

Der folgende Text stammt aus dem Buch *Computernetzwerke*, von A. S. Tanenbaum und D. J. Wetherall, Pearson München (2012), S. 80–90.

## Das Internet

Das Internet ist nicht wirklich ein Netz, sondern eine riesige Ansammlung von verschiedenen Netzen, die bestimmte gängige Protokolle nutzen und bestimmte allgemeine Dienste zur Verfügung stellen. Es ist ein ungewöhnliches System, das von niemandem geplant war und auch von niemandem kontrolliert wird. Um es besser zu verstehen, beginnen wir von vorne und betrachten, wie es entwickelt wurde und warum. Eine wundervolle Darstellung der Geschichte des Internets findet man bei John Naughton (2000). Es ist eines der seltenen Bücher, die man nicht nur mit Vergnügen liest, sondern das auch für den ernsthaften Historiker 20 Seiten mit Literatur- und Quellverweisen enthält. Einige der Informationen in diesem Abschnitt basieren auf diesem Buch.

Natürlich wurden über das Internet und seine Protokolle unzählige Bücher geschrieben. Weitere Informationen finden Sie beispielsweise in Maufer (1999).

Die Geschichte begann Ende der späten 1950er Jahre. Auf der Höhe des kalten Kriegs wollte das US-Verteidigungsministerium ein Kommando- und Steuernetz, das imstande sein sollte, einen Atomkrieg zu überdauern. Zu dieser Zeit nutzte die militärische Kommunikation das öffentliche Telefonnetz, das als verletzlich angesehen wurde. Der Grund hierfür ist aus Abbildung 1 (a) ersichtlich. Hier stehen die schwarzen Punkte für die Telefonvermittlungsstellen, von denen jeder Tausende von Telefonen verband. Diese Vermittlungsstellen waren wiederum mit übergeordneten Vermittlungsstellen (Fernvermittlungsstellen) verbunden und bildeten so eine landesweite Hierarchie mit nur geringer Redundanz. Die Verletzbarkeit dieses Systems lag darin, dass die Zerstörung einiger weniger Fernvermittlungsstellen das System in viele isolierte Inseln fragmentieren würde.

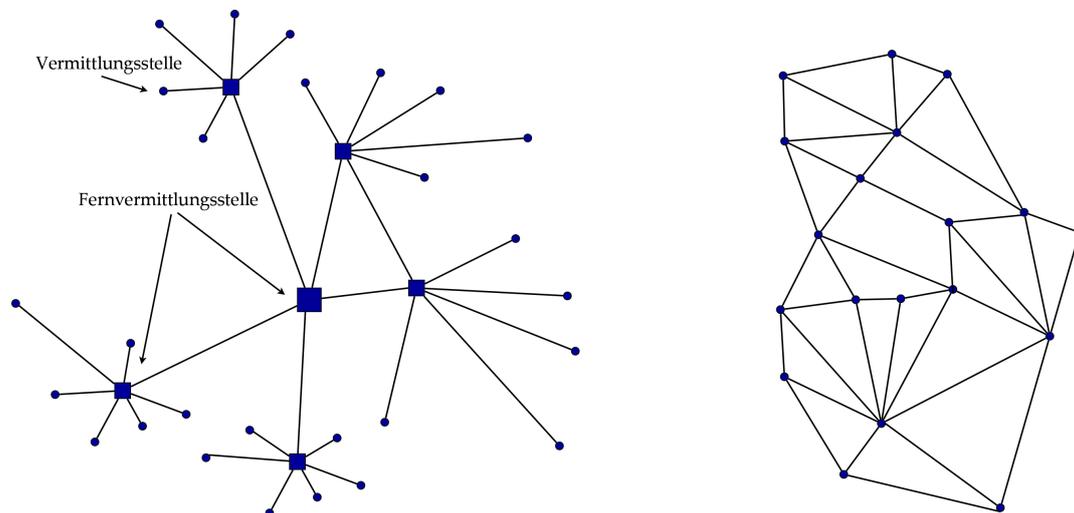


Abbildung 1: (a) Struktur des Telefonsystems. (b) Das von Baran vorgeschlagene verteilte Vermittlungssystem.

Um 1960 beauftragte das US-Verteidigungsministerium die RAND Corporation mit der Erarbeitung einer Lösung. Einer der Mitarbeiter, Paul Baran, stellte den hochgradig verteilten und fehlertoleranten Entwurf von Abbildung 1 (b) vor. Da die Pfade zwischen zwei Vermittlungsstellen jetzt nicht sehr viel länger waren, als die analogen Signale ohne Störung fließen

können, schlug Baran vor, digitale Paketvermittlung zu verwenden. Baran schrieb verschiedene Berichte für das US-Verteidigungsministerium, in denen er seine Ideen im Detail darstellte (Baran, 1964). Den Vertretern des Pentagons gefiel das Konzept und man beauftragte AT&T – zu dieser Zeit der nationale amerikanische Telefonmonopolist – einen Prototyp zu erstellen. AT&T tat die Ideen von Baran kurzerhand ab. Das grösste und reichste Unternehmen der Welt wollte sich nicht von einem jungen Klugscheisser sagen lassen, wie man ein Telefonsystem aufbaut. Man erklärte, das Telefonsystem von Baran könne nicht gebaut werden, und die Idee war damit gestorben.

