exceeded* untersucht.

tread.c

```
int bytes_read = read(fd, buf, nbytes);

/* restore previous settings */
if (!time_exceeded) alarm(0);
signal(SIGALRM, previous_handler);
if (remaining_seconds) alarm(remaining_seconds);

if (bytes_read < 0 && time_exceeded) return 0;
return bytes_read;
```

- Bevor *alarm* erneut aufgesetzt wird, muss zuvor der alte Signalbehandler restauriert werden.
- Wenn dies in umgekehrter Reihenfolge geschehen würde, dann gibt es ein kleines Zeitfenster, in dem das Signal *SIGALRM* eintreffen könnte, noch bevor es zum Aufruf von *signal* kam.
- In diesem Falle würde der andere Signalbehandler nicht wie geplant aufgerufen werden.
- Daher wird hier zuerst der alte Signalbehandler eingesetzt, bevor *alarm* aufgerufen wird. Auf diese Weise wird das Fenster geschlossen.

Das Versenden von Signalen

- Grundsätzlich kann ein Prozess einem anderen Prozess (einschliesslich sich selbst) ein Signal senden.
- Voraussetzung ist dabei unter UNIX, dass der andere Prozess dem gleichen Benutzer gehört oder der das Signal versendende Prozess mit Superuser-Privilegien arbeitet.
- Der ISO-Standard für C sieht zum Signalversand nur eine Funktion *raise*() vor, die es erlaubt, ein Signal an den eigenen Prozess zu versenden.
- Im POSIX-Standard kommt der Systemaufruf *kill*() hinzu, der es erlaubt, ein Signal an einen anderen Prozess zu verschicken, sofern die dafür notwendigen Privilegien vorliegen.

killparent.c

```
#include <signal.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <unistd.h>
#include <sys/wait.h>

void sigterm_handler(int signo) {
   const char msg[] = "Goodbye, cruel world!\n";
   write(1, msg, sizeof msg - 1);
   _Exit(1);
}

int main() {
   if (signal(SIGTERM, sigterm_handler) == SIG_ERR) {
      perror("signal"); exit(1);
   }

   pid_t child = fork();
   if (child == 0) {
      kill(getppid(), SIGTERM);
      exit(0);
   }
   int wstat;
   wait(&wstat);
   exit(0);
}
```

killparent.c

```
kill(getppid(), SIGTERM);
```

- Der Systemaufruf *kill* benötigt zwei Parameter, wobei der erste die Prozess-ID des Signalempfängers und der zweite Parameter das zu versendende Signal nennt.
- Das Versenden von *SIGTERM* gilt per Konvention als „freundliche“ Bitte, den Prozess zu terminieren.
- Der Empfänger erhält so die Gelegenheit, Aufräumarbeiten vorzunehmen, bevor er abschließt.
- Alternativ zu *SIGTERM* gibt es auch *SIGKILL*, das sich nicht behandeln lässt, d.h. dass der Empfänger unter keinen Umständen mehr zum Zuge kommt.

killparent.c

```
void sigterm_handler(int signo) {
   const char msg[] = "Goodbye, cruel world!\n";
   write(1, msg, sizeof msg - 1);
   _Exit(1);
}
```

- Hier ist vorgesehen, dass der Signalbehandler im Falle von *SIGTERM* noch eine Meldung ausgibt, bevor der Prozess terminiert wird.
- Da die Verwendung von Funktionen der *stdio* wie etwa *puts* innerhalb von Signalbehandlern tabu ist, wird hier der Systemaufruf *write* verwendet.
- Ebenfalls tabu ist *exit*, da dabei Funktionen der *stdio* zur Leerung aller Puffer aufgerufen werden.
- Alternativ kann die Funktion *_Exit* aufgerufen werden, die mit dem ISO-Standard 9899-1999 eingeführt wurde. Diese umgeht sämtliche Aufräumarbeiten und terminiert unmittelbar den aufrufenden Prozess.

Schonendes Anklopfen

- Der Systemaufruf *kill*() erfüllt aber auch noch einen weiteren Zweck. Bei einer Signalnummer von 0 wird nur die Zulässigkeit des Signalversendens überprüft.
- Dies kann dazu ausgenutzt werden, um die Existenz eines Prozesses zu überprüfen.
- Mit folgenden Fehler-Codes ist dabei zu rechnen:
  - *ESRCH*: Die genannte Prozess-ID ist zur Zeit nicht vergeben.
  - *EPERM*: Die genannte Prozess-ID existiert, aber es fehlen die Privilegien, dem Prozess ein Signal zu senden.

Schonendes Anklopfen

waitfor.c

```
#include <errno.h>
#include <signal.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <unistd.h>

int main(int argc, char** argv) {
   char* cmdname = *argv++; --argc;
   if (argc != 1) {
      fprintf(stderr, "Usage: %s pid\n", cmdname);
      exit(1);
   }

   /* convert first argument to pid */
   char* endptr = argv[0];
   pid_t pid = strtol(argv[0], &endptr, 10);
   if (endptr == argv[0]) {
      fprintf(stderr, "%s: integer expected as argument\n",
         cmdname);
      exit(1);
   }

   while (kill(pid, 0) == 0) sleep(1);

   if (errno == ESRCH) exit(0);
   perror(cmdname); exit(1);
}
```

Auf eintreffende Signale warten

- Gelegentlich kommt es vor, dass Prozesse nur auf das Eintreffen eines Signals warten möchten und sonst nichts zu tun haben.
- Theoretisch könnte ein Prozess dann in eine Dauerschleife mit leerem Inhalt treten (auch *busy loop* bezeichnet).
- Dies wäre jedoch nicht sehr fair auf einem System mit mehreren Prozessen, da dadurch Rechenzeit vergeudet würde.
- Abhilfe schafft hier der Systemaufruf *pause*(), der einen Prozess schlafen legt, bis ein Signal eintrifft.

Auf eintreffende Signale warten

pingpong.c

```
#include <signal.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <unistd.h>

static volatile sig_atomic_t sigcount = 0;

void sighandler(int sig) {
   ++sigcount;
   if (signal(sig, sighandler) == SIG_ERR) _Exit(1);
}

int main() {
   /* this signal setting is inherited to our child */
   if (signal(SIGUSR1, sighandler) == SIG_ERR) {
      perror("signal SIGUSR1"); exit(1);
   }

   pid_t parent = getpid();
   pid_t child = fork();
   if (child < 0) {
      perror("fork"); exit(1);
   }
   if (child == 0) {
      sigcount = 1; /* give the ball to the child... */
      playwith(parent);
   } else {
      playwith(child);
   }
}
```

Auf eintreffende Signale warten

pingpong.c

```
static void playwith(pid_t partner) {
   for(int i = 0; i < 10; ++i) {
      if (!sigcount) pause();
      printf("[%d] send signal to %d\n",
         (int) getpid(), (int) partner);
      if (kill(partner, SIGUSR1) < 0) {
         printf("[%d] %d is no longer alive\n",
            (int) getpid(), (int) partner);
         return;
      }
      --sigcount;
   }
   printf("[%d] finishes playing\n", (int) getpid());
}
```

- Mit *pause* wartet der aufrufende Prozess bis zum Eintreffen eines Signals. Wenn dieser Systemaufruf beendet wird, ist das Resultat immer negativ und *errno* ist auf *EINTR* gesetzt.

Auf eintreffende Signale warten

pingpong.c

```
static volatile sig_atomic_t sigcount = 0;
void sighandler(int sig) {
   ++sigcount;
   if (signal(sig, sighandler) == SIG_ERR) _Exit(1);
}

   /* ... */
   if (signal(SIGUSR1, sighandler) == SIG_ERR) {
      perror("signal SIGUSR1"); exit(1);
   }
   /* ... */
```

- *SIGUSR1* gehört zusammen mit *SIGUSR2* zu den Signalen ohne Sonderbedeutung, die problemlos für Zwecke der Prozesskommunikation verwendet werden können.
- Wenn *sighandler* noch vor *fork* als Signalbehandler installiert wird, dann erbt auch der neu erzeugte Prozess diese Einstellung.
- *sighandler* installiert sich selbst erneut, da der ISO-Standard 9899-2011 offen lässt, ob der Signalbehandler nach dem Eintreffen des Signals installiert bleibt oder nicht.

Die vorangegangenen Beispiele werfen die Frage auf, wie UNIX bei der Zustellung von Signalen vorgeht, wenn

- der Prozess zur Zeit nicht aktiv ist,
- gerade ein Systemaufruf für den Prozess abgearbeitet wird oder
- gerade ein Signalbehandler bereits aktiv ist.

Vom ISO-Standard 9899-2011 für C wird in dieser Beziehung nichts festgelegt.

Der POSIX-Standard geht jedoch genauer darauf ein:

- Wenn ein Prozess ein Signal erhält, wird dieses Signal zunächst in den zugehörigen Verwaltungsstrukturen des Betriebssystems vermerkt. Signale, die für einen Prozess vermerkt sind, jedoch noch nicht zugestellt worden sind, werden als *anhängige* Signale bezeichnet.
- Wenn mehrere Signale mit der gleichen Nummer anhängig sind, ist nicht festgelegt, ob eine Mehrfachzustellung erfolgt. Es können also Signale wegfallen.
- Nur aktiv laufende Prozesse können Signale empfangen. Prozesse werden normalerweise durch die Existenz eines anhängigen Signals aktiv — aber dieses kann auch längere Zeit in Anspruch nehmen, wenn dem zwischenzeitlich mangelnde Ressourcen entgegenstehen.
- Für jeden Prozess gibt es eine Menge blockierter Signale, die im Augenblick nicht zugestellt werden sollen. Dies hat nichts mit dem Ignorieren von Signalen zu tun, da blockierte Signale anhängig bleiben, bis die Blockierung aufgehoben wird.

- Der POSIX-Standard legt nicht fest, was mit der Signalbehandlung geschieht, wenn ein Signalbehandler aufgerufen wird.
- Möglich ist das Zurückfallen auf *SIG_DFL* (Voreinstellung mit Prozeßterminierung) oder die temporäre automatische Blockierung des Signals bis zur Beendigung des Signalbehandlers.
- Alle modernen UNIX-Systeme wählen die zweite Variante.
- Dies lässt sich aber gemäß dem POSIX-Standard auch erzwingen, indem die umfangreichere Schnittstelle *sigaction*() anstelle von *signal*() verwendet wird. Allerdings ist *sigaction*() nicht mehr Bestandteil des ISO-Standards für C.

- UNIX unterscheidet zwischen unterbrechbaren und unterbrechungsfreien Systemaufrufen. Zur ersteren Kategorie gehören weitgehend alle Systemaufrufe, die zu einer längeren Blockierung eines Prozesses führen können.
- Ist ein nicht blockiertes Signal anhängig, kann ein unterbrechbarer Systemaufruf aufgrund des Signals mit einer Fehlerindikation beendet werden. *errno* wird dann auf *EINTR* gesetzt.
- Dabei ist zu beachten, dass der unterbrochene Systemaufruf nach Beendigung der Signalbehandlung *nicht* fortgesetzt wird, sondern manuell erneut gestartet werden muss.
- Dies kann leider zu unerwarteten Überraschungseffekten führen, weil insbesondere auch die *stdio*-Bibliothek keinerlei Vorkehrungen trifft, Systemaufrufe automatisch erneut aufzusetzen, falls es zu einer Unterbrechung kam.
- Dies ist eine wesentliche Schwäche sowohl des POSIX-Standards als auch der *stdio*-Bibliothek und ein Grund mehr dafür, auf die Verwendung der *stdio* in kritischen Anwendungen völlig zu verzichten.

- Für die genauere Regulierung der Signalbehandlung bietet POSIX (jedoch nicht ISO-C) den Systemaufruf *sigaction* an. Während bei *signal* zur Spezifikation der Signalbehandlung nur ein Funktionszeiger genügte, kommen bei der **struct** *sigaction*, die *sigaction*() verwendet, die in der folgenden Tabelle genannten Felder zum Einsatz:

Datentyp	Feldname	Beschreibung
void(∗)(**int**)	*sa_handler*	Funktionszeiger (wie bisher)
void(∗)(**int**, *siginfo_t*∗, **void**∗)	*sa_sigaction*	alternativer Zeiger auf einen Signalbehandler, der mehr Informationen zum Signal erhält
sigset_t	*sa_mask*	Menge von Signalen, die während der Signalbehandlung dieses Signals zu blockieren sind
int	*sa_flags*	Menge von Boolean-wertigen Optionen

strikeback.c

```
volatile int signo = 0;
volatile pid_t pid = 0;

void sighandler(int sig, siginfo_t* siginfo, void* context) {
   signo = sig;
   pid = siginfo->si_pid;
   if (pid) { /* strike back */
      kill(pid, sig);
   }
}

int main() {
   int signals[] = {SIGHUP, SIGINT, SIGTERM, SIGUSR1, SIGUSR2};
   struct sigaction sigact = {
      .sa_sigaction = sighandler,
      .sa_flags = SA_SIGINFO,
   };
   for (int index = 0; index < sizeof(signals)/sizeof(int); ++index) {
      signo = signals[index];
      if (sigaction(signo, &sigact, 0) < 0) {
         perror("sigaction"); exit(1);
      }
   }
   for(;;) {
      pause();
      if (signo) {
         printf("got signal %d from %d\n", signo, (int) pid); fflush(stdout);
      }
   }
}
```

Verlust von Signalen

- Bei der *sigaction*-Schnittstelle ist es möglich, die Zustellung einiger Signale aufzuhalten während einer Signalbehandlung.
- Dies betrifft implizit das gerade empfangene Signal und auch mögliche weitere Signale. Letzteres wird über das Feld *sa_mask* spezifiziert.
- Blockierte Signale sind dann zunächst anhängig und warten dann darauf, dass der Block aufgehoben wird.
- Wenn mehrfach das gleiche blockierte Signal eintrifft, dann ist nicht definiert, ob dies auch mehrfach zugestellt wird, sobald der Block aufgehoben wird.
- Es kann somit zum Verlust an Signalen kommen.

sigfire.c

```
#include <signal.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <unistd.h>

static const int NOF_SIGNALS = 1000;
static volatile sig_atomic_t received_signals = 0;
static volatile sig_atomic_t terminated = 0;

static void count_signals(int sig) {
   ++received_signals;
}

void termination_handler(int sig) {
   terminated = 1;
}
```

- Dieses Beispiel soll den potentiellen Verlust von Signalen demonstrieren, indem gezählt wird, wieviel von insgesamt 1000 verschickten Signalen ankommen.

Verlust von Signalen

sigfire.c

```
int main() {
   sighold(SIGUSR1); sighold(SIGTERM);
   pid_t child = fork();
   if (child < 0) {
      perror("fork"); exit(1);
   }
   if (child == 0) {
      struct sigaction action = {
         .sa_handler = count_signals,
      };
      if (sigaction(SIGUSR1, &action, 0) != 0) {
         perror("sigaction"); exit(1);
      }
      action.sa_handler = termination_handler;
      if (sigaction(SIGTERM, &action, 0) != 0) {
         perror("sigaction"); exit(1);
      }
      sigrelse(SIGUSR1); sigrelse(SIGTERM);
      while (!terminated) pause();
      printf("[%d] received %d signals\n", (int) getpid(), received_signals);
      exit(0);
   }

   sigrelse(SIGUSR1); sigrelse(SIGTERM);
   for (int i = 0; i < NOF_SIGNALS; ++i) {
      kill(child, SIGUSR1);
   }
   printf("[%d] sent %d signals\n", (int) getpid(), NOF_SIGNALS);
   kill(child, SIGTERM); wait(0);
}
```

sigfire.c

```
sighold(SIGUSR1); sighold(SIGTERM);
/* ... */
sigrelse(SIGUSR1); sigrelse(SIGTERM);
```

- Mit der Funktion *sighold* kann ein Signal auch außerhalb eines Signalbehandlers explizit geblockt werden.
- Mit *sigrelse* kann dies wieder rückgängig gemacht werden.
- Auf diese Weise können kritische Bereiche geschützt werden.

Signale als Indikatoren für terminierte Prozesse

- Mit Hilfe der Funktionen *wait*() oder *waitpid*() wird die Terminierung erzeugter Prozesse *synchron* abgewickelt.
- Gelegentlich ist es auch sinnvoll, sich die Terminierung über Signale *asynchron* mitteilen zu lassen. Dies geht mit dem Signal *SIGCHLD*, das an den Erzeuger versendet wird, sobald eine der von ihm erzeugten Prozesse terminiert.
- Per Voreinstellung wird dieses Signal ignoriert.

sigchld.c

```
#include <signal.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <unistd.h>
#include <sys/wait.h>
#include "processlist.h"

static processlist alive, dead;

void child_term_handler(int sig) {
   pid_t pid; int wstat;
   while ((pid = waitpid((pid_t)-1, &wstat, WNOHANG)) > 0) {
      if (pl_move(&alive, &dead, pid)) {
         pl_modify(&dead, pid, wstat);
      }
   }
}
```

- In diesem Beispiel werden zahlreiche Prozesse erzeugt, deren Exit-Status zeitnah in einer Datenstruktur verwaltet wird.

sigchld.c

```
int main() {
   struct sigaction action = {
      .sa_handler = child_term_handler,
   };
   if (sigaction(SIGCHLD, &action, 0) != 0) {
      perror("sigaction"); exit(1);
   }
   pl_alloc(&alive, 4); pl_alloc(&dead, 4);
   sighold(SIGCHLD);
   for (int i = 0; i < 10; ++i) {
      fflush(0); pid_t child = fork();
      if (child < 0) {
         perror("fork"); exit(1);
      }
      if (child == 0) {
         srand(getpid()); sleep(rand() % 5); exit((char) rand());
      }
      pl_add(&alive, child, 0);
   }
   sigrelse(SIGCHLD);
   while (pl_length(&alive) > 0 || pl_length(&dead) > 0) {
      if (pl_length(&dead) == 0) pause();
      while (pl_length(&dead) > 0) {
         sighold(SIGCHLD);
         int wstat; pid_t pid = pl_pick(&dead, &wstat);
         sigrelse(SIGCHLD);
         printf("[%d] %d\n", (int) pid, WEXITSTATUS(wstat));
      }
   }
}
```

processlist.h

```
#ifndef PROCESSLIST_H
#define PROCESSLIST_H

typedef struct process {
   pid_t pid; int wstat;
   struct process* next;
} process;

typedef struct processlist {
   unsigned int size, length;
   process** bucket; /* hash table */
   unsigned int it_index;
   process* it_entry;
} processlist;

// All functions with the exception of pl_length, pl_next,
// and pl_pick return 1 on success, 0 in case of failures.

/* allocate a hash table for processes with the given bucket size */
int pl_alloc(processlist* pl, unsigned int size);

/* add tuple (pid,wstat) to the process list, pid must be unique */
int pl_add(processlist* pl, pid_t pid, int wstat);

/* modify wstat for a given pid */
int pl_modify(processlist* pl, pid_t pid, int wstat);
```

processlist.h

```
/* delete tuple by pid */
int pl_remove(processlist* pl, pid_t pid);

/* move entry for pid to another list */
int pl_move(processlist* from, processlist* to, pid_t pid);

/* return number of elements */
unsigned int pl_length(processlist* pl);

/* lookup wstat by pid */
int pl_lookup(processlist* pl, pid_t pid, int* wstat);

/* start iterator */
int pl_start(processlist *pl);

/* fetch next pid from iterator; returns 0 on end */
pid_t pl_next(processlist *pl);

/* pick and remove one element out of the list */
pid_t pl_pick(processlist *pl, int* wstat);

/* free allocated memory */
int pl_free(processlist* pl);

#endif
```

```
doolin$ tinysh
% cat >OUT
Some input...
^Cdoolin$
```

- Die zuvor vorgestellte Shell *tinysh* kümmerte sich nicht um die Signalbehandlung.
- Entsprechend führt ein *SIGINT* auf dem kontrollierenden Terminal nicht nur zum Abbruch des aufgerufenen Kommandos, sondern auch unerfreulicherweise zum abrupten Ende von *tinysh*.

Wie muss also die Signalbehandlung einer Shell aussehen?

- Wenn ein Kommando *im Vordergrund* läuft, muss die Shell die Signale *SIGINT* und *SIGQUIT* ignorieren.
- Wenn ein Kommando **im Hintergrund** läuft, müssen für diesen Prozess *SIGINT* und *SIGQUIT* ignoriert werden.
- Wenn die Shell ein Kommando einliest, sollten *SIGINT* und *SIGQUIT* die Neu-Eingabe des Kommandos ermöglichen.
- Bezüglich *SIGHUP* muss nichts unternommen werden.

