

Konzepte für das Future Internet aus der Netzperspektive

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Dr. Thomas Dreibholz

Lehrstuhl Technik der Rechnernetze
Institut für Informatik und Wirtschaftsinformatik
an der Universität Duisburg-Essen

„The Internet only just works.“

Mark Handley

[H06] M. Handley, “Why the Internet only just works”, BT Technology Journal, 24-3, 6/2006.

- Motivation und Einführung
- Wie funktioniert das aktuelle Internet?
- Ansätze zum Future Internet
- Ausgewählte Konzepte
- Der Weg zum Future Internet
- Was wird sich durchsetzen?
- Zusammenfassung und Ausblick

■ Motivation und Einführung

- Wie funktioniert das aktuelle Internet?
- Ansätze zum Future Internet
- Ausgewählte Konzepte
- Der Weg zum Future Internet
- Was wird sich durchsetzen?
- Zusammenfassung und Ausblick

Das ursprüngliche Internet

■ Für E-Mail und Dateitransfer

- Separates Netzwerk
- Meistens kabelgebunden
- Kleine Nutzergruppe
- Kooperatives Nutzerumfeld

■ Funktionierte akzeptabel für diese Anwendungen

■ TCP/IP-Grundzüge sind nahezu 40 Jahre alt [CK74]

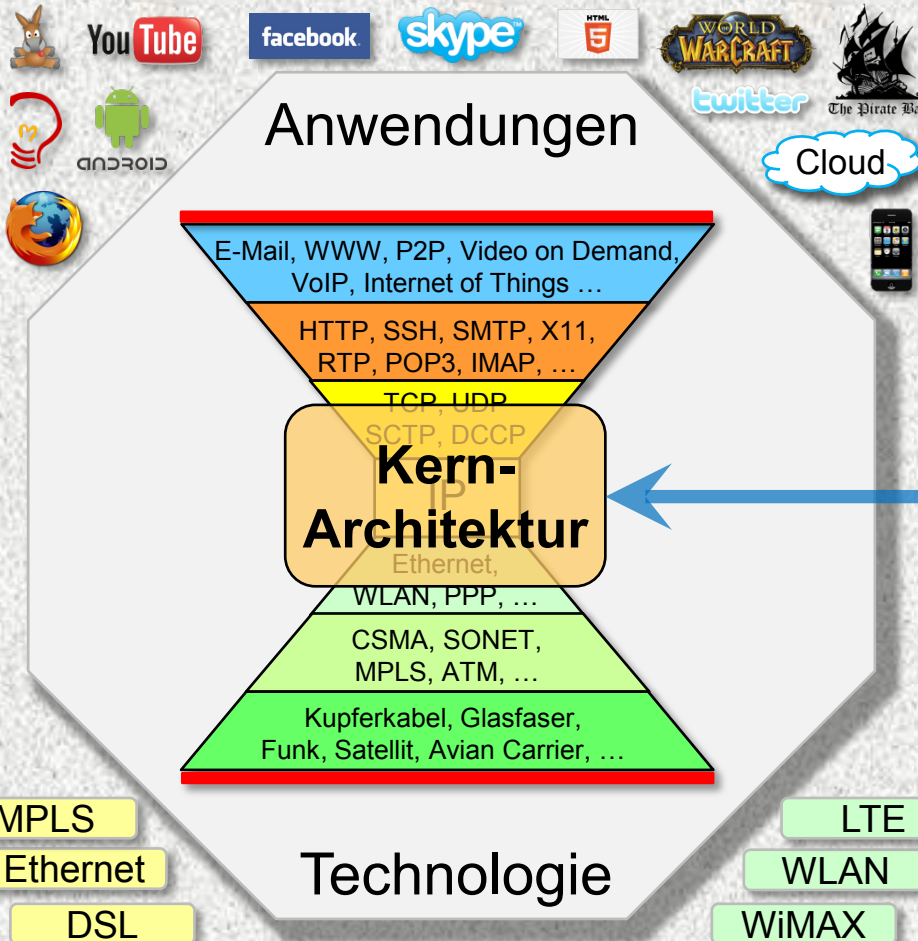
Innovation?



IP: Internet Protocol TCP: Transmission Control Protocol

[CK74] V. Cerf, R. Kahn, "A Protocol for Packet Network Intercommunication", IEEE Communications, Mai 1974

Das heutige Internet



Innovation bei Anwendungen

- File Sharing, VoIP, IPTV, ...
- Die Zukunft ist Web 2.0/3.0

Die Kern-Architektur Kaum Veränderungen!

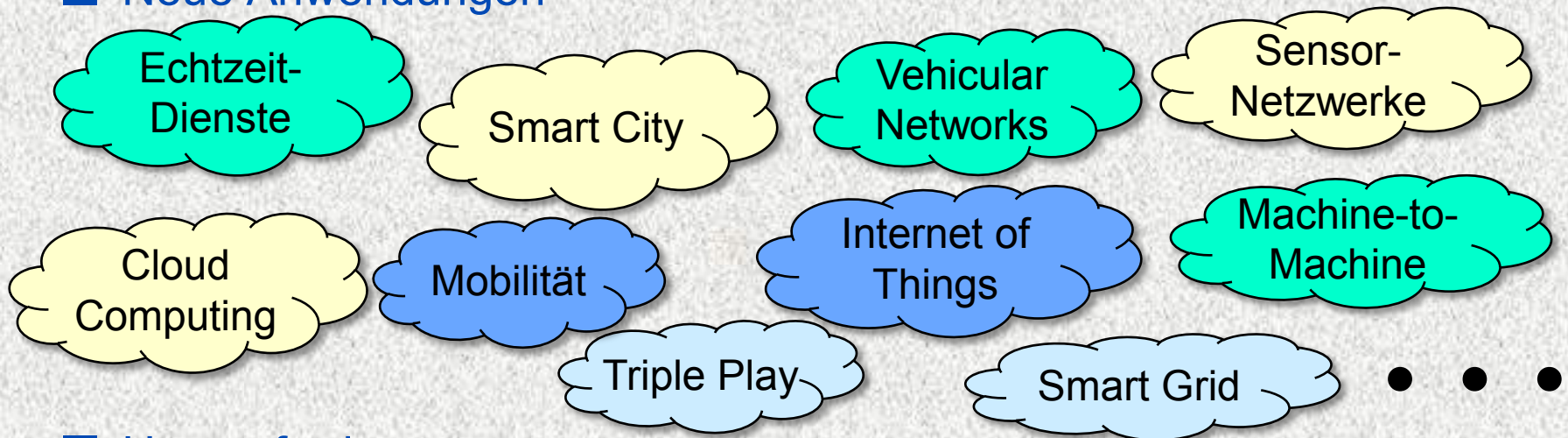
Innovation bei Technologie

- DSL, Mobilfunk, Glasfaser, ...
- Die Zukunft ist mobil

[M08] P. Müller, "G-Lab: A Future Generation Internet Research Lab", FIRE Launch Event, 9/2008.

Future Internet – Das zukünftige Internet

■ Neue Anwendungen



■ Herausforderung

- Vom aktuellen Internet zum Future Internet
 - Anwendungen
 - Netzinfrastruktur
- Schwerpunkt des Vortrags: **Netzinfrastruktur**

Was sind die Herausforderungen?

