
Betriebssysteme (BS)

07. Interprozesskommunikation

<https://sys.cs.tu-dortmund.de/de/lehre/ss24/bs>

27.05.2024

Peter Ulbrich

peter.ulbrich@tu-dortmund.de
bs-problems@ls12.cs.tu-dortmund.de

In Teilen basierend auf *Betriebssysteme* von Olaf Spinczyk, Universität Osnabrück

Wiederholung

- Prozesse können miteinander interagieren
 - Aufeinander warten (**Synchronisation**)
 - Daten austauschen (**Kommunikation**)
- Wartemechanismen ...
 - sind notwendig für kontrollierte Kommunikation
 - können zu Verklemmungen führen
- Datenaustausch wurde bisher nur am Rande betrachtet
 - Leicht- und federgewichtige Prozesse im selben Adressraum

Inhalt

- Grundlagen der Interprozesskommunikation
- Lokale Interprozesskommunikation unter UNIX
 - Signale
 - *Pipes*
 - *Message Queues*
- Rechnerübergreifende Interprozesskommunikation
 - *Sockets*
 - Entfernte Prozeduraufrufe (RPCs)
- Zusammenfassung

Tanenbaum

2.3: Interprozesskommunikation

Silberschatz

3.4: Interprocess Communication

Interprozesskommunikation

Inter-Process Communication (IPC)

- **Mehrere Prozesse bearbeiten eine Aufgabe:**
 - gleichzeitiges Nutzung von zur Verfügung stehender Information durch mehrere Prozesse
 - Verkürzung der Bearbeitungszeit durch Parallelisierung
 - Verbergen von Bearbeitungszeiten durch Ausführung „im Hintergrund“
- **Kommunikation durch gemeinsamen Speicher**
 - Datenaustausch nebenläufiges Schreiben in bzw. Lesen aus einem gemeinsamen Speicher
 - Dabei muss auf Synchronisation geachtet werden.
- **Heute: Kommunikation durch Nachrichten**
 - Nachrichten werden zwischen Prozessen ausgetauscht
 - Gemeinsamer Speicher ist nicht erforderlich

Nachrichtenbasierte Kommunikation

- ... basiert auf zwei Primitiven:

send (*Ziel, Nachricht*)

receive (*Quelle, Nachricht*)

(oder ähnlich)

- Unterschiede gibt es in ...
 - Synchronisation
 - Adressierung
 - und diversen anderen Eigenschaften

Synchronisation

... bei nachrichtenbasierter Kommunikation

■ Synchronisation bei Senden / Empfangen

- **Synchroner Nachrichtenaustausch** (auch Rendezvous)
 - Empfänger blockiert bis die Nachricht eingetroffen ist.
 - Sender blockiert bis die Ankunft der Nachricht bestätigt ist.
- **Asynchroner Nachrichtenaustausch**
 - Sender gibt die Nachricht dem Betriebssystem und arbeitet weiter
 - Blockierung auf beiden Seiten optional
 - Pufferung immer erforderlich

■ Häufig anzutreffen:

- **Asynchroner** Nachrichtenaustausch
mit **potenziell blockierendem** Senden und Empfangen

Adressierung

... bei nachrichtenbasierter Kommunikation

■ Direkte Adressierung

- Prozess-ID (Signale)
- Kommunikationsendpunkt eines Prozesses (*Port, Socket*)

■ Indirekte Adressierung

- Kanäle (*Pipes*)
- Briefkästen (*Mailboxes*), Nachrichtenpuffer (*Message Queues*)

■ Zusätzliche Dimension: **Gruppenadressierung**

- **Unicast** – an genau einen
- **Multicast** – an eine Auswahl
- **Broadcast** – an alle

Diverse andere Eigenschaften

... bei nachrichtenbasierter Kommunikation

■ Nachrichtenformat

- Stromorientiert / nachrichtenorientiert
- Feste Länge / variable Länge
- Getypt / ungetypt

■ Übertragung

- Unidirektional / Bidirektional (halb-duplex, voll-duplex)
- zuverlässig / unzuverlässig
- Reihenfolge bleibt erhalten / nicht erhalten

Inhalt

- Grundlagen der Interprozesskommunikation
- **Lokale Interprozesskommunikation unter UNIX**
 - Signale
 - *Pipes*
 - *Message Queues*
- Rechnerübergreifende Interprozesskommunikation
 - *Sockets*
 - Entfernte Prozeduraufrufe (RPCs)
- Zusammenfassung