Es vergingen einige Jahre und das amerikanische Verteidigungsministerium hatte immer noch kein besseres System. Um die nächste Entwicklung zu verstehen, müssen wir ganz zurückgehen, bis zum Oktober 1957, als die Sowjetunion die USA mit dem Start von Sputnik, dem ersten künstlichen Satelliten, im Weltall schlug. Als Präsident Eisenhower herauszufinden versuchte, wer hier mit offenen Augen geschlafen hatte, war er entsetzt, herauszufinden, dass sich Army, Navy und Air Force um das Forschungsbudget des Pentagons stritten. Seine sofortige Antwort war, eine einzige Forschungsorganisation für Verteidigungsprojekte zu gründen, die sogenannte **ARPA** (*Advanced Research Projects Agency*). ARPA hatte weder Wissenschaftler noch Labors. Sie bestand aus nichts als einem Büro und einem (nach Pentagon-Massstäben) kleinen Budget. Sie bestritt seine Aufgabe durch die Vergabe von Stipendien und Aufträgen an Universitäten und Unternehmen, deren Ideen vielversprechend aussahen.

In den ersten Jahren war ARPA noch damit beschäftigt, seine Aufgaben zu definieren. 1967 versuchte Larry Roberts, ein Programm-Manager von ARPA, herauszufinden, wie entfernter Zugriff auf Computer zur Verfügung gestellt werden könnte, und wandte sich dem Thema Netze zu. Er kontaktierte mehrere Experten und fragte sie um Rat. Einer davon, Wesley Clark, schlug vor, ein paketvermitteltes Subnetz zu errichten, das jeden Host mit seinem eigenen Router verbindet,

Nach anfänglicher Skepsis kaufte Roberts die Idee und präsentierte einen etwas vagen Artikel darüber im ACM SIGOPS Symposium on Operating System Principles, das in Gatlinburg, Tennessee, Ende 1967 stattfand (Roberts, 1967). Zu Roberts grossem Erstaunen beschrieb ein anderer Artikel in der Konferenz ein ähnliches System, das nicht nur entworfen, sondern tatsächlich unter der Leitung von Donald Davies am National Physical Laboratory (NPL) in Grossbritannien vollständig implementiert worden war. Das NPL-System war zwar kein landesweites System (es verband nur ein paar Rechner auf dem NPL-Campus), aber es zeigte, dass die Paketvermittlung praxistauglich war. Darüber hinaus zitierte dieser Artikel nun Barans frühere, verworfene Arbeit. Roberts kam von Gatlinburg mit dem Entschluss zurück, das System zu errichten, das später als **ARPANET** bekannt wurde.

Das Subnetz sollte aus Minicomputern namens **IMPs** (*Interface Message Processor*) bestehen, die über Übertragungsleitungen mit einer Kapazität von 56 kbit/s verbunden werden sollten. Um hohe Zuverlässigkeit sicherzustellen, sollte jeder IMP an mindestens zwei weitere IMPs angeschlossen werden. Das Subnetz sollte ein Datagrammnetz sein, sodass Nachrichten automatisch erneut über alternative Wege gesendet werden konnten, falls einige Leitungen und IMPs zerstört würden.

Jeder Netzknoten sollte aus einem IMP und einem Host bestehen, die im gleichen Raum stehen und über eine kurze Leitung verbunden werden sollten. Ein Host würde Nachrichten mit bis zu 8 063 Bit an seinen IMP senden, der diese in Pakete von höchstens 1 008 Bit aufteilen und unabhängig in Richtung Ziel befördern sollte. Jedes Paket würde vollständig vor der Weiterleitung empfangen werden, sodass das Subnetz das erste elektronische paketvermit-

telte Speichervermittlungsnetz (Store-and-forward-Paketvermittlungsnetz) der Welt werden sollte.

ARPA veranstaltete eine Ausschreibung zur Entwicklung des Subnetzes. Zwölf Unternehmen reichten ihre Angebote ein. Nach der Auswertung aller Angebote entschied sich ARPA für BBN, eine in Cambridge im US-Bundesstaat Massachusetts ansässige Beratungsfirma. Im Dezember 1968 wurde der Zuschlag für die Entwicklung des Subnetzes und der dazugehörigen Software erteilt. BBN wählte für diesen Auftrag speziell modifizierte Honeywell-Minicomputer vom Typ DDP-316 mit 12 000 16-Bit-Wörtern Kernspeicher als IMPs. Die IMPs hatten keine Platten, da auswechselbare Teile als unzuverlässig galten. Die IMPs wurden über 56-kbit/s-Leitungen, die von Telefongesellschaften angemietet wurden, verbunden. Obwohl heutzutage 56 kbit/s nur noch in Ausnahmefällen verwendet werden, war es damals das Beste, was man für Geld bekommen konnte.

Die Software wurde zweigeteilt: Subnetz und Host. Die Software für das Subnetz bestand aus dem IMP-Teil der Host-IMP-Verbindung, dem IMP/IMP-Protokoll und einem Protokoll vom Quell- zum Ziel-IMP, um die Zuverlässigkeit zu erhöhen. Das ARPANET in seinem ersten Entwurf ist in Abbildung 2 dargestellt.

