Verteilte Systeme

Jürgen Kleinöder

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl Informatik 4 (Verteilte Systeme und Betriebssysteme)
www4.cs.fau.de

Sommersemester 2013

http://www4.cs.fau.de/Lehre/SS13/V_VS

Überblick

IPC-Grundlagen – Überblick

- Netzwerke – Aspekte für Verteilte Systeme
- Netzwerkgrundlagen
  - Paketvermittlung
  - Daten-Streaming
  - Vermittlungsschemata
  - Protokolle
  - Routing
  - Internetworking
  - Internet-Protokolle

IPC-Grundlagen – Überblick (2)

- TCP/IP-Anwendungsschnittstelle
  - Client-Server-Modell
  - lokale/entfernte Kommunikation
  - Adressierung
  - Kommunikationsarten
  - Datendarstellung
  - Socket-Schnittstelle
  - DNS-Anfragen
  - Datenaustausch

Netzwerke — Aspekte für Verteilte Systeme

Netzwerke sind die Grundlage für Verteilte Systeme.
Ihre Eigenschaften und Fähigkeiten bestimmen wesentlich, wie ein Verteiltes System beschaffen ist (sein kann).

- Leistung
  - Interaktion in Verteilten System basiert im Wesentlichen auf Nachrichtenaustausch
  - welche Parameter beeinflussen die Geschwindigkeit von Nachrichtenzustellungen?
    - Latenz
      Zeit von der Sende-Operation bis erste Daten am Ziel ankommen
    - Transferrate (Bits pro Sekunde)

  => *Nachrichtenübertragungszeit = Latenz + Nachrichtenlänge/Transferrate*
- Skalierbarkeit

Netzwerke — Aspekte für Verteilte Systeme(2)

- Zuverlässigkeit
  - wesentliche Grundlage für Strategien in verteilten Anwendungen
  - ist der Fehlerfall die seltene Ausnahme oder der zu erwartende Normalfall?
- Sicherheit
  - worauf kann sich die Anwendung verlassen, was muss sie selbst absichern?
- Mobilität
  - mobile Geräte sind eine stark wachsende Komponente in Verteilten Systemen
  - Folge: wechselnde Erreichbarkeit verbunden mit Schwankungen bei Leistung, Zuverlässigkeit, ...
  - was kann das transparent für die Anwendung machen, was ist inhärent sichtbar?

Netzwerke — Aspekte für Verteilte Systeme(3)

- Dienstgüte (Quality of Service)
  - erlaubt das Netzwerk die Formulierung von QoS-Anforderungen?
  - wie kann eine Anwendung ihren Bedarf ermitteln und ausdrücken
- Multicast
  - Gruppenkommunikation ist die Basis für viele Mechanismen in Verteilten Systemen (-> Fehlertoleranz)
  - welche Mechanismen für Broadcast oder Multicast unterstützt bereits das Netzwerk?

Netzwerkgrundlagen

Grundlegende Technik in Rechnernetzen ist *Paketvermittlung*.
Kommunikation erfolgt *asynchron* – d. h. Nachrichten erreichen ihr Ziel nach einer (variierenden) Verzögerungszeit

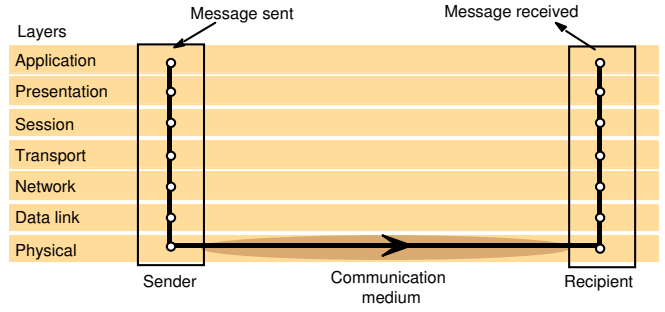
- Paketvermittlung
  - Nachrichten werden Datenpakete begrenzte Länge zerlegt
  - Pakete werden mit Adressinformationen versehen und über dasNetz übertragen
- Daten-Streaming
  - nicht alle Anwendungen in Verteilten Systemen basieren auf dem Austausch von Nachrichten
  - wichtigste Ausnahmen: Audio- und Video-Daten
  - spezielle QoS-Anforderungen: Durchsatz, Jitter

