WIK-Consult & zafaco • Gutachten

für die Bundesnetzagentur

Qualitätsparameter

Autoren:
Kulenkampff, G. / Hackbarth, K. / Ott, J. / Plückebaum, T. / Portugall, O.
unter Mitarbeit von Ockenfels, M.

Bad Honnef, 01.12.2023

Impressum

WIK-Consult GmbH
Rhöndorfer Str. 68
53604 Bad Honnef
Deutschland

Tel.: +49 2224 9225-0
Fax: +49 2224 9225-63
E-Mail: info@wik-consult.com
www.wik-consult.com

Vertretungs- und zeichnungsberechtigte Personen

Geschäftsführerin	Dr. Cara Schwarz-Schilling
Direktor Abteilungsleiter Smart Cities/Smart Regions	Alex Kalevi Dieke
Direktor Abteilungsleiter Netze und Kosten	Dr. Thomas Plückebaum
Direktor Abteilungsleiter Regulierung und Wettbewerb	Dr. Bernd Sörries
Leiter der Verwaltung	Karl-Hubert Strüver
Vorsitzender des Aufsichtsrates	Dr. Thomas Solbach
Handelsregister	Amtsgericht Siegburg, HRB 7043
Steuer-Nr.	222/5751/0926
Umsatzsteueridentifikations-Nr.	DE 329 763 261

Stand: August 2022

zafaco GmbH
Münchener Str. 101/39
85737 Ismaning
Deutschland

Tel.: +49 89 820308 200
Fax: +49 89 820308 299
E-Mail: info@zafaco.de
www.zafaco.de

Geschäftsführende Gesellschafter:

Gründer und Geschäftsführer	Christoph Sudhues
Geschäftsführer Technik	Bernd Oliver Schöttler
Handelsregister	Amtsgericht München, HRB 174425
Umsatzsteueridentifikations-Nr.	DE 260 524 045

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **IV**

Tabellenverzeichnis **V**

Abkürzungsverzeichnis **VI**

Executive Summary **i**

1 Hintergrund und Zielsetzung **1**

1.1 Gegenstand des Gutachtens und rechtlicher Hintergrund 1

1.2 Dienste der Mindestversorgung als Ausgangspunkt der Analyse 1

1.3 Methodische Herangehensweise und Aufbau der Studie 3

2 Qualität von Diensten – Mindestversorgung, technische Konzepte und Nutzererfahrung **5**

2.1 Zu untersuchende und bereits verankerte Qualitätsparameter im Kontext Mindestversorgung 5

2.2 Internet und Qualitätsparameter im Kontext des Umfelds von Regulierung und Standardisierung 7

2.2.1 Dienstequalität und Standardisierungsbemühungen von Netzbetreibern, Herstellern und entsprechenden Gremien 7

2.2.2 Dienstequalität und Netzneutralität 10

2.3 Qualität und Quality of Service (QoS) 11

2.3.1 Konzepte und Abgrenzungen 11

2.3.2 Dienstequalität im Kontext von Kundenschutz 16

2.4 Quality of Experience (QoE) 19

2.4.1 Bestimmungsfaktoren der QoE 19

2.4.2 QoE-Methoden und Metriken 20

2.5 QoE, QoS und angestrebte Mindestversorgung 24

3 Dienste der Mindestversorgung – Dienstekategorien und ihre charakterisierenden Qualitätsanforderungen **26**

3.1.1 Bereitstellung von Informationen (uni-direktional) 26

3.1.2 Kontinuierliche digitale Audio- und Videosignale und Echtzeitanforderungen 27

3.1.3 Zeitliche Dimension, Interaktivität und Echtzeit 28

3.1.4 Dialogorientierte Dienste 29

3.1.5 Unterscheidung der Dienstekategorien „mit kontinuierlichen Datenströmen“ und „mit diskreten Datenvolumina“ 30

3.2 Relevanz der zu untersuchenden QoS-Parameter im Kontext der abgeleiteten Dienstekategorien 30

3.2.1 Zusammenhang Datenübertragungsrate und Qualität 30
3.2.2 Zusammenhang Paketverlustrate und Qualität 31
3.2.3 Zusammenhang Latenz und Qualität 33
3.2.4 Zusammenhang Jitter und Qualität 34
3.2.5 Sonstige QoS-Merkmale und Schlussfolgerungen 36
4 Realisierung von Internetdiensten – grundlegende transporttechnische Zusammenhänge 38
4.1 Charakterisierung von IP-Netzen 38
4.1.1 Best-Effort-IP-Netze versus qualitätsgesicherte Netze 38
4.1.2 Schichtenmodell und protokollbasierte Realisierung von Diensten 41
4.2 Bedeutung der Transportschicht für die Dienstequalität 43
4.2.1 Transportschicht mit TCP und UDP 43
4.2.2 Weiterentwicklungen im Bereich der Transportschicht 45
4.2.3 Qualitätsbezogene Mechanismen auf Ebene der Transportschicht 45
4.3 Handlungsparameter der Netzbetreiber zur Qualitätssicherung 49
4.3.1 Netzdimensionierung und Einsatz hochleistungsfähigen Equipments 51
4.3.2 Transportkapazität im Rahmen der Schichten 1 und 2 52
4.3.3 Monitoring der Network Performance 52
4.3.4 Warteschlangendimensionierung 52
4.3.5 Unterstützende Verfahren für Staukontrolle 53
4.3.6 Caching 55
4.4 Evidenz von Paketverlust und Jitter – vereinzelte Angaben zur Network Performance 56
5 Anwendungsschicht 61
5.1 Protokolle der Anwendungsschicht – Beispielhafte Darstellung 62
5.2 Funktion der Anwendungsschicht für die Qualität von Diensten mit kontinuierlichen Datenströmen – Instrumente zum Umgang mit Paketverlust und Latenz 63
5.2.1 Codecs 64
5.2.2 Jitterbuffer 65
5.2.3 Streamingbuffer 66
5.2.4 Adaptive Verfahren 67
5.2.5 Interdependenzen zwischen den QoS-Parametern 68
5.3 Weitere Verfahren zur Behebung von Paketfehlern bei interaktiven Diensten 69

6 Dienste der Mindestversorgung und Relevanz von Paketverlustrate und Jitter 73

6.1 Einordung der Dienste der Mindestversorgung in die Protokoll-Landschaft 73

6.2 Grenzwerte für Dienste mit diskreten Datenvolumina – verfügbare Angaben zu technischen Anforderungen der Dienste 75

6.3 Evaluierung von Grenzwerten für eine akzeptable Nutzererfahrung und ein Funktionieren der Dienste mit diskreten Datenvolumina 77