UNIX-Signale

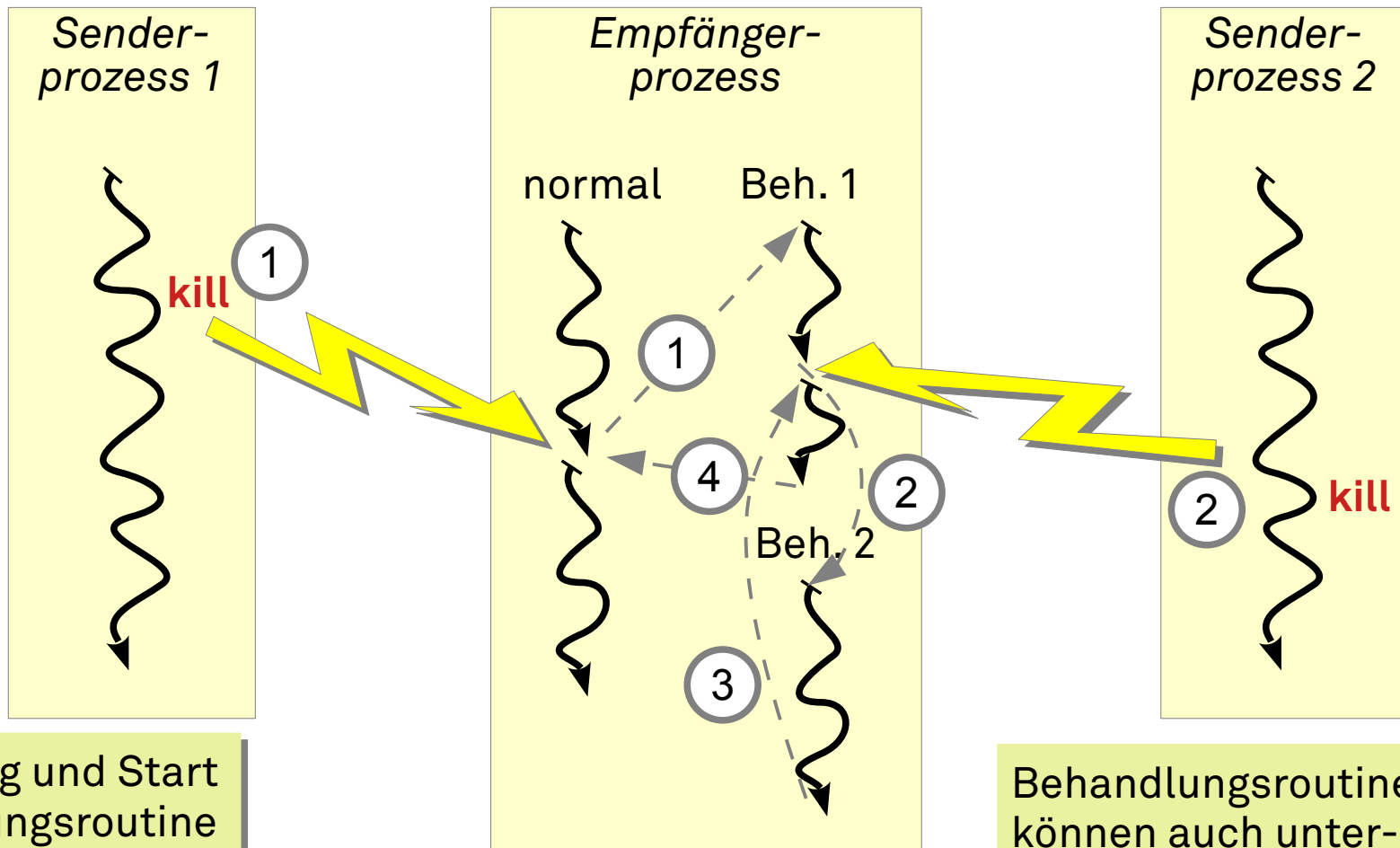
- Signale sind in Software **nachgebildete Unterbrechungen**
 - ähnlich denen eines Prozessors durch E/A-Geräte
 - minimale Form der Interprozesskommunikation (Übertragung der Signalnummer)
- **Sender**
 - Prozesse ... mit Hilfe des Systemaufrufs **kill(2)**
 - Betriebssystem ... bei Auftreten bestimmter Ereignisse
- **Empfänger**-Prozess führt Signalbehandlung durch:
 - *Ignorieren*,
 - Terminierung des Prozesses oder
 - Aufruf einer **Behandlungsfunktion**
 - Nach der Behandlung läuft Prozess an unterbrochener Stelle weiter.

Signale

- Mit Hilfe von Signalen können Prozesse über Ausnahmesituation informiert werden
 - ähnlich wie Hardwareunterbrechungen
- Beispiele:
 - **SIGINT** Prozess abbrechen (z.B. bei **Ctrl-C**)
 - **SIGSTOP** Prozess anhalten (z.B. bei **Ctrl-Z**)
 - **SIGWINCH** Fenstergröße wurde geändert
 - **SIGCHLD** Kindprozess terminiert
 - **SIGSEGV** Speicherschutzverletzung des Prozesses
 - **SIGKILL** Prozess wird getötet
 - ...
- Die **Standardbehandlung** (terminieren, anhalten, ...) kann für die meisten Signale überdefiniert werden.
 - siehe **signal(2)**

UNIX-Signale: Logische Sicht

Hollywood-Prinzip: *Don't call us, we'll call you.*



Signalisierung und Start der Behandlungsroutine erfolgen in der logischen Sicht gleichzeitig.