Netzwerkgrundlagen (2)

- Vermittlungsschemata
  - Broadcast
  - Leitungsvermittlung (Circuit Switching)
  - Paketvermittlung
  - Frame Relay

Netzwerkgrundlagen (3)

- Protokolle
  - Regeln und Formate für den Austausch von Nachrichten
  - Protokollschichten
    - Aufteilung der verschiedenen Aufgaben, die bei einer Nachrichtenübertragung anfallen
    - Schichten können aus Effizienzgründen in der Implementierung verschmolzen werden



Instructor's Guide for Coulouris, Dollimore, Kindberg and Blair, Distributed Systems: Concepts and Design Edn. 5
© Pearson Education 2012

Netzwerkgrundlagen (4)

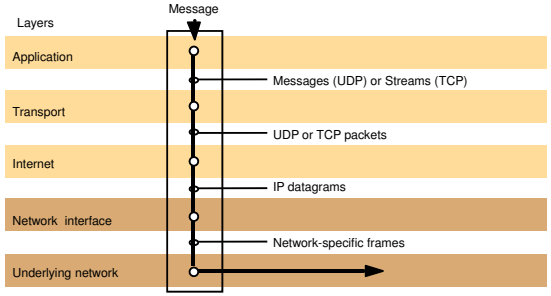
- ... Protokolle
  - Protokollstack
    - Vollständige Menge von Protokollschichten
    - Beispiel: CORBA - TCP/IP - Ethernet
  - Paketzusammenstellung
    - Paketgrößen in verschiedenen Protokollschichten / Teilnetzen ggf. unterschiedlich
    - Pakete einer Nachricht können zerteilt und verschmolzen werden
  - Adressierung
    - erfolgt auf verschiedenen Protokollschichten unterschiedlich: Anwendungs-spezifische Adressen, Prozesse, Rechner, Vermittlungsknoten
    - Abbildungsmechanismen innerhalb des Protokollstacks (z. B. IP-Adresse -> Ethernet-Adresse)
  - Paketzustellung
    - Datagramme – analog zu *Telegrammen*, jedes Datagramm enthält alle notwendigen Adressdaten und wird für sich eigenständig zugestellt
    - Virtuelle Verbindungen – analog zu *Telefonverbindungen* zunächst ein Verbindungsaufbau, die Datenpakete werden dann über die Verbindung übertragen.

Netzwerkgrundlagen (5)

- Routing
  - Zustellung eines Datenpakets durch Übertragung über mehrere Zwischen-/Vermittlungsrechner
  - grundlegendes Konzept in allen Netzen (außer sehr einfachen lokalen Netzen)
  - spezielle Protokolle legen die Übertragungswege fest
- Internetworking
  - Aufbau eines Netzwerks durch den Zusammenschluss vieler Netzwerke
  - lokale Netze, Funknetze, Weitverkehrsnetze
  - unterschiedliche Basistechnologien, unterschiedliche Vermittlungsknote und -Technologien (Router, Switches, Bridges, Hubs, Tunnel, ...)

Netzwerkgrundlagen (6)

- Internet-Protokolle
  - Basis des heutigen Internet
  - erste Entwicklungen in den 1960er Jahren im ARPAnet (NCP - *Network Control Protocol*)
  - Entwicklung der heutigen Kommunikationsprotokolle ab 1980 (TCP/IP - *Transmission Control Protocol / Internet Protocol*)
  - zunächst einfache Anwendungsprokolle für Dateitransfer (TFP), Rechnerzugang (rlogin), Mail (SMTP), ...