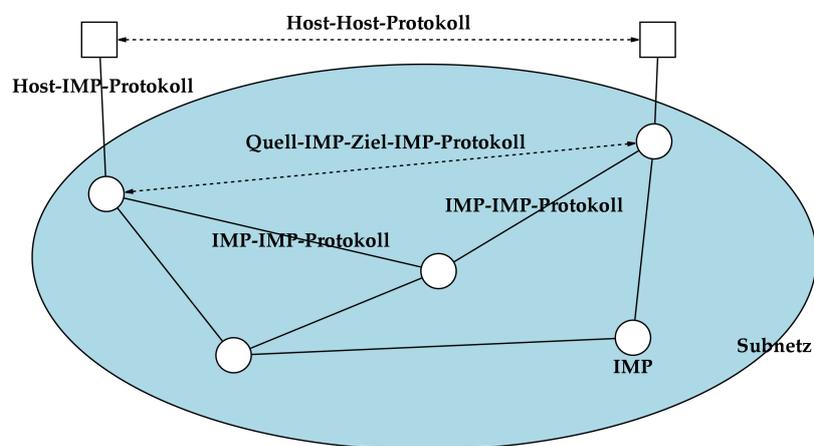


Abbildung 2: Der ursprüngliche Entwurf von ARPANET

Ausserhalb des Subnetzes war auch Software nötig: für den Host-Endpunkt der Host-IMP-Verbindung das Host-Host-Protokoll und die Anwendungssoftware. Bald wurde klar, dass BBN der Meinung war, dass seine Aufgabe getan sei, sobald eine Nachricht auf einer Host-IMP-Leitung angenommen und auf die Host-IMP-Leitung am Ziel zugestellt war.

Roberts hatte ein Problem: Auch der Host benötigte Software. Um das Problem mit der Host-Software zu lösen, berief er im Sommer 1969 in Snowbird in Utah eine Besprechung von Netzforschern, vorwiegend graduierten Studenten, ein. Die Studenten erwarteten einen Netzfachmann, der ihnen den Entwurf des Netzes und seine Software erklären und dann jedem seinen Teil an dem Projekt zuweisen würde. Sie waren verblüfft, als sie feststellten, dass es weder einen Netzfachmann noch einen nennenswerten Entwurf gab. Sie sollten sich selbst etwas einfallen lassen.

So wurde im Dezember 1969 ein experimentelles Netzwerk mit vier Knoten in Betrieb genommen: an der Universität Los Angeles (UCLA), der Universität Santa Barbara (UCSB), am Stanford Research Institute (SRI) und an der Universität von Utah. Diese vier wurden ausgewählt, weil alle eine grosse Anzahl von ARPA-Verträgen besaßen und auch verschiedene und völlig inkompatible Hostrechner im Einsatz hatten (um das Projekt spassiger zu gestalten). Die erste Host-zu-Host-Nachricht war zwei Monate früher von dem UCLA-Knoten

von einem Team, das von Len Kleinrock (einem Pionier der Paketvermittlungstheorie) angeführt wurde, zum SRI-Knoten gesendet worden. Das Netz wuchs schnell und immer mehr IMPs wurden ausgeliefert und installiert. Bald überspannte es die Vereinigten Staaten. Abbildung 3 zeigt, wie schnell das ARPANET in den ersten drei Jahren wuchs.

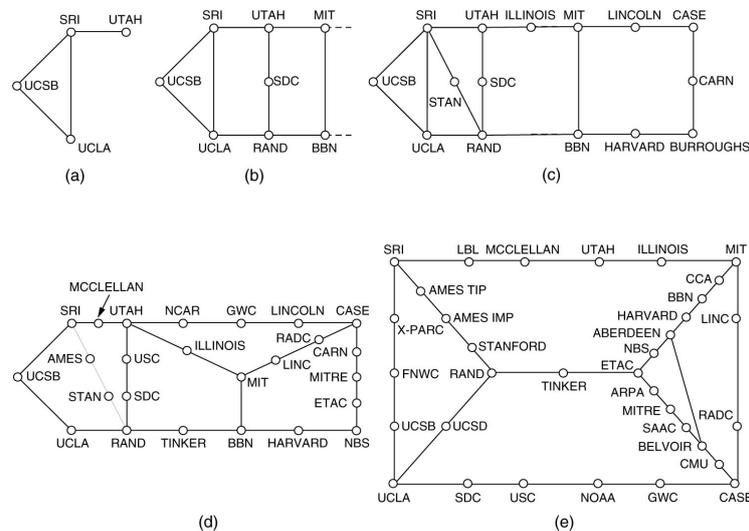


Abbildung 3: Wachstum des ARPANET: (a) Dezember 1969; (b) Juli 1970; (c) März 1971; (d) April 1972; (e) September 1972

Abgesehen von der Unterstützung des flügge gewordenen ARPANET, bezuschusste ARPA auch die Forschung von satellitengestützten und mobilen paketvermittelten Funknetzen. In einer spektakulären Demonstration fuhr ein Lastwagen durch ganz Kalifornien und nutzte das paketvermittelte Funknetz, um Nachrichten an SRI zu senden, die dann über das ARPANET an die Ostküste weitergeleitet wurden, von wo sie über Satellitennetz an das University College London (UCL) übertragen wurden. Dabei konnte ein im Lkw mitfahrender wissenschaftlicher Mitarbeiter einen Computer in London auf seiner Fahrt in Kalifornien nutzen.

