
1 Einführung

Das Internet hat eine Historie, die weit über 50 Jahre alt ist. Seit Anfang der 80er-Jahre basiert das Internetprotokoll (IP) auf der Version 4 (IPv4). 1998 wurde eine neue Version dieses Protokolls von Internet Engineering Task Force (IETF), die Version 6 veröffentlicht (IPv6). IPv6 ist anders aufgebaut, hat einige neue oder veränderte Funktionen und Protokollabläufe. Ausserdem kommt es mit der Einführung von IPv6 für eine längere Zeit zu einem Übergang, einer Migration, in dem Netze mit unterschiedlichen Protokollen zusammenarbeiten müssen. Viele Dienste und Applikationen im Internet werden diese Umstellung kaum bemerken, weil sie ja „nur“ in der Layer 3 stattfinden. Für die Übertragung der digitalisierten Sprache (Voice over IP – VoIP) hat die Umstellung und insbesondere die Migrationsphase einige Tücken und bringt neue Probleme mit sich. Auf diese Probleme und Tücken möchte dieses Buch hinweisen und Lösungen aufzeigen.

*IPv4 seit Anfang
der 80er-Jahre*

Nach einer kurzen Einführung und der Vorstellung des Internetprotokolls der Version 6 sowie der wichtigsten Zusammenhänge und Protokollabläufe für VoIP werden die Änderungen und die Probleme und Lösungen in der Migration näher betrachtet. Dabei können die Protokolle IPv6 und die VoIP-Protokolle nur zusammenfassend in den wichtigsten Aspekten und Architekturen erläutert werden. Spezielle Abschnitte beschäftigen sich mit dem Thema Sicherheit und den Verkehrseigenschaften des Netzes. Viele Details können nicht vollständig und ausführlich dargestellt werden.

1.1 Bedeutung des Internets

Das Internet ist ein Paket-orientiertes Datennetz. Basierend auf dem Internetprotokoll können Datenpakete mit einer begrenzten Länge anhand von Zieladressen (IP Destination Address) zum gewünschten Ziel geleitet werden. Die Aufgabe des Weiterleitens wird durch die sogenannten Router realisiert und als *Routing* bezeichnet. Landläufig wird unter dem Internet häufig ein spezieller Dienst/eine spezielle Anwendung, das World Wide Web (WWW), verstanden. Inzwischen ist das Internetprotokoll die technische Basis für eine große Vielzahl ganz unterschiedlicher Anwendungen. Seit über 20 Jahren auch für Echtzeitanwendungen wie die Übertragung der Sprache. Zur Unterstützung der unterschiedlichen Anwendungen, teilweise mit sehr speziellen Anforderungen, wurden diverse zusätzliche Protokolle definiert. Das Internet ist dadurch deutlich komplexer geworden. Um die diversen unterschiedlichen Dienste optimal zu unterstützen, hat sich das ursprünglich sehr einfache Internet dramatisch verändert. Es gibt zwischenzeitlich einige neue Ansätze zur Unterstützung und zur Steigerung der Leistungsfähigkeit (Performance). Die bereits im Ursprung

*Die Basis für
jede Art der
Datenkommunikation*

Mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten

des Internets definierte Offenheit des Netzes und der Protokolle machten diese Fortschritte möglich. Trotzdem sind die ursprünglichen Grundprinzipien auch heute noch immer gültig.

Das Internetprotokoll ist weit verbreitet und läuft auf ganz unterschiedlicher Hardware (Kupferdoppeladern, diverse Luftschnittstellen oder Glasfaser) mit Geschwindigkeiten zwischen 9,6 kbit/s (am Anfang der Mobilkommunikation) bis zu 800 Gbit/s in den Backbone-Netzen der großen Netzbetreiber. Obwohl das Protokoll IPv4 aktuell über 40 Jahre alt ist, funktioniert es immer noch oft recht gut. Trotzdem gibt es Bedarf für eine Aktualisierung, beispielsweise:

- ☐ 32-Bit-Adressbereich ist zu klein, auch wenn die theoretische Grenze bei ca. 4,3 Milliarden Adressen liegt, sind die IPv4-Adressen nur bis Februar 2011 von der IANA vergeben worden, in Europa wurde die letzte IPv4-Adresse im November 2019 vergeben.
- ☐ Das Prinzip *Routing* ist ineffizient durch zu lange Routing-Tabellen, die für das Weiterleiten der Pakete notwendig sind.
- ☐ Relativ schlechte Unterstützung für mobile Geräte (Finden des mobilen Endgeräts: Roaming).
- ☐ Ein gestiegenes Sicherheitsbedürfnis der Benutzer.