Signalbehandlung in einer Shell

tiny2sh.c

```
static volatile sig_atomic_t interrupted = 0;

void interrupt_handler(int sig) {
   interrupted = 1;
}

int main() {
   struct sigaction action = {
      .sa_handler = interrupt_handler,
   };
   if (sigaction(SIGINT, &action, 0) != 0 ||
         sigaction(SIGQUIT, &action, 0) != 0) {
      perror("sigaction");
   }

   stralloc line = {0};
   while (getline(&line)) {
      strlist tokens = {0};
      stralloc_0(&line); /* required by tokenizer() */
      if (!tokenizer(&line, &tokens)) break;
      if (tokens.len == 0) continue;
      command cmd = {0};
      if (!scan_command(&tokens, &cmd)) continue;

      sighold(SIGINT); sighold(SIGQUIT);
      // ... fork & (exec | wait) ...
      sigrelse(SIGINT); sigrelse(SIGQUIT);
   }
}
```

tiny2sh.c

```
sighold(SIGINT); sighold(SIGQUIT);
pid_t child = fork();
if (child == -1) {
   perror("fork"); continue;
}
if (child == 0) {
   sigrelse(SIGINT); sigrelse(SIGQUIT);
   if (cmd.background) {
      sigignore(SIGINT); sigignore(SIGQUIT);
   }
   exec_command(&cmd);
   perror(cmd.cmdname);
   exit(255);
}

if (cmd.background) {
   printf("%d\n", (int)child);
} else {
   int wstat;
   pid_t pid = waitpid(child, &wstat, 0);
   if (!WIFEXITED(wstat) || WEXITSTATUS(wstat)) {
      print_child_status(pid, wstat);
   }
}
sigrelse(SIGINT); sigrelse(SIGQUIT);
```

tiny2sh.c

```
int getline(stralloc* line) {
   int first = 1;
   interrupted = 0;
   for(;;) {
      if (interrupted) {
         interrupted = 0;
         printf("\n");
         first = 1;
      }
      if (first) {
         status_report();
         printf("%% ");
         first = 0;
      }
      errno = 0;
      if (readline(stdin, line)) return 1;
      if (errno != EINTR) return 0;
   }
}
```

tiny2sh.c

```
void print_child_status(pid_t pid, int wstat) {
   printf("[%d] ", (int) pid);
   if (WIFEXITED(wstat)) {
      printf("exit %d", WEXITSTATUS(wstat));
   } else if (WIFSIGNALED(wstat)) {
      printf("terminated with signal %d", WTERMSIG(wstat));
      if (WCOREDUMP(wstat)) printf(" (core dump)");
   } else {
      printf("???");
   }
   printf("\n");
}

void status_report(void) {
   pid_t pid; int wstat;
   while ((pid = waitpid((pid_t)-1, &wstat, WNOHANG)) > 0) {
      print_child_status(pid, wstat);
   }
}
```

tinysh2.c

```
pid_t pid; int wstat;
while ((pid = waitpid((pid_t)-1, &wstat, WNOHANG)) > 0) {
   print_child_status(pid, wstat);
}
```

- Die Funktion *waitpid* wartet auf einen gegebenen Kindprozess.
- Wenn (*pid_t*)−1 angegeben wird, dann werden alle Kinder akzeptiert.
- Mit der Option *WNOHANG* blockiert *waitpid* nicht und liefert 0 zurück, falls momentan noch kein Exit-Code für einer der Kind-Prozesse zur Verfügung steht.

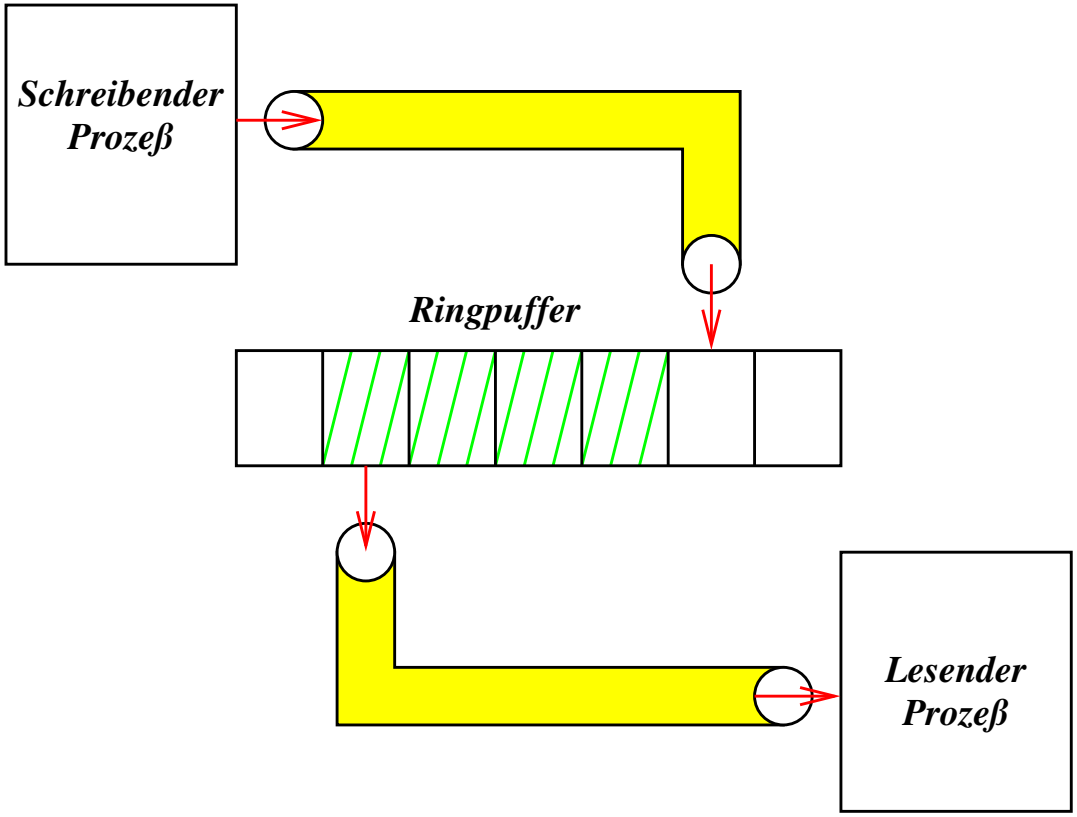
command.h

```
#ifndef COMMAND_H
#define COMMAND_H

#include <fcntl.h>
#include <afblib/strlist.h>

typedef struct fd_assignment {
   char* path;
   int oflags;
   mode_t mode;
} fd_assignment;

typedef struct command {
   char* cmdname;
   strlist argv;
   int background;
   /* for file descriptors 0 and 1 */
   fd_assignment assignments[2];
} command;

/* convert list of tokens into a command record */
int scan_command(strlist* tokens, command* cmd);

/*
 * open input and output files, if required, and
 * exec to the given command
 */
void exec_command(command* cmd);

#endif
```

```
thales$ ypcat passwd | cut -d: -f5 | cut -d' ' -f1 |
> sort | uniq -c | sort -rn | head
  94 Michael
  85 Daniel
  83 Tobias
  78 Florian
  75 Alexander
  65 Sebastian
  61 Thomas
  61 Matthias
  60 Markus
  57 Andreas
thales$
```

- Welches sind die 10 häufigsten Vornamen unserer Benutzer?
- Dank Pipelines und dem Unix-Werkzeugkasten lässt sich diese Frage schnell beantworten.
- Die Notation und die zugehörige Art der Interprozesskommunikation wurde von Douglas McIlroy, einem der Mitautoren der ersten Unix-Shell, in den 70er-Jahren entwickelt und hat sehr zur Popularität von Unix beigetragen.

Aufbau einer Pipeline



- Pipelines sind unidirektionale Kommunikationskanäle. Die beiden Enden einer Pipeline werden über verschiedene Dateiverbindungen angesprochen.
- Sie werden innerhalb des Unix-Betriebssystems mit Hilfe eines festdimensionierten Ringpuffers implementiert.

- Typische Größen des Ringbuffers sind 64 Kilobyte (Linux, OS X) oder 20 Kilobyte (Solaris 10).
- Wenn der Puffer vollständig gefüllt ist, wird ein Prozess, der ihn weiter zu füllen versucht, blockiert, bis wieder genügend Platz zur Verfügung steht.
- Wenn der Puffer leer ist, wird ein lesender Prozeß blockiert, bis der Puffer sich zumindest partiell füllt.
- Dies ist vergleichbar mit der Datenstruktur einer FIFO-Queue (*first in, first out*) mit explizit begrenzter Kapazität.
- Der POSIX-Standard unterstützt sowohl benannte Pipelines als auch solche, die mit Hilfe des Systemaufrufs *pipe*() erzeugt werden. Die benannten Pipelines sind aber kaum noch in Gebrauch, da die bidirektionalen UNIX-Domain-Sockets (mehr dazu später) normalerweise bevorzugt werden.

Konstruktion einer Pipeline

pipehello.c

```
#include <unistd.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <sys/wait.h>
enum {PIPE_READ = 0, PIPE_WRITE = 1};
int main() {
   int pipefds[2];
   if (pipe(pipefds) < 0) {
      perror("pipe"); exit(1);
   }
   pid_t child = fork();
   if (child < 0) {
      perror("fork"); exit(1);
   }
   if (child == 0) {
      close(pipefds[PIPE_WRITE]);
      char buf[32];
      ssize_t nbytes;
      while ((nbytes = read(pipefds[PIPE_READ],
            buf, sizeof buf)) > 0) {
         if (write(1, buf, nbytes) < nbytes) exit(1);
      }
      exit(0);
   }
   close(pipefds[PIPE_READ]);
   const char message[] = "Hello!\n";
   write(pipefds[PIPE_WRITE], message, sizeof message - 1);
   close(pipefds[PIPE_WRITE]);
   wait(0);
}
```

pipehello.c

```
enum {PIPE_READ = 0, PIPE_WRITE = 1};
int main() {
   int pipefds[2];
   if (pipe(pipefds) < 0) {
      perror("pipe"); exit(1);
   }
   /* ... */
}
```

- Mit dem Systemaufruf *pipe* wird eine Pipeline erzeugt.
- Zurückgegeben wird dabei ein Array mit zwei Dateiverbindungen, die auf das lesende (Index 0) und das schreibende (Index 1) Ende verweisen.
- Eine Interprozesskommunikation auf Basis von *pipe* lässt sich nur über *fork* aufbauen, indem das entsprechende andere Ende der Pipeline an einen neu erzeugten Prozess vererbt wird.
- Solche Pipelines können also nur zwischen verwandten Prozessen existieren, bei denen ein gemeinsamer Urahn diese mit *pipe* angelegt hat.

Schreibende Seite einer Pipeline

pipehello.c

```
pid_t child = fork();
if (child < 0) {
   perror("fork"); exit(1);
}
if (child == 0) {
   /* ... */
}
close(pipefds[PIPE_READ]);
const char message[] = "Hello!\n";
write(pipefds[PIPE_WRITE], message, sizeof message - 1);
close(pipefds[PIPE_WRITE]);
wait(0);
```

- Der in eine Pipeline schreibende Prozess sollte das nicht genutzte Ende der Pipeline (hier das lesende) schließen. (Mehr dazu später.)
- Danach kann auf das schreibende Ende ganz normal mit *write* (oder auch darauf aufbauend der *stdio*) geschrieben werden.
- Sobald dies abgeschlossen ist, sollte das schreibende Ende geschlossen werden, damit ein Eingabe-Ende auf der anderen Seite der Pipeline erkannt werden kann.

pipehello.c

```
if (child == 0) {
   close(pipefds[PIPE_WRITE]);
   char buf[32];
   ssize_t nbytes;
   while ((nbytes = read(pipefds[PIPE_READ],
         buf, sizeof buf)) > 0) {
      if (write(1, buf, nbytes) < nbytes) exit(1);
   }
   exit(0);
}
```

- Der von einer Pipeline lesende Prozess sollte das nicht genutzte Ende der Pipeline (hier das schreibende) schließen. (Mehr dazu später.)
- Danach kann auf das lesende Ende ganz normal mit *read* (oder auch darauf aufbauend der *stdio*) geschrieben werden.
- Die Schleife kopiert einfach alle Eingaben aus der Pipeline zur Dateiverbindung 1 (Standard-Ausgabe).
- Sobald alle schreibenden Enden geschlossen und der Ringpuffer geleert sind, wird ein Eingabe-Ende erkannt.

Gefahr von Hängern auf der lesenden Seite

- Nach *pipe* und *fork* haben zwei Prozesse jeweils beide Enden der Pipeline.
- Ein Eingabe-Ende auf der lesenden Seite wird genau dann (und nur dann!) erkannt, wenn **alle** schreibenden Enden geschlossen sind.
- Wenn also die lesende Seite es versäumt, die schreibende Seite zu schließen, wird sie kein Eingabe-Ende erkennen, wenn der andere Prozess seine schreibende Seite schließt.
- Stattdessen käme es zu einem endlosen Hänger.

Gefahr von Hängern auf der schreibenden Seite

- Genau dann (und nur dann!) wenn es kein Ende der Pipeline zum Lesen mehr gibt, führt das Schreiben auf das Ende zum Schreiben zur Zustellung des *SIGPIPE*-Signals bzw. dem Fehler *EPIPE*.
- Wenn die schreibende Seite es versäumt, ihr Ende zum Lesen zu schließen und der lesende Prozess aus irgendwelchen Gründen terminiert, ohne die Pipeline auslesen zu können, dann füllt sich zunächst der Ringpuffer und danach wird die schreibende Seite endlos blockiert.
- Entsprechend gäbe es wieder einen endlosen Hänger.
- Deswegen ist es von kritischer Bedeutung, dass die nicht benötigten Enden nach *fork* bei beiden Prozessen sofort geschlossen werden, um diese Probleme zu vermeiden.

Behandlung von *SIGPIPE*

sigpipe.c

```
int main() {
   int pipefds[2];
   if (pipe(pipefds) < 0) {
      perror("pipe"); exit(1);
   }
   pid_t child = fork();
   if (child < 0) {
      perror("fork"); exit(1);
   }
   if (child == 0) {
      close(pipefds[PIPE_WRITE]);
      char buf[32];
      ssize_t nbytes = read(pipefds[PIPE_READ],
            buf, sizeof buf);
      if (nbytes > 0) {
         if (write(1, buf, nbytes) < nbytes) exit(1);
      }
      exit(0);
   }
   close(pipefds[PIPE_READ]);
   struct sigaction action = {0}; action.sa_handler = sigpipe_handler;
   if (sigaction(SIGPIPE, &action, 0) < 0) {
      perror("sigaction"); exit(1);
   }
   while (!sigpipe_received) {
      const char message[] = "Hello!\n";
      write(pipefds[PIPE_WRITE], message, sizeof message - 1);
   }
   close(pipefds[PIPE_WRITE]); wait(0);
}
```

sigpipe.c

```
volatile sig_atomic_t sigpipe_received = 0;

void sigpipe_handler(int sig) {
   sigpipe_received = 1;
}
```

- Der Signalbehandler für *SIGPIPE* setzt hier nur eine globale Variable, so dass entsprechend getestet werden kann.
- Alternativ könnte als Signalbehandler auch *SIG_IGN* eingetragen werden. Das würde keine Funktion benötigt werden und es müsste dann explizit jede *write*-Operation überprüft werden. Wenn niemand mehr das andere Ende lesen kann, würde *errno* auf *EPIPE* gesetzt werden.

sigpipe.c

```
if (child == 0) {
   close(pipefds[PIPE_WRITE]);
   char buf[32];
   ssize_t nbytes = read(pipefds[PIPE_READ],
         buf, sizeof buf);
   if (nbytes > 0) {
      if (write(1, buf, nbytes) < nbytes) exit(1);
   }
   exit(0);
}
```

- Anders als zuvor ruft der neu erzeugte Prozess *read* nur ein einziges Mal auf und endet dann.
- Sobald sich dieser Prozess mit *exit* verabschiedet, bleibt kein lesendes Ende der Pipeline mehr offen, so dass damit dann die schreibende Seite das Signal *SIGPIPE* erhält, sobald sie in die Pipeline weiterhin schreibt.

sigpipe.c

```
close(pipefds[PIPE_READ]);
struct sigaction action = {0};
action.sa_handler = sigpipe_handler;
if (sigaction(SIGPIPE, &action, 0) < 0) {
   perror("sigaction"); exit(1);
}
while (!sigpipe_received) {
   const char message[] = "Hello!\n";
   write(pipefds[PIPE_WRITE], message, sizeof message - 1);
}
close(pipefds[PIPE_WRITE]);
wait(0);
```

- Beim übergeordneten Prozess wird zunächst der Signalbehandler für *SIGPIPE* eingesetzt.
- Danach wird solange in die Pipeline geschrieben, bis das Signal endlich eintrifft.

sigpipe2.c

```
close(pipefds[PIPE_READ]);
sigignore(SIGPIPE);
ssize_t nbytes;
do {
   const char message[] = "Hello!\n";
   nbytes = write(pipefds[PIPE_WRITE],
      message, sizeof message - 1);
} while (nbytes > 0);
if (errno != EPIPE) perror("write");
close(pipefds[PIPE_WRITE]);
wait(0);
```

- Alternativ könnte *SIGPIPE* ignoriert werden.
- Dann ist die Überprüfung der *write*-Operationen zwingend notwendig.

Pipelines zu Kommandos

- Pipelines werden sehr gerne eingesetzt, um die Ausgabe eines Kommandos auszulesen und/oder die zugehörige Eingabe zu generieren.
- POSIX bietet für diese Funktionalität auf Basis der *stdio* die Funktionen *popen*() und *pclose*() an.
- Da *popen* in jedem Falle das erste Argument mitsamt Sonderzeichen an die Shell weiterreicht, ist dies nicht ohne Sicherheitsrisiken, die sich bei dieser Schnittstelle leider nicht vermeiden lassen.
- Das Sicherheitsrisiko ist beispielsweise gegeben, wenn Teile des ersten Arguments durch Benutzereingaben beeinflussbar sind.
- Deswegen ist von dieser Schnittstelle abzuraten.
- Besser ist es, direkt mit *pipe*, *fork* und *execvp* zu arbeiten, so dass keine Gefahr besteht, dass Kommandozeilenargumente als Programmieranweisung in der Shell missverstanden werden.

pconnect.h

```
#include <unistd.h>

enum {PIPE_READ = 0, PIPE_WRITE = 1};
typedef struct pipe_end {
   int fd;
   pid_t pid;
   int wstat;
} pipe_end;

/*
 * create a pipeline to the given command;
 * mode should be either PIPE_READ or PIPE_WRITE;
 * return a filled pipe_end structure and 1 on success
 * and 0 in case of failures
 */
int pconnect(const char* path, char* const* argv,
      int mode, pipe_end* pipe_con);

/*
 * close pipeline and wait for the forked-off process to exit;
 * the wait status is returned in pipe->wstat;
 * 1 is returned if successful, 0 otherwise
 */
int phangup(pipe_end* pipe_end);
```

pconnect.h

```
typedef struct pipe_end {
   int fd;
   pid_t pid;
   int wstat;
} pipe_end;
```

- In der Verwaltungsstruktur wird von *pconnect* die Prozess-ID des neu erzeugten Prozesses und der Dateideskriptor zur Pipeline notiert.
- Wenn *phangup* aufgerufen wird, kann auf das Ende dieser Prozess-ID mit *waitpid* gewartet werden.
- Der zurückgelieferte Status wird dann in *wstat* abgelegt.

pconnect.c

```
int pconnect(const char* path, char* const* argv,
      int mode, pipe_end* pipe_con) {
   int pipefds[2];
   if (pipe(pipefds) < 0) return 0;
   int myside = mode; int otherside = 1 - mode;
   fflush(0);
   pid_t child = fork();
   if (child < 0) {
      close(pipefds[0]); close(pipefds[1]);
      return 0;
   }
   if (child == 0) {
      close(pipefds[myside]);
      dup2(pipefds[otherside], otherside);
      close(pipefds[otherside]);
      execvp(path, argv); exit(255);
   }
   close(pipefds[otherside]);
   int flags = fcntl(pipefds[myside], F_GETFD);
   flags |= FD_CLOEXEC;
   fcntl(pipefds[myside], F_SETFD, flags);
   pipe_con->pid = child;
   pipe_con->fd = pipefds[myside];
   pipe_con->wstat = 0;
   return 1;
}
```

pconnect.c

```
int pconnect(const char* path, char* const* argv,
      int mode, pipe_end* pipe_con) {
   int pipefds[2];
   if (pipe(pipefds) < 0) return 0;
   int myside = mode; int otherside = 1 - mode;
   fflush(0);
   pid_t child = fork();
   if (child < 0) {
      close(pipefds[0]); close(pipefds[1]);
      return 0;
   }
   /* ... */
}
```

- Der Index *myside* wird auf zu benutzende Ende des übergeordneten Prozesses gesetzt, *otherside* auf das Ende des neu erzeugten Prozesses.
- Mit *fflush*(0) werden alle Puffer der *stdio* geleert, damit eine Duplizierung von Pufferinhalten durch *fork* vermieden wird.

pconnect.c

```
if (child == 0) {
   close(pipefds[myside]);
   dup2(pipefds[otherside], otherside);
   close(pipefds[otherside]);
   execvp(path, argv); exit(255);
}
close(pipefds[otherside]);
int flags = fcntl(pipefds[myside], F_GETFD); flags |= FD_CLOEXEC;
fcntl(pipefds[myside], F_SETFD, flags);
pipe_con->pid = child; pipe_con->fd = pipefds[myside];
pipe_con->wstat = 0;
return 1;
```

- Beim Kindprozess wird zunächst das nicht benötigte Ende der Pipeline geschlossen. Dann wird mit *dup2* das verbliebene Ende als Standardeingabe bzw. -ausgabe zur Verfügung gestellt. Nach dem *dup2*-Aufruf kann die dann überflüssig gewordene Dateiverbindung geschlossen werden.
- Die Option *FD_CLOEXEC* sorgt dafür, dass diese Dateiverbindung automatisch beim Aufruf einer der *exec*-Varianten geschlossen wird. Dies ist wichtig, falls mehrere Pipelines parallel genutzt werden.

pconnect.c

```
int phangup(pipe_end* pipe) {
   if (close(pipe->fd) < 0) return 0;
   if (waitpid(pipe->pid, &pipe->wstat, 0) < 0) return 0;
   return 1;
}
```

- *phangup* schließt die Verbindung zur Pipeline und wartet darauf, dass der entsprechende Kindprozess terminiert.