6.3.1 Paketverlust 77

6.3.2 Irrelevanz von Grenzwerten für Jitter bei Diensten mit diskreten Datenvolumina 77

6.4 Grenzwerte für Dienste mit kontinuierlichen Datenströmen 78

6.4.1 Verfügbare Grenzwerte zu Paketverlustrate und Jitter– Angaben von Produktanbietern und Stakeholdern 78

6.4.2 Einordnung der erhobenen Jitter-Grenzwerte 81

6.4.3 Einordnung der erhobenen Grenzwerte zur Paketverlustrate 82

6.5 Evaluierung von Grenzwerten für Dienste mit kontinuierlichen Datenströmen – QoE Metriken als Beurteilungsmaßstab 83

7 Möglichkeitsanalyse 87

8 Zusammenfassende Evaluation 92

Literaturverzeichnis 96

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Four viewpoints of quality of service	12
Abbildung 2:	Quality of service comprises network and non-network criteria	13
Abbildung 3:	Quality of Service (QoS), Quality of Experience (QoE) und Network performance	14
Abbildung 4:	Quality of Service Definition in Bezug auf die Erstreckung der Leistung	18
Abbildung 5:	Bestimmungsfaktoren der Nutzerzufriedenheit	20
Abbildung 6:	Uni-direktionale sowie primarily one-way Übertragung digitaler Inhalte	27
Abbildung 7:	Zeitliche Anforderungen der Dienste und Charakteristika von Datenströmen	28
Abbildung 8:	Bi- und multi-direktionale Kommunikation	29
Abbildung 9:	Datenvolumen und Anforderungen an die Datenübertragungsrate	31
Abbildung 10:	Paketverlust und Paketfehler	32
Abbildung 11:	Latenz als zeitliche Differenz von Paketversendung und Paketempfang	33
Abbildung 12:	Jitter als Variabilität der Verzögerung	35
Abbildung 13:	Internet: Inter-network und elementare Bestandteile des IP-Transportnetzes	40
Abbildung 14:	OSI-Schichtenmodell und TCP/IP basierte Protokolle	42
Abbildung 15:	Latenz – Ergebnisse der Breitbandmessung Desktop-App (Einzelmessungen) für das Berichtsjahr 2021/2022	59
Abbildung 16:	Latenz – Ergebnisse der Breitbandmessung Desktop-App (Einzelmessungen) für das Berichtsjahr 2021/2022	59
Abbildung 17:	Bisherige Protokoll-Landschaft – TCP und UDP anhand ausgewählter Beispiele	62
Abbildung 18:	Erweiterte Protokoll-Landschaft – UDP&QhttpHTTP/3 als Substitut zu TCP	63
Abbildung 19:	EIP-Modell-Werte als Funktion der Paketverluste und der Ende-zu-Ende-Verzögerung	68
Abbildung 20:	Dienste der Mindestversorgung – Gruppierung entsprechend der protokolltechnischen Umsetzung	74
Abbildung 21:	Dienste der Mindestversorgung mit diskreten Datenvolumina	76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	TCP und UDP im Vergleich	44
Tabelle 2:	Network Performance ausgewählter VoIP-Netzbetreiber	56
Tabelle 3:	Tolerierte Latenz [s] bei Videostreaming verschiedener Anwendungen	66
Tabelle 4:	Performance targets for audio and video applications	79
Tabelle 5:	Grenzwerte für ITU G.114 für Sprachtelefonie	79
Tabelle 6:	Akzeptable Sprachqualität und Beispielwerte konkreter Network Performance für VoIP	80
Tabelle 7:	Grenzwerte für Videokonferenzanwendungen	80

Abkürzungsverzeichnis

AQM	Active Queue Management
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit
BBR	Bottleneck Bandwidth and Round-trip Propagation Time
BEREC	Body of European Regulators for Electronic Communications, Gremium europäischer Regulierungsstellen für elektronische Kommunikation
bid.	bi-direktional
BSD	Berkeley Software Distribution, BSD-Socket als Bibliothek zur Interface-Programmierung von TCP/IP-Anwendungen
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
CPE	Customer Premise Equipment / Endkundenequipment
CPU	Central Processing Unit
CUBIC	Name eines Algorithmus zur Steuerung der Verkehrsüberlastung
d.h.	das heißt
DASH	Dynamic Adaptive Streaming over HTTP
DE-CIX	Deutsche Commercial Internet Exchange, Name des IXP in Frankfurt
DESI	Digital Economy and Society Index, Index für digitale Wirtschaft und Gesellschaft
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DSL	Digital Subscriber Line
EKEK	Europäischer Kodex für die elektronische Kommunikation
ETSI	European Telecommunications Standards Institute, Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen
evtl.	eventuell
FN	Fußnote
FTTx	Fibre to the x
ggf.	gegebenenfalls
GSM	Global System for Mobile Communications
HLS	HTTP Live Streaming
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure

i.d.R.	in der Regel
IAP	Internet Access Provider
ICMP	Internet Control Message Protocol
IP	Internet Protokoll
IPSec	Internet Protocol Security
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISO	International Organisation of Standardisation
IXP	Internet eXchange Point
KHz	Kilohertz
KI	Künstliche Intelligenz
KPI	Key Performance Indicator
lip-syn	Lippensynchron
MOS	Mean Opinion Score
ms	Millisekunde
MS	Microsoft
NP	Network Performance
OTT	Over-The-Top
PESQ	Perceptual Evaluation of Speech Quality
POLQA	Perceptual Objective Listening Quality Analysis
PSNR	Peak-Signal-to-Noise Ratio
PSTN	Public Switched Telephone Network
PTDN	Public Telecommunications Data Networks
PTT	Push-to-talk
QoS	Quality of Service
QUIC	Quick UDP Internet Connections
RED	Random Early Detection
RFC	Request for Comments
RTP	Real Time Protocol
RTSP	Real Time Streaming Protocol
SLA	Service Level Agreement
sog.	sogenannten

Sym.	Symmetrie
TCP	Transmission Control Protocol
TDM	Time-division Multiplexing
TKG	Telekommunikationsgesetz
TKMV	Telekommunikationsmindestversorgungsverordnung
TLS	Transport Layer Security
TOS	Type-of-Service-Feld
TTL	Time-to-live
TV	Television
UDP	User Datagram Protocol
UGC	User-generated content
VDSL	Very High Speed Digital Subscriber Line
VHCN	Very High Capacity Networks, Netze mit sehr hoher Kapazität
VoIP	Voice over Internet Protocol
VQEG	Video Quality Experts Group
WebRTC	Web Real-Time Communication
xDSL	x als Platzhalter für alle DSL-Versionen
z.B.	zum Beispiel

Executive Summary

Das vorliegende Gutachten untersucht, ob zur Grundversorgung mit einem Internetzugang neben der Datenübertragungsrate und der Latenz die Telekommunikationsmindestversorgungsverordnung (TKMV) noch weitere Qualitätsparameter wie Jitter oder die Paketverlustrate vorgeben sollten. Dazu sollen vor allem die Anforderungen für eine stete Ermöglichung und ein Funktionieren der Dienste der Grundversorgung analysiert werden.

Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt dabei auf den Qualitätsparametern Jitter und Paketverlustrate innerhalb der Schicht 3 (IP-Schicht). Dabei wird der Einfluss der QoS (Quality of Service)-Parameter sowohl in Bezug auf das Funktionieren der Dienste als auch auf die alltäglich akzeptable Nutzererfahrung untersucht. Darüber hinaus wird überprüft, ob und wenn ja welche weiteren QoS-Parameter – wie zum Beispiel Paketfehler – ggf. für die angestrebte Grundversorgung vorgegeben werden müssten. Abschließend wird der Aspekt der Implementierbarkeit weiterer technischer Mindestanforderungen im Kontext effizienten Verwaltungshandelns beurteilt.

Das Gutachten beschreibt dazu zunächst den Einfluss, den die Parameter Latenz, Jitter und Paketverlustrate auf IP-Ebene in einem warteschlangenbasierten Best-Effort-IP-Netz haben. Dabei ist eine diskriminierungsfreie Behandlung von Datenverkehren konstitutiv für das Best-Effort-IP-Netz. Diese Gleichbehandlung von Datenverkehren ist als Grundsatz auch in der Netzneutralitätsverordnung verankert. Diese setzt Bestrebungen, eine Qualitätssteuerung ausgewählter Dienste bzw. Verkehre (Spezialdienste) vorzunehmen, enge Grenzen, indem sie diesen eine strenge Begründungspflicht auferlegt. Im aktuellen TKG wurden jedoch strengere Maßnahmen zum Kundenschutz eingeführt, die den Internetzugangsanbietern Anreize setzen, dem Nutzer die kontrahierte Qualität auch innerhalb des Best-Effort-IP-Netzes zur Verfügung zu stellen.

Die netzbezogenen Qualitätsparameter (Network Performance Parameter) werden definiert und gegenüber dem Begriff und den Bestimmungsfaktoren der Nutzerzufriedenheit abgegrenzt. Letztere werden dabei nicht nur von der Wertschöpfung des jeweiligen Internetzugangsanbieters (IP-Netz des Anbieters) beeinflusst. Da die Qualität des Dienstes aus Nutzersicht durch sämtliche Komponenten bestimmt wird, die an der Wertschöpfungskette beteiligt sind, spielen weitere Komponenten, die über das Netz des Internetzugangsanbieters hinausgehen, ebenfalls eine Rolle für die erzielte bzw. erzielbare Nutzererfahrung. Dazu zählen die Leistungsfähigkeit von Diensteservern, die Zusammenschaltung von Netzen, sofern die nachgefragten Dienste aus anderen Netzen zugeführt werden müssen, sowie die Leistungsfähigkeit des Heimnetzes und der Ausrüstung auf Seiten des Nutzers. Durch die große Produktdifferenzierung der Internetdienste spielt auch der Erfahrungshintergrund des Nutzers sowie der Kontext der Dienstenutzung eine Rolle, wenn dieser die Ende-zu-Ende Dienstequalität beurteilt.

Metriken zur wahrgenommenen Dienstequalität (Quality of Experience, QoE) – sog. QoE-Metriken – stellen darauf ab, eine Nutzererfahrung zu beschreiben. Diese QoE-Metriken und die dahinter stehenden Analysen beschreiben Zusammenhänge zwischen technisch erfassbaren QoS-Parametern und überführen diese in eine QoE-Bewertung. Typischerweise besteht ein positiver Zusammenhang: Mit sich verschlechternder Network Performance, was sich dann in der Verschlechterung eines Parameters widerspiegelt, verschlechtert sich i.d.R. auch die Nutzererfahrung und umgekehrt. Allerdings bestehen auch substitutive Zusammenhänge, wonach die Verschlechterung eines QoS-Parameters durch eine verbesserte Performance eines anderen QoS-Parameters aus Nutzersicht ausgeglichen werden kann.