■ Zentrale Anforderungen und Probleme [F07]:

- **Mobilität**
 - Viele mobile Endgeräte (Smartphones, ...)
- **Dienstgüte** (Quality of Service – QoS)
 - Priorisierung (interaktive Echtzeitsdienste, ...)
- **Sicherheit**
 - Missbrauch von Ressourcen (Spam, ...)
 - Angriffe (Denial of Service, Diebstahl, ...)
- **Verfügbarkeit**
 - Ausfallsicherheit (Cloud-Dienste, ...)
- **Skalierbarkeit**
 - Nicht mehr nur menschliche Nutzer

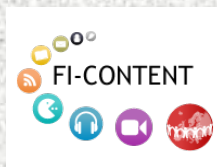
Hohe
Flexibilität
erforderlich

Viele Anforderungen ⇒ großer **Forschungsbedarf**

[F07] A. Feldmann, "Internet Clean-Slate Design: What and Why?", ACM SIGCOMM CCR, 37-3, 2007.

Forschungsinitiativen und Experimentierplattformen

Schwerpunkt **Anwendungen**



Schwerpunkt **Netzinfrastruktur**

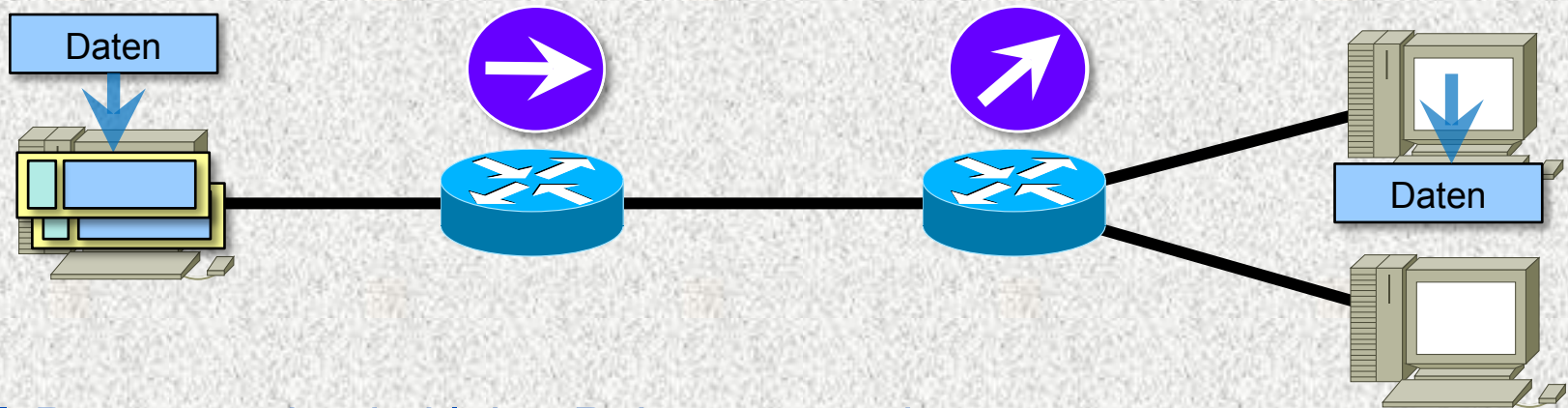


Auflistung ist keinesfalls vollständig (sehr umfangreiches Thema)

Wie funktioniert das heutige Internet?

- Motivation und Einführung
- **Wie funktioniert das aktuelle Internet?**
- Ansätze zum Future Internet
- Ausgewählte Konzepte
- Der Weg zum Future Internet
- Was wird sich durchsetzen?
- Zusammenfassung und Ausblick

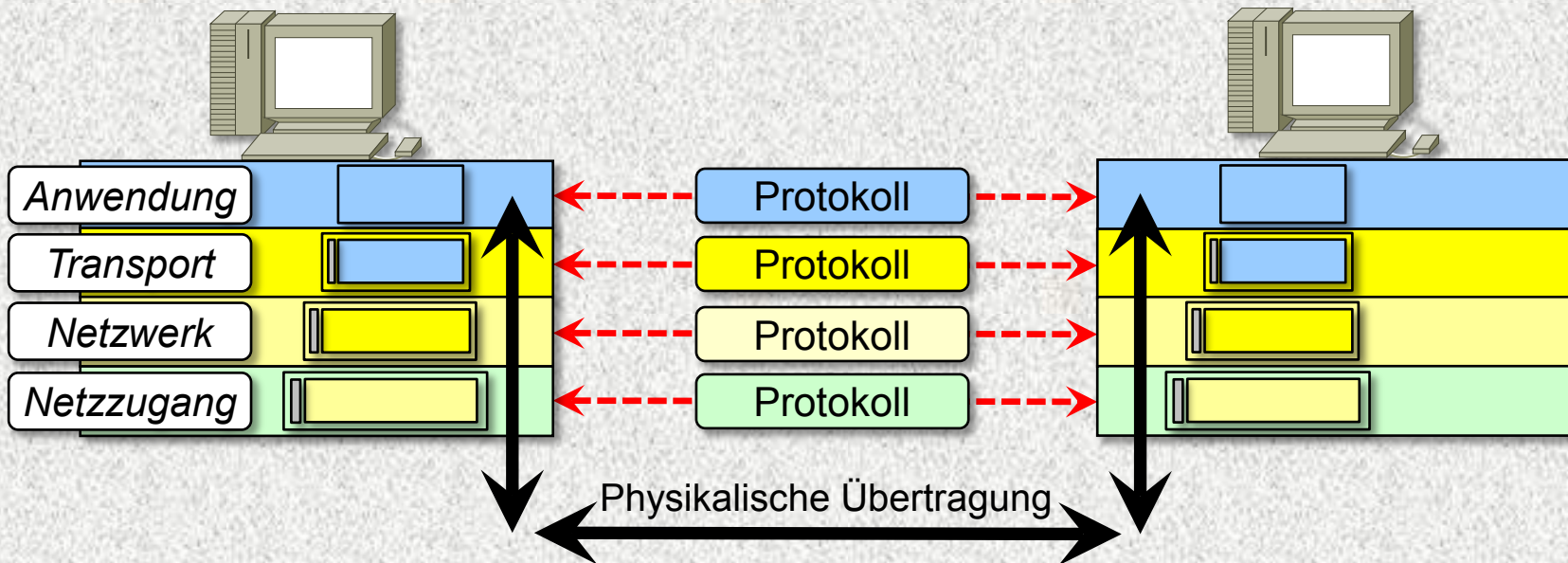
Paketvermittelte Datenübertragung



- Daten werden in kleine Pakete verpackt
- Analog zum Postverkehr
 - Vollständige Absender- und Zieladresse enthalten
 - Paketweiterleitung immer zum nächsten Netzknoten
- Vermittlungsstellen sehen nur Pakete, keine „Verbindungen“ [T96]
 - Verbindungslose Paketweiterleitung
 - Nur Endsysteme ordnen ggf. Pakete einer „Verbindung“ zu

[T96] A. Tanenbaum, “Computer Networks”, 3rd Edition, Prentice Hall, 1996.