Behandlungsroutinen können auch unterbrochen werden.

UNIX-Signale: Technische Sicht

- Die Signalbehandlung erfolgt immer beim Übergang vom Kernel in der User Mode.
- Was passiert also wirklich, wenn der Zielprozess gerade ...
 - läuft, also im Zustand **RUNNING** ist (z.B. Segmentation Fault, Bus Error)?
 - **Unmittelbarer Start** der Behandlungsroutine
 - gerade nicht läuft, aber **READY** ist (z.B. Systemaufruf kill)?
 - Im Prozesskontrollblock wird das **Signal vermerkt**.
 - Wenn der Prozess die CPU zugeteilt bekommt, erfolgt die Behandlung.
 - auf E/A wartet, also **BLOCKED** ist?
 - Der E/A-Systemaufruf (z.B. read) wird mit Fehlercode EINTR **abgebrochen**.
 - Der Prozesszustand wird auf **READY** gesetzt.
 - Danach wie bei 2.
 - Ggf. wird der unterbrochene Systemaufruf neu ausgeführt (SA_RESTART).

UNIX-Signale: Beispiel

Auszug aus dem Handbuch des *Apache* HTTP-Servers

Stopping and Restarting Apache

To send a signal to the parent you should issue a command such as:

```
kill -TERM `cat /usr/local/apache/logs/httpd.pid`
```

TERM Signal: stop now

Sending the TERM signal to the parent causes it to immediately attempt to **kill off all of its children**. It may take it several seconds to complete killing off its children. Then the **parent itself exits**. Any requests in progress are terminated, and no further requests are served.

HUP Signal: restart now

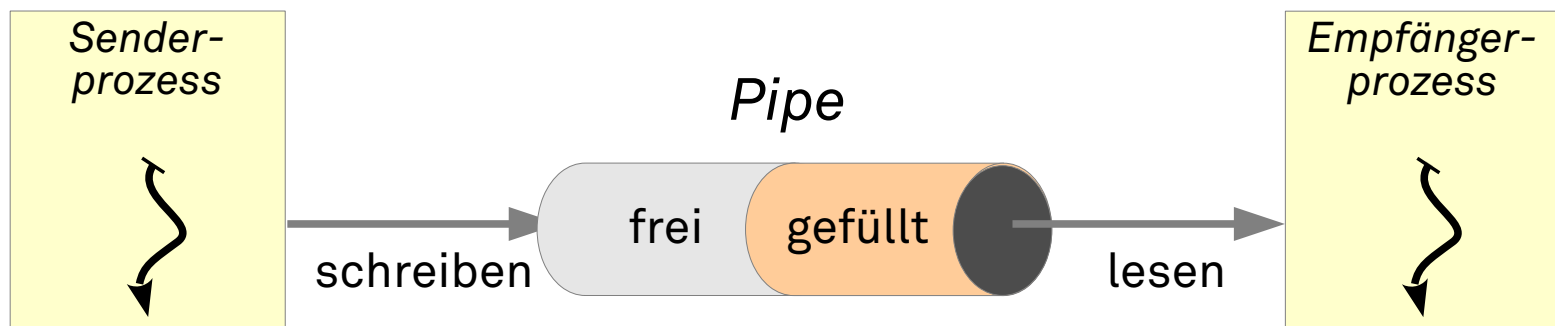
Sending the HUP signal to the parent causes it to **kill off its children** like in TERM but the **parent doesn't exit**. It **re-reads its configuration files**, and **re-opens any log files**. Then it spawns a new set of children and continues serving hits.

USR1 Signal: graceful restart

The USR1 signal causes the parent process to **advise the children to exit** after their current request (or to exit immediately if they're not serving anything). The parent **re-reads its configuration files** and **re-opens its log files**. As each child dies off the parent replaces it with a child from the new generation of the configuration, which begins serving new requests immediately.

UNIX Pipes

- **Kanal** zwischen zwei Kommunikationspartnern
 - unidirektional
 - gepuffert (feste Puffergröße)
 - zuverlässig
 - stromorientiert
- Operationen: **Schreiben** und **Lesen**
 - Ordnung der Zeichen bleibt erhalten (Zeichenstrom)
 - Blockierung bei voller *Pipe* (Schreiben) und leerer *Pipe* (Lesen)



UNIX *Pipes*: Programmierung

■ Unbenannte Pipes

- Erzeugen einer Pipe: `int pipe (int fdes[2])`
- Nach erfolgreichem Aufruf (Rückgabewert == 0) kann man ...
 - über `fdes[0]` aus der Pipe lesen (Systemaufruf `read`)
 - über `fdes[1]` in die Pipe schreiben (Systemaufruf `write`)
- Nun muss man nur noch das eine Ende an einen anderen Prozess weitergeben. (siehe nächste Folie)

■ Benannte Pipes

- Pipes können auch als **Spezialdateien ins Dateisystem** gelegt werden:
`int mkfifo (<Dateiname>, mode_t mode)`
- Standardfunktionen zum Öffnen, Lesen, Schreiben und Schließen können dann verwendet werden.
 - Normale Dateizugriffsrechte regeln, wer die Pipe benutzen darf.