rwhousers.c

```
const char rwho_path[] = "/usr/bin/rwho";

/*
 * invoke rwho and get list of users that are currently logged in;
 * return 1 in case of success, otherwise 0
 */
int get_rwho_users(strlist* users) {
   strlist argv = {0};
   strlist_push(&argv, rwho_path);
   strlist_push0(&argv);
   pipe_end pipe;
   int ok = pconnect(rwho_path, argv.list, PIPE_READ, &pipe);
   strlist_free(&argv);
   if (!ok) return 0;

   stralloc rwho_output = {0};
   ssize_t nbytes;
   char buf[32];
   while ((nbytes = read(pipe.fd, buf, sizeof buf)) > 0) {
      stralloc_catb(&rwho_output, buf, nbytes);
   }
   phangup(&pipe);

   /* ... */
}
```

rwhousers.c

```
strlist argv = {0};
strlist_push(&argv, rwho_path);
strlist_push0(&argv);
pipe_end pipe;
int ok = pconnect(rwho_path, argv.list, PIPE_READ, &pipe);
strlist_free(&argv);
if (!ok) return 0;
```

- Mit der bereits vorgestellten *strlist*-Datenstruktur wird hier eine Kommandozeile zusammengestellt, die von *pconnect* akzeptiert wird. In diesem Beispiel ist sie besonders einfach, weil sie nur aus dem Namen des aufzurufenden Programms */usr/bin/rwho* besteht.
- Aus Sicherheitsgründen werden in so einem Kontext immer gerne absolute Pfade bei Kommandonamen angegeben, damit eine Manipulation durch das Setzen der Umgebungsvariable *PATH* ausgeschlossen bleibt.

rwhousers.c

```
stralloc rwho_output = {0};
ssize_t nbytes;
char buf[32];
while ((nbytes = read(pipe.fd, buf, sizeof buf)) > 0) {
   stralloc_catb(&rwho_output, buf, nbytes);
}
phangup(&pipe);
```

- In dieser Schleife wird die gesamte Ausgabe des aufgerufenen Kommandos eingelesen und in dem *stralloc*-Objekt *rwho_output* abgelegt.
- In der Praxis sind größere Puffergrößen üblich. Im Falle von Pipelines ist es sinnvoll, die Größe des Ringpuffers zu nehmen, falls diese bekannt ist.

rwhousers.c

```
strlist_clear(users);
char* user = rwho_output.s;
for (int i = 0; i < rwho_output.len; ++i) {
   switch (rwho_output.s[i]) {
      case ' ':
         if (user != 0) {
            rwho_output.s[i] = 0;
            strlist_push(users, strdup(user));
            user = 0;
         }
         break;
      case '\n':
         user = rwho_output.s + i + 1;
         break;
   }
}
stralloc_free(&rwho_output);
return 1;
```

sendmail.c

```
const char sendmail_path[] = "/usr/lib/sendmail";
/*
 * return a pipeline opened to /usr/lib/sendmail on the
 * local system; return the opened pipeline and 1 in
 * case of success; 0 in case of failures
 */
int sendmail(char* recipient, char* subject, pipe_end* pipe_con) {
   strlist argv = {0};
   strlist_push(&argv, sendmail_path); strlist_push(&argv, "-t");
   strlist_push0(&argv);
   int ok = pconnect(sendmail_path, argv.list, PIPE_WRITE, pipe_con);
   strlist_free(&argv);
   if (!ok) return 0;
   stralloc header = {0};
   stralloc_cats(&header, "To: "); stralloc_cats(&header, recipient);
   stralloc_cats(&header, "\n");
   stralloc_cats(&header, "Subject: "); stralloc_cats(&header, subject);
   stralloc_cats(&header, "\n\n");
   ssize_t written = 0; ssize_t left = header.len;
   while (left > 0) {
      ssize_t nbytes = write(pipe_con->fd, header.s + written, left);
      if (nbytes < 0) {
         stralloc_free(&header); phangup(pipe_con);
         return 0;
      }
      written += nbytes; left -= nbytes;
   }
   stralloc_free(&header);
   return 1;
}
```

sendmail.c

```
strlist argv = {0};
strlist_push(&argv, sendmail_path);
strlist_push(&argv, "-t");
strlist_push0(&argv);
int ok = pconnect(sendmail_path, argv.list, PIPE_WRITE, pipe_con);
strlist_free(&argv);
if (!ok) return 0;
```

- Hier wird */usr/lib/sendmail* (unter Linux bei */usr/bin/sendmail* zu finden) aufgerufen mit der Option „-t“. Diese Option bittet darum, die Liste der Empfänger der E-Mail dem „To“-Header zu entnehmen.

sendmail.c

```
stralloc header = {0};
stralloc_cats(&header, "To: ");
stralloc_cats(&header, recipient);
stralloc_cats(&header, "\n");
stralloc_cats(&header, "Subject: ");
stralloc_cats(&header, subject);
stralloc_cats(&header, "\n\n");
ssize_t written = 0; ssize_t left = header.len;
while (left > 0) {
   ssize_t nbytes = write(pipe_con->fd, header.s + written, left);
   if (nbytes < 0) {
      stralloc_free(&header);
      phangup(pipe_con);
      return 0;
   }
   written += nbytes; left -= nbytes;
}
```

- Hier wird zunächst der Kopf der E-Mail generiert und dann mit Hilfe einer Schleife geschrieben, da nicht garantiert ist, dass eine einzelne *write*-Operation alles erledigt.

Arbeitet gerade einer meiner Freunde?

- Ziel einer kleinen Anwendung ist es, festzustellen, ob einer der Freunde, die alle auf der Kommandozeile aufzuzählen sind, gerade angemeldet ist. (Dies erfolgt durch die Auswertung der Ausgabe von *rwho*.)
- Wenn einer oder mehrere Freunde gefunden wurden, dann wird diese freudige Nachricht per E-Mail versandt.
- Um den Abgleich effizient durchführen zu können, wird eine Hash-Tabelle verwendet, in der die Freunde alle eingetragen werden.

Schnittstelle für eine Hash-Tabelle für Zeichenketten

strhash.c

```
typedef struct strhash_entry {
   char* key;
   char* value;
   struct strhash_entry* next;
} strhash_entry;
typedef struct strhash {
   unsigned int size, length;
   strhash_entry** bucket; /* hash table */
   unsigned int it_index;
   strhash_entry* it_entry;
} strhash;

/* allocate a hash table with the given bucket size */
int strhash_alloc(strhash* hash, unsigned int size);
/* add tuple (key,value) to the hash, key must be unique */
int strhash_add(strhash* hash, char* key, char* value);
/* remove tuple with the given key from the hash */
int strhash_remove(strhash* hash, char* key);
/* return number of elements */
unsigned int strhash_length(strhash* hash);
/* check existance of a key */
int strhash_exists(strhash* hash, char* key);
/* lookup value by key */
int strhash_lookup(strhash* hash, char* key, char** value);
/* start iterator */
int strhash_start(strhash *hash);
/* fetch next key from iterator; returns 0 on end */
int strhash_next(strhash *hash, char** key);
/* free allocated memory */
int strhash_free(strhash* hash);
```

bigbrother.c

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "pconnect.h"
#include "sendmail.h"
#include "strhash.h"
#include "strlist.h"
#include "rwhousers.h"

int main(int argc, char** argv) {
   if (argc <= 2) {
      fprintf(stderr, "Usage: %s email login...\n", argv[0]);
      exit(1);
   }
   char* email = *++argv; --argc;
   strhash friends = {0};
   strhash_alloc(&friends, 4);
   while (--argc > 0) {
      if (!strhash_add(&friends, *++argv, 0)) exit(1);
   }

   /* ... */
}
```

- Alle genannten Freunde werden in die Tabelle *friends* eingefügt.

bigbrother.c

```
strlist users = {0};
if (!get_rwho_users(&users)) exit(1);
strhash found = {0};
strhash_alloc(&found, 4);
for (int i = 0; i < users.len; ++i) {
   if (strhash_exists(&found, users.list[i])) continue;
   if (!strhash_exists(&friends, users.list[i])) continue;
   if (!strhash_add(&found, users.list[i], 0)) exit(1);
}
if (strhash_length(&found) == 0) exit(0);
```

- In der Tabelle *found* werden alle Benutzer notiert, die *rwho* zurücklieferte und die gleichzeitig in der Tabelle *friends* enthalten sind.
- Wenn keine der Freunde gefunden wird, terminiert das Programm danach schlicht mit einem Exit-Code von 0.

bigbrother.c

```
pipe_end pipe_con;
if (!sendmail(email, "Your Friends Are Online!", &pipe_con))
   exit(1);
if (dup2(pipe_con.fd, 1) < 0) exit(1);
printf("Hi, ");
if (strhash_length(&found) == 1) {
   printf("one of your friends is");
} else {
   printf("some of your friends are");
}
printf(" online:\n");
strhash_start(&found);
char* key;
while (strhash_next(&found, &key)) {
   printf("%s\n", key);
}
fclose(stdout);
if (!phangup(&pipe_con)) exit(1);
```

Wie groß ist der Pipe-Buffer?

- Die messbare Größe des Pipe-Buffers lässt sich definieren als die maximale Zahl an Bytes, die blockierungsfrei mit *write* in eine Pipe geschrieben werden kann, ohne dass die Gegenseite liest.
- Insbesondere unter Solaris ist die Größe nicht einfach zu ermitteln. Wenn hier *O_NONBLOCK* gesetzt wird und *write* bei einer Zahl von Bytes, die über dem Limit liegt, einen kleineren Wert tatsächlich geschriebener Bytes zurückgibt, dann liegt dieser Wert unter dem theoretischen Maximum.
- Konkret unter Solaris 11:
  - *write*(*fd*, *buf*, 25600) liefert 20480.
  - *write*(*fd*, *buf*, 25599) liefert jedoch 25599.

Wie groß ist der Pipe-Buffer?

measure-pipe.c

```
static int pipe_and_fork(int i, size_t nbytes) {
   int fds[2];
   if (pipe(fds) < 0) die("pipe");
   pid_t pid = fork(); if (pid < 0) die("fork");
   if (pid == 0) {
      close(fds[0]);
      char* buf = malloc(nbytes);
      int fd = fds[1];
      int flags = fcntl(fd, F_GETFL) | O_NONBLOCK;
      fcntl(fd, F_SETFL, flags);
      ssize_t written = write(fd, buf, nbytes);
      if (written < nbytes) exit(255);
      exit(i);
   }
   close(fds[1]);
   return fds[0];
}
```

- Für jeden einzelnen Test wird ein Prozess und eine Pipeline erzeugt. Mit *O_NONBLOCK* wird sichergestellt, dass *write* nicht blockiert.

Wie groß ist der Pipe-Buffer?

measure-pipe.c

```
static unsigned int suck_pipe(int fd, unsigned int expected) {
   char* buf = malloc(expected); if (!buf) die("malloc");
   ssize_t bytes_read = 0;
   while (bytes_read < expected) {
      ssize_t nbytes = read(fd, buf, expected - bytes_read);
      if (nbytes < 0) die("read from pipe");
      if (nbytes == 0) break;
      bytes_read += nbytes;
   }
   close(fd);
   free(buf);
   return bytes_read;
}
```

- Mit *suck_pipe* wird überprüft, wieviel Bytes sich aus der Pipeline auslesen lassen, nachdem der Unterprozess terminiert ist und alle schreibenden Enden geschlossen sind.

Wie groß ist der Pipe-Buffer?

measure-pipe.c

```
static int run_tests(unsigned int nbytes[], unsigned int tests) {
   int pipes[tests];
   for (int i = 0; i < tests; ++i) {
      pipes[i] = pipe_and_fork(i, nbytes[i]);
   }
   // wait for all the forked processes
   int success[tests];
   for (int i = 0; i < tests; ++i) {
      success[i] = 0;
   }
   int wstat;
   pid_t pid;
   while ((pid = wait(&wstat)) > 0) {
      if (WIFEXITED(wstat)) {
         int status = WEXITSTATUS(wstat);
         if (status != 255 && status < MAXPROCESSES) {
            success[status] = 1;
         }
      }
   }
   // evaluate and confirm results
   unsigned int confirmed_len = 0;
   for (int i = 0; i < tests; ++i) {
      if (success[i]) {
         confirmed_len = suck_pipe(pipes[i], nbytes[i]);
         continue;
      }
      break;
   }
   return confirmed_len;
}
```

Wie groß ist der Pipe-Buffer?

measure-pipe.c

```
// check for buf sizes that are powers of two
unsigned int test1() {
   unsigned int nbytes[MAXSIZE];
   for (int i = 0; i < MAXSIZE; ++i) {
      nbytes[i] = (1 << i);
   }
   return run_tests(nbytes, MAXSIZE);
}

// check for arbitrary buf sizes
unsigned int test2(unsigned int buflen,
      unsigned int increment, unsigned int tests) {
   unsigned int nbytes[tests];
   for (int i = 0; i < tests; ++i) {
      nbytes[i] = buflen + increment * i;
   }
   return run_tests(nbytes, tests);
}
```

- Zuerst wird die größte Zweierpotenz ermittelt, die blockierungsfrei geschrieben werden kann. Später wird das sukzessive verfeinert.

Wie groß ist der Pipe-Buffer?

measure-pipe.c

```
int main() {
   // check for buf sizes that are powers of two
   unsigned int buflen = test1();
   if (!buflen) {
      printf("pipe buffer size is beyond %d\n", 1 << (MAXSIZE-1)); exit(1);
   }
   // check for buf sizes that are not powers of two
   unsigned int increment = buflen / MAXPROCESSES;
   unsigned int lastlen = 0; unsigned int tests = MAXPROCESSES;
   while (increment > 0) {
      unsigned int len = test2(buflen, increment, tests);
      if (!len) {
         printf("pipe buffer len is possibly %d "
            "but that did not get confirmed\n", buflen); exit(1);
      }
      lastlen = len; buflen = len;
      if (increment > MAXPROCESSES) {
         tests = MAXPROCESSES;
         increment /= MAXPROCESSES;
      } else if (increment > 1) {
         tests = increment; increment = 1;
      } else {
         increment = 0;
      }
   }
   if (lastlen) {
      printf("pipe buffer size = %d\n", lastlen);
   } else {
      printf("pipe buffer size = %d\n", buflen);
   }
}
```

Wie groß ist der Pipe-Buffer?

Ergebnisse:

- Solaris 8: 10240
- Solaris 9 und 10: 20480
- Solaris 11: 25599
- Linux: 65536
- OS X: 65536

- Eine unidirektionale Kommunikation is ausreichend, da alle Eingabedaten über *fork()* vererbt werden können.
- Spannend ist die Frage, wieviele Kommunikationskanäle benötigt werden: Ist für jeden Unterprozess eine Pipeline zu erzeugen oder kann eine Pipeline für alle Unterprozesse gemeinsam verwendet werden?
- Bei letzterem stellt sich die Frage, ob sich die Ausgaben verschiedener Unterprozesse in die gleiche Pipeline vermischen können. Hier stellt der POSIX-Standard sicher, dass dies nicht geschieht, sofern die bei *write* angegebene Quantität nicht mehr als *PIPE_BUF* beträgt.
- Konkrete Werte:
  - Solaris 8, 9, 10, 11: 5120
  - Linux: 4096
  - OS X: 512

- Ein Netzwerkdienst ist ein Prozess, der unter einer Netzwerkadresse einen Dienst anbietet.
- Ein Klient, der die Netzwerkadresse kennt, kann einen bidirektionalen Kommunikationskanal zu dem Netzwerkdienst eröffnen und über diesen mit dem Dienst kommunizieren.
- Die Kommunikation wird durch ein Protokoll strukturiert, bei dem typischerweise Anfragen oder Kommandos auf dem Hinweg übermittelt werden und auf dem Rückweg des Kommunikationskanals die zugehörigen Antworten kommen.
- Wenn erst die Antwort gelesen werden muss, bevor die nächste Anfrage gestellt werden darf, wird von einem *synchronen* Protokoll gesprochen.
- Wenn mehrere Anfragen unmittelbar hintereinander gestellt werden dürfen, ohne dass erst die Antworten abgewartet werden, wird von *Pipelining* gesprochen. (Das hat nichts mit den Pipes aus dem vorherigen Kapitel zu tun.)

Unterschiede zu Pipelines

- Die beiden Kommunikationspartner müssen nicht miteinander verwandt sein.
- Sie müssen nicht einmal auf dem gleichen Rechner laufen.
- Da der Kommunikationskanal bidirektional ist, wird ein echter Dialog zwischen den beiden Prozessen möglich.
- Der Aufbau einer Verbindung ist jedoch schwieriger, da zunächst die Netzwerkadresse des gewünschten Partners ermittelt werden muss.

Vorteile von Netzwerkdiensten

Wenn Dienste über das Netzwerk angeboten und in Anspruch genommen werden, ergeben sich viele Vorteile:

- Der Dienst kann allen offenstehen, und ein direkter Zugang zu dem Rechner, auf dem der Dienst angeboten wird, ist nicht notwendig.
- Viele Parteien können in kooperativer Weise einen Dienst gleichzeitig nutzen.
- Der Dienste-Anbieter hat weniger Last, da die Benutzerschnittstelle auf anderen Rechnern laufen kann.

Risiken von Netzwerkdiensten

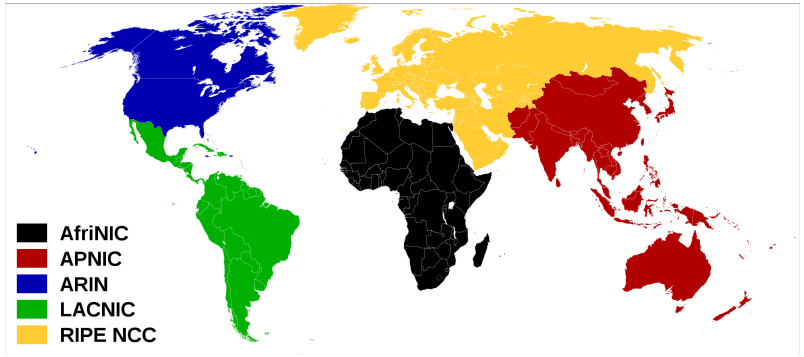
- Der Kreis derjenigen, die auf einen Netzwerkdienst zugreifen können, ist möglicherweise ziemlich umfangreich (normalerweise das gesamte Internet).
- Somit muss jeder Netzwerkdienst Zugriffsberechtigungen einführen und überprüfen und kann sich dabei nicht wie traditionelle Applikationen auf die des Betriebssystems verlassen.
- Dienste, die gleichzeitig von vielen genutzt werden können, haben vielerlei zusätzliche Konsistenz- und Synchronisierungsprobleme, für die nicht jede Art von Datenhaltung geeignet ist.
- Netzwerke bringen neue Arten von Ausfällen mit sich, wenn eine Netzwerkverbindung zusammenbricht oder es zu längeren „Hängern“ kommt.

- Im Rahmen dieser Vorlesung beschäftigen wir uns nur mit TCP/IP, also den verbindungsorientiertem Protokoll des Internets. (Mehr zur Semantik später.)
- Im Internet gibt es zwei etablierte Räume für Netzwerkadressen: IPv4 und IPv6.
- IPv4 arbeitet mit 32-Bit-Adressen und ist seit dem 1. Januar 1983 in Benutzung.
- Da der Adressraum bei IPv4 auszugehen droht, gibt es als Alternative IPv6, das mit 128-Bit-Adressen arbeitet.
- Im Rahmen dieser Vorlesung beschäftigen wir uns nur mit IPv4.
- Eine IPv4-Adresse (das gilt auch für IPv6) adressiert nur den Rechner, auf dem der Dienst läuft. Der Dienst selbst wird über eine Portnummer (16 Bit) ausgewählt.
- Ein Netzwerkdienst wird also z.B. über eine IPv4-Adresse und eine Port-Nummer adressiert.