- Datenübertragung zwischen Systemen ist eine komplexe Aufgabe
- Protokollstack mit bestimmten Aufgaben je Schicht [T96]
 - Streng **hierarchisch**:
Schicht n bietet **Dienst** (Service) für Schicht $n+1$, nutzt den von Schicht $n-1$
 - **Logische** Kommunikation der jeweiligen Schichten mittels **Protokoll**

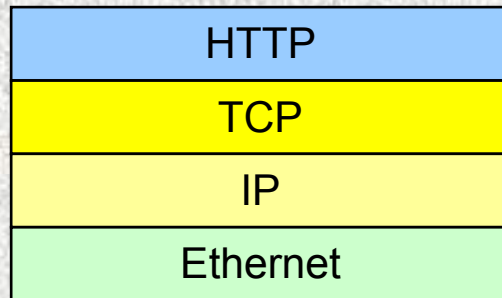


[T96] A. Tanenbaum, "Computer Networks", 3rd Edition, Prentice Hall, 1996.

Theorie und Praxis im Vergleich

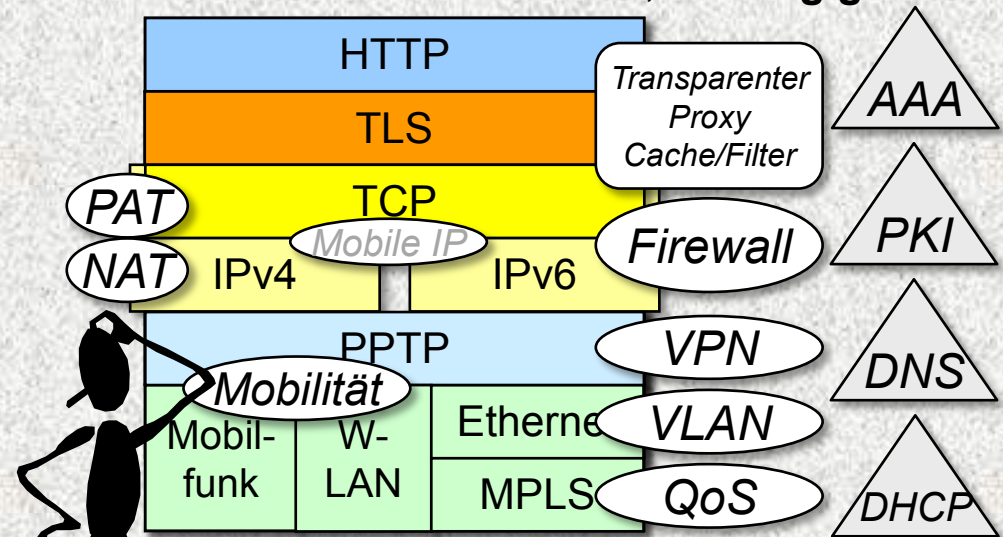
Theorie (der Idealfall)

- Alles **einfach** und **übersichtlich**



Praxis (der Normalfall)

- Erheblich komplizierter
- **Zwischenschichten, Abhängigkeiten**



HTTP: Hypertext Transfer Protocol
 IPvX: Internet Protocol, Version X
 MPLS: Multi-Protocol Label Switching
 NAT/PAT: Network/Port Address Translation
 PPTP: Point-to-Point Tunneling Protocol
 QoS: Quality of Service
 TLS: Transport Layer Security
 VLAN: Virtual Local Area Network
 VPN: Virtual Private Network
 WLAN: Wireless Local Area Network

AAA: Authentication, Authorization, Accounting
 DHCP: Dynamic Host Configuration Protocol
 DNS: Domain Name System
 PKI: Public Key Infrastructure

Bereits das heutige Internet ist sehr kompliziert

■ Wie lässt sich das Future Internet **realisieren** [F07]?

■ **Evolutionäre Ansätze**

- Kontinuierlicher Prozess
- Bestehende Strukturen **anpassen**

■ **Revolutionäre Ansätze**

- Von Grund auf neu beginnen
- Bestehende Strukturen **komplett ersetzen**

[F07] A. Feldmann, "Internet Clean-Slate Design: What and Why?", ACM SIGCOMM CCR, 37-3, 2007.

- Motivation und Einführung
- Wie funktioniert das aktuelle Internet?
- Ansätze zum Future Internet
- **Ausgewählte Konzepte**
 - Evolutionäre Ansätze
 - Revolutionäre Ansätze
- Der Weg zum Future Internet
- Was wird sich durchsetzen?
- Zusammenfassung und Ausblick

■ Protokollerweiterung

- Neue Funktionalitäten zu Protokoll hinzufügen

■ Vorteil

- Relativ einfach realisierbar

■ Nachteile

- Erfordert Aushandlung von Protokolleigenschaften
- Abwärtskompatibilität
 - ⇒ viele Kombinationen
 - ⇒ **viele mögliche Testfälle**
- Versteckte Abhängigkeiten möglich

■ Beispiel: TCP-Erweiterungen

Nur eine kleine Auswahl [A09]

Erweiterung	Einstellungen
Selektive Quittung	Ja /Nein
Fast Retransmission	Ja /Nein
Fast Recovery	Ja /Nein
Window Scaling	Ja /Nein
Überlastkontrolle	Standard/High-Speed/Wireless/...
Zeitstempel	Ja /Nein
TCP for Transactions	Ja/ Nein
Multipath Transfer	Ja/ Nein

Fettdruck: Default aktueller Implementierungen

[A09] M. Allman, V. Paxson, E. Blanton, "TCP Congestion Control", IETF, RFC 5681, 9/2009.

■ Protokollaustausch

- Protokoll einer Schicht wird gewechselt

■ Vorteil

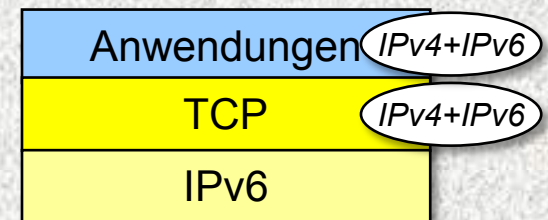
- Im Idealfall: keine Änderungen an anderen Schichten

■ Nachteil

- In der Praxis: häufig doch Anhängigkeiten ☹

■ Beispiel: IPv4 → IPv6

- **Problem:** IPv6-Adressen sind länger
- TCP arbeitet mit IP-Adressen
 - ⇒ **Anpassung von TCP** [D98]
- Anwendungen arbeiten (oft) mit IP-Adressen
 - ⇒ **Anpassung der Anwendungen**



Was ist mit schichtenübergreifenden Interaktionen?

[D98] S. Deering, R. Hinden, "Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification", IETF, RFC 2460, 12/1998.