UNIX Pipes: Programmierung

```

■ U enum { READ=0, WRITE=1 };

int main (int argc, char *argv[]) {
    int res, fd[2];
    if (pipe (fd) == 0) {           /* Pipe erzeugen */
        res = fork ();
        if (res > 0) {             /* Elternprozess */
            close (fd[READ]);      /* Leseseite schließen */
            dup2 (fd[WRITE], 1);   /* Std-Ausgabe in Pipe */
            close (fd[WRITE]);     /* Deskriptor freigeben */
            execlp (argv[1], argv[1], NULL); /* Schreiber ausführen */
        }
        else if (res == 0) {       /* Kindprozess */
            close (fd[WRITE]);     /* Schreibseite schließen */
            dup2 (fd[READ], 0);    /* Std-Eingabe aus Pipe */
            close (fd[READ]);      /* Deskriptor freigeben */
            execlp (argv[2], argv[2], NULL); /* Leser ausführen */
        }
        ...Fehler behandeln
    }
}

```

en.

UNIX Pipes: Programmierung

```
enum { READ=0, WRITE=1 };

int main (int argc, char *argv[]) {
    int res, fd[2];
    if (pipe (fd) == 0) { /* Pipe er...
```

„./connect ls wc“ entspricht dem Shell-Kommando „ls|wc“

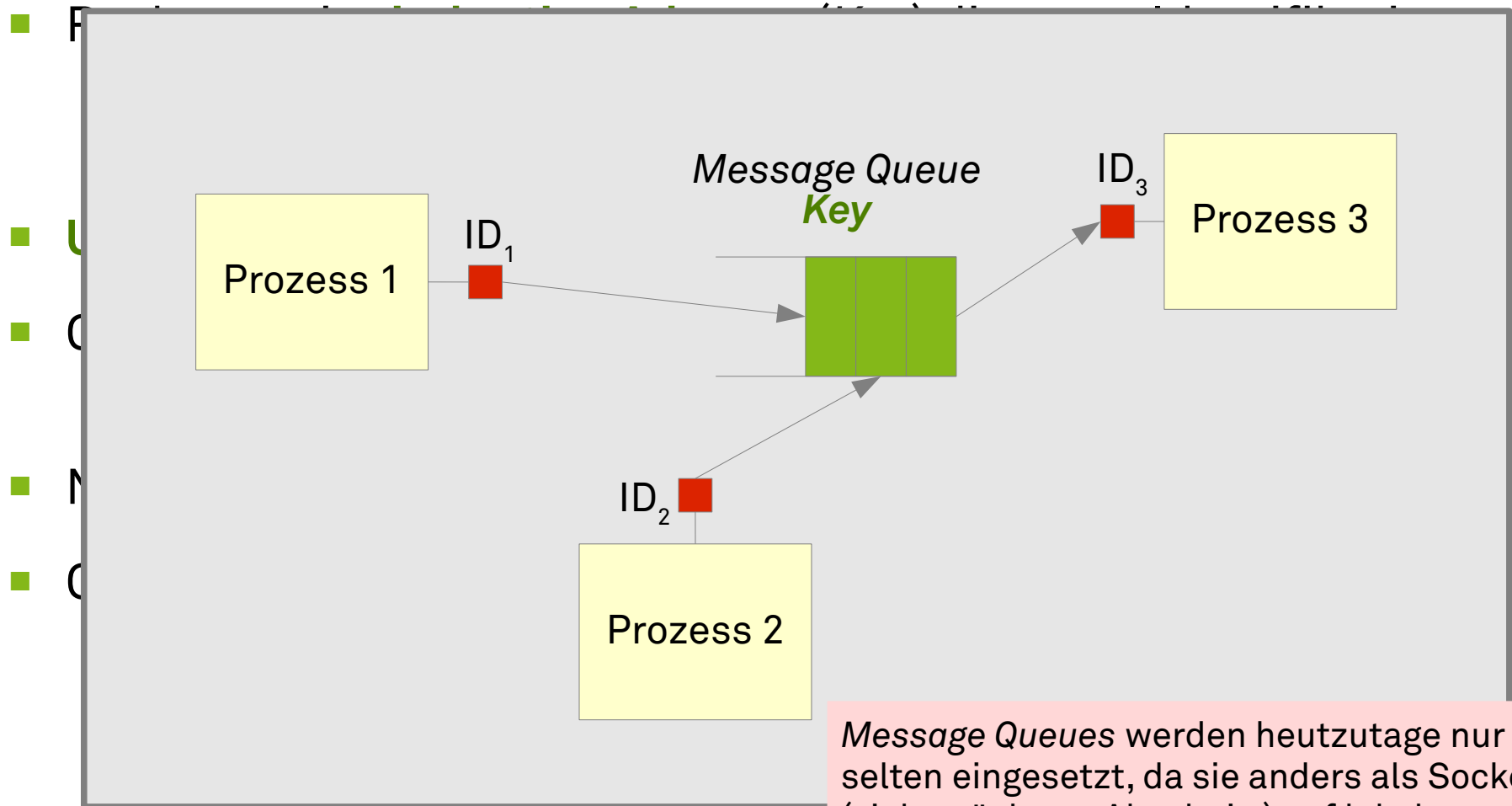
```
ulbrich@kos:~/V_BS/vorlesung/code> ls
connect connect.c execl.c fork.c orphan.c wait.c
ulbrich@kos:~/V_BS/vorlesung/code> ./connect ls wc
6 6 49
```

```
close (fd[WRITE]); /* Schreibseite schließen */
dup2 (fd[READ], 0); /* Std-Eingabe aus Pipe */
close (fd[READ]); /* Deskriptor freigeben */
execlp (argv[2], argv[2], NULL); /* Leser ausführen */
}
}
...Fehler behandeln
}
```