Dieses Experiment zeigte auch auf, dass die vorhandenen ARPANET-Protokolle nicht für den Betrieb über unterschiedliche Netze geeignet waren. Diese Beobachtung führte zu weiteren Forschungsarbeiten über Protokolle, die schliesslich in der Erfindung des TCP/IP-Modells und der entsprechenden Protokolle gipfelte (Cerf und Kahn, 1974). TCP/IP wurde speziell zur Verwaltung der Kommunikation über Internetworks entwickelt, was immer wichtiger wurde, da mehr und mehr Netze an das ARPANET angeschlossen wurden.

Um die Übernahme dieser neuen Protokolle voranzutreiben, erteilte ARPA mehrere Aufträge, TCP/IP auf verschiedenen Computerplattformen zu implementieren, unter anderem für IBM-, DEC- und HP-Systeme sowie für Berkeley-UNIX. Wissenschaftliche Mitarbeiter an der kalifornischen Universität in Berkeley schrieben TCP/IP mit einer neuen Programmierschnittstelle (**Socket**) für die aufkommende 4.2BSD-Version von Berkeley-UNIX um.

Sie schrieben ausserdem viele Anwendungen, Hilfs- und Verwaltungsprogramme, um zu zeigen, wie bequem es war, das Netz mithilfe der Sockets zu nutzen.

Das war perfektes Timing. Viele Universitäten hatten eben erst einen zweiten oder Dritten VAX-Rechner angeschafft sowie ein LAN, um diese miteinander zu verbinden, hatten aber noch keine Netzsoftware. Als 4.2BSD mit TCP/IP, Sockets und vielen Netzdienstprogrammen herauskam, wurde das Komplettpaket mit offenen Armen aufgenommen. Mit TCP/IP erwies

es sich ausserdem als einfach, LANs an das ARPANET anzuschliessen, was viele auch taten.

In den 1980er Jahren wurden weitere Netze, vor allem LANs, an das ARPANET angeschlossen. Je mehr der Umfang zunahm, umso aufwändiger wurde es, die Hosts zu finden. Daher wurde das **DNS** (*Domain Name System*) entwickelt, damit Rechner in Domänen organisiert und Host-Namen IP-Adressen zugeordnet werden konnten. Seither hat sich DNS zu einem allgemeinen, verteilten Datenbanksystem zum Speichern verschiedener Informationen in Bezug auf Namen entwickelt. (...)

## **NSFNET**

Gegen Ende der 1970er Jahre erkannte die NSF (U.S. National Science Foundation) die enorme Wirkung des ARPANET auf Forschungen an Universitäten, denn Wissenschaftler konnten kreuz und quer über das ganze Land Daten austauschen und an Forschungsprojekten zusammenarbeiten. Um sich allerdings in das ARPANET einzuklinken, musste eine Universität einen Forschungsvertrag mit dem US-Verteidigungsministerium haben. Viele hatten keinen Vertrag. Die anfängliche Reaktion der NSF war 1981 die bezuschung des **CSNET** (*Computer Science Network*). Dieses Netz verband Informatikfachbereiche und industrielle Forschungszentren mit dem ARPANET über Einwahlstandleitungen. In den späten 1980er Jahren ging die NSF einen Schritt weiter und entschied sich, einen Nachfolger zum ARPANET zu entwickeln, der für alle Forschungsgruppen an Universitäten offen sein sollte.

Um für den Anfang etwas Konkretes zur Hand zu haben, baute die NSF ein Backbonenetz, um ihre sechs Superrechenzentren in San Diego, Boulder, Champaign, Pittsurgh, Ithaca und Princeton zu verbinden. Jeder Supercomputer erhielt einen kleinen Bruder, der aus einem Mikrocomputer LSI-11 bestand, den man **Fuzzball** nannte. Diese Fuzzballs wurden über 56-kbit/s-Standleitungen verbunden und bildeten das Subnetz. Hardwareseitig wurde also die gleiche Technologie angewandt wie beim ARPANET. Die Software war jedoch völlig anders: Die Fuzzballs sprachen von Anfang an TCP/IP und bildeten damit das erste TCP/IP-WAN.

Die NSF bezuschusste ausserdem einige (zum Schluss 20) regionale Netze, die an das Backbone angeschlossen wurden, um Benutzern an Tausenden von Universitäten, Forschungseinrichtungen, Bibliotheken und Museen Zugriff auf jeden der Supercomputer zu ermöglichen und untereinander zu kommunizieren. Das komplette Netz, einschliesslich des Backbones und der regionalen Netze, wurde **NSFNET** genannt. Es bot Zugang zum ARPANET über eine Verbindung zu einem IMP und einem Fuzzball im Rechenzentrum der Carnegie-Mellon-Universität. Das erste NSFNET-Backbone ist in Abbildung 4 dargestellt.

NSFNET war sofort ein durchschlagender Erfolg – und von Anfang an überladen. Die NSF begann unverzüglich mit der Planung eines Nachfolgers und erteilte nach einer Ausschreibung dem in Michigan ansässigen MERIT-Konsortium den Zuschlag als Betreiber des Netzes. Glasfaserkanäle mit 448 kbit/s wurden von MCI (einer amerikanischen Telefongesellschaft, die mit WorldCom fusionierte) angemietet, um das Backbone Version 2 bereitzustellen. Als Router wurden PC-RTs von IBM eingesetzt. Auch dieses Netz war bald überladen, sodass bis 1990 das zweite Backbone auf 1.5 Mbit/s aufgerüstet wurde.