■ Cross-Layer Optimization [S05]

- Eingriff in mehrere Schichten
- Schichtenübergreifende Interaktionen möglich

■ Vorteil

- **Schichtenübergreifende Problemlösungen**
- Besonders: Mobilität und QoS

■ Nachteil

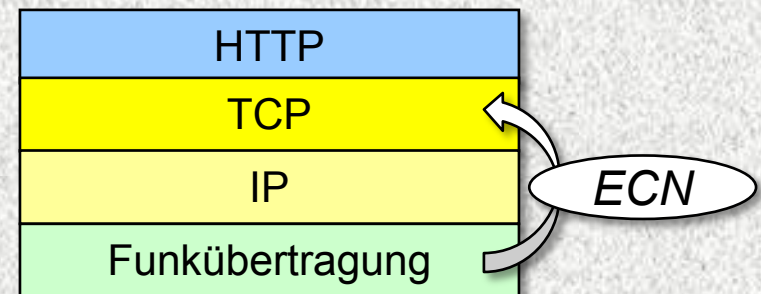
- Nochmals höhere **Komplexität**

■ Beispiel: Funkübertragung

- **Bitfehler** \Rightarrow Paketverlust
- TCP: Paketverluste \equiv Überlast
 - Datenrate wird gesenkt \Rightarrow Schlechter Durchsatz

■ Explicit Congestion Notification (ECN)

- Unterscheidung Überlast/Bitfehler
- **Durchsatzverbesserung**



Weitere Komplexitätssteigerung \Rightarrow flexiblerer Ansatz?

[S05] V. Srivastava, M. Motani, "Cross-Layer Design: A Survey and the Road Ahead", IEEE Comm. Mag., 12/2005.

Ansätze zum Future Internet: Revolutionäre Ansätze

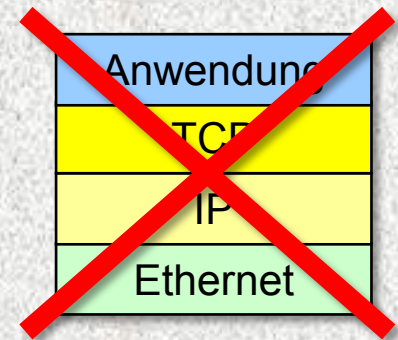
- Motivation und Einführung
- Wie funktioniert das aktuelle Internet?
- Ansätze zum Future Internet
- **Ausgewählte Konzepte**
 - Evolutionäre Ansätze
 - **Revolutionäre Ansätze**
- Der Weg zum Future Internet
- Was wird sich durchsetzen?
- Zusammenfassung und Ausblick

Was bedeutet „Clean Slate“?

„to start with a clean slate“ \equiv „einen neuen Anfang machen“ [D12]

■ Clean Slate für das Future Internet [F07]:

- Weg vom starren Schichtenmodell
- Komplette Neuentwicklung **ohne Altlasten**
- Bisherige Annahmen **neu überdenken** ...
- ... und dem Stand der Technik anpassen



Wichtige Clean-Slate-Ansätze für das Future Internet?

[D12] <http://dict.cc> Deutsch-Englisch-Wörterbuch, 2012.

[F07] A. Feldmann, "Internet Clean-Slate Design: What and Why?", ACM SIGCOMM CCR, 37-3, 2007.

■ Im Folgenden

Überblick über drei aktuell diskutierte **Konzepte**

■ Funktionale Komposition

■ Content-Centric Networking

■ Virtualisierung von Netzwerken

■ Sinnvolle **Kombination** und **paralleler Einsatz** möglich

Paradigmenwechsel [H10]:

„Funktionale Komposition statt starren Protokollstack“

■ Grundidee

- **Funktionale Blöcke (FB):** Wiederverwendbare Bausteine mit einfachen Funktionalitäten
- **Komposition:** FBs nach Bauplänen (Workflows) kombinieren

■ Dynamik möglich

- Kompositionen nach Bedarf
- Dynamisch anpassbar
- ⇒ Sehr hohe **Flexibilität**

■ Analogon: Lego-Steine



Bilderquelle: Wikimedia Commons

[H10] C. Henke, A. Siddiqui, R. Khondoker, “Network Functional Composition: State of the Art”, IEEE ATNAC, 11/2010.

■ Funktionalitäten in FBs aufteilen

Möglich: Neuer FB durch Verbund von FBs

■ Komposition an Anforderungen ausrichten

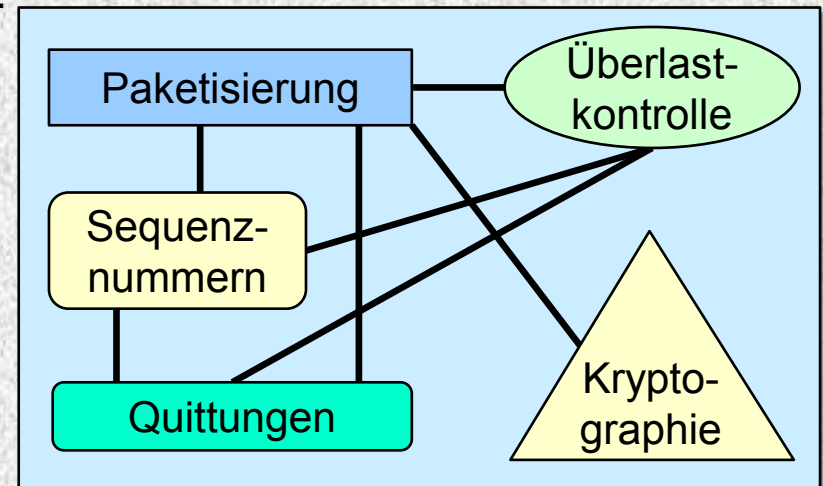
■ Beispiel:

– Anwendung definiert Eigenschaften:

„Zuverlässiger Bytestrom mit Überlastkontrolle“

– Möglich durch Komposition von:

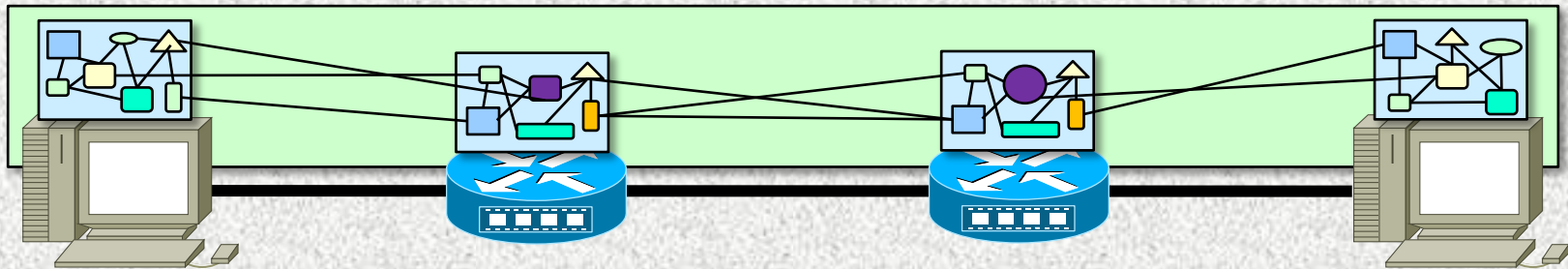
- Paketisierungs-FB (Verbund-FB mit Segmentierung, Queuing, Wiederholungen, etc.)
- Sequenznummern-FB
- Quittungs-FB
- Überlastkontroll-FB



■ Anpassungen möglich

z.B. Vertraulichkeit gewünscht \Rightarrow Kryptographie-FB hinzufügen

- **Einfacher Fall: Komposition von FBs auf dem gleichen Knoten**
 - Ersetzung von Protokollstack/Schichten auf einem Gerät
 - Flexible Anpassung des Knotens
- **Verteilt: Komposition von FBs über mehrere Knoten im Netzwerk**
 - Neue Dienste im Netzwerk selbst (nicht mehr nur „Paketweiterleitung“)
 - Netzwerk an neue Anforderungen anpassbar, z.B.
 - Reservierungen \Rightarrow QoS
 - Cache für Inhalte \Rightarrow Skalierbarkeit
 - Kompression \Rightarrow Anpassung für Mobilfunk
 - ...



