

*Sonderdruck aus:*

# Virtuelle Welten? Die Realität des Internets

---

*Universität Bern*

*Kulturhistorische Vorlesungen*

*Peter Lang Bern · Berlin · Bruxelles · Frankfurt a.M. · New York · Oxford · Wien*

ISBN 978-3-03911-310-1

© Peter Lang AG, Internationaler Verlag der Wissenschaften, Bern 2008  
Hochfeldstrasse 32, Postfach 746, CH-3000 Bern 9; info@peterlang.com, www.peterlang.com, www.peterlang.net

# Entstehung und Funktionsweise des Internets

Torsten Braun

## Die Advanced Research Projects Agency (ARPA)

Die Geschichte des Internets beginnt am 4. Oktober 1957, als die damalige Sowjetunion den ersten Satelliten Sputnik in eine Erdumlaufbahn brachte (Naughton, 2003; Hafner et al., 2000). Für die USA war die Tatsache, technologisch gegenüber der Sowjetunion im Hintertreffen zu sein, ein Schock. Präsident Eisenhower gründete daraufhin im Februar 1958 die dem Verteidigungsministerium unterstellte Advanced Research Projects Agency (ARPA), deren Ziel es war, die angewandte Forschung in akademischen und universitären Einrichtungen besser zu koordinieren und auch finanziell stärker zu unterstützen.

1962 wurde der Physiologie-Professor Joseph Licklider zum Direktor des Information Processing Techniques Office (IPTO) der ARPA berufen. Dieser hatte die Vision, dass Computer von menschlichen Benutzern interaktiv zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen verwendet werden sollten. Damals gab es noch keine persönlichen Computer, sondern verschiedene Rechenzentren betrieben einige wenige grosse Computer, welche einen Auftrag nach dem anderen verarbeiteten. Die Reaktionszeiten waren lang, die Interaktion mit dem Computer basierte auf Terminals, welche aus einer Eingabe- (Tastatur, später auch Maus) und einer Ausgabeeinheit (Bildschirm) bestanden. Die Terminals waren über spezielle Terminalleitungen an die Computer angeschlossen. Das Konzept des Time-Sharing sollte mehreren Anwendern die gemeinsame Benutzung eines Computers ermöglichen, um interaktiv und damit bei kurzen Reaktionszeiten mit diesem zu arbeiten. Die Rechenzeit eines Computers wird dabei so aufgeteilt, dass jeder Prozess oder jeder Benutzer den Eindruck gewinnt, dass das entsprechende Programm permanent Fortschritte erzielt.

Der ARPA-Mitarbeiter Bob Taylor hatte nun drei Terminals auf seinem Schreibtisch stehen, die jeweils mit einem einzelnen Grosscomputer verbun-

den waren. Taylor suchte nach Möglichkeiten, um von einem Terminal aus auf die geografisch verteilten Grosscomputer zuzugreifen. Er entwickelte 1966 die Idee, die an den verschiedenen Universitäten stehenden Computer miteinander zu einem Computernetz zu verbinden und das Einloggen von einem auf den nächsten Computer zu ermöglichen. Durch den damit erreichten entfernten Ressourcenzugriff erhoffte man sich auch eine effizientere Ressourcennutzung, da die Beschaffung und der Betrieb der damals sehr teuren Computer auf einige wenige Standorte beschränkt werden sollte. Der erste Ansatz, alle Computer direkt miteinander zu verbinden, wurde aber schnell verworfen, da diese Lösung für eine grosse Anzahl von Computern nicht skalierte. Der Aufwand, d. h. die Anzahl der erforderlichen Leitungen, ist proportional zu  $N^2$ , mit  $N$  = Anzahl der zu verbindenden Computer. Wesley Clark schlug daher 1967 eine Lösung vor, die darin bestand, die zur Kommunikation erforderlichen Aufgaben vom Computer auf ein spezielles Gerät – einen so genannten Interface Message Processor (IMP) – auszulagern und die Computer über ein Netz von IMPs miteinander zu verbinden. Es blieb zunächst aber noch offen, wie die konkrete Technologie zum Aufbau des Netzes aussehen sollte.