Instructor's Guide for Coulouris, Dollimore, Kindberg and Blair, Distributed Systems: Concepts and Design Edn. 5
© Pearson Education 2012

TCP/IP Grundlagen

- TCP/IP hat sich in den letzten 20 Jahren als der de-facto-Kommunikationsstandard etabliert
- API ursprünglich in der UNIX-Version der Univ. Berkeley entstanden
- Grundlegendes Kommunikationsparadigma: Client-Server-Modell
- Verbindungsorientierte Kommunikation: TCP/IP
- Paketorientierte Kommunikation: UDP/IP
- Schnittstelle zu Anwendungsprogrammen: Sockets = Kommunikationsendpunkte
- In UNIX-Systemen weitgehende Integration in die Datei-Ein/Ausgabe-Schnittstelle

Client-Server-Modell

Ein **Server** ist ein Programm, das einen **Dienst** (*Service*) anbietet, der über einen Kommunikationsmechanismus erreichbar ist.

Server

- **Akzeptiert Anforderungen**, die von außen kommen
- **Führt** einen angebotenen **Dienst aus**
- **Schickt** das **Ergebnis zurück** zum Sender der Anforderung
- Ist in der Regel als normaler Benutzerprozess realisiert

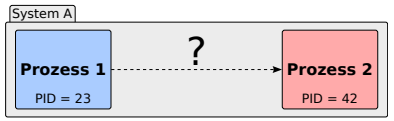
Client

- Schickt eine **Anforderung an einen Server**
- Wartet auf eine Antwort

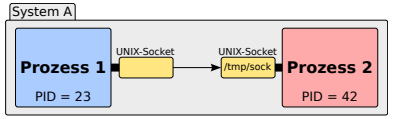
Kommunikation innerhalb eines Systems

? **Wie findet man seinen gewünschten Kommunikationspartner?**

- Intuitiv: über dessen Prozess-ID



  - **Problem:** Prozesse werden dynamisch erzeugt/beendet; PID ändert sich
- **Lösung:** Verwendung eines abstrakten „Namens“

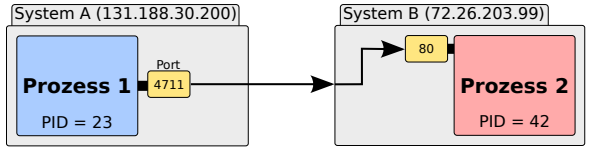


  - Prozess 2 ist so über einen speziellen Eintrag im Dateisystem erreichbar

Kommunikation über Systemgrenzen hinweg

? **Wie findet man nun seinen gewünschten Kommunikationspartner?**

- Wieder über einen Socket...
- ... diesmal aber mit zweistufig aufgebautem „Namen“:
  1. Identifikation des Systems innerhalb des Netzwerks
  2. Identifikation des Prozesses innerhalb des Systems
- Beispiel TCP/IP: eindeutige Kombination aus
  1. IP-Adresse
  2. Port-Nummer



Adressierung in IP-Netzwerken

Internet Protocol

- Netzwerkprotokoll zur Bildung eines virtuellen Netzwerkes auf der Basis mehrerer physischer Netze (Routing)
- Unzuverlässige Datenübertragung
  - Für Zuverlässigkeit ist darüberliegende Transportschicht zuständig

IPv4

- 32-Bit-Adressraum ($\approx$ 4 Milliarden Adressen)
- Notation: 4 mit `.` getrennte Byte-Werte in Dezimaldarstellung
  - z. B. `131.188.30.200`
- Nicht zukunftsfähig wegen des zu kleinen Adressraums
  - Alle Adressen in Asien/Pazifikraum (seit April 2011) und Europa/Nahost (seit September 2012) bereits vergeben!