UNIX *Message Queues*

- Rechnerweit **eindeutige Adresse** (*Key*) dient zur Identifikation
 - Zugriffsrechte wie auf Dateien
 - Prozesslokale Nummer (*MsqID*) wird bei allen Operationen benötigt
- **Ungerichtete M:N-Kommunikation**
- Gepuffert
 - einstellbare Größe pro *Queue*
- Nachrichten haben einen Typ (long-Wert)
- Operationen zum Senden und Empfangen einer Nachricht
 - blockierend — nicht-blockierend (aber nicht asynchron)
 - Empfang aller Nachrichten — nur ein bestimmter Typ

UNIX Message Queues



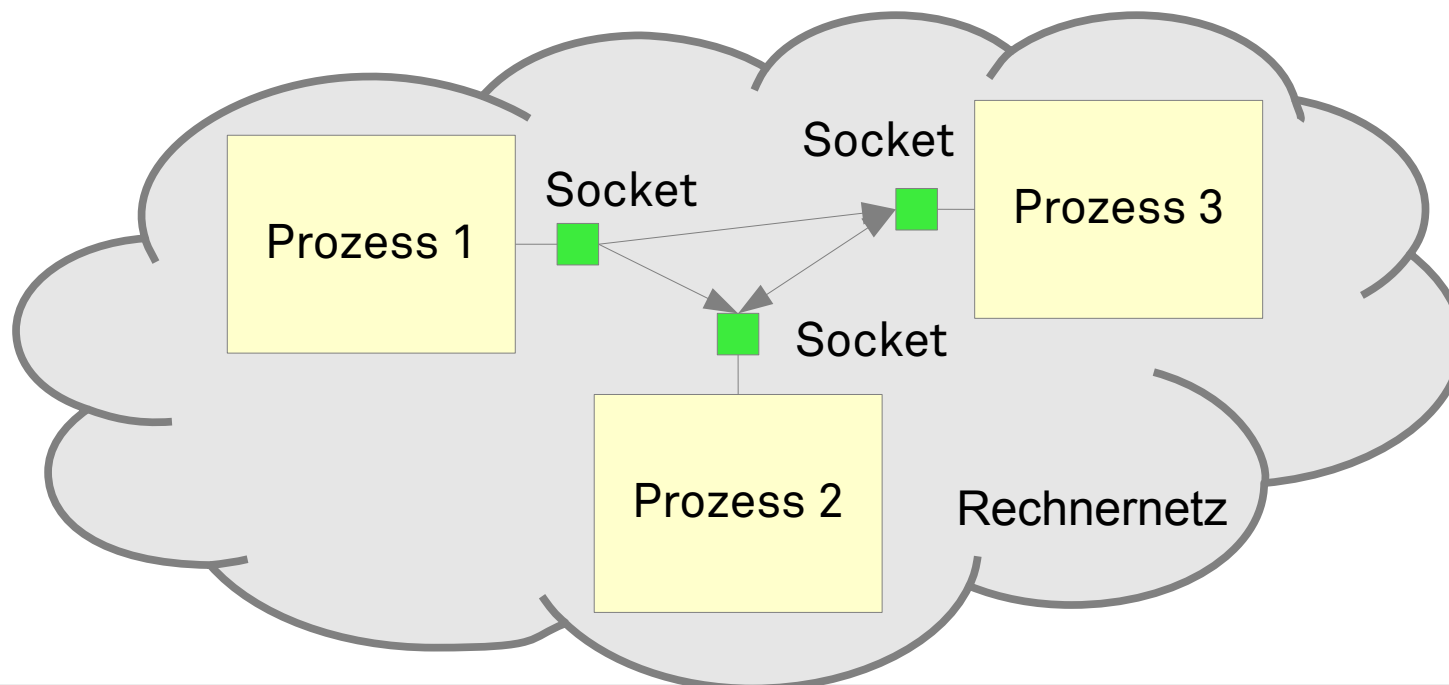
Message Queues werden heutzutage nur noch selten eingesetzt, da sie anders als Sockets (siehe nächster Abschnitt) auf lokale Kommunikation beschränkt sind. Zudem ist der Anwendungscode weniger portabel.