## Robuste Kommunikationsnetze und Paketvermittlung

Parallel zu den oben genannten Überlegungen entwickelten andere Forscher Konzepte für den Aufbau robuster Kommunikationsnetze. Paul Baran arbeitete bei der amerikanischen Firma RAND an Projekten, welche von der Air Force in Auftrag gegeben wurden. Er machte sich insbesondere darüber Gedanken, wie Kommunikationsnetze zu gestalten sind, die auch einen atomaren Angriff überleben können und in einem solchen Fall die Kommunikation des Militärs sicherstellen. Zentralistische oder hierarchische Netzstrukturen mussten demnach vermieden werden. Sein Vorschlag (Baran, 1964) basierte auf einem Netz gleichberechtigter Knoten, die jeweils mit mehreren anderen Knoten verbunden werden, wodurch redundante Kommunikationswege entstehen. Die Berechnungen zeigten, dass bereits wenige Verbindungen (z. B. 3–4) ausreichten, um eine gute Robustheit des Netzes zu erreichen. Baran schlug vor, die Daten in Nachrichtenblöcke aufzuteilen und diese unabhängig voneinander, gegebenenfalls auf unterschiedlichen Wegen, vom Sender- zum

Empfängerknoten zu transportieren. Der Empfängerknoten wartet bis alle Nachrichtenblöcke eintreffen und setzt dann die ursprüngliche Nachricht wieder zusammen. Baran versuchte die Umsetzung seines Konzepts voranzutreiben und wurde von seiner Firma sowie der Air Force darin unterstützt. Er nahm daher mit dem amerikanischen Telefon-Monopolisten AT&T Kontakt auf. Allerdings bewerteten die Manager von AT&T seine Idee als untauglich und frustriert beendete 1965 Baran die Bemühungen, seine Ideen in die Realität umzusetzen. Traditionelle Telefonnetze sind im Gegensatz zu Datenetzen verbindungsorientiert und streng hierarchisch aufgebaut. Die durch die völlig unterschiedliche Philosophie begründete Skepsis der Telefonmonopolisten ist aber nicht aussergewöhnlich. Bis weit in die 90er Jahre gab es viele Vorbehalte gegenüber der Internet-Technik durch die Telekommunikationsmonopolisten.

In Europa arbeitete Donald Davies am National Physical Laboratory (NPL) des Imperial College in London unabhängig von Baran an Konzepten zur Unterstützung der Kommunikation zwischen Computern. Er erkannte, dass das auf durchgeschalteten Verbindungen beruhende Telefonnetz ungeeignet war, die Rechnerkommunikation effizient zu unterstützen. Zunächst mussten zwischen Computern Verbindungen aufgebaut werden, bevor eine kurze Nachricht überhaupt übertragen werden kann. Um die reservierten Verbindungskapazitäten nicht zu verschwenden, mussten dann die Verbindungen wieder abgebaut werden. Die verbindungsorientierte Technik stellt daher für die Kommunikation zwischen Computern einen aufwändigen und wenig effizienten Ansatz dar. Ähnlich wie Baran schlug er daher eine Aufteilung von Nachrichten in kleinere Einheiten (so genannte Pakete, packets) vor. Diese sollten Steuerinformationen am Beginn des Pakets enthalten, auf deren Basis die Entscheidungen zum Weiterleiten gefällt werden. Alle Pakete werden unabhängig voneinander durch ein Netz von Paketvermittlungsknoten geleitet und beim Empfänger wieder zur ursprünglichen Nachricht zusammengesetzt. Davies schlug zunächst feste Paketgrößen vor und kreierte den Begriff «Packet Switching» (Davies, 1964). Das Konzept wurde 1967 am NPL in einem Prototyp implementiert.

Im Gegensatz zur Paketvermittlung wird bei der im Telefonnetz eingesetzten Leitungsvermittlung die gesamte Kapazität einer Leitung oder eines Kanals einer Verbindung zugewiesen. Die Anzahl der Verbindungen ist damit begrenzt. Die Netzkapazität wird ggf. nicht optimal ausgenutzt. Es entsteht

Aufwand zum Aufbauen und Abbauen einer Verbindung. Bei der Paketvermittlung werden die Verbindungen zwischen den Netzkomponenten zwischen mehreren Datenströmen aufgeteilt. Ist ein Datenstrom nicht aktiv, so kann eine Leitung von anderen Datenströmen benutzt werden. Alternative Wege können gleichzeitig oder im Fehlerfall benutzt werden.