Ergänzende Protokolle

Viele Probleme sind nicht neu und wurden teilweise durch neue, zusätzliche oder ergänzende Protokolle gelöst (IPSec, DHCP, NAT usw.), die zusätzlichen Protokolle sorgen für eine geringere Performance und eine gewisse Ineffizienz. All das war Anfang der 80er-Jahre kein Problem, in dieser Zeit war das Internet noch ein einfaches Netz – heute ist es ein komplexes System. Nur einfache Netze sind performant, die gegenwärtigen Entwicklungen sollen das Internet leistungsfähiger, verlässlicher und sicherer machen, die Einführung von IPv6 ist ein wichtiger Schritt in diese Richtung.

1.2 Entwicklung des Internetprotokolls

1.2.1 Aufgabe

Schicht 3

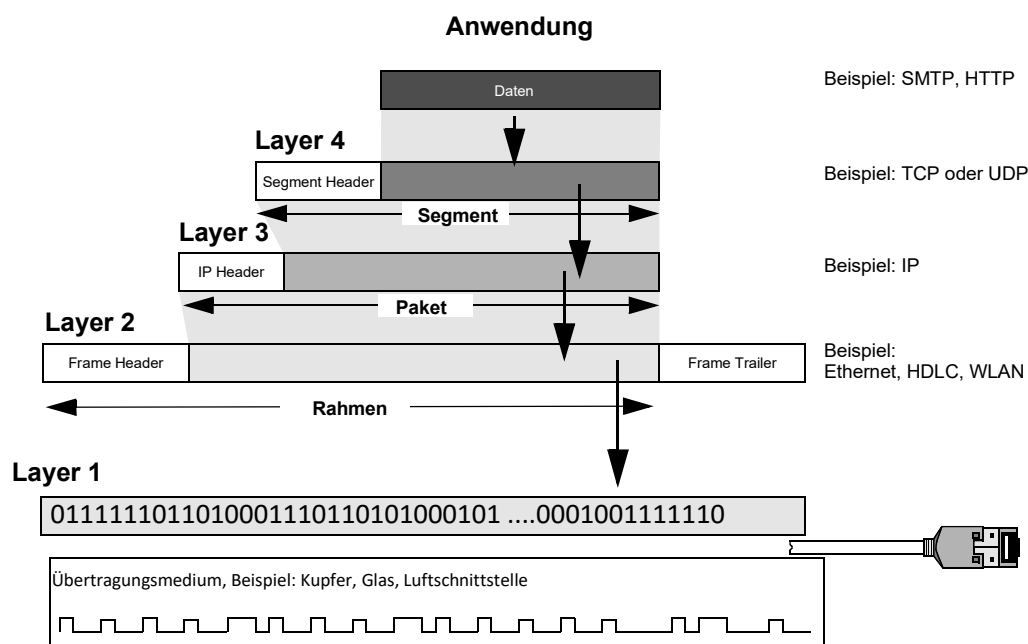
Im OSI-Referenzmodell ist es die Aufgabe der Schicht 3 (engl. Layer 3), Endsysteme miteinander zu verbinden und einen Nachrichtenaustausch zwischen beiden zu ermöglichen. Um diese Aufgabe den höheren Schichten zur Verfügung zu stellen, wird ein Protokoll verwendet, das Protokoll der Schicht 3. Im Internet ist es die Aufgabe der Schicht 3, Subnetze zu verbinden. Innerhalb eines Subnetworks kann die Adresse der Schicht 2, die MAC-Adresse (*Medien Access Control* – MAC), verwendet werden. Die Layer 3 bildet das Netz zwischen den Subnetworks, das Internet.