Das dritte Kapitel befasst sich mit den dienstespezifischen Anforderungen an die QoS-Parameter. Die Unterscheidung in Dienste mit kontinuierlichen Datenströmen und Dienste mit diskreten Datenvolumina trägt dabei den spezifischen Anforderungen der Dienste Rechnung. Bereits im wik-zafaco-Gutachten 2021 wurden die Dienste mit kontinuierlichen Datenströmen auch als Dienste mit determinierten Mindestanforderungen beschrieben. Noch unter Vernachlässigung der Leistungsmerkmale protokolltechnischer Mechanismen auf Anwendungsebene wird in diesem Kapitel herausgearbeitet, dass Dienste bzw. Anforderungen an eine vorgegebene Dienstequalität aus Nutzersicht a priori mit Anforderungen an die Network Performance einhergehen. Auch wird abgeleitet, dass keine weiteren QoS-Parameter jenseits von Jitter und Paketverlustrate in die weiteren Untersuchungen einbezogen werden müssen.

Kapitel vier untersucht die Realisierung von Internetdiensten auf der Transportschicht. Mit Hilfe des OSI-Schichten-Modells bzw. TCP/IP-Modells wird die strikte Trennung von Transport- und Anwendungsschicht herausgearbeitet. Die Protokolle der Transportschicht haben dabei qualitätssichernde Eigenschaften: TCP und auch QUIC haben die Fähigkeit, Paketverluste zu kompensieren. Auch die Netzbetreiber selbst verfügen über Handlungsparameter, eine Qualitätssicherung zu betreiben. Sie liegen insbesondere im Bereich der Dimensionierung der Netzkapazitäten, aber auch im Bereich der Lastverteilung. Abschließend wird anhand von verfügbaren Informationen zur Bedeutung von Paketverlust und Jitter in heutigen IP-Kernnetzen die empirische Relevanz dieser Phänomene dargestellt.

Kapitel 5 stellt auf die protokolltechnische Realisierung der Anwendungen ab. Diese spielen insbesondere für diejenigen Dienste eine Rolle, bei denen keine Qualitätssicherung auf Transportebene greift. Jitterbuffer bei Echtzeitdialogdiensten sowie Streamingbuffer sind Beispiele, wie auf der Anwendungsschicht einer (vorübergehenden) Einschränkung der Network Performance begegnet werden kann, um (a) ein Funktionieren des Dienstes zu ermöglichen und (b) Beeinträchtigungen der Nutzererfahrung zu minimieren.

Kapitel 6 ordnet die Dienste der Mindestversorgung in den protokolltechnischen Zusammenhang ein und stellt Informationen über anwendungsbezogene Grenzwerte sowohl von der ITU als auch vereinzelt von Diensteanbietern bereit. Auffällig sind die strengen

Grenzwerte der ITU, die sich jedoch vor dem Hintergrund erklären, dass sie von den protokolltechnischen Mechanismen auf der Anwendungsschicht abstrahieren. Die Nutzererfahrung wird jedoch durch die Ende-zu-Ende-Verbindung bestimmt und damit auch inklusive der Leistungsmerkmale der Anwendung.

In Kapitel 7 wird analysiert, inwieweit die Möglichkeit besteht, Daten zu den Qualitätsparametern Jitter und Paketverlustrate zu erheben. Aus den Empfehlungen des BEREC (Body of European Regulators for Electronic Communications) sowie den Erfahrungen aus den Breitbandmessungen der Bundesnetzagentur wird abgeleitet, dass sich die Paketverlustrate in der gemessenen Datenübertragungsrate ausdrückt und sie daher ein nachgelagerter Parameter ist, der keiner eigenständigen Berücksichtigung bedarf. Würde man dennoch die Paketverlustrate zusätzlich zur Datenübertragungsrate erheben wollen, wäre dies nur mit sehr umfangreichen Messungen möglich. Daher ziehen die Gutachter die Schlussfolgerung, dass dies nicht mit effizientem Verwaltungshandeln vereinbar ist.

Aufgrund der dargestellten ökonomischen und technischen Zusammenhänge und bezugnehmend auf die Ausgangsfragen kommt das Gutachten zu den abschließenden Feststellungen, dass

- Einschränkungen der Network Performance Parameter Paketverlustrate und Jitter Einfluss auf die Nutzererfahrung haben. Dies bringen Untersuchungen der ITU oder auch verfügbare QoE-Analysen zum Ausdruck.
- Internetdienste nicht mit einem binären „Funktionieren / nicht-Funktionieren“ einhergehen. Vielmehr sind Internetanwendungen im Allgemeinen derart gestaltet, dass sie auf Einschränkungen der Network Performance (d.h. der QoS-Parameter) adaptiv reagieren und versuchen, den QoS-Einschränkungen entgegenzuwirken.

Die aus der Analyse abgeleitete Empfehlung stellt sich wie folgt dar:

Auch wenn die Parameter Jitter und Paketverlustrate einen Einfluss sowohl auf das Funktionieren der Dienste als auch auf die alltäglich akzeptable Nutzererfahrung haben, ziehen wir in diesem Gutachten die Schlussfolgerung, dass es weder erforderlich noch sinnvoll ist, für diese QoS-Parameter technische Mindestanforderungen zu formulieren. Dem liegen folgende Zusammenhänge zugrunde:

Ein Paketverlust drückt sich für den Nutzer in einer Minderung der ihm zur Verfügung stehenden Datenübertragungsrate aus. Da sich die in der TKMV verankerten Mindestanforderungen an den dienstespezifischen Anforderungen an die Datenübertragungsraten im Downstream und Upstream orientieren und für den Internetanschluss der Grundversorgung entsprechend vorgegeben sind, bedarf es keiner ergänzenden, nachgelagerten Vorgabe eines Schwellwertes für die Paketverlustrate.

Die Anwendungen IP-basierter Dienste sind darauf ausgerichtet, Verschlechterungen von Network Performance Parametern entgegenzuwirken, um für ein Funktionieren des Dienstes Sorge zu tragen. In Bezug auf den Jitter, der seine QoE-Bedeutung bei dialogorientierten Echtzeitdiensten hat, trägt der Jitterbuffer dafür Sorge, dass der im IP-Kernnetz entstehende Jitter beim Empfänger der Daten wieder ausgeglichen wird. Weil mit der Beschränkung der Latenz (maximale Verzögerung von 150 ms) auch dem Jitter eine Obergrenze gesetzt wird, und Echtzeitdialogdienste grundsätzlich mit Jitterbuffern arbeiten, bedarf es daher auch keiner nachgelagerten Vorgabe eines Schwellwertes für den Jitter.

Eine Vorgabe von Grenzwerten für Paketverlust und auch Jitter sollte aber auch aufgrund weiterer, grundlegender technischer Zusammenhänge ausgeschlossen werden: Paketverlust und auch Jitter sind systemimmanente Merkmale des warteschlangenbasierten Best-Effort-IP-Netzes, welches der Netzneutralität verpflichtet ist. Um in diesem qualitätsungesicherten (eben „best effort“) Netz einen bestmöglichen Transportdienst erbringen zu können, wird von den Anwendungen versucht, maximale Übertragungskapazitäten für sich in Anspruch zu nehmen, um sich im Normalfall dann auf die zur Verfügung stehende Kapazität zu beschränken. Dieser dynamische Anpassungsprozess an verfügbare Kapazitäten geht zwangsläufig mit Paketverlust einher. Dieser ist jedoch nicht als schädlich, ondern für das Best-Effort-Netz als systemstabilisierend einzuordnen und ist letztlich die Voraussetzung für ein funktionierendes ebensolches Best-Effort-Netz.

Letztlich wird unter Wahrung der Netzneutralität und durch die Separierung von Transport- und Anwendungsschicht ein wettbewerbliches Umfeld für die Entwicklung und Innovationsdynamik von IP-basierten Anwendungen geschaffen: Es kann sowohl den Phänomenen eingeschränkter Network Performance als auch den Beschränkungen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der Anschlusslinien, ausgedrückt durch die zur Verfügung stehenden Datenübertragungsraten, Rechnung tragen. Maßnahmen des Kundenschutzes flankieren die marktlich gesteuerten Anreizstrukturen und machen die Qualität bereitgestellter Internetzugänge überprüfbar.