Inhalt

- Grundlagen der Interprozesskommunikation
- Lokale Interprozesskommunikation unter UNIX
 - Signale
 - *Pipes*
 - *Message Queues*
- **Rechnerübergreifende Interprozesskommunikation**
 - *Sockets*
 - Entfernte Prozeduraufrufe (RPCs)
- Zusammenfassung

Sockets

- Allgemeine **Kommunikationsendpunkte** im Rechnernetz
 - Bidirektional
 - Gepuffert
- Abstrahiert von Details des Kommunikationssystems
 - Beschrieben durch **Domäne** (Protokollfamilie), **Typ und Protokoll**



Sockets: Domänen

■ **UNIX Domain**

- UNIX *Domain Sockets* verhalten sich wie bidirektionale *Pipes*.
- Anlage als Spezialdatei im Dateisystem möglich.

■ **Internet Domain**

- Dienen der rechnerübergreifenden Kommunikation mit Internet-Protokollen

■ **Appletalk Domain, DECnet Domain, ...**

■ **Domänen bestimmen mögliche Protokolle**

- z.B. Internet *Domain*: TCP/IP oder UDP/IP

■ **Domänen bestimmen die Adressfamilie**

- z.B. Internet *Domain*: **IP-Adresse** und *Port*-Nummer

Sockets: Typ und Protokoll

- Die wichtigsten **Sockettypen**:
 - stromorientiert, verbindungsorientiert und gesichert
 - nachrichtenorientiert und ungesichert
 - nachrichtenorientiert und gesichert

- **Protokolle** der Internet Domain:
 - **TCP/IP Protokoll**
 - strom- und verbindungsorientiert, gesichert
 - **UDP/IP Protokoll**
 - nachrichtenorientiert, verbindungslos, ungesichert
 - Nachrichten können verloren oder dupliziert werden
 - Reihenfolge kann durcheinander geraten
 - Paketgrenzen bleiben erhalten (Datagramm-Protokoll)

- **Protokollangabe ist oft redundant**

Sockets: Programmierung

■ Anlegen von Sockets

- Generieren eines Sockets mit (Rückgabewert ist ein Filedeskriptor)

```
int socket (int domain, int type, int proto);
```

- Adresszuteilung

- Sockets werden ohne Adresse generiert
- Adressenzuteilung erfolgt durch:

```
int bind (int socket,
         const struct sockaddr *address,
         socklen_t address_len);
```

- struct sockaddr_in (für die Internet-Adressfamilie) enthält:

```
sin_family: AF_INET
sin_port:   16-Bit-Portnummer
sin_addr:   Struktur mit der IP-Adresse,
            z.B. 192.168.2.1
```

Hinweis: Für IPv6 gibt es
sockaddr_in6 und AF_INET6

Sockets: Programmierung

■ *Datagram Sockets*

- Kein Verbindungsaufbau notwendig
- **Datagramm senden**

```
ssize_t sendto (int socket, const void *message,  
               size_t length, int flags,  
               const struct sockaddr *dest_addr,  
               socklen_t dest_len);
```

- **Datagramm empfangen**

```
ssize_t recvfrom (int socket, void *buffer,  
                 size_t length, int flags,  
                 struct sockaddr *address,  
                 socklen_t *address_len);
```

Sockets: Programmierung

■ Stream Sockets

- Verbindungsaufbau notwendig
- Client (Benutzer, Benutzerprogramm) will zu einem Server (Dienstanbieter) eine Kommunikationsverbindung aufbauen

■ Client: Verbindungsaufbau bei stromorientierten Sockets

- Verbinden des Sockets mit

```
int connect (int socket,  
            const struct sockaddr *address,  
            socklen_t address_len);
```

- Senden und Empfangen mit `write` und `read` (oder `send` und `recv`)
- Beenden der Verbindung mit `close` (schließt den Socket)

Sockets: Programmierung

■ Server: akzeptiert Anfragen/Aufträge

- bindet *Socket* an eine Adresse (sonst nicht erreichbar)
- bereitet *Socket* auf Verbindungsanforderungen vor durch

```
int listen (int s, int queue len);
```