Pakete

Oberhalb der Schicht 3 ist die Transportschicht (Layer 4), deren Nachrichten (Segmente) werden zusammen mit dem Header der Schicht 4 von dem Internetprotokoll als Pakete transportiert. Die Nachrichten

der Schicht 2 werden als Rahmen oder Frames bezeichnet, sie verfügen über einen eigenen Header und zusätzliche Sicherungsinformationen in einem *Frame Trailer*. Die Schicht 1 überträgt dann schließlich alles und hat keine Nachrichten- oder Rahmenstruktur, hier werden einzelne Bit mit Kupferadern, optischen Transportsystemen oder über Luft-schnittstellen als elektromagnetische Wellen transportiert.

Abb. 1:
Schichten des OSI-Referenzmodells



Der Transport der Datenpakete, das Leiten der Pakete innerhalb der Layer 3 zum gewünschten Ziel wird als *Routing* bezeichnet. Die Netzelemente, die Datenpakete weiterleiten, werden als *Router* bezeichnet. Anders als in der klassischen Kommunikationstechnik wird im Internet vorab keine Verbindung zwischen den beiden Kommunikationspartnern aufgebaut, sondern die Pakete werden nur anhand der in jedem Paket enthaltenen Quell- und Zieladresse (IP-Adresse) und den Einträgen in einer Routingtabelle durch das Netz geleitet. In der Grundidee des Internets arbeitet jeder Router autonom und ohne Kontakt zu den anderen Routern und ohne den vollständigen Weg (die End-to-End-Beziehung) zu kennen.