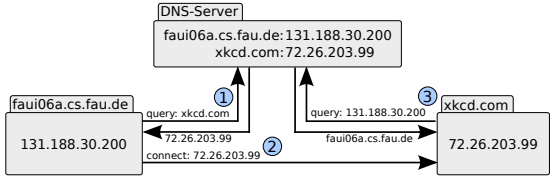
Adressierung in IP-Netzwerken

IPv6

- 128-Bit-Adressraum ($\approx 3{,}4 \cdot 10^{38}$ Adressen)
- Notation: 8 mit `:` getrennte 2-Byte-Werte in Hexadezimaldarstellung
  - z. B. `2001:638:a000:1e:219:99ff:fe33:8e75`
- In der Adresse kann einmalig `::` als Kurzschreibweise einer Nullfolge verwendet werden
  - z. B. *localhost*-Adresse: `0:0:0:0:0:0:0:1 = ::1`
- Abwärtskompatibilität durch transparente IPv4-in-IPv6-Unterstützung
- Bereits 1998 als Standard verabschiedet, aber seither nur schleppende Einführung

Domain Name System (DNS)

- IP-Adressen sind nicht leicht zu merken
- ... und ändern sich, wenn man einen Rechner in ein anderes Rechenzentrum umzieht
- **Lösung:** zusätzliche Abstraktion durchs DNS-Protokoll



1. *Forward lookup*: Rechnername $\rightarrow$ IP-Adresse
2. Kommunikationsaufbau
3. *Reverse lookup* (im Beispiel optional): IP-Adresse $\rightarrow$ Rechnername

Portnummer

- Zur Identifikation eines Prozesses innerhalb eines Systems
- 16-Bit-Zahl, d. h. kleiner als 65536
- Portnummern < 1024: *well-known ports*
  - Können nur von Prozessen gebunden werden, die mit speziellen Privilegien gestartet wurden (Ausführung als *root*)
  - z. B. ssh = 22, smtp = 25, http = 80

Kommunikationsarten

Verbindungsorientiert (Datenstrom)

- Gesichert gegen Verlust und Duplizierung von Daten
- Reihenfolge der gesendeten Daten bleibt erhalten
- Vergleichbar mit einer Pipe – allerdings bidirektional
- Implementierung: Transmission Control Protocol (TCP)

Paketorientiert

- Schutz vor Bitfehlern – nicht vor Paketverlust oder -duplizierung
- Datenpakete können eventuell in falscher Reihenfolge ankommen
- Grenzen von Datenpaketen bleiben erhalten
- Implementierung: User Datagram Protocol (UDP)

Datendarstellung auf einem Rechner

- Beim Austausch von binären Datenwörtern ist die Reihenfolge der Einzelbytes zur richtigen Interpretation relevant
- Kommunikation zwischen Rechnern verschiedener Architekturen – z. B. x86 (*little endian*) und SPARC (*big endian*) – setzt Konsens über die verwendete Byteorder voraus
- Beispiel:

Wert	Repräsentation	0	1	2	3
0xcafebabe	big endian	ca	fe	ba	be
	little endian	be	ba	fe	ca

- **Definierter Standard:** Netzwerk-Byteorder = *big endian*

TCP/IP - Anwendungsschnittstelle — Sockets

- Generischer Mechanismus zur Interprozesskommunikation
- Verwendung im Programm ist unabhängig von der Kommunikations-Domäne
  - ... egal, ob der Kommunikationspartner ein Prozess auf dem selben Rechner ist oder ob er tausende von Kilometern entfernt ist
- Betriebssystemseitige Implementierung ist abhängig von der jeweiligen Kommunikations-Domäne
  - Innerhalb des selben Systems: z. B. UNIX-Socket
    → Adressierung über Dateinamen, Kommunikation über gemeinsamen Speicher, keine Sicherungsmechanismen notwendig
  - Über Rechnergrenzen hinweg: z. B. TCP/UDP-Socket
    → Adressierung über IP-Adresse + Port, nachrichtenbasierte Kommunikation, Sicherungsmechanismen bei TCP