- akzeptiert einzelne Verbindungsanforderungen durch

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

- gibt einen neuen *Socket* zurück, der mit dem Client verbunden ist
- blockiert, falls kein Verbindungswunsch vorhanden
- liest Daten mit **read** und führt den angebotenen Dienst aus
- schickt das Ergebnis mit **write** zurück zum Sender
- schließt den neuen *Socket* mit **close**

Sockets: Programmierung

```
#define PORT 6789
#define MAXREQ (4096*1024)

char buffer[MAXREQ], body[MAXREQ+1000], msg[MAXREQ+2000];

void error(const char *msg) { perror(msg); exit(1); }

int main() {
    int sockfd, newsockfd;
    socklen_t clilen;
    struct sockaddr_in serv_addr, cli_addr;
    int n;
    sockfd = socket(PF_INET, SOCK_STREAM, 0);
    if (sockfd < 0) error("ERROR opening socket");
    bzero((char *) &serv_addr, sizeof(serv_addr));
    serv_addr.sin_family = AF_INET;
    serv_addr.sin_addr.s_addr = INADDR_ANY;
    serv_addr.sin_port = htons(PORT);
    if (bind(sockfd, (struct sockaddr *) &serv_addr, sizeof(serv_addr)) < 0)
        error("ERROR on binding");
    listen(sockfd, 5);
    ...
}
```

Hier wird der Socket
erstellt und an eine
Adresse gebunden.

Sockets: Programmierung

```

...
while (1) {
    cliilen = sizeof(cli_addr);
    newsockfd = accept (sockfd, (struct sockaddr *) &cli_addr, &cliilen);
    if (newsockfd < 0) error("ERROR on accept");
    bzero(buffer, sizeof(buffer));
    n = read (newsockfd, buffer, sizeof(buffer)-1);
    if (n < 0) error("ERROR reading from socket");
    sprintf (body, sizeof (body),
        "<html>\n<body>\n"
        "<h1>Hallo Webbrowser</h1>\nDeine Anfrage war ... \n"
        "<pre>%s</pre>\n"
        "</body>\n</html>\n", buffer);
    sprintf (msg, sizeof (msg),
        "HTTP/1.0 200 OK\n"
        "Content-Type: text/html\n"
        "Content-Length: %zd\n\n%s", strlen (body), body);
    n = write (newsockfd, msg, strlen(msg));
    if (n < 0) error("ERROR writing to socket");
    close (newsockfd);
}
}