Routing

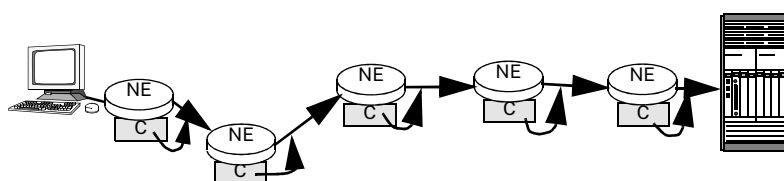


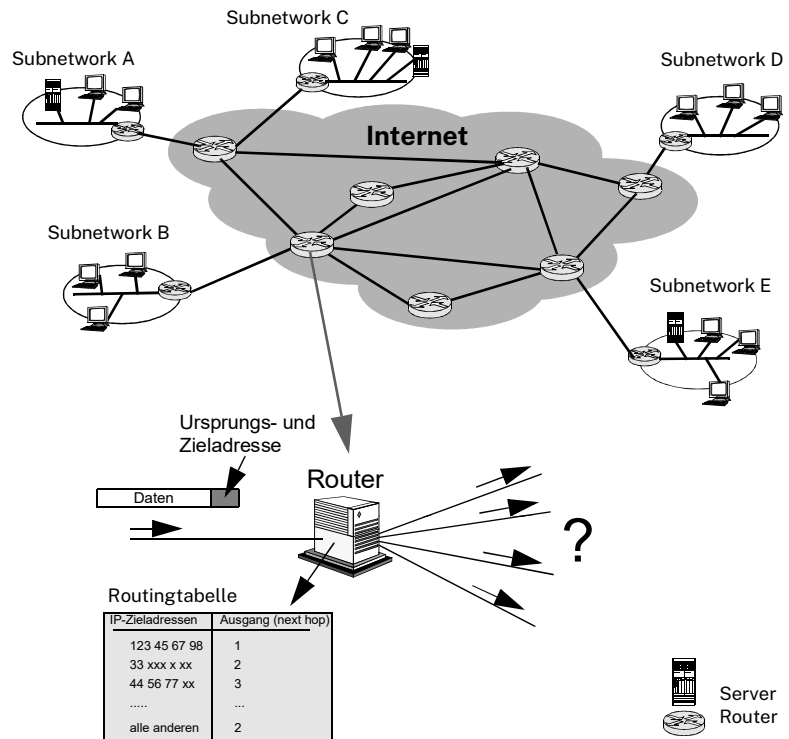
Abb. 2:
Das Grundprinzip
Routing

1.2.2 Die Anfänge

Wie es anfang

Der erste Ansatz und Urvater des Internet, das Advanced Research Projects Agency Network (ARPANET), geht auf das Ende der 1960er-Jahre zurück. Nach einigen Vorläufern und Zwischenschritten wurde schließlich die Version 4 des Internetprotokolls definiert und in einem Request for Comments (RFC) veröffentlicht. Der RFC791 wurde 1981 von der Internet Engineering Task Force (IETF) herausgegeben und ab dem 01.01.1983 eingeführt. Das Internetprotokoll der Version 4 (IPv4) bildete dann die Basis für die ersten Vernetzungen der amerikanischen Hochschulen und bildete den Grundstein für die weltweite Verbreitung des Internets Ende der 1980er/Anfang der 1990er-Jahre.

Abb. 3:
Das Internet
verbindet
Subnetworks



IP-Adresse

Die Adressen im Internetprotokoll (die IP-Adressen) wurden durch 32 Bit gebildet und konnten damit theoretisch 2^{32} unterschiedliche Adressen bilden (vier Zahlengruppen, jeweils zwischen 0 und 255 oder hexadezimal mit den Zahlen 0 bis 9 plus den Buchstaben A bis F geschrieben). Theoretisch können damit 4,3 Milliarden IP-Adressen gebildet werden. Für den ersten Einsatz an amerikanischen Hochschulen war das mehr als ausreichend. Durch die explosionsartige weltweite Verbreitung des Internets, die Strukturierung der Adressen und die Aufteilung der Adresse in *Präfix* (Netzanteil) und *Hostanteil* wurden die nutzbaren IP-Adressen knapp. In der Abbildung 4 ist der Zuwachs der Internet Hosts logarithmisch dargestellt, IPv4 ist die Basis dieses Wachstums.

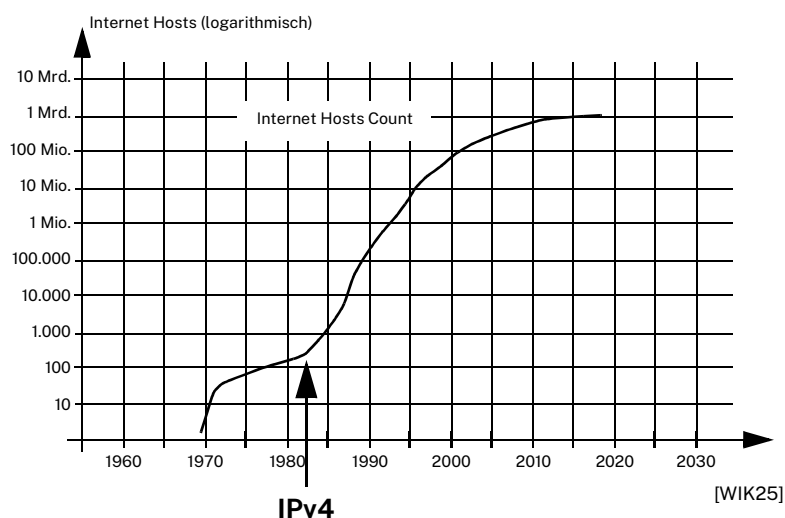


Abb. 4:
Wachstum
des Internets

Die Version 5 (Stream Protocol) wurde nicht als ein Update des Internetprotokolls eingeführt, diente aber als Basis für die spätere Entwicklung der Protokolle für die Voice- und Video-Kommunikation. Die Version 5 verwendete weiterhin die 32 Bit zur Adressierung.

IPv5

1.2.3 Ein neuer Ansatz

Im Dezember 1998 wurde schließlich die Version 6 des Internetprotokolls (IPv6) von der IETF veröffentlicht. Mit IPv6 stehen damit nun 2^{128} Adressen zur Verfügung, theoretisch entspricht das 340 Sextillionen ($3,4 \cdot 10^{38}$) Adressen, eine unvorstellbare Zahl. Einige Vergleiche versuchen sich dieser Zahl zu nähern: Insgesamt könnten mit IPv6 1 500 IPv6-Adressen für jeden Quadratmeter der Erde vorgesehen werden [DOK23]. IPv6 wurde 1998 mit dem RFC 2460 veröffentlicht, der 2017 mit dem RFC 8200 eine Aktualisierung durch die IETF erhielt.