Erzeugen eines Sockets

- Sockets werden mit dem Systemaufruf `socket(2)` angelegt:

```
#include <sys/socket.h>

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

  - `domain`, z. B.:
    - `PF_UNIX`: UNIX-Domäne
    - `PF_INET`: IPv4-Domäne
    - `PF_INET6`: IPv6-Domäne
  - `type` innerhalb der gewählten Domäne:
    - `SOCK_STREAM`: Stream-Socket
    - `SOCK_DGRAM`: Datagramm-Socket
  - `protocol`:
    - `0`: Standard-Protokoll für gewählte Kombination (z. B. TCP/IP bei `PF_INET(6)` + `SOCK_STREAM`)
- Ergebnis ist ein numerischer Socket-Deskriptor
  - Entspricht einem Datei-Deskriptor und unterstützt (bei Stream-Sockets) die selben Operationen: `read(2)`, `write(2)`, `close(2)`, ...

Binden eines Sockets an eine Adresse

- Nach seiner Erzeugung muss ein Socket zunächst an eine Adresse *gebunden* werden, bevor er verwendet werden kann
- Der Systemaufruf `bind(2)` stellt eine generische Schnittstelle zum Binden von Sockets in unterschiedlichen Domänen bereit:

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

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

```
struct sockaddr {
    sa_family_t sa_family; // Adressfamilie
    char sa_data[14];      // Platzhalter-Bytes für die Adresse
};
```

  - `addrlen`: Länge der konkret übergebenen Struktur in Bytes

Binden eines IPv4-Sockets

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

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

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

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

Binden eines IPv6-Sockets

TCP/IP API

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

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

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

  - `sin6_addr`: IPv6-Adresse
    - `in6addr_any` / `IN6ADDR_ANY_INIT`: auf allen lokalen Adressen Verbindungen akzeptieren
- Die Werte für `in6addr_any` bzw. `IN6ADDR_ANY_INIT` liegen bereits in Netzwerk-Byteorder vor

Verbindungsaufbau durch Client

- `connect(2)` meldet Verbindungswunsch an Server:

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

  - `sockfd`: Socket, über den die Kommunikation erfolgen soll
  - `addr`: Beinhaltet abstrakten „Namen“ (bei uns: IP-Adresse und Port) des Servers
  - `addrlen`: Länge der `addr`-Struktur
- `connect()` blockiert solange, bis der Server die Verbindung annimmt oder zurückweist
- Falls der Socket noch nicht lokal gebunden ist, wird automatisch eine lokale Bindung hergestellt (Port-Nummer wird vom System gewählt)
- Socket ist anschließend bereit zur Kommunikation mit dem Server

DNS-Anfragen

- Zum Ermitteln der Werte für die `sockaddr`-Struktur kann das DNS-Protokoll verwendet werden
- `getaddrinfo(3)` liefert die nötigen Werte:

```
int getaddrinfo(const char *node,
                const char *service,
                const struct addrinfo *hints,
                struct addrinfo **res);
```

  - `node` gibt den DNS-Namen des Hosts an (oder die IP-Adresse als String)
  - `service` gibt entweder den numerischen Port als String (z. B. `"25"` oder den Dienstnamen (z. B. `"smtp"`, `getservbyname(3)`) an
  - Mit `hints` kann die Adressauswahl eingeschränkt werden (z. B. auf IPv4-Sockets). Nicht verwendete Felder auf `0` bzw. `NULL` setzen.
  - Ergebnis ist eine verkettete Liste von Socket-Namen; ein Zeiger auf das Kopfelement wird in `*res` gespeichert
- Freigabe der Ergebnisliste nach Verwendung mit `freeaddrinfo(3)`

DNS-Anfragen