```
clonard$ telnet 134.60.54.12 13
Trying 134.60.54.12...
Connected to 134.60.54.12.
Escape character is '^]'.
Mon Jun 14 11:03:16 2010
Connection to 134.60.54.12 closed by foreign host.
clonard$
```

- 134.60.54.12 ist eine IPv4-Adresse in der sogenannten *dotted-decimal*-Notation, bei der durch Punkte getrennt jedes der vier Bytes der Adresse einzeln dezimal spezifiziert wird.
- 134.60.54.12 ist also eine lesbarere Form für 2252092940.
- 13 ist die Port-Nummer des *daytime*-Dienstes.
- Die Port-Nummer ist nicht zufällig. Die 13 ist explizit von der IANA (*Internet Assigned Numbers Authority*) dem *daytime*-Dienst zugewiesen worden.

Aufteilung des Netzwerkraums



- Die IANA teilt den globalen IPv4-Adressraum auf einzelne lokale Institutionen, den sogenannten *Regional Internet Registries*.
- ARIN ist zuständig für Amerika, RIPE für Europa, den Mittleren Osten und Zentralasien, APNIC für Asien, Australien und Ozeanien, AfriNIC für Afrika und LACNIC für Lateinamerika einschließlich Teile der Karibik.
- Die Universität Ulm hat seit 1989 den Adressbereich *134.60.0.0/16*.

Wer ist zuständig für die 134.60.54.12?

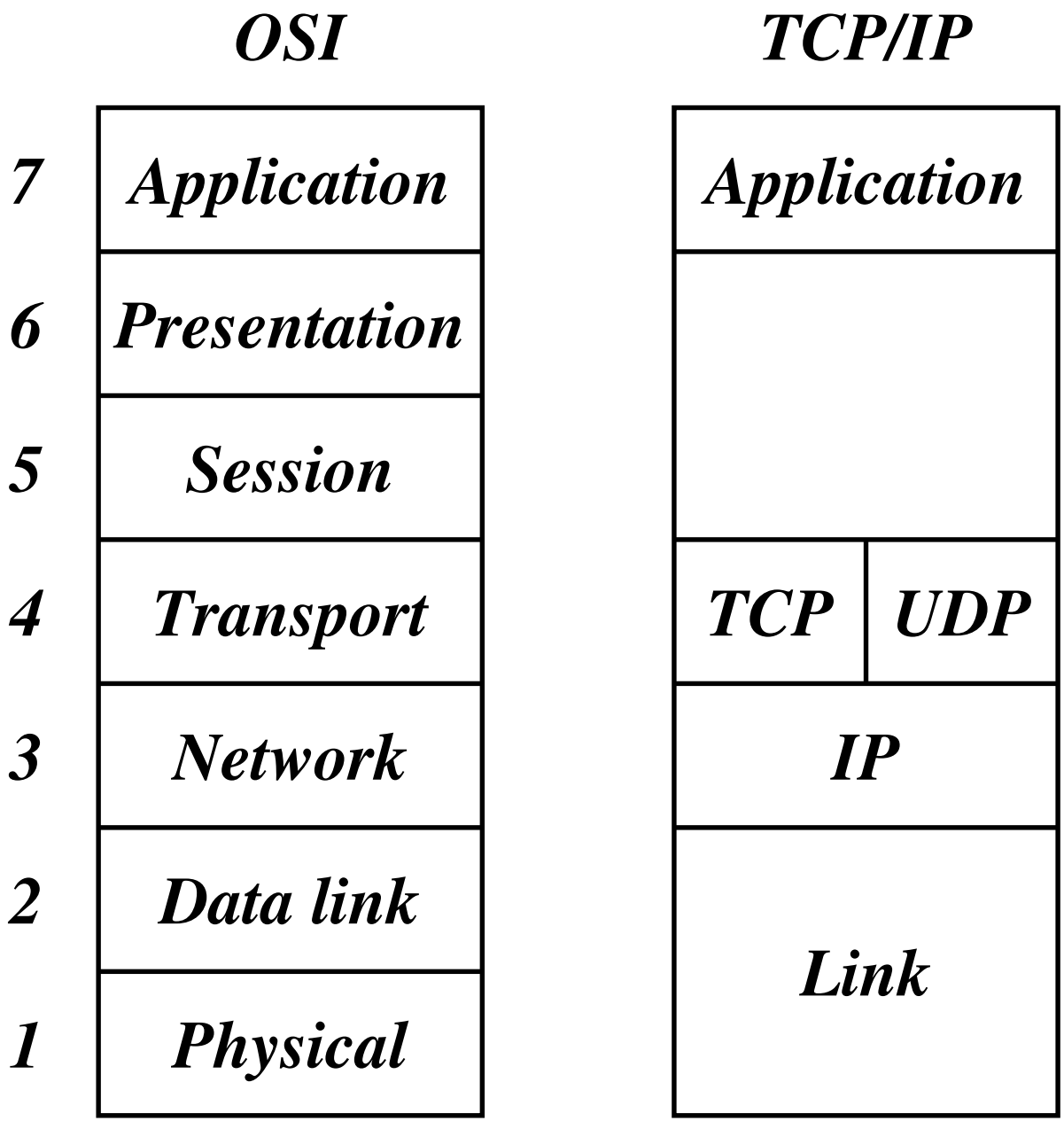

```
theseus$ wget -O - -q http://www.iana.org/assignments/ipv4-address-space/ipv4-address-space.txt | \
> sed 's/  */ /g' | grep '^ 134'
 134/8 Administered by ARIN 1993-05 whois.arin.net LEGACY
theseus$ whois -h whois.arin.net 134.60.54.12
[...]
NetRange:   134.58.0.0 - 134.61.255.255
CIDR:       134.58.0.0/15, 134.60.0.0/15
NetName:    RIPE-ERX-134-58-0-0
NetHandle:  NET-134-58-0-0-1
Parent:     NET-134-0-0-0-0
NetType:    Early Registrations, Transferred to RIPE NCC
Comment:    These addresses have been further assigned to users in
Comment:    the RIPE NCC region.  Contact information can be found in
Comment:    the RIPE database at http://www.ripe.net/whois
[...]
theseus$ whois -h whois.ripe.net 134.60.54.12
[...]
inetnum:        134.60.0.0 - 134.60.255.255
netname:        UDN
descr:          Universitaet Ulm
descr:          Ulm, Germany
country:        DE
[...]
% Information related to '134.60.0.0/16AS553'

route:        134.60.0.0/16
descr:        UNI-ULM
origin:       AS553
mnt-by:       BELWUE-MNT
source:       RIPE # Filtered
[...]
```

- Für Rechnernamen wie *theseus.mathematik.uni-ulm.de* können über hierarchisierte Domain-Server die zugehörigen IP-Adressen abgefragt werden.
- Die Abfrage beginnt zuerst bei einem der 13 sogenannten Root-Server, die weltweit verteilt sind und deren IP-Adressen jedem Domain-Server bekannt sind.
- Einer davon ist *198.41.0.4*. Dieser verrät, welche Nameserver für die Top-Level-Domain *de* zuständig ist.
- Einer davon ist *194.0.0.53*. Dieser verrät, welche Nameserver für *uni-ulm.de* zuständig sind.
- Einer davon ist *134.60.1.111*, der sogleich in der Lage ist, diesen Namen vollständig aufzulösen und die *134.60.54.12* zurückzuliefern.

- IP-Adressen wie *134.60.54.12* werden nur auf einer abstrakten Ebene zur Verfügung gestellt.
- IP-Adressen werden auf der darunterliegenen physischen Ebene und denen damit verbundenen Protokollen nicht verstanden.
- So wird beispielsweise beim Ethernet, das bei uns weitgehend an der Universität zum Einsatz kommt, mit 6-Byte-Adressen gearbeitet.
- Die Theseus hat beispielsweise die Ethernet-Adresse *0:14:4f:3e:a1:f0* (Bytes werden hier in Form von Hexzahlen angegeben). Diese Adressen sind jedoch nur lokal auf einem Ethernet-Segment von Bedeutung.

Ebenen oberhalb der IP-Ebene

- Aufbauend auf der Schicht mit IP-Adressen (IP-Protokoll) gibt es alternative Transport-Schichten, über die Pakete versendet werden können.
- Mittels UDP (*User Datagram Protocol*) können einzelne Pakete sehr effizient, aber unzuverlässig versendet werden.
- Im Gegensatz dazu gewährleistet TCP (*Transmission Control Protocol*) eine sichere Verbindung, die jedoch weniger effizient ist.
- Parallel zu TCP/IP entstand 1983 das OSI-Referenz-Modell (*Open Systems Interconnection*), das eine feinere Schichtung vorsieht. Die Präsentations- oder Sitzungsebene fand jedoch nie ihren Weg in die Protokollhierarchie von TCP/IP.


OSI
TCP/IP
7
Application
6
Presentation
5
Session
4
Transport
3
Network
2
Data link
1
Physical
Application
TCP
UDP
IP
Link

- Für TCP/IP gibt es zwei Schnittstellen, die beide zum POSIX-Standard gehören:
- Die Berkeley Sockets wurden 1983 im Rahmen von BSD 4.2 eingeführt. Dies war die erste TCP/IP-Implementierung.
- Im Jahr 1987 kam durch UNIX System V Release 3.0 noch TLI (*Transport Layer Interface*) hinzu, die auf Streams basiert (einer anderen System-V-spezifischen Abstraktion).
- Die Berkeley-Socket-Schnittstelle hat sich weitgehend durchgesetzt. Wir werden uns daher nur mit dieser beschäftigen.

Die Entwickler der Berkeley-Sockets setzten sich folgende Ziele:

- **Transparenz**: Die Kommunikation zwischen zwei Prozessen soll nicht davon abhängen, ob sie auf dem gleichen Rechner laufen oder nicht.
- **Effizienz**: Zu Zeiten von BSD 4.2 (also 1983) war dies ein außerordentlich wichtiges Kriterium wegen der damals noch sehr geringen Rechenleistung. Aus diesem Grund werden insbesondere keine weiteren System-Prozesse zur Kommunikation eingesetzt, obwohl dies zu mehr Flexibilität und Modularität hätte führen können.
- **Kompatibilität**: Viele bestehende Applikationen und Bibliotheken wissen nichts von Netzwerken und sollen dennoch in einem verteilten Umfeld eingesetzt werden können. Dies wurde dadurch erreicht, dass nach einem erfolgten Verbindungsaufbau (der z.B. von einem anderen Prozess durchgeführt werden kann) Ein- und Ausgabe in gewohnter Weise (wie bei Dateien, Pipelines oder Terminal-Verbindungen) erfolgen können.

Semantik einer Netzwerkbeziehung

Die Semantik einer Kommunikation umschließt bei jeder Verbindung eine Teilmenge der folgenden Punkte:

1. Daten werden in der Reihenfolge empfangen, in der sie abgeschickt worden sind.
2. Daten kommen nicht doppelt an.
3. Daten werden zuverlässig übermittelt.
4. Einzelne Pakete kommen in der originalen Form an (d.h. sie werden weder zerstückelt noch mit anderen Paketen kombiniert).
5. Nachrichten außerhalb des normalen Kommunikationsstromes (*out-of-band messages*) werden unterstützt.
6. Die Kommunikation erfolgt verbindungs-orientiert, womit die Notwendigkeit entfällt, sich bei jedem Paket identifizieren zu müssen.

Die folgende Tabelle zeigt die Varianten, die von der Berkeley-Socket-Schnittstelle unterstützt werden:

Name	1	2	3	4	5	6
SOCK_STREAM	⋆	⋆	⋆		⋆	⋆
SOCK_DGRAM				⋆		
SOCK_SEQPACKET	⋆	⋆	⋆	⋆	⋆	⋆
SOCK_RDM	⋆	⋆	⋆	⋆		

(1: Reihenfolge korrekt; 2: nicht doppelt; 3: zuverlässige Übermittlung; 4: keine Stückelung; 5: *out-of-band*; 6: verbindungsorientiert.)

- *SOCK_STREAM* lässt sich ziemlich direkt auf TCP abbilden.
- *SOCK_STREAM* kommt den Pipelines am nächsten, wenn davon abgesehen wird, dass die Verbindungen bei Pipelines nur unidirektional sind.
- UDP wird ziemlich genau durch *SOCK_DGRAM* widergespiegelt.
- Die Varianten *SOCK_SEQPACKET* (TCP-basiert) und *SOCK_RDM* (UDP-basiert) fügen hier noch weitere Funktionalitäten hinzu. Allerdings fand *SOCK_RDM* nicht den Weg in den POSIX-Standard und wird auch von einigen Implementierungen nicht angeboten.
- Im weiteren Verlauf dieser Vorlesung werden wir uns nur mit *SOCK_STREAM*-Sockets beschäftigen.

```
int sfd = socket(domain, type, protocol);
```

- Bis zu einem gewissen Grad ist eine Betrachtung, die sich an unserem Telefonsystem orientiert, hilfreich.
- Bevor Sie Telefonanrufe entgegennehmen oder selbst anrufen können, benötigen Sie einen Telefonanschluss.
- Dieser Anschluss wird mit dem Systemaufruf *socket* erzeugt.
- Bei *domain* wird hier normalerweise *PF_INET* angegeben, um das IPv4-Protokoll auszuwählen. (Alternativ wäre etwa *PF_INET6* für IPv6 denkbar.)
- *PF* steht dabei für *protocol family*. Bei *type* kann eine der unterstützten Semantiken ausgewählt werden, also beispielsweise *SOCK_STREAM*.
- Der dritte Parameter *protocol* erlaubt in einigen Fällen eine weitere Selektion. Normalerweise wird hier schlicht 0 angegeben.

Festlegen der eigenen Adresse

- Nachdem der Anschluss existiert, fehlt noch eine zugeordnete Telefonnummer. Um bei der Analogie zu bleiben, haben wir eine Vorwahl (IP-Adresse) und eine Durchwahl (Port-Nummer).
- Auf einem Rechner können mehrere IP-Adressen zur Verfügung stehen.
- Es ist dabei möglich, nur eine dieser IP-Adressen zu verwenden oder alle gleichzeitig, die zur Verfügung stehen.
- Bei den Port-Nummern ist eine automatische Zuteilung durch das Betriebssystem möglich.
- Alternativ ist es auch möglich, sich selbst eine Port-Nummer auszuwählen. Diese darf aber noch nicht vergeben sein und muss bei nicht-privilegierten Prozessen eine Nummer jenseits des Bereiches der wohldefinierten Port-Nummern sein, also typischerweise mindestens 1024 betragen.
- Die Verknüpfung eines Anschlusses mit einer vollständigen Adresse erfolgt mit dem Systemaufruf *bind*...

```
struct sockaddr_in address = {0};
address.sin_family = AF_INET;
address.sin_addr.s_addr = htonl(INADDR_ANY);
address.sin_port = htons(port);
bind(sfd, (struct sockaddr *) &address, sizeof address);
```

- Die Datenstruktur **struct** *sockaddr_in* repräsentiert Adressen für IPv4, die aus einer IP-Adresse und einer Port-Nummer bestehen.
- Das Feld *sin_family* legt den Adressraum fest. Hier gibt es passend zur Protokollfamilie *PF_INET* nur *AF_INET* (*AF* steht hier für *address family*).
- Bei dem Feld *sin_addr.s_addr* lässt sich die IP-Adresse angeben. Mit *INADDR_ANY* übernehmen wir alle IP-Adressen, die zum eigenen Rechner gehören.
- Das Feld *sin_port* spezifiziert die Port-Nummer.

```
struct sockaddr_in address = {0};
address.sin_family = AF_INET;
address.sin_addr.s_addr = htonl(INADDR_ANY);
address.sin_port = htons(port);
bind(sfd, (struct sockaddr *) &address, sizeof address);
```

- Da Netzwerkadressen grundsätzlich nicht von der Byte-Anordnung eines Rechners abhängen dürfen, wird mit *htonl* (*host to network long*) der 32-Bit-Wert der IP-Adresse in die standardisierte Form konvertiert. Analog konvertiert *htons*() (*host to network short*) den 16-Bit-Wert *port* in die standardisierte Byte-Reihenfolge.
- Wenn die Port-Nummer vom Betriebssystem zugeteilt werden soll, kann bei *sin_port* auch einfach 0 angegeben werden.

```
struct sockaddr_in address = {0};
address.sin_family = AF_INET;
address.sin_addr.s_addr = htonl(INADDR_ANY);
address.sin_port = htons(port);
bind(sfd, (struct sockaddr *) &address, sizeof address);
```

- Der Datentyp **struct** *sockaddr_in* ist eine spezielle Variante des Datentyps **struct** *sockaddr*. Letzterer sieht nur ein Feld *sin_family* vor und ein generelles Datenfeld *sa_data*, das umfangreich genug ist, um alle unterstützten Adressen unterzubringen.
- Bei *bind*() wird der von *socket*() erhaltene Deskriptor angegeben (hier *sfd*), ein Zeiger, der auf eine Adresse vom Typ **struct** *sockaddr* verweist, und die tatsächliche Länge der Adresse, die normalerweise kürzer ist als die des Typs **struct** *sockaddr*.
- Schön sind diese Konstruktionen nicht, aber C bietet eben keine objekt-orientierten Konzepte, wenngleich die Berkeley-Socket-Schnittstelle sehr wohl polymorph und damit objekt-orientiert ist.

Anschluss „scharf“ schalten


```
listen(sfd, SOMAXCONN);
```

- Damit eingehende Verbindungen (oder Anrufe in unserer Telefon-Analogie) entgegengenommen werden können, muss *listen*() aufgerufen werden.
- Nach *listen*() kann der Anschluss „klingeln“, aber noch sind keine Vorbereitungen getroffen, das Klingeln zu hören oder den Hörer abzunehmen.
- Der zweite Parameter bei *listen*() gibt an, wieviele Kommunikationspartner es gleichzeitig klingeln lassen dürfen.
- *SOMAXCONN* ist hier das Maximum, das die jeweilige Implementierung erlaubt.

Anschlussdaten ermitteln

newsocket.c

```
#include <sys/socket.h>
#include <netinet/in.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

void print_ip_addr(in_addr_t ipaddr) {
   if (ipaddr == INADDR_ANY) {
      printf("INADDR_ANY");
   } else {
      uint32_t addr = ntohl(ipaddr);
      printf("%d.%d.%d.%d",
         addr>>24, (addr>>16)&0xff,
         (addr>>8)&0xff, addr&0xff);
   }
}

int main() {
   int sfd = socket(PF_INET, SOCK_STREAM, 0);
   if (sfd < 0) exit(1);
   if (listen(sfd, SOMAXCONN) < 0) exit(2);
   struct sockaddr address;
   socklen_t len = sizeof address;
   if (getsockname(sfd, &address, &len) < 0) exit(3);
   struct sockaddr_in * inaddr = (struct sockaddr_in *) &address;
   printf("This is the address of my new socket:\n");
   printf("IP Address:  "); print_ip_addr(inaddr->sin_addr.s_addr);
   printf("\n");
   printf("Port Number: %d\n", (int) ntohs(inaddr->sin_port));
}
```

Auf einen Anruf warten und abheben


```
struct sockaddr client_addr;
socklen_t client_addr_len = sizeof client_addr;
int fd = accept(sfd, &client_addr, &client_addr_len);
```

- Liegt noch kein Anruf vor, blockiert *accept*() bis zum nächsten Anruf.
- Wenn mit *accept*() ein Anruf eingeht, wird ein Dateideskriptor auf den bidirektionalen Verbindungskanal zurückgeliefert.
- Normalerweise speichert *accept*() die Adresse des Klienten beim angegebenen Zeiger ab. Wenn als Zeiger 0 angegeben wird, entfällt dies.

Ein einfacher Zeitdienst

timeserver.c

```
#include <netinet/in.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <sys/socket.h>
#include <sys/time.h>
#include <time.h>
#include <unistd.h>
#define PORT 11011
int main () {
   struct sockaddr_in address = {0};
   address.sin_family = AF_INET;
   address.sin_addr.s_addr = htonl(INADDR_ANY);
   address.sin_port = htons(PORT);
   int sfd = socket(PF_INET, SOCK_STREAM, 0);
   int optval = 1;
   if (sfd < 0 ||
        setsockopt(sfd, SOL_SOCKET, SO_REUSEADDR,
                   &optval, sizeof optval) < 0 ||
        bind(sfd, (struct sockaddr *) &address,
             sizeof address) < 0 ||
        listen(sfd, SOMAXCONN) < 0) {
      perror("socket"); exit(1);
   }
   int fd;
   while ((fd = accept(sfd, 0, 0)) >= 0) {
      char timebuf[32]; time_t clock; time(&clock);
      ctime_r(&clock, timebuf);
      write(fd, timebuf, strlen(timebuf)); close(fd);
   }
}
```

timeserver.c

```
if (sfd < 0 ||
     setsockopt(sfd, SOL_SOCKET, SO_REUSEADDR,
                &optval, sizeof optval) < 0 ||
     bind(sfd, (struct sockaddr *) &address,
          sizeof address) < 0 ||
     listen(sfd, SOMAXCONN) < 0) {
   perror("socket"); exit(1);
}
```

- Hier wird zusätzlich noch *setsockopt* aufgerufen, um die Option *SO_REUSEADDR* einzuschalten.
- Dies empfiehlt sich immer, wenn eine feste Port-Nummer verwendet wird.
- Fehlt diese Option, kann es passieren, dass bei einem Neustart des Dienstes die Port-Nummer nicht sofort wieder zur Verfügung steht, da noch alte Verbindungen nicht vollständig abgewickelt worden sind.

timeclient.c

```
#include <netdb.h>
#include <netinet/in.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <sys/socket.h>
#include <unistd.h>
#define PORT 11011
int main (int argc, char** argv) {
   char* cmdname = *argv++; --argc;
   if (argc != 1) {
      fprintf(stderr, "Usage: %s host\n", cmdname); exit(1);
   }
   char* hostname = *argv; struct hostent* hp;
   if ((hp = gethostbyname(hostname)) == 0) {
      fprintf(stderr, "unknown host: %s\n", hostname); exit(1);
   }
   char* hostaddr = hp->h_addr_list[0];
   struct sockaddr_in addr = {0}; addr.sin_family = AF_INET;
   memcpy((void *) &addr.sin_addr, (void *) hostaddr, hp->h_length);
   addr.sin_port = htons(PORT);
   int fd;
   if ((fd = socket(PF_INET, SOCK_STREAM, 0)) < 0) {
      perror("socket"); exit(1);
   }
   if (connect(fd, (struct sockaddr *) &addr, sizeof addr) < 0) {
      perror("connect"); exit(1);
   }
   char buffer[BUFSIZ]; ssize_t nbytes;
   while((nbytes = read(fd, buffer, sizeof buffer)) > 0 &&
         write(1, buffer, nbytes) == nbytes);
}
```

timeclient.c