IPv6

Grundstein: ARPANET
erster RFC April 1969

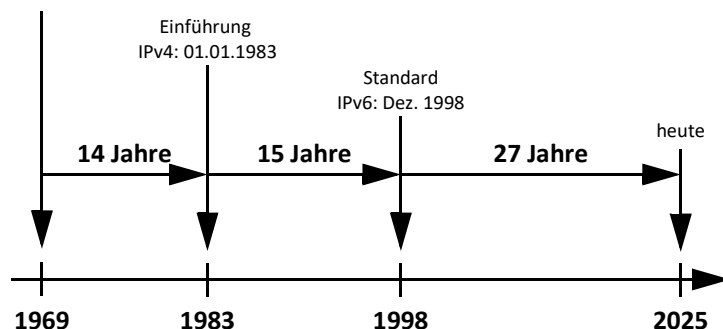


Abb. 5:
Die wichtigsten
Entwicklungen
des IP-Standards

World Wide Web

Mit dem IPv6 versucht die IETF sich den zukünftigen Anforderungen an das Internet zu stellen. Von der ursprünglichen Idee der einfachen Datenübertragung hat sich das Internet sehr viel weiter entwickelt. Ein Meilenstein war sicher die Einführung des Hypertext Transfer Protocols (HTTP) 1991. Die damit verbundene Anwendung des World Wide Web (WWW) und die einfache Navigation im Netz durch den Webbrowser (kurz Browser) ermöglichten für viele Anwender die Nutzung der Netzinhalte durch eine einfach zu bedienende Benutzeroberfläche.

Zukünftige Anwendungen

Inzwischen ist das Internetprotokoll die Basis für eine sehr große Vielzahl von unterschiedlichen Anwendungen. Teilweise erfordern die neuen Anwendungen erweiterte Funktionen, die durch IPv6 und ggf. weitere Protokolle besser unterstützt werden sollen. Zu diesen Anwendungen gehören beispielsweise:

- ☐ Echtzeitanwendungen wie Sprache (Voice over IP – VoIP), Videokonferenz oder auch Maschinensteuerungen (Internet of Things – IoT).
- ☐ Unterstützung der Mobilität (5G auch in Privatnetzen wie dem Hafen Hamburg oder größeren Unternehmen, WLAN usw.).
- ☐ Einführung von Car-to-Car- oder Smart-City-Anwendungen.
- ☐ Sensornetze mit einer sehr großen Anzahl von Sensoren und Aktoren.
- ☐ Virtualisierung von Netzen und Anwendungen.
- ☐ Das Taktile Internet: Unter taktil (wahrnehmbar, spürbar) versteht man ein Netz, das unmittelbar auf die Reaktionen des Benutzers reagiert. Mit Anwendungen wie Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) können so visuelle Eindrücke durch haptische (fühlbare) Erfahrungen ergänzt und erweitert werden.

Zukünftige Anforderungen an das Internet

Abgeleitet aus den Anwendungen ergeben sich aktuelle Forderungen an das Internet:

- ☐ Performanz: Die Leistungsfähigkeit des Netzes ist immer ein Thema. Es geht nie schnell genug und der Hunger an Bandbreite hält an. Im Umfeld der Industrie 4.0 kommen sehr harte Anforderungen an die maximalen Paketlaufzeiten (vorzugsweise kleiner als eine Millisekunde).
- ☐ Quality of Service: Unterstützung der Echtzeitkommunikation durch kleine Paketlaufzeiten und geringen Paketverlust (IoT, Regelkreise).
- ☐ Ultra Reliable: Verlässliche Netze, höchst- bzw. hochverfügbare Netze, die End-to-End-Verbindung mit festen, garantierten Verbindungseigenschaften für die Dauer der Verbindung.
- ☐ Security: Mehrfaktor-Authentifizierung – Secure Access Service Edge (SASE) versucht beispielsweise den Zugriff auf bestimmte Funktionen oder Netzteile bereits im Access-Bereich abzufangen. Eine Mehrfaktor-Authentifizierung versucht eine höhere Sicherheit (durch die Nutzung unterschiedlicher Zugänge) als herkömmliche Standard-Verfahren anzubieten.