Das Wachstum setzte sich in raschem Tempo fort und die NSF erkannte, dass die Regierung nicht für immer und ewig Netze finanzieren konnte. Ausserdem wollten Privatunternehmen in den Bereich einsteigen, wurden aber durch das Monopol der NSF, das durch deren Finanzierung der Projekte entstand, daran gehindert. Als Folge regte die NSF MERIT, MCI und IBM an, ein gemeinnütziges Unternehmen zu gründen. Es entstand **ANS** (Advanced Net-

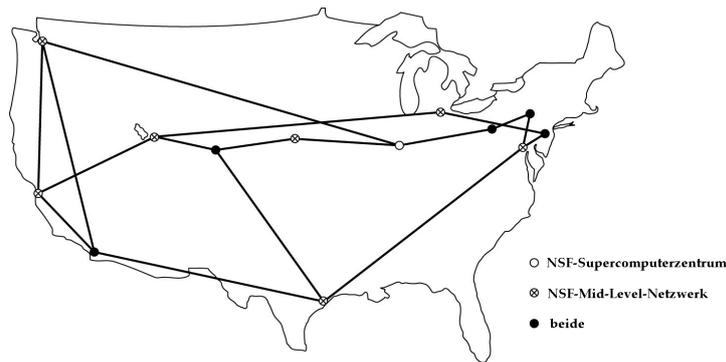


Abbildung 4: Das NSFNET-Backbone, USA, im Jahr 1988

works and Services) als erster Schritt auf dem Weg zur Kommerzialisierung. 1990 übernahm ANS das NSFNET und rüstete die 1.5-Mbit/s-Leitungen auf 45 Mbit/s auf. Damit war das **ANSNET** geboren. Dieses Netzwerk war fünf Jahre in Betrieb und wurde dann an America Online verkauft. Aber zu dieser Zeit boten bereits verschiedene Unternehmen kommerzielle IP-Dienste an und es war klar, dass sich der Staat nun aus dem Netzgeschäft zurückziehen sollte.

Um den Übergang zu erleichtern und sicherzustellen, dass jedes regionale Netz mit jedem anderen regionalen Netz kommunizieren konnte, erteilte die NSF Aufträge an vier verschiedene Netzbetreiber für die Errichtung eines **Netzzugangspunkts (NAP, Network Access Point)**. Diese Betreiber waren PacBell (San Francisco), Ameritech (Chicago), MFS (Washington, DC) und Sprint (New York City, wobei für NAP-Zwecke der Ort Pennsauken in New Jersey als Teil von New York City zählte). Jeder Netzbetreiber, der Backbonedienste für die regionalen NSF-Netze bereitstellen wollte, musste sich an alle NAPs anschließen,

Diese Anordnung bedeutete, dass ein Paket, das von irgendeinem regionalen Netz ausging, den Backbonebetreiber aussuchen konnte. Folglich standen die Backbonebetreiber im Wettbewerb um ein regionales Netzgeschäft, der auf der Grundlage von Service und Preis ausgetragen wurde – was natürlich der Grundgedanke war. In der Folge wurde das Konzept eines einzigen Standard-Backbones durch eine kommerziell ausgerichtete wettbewerbsorientierte Infrastruktur ersetzt. Viele Leute kritisieren die US-Regierung gerne, dass sie nicht innovativ genug sei, aber beim Betrieb von Netzen waren das US-Verteidigungsministerium und die NSF federführend bei der Erstellung der Infrastruktur, die die Basis für das Internet bildete, und man übergab dies dann an die Industrie zum weiteren Betrieb.

In den 1990er Jahren haben viele Länder und Regionen nationale Forschungsnetze aufgebaut, die oftmals nach dem Muster von ARPANET und NSFNET ausgelegt waren. Hierzu gehörten EuropaNET und EBONE in Europa, die mit 2-Mbit/s-Standleitungen begannen und dann auf Leitungen mit einer Kapazität von 34 Mbit/s aufgerüstet wurden. Auch in Europa ging die Netzinfrastruktur in die Hände der Industrie über.

Das Internet hat sich seit diesen frühen Tagen deutlich gewandelt. Mit dem Aufkommen des World Wide Web (WWW) in den frühen 1990er Jahren ist seine Grösse nahezu explodiert. Aktuelle Zahlen des Internet Systems Consortium gehen von über 600 Millionen sichtbaren Internethosts aus. Diese Schätzung ist bewusst zu niedrig veranschlagt, aber die Zahl übersteigt bei Weitem die paar Millionen Hosts von 1994, als die erste WWW-Konferenz am CERN abgehalten wurde.