Im Oktober 1967 fand ein ACM-Symposium statt, bei dem Mitarbeiter vom Imperial College und der ARPA Vorträge hielten und ihre Ideen austauschten. Die Anwender der ARPA erkannten sofort das Potenzial der Paketvermittlung. Die Arbeit des Imperial College zitierte die Arbeiten von Baran, welche die ARPA-Mitarbeiter nach ihrer Rückkehr verstaubt in ihrem eigenen Archiv fanden. Unter der Leitung von Larry Roberts wurde im August 1968 eine Ausschreibung zur Lieferung der IMPs veröffentlicht, um ein Netz zur Verbindung von vier Computern mit den Standorten University of Utah, University of California Los Angeles bzw. Santa Barbara sowie dem Stanford Research Institute (SRI) aufzubauen. Die Firma BBN, ein Spin-Off des MIT, investierte einen beträchtlichen Aufwand in die Erstellung eines Angebots und stach dabei grosse Unternehmen aus. Im Januar 1969 wurde der Vertrag mit BBN unterzeichnet. BBN entwickelte innerhalb weniger Monate unter der Leitung von Bob Kahn die IMP-Software auf der Basis von Minicomputern der Firma Honeywell. Neun Monate später wurde der erste IMP an die University of California at Los Angeles (UCLA) geliefert. Weitere Lieferungen erfolgten an andere Universitäten im Abstand von einem Monat. Ende 1969 waren vier Computer über das ARPANET (*Abb. 1*) miteinander verbunden. Die physikalische Verbindung erfolgte über Telefonleitungen. BBN verwarf übrigens Anfang der 80er Jahre wegen wenig Erfolg versprechender Geschäftsaussichten den Plan, ins Router-Geschäft einzutreten. Die 1984 als Spin-off der Stanford University gegründete Firma Cisco ist heute Marktführer mit einem jährlichen Umsatz von über 25 Milliarden Dollar.

## Standardisierung und frühe Anwendungen

Neben den IMPs musste aber auch spezielle Software für die zu verbindenden Computer entwickelt werden, vor allem, um die Kommunikation zwischen Endsystemen und IMPs sowie zwischen den Endsystemen zu regeln. Anfang

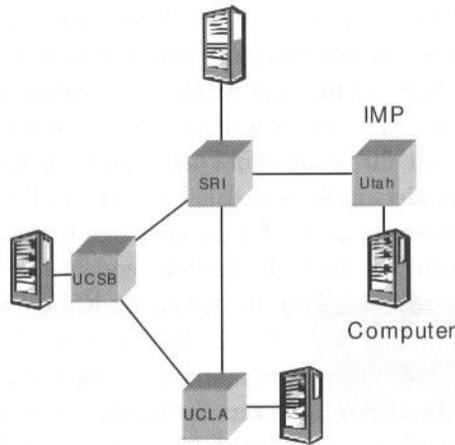


Abbildung 1: ARPANET Ende 1969.

1969 wurde dazu eine Arbeitsgruppe, bestehend aus Mitgliedern (meist Doktoranden) der am ARPANET beteiligten Universitäten, etabliert. Diese Arbeitsgruppe um Vint Cerf, Steve Crocker und Jon Postel sollte sich um folgende Fragen kümmern: Wie kommunizieren IMPs und Endsysteme miteinander? Wie kommunizieren Endsysteme miteinander? Welche Anwendungen sollten unterstützt werden? Die Arbeitsgruppe entwickelte einen sehr kollegialen, kooperativen und konsensorientierten Arbeitsstil, um die Spezifikationen für die erforderlichen Protokolle zu entwickeln. Die Spezifikationen werden «Request for Comments» (RFC) genannt. Auch heute gibt es noch Arbeitsgruppen in der Internet Engineering Task Force (IETF), die stark durch ein konsensorientiertes Arbeiten geprägt sind.

Innerhalb der Arbeitsgruppe wurden auch Anwendungen diskutiert. Bereits 1971 wurde die erste E-Mail-Software entwickelt. 1971 erschienen die ersten Spezifikationen zum entfernten Einloggen in andere Rechner (Telnet). 1973 wurde die Anwendung Talk entwickelt, welche zwei gleichzeitig auf einem Computer eingeloggt Benutzern erlaubt, eine Art Chat durchzuführen. Als weitere wichtige Anwendung etablierte sich später auch Usenet News, ein Dienst, um Nachrichten in ein Forum zu stellen und diese zu diskutieren.