- ❑ **Multi-Homing:** Ein Standort, viele IP-Adressen auch von unterschiedlichen Betreibern oder Fix/Mobile – aus Gründen der Skalierung und/oder Verfügbarkeit (Mehrfachabstützung).
- ❑ **Netz im Netz:** In 5G wurden sogenannte Network Slices definiert, die spezialisierte Netzeigenschaften in Bezug auf QoS, Verlässlichkeit, Verfügbarkeit oder Virtualisierung haben. Solche Slices können beispielsweise mit dem Ansatz des Software-defined Networking oder aber mit Segment Routing (SR), eine Technik, die von IPv6 unterstützt wird (s. Kapitel 6), realisiert werden.

Nicht alle Forderungen und Netzeigenschaften können durch IPv6 erfüllt oder realisiert werden, für viele sind Voraussetzungen in der Layer 2 bzw. ergänzende Protokolle erforderlich. Dennoch wurden aktuelle Trends bei IPv6 berücksichtigt und es bietet eine Grundlage dafür. Trotzdem gibt es ein großes Verharren beim Internetprotokoll der Version 4. Seit langer Zeit wird angekündigt, dass IPv6 jetzt vor der Tür steht, viele Betriebssysteme und Netzelemente es bereits unterstützen und es ist trotzdem nicht eingeführt. Der größte Teil des Internets basiert auf IPv4 – irgendwie geht es dann doch immer noch.

*IPv6 kann
nicht alles*

1.2.4 Der Weg zu IPv6

Nachdem die Version 6 des Internetprotokolls bereits schon so lange verfügbar ist und von vielen Betriebssystemen bereits unterstützt wird, muss man sich fragen: Warum wird IPv6 so zögerlich eingeführt? Nach einer Umfrage des Heise-Verlags im Jahr 2024 [Nol24] arbeiten von 3 000 Befragten 48 % immer noch ausschließlich und 24 % weitestgehend immer noch mit IPv4. Weitere 22 % arbeiten im Dual-Stack-Betrieb und nur 5 % ausnahmsweise oder gar nicht mehr mit IPv4.

Warum etwas ändern?

Der Spruch „Never change a running System“ beschreibt die Angst, Veränderungen an einem laufenden System durchzuführen. „Warum soll ich etwas ändern, wenn es doch gerade läuft?“ Die Kunden der Internet-Anbieter (Internet Service Provider – ISP) fordern IPv6 nicht unbedingt, weil sie Interesse an Anwendungen haben, IP aber „nur“ in der Layer 3 den Transport übernimmt. Mit der IPv6-Einführung haben die Kunden keine neuen Funktionen oder Anwendungen. Durch viele ergänzende Festlegungen und Protokolle wird das IPv4 auch in diesen Zeit noch am Laufen gehalten, aber IPv4 wurde durch die vielen zusätzlichen Protokolle nicht performanter – denn nur einfache Systeme sind performant, je komplexer ein System wird, um so mehr wird es ausgebremst. Die Einführung von IPv6 führt auch zu einer Aufräumarbeit in der Protokollvielfalt. IPv6 versucht die gegenwärtigen Anforderungen an das Internet der Zukunft zu adressieren und es gleichzeitig performant zu erhalten. Einige Nutzer haben nach [Nol24] Bedenken bezüglich einer ausreichenden IPv6-Unterstützung durch die Firewalls (Sicherheitsmaßnahmen sind auf IPv4 abgestellt) und Router. Einigen erscheint der Umstieg als sehr komplex oder es fehlen die Zeit, Erfahrung bzw. die Fachkräfte für den Umstieg. Viele wollen so lange wie es geht mit der Umstellung abwarten und 62 % haben keine Roadmap für die Umstellung.

Es läuft doch alles