Auch die Art und Weise, wie wir das Internet nutzen, hat sich radikal geändert. Anfangs herrschten Anwendungen wie E-Mail-für-Akademiker, Newsgroups, entferntes Einloggen und Dateiübertragungen vor. Später verschob sich der Fokus zu E-Mail-für-Alle, dann zu Web- und Peer-to-Peer-Anwendungen zum Verbreiten von Inhalten (wie das heute abgeschaltete Napster). Heute sind das Verbreiten von Media in Echtzeit, soziale Netze (z. B. Facebook) und Mikroblogging (z. B. Twitter) gängige Anwendungen. Dieser Wechsel brachte reichhaltigere Medienarten und daher sehr viel mehr Datenverkehr mit sich. Tatsächlich scheint sich die Art des jeweils vorherrschenden Datentransports im Internet mit einer gewissen Regelmässigkeit zu ändern, beispielsweise wenn neue und bessere Möglichkeiten der Musik- oder Filmbearbeitung sehr beliebt werden.

## Die Internetarchitektur

Die Architektur des Internets hat sich im Zuge des explosionsartigen Wachstums ebenfalls stark gewandelt. In diesem Abschnitt versuchen wir, eine kurze Übersicht darüber zu geben, wie das Internet heute aussieht. Dieses Bild verkompliziert sich durch die ständigen Umwälzungen im Bereich der Telefongesellschaften, Kabelunternehmen und ISPs, wodurch es oftmals schwer zu sagen ist, wer was macht. Eine treibende Kraft dieser Umwälzungen ist das Zusammenwachsen in der Telekommunikation in dem Sinne, dass Netze eingesetzt werden, die vorher anderen Benutzungsarten dienten. Beispielsweise kaufen Sie von einem Unternehmen in einem „Triple-Play“-Paket Telefon-, Fernsehen- und Internetdienste über dieselbe Netzverbindung in der Annahme, dass Sie damit Geld sparen. Daher ist die Beschreibung, die wir hier geben, etwas einfacher als die realen Verhältnisse. Und was heute gilt, kann morgen schon nicht mehr wahr sein. Abbildung 5 zeigt die grosse Übersicht. Lassen Sie uns diese Darstellung einmal Stück für Stück untersuchen, angefangen bei einem Computer zu Hause (an den Rändern der Abbildung). Um sich an das Internet anzuschliessen, ist der Computer mit einem **Internetdienstanbieter (ISP, Internet Service Provider)** verbunden, von dem der Benutzer **Internetzugang (access)** oder **-konnektivität (connectivity)** erwirbt. Damit ist der Rechner in der Lage, Pakete mit allen anderen erreichbaren Hosts im Internet auszutauschen. Der Nutzer könnte Pakete senden, um im Web zu surfen oder für eine der tausend anderen Nutzungsmöglichkeiten, das spielt keine Rolle. Es gibt viele Arten von Internetzugriff und sie werden in der Regel danach unterschieden, wie viel Bandbreite sie zur Verfügung stellen und wie viel sie kosten, aber die wichtigste Eigenschaft ist die Verbindungsfähigkeit.

Häufig wird zum Anschluss an einen ISP die Telefonleitung zu Ihrem Haus genutzt, in diesem Fall ist Ihre Telefongesellschaft auch Ihr ISP. **DSL (Digital Subscriber Line)** benutzt die Telefonleitungen, die Ihr Haus verbindet, zur digitalen Datenübertragung. Der Rechner ist mit einem DSL-Modem verbunden, einem Gerät zur Umwandlung von digitalen Paketen in analoge Signale, welche ungehindert die Telefonleitung passieren können. Am anderen Ende konvertiert ein Gerät namens **DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer)** die Signale wieder in Pakete.

In Abbildung 5 sind mehrere andere Wege dargestellt, sich an einen ISP anzuschliessen. DSL benutzt ein Frequenzband der lokalen Telefonleitung, das oberhalb des für Sprachübertragung verwendeten Bands liegt. Somit werden nicht einfach – wie bei der **Wählleitung (dial-up)** – Bits anstelle von Sprache über eine traditionelle Telefonverbindung gesendet. Bei der Wählleitung wird eine andere Art von Modem an beiden Enden eingesetzt. Das Wort **Modem** ist ein Akronym aus „*Modulator Demodulator*“ und bezieht sich auf jedes Gerät, das zwischen digitalen Bits und analogen Signalen konvertiert.