Im Mittelpunkt der Arbeiten der Arbeitsgruppe stand zunächst die Entwicklung des Kommunikationsprotokolls Network Control Protocol (NCP), ein

Vorläufer von TCP. Das in Cerf et al., 1974 beschriebene Transport Control Protocol (TCP) regelt den zuverlässigen Datentransport zwischen Computern über unzuverlässige Netze. Motiviert wurde diese Arbeit durch die Entwicklung von Ethernet (Metcalfe, 1973), welches auf dem Anfang der 70er Jahre an der Universität Hawaii für lokale Funknetze entwickelten Aloha-Verfahren basierte. Bei Aloha sendet ein Knoten dabei einfach ein Paket und hofft, dass es beim Empfänger ankommt. Unter Umständen treten jedoch Kollisionen auf, wenn zwei oder mehr Rechner gleichzeitig senden. Die Übertragung eines Paketes wird dann gestört. Bei Ethernet hören die Knoten vor dem Senden ab, ob andere Stationen senden und falls dies der Fall ist, wird die eigene Übertragung zurückgestellt. Störungen einzelner Bits werden zwar erkannt, aber die Fehlerkorrektur wird anderen Instanzen überlassen. Diese neuen Technologien für lokale Netze beeinflussten die Entwicklung von TCP. Da das ARPANET als eher zuverlässig galt, konnten Fehler durch benachbarte IMPs behoben werden. Bei TCP übernehmen nun die Endsysteme die Fehlerkorrektur, z. B. dann, wenn ein Paket nicht oder verfälscht beim Empfänger ankommt.

Des Weiteren entwickelte Cerf die Vision des Internets als ein Zusammenschluss vieler verschiedenartiger Netze, zu welchem sich das Internet in der Folgezeit entwickelte. In den USA betrieb die National Science Foundation (NSF) ein Backbone, an dem einzelne regionale Netze angeschlossen waren. Auch in Europa entstanden Forschungsnetze mit Verbindungen in die USA. Die Verbindung der Netze erfolgt durch Gateways, auch Router genannt, welche im heutigen Internet die Rolle der IMPs übernehmen.

Im Jahr 1977 wurde TCP in zwei Protokolle (TCP und IP, Internet Protocol) aufgeteilt. IP ist für das Weiterleiten von Paketen zwischen Quelle und Ziel verantwortlich. TCP sorgt für eine zuverlässige Kommunikation zwischen zwei am Internet angeschlossenen Computern. TCP/IP löste im Jahr 1983 das NCP vollständig ab. Die internationale Standardisierungsorganisation ISO versuchte zwar um 1990, eine neue Protokollarchitektur zu entwickeln, doch setzte sich TCP/IP letztendlich durch, nicht zuletzt, da TCP/IP integraler Bestandteil in Unix geworden war. AT&T verteilte 1974 das von Ken Thompson entwickelte Unix einschliesslich des Quellcodes zum Selbstkostenpreis von \$ 150,-. Unix wurde zum wichtigsten Betriebssystem für wissenschaftliche Arbeitsplatzrechner, welche mit Hilfe von TCP/IP miteinander kommunizieren konnten.

## Wissenschaftsnetze

In den 80er Jahren wurden immer mehr Forschungsnetze realisiert, welche auf dem TCP/IP-Protokoll aufbauen. In den USA wurden 1980 zunächst verschiedene Informatikfakultäten über das CSNET miteinander verbunden. Ab 1985 betrieb die National Science Foundation das Backbone-Netz (NSFNET), um die amerikanischen Universitäten miteinander zu verbinden. Auch in Europa wurden IP-Netze aufgebaut, z.B. das EUNet (European UNIX Network) 1982 zwischen den Niederlanden, Grossbritannien, Schweden und Dänemark. Diese einzelnen Netze wurden dann zum Internet zusammengeschlossen («network of networks»). In der Schweiz baute SWITCH ab 1998 das erste mit dem Internet verbundene Schweizer IP-Netz auf. Bereits 1989 waren alle damaligen Universitäten an so genannten SWITCHlan angeschlossen, welches anfangs noch andere Protokollfamilien unterstützte. Typische Anschlussbandbreiten waren 64 bzw. 128 kbit/s, die Kapazität des Backbone wies 2 Mbit/s auf (SWITCH, 2002).

1983 wurde im Internet das Domain Name System (DNS) zur Verwaltung von Rechnernamen eingeführt. In der Schweiz übernahm SWITCH ab 1990 diese Aufgabe, wobei bis 1993 noch weniger als 100 Domännennamen zu verwalten waren. Heute sind mehr als eine Million Namen bei SWITCH registriert.

1989 wurde das ARPANET abgeschaltet. 1991 öffnete das NSFNET das Netz für kommerzielle Organisationen. ABB Forschung, Radio Schweiz, die Flugzeugwerke Emmen und die Schweizerische Meteorologische Anstalt waren die ersten nicht-universitären an SWITCHlan angeschlossenen Organisationen.