```
char* hostname = *argv;
struct hostent* hp;
if ((hp = gethostbyname(hostname)) == 0) {
   fprintf(stderr, "unknown host: %s\n", hostname);
   exit(1);
}
char* hostaddr = hp->h_addr_list[0];
struct sockaddr_in addr = {0};
addr.sin_family = AF_INET;
memmove((void *) &addr.sin_addr, (void *) hostaddr, hp->h_length);
addr.sin_port = htons(PORT);
```

- Der Klient erhält über die Kommandozeile den Namen des Rechners, auf dem der Zeitdienst zur Verfügung steht.
- Für die Abbildung eines Rechnernamens in eine IP-Adresse wird die Funktion *gethostbyname*() benötigt, die im Erfolgsfalle eine oder mehrere IP-Adressen liefert, unter denen sich der Rechner erreichen lässt.
- Hier wird die erste IP-Adresse ausgewählt.

Für die Kombination aus Rechnernamen (oder alternativ einer IP-Adresse) und einer Portnummer gibt es mit RFC 2396 einen Standard:

$$
\begin{array}{rcl}
\langle\text{hostport}\rangle & \longrightarrow & \langle\text{host}\rangle\ [\ „:“\ \langle\text{port}\rangle\ ] \\
\langle\text{host}\rangle & \longrightarrow & \langle\text{hostname}\rangle \\
 & \longrightarrow & \langle\text{IPv4address}\rangle \\
\langle\text{hostname}\rangle & \longrightarrow & \{\ \langle\text{domainlabel}\rangle\ „.“\ \}\ \langle\text{toplabel}\rangle\ [\ „.“\ ] \\
\langle\text{domainlabel}\rangle & \longrightarrow & \langle\text{alphanum}\rangle \\
 & \longrightarrow & \langle\text{alphanum}\rangle\ \{\ \langle\text{alphanum}\rangle\ |\ „-“\ \}\ \langle\text{alphanum}\rangle \\
\langle\text{toplabel}\rangle & \longrightarrow & \langle\text{alpha}\rangle \\
 & \longrightarrow & \langle\text{alpha}\rangle\ \{\ \langle\text{alphanum}\rangle\ |\ „-“\ \}\ \langle\text{alphanum}\rangle \\
\langle\text{IPv4address}\rangle & \longrightarrow & \{\ \langle\text{digit}\rangle\ \}\ „.“\ \{\ \langle\text{digit}\rangle\ \} \\
 & & „.“\ \{\ \langle\text{digit}\rangle\ \}\ „.“\ \{\ \langle\text{digit}\rangle\ \}
\end{array}
$$

Datenstruktur für einen *hostport*

hostport.h

```
typedef struct hostport {
   /* parameters for socket() */
   int domain;
   int protocol;
   /* parameters for bind() or connect() */
   struct sockaddr_storage addr;
   int namelen;
} hostport;

bool parse_hostport(char* input, hostport* hp,
   in_port_t defaultport);
```

- In der Vorlesungsbibliothek gibt es eine Funkton *parse_hostport*, die eine Zeichenkette entsprechend der Syntax des RFC 2396 analysiert und in einer **struct** *hostport* ablegt.
- In der Datenstruktur *hostport* liegen alle Parameter, die für die Systemaufrufe *socket()*, *bind()* oder *connect()* benötigt werden.
- Mit so einer Schnittstelle lässt sich auch die Festlegung auf IPv4 oder IPv6 vermeiden.

timeclient2.c

```
hostport hp;
if (!parse_hostport(*argv, &hp, PORT)) {
   fprintf(stderr, "unknown hostport: %s\n", *argv); exit(1);
}
int fd;
if ((fd = socket(hp.domain, SOCK_STREAM, hp.protocol)) < 0) {
   perror("socket"); exit(1);
}
if (connect(fd, (struct sockaddr *) &hp.addr, hp.namelen) < 0) {
   perror("connect"); exit(1);
}
```

- Der im *hostport* verwendete Datentyp **struct** *sockaddr_storage* ist unabhängig von der Wahl eines bestimmten Netzwerks bzw. des zugehörigen Adressraums.
- Deswegen kann nicht mehr **sizeof** verwendet werden, da dieser jetzt eine Maximalgröße aufweist für alle denkbaren Varianten. Die zu verwendende Größe steht über *hp.namelen* zur Verfügung.

Fragmentierung der Pakete bei Netzwerkverbindungen 196

- Die Ein- und Ausgabe über Netzwerkverbindungen bringt in Vergleich zur Behandlungen von Dateien und interaktiven Benutzern einige Veränderungen mit sich.
- Wenn eine Verbindung des Typs *SOCK_STREAM* zum Einsatz gelangt, so kommen die Daten zwar in der korrekten Reihenfolge an, jedoch nicht in der ursprünglichen Paketisierung.
- Als ursprüngliche Pakete werden hier die Daten betrachtet, die mit Hilfe eines einzigen Aufrufs von *write*() geschrieben werden:

```
const char greeting[] = "Hi, how are you?\r\n";
ssize_t nbytes = write(sfd, greeting, sizeof greeting);
```

Fragmentierung der Pakete bei Netzwerkverbindungen 197

- Wenn beispielsweise bei einer Netzwerkverbindung immer vollständige Zeilen mit *write*() geschrieben werden, so ist es möglich, dass die korrespondierende *read*()-Operation nur einen Teil einer Zeile zurückliefert oder auch ein Fragment, das sich über mehr als eine Zeile erstreckt.
- Diese Problematik legt es nahe, nur zeichenweise einzulesen, wenn genau eine einzelne Zeile eingelesen werden soll:

```
char ch;
stralloc line = {0};
while (read(fd, &ch, sizeof ch) == 1 && ch != '\n') {
   stralloc_append(&line, &ch);
}
```

Fragmentierung der Pakete bei Netzwerkverbindungen 198

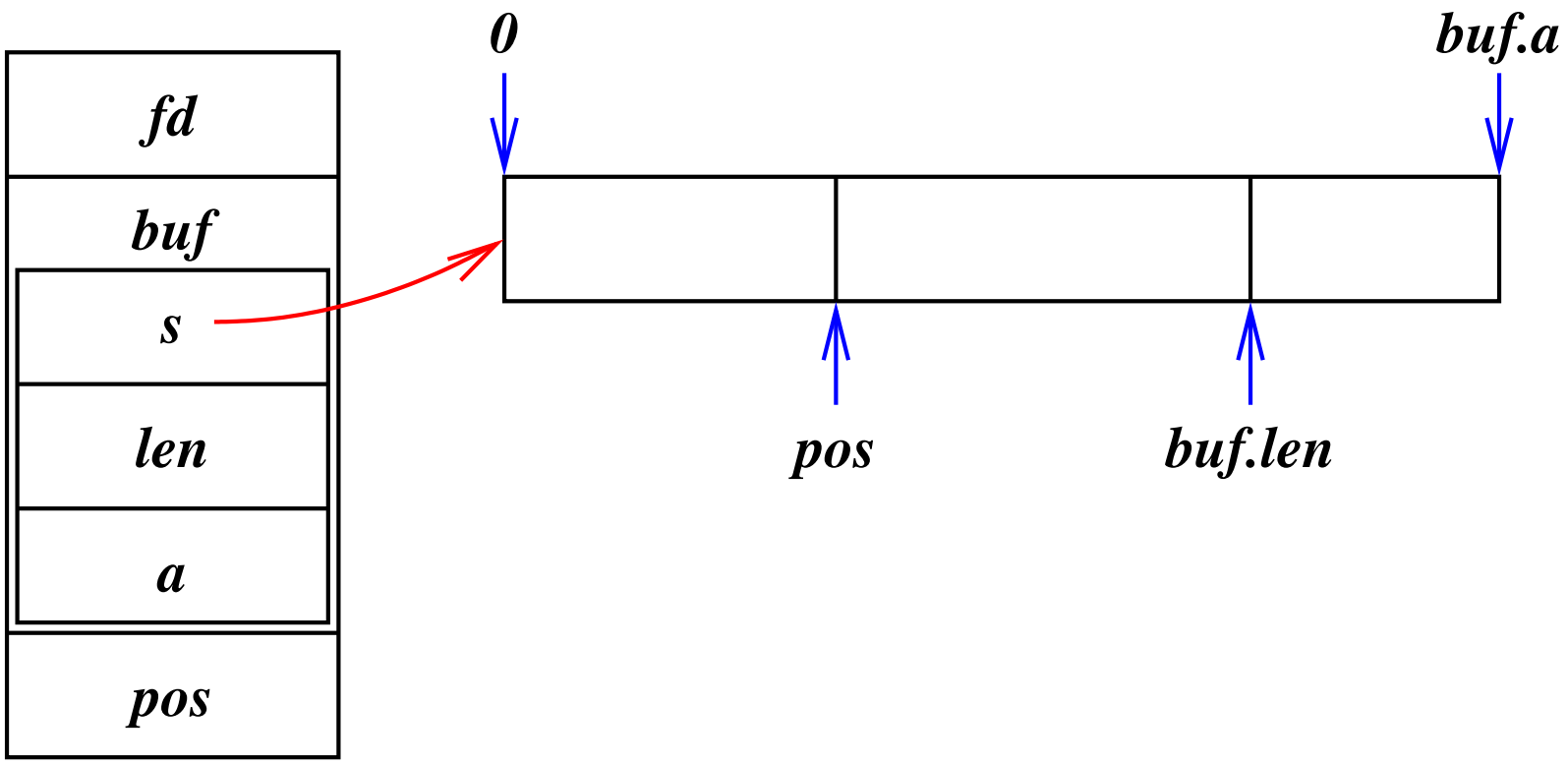
- Diese Vorgehensweise ist jedoch außerordentlich ineffizient, weil Systemaufrufe wie *read*() zu einem Kontextwechsel zwischen dem aufrufenden Prozess und dem Betriebssystem führen.
- Wenn ein Kontextwechsel für jedes einzulesende Byte initiiert wird, dann ist der betroffene Rechner mehr mit Kontextwechseln als mit sinnvollen Tätigkeiten beschäftigt.
- Wenn jedoch in größeren Einheiten eingelesen wird, ist möglicherweise mehr als nur die gewünschte Zeile in *buf* zu finden. Oder auch nur ein Teil der Zeile:

```
char buf[512];
ssize_t nbytes = read(fd, buf, sizeof buf);
```

- Entsprechend ist eine gepufferte Eingabe notwendig, bei der die Eingabe-Operationen aus einem Puffer versorgt werden, der, wenn er leer wird, mit Hilfe einer *read*()-Operation aufzufüllen ist.
- Die Datenstruktur für einen Eingabe-Puffer benötigt entsprechend einen Dateideskriptor, einen Puffer und einen Positionszeiger innerhalb des Puffers:

inbuf.h

```
typedef struct inbuf {
   int fd;
   stralloc buf;
   unsigned int pos;
} inbuf;
```


0
buf.a
fd
buf
s
len
a
pos
pos
buf.len

inbuf.h

```
#ifndef INBUF_H
#define INBUF_H

#include <stralloc.h>
#include <unistd.h>

typedef struct inbuf {
   int fd;
   stralloc buf;
   unsigned int pos;
} inbuf;

/* set size of input buffer */
int inbuf_alloc(inbuf* ibuf, unsigned int size);

/* works like read(2) but from ibuf */
ssize_t inbuf_read(inbuf* ibuf, void* buf, size_t size);

/* works like fgetc but from ibuf */
int inbuf_getchar(inbuf* ibuf);

/* move backward one position */
int inbuf_back(inbuf* ibuf);

/* release storage associated with ibuf */
void inbuf_free(inbuf* ibuf);

#endif
```

Implementierung für eine gepufferte Eingabe

inbuf.c

```
/* set size of input buffer */
int inbuf_alloc(inbuf* ibuf, unsigned int size) {
   return stralloc_ready(&ibuf->buf, size);
}

/* works like read(2) but from ibuf */
ssize_t inbuf_read(inbuf* ibuf, void* buf, size_t size) {
   if (size == 0) return 0;
   if (ibuf->pos >= ibuf->buf.len) {
      if (ibuf->buf.a == 0 && !inbuf_alloc(ibuf, 512)) return -1;
      /* fill input buffer */
      ssize_t nbytes;
      do {
         errno = 0;
         nbytes = read(ibuf->fd, ibuf->buf.s, ibuf->buf.a);
      } while (nbytes < 0 && errno == EINTR);
      if (nbytes <= 0) return nbytes;
      ibuf->buf.len = nbytes;
      ibuf->pos = 0;
   }
   ssize_t nbytes = ibuf->buf.len - ibuf->pos;
   if (size < nbytes) nbytes = size;
   memcpy(buf, ibuf->buf.s + ibuf->pos, nbytes);
   ibuf->pos += nbytes;
   return nbytes;
}
```

inbuf.c

```
/* works like fgetc but from ibuf */
int inbuf_getchar(inbuf* ibuf) {
   char ch;
   ssize_t nbytes = inbuf_read(ibuf, &ch, sizeof ch);
   if (nbytes <= 0) return -1;
   return ch;
}

/* move backward one position */
int inbuf_back(inbuf* ibuf) {
   if (ibuf->pos == 0) return 0;
   ibuf->pos--;
   return 1;
}

/* release storage associated with ibuf */
void inbuf_free(inbuf* ibuf) {
   stralloc_free(&ibuf->buf);
}
```

- Die Ausgabe sollte ebenfalls gepuffert erfolgen, um die Zahl der Systemaufrufe zu minimieren.
- Ein Positionszeiger ist nicht erforderlich, wenn Puffer grundsätzlich vollständig an *write*() übergeben werden.
- Hier ist das einzige Problem, dass die *write*()-Operation unter Umständen nicht den gesamten gewünschten Umfang akzeptiert und nur einen Teil der zu schreibenden Bytes akzeptiert und entsprechend eine geringere Quantität als Wert zurückgibt.

outbuf.h

```
typedef struct outbuf {
   int fd;
   stralloc buf;
} outbuf;
```

Schnittstelle für eine gepufferte Ausgabe

outbuf.h

```
#ifndef OUTBUF_H
#define OUTBUF_H

#include <stralloc.h>
#include <unistd.h>

typedef struct outbuf {
   int fd;
   stralloc buf;
} outbuf;

/* works like write(2) but to obuf */
ssize_t outbuf_write(outbuf* obuf, void* buf, size_t size);

/* works like fputc but to obuf */
int outbuf_putchar(outbuf* obuf, char ch);

/* write contents of obuf to the associated fd */
int outbuf_flush(outbuf* obuf);

/* release storage associated with obuf */
void outbuf_free(outbuf* obuf);

#endif
```

outbuf.c

```
/* works like write(2) but to obuf */
ssize_t outbuf_write(outbuf* obuf, void* buf, size_t size) {
   if (size == 0) return 0;
   if (!stralloc_readyplus(&obuf->buf, size)) return -1;
   memcpy(obuf->buf.s + obuf->buf.len, buf, size);
   obuf->buf.len += size;
   return size;
}

/* works like fputc but to obuf */
int outbuf_putchar(outbuf* obuf, char ch) {
   if (outbuf_write(obuf, &ch, sizeof ch) <= 0) return -1;
   return ch;
}
```

outbuf.c

```
/* write contents of obuf to the associated fd */
int outbuf_flush(outbuf* obuf) {
   ssize_t left = obuf->buf.len; ssize_t written = 0;
   while (left > 0) {
      ssize_t nbytes;
      do {
         errno = 0;
         nbytes = write(obuf->fd, obuf->buf.s + written, left);
      } while (nbytes < 0 && errno == EINTR);
      if (nbytes <= 0) return 0;
      left -= nbytes; written += nbytes;
   }
   obuf->buf.len = 0;
   return 1;
}

/* release storage associated with obuf */
void outbuf_free(outbuf* obuf) {
   stralloc_free(&obuf->buf);
}
```

Ein- und Ausgabe von Paketen für Netzwerkverbindungen

- Zwischen Dienste-Anbietern und ihren Klienten auf dem Netzwerk besteht häufig ein ähnliches Verhältnis wie zwischen einer Shell und dem zugehörigen Benutzer.
- Der Klient gibt ein Kommando, das typischerweise mit dem Zeilentrenner CR LF, beendet wird, und der Dienste-Anbieter sendet darauf eine Antwort zurück,
  - die zum Ausdruck bringt, ob das Kommando erfolgreich verlief oder fehlschlug, und
  - einen Antworttext über eine oder mehrere Zeilen bringt.
- Es gibt keine zwingende Notwendigkeit, bei einem Protokoll Zeilentrenner zu verwenden. Alternativ wäre es auch denkbar,
  - die Länge eines Pakets zu Beginn explizit zu deklarieren oder
  - Pakete fester Länge zu wählen.

Protokoll-Syntax am Beispiel von SMTP


```
clonard$ telnet mail.rz.uni-ulm.de smtp
Trying 134.60.1.11...
Connected to mail.rz.uni-ulm.de.
Escape character is '^]'.
220 mail.uni-ulm.de ESMTP Sendmail 8.14.2/8.14.2; Mon, 2 Jun 2008 10:18:51 +02
help
214-2.0.0 This is sendmail version 8.14.2
214-2.0.0 Topics:
214-2.0.0  HELO EHLO MAIL RCPT DATA
214-2.0.0  RSET NOOP QUIT HELP VRFY
214-2.0.0  EXPN VERB ETRN DSN AUTH
214-2.0.0  STARTTLS
214-2.0.0 For more info use "HELP <topic>".
214-2.0.0 To report bugs in the implementation see
214-2.0.0  http://www.sendmail.org/email-addresses.html
214-2.0.0 For local information send email to Postmaster at your site.
214 2.0.0 End of HELP info
huhu
500 5.5.1 Command unrecognized: "huhu"
helo clonard.mathematik.uni-ulm.de
250 mail.uni-ulm.de Hello borchert@clonard.mathematik.uni-ulm.de [134.60.66.13
quit
221 2.0.0 mail.uni-ulm.de closing connection
Connection to mail.rz.uni-ulm.de closed by foreign host.
clonard$
```

```
clonard$ telnet mail.rz.uni-ulm.de smtp
Trying 134.60.1.11...
Connected to mail.rz.uni-ulm.de.
Escape character is '^]'.
220 mail.uni-ulm.de ESMTP Sendmail 8.14.2/8.14.2; Mon, 2 Jun 2008 10:18:51 +02
```

- Beim SMTP-Protokoll erfolgt zunächst eine Begrüßung des Dienste-Anbieters.
- Die Begrüßung oder auch eine andere Antwort des Anbieters besteht aus einer dreistelligen Nummer, einem Leerzeichen oder einem Minus und beliebigem Text, der durch CR LF abgeschlossen wird.
- Die erste Ziffer der dreistelligen Nummer legt hier fest, ob ein Erfolg oder ein Problem vorliegt. Die beiden weiteren Ziffern werden zur feineren Unterscheidung der Rückmeldung verwendet.
- Eine führende 2 bedeutet Erfolg, eine 4 signalisiert ein temporäres Problem und eine 5 signalisiert einen permanenten Fehler.

```
help
214-2.0.0 This is sendmail version 8.14.2
214-2.0.0 Topics:
214-2.0.0  HELO EHLO MAIL RCPT DATA
214-2.0.0  RSET NOOP QUIT HELP VRFY
214-2.0.0  EXPN VERB ETRN DSN AUTH
214-2.0.0  STARTTLS
214-2.0.0 For more info use "HELP <topic>".
214-2.0.0 To report bugs in the implementation see
214-2.0.0  http://www.sendmail.org/email-addresses.html
214-2.0.0 For local information send email to Postmaster at your site.
214 2.0.0 End of HELP info
```

- In der Beispielsitzung ist das erste Kommando ein „help“, gefolgt von CR LF.
- Da die Antwort sich über mehrere Zeilen erstreckt, werden alle Zeilen, hinter der noch mindestens eine folgt, mit einem Minuszeichen hinter der dreistelligen Zahl gekennzeichnet.

```
huhu
500 5.5.1 Command unrecognized: "huhu"
helo clonard.mathematik.uni-ulm.de
250 mail.uni-ulm.de Hello borchert@clonard.mathematik.uni-ulm.de [134.60.66.13
quit
221 2.0.0 mail.uni-ulm.de closing connection
Connection to mail.rz.uni-ulm.de closed by foreign host.
clonard$
```

- Das unbekannte Kommando „huhu“ provoziert hier eine Fehlermeldung provoziert, die durch den Code 500 als solche kenntlich gemacht wird.
- Das SMTP-Protokoll erlaubt auch eine Fortsetzung des Dialogs nach Fehlern, so dass dann noch ein „helo“-Kommando akzeptiert wurde.
- Die Verbindung wurde mit dem „quit“-Befehl beendet.

- Semaphore als Instrument zur Synchronisierung von Prozessen gehen auf den niederländischen Informatiker Edsger Dijkstra zurück, der diese Kontrollstruktur Anfang der 60er-Jahre entwickelte.
- Eine Semaphore wird irgendeiner Ressource zugeordnet, auf die zu einem gegebenen Zeitpunkt nur ein Prozess zugreifen darf, d.h. Zugriffe müssen exklusiv erfolgen.
- Damit sich konkurrierende Prozesse beim Zugriff auf die Ressource nicht ins Gehege kommen, erfolgt die Synchronisierung über Semaphore, die folgende Operationen anbieten:

  P Der Aufrufer wird blockiert, bis die Ressource frei ist. Danach ist ein Zugriff möglich.

  V Gib die Ressource wieder frei.