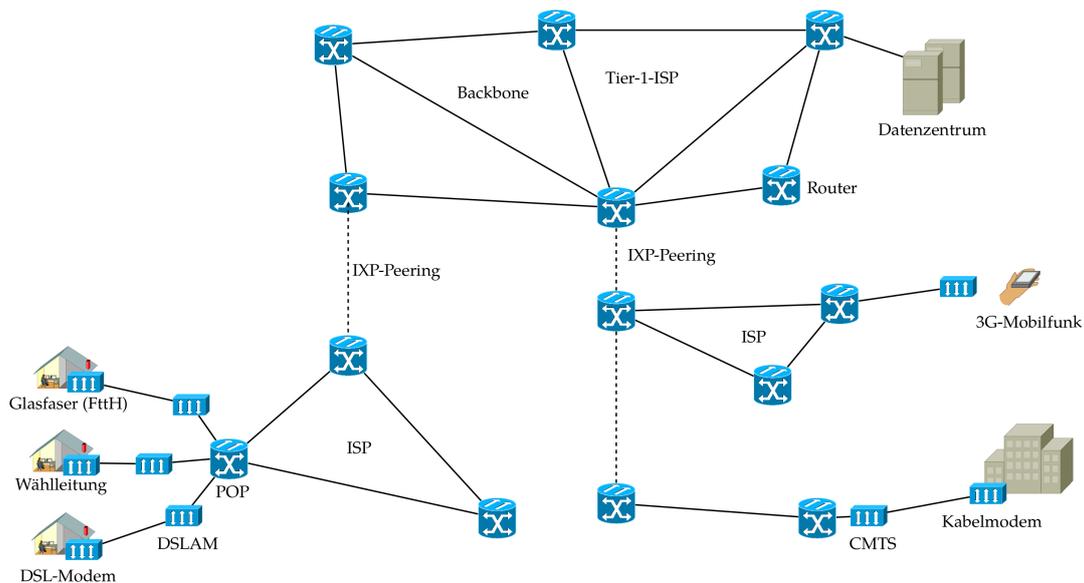


Abbildung 5: Überblick über die Internetarchitektur

Eine weitere Methode ist das Senden von Signalen über das Kabelfernsehsystem. Wie DSL ist dies eine Möglichkeit, vorhandene Infrastrukturen zu nutzen, in diesem Fall ansonsten ungenutzte Kabelfernsehkkanäle. Das Endgerät im Haus heisst **Kabelmodem** und das Gerät am Kabelkopfende heisst **Kabelmodemabschlusssystem** (*CMTS, Cable Modem Termination System*).

DSL und Kabel bieten Internetanschluss zu Übertragungsraten von einem kleinen Bruchteil eines Megabit/s bis hin zu mehreren Megabit/s, je nach System. Diese Übertragungsraten sind deutlich grösser als bei Wählleitungen, welche aufgrund ihrer geringen Bandbreite, die für Sprachübertragungen benutzt wird, auf 56 kbit/s begrenzt sind. Ein Internetzugang mit deutlich grösseren Übertragungsraten als bei Wählleitungen wird **Breitbandzugang** genannt. Der Name bezieht sich auf die grössere Bandbreite, die für schnellere Netze eingesetzt wird, und nicht auf eine bestimmte Geschwindigkeit.

Die bisher erwähnten Zugangsmethoden sind durch die Bandbreite der „letzten Meile“ oder letzten Etappe der Übertragung begrenzt. Wenn Glasfaserkabel zu Wohnhäusern verlegt werden, dann kann schneller Internetzugang zu Übertragungsraten in der Grössenordnung von 10 bis 100 Mbit/s angeboten werden. Dieser Entwurf heisst **FttH** (*Fiber to the Home*). Für Betriebe in Gewerbegebieten kann es sinnvoll sein, eine Leitung mit hoher Übertragungsgeschwindigkeit vom Büro zum nächstgelegenen ISP zu mieten. In Nordamerika läuft beispielsweise eine T3-Leitung mit ungefähr 45 Mbit/s.

Auch beim Internetzugang gibt es drahtlose Anwendungen. Ein Beispiel, (...) sind die 3G-Mobilfunknetze. Diese können Datenübertragungsraten von 1 Mbit/s oder höher zu Mobiltelefonen und stationären Teilnehmern im Abdeckungsbereich bieten.

Wir können jetzt also Pakete zwischen dem Haus und dem ISP übertragen. Der Ort, an dem Kundenpakete das ISP-Netz betreten, heisst **Übergabepunkt** (*POP, Point of Presence*) des ISP. Als Nächstes werden wir erklären, wie Pakete zwischen den POPs der verschiedenen ISPs übertragen werden. Ab diesem Punkt ist das System vollständig digital und paketvermittelt.

ISP-Netze können sich regional, national oder international ausdehnen. Wir haben bereits gesehen, dass ihre Architektur aus Fernübertragungsleitungen aufgebaut ist, welche Router an POPs in den verschiedenen Städten, die dieser ISP bedient, miteinander verbinden. Diese

Anlage heisst das **Backbone** des ISP. Wenn ein Paket für einen Host bestimmt ist, der direkt von dem ISP bedient wird, dann wird dieses Paket über das Backbone geleitet und dem Host zugestellt. Ansonsten muss es einem anderen ISP übergeben werden.

ISPs verbinden ihre Netze, um Datenverkehr an **Internetknoten** (*IXP, Internet eXchange Point*) auszutauschen. Das Verbinden der ISPs untereinander wird *Peering* genannt. Es gibt auf der ganzen Welt viele IXPs in Städten. Sie sind in Abbildung 5 vertikal eingezeichnet, da sich ISP-Netze geografisch überlappen. Im Prinzip ist ein IXP ein Raum voll mit Routern, pro ISP mindestens einer. Ein LAN in dem Raum verbindet all die Router, sodass Pakete von jedem ISP-Backbone zu jedem anderen ISP-Backbone weitergeleitet werden können. IXPs können grosse Einrichtungen sein, die voneinander unabhängige Eigentümer haben. Eines der grössten IXP ist die Amsterdam Internet Exchange, mit der Hunderte von ISPs verbunden sind und über die Hunderte von Gigabyte/s an Datenverkehr ausgetauscht werden.