## Funktionsweise des Internets

Wie funktioniert nun das Weiterleiten von Paketen zwischen zwei Computern im Internet? Ein sendender Computer erzeugt einen Strom von Paketen und sendet diesen an einen Router (vgl. *Abb. 2*). Jedes Paket besteht aus einem Kopf (Header) mit IP- und TCP-Steuerinformationen. Der IP-Teil enthält die Sender- und Empfängeradressen. Jede Adresse besteht aus vier zusammen-

gehörenden, mit einem «.» getrennten Nummern < 255. Die Adresse des Web-Servers der Universität Bern ist z.B. 130.92.5.10. Die vorderen Zahlen sind für alle Computer in einem Netz gleich. Beispielsweise beginnen alle Adressen der Universität Bern mit «130.92». Ein gesendetes Paket kommt als Folge einzelner Bits bei einem Router an. Der Router extrahiert aus dem Bitstrom die Zieladresse und entscheidet anhand einer Tabelle, auf welchem Ausgang das Paket weitergeleitet werden soll. Router im Backbone haben zum Teil mehrere 10'000 solcher Tabelleneinträge, während Router nahe bei den Endsystemen einige wenige Tabelleneinträge besitzen. Router müssen entweder manuell konfiguriert werden, oder sie lernen automatisch mit Hilfe von Routing-Protokollen, welche Teilnetze wie erreichbar sind.

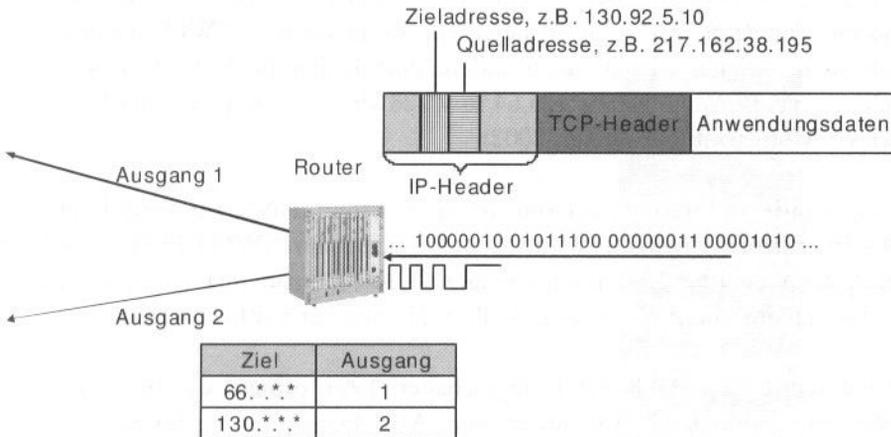


Abbildung 2: Weiterleiten von Paketen.

In einem typischen Szenario sind Router miteinander verbunden und bilden ein Teilnetz. *Abbildung 3* zeigt ein solches Szenario, bei dem Router B direkt mit A, C, und G verbunden ist. C ist direkt mit A, B, D, F und G verbunden; D ist direkt mit A, C, E und F verbunden. Beim so genannten Distanz-Vektor-Verfahren lernt B aus der Nachricht von C, dass D und F über einen Zwischenknoten erreichbar sind. C selbst lernt nun, dass D direkt mit E verbunden ist, daher ist E von C aus über einen Zwischenknoten erreichbar. C verbreitet diese Nachricht an B, welcher lernt, dass E über C über insgesamt zwei Zwischenknoten erreichbar ist. Das Verfahren funktioniert nur für eine begrenzte Anzahl von Routern. Daher werden Router in Teilnetze zusam-

mengemfasst. Auf der Ebene der Teilnetze werden dann ähnliche Verfahren eingesetzt, um die Erreichbarkeitsinformation für diese Teilnetze zu verteilen.

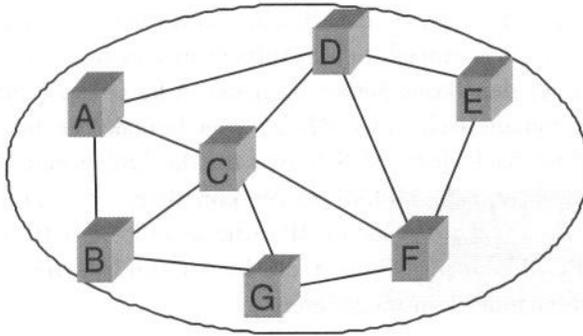


Abbildung 3: Router-Szenario.