Maßgeblich für die Sicherstellung einer Grundversorgung gemäß §157 Absatz 3 Satz 3 TKG ist die Leistungsfähigkeit der Anschlusslinie. Die beschriebenen, im Kernnetz entstehenden Einschränkungen der Network Performance wirken sich diskriminierungsfrei auf alle Endkundenanschlüsse des Netzbetreibers aus – egal, ob diese über einen ADSL- oder FTTx Gigabit-Anschluss verfügen. Ist die Anschlusslinie nach Maßgabe der Vorgaben der TKMV dimensioniert und leistungsfähig, so sind in Bezug auf den Internetzugang die notwendigen Voraussetzungen zur Erreichung der angestrebten Qualität bzgl. Paketverlustrate und Jitter erfüllt. Daher handelt es sich bei diesen, auf das Kernnetz bezogenen Phänomenen Paketverlust und Jitter, nicht um ein spezifisches Mindestversorgungsthema, sondern vielmehr um eines der Vertragserfüllung durch den Internetzugangsanbieter und damit des Kundenschutzes.

1 Hintergrund und Zielsetzung

1.1 Gegenstand des Gutachtens und rechtlicher Hintergrund

Im Juni 2022 wurde die Verordnung über die Mindestanforderungen für das Recht auf Versorgung mit Telekommunikationsdiensten (TKMV) erlassen. Sie konkretisiert unter anderem die technischen Anforderungen an den Internetzugangsdienst, welche den Anforderungen des § 157 Absatz 3 Satz 3 TKG gerecht werden müssen.

Gemäß § 157 TKG ist die Bundesnetzagentur dazu verpflichtet, die Verfügbarkeit des Mindestangebots für den Internetzugangsdienst in regelmäßigen Abständen zu überwachen (§ 157 Absatz 1 TKG) sowie die in der TKMV festgelegten technischen Mindestanforderungen jährlich zu überprüfen (§ 157 Absatz 4 TKG).

Als Ergebnis des Entschließungsantrags 05/22 wurde von der BNetzA dieses Gutachten beauftragt, um die Frage zu beantworten, ob es ggf. (zukünftig, im Rahmen der durchzuführenden Überprüfungen) erforderlich sei, weitere Qualitätsmerkmale des Internetzugangs in die Verordnung mit aufzunehmen.

Vor diesem Hintergrund ergeben sich die im Gutachten zu untersuchenden Fragen, ob und wenn ja, welche zusätzlichen Qualitätsparameter der Internetzugangsdienst – neben der Download- und Upload-Bandbreite sowie der Latenz – erfüllen muss, um die Anhang-V-Dienste,[1] Teleheimarbeit einschließlich Verschlüsselungsverfahren im üblichen Umfang und eine für Verbraucher marktübliche Nutzung von Online-Inhaltediensten stets mindestens zu ermöglichen. Ebenso ist die Rolle der Qualitätsparameter für eine alltäglich akzeptable Nutzererfahrung in Bezug auf die Produkte der Mindestversorgung zu analysieren.

Ein weiterer Bestandteil des Gutachtens ist eine Möglichkeitsanalyse zur Erhebung valider Daten zu den zusätzlich identifizierten Qualitätsparametern.

1.2 Dienste der Mindestversorgung als Ausgangspunkt der Analyse

In diesem Gutachten ist die Bedeutung von Qualitätsmerkmalen für ein stetes Ermöglichen bzw. Funktionieren sowie eine im Alltag akzeptable Nutzererfahrung von den in Deutschland festgelegten Diensten der Mindestversorgung zu untersuchen.

---

1 Siehe die Aufzählung der Anhang V-Dienste in Abschnitt 1.2.

Diese Dienste sind in § 157 Absatz 3 TKG verankert. Sie umfassen[2]

- die im Anhang V der Richtlinie (EU) 2018/1972[3] des Europäischen Parlaments und des Rates über den europäischen Kodex für die elektronische Kommunikation (EKEK) aufgeführten Dienste,
- Teleheimarbeit einschließlich Verschlüsselungsverfahren im üblichen Umfang sowie
- eine für Verbraucher marktübliche Nutzung von Online-Inhaltediensten.

Diese Dienste sind nachfolgend dargestellt. Sie bildeten die Grundlage für das 2021 von wik-zafaco erstellte Gutachten zur Quantifizierung von Mindestanforderungen für die Qualitätsparameter Datenübertragungsrate im Down- und Upload sowie Latenz. Dabei sind die aufgeführten Dienste in der Kategorie Online-Inhaltedienste nach deutschem Recht nur dann Gegenstand der Mindestversorgung, sofern sie bereits als marktüblich eingestuft werden.[4] Ob dies der Fall ist, ist Bestandteil der von der BNetzA durchzuführenden Überprüfung und Gegenstand des von ihr zeitgleich beauftragten Gutachtens zu Mehrpersonenhaushalten.[5]

1. **Anhang V-Dienste**

   (1) E-Mail

   (2) Suchmaschinen

   (3) Online-Werkzeuge für die Aus- und Weiterbildung

   (4) Online-Zeitungen oder Online-Nachrichten

   (5) Online-Einkauf oder Online-Bestellung

   (6) Arbeitssuche und Werkzeuge für die Arbeitssuche

   (7) berufliche Vernetzung

   (8) Online-Banking

   (9) Nutzung elektronischer Behördendienste

   (10) soziale Medien und Sofortnachrichtenübermittlung

   (11) Anrufe und Videoanrufe (Standardqualität)

2. **Teleheimarbeit inkl. Verschlüsselungsverfahren im üblichen Umfang**
3. **Marktübliche Nutzung von Online-Inhaltediensten**

---

2 Siehe hierzu auch die Ausführungen zur Konkretisierung der in § 157 Absatz 3 Satz 3 TKG genannten Dienstekategorien in der Bundestagsdrucksache 19/28865, S. 404.
3 Vgl. EU (2018).
4 § 157 Absatz 3 Satz 3 TKG.
5 Vgl. BNetzA (2022b).

Für die durchzuführende Analyse wird berücksichtigt, dass die mit dem Internetzugang zu ermöglichenden Dienste durch verschiedenste Produkte realisiert werden können.[6] Sofern dies für die stete Ermöglichung der Dienste bzw. im Alltag akzeptable Nutzererfahrung von Bedeutung ist, sind ggf. Aspekte der konkreten technischen Umsetzung zu beachten.

1.3 Methodische Herangehensweise und Aufbau der Studie

In diesem Gutachten wird aus ökonomischer[7] und technischer Perspektive untersucht, ob und falls ja, welche weiteren technischen Qualitätsparameter – insbesondere Jitter und die Paketverlustrate – in die Vorgaben der TKMV Eingang finden und damit die bereits verankerten Parameter Datenübertragungsrate im Upstream und Downstream sowie der Latenz ergänzen sollten.

Methodisch gehen wir bei der Bearbeitung des Gutachtens wie folgt vor: Wir beginnen mit einer Definition der Qualitätsparameter, erläutern Qualitätskonzepte und ihre Abgrenzung und machen eine Bestandsaufnahme davon, in welchem regulatorischen Kontext diese bereits von Relevanz sind.

Die weiteren Kapitel in diesem Gutachten haben einen modularen Charakter und repräsentieren unterschiedliche Perspektiven auf die Bedeutung der QoS-Parameter. Kapitel 3 stellt auf charakteristische Anforderungen von Dienstekategorien ab, die der Nutzerperspektive zuzuordnen sind und stellt sie in Beziehung zu den QoS-Parametern. Kapitel 4 und 4 repräsentieren die Angebotsseite und die produktionstechnischen Rahmenbedingungen für die Qualität von Internetdiensten – sowohl aus Perspektive des Netzes bzw. Netzbetreibers (Kapitel 4) als auch aus Sicht der Anbieter bzw. Entwickler von Anwendungen und Produkten (Kapitel 5). Hier werden jeweils die technischen Zusammenhänge und das Zusammenspiel der beiden Ebenen erläutert. In den jeweiligen Kapiteln stellen wir auf die zu untersuchenden QoS-Parameter Paketverlustrate und Jitter ab und ordnen diese in den jeweiligen Kontext ein. Diese Abschnitte abstrahieren dabei weitestgehend von den konkreten Diensten der Mindestanforderungen. Die Darstellungen beanspruchen vielmehr eine Gültigkeit für sämtliche Internetdienste und sollen somit auch für den Fall einer Erweiterung des Dienstekatalogs, der für die Mindestanforderungen an den Internetzugang zukünftig verbindlich werden könnte, Bestand haben. In Kapitel 6 wird auf die Dienste der Mindestversorgung abgestellt, eine Bestandsaufnahme hinsichtlich der zu betrachtenden Qualitätsparameter aus Perspektive der Akteure vorgenommen

---

6 Eine Konkretisierung von technischen Mindestanforderungen, die auch in die Entscheidungsgrundlage der Bundesnetzagentur Eingang gefunden hat, erfolgte auf Basis repräsentativer Produkte, die seinerzeit im wik-zafaco-Gutachten 2021 identifiziert worden waren.