■ Wann wird Komposition durchgeführt?

- **A priori** (beim Design) [M11] ⇒ Einfach, aber weniger flexibel
- **Dynamisch** (während der Laufzeit) [D07] ⇒ Flexibel, aber aufwendiger

■ Verteilte Funktionale Komposition

– Signalisierung von Workflows

- In-band ⇒ verbindungslos [B03]
 - Paketheader: Liste von Knoten und deren zuständige FBs
- Out-of-band ⇒ verbindungsorientiert [G07]
 - Verbindung wird vorab aufgebaut ⇒ Verbindungs-ID
 - Paketheader: Enthalten nur noch Verbindungs-ID

– Sicherheit

Ausführung von fremden FBs im Netzwerk [S11]

[B03] Braden, Faber, Handley, “From Protocol Stack to Protocol Heap – Role-Based Architecture”, ACM SIGCOMM CCR, 33-1, 2003.

[D07] Dutta et.al., “The SILO Architecture for Services Integration, control, and Optimization for the Future Internet”, IEEE ICC, 2007.

[G07] Ganapathy, Wolf, “Design of a Network Service Architecture”, IEEE ICCCN, 2007.

[M11] Martin, Völker, Zitterbart, “A Flexible Framework for Future Internet Design, Assessment, and Operation”, Comp. Net. 55, 2011.

[S11] Şimşek, “Security Challenges of Functional Composition”, VDE/ITG Beyond IP –Security for the Future Internet, 2011.

■ Fazit

- Funktionale Komposition bringt **Flexibilität**
- Macht **Lösung** der Herausforderungen **einfacher**

■ Offene Punkte

- **Flexibilität** ⇔ **Aufwand**
 - Dynamische Komposition?
 - Verteilte Funktionale Komposition?
 - **Sicherheit**
- ⇒ Gegenstand zahlreicher Forschungsprojekte

Vierversprechender Ansatz, aber Details noch zu klären

Paradigmenwechsel [J12]:

„Inhalte statt Orte“

■ Beispiel

- Nutzer benötigt Installations-CD von Kubuntu Linux
 - ⇒ Anfrage an Server „*releases.ubuntu.com*“ (steht in England) nach Datei „*kubuntu-11.10-alternate-amd64.iso*“
- Nutzer muss **Inhalt** (Content) und **Standort** kennen
 - Ort ist ggf. nicht günstig (Nutzer in Australien, Server in England)
 - Skalierbarkeit (viele Nutzer wollen den gleichen Inhalt)

■ Content-Centric Networking

- Nutzer gibt nur gewünschten Inhalt an
- Netzwerk ermittelt passenden Standort (nah, kostengünstig, etc.)
- Möglichkeit zur Zwischenspeicherung (Caching)

[J12] Van Jacobson et.al., “Networking Named Content”, Communications of the ACM, 55-1, 1/2012.

■ Pakettypen

- **Interest** – Anfrage nach Inhalt (Content)
- **Data** – Antwort mit dem Inhalt selbst

■ Inhalte

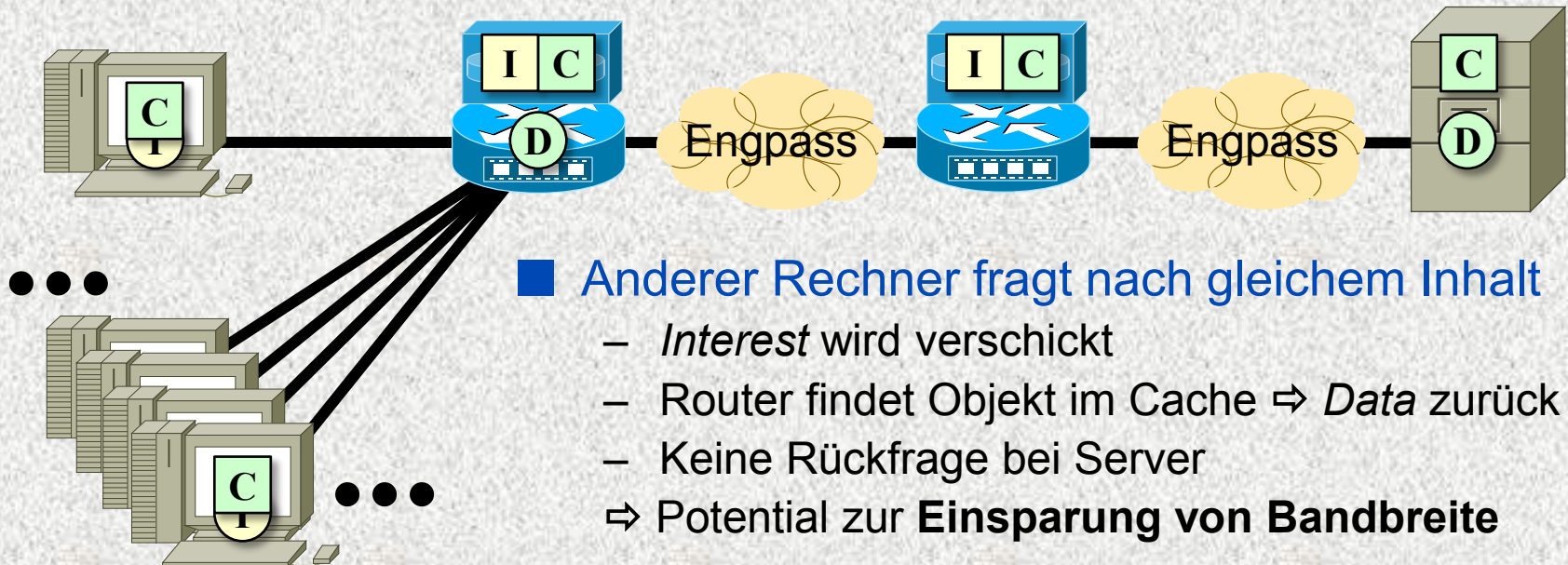
- Objekte mit eindeutigen, hierarchischen **Namen**, z.B. */ubuntu.com/kubuntu-11.10-alternate-amd64.iso/...*
- Hierarchie ermöglicht effizientes Routing
- **Routing basiert auf Namen**, nicht auf Adressen

Content-Centric Networking Beispiel

■ Nachfrage nach Inhalt

- *Interest* für **I** Content **C** wird verschickt
- Router speichern *Interest* **I** und leiten *Interest* weiter
- Server schickt *Data* **D** mit Content **C** zurück
- Router kennen Rückweg:

Interesse wird jeweils gelöscht und **Content in Cache** kopiert



■ Anderer Rechner fragt nach gleichem Inhalt

- *Interest* wird verschickt
 - Router findet Objekt im Cache \Rightarrow *Data* zurück
 - Keine Rückfrage bei Server
- \Rightarrow Potential zur **Einsparung von Bandbreite**

■ Vorteile

- **Skalierbarkeit**
 - Inhalte werden in **Cache** zwischengespeichert
 - Verteilung von Inhalten ⇒ ca. 70 bis 80% des Datenverkehrs [I12]
- **Verfügbarkeit** und **Mobilität** [J12]
 - Kopien der Inhalte in Caches
 - Anfragen über mehrere Anschlüsse senden
- **Sicherheit** [J12]
 - Sicherheit explizit in Konzept aufgenommen
 - Daten werden immer signiert ⇒ auch zur Integritätsprüfung
 - Vertraulichkeit durch Verschlüsselung

■ Nachteile

Deutlich aufwendiger als TCP/IP-basierte Kommunikation

⇒ Effiziente Realisierbarkeit?