Nach dem Aufsetzen der Tabellen in den Routern übernimmt das Internet Protocol (IP) das Weiterleiten von Paketen zwischen Quell- und Zielsystemen. Pakete können jedoch zwischen Quelle und Ziel verloren gehen, z.B. durch Pufferüberläufe oder Übertragungsfehler. Zuverlässigkeitsmechanismen werden in den Endsystemen implementiert, um auf Paketverluste oder andere Fehler zu reagieren. Dazu etablieren zwei auf den kommunizierenden Computern laufende Anwendungen (z. B. ein Web-Browser und Web-Server-Prozess) eine logische TCP-Verbindung, welche den Datentransfer in beide Richtungen ermöglicht. Die Anwendungen (Web-Browser und Web-Server-Prozess) wählen dabei logische Adressen, so genannte Ports, auf ihrem Computer. Web-Server-Prozesse benutzen in der Regel den Port 80. Ein TCP-Sender versieht jedes gesendete Paket mit einer Folgenummer. Der TCP-Empfänger bestätigt den Empfang eines Pakets mit einer Quittung, womit der Sender prüft, ob der Empfänger alle Pakete korrekt erhalten hat. Falls notwendig werden nach einer gewissen Zeit nicht quitierte Übertragungen wiederholt. TCP sorgt auch dafür, dass der Empfänger und die Router im Netz nicht überlastet werden. Ein Paketverlust wird als Zeichen gewertet, mit etwas geringerer Rate zu senden. Das User Datagram Protocol (UDP) ist ein unzuverlässiges Protokoll und wird zum Beispiel bei der Sprachübertragung zusammen mit IP eingesetzt, da nicht jedes Paket unbedingt ankommen muss. TCP, UDP und IP sind in der Regel im Betriebssystem eines Computers implementiert.

Eine weitere wichtige Komponente ist das Domänennamenssystem (DNS), mit dessen Hilfe Rechnernamen auf IP-Adressen abgebildet werden. Im Beispiel will ein PC, der an ein Netz eines kommerziellen Netzanbieters angeschlossen ist, ein Paket an den Web-Server der Universität Bern ([www.unibe.ch](http://www.unibe.ch)) schicken. Dazu sendet er zunächst eine Anfrage an seinen zugeordneten DNS-Server. Dieser fragt den Root-Server nach der Adresse des DNS-Servers für die Top-Level-Domäne «.ch». Der DNS-Server kontaktiert den DNS-Server für «.ch» und fragt nach dem DNS-Server für die Universität Bern, d.h. für die Domäne «unibe.ch». Der DNS-Server kontaktiert den DNS-Server der Universität Bern, erhält die gesuchte IP-Adresse (130.92.5.10) und übergibt diese an den PC. Erst dann können die beiden Endsysteme, d.h. PC und Web-Server, miteinander kommunizieren.

## Anwendungen im Internet

Die heute wichtigste Anwendung im Internet ist das World Wide Web (WWW), welches dem Internet zu seinem weltweiten Durchbruch verhalf und welches von Tim Berners-Lee am CERN in Genf ab 1989 entwickelt wurde. Fast zeitgleich öffnete 1991 das NSFnet den Zugang zum Internet für private und kommerzielle Nutzer. Die stürmische Verbreitung des Internets begann. Berners-Lee passte das seit den 30er Jahren bekannte Hypertext-Konzept auf das Internet an. Seine Motivation bestand darin, verschiedene Dokumente, in denen Wissen zu Experimenten, Technologien oder organisatorischen Aspekten festgehalten ist, miteinander zu verknüpfen und ein Informationssystem aufzubauen, welches das Sammeln, Verwalten und das einfache Aktualisieren von Wissen unterstützt. Das System sollte die besonderen Gegebenheiten in einer Organisation mit hoher Fluktuation berücksichtigen.

Zum Erfolg des WWW hat auch die freie Verfügbarkeit der ersten Browser beigetragen. Hier ist insbesondere der an der Universität Illinois für verschiedene Plattformen entwickelte Mosaic-Browser zu erwähnen, welcher 1994 zur Gründung der Firma Netscape führte. Im selben Jahr wurde das World Wide Web Consortium (W3C) zur Koordination der Weiterentwicklung von WWW-Standards gegründet.

Standard-Anwendungen im Internet sind meist ähnlich einfach aufgebaut. Zum Abrufen einer Web-Seite öffnet ein PC eine TCP-Verbindung mit dem Web-Server. Über diese Verbindung können in zuverlässiger Art und Weise Nachrichten ausgetauscht werden. Der Web-Browser auf dem PC schickt eine Anfrage nach einer Web-Seite an den Server, welcher die angeforderte Web-Seite liest oder dynamisch erzeugt und über eine oder mehrere Antwortnachrichten an den PC zurücksendet. Ähnlich ist der Ablauf beim Senden oder Abrufen von E-Mails, aber auch beim Anrufen von Benutzern über Internet-Telefonie.