```
P(sema); // warte, bis die Semaphore fuer uns reserviert ist
// ... Kritischer Bereich, in dem wir exklusiven Zugang
// zu der mit sema verbundenen Ressource haben ...
V(sema); // Freigabe der Semaphore
```

- Semaphores werden so verwendet, dass jeder exklusive Zugriff auf eine Ressource in die Operationen P und V geklammert wird.
- Intern werden typischerweise Semaphore repräsentiert durch eine Datenstruktur mit einer ganzen Zahl und einer Warteschlange. Wenn die ganze Zahl positiv ist, dann ist die Semaphore frei. Ist sie 0, dann ist sie belegt, aber niemand sonst wartet darauf. Ist sie negativ, dann entspricht der Betrag der Länge der Warteschlange.
- Bei P wird entsprechend der Zähler heruntergezählt und, falls der Zähler negativ wurde, der Aufrufer in die Warteschlange befördert. Ansonsten erhält er sofort Zugang zur Ressource.
- Bei V wird der Zähler hochgezählt und, falls der Zähler noch nicht positiv ist, das am längsten wartende Mitglied der Warteschlange daraus entfernt und aufgeweckt.

Anmerkungen zu den Namen P und V, die beide auf Edsger Dijkstra zurückgehen:

- P steht für „Prolaag“ und V für „Verhoog“.
- „Verhoog“ ist niederländisch und bedeutet übersetzt „hochzählen“.
- Da das niederländische Gegenstück „verlaag“ (übersetzt: „herunterzählen“) ebenfalls mit einem „v“ beginnt, schuf Dijkstra das Kunstwort „prolaag“.
- Die erste Notiz, in der Dijkstra diese Operationen und die Namen P und V definierte, findet sich unter `http://www.cs.utexas.edu/users/EWD/ewd00xx/EWD74.PDF`. Eine genaue Datierung liegt nicht vor, aber die Notiz muss wohl 1963 oder 1964 entstanden sein.
- 1968 erfolgte die erste Veröffentlichung in seinem Beitrag *Cooperating sequential processes* zur NATO-Konferenz über Programmiersprachen.

- Das *Mutual Exclusion Protocol* (MXP) sei ein Protokoll, das die Synchronisation einander fremder Prozesse über Semaphore erlaubt, die durch einen Netzwerkdienst verwaltet werden.
- Der Netzwerkdienst (in diesem Beispiel *mutexd* genannt) erlaubt beliebig viele Klienten, die sich jeweils namentlich identifizieren müssen.
- Jede der Klienten kann dann die bekannten P- und V-Operationen für beliebige Semaphoren absetzen oder den aktuellen Status einer Semaphore überprüfen.

- Das Protokoll sieht Anfragen (von einem Klienten an den Dienst) und Antworten (von dem Dienst an den Klienten) vor.
- Anfragen bestehen immer aus genau einer Zeile, die mit CR LF terminiert wird.
- Antworten bestehen aus einer oder mehrerer Zeilen, die ebenfalls mit CR LF terminiert werden.
- Die letzte Zeile einer Antwort beginnt immer mit dem Buchstaben „S“ oder „F“. „S“ steht für eine erfolgreich durchgeführte Operation, „F“ für eine fehlgeschlagene Operation.
- Wenn eine Antwort aus mehreren Zeilen besteht, dann beginnen alle Antwortzeilen mit Ausnahme der letzten Zeile mit dem Buchstaben „C“.

- Anfragen beginnen mit einer Folge von Kleinbuchstaben (dem Kommando), einem Leerzeichen und einem Parameter. Parameter sind beliebige Folgen von 8-Bit-Zeichen, die weder CR, LF noch Nullbytes enthalten dürfen.
- Antwortzeilen bestehen aus dem Statusbuchstaben („S“, „F“ oder „C“) und einer beliebigen Folge von 8-Bit-Zeichen, die weder CR, LF noch Nullbytes enthalten dürfen.

Folgende Anfragen werden unterstützt:

id *login*	Anmelden mit eindeutigem Namen. Dies muss als erstes erfolgen.
stat *sema*	Liefert den Status der genannten Semaphore. Wenn die Semaphore frei ist, wird „Sfree“ als Antwort zurückgeliefert. Ansonsten eine C-Zeile mit dem Namen desjenigen, der sie gerade reserviert hat, gefolgt von „Sheld“.
lock *sema*	Wartet, bis die Semaphore frei wird, und blockiert sie dann für den Aufrufer. Falls gewartet werden muss, gibt es sofort eine Antwortzeile „Cwaiting“. Sobald die Semaphore für den Aufrufer reserviert ist, folgt die Antwortzeile „Slocked“.
release *sema*	Gibt eine reservierte Semaphore wieder frei. Antwort ist ein einfaches „S“.

Beispiel für eine MXP-Sitzung


```
←  S
→  id alice
←  Swelcome
→  stat beer
←  Sfree
→  stat wine
←  Cbob
←  Sheld
→  lock beer
←  Slocked
→  lock wine
←  Cwaiting
←  Slocked
→  release wine
←  S
→  release cake
←  F
→  release beer
←  S
```

mxprequest.h

```
#ifndef MXP_REQUEST_H
#define MXP_REQUEST_H

#include <stdbool.h>
#include <stralloc.h>
#include <afblib/inbuf.h>
#include <afblib/outbuf.h>

typedef struct mxp_request {
   stralloc keyword;
   stralloc parameter;
} mxp_request;

/* read one request from the given input buffer */
bool read_mxp_request(inbuf* ibuf, mxp_request* request);

/* write one request to the given outbuf buffer */
bool write_mxp_request(outbuf* obuf, mxp_request* request);

/* release resources associated with request */
void free_mxp_request(mxp_request* request);

#endif
```

MXP-Pakete: Anfragen

mxprequest.c

```
/* read one request from the given input buffer */
bool read_mxp_request(inbuf* ibuf, mxp_request* request) {
   return
      inbuf_scan(ibuf, "([a-z]+) ([^\r\n]*)\r\n",
         &request->keyword, &request->parameter) == 2;
}

/* write one request to the given outbuf buffer */
bool write_mxp_request(outbuf* obuf, mxp_request* request) {
   return
      outbuf_printf(obuf, "%.*s %.*s\r\n",
         request->keyword.len, request->keyword.s,
         request->parameter.len, request->parameter.s) > 0;
}

/* release resources associated with request */
void free_mxp_request(mxp_request* request) {
   stralloc_free(&request->keyword);
   stralloc_free(&request->parameter);
}
```

mxpresponse.h

```
#ifndef MXP_RESPONSE_H
#define MXP_RESPONSE_H

#include <stdbool.h>
#include <afblib/inbuf.h>
#include <afblib/outbuf.h>

typedef enum mxp_status {
   MXP_SUCCESS = 'S',
   MXP_FAILURE = 'F',
   MXP_CONTINUATION = 'C',
} mxp_status;

typedef struct mxp_response {
   mxp_status status;
   stralloc message;
} mxp_response;

/* write one (possibly partial) response to the given output buffer */
bool write_mxp_response(outbuf* obuf, mxp_response* response);

/* read one (possibly partial) response from the given input buffer */
bool read_mxp_response(inbuf* ibuf, mxp_response* response);

void free_mxp_response(mxp_response* response);

#endif
```

MXP-Pakete: Antworten

mxpresponse.c

```
bool read_mxp_response(inbuf* ibuf, mxp_response* response) {
   int ch = inbuf_getchar(ibuf);
   switch (ch) {
      case MXP_SUCCESS:
      case MXP_FAILURE:
      case MXP_CONTINUATION:
         response->status = ch;
         break;
      default:
         return false;
   }
   return inbuf_scan(ibuf, "([^\r\n]*)\r\n", &response->message) == 1;
}

bool write_mxp_response(outbuf* obuf, mxp_response* response) {
   return outbuf_printf(obuf, "%c%.*s\r\n", response->status,
      response->message.len, response->message.s) > 0;
}

void free_mxp_response(mxp_response* response) {
   stralloc_free(&response->message);
}
```

Es gibt vier Ansätze, um parallele Sitzungen zu ermöglichen:

- Für jede neue Sitzung wird mit Hilfe von *fork*() ein neuer Prozess erzeugt, der sich um die Verbindung zu genau einem Klienten kümmert.
- Für jede neue Sitzung wird ein neuer Thread gestartet.
- Sämtliche Ein- und Ausgabe-Operationen werden asynchron abgewickelt mit Hilfe von *aio_read*, *aio_write* und dem *SIGIO*-Signal.
- Sämtliche Ein- und Ausgabe-Operationen werden in eine Menge zu erledigender Operationen gesammelt, die dann mit Hilfe von *poll* oder *select* ereignis-gesteuert abgearbeitet wird.

Im Rahmen dieser Vorlesung betrachten wir nur die erste und die letzte Variante.

Jede Sitzung in einem eigenen Prozess

- Diese Variante ist am einfachsten umzusetzen und von genießt daher eine gewisse Popularität.
- Beispiele sind etwa der Apache-Webserver, der jede HTTP-Sitzung in einem separaten Prozess abhandelt, oder verschiedene SMTP-Server, die für jede eingehende E-Mail einen separaten Prozess erzeugen.
- Es gibt fertige Werkzeuge wie etwa *tcpserver* von Dan Bernstein, die die Socket-Operationen übernehmen und für jede Sitzung ein angegebenes Kommando starten, das mit der Netzwerkverbindung über die Standardein- und ausgabe verbunden ist.
- Es ist auch sinnvoll, das in Form einer kleinen Bibliotheksfunktion zu verpacken.

service.h

```
#ifndef AFBLIB_SERVICE_H
#define AFBLIB_SERVICE_H

#include <afblib/hostport.h>

typedef void (*session_handler)(int fd, int argc, char** argv);

/*
 * listen on the given port and invoke the handler for each
 * incoming connection
 */
void run_service(hostport* hp, session_handler handler,
   int argc, char** argv);

#endif
```

- *run_service* eröffnet eine Socket mit der über den Hostport spezifizierten Adresse und startet *handler* in einem separaten Prozess für jede neu eröffnete Sitzung. Diese Funktion läuft permanent und hört nur im Fehlerfalle auf.
- Wenn der *handler* beendet ist, terminiert der entsprechende Prozess.

Einfache Technik für Semaphore

- Problem: Wir haben konkurrierende Prozesse (für jede Sitzung einen), die eine gemeinsame Menge von Semaphoren verwalten.
- Prinzipiell könnten die das über ein Protokoll untereinander regeln oder den Systemaufrufen für Semaphore (die es auch gibt).
- In diesem Fallbeispiel wird eine primitive und uralte Technik eingesetzt:
  - Für jede Sitzung wird eine Datei angelegt, die nach dem jeweiligen Benutzer benannt wird.
  - Wer eine Semaphore reservieren möchte, versucht, mit dem Systemaufruf *link* einen harten Link von der Datei zum Namen der Semaphore zu erzeugen. Da der Systemaufruf fehlschlägt, wenn der Zielname (der neue Link) bereits existiert, kann das maximal nur einem Prozess gelingen. Der hat dann den gewünschten exklusiven Zugriff.
  - Die anderen Prozesse verharren in einer Warteschleife und hoffen, dass irgendwann einmal die Semaphore wegfällt. Die primitive Lösung verwaltet keine Warteschlange.

Schnittstelle für die Semaphore

lockmanager.h

```
typedef struct lockset {
   char* dirname;
   char* myname;
   stralloc myfile;
   strhash locks;
} lockset;

/*
 * initialize lock set
 */
int lm_init(lockset* set, char* dirname, char* myname);

/* release all locks associated with set and allocated storage */
void lm_free(lockset* set);

/*
 * check status of the given lock and return
 * the name of the holder in holder if it's held
 * and an empty string if the lock is free
 */
int lm_stat(lockset* set, char* lockname, stralloc* holder);

/* block until 'lockname' is locked */
int lm_lock(lockset* set, char* lockname);

/* attempt to lock 'lockname' but do not block */
int lm_nonblocking_lock(lockset* set, char* lockname);

/* release 'lockname' */
int lm_release(lockset* set, char* lockname);
```

service.c

```
void run_service(hostport* hp, session_handler handler,
      int argc, char** argv) {
   int sfd = socket(hp->domain, SOCK_STREAM, hp->protocol);
   int optval = 1;
   if (sfd < 0 ||
        setsockopt(sfd, SOL_SOCKET, SO_REUSEADDR,
                   &optval, sizeof optval) < 0 ||
        bind(sfd, (struct sockaddr *) &hp->addr,
             hp->namelen) < 0 ||
        listen(sfd, SOMAXCONN) < 0) {
      return;
   }

   /* our childs shall not become zombies */
   struct sigaction action = {
      .sa_handler = SIG_IGN,
      .sa_flags = SA_NOCLDWAIT,
   };
   if (sigaction(SIGCHLD, &action, 0) < 0) return;

   /* ... accept incoming connections ... */
}
```

service.c

```
int fd;
while ((fd = accept(sfd, 0, 0)) >= 0) {
   pid_t child = fork();
   if (child == 0) {
      close(sfd);
      handler(fd, argc, argv);
      exit(0);
   }
   close(fd);
}
```

- Der übergeordnete Prozess wartet mit *accept* auf die jeweils nächste eingehende Netzwerkverbindung.
- Sobald eine neue Verbindung da ist, wird diese mit *fork* an einen neuen Prozess übergeben, der dann *handler* aufruft. Diese Funktion kümmert sich dann nur noch um eine einzelne Sitzung.

MXP-Dienst auf Basis von *run_service*

mutexd.c

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <afblib/hostport.h>
#include <afblib/service.h>
#include "mxpsession.h"

int main (int argc, char** argv) {
   char* cmdname = *argv++; --argc;
   if (argc != 2) {
      fprintf(stderr, "Usage: %s hostport lockdir\n", cmdname);
      exit(1);
   }
   char* hostport_string = *argv++; --argc;
   hostport hp;
   if (!parse_hostport(hostport_string, &hp, 21021)) {
      fprintf(stderr, "%s: hostport in conformance to RFC 2396 expected\n",
         cmdname);
      exit(1);
   }

   /* pass lockdir argument to the service */
   run_service(&hp, mxp_session, argc, argv);
}
```

mxpsession.c

```
#define EQUAL(sa,str) (strncmp((sa.s),(str),(sa.len)) == 0)

void mxp_session(int fd, int argc, char** argv) {
   if (argc != 1) return;
   char* lockdir = argv[0];

   inbuf ibuf = {fd};
   outbuf obuf = {fd};
   lockset locks = {0};

   /* send greeting */
   mxp_response greeting = {MXP_SUCCESS};
   if (!write_mxp_response(&obuf, &greeting)) return;
   if (!outbuf_flush(&obuf)) return;

   /* ... rest of the session ... */

   /* release all locks */
   lm_free(&locks);
   /* free allocated memory */
   free_mxp_response(&response);
   stralloc_free(&myname);
}
```

mxpsession.c

```
/* receive identification */
mxp_request id = {{0}};
if (!read_mxp_request(&ibuf, &id)) return;
if (!EQUAL(id.keyword, "id")) return;
stralloc myname = {0};
stralloc_copy(&myname, &id.parameter);
stralloc_0(&myname);
int ok = lm_init(&locks, lockdir, myname.s);

/* send response to identification */
mxp_response response = {MXP_SUCCESS};
stralloc_copys(&response.message, "welcome");
if (!ok) response.status = MXP_FAILURE;
if (!write_mxp_response(&obuf, &response)) return;
if (!outbuf_flush(&obuf)) return;
if (!ok) return;
```

mxpsession.c

```
/* process regular requests */
mxp_request request = {{0}};
while (read_mxp_request(&ibuf, &request)) {
   stralloc lockname = {0};
   stralloc_copy(&lockname, &request.parameter);
   stralloc_0(&lockname);

   if (EQUAL(request.keyword, "stat")) {
      /* ... handling of stat ... */
   } else if (EQUAL(request.keyword, "lock")) {
      /* ... handling of lock ... */
   } else if (EQUAL(request.keyword, "release")) {
      /* ... handling of release */
   } else {
      response.status = MXP_FAILURE;
      stralloc_copys(&response.message, "unknown command");
   }
   if (!write_mxp_response(&obuf, &response)) break;
   if (!outbuf_flush(&obuf)) break;
}
```

mxpsession.c

```
      if (EQUAL(request.keyword, "stat")) {
         mxp_response info = {MXP_CONTINUATION};
         if (lm_stat(&locks, lockname.s, &info.message)) {
            response.status = MXP_SUCCESS;
            if (info.message.len == 0) {
               stralloc_copys(&response.message, "free");
            } else {
               if (!write_mxp_response(&obuf, &info)) break;
               stralloc_copys(&response.message, "held");
            }
         } else {
            response.status = MXP_FAILURE;
            stralloc_copys(&response.message,
               "unable to check lock status");
         }
         free_mxp_response(&info);
```

mxpsession.c

```
} else if (EQUAL(request.keyword, "lock")) {
   if (lm_nonblocking_lock(&locks, lockname.s)) {
      response.status = MXP_SUCCESS;
      stralloc_copys(&response.message, "locked");
   } else {
      mxp_response notification = {MXP_CONTINUATION};
      stralloc_copys(&notification.message, "waiting");
      if (!write_mxp_response(&obuf, &notification)) break;
      if (!outbuf_flush(&obuf)) break;
      if (lm_lock(&locks, lockname.s)) {
         response.status = MXP_SUCCESS;
         stralloc_copys(&response.message, "locked");
      } else {
         response.status = MXP_FAILURE;
         stralloc_copys(&response.message, "");
      }
   }
} else if (EQUAL(request.keyword, "release")) {
   stralloc_copys(&response.message, "");
   if (lm_release(&locks, lockname.s)) {
      response.status = MXP_SUCCESS;
   } else {
      response.status = MXP_FAILURE;
   }
```

Prefork-Modell

- Wenn es um sehr schnelle Reaktionen auf eingehende Verbindungen ankommt, erscheint u.U. die Sequenz von *accept* und *fork* zu langsam.
- Alternativ ist es auch denkbar, den Netzwerkdienst zuerst mit *socket*, *bind* und *listen* aufzusetzen und dann mehrere Prozesse im Voraus mit *fork* zu erzeugen, die alle die Socket erben.
- Dann kann jeder dieser Prozesse konkurrierend *accept* aufrufen. Wenn dann eine Netzwerkverbindung durch einen Klienten eröffnet wird, dann ist genau einer der *accept*-Aufrufe erfolgreich. Die anderen Prozesse warten weiter auf andere Klienten.
- Das Modell ist insbesondere durch den Apache-Webserver bekannt geworden.

Probleme des Prefork-Modells

- Die Zahl der Prozesse, die mit dem Prefork-Modell erzeugt worden ist, begrenzt zunächst die Zahl der parallelen Sitzungen. Das ist nicht befriedrigend.
- Es müssen also bei Bedarf weitere Prozesse erzeugt werden. Aber wie bekommt der Hauptprozess mit, wieviele Prozesse noch frei sind, um eine Verbindung entgegenzunehmen?
- Signale sind ungeeignet, da die sich gegenseitig auslöschen können. Es wird also irgendeine Interprozesskommunikation benötigt. Hierfür bieten sich u.a. Pipelines an, da die leicht vererbt werden können.
- Das bedeutet aber, dass der Hauptprozess mehrere Pipelines unter Beobachtung halten muss. Das ist mit *poll* denkbar.
- Wie können die Prozesse alle abgebaut werden? Wenn der Hauptprozess mit *SIGTERM* terminiert wird, sollten die anderen Prozesse, die nur auf Sitzungen warten, folgen. Bestehende Sitzungen sollten aber nicht unterbrochen werden.