7 Wir verwenden innerhalb dieses Gutachtens die Begriffe „volkswirtschaftliche Perspektive“ und „ökonomische Perspektive“ synonym.

und die Brücke zu den zu Beginn des Gutachtens in Kapitel 2 dargestellten regulatorischen Befassungen mit Qualitätsparametern im Kontext von Internetdiensten geschlagen.

Die Befassung mit den bereits in der TKMV verankerten QoS-Parametern Datenübertragungsrate und Latenz zieht sich durch das gesamte Gutachten. Dies geschieht jedoch nicht aus der Perspektive der Überprüfung, wie sie für die Parameter Paketverlustrate und Jitter in diesem Gutachten durchzuführen ist, sondern aufgrund der bestehenden technischen Zusammenhänge, die einer Darstellung bedürfen, um die in diesem Gutachten gezogenen Schlussfolgerungen nachvollziehbar zu machen.

Die Möglichkeitsanalyse in Kapitel 7 komplettiert die Befassung aus der Umsetzungsperspektive. Sie hat zum einen die Machbarkeit der Überprüfung von Grenzwerten für Paketverlust und Jitter zum Gegenstand. Zum anderen evaluiert sie die Aussagekraft bestehender Messgrößen für die in diesem Gutachten zu betrachtenden Metriken.

Die Evaluation in Kapitel 8 greift die zentralen Ergebnisse aus den vorherigen Kapiteln auf und fasst die vorgetragenen ökonomischen und technischen Schlussfolgerungen zusammen.

2 Qualität von Diensten – Mindestversorgung, technische Konzepte und Nutzererfahrung

2.1 Zu untersuchende und bereits verankerte Qualitätsparameter im Kontext Mindestversorgung

Dieses Gutachten untersucht, ob die technischen Mindestanforderungen noch weitere Qualitätsparameter umfassen sollten, um der Zielsetzung des TKG „Ermöglichung der Dienste der Mindestversorgung“ zu genügen. Falls dies bejaht werden sollte, ergäbe sich daraus die Notwendigkeit, entsprechende Grenzwerte festzulegen, die die angestrebte Mindestversorgung mit einem Internetzugangsdienst ermöglichen.[8]

An dieser Stelle des Gutachtens erfolgt eine Definition sowohl der bereits implementierten als auch der in diesem Gutachten zu untersuchenden Qualitätsparameter. Hierzu greifen wir auf die Definitionen von Qualitätsparametern nach Maßgabe der ITU Festlegungen (ITU-T Y.2617) zurück, die die Latenz, den Jitter und die Paketverlustrate umfassen. Da der QoS-Parameter Verzögerung bereits bei den Mindestanforderungen der TKMV berücksichtigt ist, bedarf dieser in diesem Gutachten keiner weiteren Überprüfung. Die bereits in der TKMV enthaltenen Parameter sind „lediglich“ in Bezug auf ihre Interdependenzen und ihr Zusammenspiel mit den weiteren, in diesem Gutachten zu untersuchenden Qualitätsparametern von Bedeutung.

- Verzögerung (Latenz) (ITU-T Y.2617)

  Die Verzögerung (Delay, oder auch Latenz) bezeichnet die Übertragungsdauer vom Sender zum Empfänger (One-Way-Delay). Sie ist vor allem relevant für die Dienste Sprachübertragung oder lineares TV. Davon zu unterscheiden ist die Paketumlaufzeit (Round-Trip-Delay), welche die Zeitdauer beschreibt, die ein Signal für eine Übertragungsstrecke von einer Datenquelle zu einem Ziel und wieder zurück benötigt. Diese Zeit beinhaltet die Laufzeiten der Strecken zwischen den beiden Endpunkten der Kommunikation (Messagenten und Messserver).[9] Eine Verzögerung entsteht zum einen durch die Technik des für die Kommunikation verwendeten Mediums (Kabel oder Frequenz sowie die zu überwindende Distanz), zum anderen durch die Verarbeitungszeiten und ggf. auftretenden Warteschlangen an den Netzknoten sowie durch die Verbindungen zwischen den Netzknoten.[10]

---

8 Das TKG fordert eine Konkretisierung von Datenübertragungsrate im Up- und Downstream sowie der Latenz für die Mindestversorgung mit einem Internetzugangsdienst. Diese Parameter wurden im Rahmen der TKMV 2022 erstmalig festgelegt, sie sind jährlich zu überprüfen.

9 Hiervon zu unterscheiden ist die Übertragungsdauer, die zudem noch die Zeit beinhaltet, bis das letzte Bit einer Übertragungseinheit den Übertragungskanal verlässt (Serialisierungszeit).

10 Eine Verzögerung kann natürlich auch an den jeweiligen Enden einer Verbindung, im „home network“ entstehen. Dieses ist jedoch nicht Gegenstand der Betrachtung der ITU, die sich auf das öffentliche Telekommunikationsnetz bezieht.

- Jitter (ITU-T Y.2617)

  Jitter ist die Differenz zwischen der maximalen Verzögerung und der minimalen Verzögerung innerhalb eines bestimmten Zeitfensters. Hauptfaktor für den Jitter ist die Verzögerung in den Netzknoten unter Einschluss der Warteschlangen.[11] Dieser Wert hat eine gewisse Relevanz bei der Sprach- oder Video-Telefonie und kann zu stockender oder ungleichmäßiger Wiedergabe führen. So können beispielsweise bei der Telefonie Sprachlücken durch zu stark verzögerte Pakete entstehen.

- Paketverlustrate (ITU-T Y.2617)

  Die Paketverlustrate (Paket Loss Ratio) beschreibt das Verhältnis von gesendeten Datenpaketen einer Datenquelle zu empfangen Datenpaketen an einem Ziel in einem zu betrachtenden Zeitintervall. Mathematisch ist sie wie folgt definiert:

  Verlustrate = 1 - (empfangene Pakete / gesendete Pakete)

- Datenübertragungsrate (Mbps)

  Die Datenübertragungsrate ist eine Stromgröße, die das pro Zeiteinheit übertragene Datenvolumen beschreibt (Megabit pro Sekunde). Die Datenübertragungsrate ist sowohl für den Down- als auch den Upstream von Relevanz.
  Sie ist die im politischen und regulatorischen Kontext die bedeutendste QoS-Metrik und wird umgangssprachlich auch als Internet-Geschwindigkeit oder Bandbreite bezeichnet.[12]

---

11 Wie bei der Latenz ist auch beim Jitter die Bezugsgröße zu definieren. Diese kann sich auf einen „round trip“ (RTT, round trip time) oder den „one-way“ („mouth-to-ear“) beziehen. In der TKMV wurde für die Quantifizierung der Latenz auf 1/2 RTT abgestellt.

12 Siehe Stallings, W. (2007). Umgangssprachlich wird für die Datenübertragungsrate häufig auch der Begriff Bandbreite verwendet. Siehe hierzu beispielsweise das Breitband Glossar der Europäischen Kommission, die folgende Definition verwendet: „Bandbreite ist die Kapazität eines Netzwerks oder eines anderen Kommunikationskanals für die Übertragung von Daten, gemessen in bps.“ (EU (2023) Die technisch korrekte Bezeichnung ist „Datenübertragungsrate“. Sie gibt die Anzahl der Bits an, die in einer Zeiteinheit übertragen werden; typische Größen im Zusammenhang mit dem Internet sind kbps, Mbps und Gbps. Bandbreite ist ein Begriff aus der Telekommunikation vor allem aus dem analogen Signalbereich und den Bereich der niedrigsten- und der höchsten Frequenz angibt und der in Hertz (HZ) bzw. kHZ, MHz etc. angegeben bzw. gemessen wird, vgl. Bundesminister für Wissenschaft und Verkehr (1999), § 1. Begriffsbestimmungen, Abs (5). Im Rahmen der Digitalisierung wird der Begriff Bandbreite zunehmend auch für den digitalen Signalbereich als Synonym für die Datenübertragungsrate verwendet (so beispielsweise der „Bandbreiten-Rechner“ von Heise-Online, vgl. Heise-Online *I*) und gibt das maximale Spektrum an, das ein Medium übertragen kann, z.B. 1Gbps Ethernet. Der Unterschied zwischen den beiden Begriffen wird anschaulich in folgendem Blog erläutert: vergleiche: weblogographic.com (2023).