[I12] Ipoque Internet Observatory (<http://www.internetobservatory.net/>), Aktuelle Daten für Europa (30 Tage), 04.03.2012.

[J12] Van Jacobson et.al., “Networking Named Content”, Communications of the ACM, 55-1, 1/2012.

■ Fazit

Bringt deutliche Fortschritte für wichtiges Anwendungsszenario

■ Offene Punkte

- **Effiziente Algorithmen** für Routing und Forwarding [Z10]
 - Performanz von **Anwendungen** [J12]
 - **Sicherheit** in der Praxis [Z10]
 - Insbesondere: „Proof of Concept“ in größeren Umgebungen [T12]
- ⇒ Gegenstand von aktuellen Forschungsprojekten

Komplett neuer Netzwerkansatz ⇒ realisierbar?

[Z10] L. Zhang et.al., “Named Data Networking (NDN) Project”, Research Agenda, 10/2010.

[J12] V. Jacobson et.al., “Networking Named Content”, Communications of the ACM, 55-1, 1/2012.

[T12] G. Tyson et.al., “Juno: An Adaptive Delivery-Centric Middleware”, IEEE CCNC, 1/2012.

Paradigmenwechsel [C10]:

„Logische statt physikalische Netzwerke“

■ Analogon: Server-Virtualisierung

- Viele virtuelle Server auf wenigen physikalischen Systemen
- Wenig Hardware mit guter Auslastung ⇒ **geringere Kosten**

■ Übertragung auf Netzwerke

- Eine physikalische Infrastruktur
- Viele virtuelle Netzwerke darüber
 - Flexibel konfigurierbar (Software-basiert, automatisierbar)
 - Dynamisch anpassbar

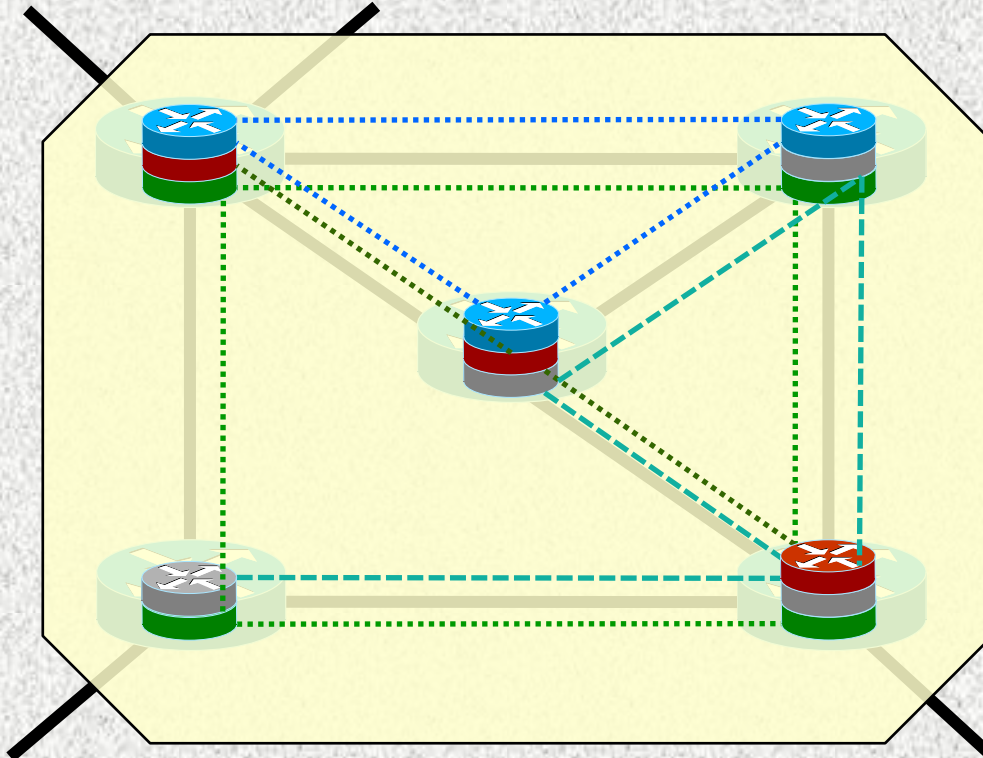
■ Ermöglicht **Realisierung grundlegend neuer Ansätze**

Parallel zu bestehenden/anderen Netzwerken

[C10] Chowdhury, Boutaba, “A Survey of Network Virtualization”, Elsevier Computer Networks 54-5, 2010.

Beispiel für Virtualisierung von Netzwerken

■ Grundlage: Physikalisches Netzwerk



■ Darauf aufbauend: virtuelle Netzwerke

– IPv4



– IPv6



– Content-Centric Networking



– Weiterer Ansatz



– ...

„... to let 1000 networks bloom“ [V09]

[V09] L. Völker et.al., “A Node Architecture for 1000 Future Networks”, IEEE ICC, 2009.

■ Physikalischer Router

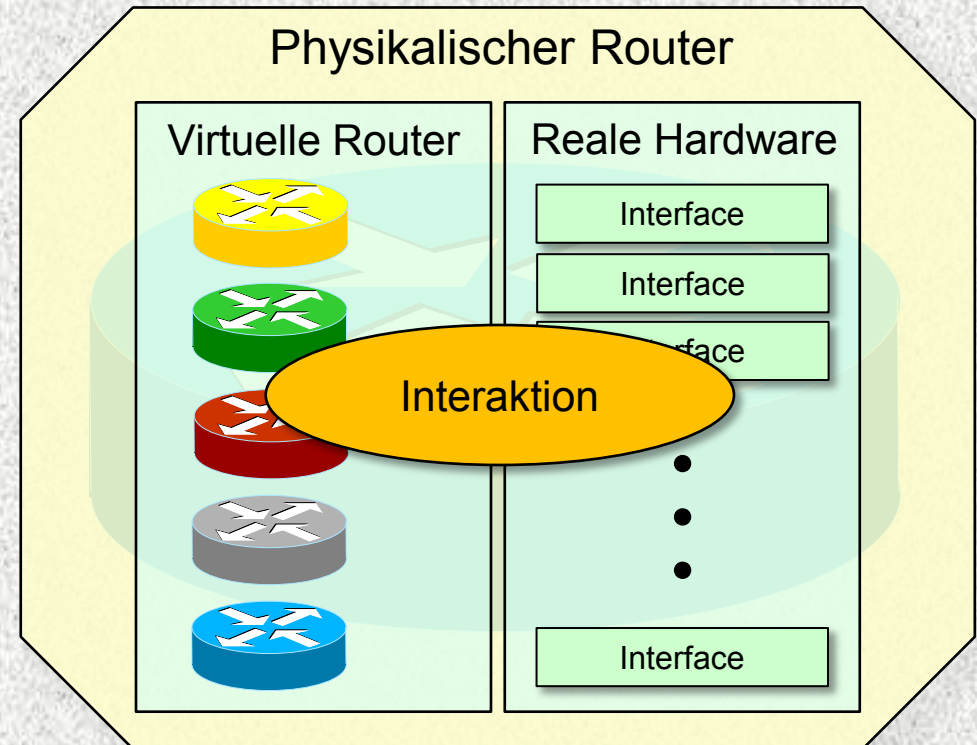
- Verwaltet reale Hardware
- und virtueller Router

■ Virtueller Router

- Virtuelle Maschine
- Realisiert Ansatz
 - IPv4, IPv6,
 - Content-Centric Network
 - ...