Einfaches Prefork-Modell

- Dieses Modell kommt noch ohne *poll* aus.
- Zu Beginn wird die gewünschte Zahl von Prozessen erzeugt.
- Jeder der erzeugten Prozesse (Kind-Prozess) legt eine Pipeline an und erzeugt einen weiteren Prozess (Enkel-Prozess), der die Pipeline zum Schreiben offenlässt, während der Erzeuger aus der Pipeline nur liest.
- Der Enkel-Prozess ruft dann *accept* auf, um auf eine eingehende Verbindung zu warten. Sobald *accept* erfolgreich ist, wird die Pipeline geschlossen und die Sitzung gestartet.
- Der Kind-Prozess liest aus der Pipeline und wird damit blockiert, bis der Enkel-Prozess die Pipeline schließt. Danach kann ein neuer Enkel-Prozess erzeugt werden.
- Sollte einer der Kind-Prozesse terminieren, wird vom Hauptprozess ein Nachfolger erzeugt.
- Vorteil: Es sind immer n Prozesse bereit, eine Sitzung entgegenzunehmen. Nachteil: Wir benötigen insgesamt $2n + 1$ Prozesse.

preforked_service.c

```
void run_preforked_service(hostport* hp, session_handler handler,
      unsigned int number_of_processes, int argc, char** argv) {
   assert(number_of_processes > 0);
   int sfd = socket(hp->domain, SOCK_STREAM, hp->protocol);
   int optval = 1;
   if (sfd < 0 ||
        setsockopt(sfd, SOL_SOCKET, SO_REUSEADDR,
                   &optval, sizeof optval) < 0 ||
        bind(sfd, (struct sockaddr *) &hp->addr, hp->namelen) < 0 ||
        listen(sfd, SOMAXCONN) < 0) {
      close(sfd);
      return;
   }

   /* ... setup termination handler ... */
   /* ... create preforked processes ... */
   /* ... start a new preforked process for every one terminating ... */
   /* ... terminate everything ... */
}
```

preforked_service.c

```
/* setup termination handler */
struct sigaction action = {
   .sa_handler = termination_handler,
};
if (sigaction(SIGTERM, &action, 0) != 0) {
   return;
}

/* create preforked processes */
pid_t child_pid[number_of_processes];
for (int i = 0; i < number_of_processes; ++i) {
   pid_t pid = spawn_preforked_process(sfd, handler, argc, argv);
   if (pid < 0) return;
   child_pid[i] = pid;
}
```

preforked_service.c

```
/* start a new preforked process for every one terminating */
while (!terminate) {
   pid_t child; int wstat;
   if ((child = wait(&wstat)) > 0) {
      int index;
      for (index = 0; index < number_of_processes; ++index) {
         if (child_pid[index] == child) break;
      }
      if (index < number_of_processes) {
         child = spawn_preforked_process(sfd, handler, argc, argv);
         child_pid[index] = child;
         if (child < 0) break;
      }
   }
}

/* terminate everything */
for (int i = 0; i < number_of_processes; ++i) {
   if (child_pid[i] > 0) {
      kill(child_pid[i], SIGTERM);
   }
}
```

preforked_service.c

```
static pid_t spawn_preforked_process(int sfd, session_handler handler,
      int argc, char** argv) {
   pid_t child = fork();
   if (child) return child;

   /* our childs shall not become zombies */
   struct sigaction action = {
      .sa_handler = SIG_IGN,
      .sa_flags = SA_NOCLDWAIT,
   };
   if (sigaction(SIGCHLD, &action, 0) < 0) exit(1);

   while (!terminate) {
      /* ... */
   }
   exit(0);
}
```

preforked_service.c

```
while (!terminate) {
   /* now create another process and share a pipeline with it */
   int pipe_fds[2];
   if (pipe(pipe_fds) < 0) exit(1);
   pid_t pid = fork();
   if (pid < 0) exit(1);
   if (pid == 0) {
      /* grandchild of the original process */
      close(pipe_fds[0]); /* close reading side of pipe */
      int fd = accept(sfd, 0, 0);
      close(sfd);
      if (fd < 0) exit(1);
      /* now close the writing side of the pipe to indicate that
         we are busy with running a session */
      close(pipe_fds[1]);
      /* run the session and exit */
      handler(fd, argc, argv);
      exit(0);
   }
   close(pipe_fds[1]); /* close writing side of the pipe */
   /* now wait for the child process to accept a connection;
      we get notified by the closure of the pipe */
   char ch;
   if (read(pipe_fds[0], &ch, 1) < 0 && errno == EINTR && terminate) {
      kill(pid, SIGTERM); /* propagate termination */
   }
   close(pipe_fds[0]);
}
```

Verfolgen mehrerer Ereignisse mit *poll*

- Ein- und Ausgabe-Operationen blockieren normalerweise, bis sie durchgeführt werden können.
- Dies erschwert die Parallelisierung solcher Operationen bzw. die Möglichkeit, auf unterschiedliche Ein- und Ausgabe-Ereignisse zu reagieren.
- Mit den Systemaufrufen *poll* und *select* gibt es die Möglichkeit, zu warten, bis wir mindestens eine von beliebig vielen geplanten Ein- und Ausgabe-Operationen durchführen können, ohne blockiert zu werden.
- Der Vorteil dieser Schnittstelle liegt darin, dass wir die synchrone Arbeitsweise nicht aufgeben müssen.
- Wir betrachten hier im weiten *poll*, da dieser Systemaufruf eine etwas elegantere Schnittstelle als *select* bietet.

Funktionsweise von *poll*

multiplexor.c

```
    if (poll(mpx.pollfds, count, -1) <= 0) return;
```

- *poll* erhält drei Parameter:
  - Einen Zeiger auf ein Array mit Einträgen des Datentyps **struct** *pollfd*,
  - einer natürlichen Zahl, die die Länge des Arrays angibt, und
  - einer zeitlichen Beschränkung in Millisekunden. (Hier wird -1 angegeben, wenn keine Befristung gewünscht wird.)
- Der Datentyp **struct** *pollfd* umfasst folgende Felder:

fd	Dateideskriptor
events	Menge der Ereignisse, auf die gewartet wird
revents	Menge der Ereignisse, die eingetreten sind

- Im Erfolgsfalle liefert *poll* die Zahl der eingetretenen Ereignisse zurück. Falls die zeitliche Beschränkung erreicht wurde, ohne dass eines der Ereignisse eintrat, wird 0 zurückgeliefert. Im Falle von Fehlern wird -1 zurückgegeben.

Unterstützte Ereignisse bei *poll*

- Relevant sind nur *POLLIN* und *POLLOUT*. Prinzipiell kann *poll* noch Unterscheidungen treffen, ob priorisierte Pakete über die Netzwerkverbindung ankamen, aber das wird normalerweise nicht verwendet.
- Das Ereignis *POLLIN* bedeutet, dass ein *read*-Systemaufruf für den Dateideskriptor abgesetzt werden kann, ohne dass der Prozess blockiert wird.
- Analog bedeutet *POLLOUT*, dass ein *write*-Systemaufruf abgesetzt werden kann, ohne Gefahr zu laufen, blockiert zu werden.
- Bei mit *listen* vorbereiteten Sockets kann ebenfalls *POLLIN* verwendet werden. Das Ereignis tritt dann ein, sobald sich eine neue Netzwerkverbindung anbahnt und *accept* blockierungsfrei aufgerufen werden kann.

Prefork-Modell mit Hilfe von *poll*

- Die Umsetzung des Prefork-Modells lässt sich mit Hilfe von *poll* verbessern, da wir dann keinen Wächterprozess pro Prozess benötigen, der bereit ist, eine Verbindung mit *accept* entgegenzunehmen.
- Bei n Prozessen, die bereit sein sollen, eine Sitzung entgegenzunehmen, werden jetzt nur noch insgesamt $n + 1$ Prozesse benötigt, d.h. es kommt nur noch der Hauptprozess hinzu.
- Der Hauptprozess erzeugt selbst alle weiteren Prozesse und beobachtet dann mit Hilfe von *poll* die Pipeline-Verbindungen zu den einzelnen Prozessen.
- Sobald die letzte offene Schreibverbindung einer Pipeline geschlossen wird, tritt auf der lesenden Seite das *POLLIN*-Ereignis ein, damit das Eingabe-Ende erkannt werden kann. (Ein *read* würde dann blockierungsfrei eine 0 zurückliefern.)

preforked_service.c

```
static pid_t spawn_preforked_process(int sfd, int pipefds[2],
      session_handler handler, int argc, char** argv) {
   if (pipe(pipefds) < 0) return -1;
   pid_t child = fork();
   if (child) {
      close(pipefds[1]);
      return child;
   }
   close(pipefds[0]);

   int fd = accept(sfd, 0, 0); close(sfd);
   if (fd < 0) exit(1);
   /* now close the writing side of the pipe to indicate that
      we are busy with running a session */
   close(pipefds[1]);
   /* run the session and exit */
   handler(fd, argc, argv);
   exit(0);
}
```

- Die Funktion *spawn_preforked_process* vereinfacht sich, da nur noch ein Prozess erzeugt wird.

preforked_service.c

```
/* create preforked processes */
pid_t child_pid[number_of_processes];
struct pollfd pollfds[number_of_processes];
for (int i = 0; i < number_of_processes; ++i) {
   /* a pipe is used to signal that one of the
      preforked processes accepted a connection */
   int pipefds[2];
   pid_t pid = spawn_preforked_process(sfd, pipefds, handler,
      argc, argv);
   pollfds[i] = (struct pollfd) { .fd = pipefds[0], .events = POLLIN};
   if (pid < 0) return;
   child_pid[i] = pid;
}
```

- Der Hauptprozess erzeugt hier zu Beginn die gewünschte Zahl von Prozessen.
- Dabei wird gleichzeitig die *pollfds*-Datenstruktur aufgebaut, um all die Pipelines gleichzeitig beobachten zu können.

preforked_service.c

```
while (!terminate) {
   if (poll(pollfds, number_of_processes, -1) <= 0) break;
   for (int i = 0; i < number_of_processes; ++i) {
      if (pollfds[i].revents == 0) continue;
      close(pollfds[i].fd);
      int pipefds[2];
      pid_t pid = spawn_preforked_process(sfd, pipefds, handler,
         argc, argv);
      if (pid < 0) return;
      pollfds[i] = (struct pollfd) {
         .fd = pipefds[0], .events = POLLIN};
      child_pid[i] = pid;
   }
}
```

- Mit *poll* warten wir darauf, dass die schreibende Seite eine der Pipes geschlossen wird.
- Dies ist das Signal, dass ein neuer Prozess zu starten ist, dessen Pipeline dann in *pollfds* ersatzweise eingetragen wird.

Parallele Sitzungen auf Basis von *poll*

- In manchen Fällen ist es vorteilhaft, wenn alle Sitzungen einen gemeinsamen Adressraum verwenden, damit sitzungsübergreifende Datenstrukturen leichter verwaltet werden können.
- Prinzipiell lässt sich das mit Hilfe des Systemaufrufs *poll* erreichen, mit dem auf das Eintreten eines Ein- oder Ausgabe-Ereignisses gewartet werden kann.
- Dies führt zu einem grundlegend anderen Programmierstil, bei dem Ein- und Ausgaben ereignisgesteuert abgewickelt werden.
- Da bei jedem Ereignis entsprechende Behandler neu aufgerufen werden, kann der Sitzungskontext nicht in lokalen Variablen verwaltet werden. Stattdessen sind dafür dynamische Datenstrukturen zu verwenden, die bei jedem Aufruf erst lokalisiert werden müssen.

Verpackung von *poll* in eine Bibliothek

multiplexor.h

```
typedef void (*multiplexor_handler)(connection* link);
void run_multiplexor(int socket, multiplexor_handler open_handler,
   multiplexor_handler input_handler, multiplexor_handler close_handler,
   void* mpx_handle);
bool write_to_link(connection* link, char* buf, unsigned int len);
ssize_t read_from_link(connection* link, char* buf, unsigned int len);
void close_link(connection* link);
```

- Es ist sinnvoll, die Verwendung von *poll* in eine geeignete Bibliothek zu verpacken.
- Die Funktion *run_multiplexor* läuft dann permanent und übernimmt somit die vollständige Kontrolle des Programms. Es werden nur noch Behandler aufgerufen, wenn
  - neue Netzwerkverbindungen eröffnet werden,
  - neue Eingaben vorliegen oder
  - eine Verbindung beendet wird.
- Eine Rückkehr von *run_multiplexor* gibt es nur im Fehlerfalle.

multiplexor.h

```
typedef void (*multiplexor_handler)(connection* link);
void run_multiplexor(int socket, multiplexor_handler open_handler,
   multiplexor_handler input_handler, multiplexor_handler close_handler,
   void* mpx_handle);
bool write_to_link(connection* link, char* buf, unsigned int len);
ssize_t read_from_link(connection* link, char* buf, unsigned int len);
void close_link(connection* link);
```

- Konkret ruft *run_multiplexor* den Behandler *open_handler* für neue Verbindungen, *input_handler* für neue Eingaben und *close_handler* für beendete Verbindungen auf.
- Die Behandler dürfen selbst nichts direkt auf eine Netzwerkverbindung ausgeben, da dies zu längeren Blockaden führen könnte. Stattdessen muss dies durch *write_to_link* erfolgen, das dafür Warteschlangen unterhält.
- Der Parameter *mpx_handle* dient als Zeiger auf eine eigene Datenstruktur, die den Behandlern unter *connection−>mpx_handle* zur Verfügung gestellt wird.

Datenstruktur für eine Netzwerkverbindung

multiplexor.h

```
typedef struct connection {
   int fd;
   void* handle; /* may be freely used by the application */
   void* mpx_handle; /* corresponding parameter from run_multiplexor */
   bool eof;
   struct output_queue_member* oqhead;
   struct output_queue_member* oqtail;
   struct connection* next;
   struct connection* prev;
} connection;
```

- Für jede Netzwerkverbindung gibt es eine zugehörige Datenstruktur.
- Neben der Netzwerkverbindung *fd* und den beiden benutzerdefinierten Zeigern *handle* und *mpx_handle*, kommen noch folgende Felder hinzu:

eof	wird auf *true* gesetzt, sobald ein Eingabeende erkannt wurde
oqhead und *oqtail*	Zeiger auf das erste und letzte Element der Warteschlange mit den auszugebenden Puffern
next und *prev*	doppelt verkettete Liste aller Netzwerkverbindungen

multiplexor.c

```
typedef struct output_queue_member {
   char* buf;
   unsigned int len;
   unsigned int pos;
   struct output_queue_member* next;
} output_queue_member;
// ...
int write_to_link(connection* link, char* buf, unsigned int len);
```

- Jedes Element der Warteschlange weist auf einen Puffer.
- Zu Beginn ist die Position *pos* gleich 0 und *len* entspricht der Länge, die an *write_to_link* übergeben worden ist.
- Wenn jedoch der entsprechende Aufruf von *write* nicht vollständig umgesetzt werden kann, dann wird *pos* um die übertragene Quantität erhöht und *len* entsprechend gesenkt.
- Sobald die Schreiboperation abgeschlossen ist, wird nicht nur das Warteschlangen-Element, sondern auch der Puffer freigegeben.

Globale Datenstruktur

multiplexor.c

```
typedef struct multiplexor {
   /* parameters passed to run_multiplexor */
   int socket;
   multiplexor_handler ohandler, ihandler, chandler;
   void* mpx_handle;
   /* additional administrative fields */
   bool socketok; /* becomes false when accept() fails */
   connection* head; /* double-linked linear list of connections */
   connection* tail; /* its last element */
   int count; /* number of connections */
   struct pollfd* pollfds; /* parameter for poll() */
   unsigned int pollfdslen; /* allocated len of pollfds */
   connection** pollcs; /* of the same len as pollfds */
} multiplexor;
```

- Es gibt nur ein Objekt dieser Datenstruktur, das von *run_multiplexor* zu Beginn angelegt wird.
- Neben den Parametern von *run_multiplexor* werden in der doppelt verketteten Liste mit *head* und *tail* alle offenen Verbindungen verwaltet. In *count* findet sich deren Zahl.
- *pollfds* zeigt auf ein dynamisch belegtes Feld mit *pollfdslen* Elementen. Dies dient der Verwaltung der *poll* zu übergebenden Datenstruktur.

Vorbereitung der Datenstruktur für *poll*

multiplexor.c

```
/* prepare fields pollfds and pollfdslen in mpx in
   dependence of the current set of connections */
static int setup_polls(multiplexor* mpx) {
   int len = mpx->count;
   if (mpx->socketok) ++len;
   if (len == 0) return 0;
   /* weed out links which have been closed
      and where our output queue is empty */
   connection* link = mpx->head;
   while (link) {
      connection* next = link->next;
      if (link->eof && link->oqhead == 0) remove_link(mpx, link);
      link = next;
   }
   /* allocate or enlarge pollfds, if necessary */
   if (mpx->pollfdslen < len) {
      mpx->pollfds = realloc(mpx->pollfds, sizeof(struct pollfd) * len);
      if (mpx->pollfds == 0) return 0;
      mpx->pollcs = realloc(mpx->pollcs, sizeof(connection*) * len);
      if (mpx->pollcs == 0) return 0;
      mpx->pollfdslen = len;
   }

   /* ... */
}
```

Vorbereitung der Datenstruktur für *poll*

multiplexor.c

```
/* prepare fields pollfds and pollfdslen in mpx in
   dependence of the current set of connections */
static int setup_polls(multiplexor* mpx) {
   /* ... */

   int index = 0;
   /* look for new network connections as long accept()
      returned no errors so far */
   if (mpx->socketok) {
      mpx->pollcs[index] = 0;
      mpx->pollfds[index++] = (struct pollfd) {mpx->socket, POLLIN};
   }
   /* look for incoming network connections and
      check whether we can write any pending output packets
      without blocking */
   link = mpx->head;
   while (link) {
      short events = 0;
      if (!link->eof) events |= POLLIN;
      if (link->oqhead) events |= POLLOUT;
      mpx->pollcs[index] = link;
      mpx->pollfds[index++] = (struct pollfd) {link->fd, events};
      link = link->next;
   }
   return index;
}
```

multiplexor.c

```
static bool add_connection(multiplexor* mpx) {
   int newfd;
   if ((newfd = accept(mpx->socket, 0, 0)) < 0) {
      mpx->socketok = false; return true;
   }
   connection* link = malloc(sizeof(connection));
   if (link == 0) return false;
   *link = (connection) {
      .fd = newfd, .handle = 0, .mpx = mpx,
      .mpx_handle = mpx->mpx_handle,
      .eof = false, .oqhead = 0, .oqtail = 0,
      .next = 0, .prev = mpx->tail,
   };
   if (mpx->tail) {
      mpx->tail->next = link;
   } else {
      mpx->head = link;
   }
   mpx->tail = link; ++mpx->count;
   if (mpx->ohandler) (*mpx->ohandler)(link);
   return true;
}
```

Entfernung einer Verbindung

multiplexor.c

```
/* remove a connection from the double-linked linear
   list of connections
*/
static void remove_link(multiplexor* mpx, connection* link) {
   close(link->fd);
   if (link->prev) {
      link->prev->next = link->next;
   } else {
      mpx->head = link->next;
   }
   if (link->next) {
      link->next->prev = link->prev;
   } else {
      mpx->tail = link->prev;
   }
   if (mpx->chandler) (*mpx->chandler)(link);
   free(link);
   --mpx->count;
}
```

multiplexor.c

```
/* read one input packet from the given network connection */
ssize_t read_from_link(connection* link, char* buf, unsigned int len) {
   if (link->eof) return 0;
   ssize_t nbytes = read(link->fd, buf, len);
   if (nbytes <= 0) {
      link->eof = true;
      if (link->oqhead == 0) remove_link((multiplexor*)link->mpx, link);
   }
   return nbytes;
}
```

- Wenn *poll* signalisiert hat, dass wir von einer Verbindung einlesen dürfen, dann wird der entsprechende Behandler aufgerufen, der wiederum *read_from_link* aufruft, um die Eingabe in den eigenen Puffer einzulesen.

Schreiben auf eine Verbindung

multiplexor.c

```
/* write one pending output packet to the given network connection */
static void write_to_socket(multiplexor* mpx, connection* link) {
   ssize_t nbytes = write(link->fd,
      link->oqhead->buf + link->oqhead->pos,
      link->oqhead->len - link->oqhead->pos);
   if (nbytes <= 0) {
      remove_link(mpx, link);
   } else {
      link->oqhead->pos += nbytes;
      if (link->oqhead->pos == link->oqhead->len) {
         output_queue_member* old = link->oqhead;
         link->oqhead = old->next;
         if (link->oqhead == 0) {
            link->oqtail = 0;
         }
         free(old->buf); free(old);
         if (link->oqhead == 0 && link->eof) {
            remove_link(mpx, link);
         }
      }
   }
}
```

Schreiben auf eine Verbindung

multiplexor.c

```
bool write_to_link(connection* link, char* buf, unsigned int len) {
   assert(len >= 0);
   if (len == 0) {
      free(buf); return true;
   }
   output_queue_member* member = malloc(sizeof(output_queue_member));
   if (!member) return false;
   member->buf = buf; member->len = len; member->pos = 0;
   member->next = 0;
   if (link->oqtail) {
      link->oqtail->next = member;
   } else {
      link->oqhead = member;
   }
   link->oqtail = member;
   return true;
}
```

- Diese Funktion ist von den Behandlern aufzurufen, wenn etwas auf eine der Netzwerkverbindungen auszugeben ist.
- Der Ausgabepuffer wird dann in die entsprechende Warteschlange eingereiht.

multiplexor.c

```
void close_link(connection* link) {
   link->eof = 1;
   shutdown(link->fd, SHUT_RD);
}
```

- Bei bidirektionalen Netzwerkverbindungen ist es möglich, nur eine Seite zu schließen.
- Dies geht nicht mit *close*, das sofort beide Seiten schließen würde, sondern mit *shutdown*, mit dem eine spezifizierte Seite geschlossen werden kann.
- Hier wird aus der Sicht des Aufrufers die lesendende Seite geschlossen, also die Verbindung vom Klienten zum Dienst. Danach können keine weiteren Anfragen mehr eintreffen, aber die Warteschlange der abzuarbeitenden Ausgabe-Puffer kann noch abgearbeitet werden.
- Erst wenn die Warteschlange ganz leer ist, dann wird (von *remove_link*) die Verbindung vollständig geschlossen.

multiplexor.c

```
void run_multiplexor(int socket, multiplexor_handler open_handler,
      multiplexor_handler input_handler, multiplexor_handler close_handler,
      void* mpx_handle) {
   multiplexor mpx = {
      .socket = socket, .ohandler = open_handler,
      .ihandler = input_handler, .chandler = close_handler,
      .mpx_handle = mpx_handle, .socketok = true,
   };
   int count;
   while ((count = setup_polls(&mpx)) > 0) {
      if (poll(mpx.pollfds, count, -1) <= 0) return;
      for (int index = 0; index < count; ++index) {
         if (mpx.pollfds[index].revents == 0) continue;
         int fd = mpx.pollfds[index].fd;
         if (fd == mpx.socket) {
            if (!add_connection(&mpx)) return;
         } else {
            connection* link = mpx.pollcs[index]; assert(link);
            if (mpx.pollfds[index].revents & POLLIN) {
               (*mpx.ihandler)(link);
            }
            if (mpx.pollfds[index].revents & POLLOUT) {
               write_to_socket(&mpx, link);
            }
         }
      }
   }
}
```

Nachteil dieser Ebene

- Der *input_handler* wird für jedes eingehende Paket aufgerufen.
- Da Pakete fragmentiert sein können, sind dies möglicherweise Bruchstücke einer Anfrage oder auch Teile mehrerer Anfragen.
- Entsprechend muss die Eingabe wieder gepuffert und zerlegt werden, da normalerweise eine Reaktion erst bei einer vollständig übermittelten Anfrage erfolgen sollte.
- Eine ereignisgesteuerte Behandlung wäre daher aus Anwendungssicht leichter zu programmieren, wenn sie auf vollständigen Anfragen beruhen würde.
- Die Erkennung einer vollständigen Anfrage ist im allgemeinen Fall nicht ganz trivial zu spezifizieren. Im folgenden wird eine Lösung auf Basis regulärer Ausdrücke vorgestellt, die für textbasierte Protokolle gut geeignet ist.