Bei der Internet-Telefonie erfolgt der Anruf wie bei der klassischen Telefonie über den Austausch von Signalisierungsnachrichten, mit denen der Anrufer den Gesprächswunsch anzeigt. Diese Nachrichten werden über einen oder mehrere Server an den Angerufenen weitergeleitet, welcher dann den Anruf bestätigt. Beide Gesprächspartner tauschen dann direkt Sprachdaten aus. Dabei werden die Sprachsignale abgetastet und digitalisiert. Eine gewisse Anzahl von Abtastwerten wird für eine kurze Zeit gesammelt und in einem grösseren IP-Paket an den Empfänger geschickt. Dort werden die Abtastwerte extrahiert und über einen Lautsprecher ausgegeben.

Die Zahl der Benutzer, die das Internet zum Telefonieren (Voice over IP) nutzt, steigt stetig an und hat heute die 100 Millionen-Grenze überschritten. Es wird erwartet, dass in den nächsten fünf Jahren die Hälfte der Benutzer ihren klassischen Telefonanschluss aufgeben werden. Bereits 1992 wurden Audio/Video-Konferenzen über das Internet übertragen, welche es ermöglichen, die meist in den USA stattfindenden Meetings der IETF, auf denen die technischen Grundlagen diskutiert und standardisiert werden, in aller Welt zu verfolgen. Die damals entwickelten Protokolle dienen heute als Grundlage für Voice over IP. Das Übertragen von TV-Programmen über das Internet wird heute in mehreren kommerziellen Netzen eingeführt. SWITCH übertrug bereits 2002 die Fussball-Weltmeisterschaft live in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich über das SWITCHlan unter Benutzung der IP-Multicast-Technologie.

In den letzten Jahren haben Peer-to-Peer(P2P)-Netze eine wichtige Bedeutung erlangt. P2P-Netze besitzen ein grosses Potenzial und basieren auf dem Ende-zu-Ende-Argument, welches in Saltzer (1984) formuliert wurde und

Entwurfsprinzipien zur Platzierung von Funktionen in Kommunikationssystemen definiert. Das Ziel bestand in der Realisierung effizienter und einfach strukturierter Netzknoten. Eine Funktion sollte nur dann in einem Teilsystem, z.B. einer Protokollschicht, implementiert werden, wenn sie vollständig darin implementiert werden kann, oder wenn bei teilweiser Implementierung im Teilsystem die Gesamtleistung eines Systems gesteigert werden kann. Des Weiteren sollten nur Funktionen, die von allen Anwendungen benötigt werden, im Netz realisiert werden. Auf einem ähnlichen Prinzip basieren auch RISC-Prozessoren.

P2P-Netze wurden zunächst zum Austausch von Musikdateien eingesetzt. Dabei etablieren Endsysteme (Peers) typischerweise mehrere TCP-Verbindungen zu anderen Peers im Internet. Es entsteht ein teilweise vermaschtes Netz, über welches beliebige Informationen ausgetauscht und weitergeleitet werden. Beispielsweise kann ein Benutzer des Endsystems A eine MP3-Datei einer bekannten Sängerin suchen. Dazu schickt A die Suchnachricht an Computer B, welcher aber keine solche Datei gespeichert hat. Er leitet die Anfrage an andere Computer, mit denen er verbunden ist, weiter, z.B. auch an Computer C. C hat dann vielleicht verschiedene in Frage kommende Dateien lokal gespeichert und kann eine Liste der Dateien an A zurücksenden, welcher dann das eine oder andere Lied direkt von C herunterladen kann. P2P-Techniken können auch für die Internet-Telefonie eingesetzt werden, z. B. um Gesprächspartner zu lokalisieren. In den letzten Jahren wurden in Forschungslaboratorien P2P-Systeme für das Live-Streaming von Filmen und Videos entwickelt. Erste Prototypen zur Echtzeitübertragung von TV-Sendungen oder zum Audio/Video-Streaming sind bereits verfügbar.