■ Herausforderung

- **Nutzung der Hardware**, um Daten **schnell** und **effizient** weiterzuleiten
- Ansatz: OpenFlow [M08]



[M08] N. McKeown, "OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks", ACM SIGCOMM CCR, 38-2, 4/2008.

■ Virtualisierung bringt

- **Reduktion der Kosten**
 - Nur ein physikalisches Netzwerk
 - Keine zusätzliche Hardware für weitere Netzwerke
- Möglichkeit zum gleichzeitigen Einsatz verschiedener Ansätze

■ Offene Punkte

- Architektur virtualisierter Router [V09] ⇒ **Performanz**
- Netzmanagement für virtuelle Netzwerke [B11]
 - Virtuelle Topologien
 - Live-Migration von Routern

Mit Virtualisierung ist Realisierung neuer Netzansätze möglich

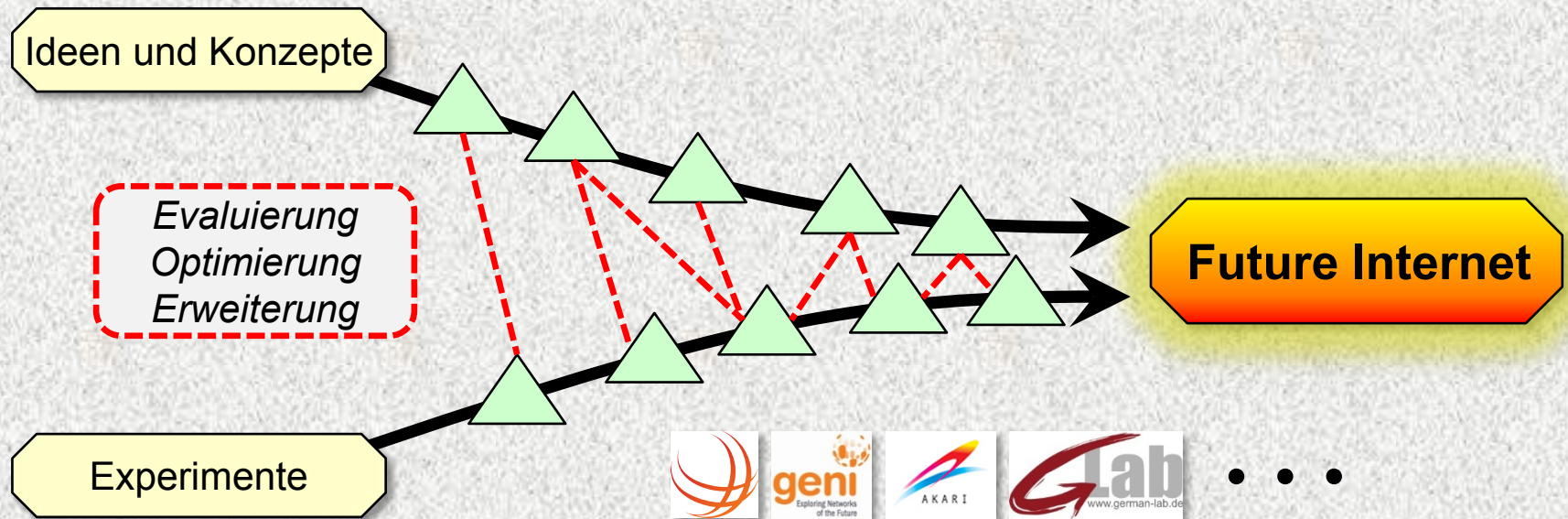
[B11] Bozakov, “Architecture and Algorithms for Virtual Routers as a Service”, IEEE IWQoS, 2011.

[V09] L. Völker et.al., “A Node Architecture for 1000 Future Networks”, IEEE ICC, 2009.

- Motivation und Einführung
- Wie funktioniert das aktuelle Internet?
- Ansätze zum Future Internet
- Ausgewählte Konzepte
- **Der Weg zum Future Internet**
- Was wird sich durchsetzen?
- Zusammenfassung und Ausblick

■ Allgemeiner Konsens [C07,G07,T09]:

- Ansätze müssen in der **Realität** evaluiert werden
- Experimenten in realistischen **Testbettumgebungen** ⇒ Projekte
- Ermöglicht Evaluierung konkurrierender Ideen durch Vergleiche



[C07] Clark, Shenker, Falk, “GENI Research Plan”, Research Coordination Working Group, 4/2007.

[G07] Gavras et.al., “Future Internet Research and Experimentation: The FIRE Initiative”, ACM SIGCOMM CCR, 37-3, 2007.

[T09] Tran-Gia et.al., “Studien- und Experimentalplattform für das Internet der Zukunft”, G-Lab White Paper, 1/2009.

Multi-Homing im Kontext des Future Internets

- **Bereits heute: Geräte mit mehreren Netzzugängen**
Beispiel: Smartphone (UMTS, WLAN)
⇒ Multi-Homing
- **Im Future Internet eher Regelfall statt Ausnahme**
- **Verallgemeinerung der Ideen aus der Habilitationsschrift**
 - Multi-Path Transport [B12a]
 - Überlegungen zu Fairness [B12b] ⇒ Clean Slate



Bildquelle: HTC

Wissenstransfer von CMT-SCTP zum Future Internet

CMT: Concurrent Multipath Transfer SCTP: Stream Control Transmission Protocol

[B12a] Becke, Dreibholz, Adhari, Rathgeb, "A Future Internet Architecture supporting Multipath Comm. Netw.", IEEE NOMS 2012.

[B12b] Becke, Dreibholz, Adhari, Rathgeb, "On the Fairness of Transport Protocols in a Multi-Path Environment", IEEE ICC 2012.

Was wird sich durchsetzen?

- Motivation und Einführung
- Wie funktioniert das aktuelle Internet?
- Ansätze zum Future Internet
- Ausgewählte Konzepte
- Der Weg zum Future Internet
- **Was wird sich durchsetzen?**
- Zusammenfassung und Ausblick

■ Zwei Strategien

- Evolutionäre Ansätze
- Revolutionäre Ansätze

Future Internet

Industrie/Provider-Sicht:

■ Evolutionäre Entwicklung

- **Interoperabilität** mit bestehenden Systemen
- Sicherung von Investitionen

■ Verbessertes TCP/IP-Internet

Forscher-Sicht:

■ Revolutionäre Entwicklung

- Von Grund auf neu beginnen
- Bestehende Strukturen **komplett ersetzen**

■ Neues Clean-Slate Internet

[G07] Gavras et.al., “Future Internet Research and Experimentation: The FIRE Initiative”, ACM SIGCOMM CCR, 37-3, 2007.