```

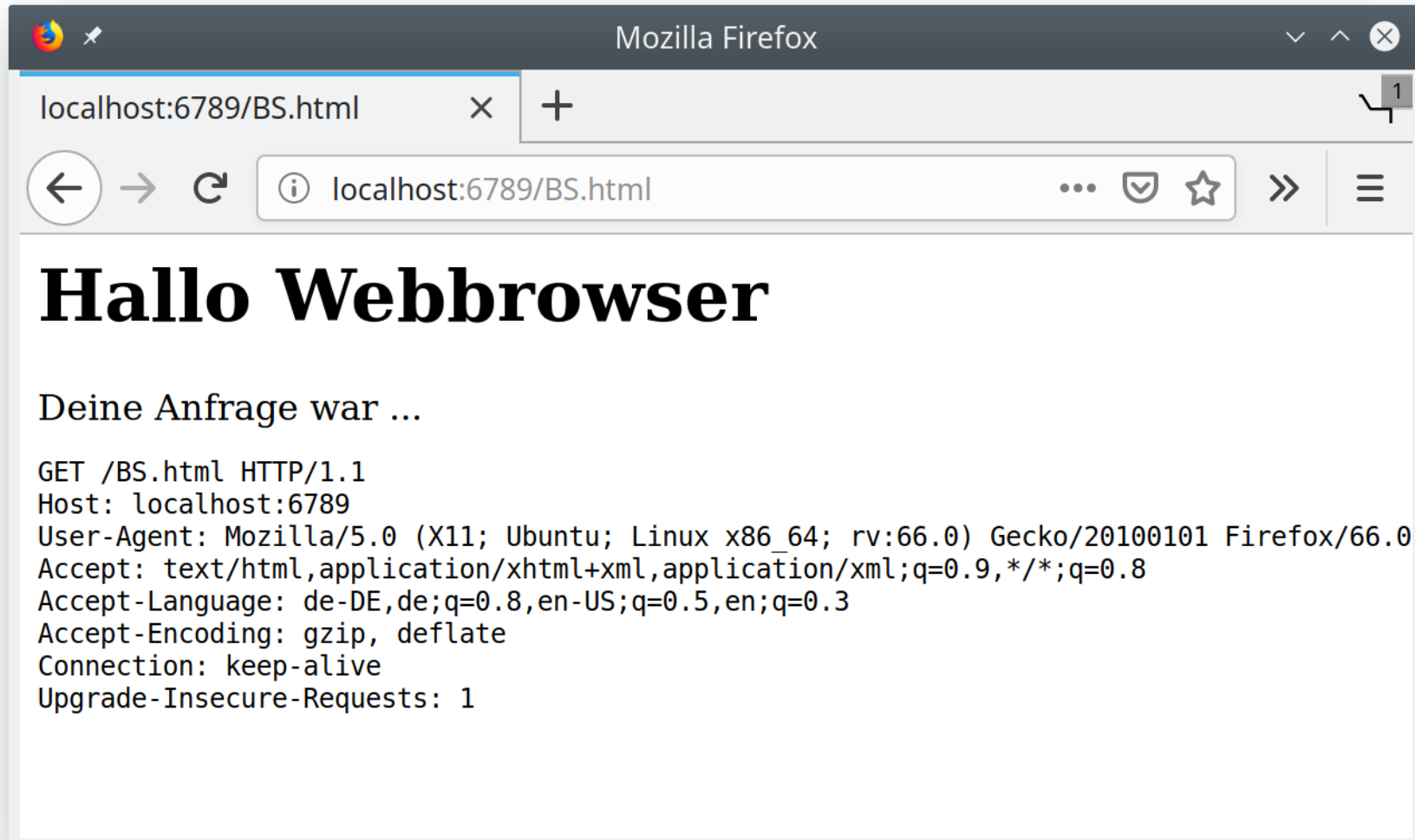
Eine neue Verbindung akzeptieren

HTTP-Anfrage einlesen

Antwort generieren und zurückschicken

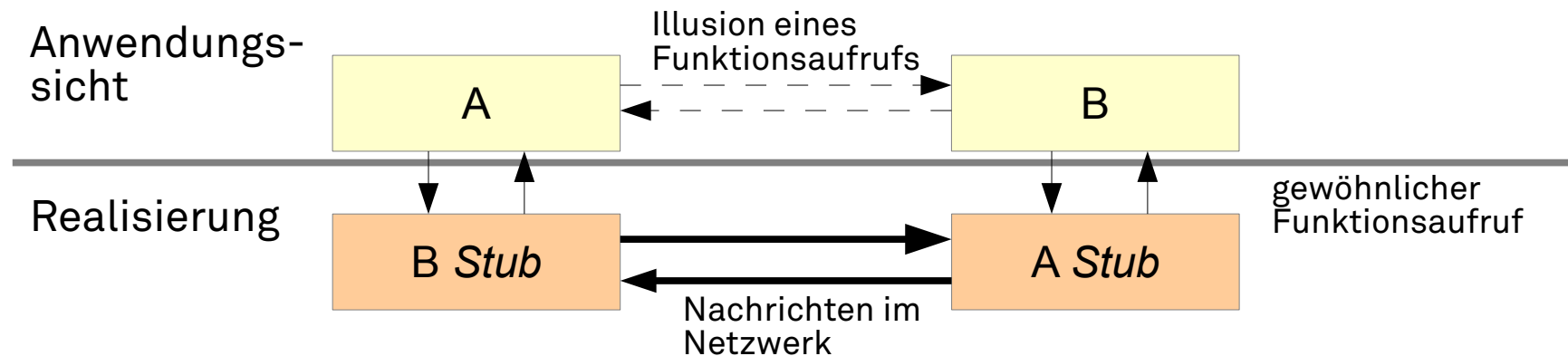
Verbindung wieder schließen.

Sockets: Beispiel HTTP Echo



Fernaufruf (RPC)

- Funktionsaufruf über Prozessgrenzen hinweg (*Remote Procedure Call*)
 - hoher Abstraktionsgrad
 - selten wird Fernaufruf direkt vom System angeboten; benötigt Abbildung auf andere Kommunikationsformen (z.B. auf Nachrichten)
 - Abbildung auf mehrere Nachrichten
 - Auftragsnachricht transportiert Aufrufabsicht und Parameter.
 - Ergebnismnachricht transportiert Ergebnisse des Aufrufs.



- Beispiele: NFS (ONC RPC), Linux D-BUS

Inhalt

- Grundlagen der Interprozesskommunikation
- Lokale Interprozesskommunikation unter UNIX
 - Signale
 - *Pipes*
 - *Message Queues*
- Rechnerübergreifende Interprozesskommunikation
 - *Sockets*
 - Entfernte Prozeduraufrufe (RPCs)
- **Zusammenfassung**

Zusammenfassung

- **Es gibt zwei Arten der Interprozesskommunikation**
 - nachrichtenbasiert
 - die Daten werden kopiert
 - geht auch über Rechengrenzen
 - über gemeinsamen Speicher
 - war heute nicht dran

- **UNIX-Systeme bieten verschiedene Abstraktionen**
 - Signale, Pipes, Sockets, Message Queues
 - Insbesondere die Sockets werden häufig verwendet.
 - Ihre Schnittstelle wurde standardisiert.
 - Praktisch alle Vielzweckbetriebssysteme implementieren heute Sockets.