```
struct addrinfo {
  int              ai_flags;     // Flags zur Auswahl (hints)
  int              ai_family;    // z. B. PF_INET6
  int              ai_socktype;  // z. B. SOCK_STREAM
  int              ai_protocol;  // Protokollnummer
  socklen_t        ai_addrlen;   // Größe von ai_addr
  struct sockaddr *ai_addr;      // Adresse fuer bind()/connect()
  char            *ai_canonname; // Offizieller Hostname (FQDN)
  struct addrinfo *ai_next;      // Nächstes Listenelement oder NULL
};
```

- `ai_flags` relevant zur Anfrage von Auswahlkriterien (`hints`)
  - `AI_ADDRCONFIG`: Auswahl von Adresstypen, für die auch ein lokales Interface existiert (z. B. werden keine IPv6-Adressen geliefert, wenn der aktuelle Rechner gar keine IPv6-Adresse hat)
- `ai_family`, `ai_socktype`, `ai_protocol` für `socket(2)` verwendbar
- `ai_addr`, `ai_addrlen` für `bind(2)` und `connect(2)` verwendbar

DNS-Anfragen: Beispiel


```
struct addrinfo hints = {
    .ai_socktype = SOCK_STREAM,  // Nur TCP-Sockets
    .ai_family   = PF_UNSPEC,    // Beliebige Protokollfamilie
    .ai_flags    = AI_ADDRCONFIG // Nur lokal verfuegbare Adresstypen
}; // C99: alle anderen Elemente der Struktur werden implizit genullt

struct addrinfo *head;
int error = getaddrinfo("xkcd.com", "80", &hints, &head);
if (error != 0) {
    // Fehler! Behandlung siehe Man-Page
}

// Liste der Adressen durchtesten
int sock;
struct addrinfo *curr;
for (curr = head; curr != NULL; curr = curr->ai_next) {
    sock = socket(curr->ai_family, curr->ai_socktype, curr->ai_protocol);
    if (connect(sock, curr->ai_addr, curr->ai_addrlen) == 0)
        break;
    close(sock);
}
if (curr == NULL) {
    // Fehler!
}

freeaddrinfo(head);
```

Verbindungsannahme durch Server

- **Ausgangssituation:** Socket wurde bereits erstellt (`socket(2)`) und an einen Namen gebunden (`bind(2)`)
- Verbindungsannahme vorbereiten mit `listen(2)`:

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

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

Verbindungsannahme durch Server (2)

- Verbindung annehmen mit `accept(2)`:

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

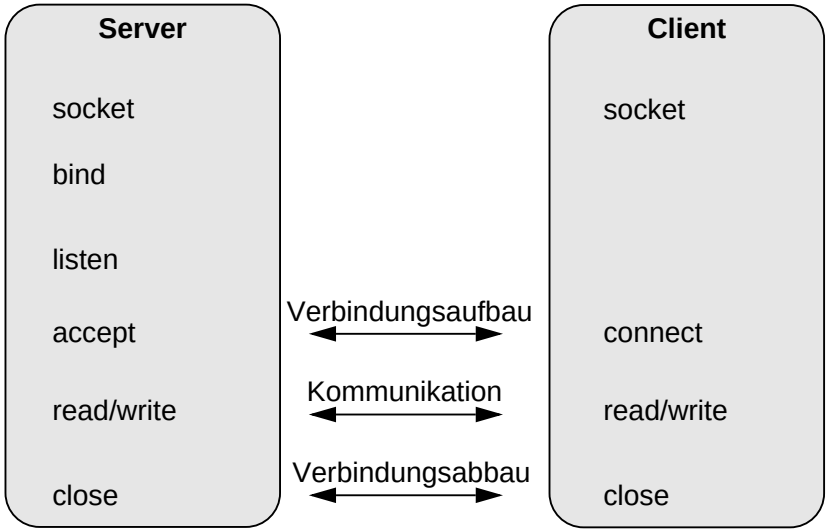
  - `addr`, `addrlen`: Ausgabeparameter zum Ermitteln der Adresse des Clients
    - Bei Desinteresse zweimal `NULL` übergeben
- Entnimmt die vorderste Verbindungsanfrage aus der Warteschlange
  - Blockiert bei leerer Warteschlange
- Erzeugt einen neuen Socket und liefert ihn als Rückgabewert
  - Kommunikation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

Verbindungsannahme durch Server (3)

- Nach Beendigung des Server-Prozesses erlaubt das Betriebssystem kein sofortiges `bind(2)` an den selben Port
  - Erst nach Timeout erneut möglich
  - Grund: es könnten sich noch Datenpakete für den alten Prozess auf der Leitung befinden
- Testen und Debuggen eines Server-Programms dadurch stark erschwert
- Lösungsmöglichkeiten:
  1. Bei jedem Start einen anderen Port verwenden
  2. Sofortige Wiederverwendung des Ports forcieren:

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

TCP/IP-Sockets: Zusammenfassung



Ein-/Ausgabemechanismen

- Nach dem Verbindungsaufbau lässt sich ein Stream-Socket nach dem selben Schema benutzen wie eine geöffnete Datei
- Für Ein- und Ausgabe stehen verschiedene Funktionen zur Verfügung:
  - Ebene 2: POSIX-Systemaufrufe
    - arbeiten mit Filedeskriptoren (`int`)
  - Ebene 3: Bibliotheksfunktionen
    - greifen intern auf die Systemaufrufe zurück
    - wesentlich flexibler einsetzbar
    - arbeiten mit File-Pointern (`FILE *`)

Ebene	Variante	Ein-/Ausgabedaten	Funktionen
2	blockorientiert	Puffer, Länge	`read()`, `write()`
3	blockorientiert	Array, Elementgröße, -anzahl	`fread()`, `fwrite()`
	zeichenorientiert	Einzelbyte	`getc()`, `putc()`
	zeilenorientiert	`'\0'`-terminierter String	`fgets()`, `fputs()`
	formatiert	Formatstring, beliebige Variablen	`fscanf()`, `fprintf()`

Ein-/Ausgabemechanismen

- Auf Grund ihrer Flexibilität eignen sich `FILE *` für String-basierte Ein- und Ausgabe wesentlich besser
- Konvertierung von Dateideskriptor nach `FILE *`:

```
FILE *fdopen(int fd, const char *mode);
```

  - `mode` kann sein: `"r"`, `"w"`, `"a"`, `"r+"`, `"w+"`, `"a+"` (`fd` muss entsprechend geöffnet sein)
  - Sockets sollten mit `"a+"` geöffnet werden
- Schließen des erzeugten `FILE *`:

```
int fclose(FILE *fp);
```

  - Darunterliegender Filedeskriptor wird dabei geschlossen
  - Erneutes `close(2)` nicht notwendig

Beispiel: einfacher Echo-Server

TCP/IP API

! Fehlerabfragen nicht vergessen

```
int listenSock = socket(PF_INET6, SOCK_STREAM, 0);

struct sockaddr_in6 name = {
    .sin6_family = AF_INET6,
    .sin6_port   = htons(1112),
    .sin6_addr   = in6addr_any
};
bind(listenSock, (struct sockaddr *) &name, sizeof(name));

listen(listenSock, SOMAXCONN);

for (;;) {
    int clientSock = accept(listenSock, NULL, NULL);
    char buf[1024];
    ssize_t n;
    while ((n = read(clientSock, buf, sizeof(buf))) > 0) {
        write(clientSock, buf, n);
    }
    close(clientSock);
}
```

Beispiel: einfacher Echo-Server

TCP/IP API

```
int clientSock;
while ((clientSock = accept(listenSock, NULL, NULL)) != -1) {
    char buf[1024];
    ssize_t n;
    while ((n = read(clientSock, buf, sizeof(buf))) > 0) {
        write(clientSock, buf, n);
    }
    close(clientSock);
}
```

- Limitierungen:
  - Neue eingehende Verbindung kann erst nach vollständiger Abarbeitung der vorherigen Anfrage angenommen werden
  - Monopolisierung des Dienstes möglich (*Denial of Service*)!
- Mögliche Ansätze zur Abhilfe:
  1. Mehrere Prozesse
     - Anfrage wird durch Kindprozess bearbeitet
  2. Mehrere Threads
     - Anfrage wird durch einen Thread im gleichen Prozess bearbeitet