Wie das Peering an den IXPs genau vonstatten geht, hängt von den Geschäftsbeziehungen zwischen den ISPs ab. Er gibt viele mögliche Beziehungen. Zum Beispiel könnte ein kleiner ISP einen grösseren für Internetanschluss bezahlen, um entfernte Hosts zu erreichen, so wie ein Kunde für den Dienst eines Internetproviders bezahlt. In diesem Fall sagt man, dass der kleine ISP für den **Transit** bezahlt. Zwei grosse ISPs könnten dagegen den gegenseitigen Datenaustausch so organisieren, dass jeder ISP einen gewissen Datenverkehr an den anderen ISP liefert, ohne für den Transit zu bezahlen. Eines der vielen Paradoxe des Internets ist, dass ISPs, die öffentlich um Kunden konkurrieren, im nicht öffentlichen Bereich als Peering-Partner zusammenarbeiten (Metz, 2001).

Der Pfad eines Pakets durch das Internet hängt von der Wahl der Peering-Partner des ISP ab. Falls der ausliefernde ISP ein Peering-Partner vom Ziel-ISP ist, so kann das Paket direkt zu dem Peer geliefert werden. Andernfalls muss das Paket an den nächsten Ort geleitet werden, an dem es eine Verbindung zu einem bezahlten Transit-Provider gibt, der wiederum das Paket ausliefern kann. Zwei ISP-Beispielpfade sind in Abbildung 5 eingezeichnet. Oftmals ist der Pfad, den ein Paket nimmt, nicht der kürzeste Weg durch das Internet.

Am oberen Ende der Nahrungskette sitzt eine kleine Handvoll Unternehmen wie AT&T und Sprint, die grosse internationale Backbonenetze mit Tausenden von Routern betreiben, welche über Glasfaserkabeln mit hoher Bandbreite miteinander verbunden sind. Diese ISPs bezahlen nicht für den Transit. Sie werden in der Regel **Tier-1**-ISPs genannt und werden als das Backbone des Internets bezeichnet, da sich jeder mit ihnen verbinden muss, um das gesamte Internet erreichen zu können.

Unternehmen, die wie z. B. Google und Yahoo! viel Inhalt zur Verfügung stellen, stellen ihre Rechner in Datenzentren auf, die eine gute Verbindung zum Rest des Internets aufweisen. Diese Datenzentren sind für Computer, nicht für Menschen entworfen worden. In einigen Zentren stapeln sich die Maschinen in vielen Regalen, diese werden **Serverfarmen** genannt. Datenzentren mit **Server-Housing** (*colocation*) oder **Hosting** ermöglichen ihren Kunden, Server an ISP-POPs aufzustellen, sodass kurze, schnelle Verbindungen zwischen den Servern und dem ISP-Backbone hergestellt werden können. Der Bereich des Internet-Hostings ist immer mehr virtualisiert worden, sodass es heute üblich ist, eine virtuelle Maschine zu mieten, die in einer Serverfarm läuft, anstatt einen physischen Rechner zu installieren. Diese Datenzentren sind so gross (Zigtausende von Maschinen), dass Strom ein Hauptkostenfaktor ist. Deshalb werden Datenzentren manchmal in Gegenden gebaut, in denen Strom billig ist.

Damit endet unsere kurze Betrachtung des Internets. In den folgenden Kapiteln wird noch ausführlich auf die einzelnen Komponenten und deren Entwurf, die Algorithmen und Proto-

kolle eingegangen. Ein weiterer erwähnenswerter Punkt hier ist, dass sich auch die Bedeutung dessen verändert, was es heisst, im Internet zu sein. Früher war ein Rechner dann im Internet, wenn er (1) den TCP/IP-Protokollstapel ausführte, (2) eine IP-Adresse hatte und (3) IP-Pakete an alle anderen Maschinen im Internet schicken konnte. ISPs verwenden jedoch häufig IP-Adressen erneut, je nachdem welche Rechner zurzeit benutzt werden, und Heimnetze verwenden häufig eine IP-Adresse für mehrere Computer. Diese Praxis untergräbt also die zweite Bedingung. Sicherheitsmassnahmen wie Firewalls können unter Umständen den Empfang von Paketen blockieren, was die dritte Bedingung untergräbt. Trotz dieser Schwierigkeiten ist es sinnvoll, auch bei solchen Rechnern davon zu sprechen, dass sie im Internet sind, solange sie mit ihren ISPs verbunden sind.

Auch sollte noch nebenbei erwähnt werden, dass manche Unternehmen all ihre vorhandenen internen Netze miteinander verbunden haben und dabei oftmals die gleiche Technologie wie das Internet verwenden. Auf diese **Intranets** kann normalerweise nur innerhalb des Firmengeländes oder von Firmenrechnern aus zugegriffen werden. Sie funktionieren aber nach dem gleichen Prinzip wie das Internet.

## Literatur

Baran, P.: „On Distributed Communications: I. Introduction to Distributed Communication Networks“, *Memorandum RM-420-PR*, Rand Corporation, August 1964.

Cerf, V. und Kahn, R.: „A Protocol for Paket Network Interconnection“, *IEEE Trans. on Commun.*, Vol COM-2, S. 637–648, Mai 1974.

Maufer, T.A.: *IP Fundamentals*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 1999.

Metz, C.: „Interconnecting ISP Networks“, *IEEE Internet Computing*, Vol. 5, S. 74–80, März–April 2001.

Naughton, J.: *A Brief History of the Future*. Overlook Press, Woodstock, 2000.

Roberts, L. G.: „Multiple Computer Networks and Intercomputer Communication“, *Proc. First Symposium on Operating Systems Principles*, ACM, S. 3.1–3.6, 1967.