mpx_session.h

```
typedef void (*mpx_handler)(session* s);

int mpx_session_scan(session* s, ...);
int mpx_session_printf(session* s, const char* restrict format, ...);
void close_session(session* s);

void run_mpx_service(hostport* hp, const char* regexp,
   mpx_handler ohandler, mpx_handler rhandler, mpx_handler hhandler,
   void* global_handle);
```

- *run_mpx_service* erhält einen regulären Ausdruck, der eine Anfrage spezifiziert.
- Dieser reguläre Ausdruck darf mit Hilfe runder Klammern beliebig viele Elemente der Anfrage herausgreifen – analog zu *inbuf_scan*.
- Der *rhandler* (*request handler*) wird dann für jede vollständig vorliegende Anfrage aufgerufen und kann dann mit *mpx_session_scan* die herausgegriffenen Elemente in *stralloc*-Objekte hineinkopieren lassen.

mxprequest.h

```
#define MXP_REQUEST_RE "([a-z]+) (.*?)\r?\n"
```

mutexd.c

```
   run_mpx_service(&hp, MXP_REQUEST_RE,
      mxp_session_open, mxp_session_read, mxp_session_hangup,
      locks);
```

- Beim Aufruf von *run_mpx_service* wird der reguläre Ausdruck zum Erkennen einer Anfrage mitgegeben.

mxpsession.c

```
void mxp_session_read(session* s) {
   struct mxp_session* ms = s->handle; assert(ms);
   if (!read_mxp_request(s, &ms->request)) {
      close_session(s); return;
   }
   /* ... process request and generate response ... */
   if (!write_mxp_response(s, &ms->response)) {
      close_session(s);
   }
}
```

- Der Behandler *mxp_session_read* wird jetzt nur aufgerufen, wenn eine vollständige Anfrage vorliegt. Entsprechend sollte *read_mxp_request* eine Anfrage einlesen können.

mxprequest.c

```
bool read_mxp_request(session* s, mxp_request* request) {
   return
      mpx_session_scan(s, &request->keyword, &request->parameter) == 2;
}
```

mxresponse.c

```
/* write one (possibly partial) response to */
bool write_mxp_response(session* s, mxp_response* response) {
   return mpx_session_printf(s, "%c%.*s\r\n", response->status,
      response->message.len, response->message.s) > 0;
}
```

- Die Einlese-Operation für Anfragen und die Ausgabe-Operation für Antworten verwenden hier die entsprechenden Funktionen aus *mpx_session.h*

- Bei *socket* lässt sich *SOCK_DGRAM* als zweiter Parameter angeben.
- Der Netzwerkdienst kann dann wie gewohnt *setsockopt* und *bind* aufrufen. Der Systemaufruf *listen* fällt weg, da dieser nur bei verbindungsorientierten Sockets Anwendung findet.
- Eingehende Pakete können dann mit *recvfrom* empfangen werden, das (in Ergänzung zu *read*) auch die Absenderadresse mitliefert. Mit *sendto* ist eine Antwort an eine gegebene Adresse möglich.
- Der Klient verwendet wie gewohnt *connect* und kann dann *read* und *write* verwenden, wobei hier (falls die Buffergröße groß genug ist) vollständige Pakete gelesen und verschickt werden.

timeserver.c

```
struct sockaddr_in address = {0};
address.sin_family = AF_INET;
address.sin_addr.s_addr = htonl(INADDR_ANY);
address.sin_port = htons(PORT);
int sfd = socket(PF_INET, SOCK_DGRAM, 0);
int optval = 1;
if (sfd < 0 ||
     setsockopt(sfd, SOL_SOCKET, SO_REUSEADDR,
                &optval, sizeof optval) < 0 ||
     bind(sfd, (struct sockaddr *) &address,
          sizeof address) < 0) {
   perror("socket"); exit(1);
}
ssize_t nbytes; char buf[BUFSIZ];
struct sockaddr sender; socklen_t sender_len = sizeof(sender);
while ((nbytes = recvfrom(sfd, buf, sizeof buf, 0,
         &sender, &sender_len)) >= 0) {
   char timebuf[32]; time_t clock; time(&clock);
   ctime_r(&clock, timebuf, sizeof timebuf);
   sendto(sfd, timebuf, strlen(timebuf), 0,
      &sender, sender_len);
}
```

timeserver.c

```
ssize_t nbytes; char buf[BUFSIZ];
struct sockaddr sender; socklen_t sender_len = sizeof(sender);
while ((nbytes = recvfrom(sfd, buf, sizeof buf, 0,
         &sender, &sender_len)) >= 0) {
   /* ... */
}
```

Im Vergleich zu *read* erwartet *recvfrom* drei weitere Parameter:

- **int** *flags*
  normalerweise 0, der Standard nennt *MSG_PEEK* (Nachricht nicht verkonsumieren), *MSG_OOB* (*out of band*) und *MSG_WAITALL* (Nachricht muss vollständig vorliegen)
- **struct** *sockaddr∗ restrict address*
  Zeiger auf den Puffer für die Absenderadresse, darf 0 sein
- *socklen_t∗ restrict address_len*
  Zeiger auf eine Variable mit der Länge von *address*, die aktualisiert wird mit der tatsächlichen Länge der Absenderadresse.

timeclient.c

```
int fd;
if ((fd = socket(PF_INET, SOCK_DGRAM, 0)) < 0) {
   perror("socket"); exit(1);
}
if (connect(fd, (struct sockaddr *) &addr, sizeof addr) < 0) {
   perror("connect"); exit(1);
}
char buffer[BUFSIZ]; ssize_t nbytes;
/* send an empty packet */
if (write(fd, buffer, 0) < 0) {
   perror("write"); exit(1);
}
/* receive response */
if ((nbytes = read(fd, buffer, sizeof buffer)) > 0) {
   write(1, buffer, nbytes);
} else {
   perror("read"); exit(1);
}
```

Verbindungslosigkeit bei UDP

- Bei TCP bzw. *SOCK_STREAM* erfolgte implizit bereits ein Austausch von Paketen durch die Systemaufrufe *listen* und *connect*.
- Bei UDP bzw. *SOCK_DGRAM* fällt dies weg. Der Systemaufruf *connect* hat hier nur die Funktion, dass eine Socket fest mit einer Adresse verbunden wird, d.h. es kann anschließend wie gewohnt *read* und *write* verwendet werden ohne eine weitere Spezifikation der Adresse.
- Wenn *connect* wegfällt, muss die Adresse beim Paketversand immer angegeben werden.
- Da *connect* bei *SOCK_DGRAM* noch nicht zum Austausch von Paketen führt, kann zu diesem Zeitpunkt noch nicht festgestellt werden, ob die Gegenseite den Dienst überhaupt anbietet. Das stellt sich erst (mit etwas Glück) bei einem anschließenden *write* heraus.
- Anders als bei TCP bzw. *SOCK_STREAM* kann das Versenden leerer Pakete sinnvoll sein.

Fehlende Verlässlichkeit bei UDP

timeclient2.c

```
/* receive response */
struct pollfd pollfds[1] = { {.fd = fd, .events = POLLIN} };
unsigned int attempts = 0;
while (attempts < 10 &&
      poll(pollfds, 1, 100 /* milliseconds */) == 0) {
   ++attempts;
   /* resend package */
   if (send(fd, buffer, 0, 0) < 0) {
      perror("send"); exit(1);
   }
}
if (attempts < 10) {
   if ((nbytes = recv(fd, buffer, sizeof buffer, 0)) > 0) {
      write(1, buffer, nbytes);
   } else {
      perror("recv");
   }
}
```

- UDP-Pakete können verloren gehen. Entsprechend sollte damit gerechnet werden, dass keine Antwort auf eine Anfrage eingeht. Entsprechend ist es sinnvoll, mehrere Versuche einzuplanen.

- Neben *AF_INET* und *AF_INET6* wird durch den POSIX-Standard auch noch *AF_UNIX* genannt.
- *PF_UNIX* bzw. *AF_UNIX* stehen für UNIX-Domain-Sockets.
- Ähnlich zu den Pipes bieten sie eine Interprozess-Kommunikation innerhalb eines Rechners auf Basis der BSD-Socket-Schnittstelle an.
- Anders als Pipes sind sie bidirektional.
- Als Adresse wird ein Dateiname verwendet. Eine Socket-Datei wird durch einen entsprechenden *bind*-Systemaufruf implizit erzeugt. Die Datei wird aber nicht automatisch entfernt, wenn der Dienst endet.
- Das Dateisystem kann hier den Zugriffsschutz übernehmen.

- Für UNIX-Domain-Sockets gibt es aus **#include** <sys/un.h> die Datenstruktur **struct** *sockaddr_un* mit folgenden Komponenten:

sa_family_t sun_family	Adressfamilie, hier immer *AF_UNIX*
char *sun_path*[]	Pfadname der Socket-Datei

- Die maximale Länge des Pfadnamens ist sehr begrenzt, typischerweise liegt das Limit bei ca. 100 Bytes.
- Bei *bind* kann ein Zeiger auf eine entsprechende Datenstruktur übergeben werden.
- Noch einfacher ist es, die Funktion *parse_hostport* entsprechend zu erweitern, so dass auch Pfadnamen unterstützt werden.

UNIX-Domain-Sockets können alternativ zu Pipes verwendet werden:

- Statt *pipe* ist *socketpair* zu verwenden, das analog zwei miteinander verbundene Sockets mit einem Systemaufruf erzeugt:

```
int sfds[2];
if (socketpair(PF_UNIX, SOCK_SEQPACKET, 0, sfds) < 0) {
   /* failure ... */
}
```

- Typischerweise unterstützt *socketpair* ausschließlich UNIX-Domain-Sockets. Statt *SOCK_SEQPACKET* kann natürlich auch *SOCK_STREAM* oder *SOCK_DGRAM* verwendet werden, wobei letzteres keine Vorteile bietet.
- Wie bei Pipes sollte jede Seite nur ein Ende verwenden und das andere schließen. Anders als bei Pipes sind beide Enden voll bidirektional.
- Über UNIX-Domain-Sockets können auch geöffnete Dateideskriptoren versandt werden...

Grundsätzlich können bei Sockets statt *write* und *read* die allgemeineren Systemaufrufe *sendmsg* und *recvmsg* verwendet werden:

- *ssize_t sendmsg*(**int** *socket*, **const struct** *msghdr* ∗*message*, **int** *flags*);
- Die Datenstruktur **struct** *msghdr* bietet folgende Komponenten:

void∗ *msg_name*	Adresse (optional)
socklen_t msg_namelen	Länge der Adresse
struct *iovec*∗ *msg_iov*	Array mit I/O-Puffern
int *msg_iovlen*	Länge des Arrays
void∗ *msg_control*	Zusatzdaten
socklen_t msg_controllen	Länge der Zusatzdaten
int *msg_flags*	Flags bei empfangenen Nachrichten

Optional können Zusatzdaten beigefügt werden. Diese Daten werden beidseits inhaltlich interpretiert. Die wichtigste (und wohl einzige portable) Anwendung ist für die Übertragung von Dateideskriptoren:

- Zusatzdaten bestehen aus mehreren hintereinander liegenden Datenbereichen, bei der jeder Bereich mit der Header-Datenstruktur **struct** *cmsghdr* beginnt.
- Header-Datenstruktur:

socklen_t cmsg_len	Länge der Zusatzdaten einschließlich des Headers
int *cmsg_level*	Protokollebene
int *cmsg_type*	Art der Zusatzdaten

- Für Dateideskriptoren sollte *cmsg_level* auf *SOL_SOCKET* und *cmsg_type* auf *SCM_RIGHTS* gesetzt werden.

Versand eines Dateideskriptors

sendfd.c

```
struct fd_cmsg {
   struct cmsghdr cm;
   int fd;
};

ssize_t send_fd_and_message(int sfd, int fd, void* buf, size_t buflen) {
   struct fd_cmsg cmsg = {
      .cm = {
         .cmsg_len = sizeof cmsg,
         .cmsg_level = SOL_SOCKET,
         .cmsg_type = SCM_RIGHTS
      },
      .fd = fd
   };
   struct iovec iovec[1] = {
      {
         .iov_base = buf,
         .iov_len = buflen
      }
   };
   struct msghdr msg = {
      .msg_iov = iovec,
      .msg_iovlen = sizeof(iovec)/sizeof(iovec[0]),
      .msg_control = &cmsg.cm,
      .msg_controllen = sizeof cmsg,
   };
   return sendmsg(sfd, &msg, /* flags = */ 0);
}
```

Empfang eines Dateideskriptors

sendfd.c

```
ssize_t recv_fd_and_message(int sfd, int* fd_ptr, void* buf, size_t buflen) {
   struct fd_cmsg cmsg = {{0}};
   struct iovec iovec[1] = {
      {
         .iov_base = buf,
         .iov_len = buflen
      }
   };
   struct msghdr msg = {
      .msg_iov = iovec,
      .msg_iovlen = sizeof(iovec)/sizeof(iovec[0]),
      .msg_control = &cmsg.cm,
      .msg_controllen = sizeof cmsg,
   };
   ssize_t nbytes = recvmsg(sfd, &msg, MSG_WAITALL);
   if (nbytes < 0) return -1;
   if (fd_ptr) *fd_ptr = cmsg.fd;
   return nbytes;
}
```

hostport.c

```
bool parse_hostport(char* input, hostport* hp, in_port_t defaultport) {
   if (input[0] == '/' || input[0] == '.') {
      /* special case: UNIX domain socket */
      hp->domain = PF_UNIX;
      hp->protocol = 0;
      struct sockaddr_un* sp = (struct sockaddr_un*) &hp->addr;
      sp->sun_family = AF_UNIX;
      strncpy(sp->sun_path, input, sizeof sp->sun_path);
      hp->namelen = sizeof(struct sockaddr_un);
      return true;
   }
   // regular hostports ...
}
```

- Wegen der objekt-orientierten Socket-Schnittstelle genügt eine entsprechende Erweiterung der *parse_hostport*-Funktion, um UNIX-Domain-Sockets zu unterstützen.

```
thales$ ls
MXP             lockmanager.o  mxprequest.c   mxpresponse.h  mxpsession.o
Makefile        mutexd         mxprequest.h   mxpresponse.o
lockmanager.c   mutexd.c       mxprequest.o   mxpsession.c
lockmanager.h   mutexd.o       mxpresponse.c  mxpsession.h
thales$ mutexd ./socket &
[1] 3000
thales$ ls -l socket
srwxrwxr-x 1 borchert sai 0 Jul  6 13:42 socket
thales$ cd ../connect
thales$ connect ../mutexd-multiplexed/socket
S
id Andreas
Swelcome
quit
thales$
```

- Für interaktiv nutzbare Netzwerkdienste stand *telnet* zur Verfügung. Dieser lässt sich aber nicht für UNIX-Domain-Sockets verwenden.
- Entsprechend wird ein verallgemeinerter Ansatz namens *connect* benötigt...

connect.c

```
int main(int argc, char** argv) {
   char* cmdname = *argv++; --argc;
   if (argc != 1) {
      fprintf(stderr, "Usage: %s hostport\n", cmdname);
      exit(1);
   }
   char* hostport_string = *argv++; --argc;
   hostport hp;
   if (!parse_hostport(hostport_string, &hp, 0)) {
      fprintf(stderr, "%s: invalid hostport: %s\n", cmdname,
         hostport_string);
      exit(1);
   }
   int sfd = socket(hp.domain, SOCK_STREAM, hp.protocol);
   if (sfd < 0) {
      perror("socket"); exit(1);
   }
   if (connect(sfd, (struct sockaddr*) &hp.addr, hp.namelen) < 0) {
      perror(hostport_string); exit(1);
   }
   // ...
}
```

connect.c

```
struct pollfd fds[] = {
   {sfd, POLLIN, 0}, /* wait for input from the socket */
   {0, POLLIN, 0}, /* wait for input from stdin */
};
char buf[BUFSIZ];
while (poll(fds, sizeof(fds)/sizeof(fds[0]), -1) > 0) {
   for (int index = 0; index < sizeof(fds)/sizeof(fds[0]); ++index) {
      if (fds[index].revents) {
         ssize_t nbytes = read(fds[index].fd, buf, sizeof buf);
         if (nbytes < 0) { perror("read"); exit(1); }
         if (nbytes == 0) exit(0);
         int outfd = (index == 0? 1: sfd);
         size_t written = 0;
         while (written < nbytes) {
            ssize_t outbytes = write(outfd,
               buf + written, nbytes - written);
            if (outbytes < 0) {
               perror("write"); exit(1);
            }
            written += outbytes;
         }
      }
   }
}
```

Lokale Alternativen zu Sockets

Es gibt zahlreiche Techniken zur lokalen Kommunikation und Synchronisation:

- *pipe*: unidirektional, Prozesse müssen miteinander verwandt sein.
- Benannte Pipes: über das Dateisystem, die Pipe-Datei muss explizit angelegt werden.
- UNIX-Domain-Sockets: bidirektional, deutlich einfacher im Vergleich zu benannten Pipes.
- Message Queues mit *msgsnd*, *msgrcv* etc. – sehr unhandlich wie alle System-V-IPC-Mechanismen
- Gemeinsame Speicherbereiche mit *mmap* – da fehlt noch die Synchronisierung...

- Speicherbereiche können auch von nicht miteinander verwandten Prozessen gemeinsam genutzt werden.
- Hierzu genügt es, mit *mmap* eine Datei in den eigenen Speicherbereich abzubilden.
- Vorteil: Das Hin- und Herkopieren kann minimiert werden.
- Nachteile:
  - Die Größe des gemeinsamen Speicherbereichs wird zu Beginn festgelegt. Dieser kann später nicht wachsen.
  - Die Synchronisierung muss auf irgendeine andere Weise erreicht werden.

Zur Synchronisation von Prozessen auf dem gleichen Rechner bieten sich u.a. folgende Techniken an:

- Über das Dateisystem, etwa mit *link* (siehe erstes *mutexd*-Beispiel) oder mit *flock*. Nachteil: Wie warten wir darauf, dass uns der Partner etwas mitgeteilt hat?
- Semaphores aus dem System-V-IPC-Mechanismen (ebenso sehr unhandlich). Nachteil wie oben.
- Andere Kommunikation mit impliziter Synchronisierung
- Mutex- und Bedingungsvariablen der POSIX-Threads-Schnittstelle

Letzteres ist vielleicht überraschend. Interessanterweise können Mutex- und Bedingungsvariablen der POSIX-Threads-Schnittstelle auch von mehreren Prozessen mit Hilfe gemeinsamer Speicherbereiche genutzt werden.

POSIX-Mutex-Variablen


```
#include <pthread.h>
// ...
Mutex* mutex; // zeigt in gemeinsamen Speicher
// ...
pthread_mutexattr_t mxattr;
pthread_mutexattr_init(&mxattr);
CHECK(pthread_mutexattr_setpshared, &mxattr, PTHREAD_PROCESS_SHARED);
CHECK(pthread_mutex_init, mutex, &mxattr);
pthread_mutexattr_destroy(&mxattr);
```

- Mit Hilfe von Mutex-Variablen können mehrere Parteien sichergehen, dass nur ein Prozess zu einer Ressource hat.
- Eine Mutex-Variable wird mit *pthread_mutex_init* initialisiert. *CHECK* ist hier ein Makro, das auf Fehler reagiert.
- Als einziges Attribut wird hier *PTHREAD_PROCESS_SHARED* gesetzt. Dies muss gesetzt sein, wenn die Mutex-Variable von mehreren Prozessen gemeinsam genutzt wird.
- Mit *pthread_mutex_destroy* wird sie wieder freigegeben.

```
pthread_mutex_destroy(mutex);
```

POSIX-Mutex-Variable: Lock


```
CHECK(pthread_mutex_lock, mutex);
```

- Durch den Aufruf von *pthread_mutex_lock* wird der Aufrufer blockiert, bis die Mutex-Variable frei ist.
- Danach ist sie vom Aufrufer belegt, bis sie mit *pthread_mutex_unlock* wieder freigegeben wird.

```
CHECK(pthread_mutex_unlock, mutex);
```

```
pthread_cond_t* condition; // zeigt auf gemeinsamen Speicher

pthread_condattr_t condattr;
pthread_condattr_init(&condattr);
CHECK(pthread_condattr_setpshared, &condattr, PTHREAD_PROCESS_SHARED);
CHECK(pthread_cond_init, condition, &condattr);
pthread_condattr_destroy(&condattr);
```

- Bedingungsvariablen erlauben es, auf ein Ereignis zu warten, das durch eine andere Partei signalisiert wird.
- Hier ist ebenso bei der Initialisierung wichtig, dass das Attribut *PTHREAD_PROCESS_SHARED* gesetzt wird.
- Die Freigabe erfolgt mit *pthread_cond_destroy*.

```
pthread_cond_destroy(condition);
```

```
CHECK(pthread_cond_wait, condition, mutex);
```

- Die Operation *pthread_cond_wait* erfolgt immer in Verbindung mit einer Mutex-Variablen, die bereits mit *pthread_mutex_lock* reserviert sein muss.
- In einer atomaren Operation wird dann die Mutex-Variable freigegeben und der aufrufende Prozess (bzw. Thread) in die zugehörige Warteschlange eingereiht.
- Mit *pthread_cond_signal* weckt einen Prozess aus der Warteschlange auf (falls vorhanden). Alternativ gibt es auch die Operation *pthread_cond_broadcast*, mit der alle aus der Warteschlange aufgeweckt werden.

```
CHECK(pthread_cond_signal, condition);
```