2.2 Internet und Qualitätsparameter im Kontext des Umfelds von Regulierung und Standardisierung

Die Dienstequalität in IP-basierten Netzen hat sowohl aus Sicht der Netzbetreiber (und Entwickler) als auch der Nutzer seit Beginn eine große Aufmerksamkeit erhalten. Die Frage der Bereitstellung von Dienstequalität, ihrer Definition und Realisierung zieht sich durch die Entwicklungsgeschichte des Internet seit seiner Einführung.[13]

In diesem Abschnitt wollen wir eine Bestandsaufnahme der Bedeutung von Qualitätsparameter – insbesondere derjenigen, die in diesem Gutachten zu untersuchen sind – im Kontext von Standardisierungsverfahren sowie rechtlich bzw. regulatorischer Vorgaben vornehmen. Die Darstellungen sollen eine Einordnung bzw. Abgrenzung zu den im Kontext der Mindestversorgung relevanten bzw. in diesem Gutachten zu untersuchenden Qualitätsmetriken erlauben. Sie haben nicht den Anspruch, Schlussfolgerungen für die Leitfrage dieses Gutachtens ziehen zu wollen.

2.2.1 Dienstequalität und Standardisierungsbemühungen von Netzbetreibern, Herstellern und entsprechenden Gremien

Um Telekommunikationsdienste netzübergreifend anbieten zu können, mussten Netzbetreiber schon immer Vereinbarungen über zu verwendende Standards treffen. Qualität bzw. qualitätsgesicherte Dienste sind daher nach wie vor für die Netzbetreiber von großer Bedeutung. Mit den nachfolgenden Ausführungen wollen wir zeigen, welchem Wandel der Umgang mit Qualität und Qualitätssicherung in den letzten Jahrzehnten unterlegen war.

Public (Packet) Telecommunications Data Networks (PTDN)[14] – und damit auch IP-Netze als Bestandteil des Internet – wurden zunächst auch von denselben Betreibern aufgebaut, die in jahrzehntelanger Tradition Telefondienste über das Public Switched Telephone Network (PSTN) bereitgestellt haben. In dieser Tradition haben sich die bestehenden Institutionen – d.h., frühere staatliche Netzbetreiber und deren Zusammenschlüsse in der International Telecommunications Union (ITU) - mit Fragen der sogenannten Network Performance[15] und ihre Bewertung anhand der beobachtbaren Qualitätsmetriken auseinandergesetzt.[16] Paketverlustrate, Latenz und auch Jitter sind dabei von jeher erhobene und in Bezug auf die Nutzerzufriedenheit ausgewertete Indikatoren

---

13 Zu den verschiedenen Facetten der Qualitätsrealisierung bei IP siehe Xiao, X. (2008), insb. Chapter 3 Historic Evolution of QoS Solutions.
14 Vgl. ITU (2010).
15 Mit der Definition von „Network Performance“ befassen wir uns in Abschnitt 2.3.
16 Siehe hierzu die früheren Versionen der ITU Empfehlungen zu E.800 von 1988, 1994 und 2008, vgl. ITU (1988, 1994, 2008).

für den Sprachtelefondienst – motiviert durch die Zielsetzung, die Qualität des PSTN auch über PTDN realisieren zu können.[17]

Im Zuge allgemeiner Bestrebungen der Netzbetreiber, Qualitätsklassen in PTDN einzuführen, wurden von der ITU Qualitätsklassen definiert,[18] die auf die unterschiedlichen Anforderungen von Telekommunikationsdiensten ausgerichtet wurden. Es war die Intention, Dienste mit homogenen Qualitätsanforderungen in entsprechenden QoS-Klassen zu bündeln. Dabei wurden für die Paketverlustrate und den Jitter folgende Werte vorgeschlagen:

- Für die Paketverlustrate wurde uniform (für alle Klassen) ein Wert von 0,1% angesetzt.
- Für den Jitter wurde ebenfalls nur ein Grenzwert in Höhe von 50 ms definiert, der jedoch lediglich in den ersten beiden Qualitätsklassen angesetzt wurde. Für die übrigen Qualitätsklassen wurde auf eine Vorgabe eines Grenzwertes für den Jitter verzichtet[19].

Diese Ansätze standen im Kontext der Konzepte zur Qualitätsdifferenzierung in IP-Netzen, denen die Verfahren von DiffServ (differentiated services) und IntServ (integrated services) zuzurechnen sind.[20] Diese QoS-Klassifizierungsbemühungen haben jedoch für das Internet an Bedeutung verloren.[21] Dies ist der technologischen und marktwirtschaftlich getriebenen (Weiter-)Entwicklung des Internets und der in diesem Kontext regulatorisch verfolgten und implementierten Netzneutralität[22] geschuldet.[23]

Bereits 2001 hat die ITU Zielgrößen für dienstespezifische Anforderungen an Qualitätsparameter konkretisiert,[24] deren Grenzwerte, beispielsweise für die Paketverlustrate für Telefonie (conversational voice two way) mit <3 %, deutlich toleranter ist, als der für die Qualitätsklassen uniform vorgeschlagene Grenzwert von <0,1 %. Diese Unterschiede erklären sich dabei unter anderem durch die Berücksichtigung von Paketverlust-Korrektur-Algorithmen, die in den Anwendungen implementiert sind.[25] Diese Zusammenhänge werden im weiteren Verlauf des Gutachtens, insb. in Kapitel 4 vertieft.

---

17 Die Study Group 12 der ITU-T befasst sich seit mehreren Jahrzehnten mit der QoS-Thematik.
18 Vgl. ITU (2011): ITU-T Y.1541. Für den Jitter wurden lediglich in den zwei höchsten (anspruchsvollsten) Qualitätsklassen Grenzwerte angegeben. Siehe Tabelle 1 im angegebenen ITU-Dokument. Vergleiche ITU (2011): ITU-T Y.1541, Tabelle 1.
20 Zu den Verfahren DiffServ und IntServ vergleiche beispielsweise Xiao, XiPeng (2008), S. 43 ff. Während DiffServ sich des Type of Service (TOS) Feldes im IP-Header bedient, basiert IntServ auf der Idee, Kapazitäten für eine Klasse höherwertiger Dienste zu reservieren.
21 Einen Überblick zu den Arbeiten der ITU zu den Themen von QoS im Kontext von Best-Effort-Internet bis hin zum sog. Next Generation Network gibt Janevski, T. (2015).
22 Siehe hierzu die Ausführungen im anschließenden Unterkapitel.
23 Letztlich kann bei Verpflichtungen zum „open Internet access“ eine Klassifikation dieser Form nicht zur technischen Realisierung beitragen und kann lediglich im Kontext von „managed networks“ Bedeutung haben, die außerhalb dieser Betrachtung liegen.
24 Vgl. ITU (2001): ITU-T G.1010, Table I.1 und I.2.
25 Vgl. ITU (2001): ITU-T G.1010 „Note 2“ in Table I.1 – Performance targets for audio and video applications (transported from Table I.1/G.1010).

Mit der Entwicklung des Internets hat sich auch der Fokus der Arbeiten zur Dienstequalität innerhalb der ITU-T Study Group 12 verschoben: Weg von einer im Netz gesteuerten Dienstequalität hin zu einer Schaffung von Transparenz anhand von Performance Indicators und einem aktiven Monitoring, um den Marktteilnehmern Entscheidungshilfen für die Auswahl ihrer Geschäftspartner und Produkte zu geben.[26] In Bezug auf die Durchsetzung von Qualitätsanforderungen werden aktuell Transparenzauflagen vorgeschlagen, die indirekt – über die geschaffene Transparenz – beim Nachfrager eine entsprechende rationale Kaufentscheidung bewirken.[27] Mit anderen Worten: Transparenz über schlechte Network Performance soll durch Abwanderung informierter Kunden die Netzbetreiber „bestrafen".

Ein großer Teil der Analyse von Qualität der ITU befasst sich mit der Qualität des Internetzugangs als eigenständiger Dienst.[28] Danach soll die Einhaltung von KPIs (Key Performance Indicator) für den Internetzugangsdienst sicherstellen, dass der Nutzer eine zufriedenstellende Qualität bei der Nutzung von OTT-Diensten erfährt.[29] Dabei wird hervorgehoben, dass die Nutzererfahrung im Kontext des Best-Effort-Charakters des Internets zu beurteilen sei und auch den Prinzipien der Netzneutralität Rechnung zu tragen habe. Die von der ITU benannten KPIs umfassen:[30]

(1) Maximum IP layer capacity of the access network,

(2) Congestion in the backbone or backhaul,

(3) End-to-end delay (latency),

(4) Delay variation (jitter),

(5) Packet loss (loss of information),

(6) Service availability."