## Sicherheit

Das Thema Sicherheit wird ebenfalls zusammen mit dem Internet immer wieder diskutiert. Problematisch ist, dass das Internet nicht für eine kommerzielle Nutzung entwickelt wurde und Sicherheitsfunktionen erst mit der Zeit integriert wurden. Die Kommunikation selbst kann heute mit Hilfe entsprechender Verschlüsselungs- und Authentifizierungssoftware auf verschiedenen Ebenen sehr sicher gestaltet werden. Problematischer erscheinen eher

Sicherheitsmängel von Betriebssystemen und Anwendungen, welche einen ans Internet angeschlossenen PC angreifbar machen. Auch gehen Firmen und Privatpersonen mit vertraulichen Daten oft sorglos um. Die Sicherheitssoftware ist zudem oft wenig benutzerfreundlich und wird dann häufig nicht eingesetzt. Es muss ebenfalls festgestellt werden, dass Sicherheitslösungen wie Firewalls Benutzer stark einschränken können und teilweise Anwendungen nicht mehr funktionieren. Schliesslich ist festzustellen, dass andere Kommunikationsformen im Alltag wie Telefon oder Post weit weniger sicher sind als das Internet.

## Zusammenfassung und Ausblick

Das Internet hat sich in den letzten 40 Jahren zu einem universellen Kommunikationsmedium entwickelt und wird in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen (vgl. Braun, 2006a; Braun, 2006b). Heute kann die Anzahl von an das Internet angeschlossenen Computern nur noch grob geschätzt werden. Die Zahl von 1 Milliarde dürfte aber schon lange überschritten sein. Man geht davon aus, dass das Internet in absehbarer Zeit die grundlegende Infrastruktur für jegliche Art der Kommunikation darstellen wird. Die Entwicklung des Internets wurde und wird massgeblich durch die akademische Forschung beeinflusst. Allerdings sollte angemerkt werden, dass die technische Entwicklung bei weitem nicht so rasend fortschreitet, wie es oft in der Öffentlichkeit dargestellt wird. Viele Entwicklungen im Bereich der Kommunikation erreichen erst 5–10 Jahre oder sogar mehr nach ihrer Erfindung in wissenschaftlichen Einrichtungen eine weite Verbreitung.

Aktuell sind mehrere Initiativen im Gang um das Internet der nächsten Generation zu entwickeln. Im Rahmen des NSF-Projekts «Global Environment for Network Innovations» (GENI) wurde die Firma BBN mit der Projektkoordination beauftragt. In Europa plant die EU im Rahmen der Initiative «Future Internet Research and Experimentation» (FIRE) innovative Projekte zur Entwicklung des zukünftigen Internets zu fördern.

In der Zukunft ist vor allem eine verstärkte Einbindung von drahtlos kommunizierenden Endsystemen – vor allem Kleinstcomputern – zu erwarten. Diese Systeme können Pakete über Funk empfangen und an einen Nachbarn wei-

terleiten. Die Pakete werden gegebenenfalls über mehrere drahtlose Zwischenknoten transportiert. Typischerweise stellt eine Basisstation die Verbindung zwischen solchen drahtlosen Multi-Hop-Netzen und dem Festnetz-Internet her. Als Anwendungsszenarien lassen sich Wireless Mesh Netze zur Verlängerung der Reichweite von Funk-Basisstationen oder Sensornetze zum Aufnehmen und Transport von Messdaten im Freien, in Gebäuden oder an Menschen vorstellen.

## Literatur

- Baran, P. (1964). *On Distributed Communications: I. Introduction to Distributed Communications Networks*. Memorandum RM-3420-PR, RAND Corporation, August 1964.
- Braun, T. (2006). *Entstehung und Entwicklung des Internets*. In *SWITCH Journal*, Juni 2006, S. 6–8.
- Braun, T. (2006). *Geschichte und Entwicklung des Internets*. In *UniPress*, Heft 127, Januar 2006, S. 5–6.
- Cerf, V./Kahn, R. (1974). *A Protocol for Packet Network Intercommunication*. In *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 22, Mai 1974, pp. 637–648.
- Davies, D./Bartlett, K./Scantlebury, R./Wilkinson, P. (1967). *A digital communications network for computers giving rapid response at remote terminals*. ACM Symposium on Operating Systems Problems, Gatlinburg, Oktober 1967.
- Hafner, K./Lon M. (2000). *Die Geschichte des Internet*. Heidelberg: dpunkt.verlag.
- Metcalf, R. (1973). *Packet Communication*. Ph.D. Thesis, Harvard University, Dezember 1973.
- Naughton, J (2003). *A Brief History of the Future*. Phoenix.
- Saltzer, J./Reed, D./Clark, D. (1984). *End-To-End Arguments in System Design*. In *ACM Transactions on Computer Systems*, Vol. 2, No. 4, November 1984, pp. 277–288.
- SWITCH (2002). *Jubiläumsbeilage zu 15 Jahre SWITCH*, <http://www.switch.ch/about/jubilaem.pdf>