Evolutionäre Sicht von Industrie und Providern

■ IPv4

- Eingeführt am 01.01.1983 [P81]
- Vorhandene, leistungsfähige **Hardware**

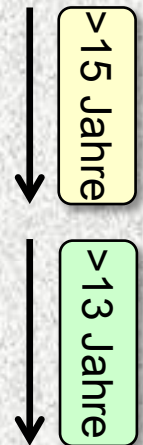
■ IPv6

- Standardisiert: 12/1998 [D98]
- Verwendet parallel zu IPv4:
 - Im Deutschen Forschungsnetz: seit wenigen Jahren
 - Für Endkunden in Deutschland: läuft langsam an

■ Folgerung: Bis zur Ersetzung von IPv6 vergehen Jahrzehnte

■ Auch TCP wird noch lange bleiben

- Effiziente **Hardwareunterstützung** (Offloading) ⇒ **Performanz**
- Enger **Verbund mit Betriebssystem**



Der Kern des Internets wird weiter auf TCP/IP basieren

[P81] J. Postel, "NCP/TCP Transition Plan", IETF, RFC 801, 11/1981.

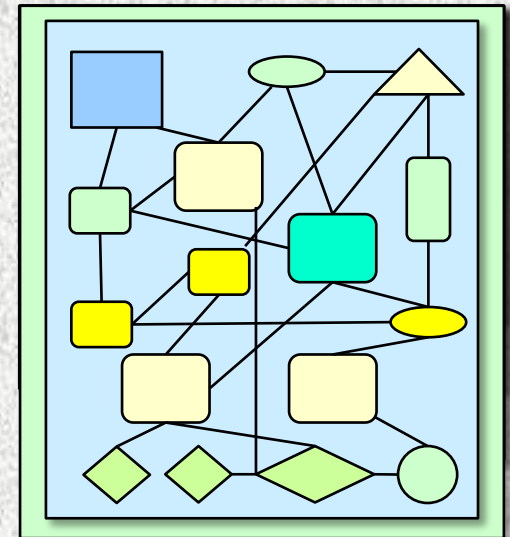
[D98] S. Deering, R. Hinden, "Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification", IETF, RFC 2460, 12/1998.

■ Aktuell

- Service-orientierte Architekturen verwenden bereits Funktionale Komposition ...
- ... **in anwendungsnahen Schichten**
- Bringt erforderliche **Flexibilität** für Lösungen

■ In Zukunft

- **Flexibilität** auch **für untere Schichten** zwingend notwendig
- Ersetzung dieser Schichten



Funktionale Komposition ersetzt Protokollstacks vollständig

Synthese: Kombination beider Ansätze

■ Ansätze als **ergänzend** betrachten, **nicht als gegensätzlich** [G07]

- **TCP/IP-Internet weiterentwickeln**
 - Weiternutzung vorhandener Hard- und Software
- **Clean-Slate-Ansätze parallel dazu**
 - Offene Punkte lösen \Rightarrow Evaluierung
 - Verschiedene Netzansätze für verschiedene Anwendungen

■ **Parallelbetrieb mittels Virtualisierung auf einer Infrastruktur**



Jeweils „bestes“ Internet für Anwendung verwenden

[G07] Gavras et.al., “Future Internet Research and Experimentation: The FIRE Initiative”, ACM SIGCOMM CCR, 37-3, 2007.

- Virtualisierung ermöglicht „neue“ Netzwerke
 - Ohne zusätzliche Hardware
 - **Flexibilität** für neue Ansätze
- Tunnelung über IP (einfach, wenig performant)
- Stufe 1: **Virtuelle Pfade**
 - Mit MPLS **protokollunabhängig** möglich
 - Stand der Technik: **100 Gbit/s** inkl. **QoS**
 - ⇒ Übertragung zwischen Standorten
- Stufe 2: Neue **Funktionalitäten im Netzwerk**
 - Evtl. mittels **OpenFlow?**
 - Erste Hardware verfügbar ⇒ **Performanz?**

Brocade MLX MPLS-Router

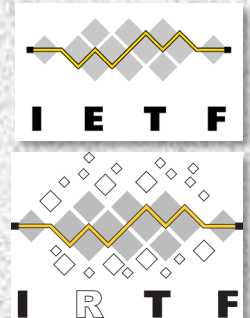


Bildquelle: Brocade

Virtualisierung kommt zunächst mit virtuellen Pfaden

MPLS: Multi-Protocol Label Switching

- Neuansätze durch Virtualisierung ⇒ z.B. Content-Centric Networking
- **Verteilung von Inhalten** ist sehr wichtiges Anwendungsszenario
- Content-Centric Networking ist mögliche Lösung
 - Bringt **Skalierbarkeit, Verfügbarkeit** und **Mobilität**
 - **Aktivitäten in der IETF**
 - Als Forschungs-Arbeitsgruppe in Gründung (IRTF):
Information-Centric Networking Research Group (ICNRG)
 - Details zu effizienter Realisierung und Sicherheit noch zu klären



Vielversprechender Ansatz

IETF: Internet Engineering Task Force IRTF: Internet Research Task Force

- Motivation und Einführung
- Wie funktioniert das aktuelle Internet?
- Ansätze zum Future Internet
- Ausgewählte Konzepte
- Der Weg zum Future Internet
- Was wird sich durchsetzen?
- **Zusammenfassung und Ausblick**

■ Herausforderungen des Future Internets:

- Mobilität, QoS, Sicherheit, Verfügbarkeit, Skalierbarkeit
- **Flexibilität**, um auf sich ändernde Anforderungen zu reagieren

■ Zwei Strategien:

- **Evolutionäre Ansätze** von Industrie/Providern
Bestehendes langsam verbessern
- **Revolutionäre Ansätze** von Forschern
Neue Impulse durch Clean-Slate-Ideen:
Funktionale Komposition, Content-Centric Networking, Virtualisierung

■ Durch **Kombination** lassen sich die Herausforderungen bewältigen

- Bestehende Systeme lassen sicher weiterverwenden
- Neue Ansätze können parallel eingesetzt werden, reifen ...
- ... und ggf. langfristig das Bestehende ersetzen

- Das Internet wird sich weiterentwickeln
- Aber der Weg zum Future Internet ist noch lang, herausfordernd ...



- ... und teilweise noch unbestimmt ⇒ es gibt **noch sehr viel zu tun!**

Neste holdeplass er ... I.T. Fornebu

■ Meine nächste Herausforderung:

- Projekt „**Resilient Networks**“ am Simula Research Lab, Fornebu (Oslo)
- Aufbau eines multi-homed Internet-Testbetts mit Mobilfunkanbietern
- Ziele: **Mobilität** (Mobilfunk), **Verfügbarkeit** von Netzwerk und Diensten



<http://www.simula.no>