Die beiden ersten Größen stellen auf die verfügbare Datenübertragungsrate ab. Die explizite Berücksichtigung von Stau bzw. Überfüllung ist dem Umstand geschuldet, dass auf diesen Segmenten durch den kumulierten Transport von Verkehrsdaten einer Vielzahl von Nutzern Kapazitätsengpässe entstehen können, die bei dedizierten Kapazitäten auf der von einem Nutzer exklusiv genutzten Anschlusslinie keine Bedeutung haben.

---

26 Vgl. ITU (2021): ITU-T E-Series Supplement 9 (10/2021), Kapitel 9; wo eine Einordnung Empfehlungen von QoS im regulatorischen Kontext gegeben wird.
27 Vgl. ITU (2021): Kapitel 8.1.2.
28 Vgl. ITU (2021), S. 5.
29 Mit Over-The-Top (OTT)-Diensten werden Diensteangebote bezeichnet, die nicht an die Übertragungsleistung gekoppelt sind und somit von allen Nutzern über einen allgemeinen Internetzugang bezogen werden können. Definitionen finden sich beispielsweise bei European Parliament (2015), S. 7 oder auch BEREC (2016a), S. 14.
30 Vgl. ITU (2021), S. 5.

Die an sechster Stelle gelistete Position ist im Kontext dieses Gutachtens unbedeutend, da sie nicht die technischen Leistungsmerkmale, sondern ihre Verfügbarkeit betrifft.[31]

2.2.2 Dienstequalität und Netzneutralität

Mit der EU-Verordnung über Maßnahmen zum Zugang zum offenen Internet und zur Änderung der Richtlinie 2002/22/EG über den Universaldienst und Nutzerrechte bei elektronischen Kommunikationsnetzen und -diensten sowie der Verordnung (EU) Nr. 531/2012 über das Roaming in öffentlichen Mobilfunknetzen in der Union (nachfolgend kurz „EU-Netzneutralitätsverordnung“ zitiert als EU(2015/2120)) wurde regulatorisch (u.a.) eine Begründungsnotwendigkeit für die Einführung einer Qualitätsdifferenzierung von Diensten etabliert.[32]

Motivation für die Netzneutralität war und ist die Aufrechterhaltung eines offenen Zugangs zum Internet, um (Dienste-)Anbietern und Kunden frei von Markteintrittsschranken Dienste ihrer Wahl anzubieten und zu nutzen.[33] Die Entbündelung von Transport und Diensteangebot solle durch Verzicht auf Qualitätsdifferenzierung das Internet als Motor für Innovation schützen.[34]

Qualitätsmetriken – wie beispielsweise die Paketverlustrate – haben in der Netzneutralitätsverordnung, bezogen auf die allgemeine Qualität des Netzes und den Internetzugang, eine Relevanz. Eine „dienstespezifische“ Qualitätssteuerung durch die Netzbetreiber ist nur in begründungsbedürftigen Ausnahmefällen zu erwägen.[35]

---

31 Vergleiche ITU Y1540 Internet protocol data communication service – IP packet transfer and availability performance parameters. Dies ist insofern irrelevant, als dass diese Größe keine differenzierten Schlussfolgerungen für die Dienste der Mindestversorgung liefern kann. Hier handelt es sich lediglich um eine binäre 0-1-Betrachtung, die die Frage nach dienstespezifischen Anforderungen unbeantwortet lässt.

32 Vgl. BEREC (2016), S. 9, Absatz 27.

33 Vgl. EU(2015/2120), Erwägungsgrund 3.

34 Vgl. EU(2015/2120), Erwägungsgrund 1.

35 Vgl. EU(2015/2120), Erwägungsgrund 9. Entsprechend bedarf es außerordentlicher Gründe, um von dieser Regel abzuweichen (und damit eine Qualitätsdifferenzierung von Diensten zu implementieren). Eine akzeptierte Ausnahme bildet der Sprachtelefondienst als qualitätsgesicherter, netzübergreifender Dienst (sog. NGN-Voice). Siehe hierzu Artikel 3 sowie auch die Erwägungsgründe 16 und 17.
Die Thematik von Mindestanforderungen an einen Internetzugang ist ebenfalls in der Netzneutralitätsverordnung verankert. Derartige Vorschriften sind jedoch daran geknüpft, dass ohne sie eine Einhaltung der Netzneutralität nicht gewährleistet oder eine Verschlechterung der allgemeinen Dienstequalität auf Seiten des Nutzers verhindert werden kann. Siehe hierzu EU(2015/2120), Artikel 5 sowie Erwägungsgrund 19.

2.3 Qualität und Quality of Service (QoS)

2.3.1 Konzepte und Abgrenzungen

„Qualität“ oder auch „Quality of Service“ sind globale Begriffe, die in den verschiedensten technischen, ökonomischen oder auch sozialen Bereichen zu finden sind und auch oft synonym verwendet werden.

Eine allg. Definition findet sich bei der International Organisation of Standardisation (ISO 8402). Derzufolge ist Qualität definiert als[36]

> “[…] totality of characteristics of an entity that bear on its ability to satisfy stated and implied needs”.

Die unterschiedlichen Verwendungen des „Quality of Service“-Begriffs kommen in der ETSI (European Telecommunications Standards Institute)-Definition anschaulich zum Ausdruck:[37]

> “Quality of Service (QoS): The ability to segment traffic or differentiate between traffic types in order for the network to treat certain traffic differently from others. QoS encompasses both the service categorization and the overall performance of the network for each category. It also refers to the capability of a network to provide better service to selected network traffic over various technologies and IP-routed networks that may use any or all of the underlying technologies. QoS is defined as the collective effect of service performances which determine the degree of satisfaction of a user of a service. It is characterized by the combined aspects of performance factors applicable to all services, such as: - service operability performance; - service accessibility performance; - service retainability performance; - service integrity performance and other factors specific to each service.”

In diesem und dem folgenden Abschnitt stellen wir verschiedene Qualitätskonzepte vor und erläutern, wie wir die von uns im weiteren Verlauf der Analyse verwendeten Begriffe belegen. Für unsere Zwecke in diesem Gutachten werden wir den Begriff „Qualität“ in seinem globalen Charakter immer dann verwenden, wenn aus einer Konkretisierung des Begriffs kein zusätzlicher Erkenntnisgewinn entsteht.

Qualität von Diensten und Produkten kann sowohl an Merkmalen der technischen Beschaffenheit oder Key Performance Indicators (KPI) festgemacht werden (abstrakt definierbare, messbare Indikatoren) als auch an der subjektiven Bewertung durch den Anbieter oder Nachfrager.

---

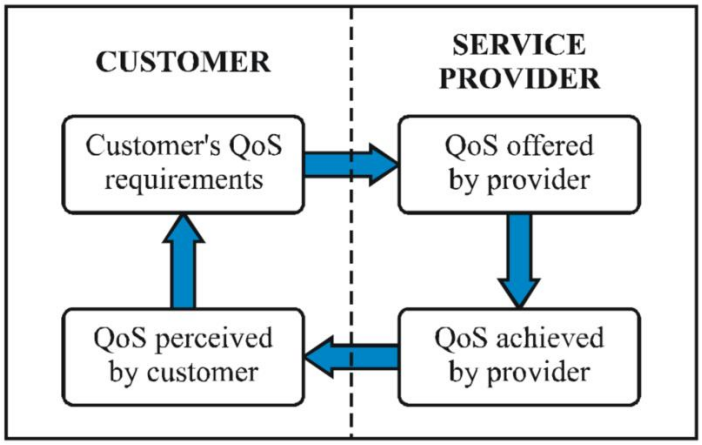
36 ISO 8402, zitiert aus ITU (2017).
37 ETSI (2003), S. 13.

Diese Perspektiven auf Qualitätsparameter bzw. Qualitätsmetriken[38] sind auch für die Analyse von Qualitätsanforderungen für Internetdienste von Relevanz und werden von der ITU seit Jahrzehnten analysiert.[39]

Das Zusammenspiel von Qualität aus Perspektive der abstrakt messbaren Qualitätsmerkmale des Netzes (Network Performance) einerseits und Qualität, bewertet durch den Nutzer andererseits, ist in der ITU-Darstellung „Vier Betrachtungspunkte von Quality of Service“ Abbildung 1 dargestellt. Neben der Unterteilung in die Sphären von Nutzer und Service Provider wird für beide danach unterschieden[40]

- was initial angeboten (QoS offered) bzw. verlangt wird (QoS requirements) sowie
- was abstrakt erreicht wird (QoS achieved) bzw. wahrgenommen wird (QoS perceived).

Abbildung 1: Four viewpoints of quality of service



Quelle: ITU-T E800 (2008), Figure 3

Diese Differenzierung macht deutlich, dass es sowohl auf Seiten des Nutzers als auch des Anbieters zu einem Auseinanderfallen von erwarteter bzw. angebotener Qualität zu der erreichten bzw. wahrgenommenen Qualität kommen kann.

38 Wir verwenden die Begriffe QualitätsPARAMETER und QualitätsMETRIK in diesem Gutachten weitestgehend synonym. METRIK stellt auf den Charakter einer beschreibenden Größe ab und ist im strengen Sinn die korrekte Bezeichnung für den Befassungsgegenstand in diesem Gutachten. Die ETSI Definition für QoS-Parameter macht deutlich, dass die Begrifflichkeiten oftmals verschwimmen: ETSI (2003), S. 13: „QoS parameters: parameters that will be specified or monitored to ensure QoS“.

39 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Abschnitt 2.2.1.

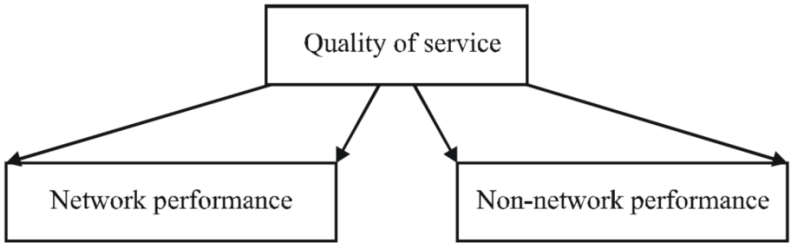
40 Die ITU bringt hier in ihren Darstellungen keine sprachliche Unterscheidung von QoS und QoE zum Ausdruck. Der Kontext ist daher relevant, um eine entsprechende Einordnung in die von uns in diesem Gutachten verwendeten Kategorien vornehmen zu können.

Für dieses Gutachten sind in diesem Kontext insbesondere die folgenden Fragen von Relevanz:

- Wie lassen sich die Qualitätsanforderungen des Nutzers in bereitzustellende QoS-Parameter transformieren?
- Welche Bestimmungsfaktoren und Handlungsparameter sind auf Seiten des Internet Service Providers für die erreichte Qualität verantwortlich?

Um diese Fragen beantworten zu können ist es notwendig, eine Abgrenzung von objektiv messbaren Qualitätsmerkmalen von denen einer subjektiven Bewertung vorzunehmen. Dazu nimmt die ITU – wie in Abbildung 2 illustriert – eine Abgrenzung von „Network Performance“ und „Non-Network Performance“ Indikatoren vor.

Abbildung 2: Quality of service comprises network and non-network criteria

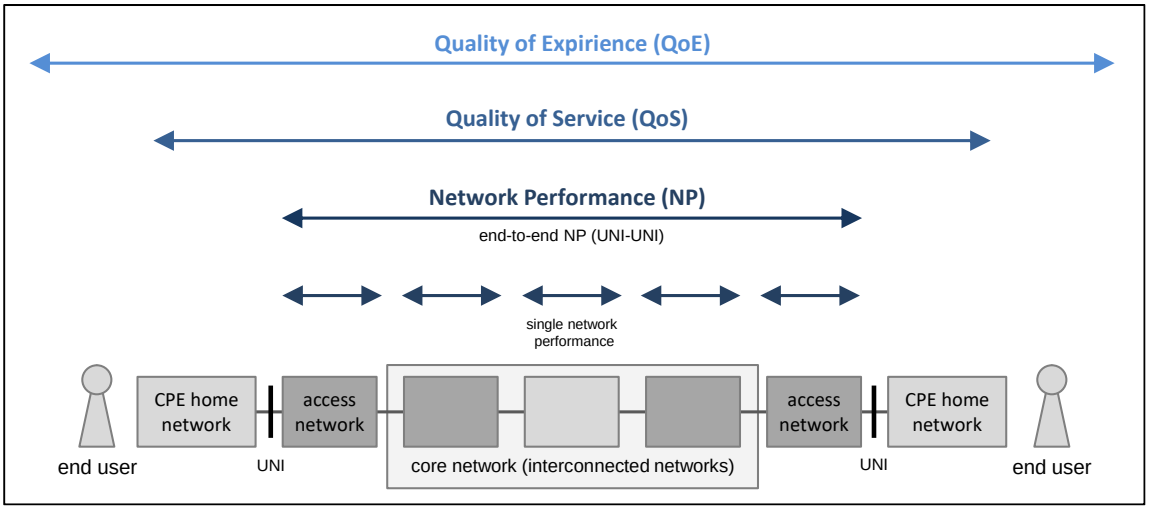


Quelle: ITU-T E.800 (2008), Figure 2

Für die Zwecke unseres Gutachtens ist die Darstellung des BEREC[41] hilfreich (siehe Abbildung 3). Aus ihr geht hervor, dass Quality of Service (QoS) auf die abstrakt messbare Network Performance abstellt. Demgegenüber bezieht Quality of Experience (QoE) die Bewertung durch den Nutzer in die Betrachtung ein.

41 Die Darstellung des BEREC (2011) basiert auf den Ausführungen von ITU-T (2008).

Abbildung 3: Quality of Service (QoS), Quality of Experience (QoE) und Network performance



Quelle: BEREC (2011)

Die Network Performance wird typischerweise anhand der bereits vorgestellten QoS-Metriken Bandbreite, Latenz, Jitter sowie Paketverlustrate beschrieben. Diese Größen sind technisch definiert und damit objektiv – ohne Einbeziehung einer subjektiven Bewertung eines Nutzers – quantifizierbar. Sie beschreiben letztlich die Leistungsfähigkeit eines Netzes oder einer Verbindung in den genannten Dimensionen.

Die Network Performance erstreckt sich in der allgemeinen Form auf die gesamte Verbindung zwischen den Endpunkten der Anschlussleitung der beiden Endnutzer bzw. zwischen Endnutzer und Diensteanbieter. Die involvierten Netzsegmente umfassen

- das Anschlussnetz (Access Network),
- das Konzentrationsnetz (Backhaul),
- das Kernnetz (Backbone) sowie
- zusammengeschaltete Netze (Interconnected Networks) inklusive Internet Exchange Points (IXPs).

Besteht der Anspruch, die aus Nutzersicht erzielte Qualität eines Dienstes zu beurteilen (QoE), erfordert das die Berücksichtigung der Ende-zu-Ende-Leistung und damit auch die über die Hoheit des Internetzugangsanbieters hinausgehende Network Performance der zusammengeschalteten Netze. Die von der ITU gewählte Abgrenzung muss für dieses Gutachten jedoch in den Kontext der Anwendung von QoS-Parametern für die Min-

destversorgung betrachtet werden. Wie auch im wik-zafaco-Gutachten 2021 ausgeführt,[42] können sich die in der TKMV festgelegten bzw. festzulegenden Parameter ausschließlich auf die Network Performance beziehen. Ausschlaggebend dafür ist, dass sich die Verpflichtungen von Netzbetreibern zur Erbringung einer Mindestversorgung nur auf die Bereitstellung eines Internetzugangsdienstes beziehen können. Seine Leistungserbringung endet am Abschlusspunkt der Linientechnik im Gebäude des Nutzers bzw. an der Telekommunikations-Anschluss-Einheit, die den Übergang zum Heimnetz des Nutzers bildet. Eine entsprechende Begrenzung greift Backbone-seitig für die zusammengeschalteten IP-Netze (core networks).[43] Insofern fokussiert die Untersuchung von QoS-Parametern[44] in diesem Gutachten auf die sog. Network Performance der **öffentlichen Netzsegmente des Internetzugangsanbieters** und deren Leistungsfähigkeit, beschrieben anhand ausgewählter QoS-Metriken.

ITU-definition "private network"

(Rec. ITU-T P.10/G.100 (2017)/Amd.1 (06/2019))[45]

"The term "private network" is used to describe a network which provides switching functions and all other features only to a single customer or to a group of customers (restricted user group) and which is not available to the general public.

In general, a private network is a terminating network and consists of several interconnected nodes (e.g., PBXs), with interconnections to other networks.

It consists of more than one element of switching equipment, connected via tie trunks or leased lines or via a virtual private network (VPN). Network functionality is independent of its structure and hierarchy.

It is not limited by geographical size or to a specific national area or region and has no limitation with regard to the number of extensions and access points to other networks."

ITU-definition "core network"

(Rec. ITU-T E.800 (09/2008))[46]

NOTE 4 – Core network: The core network may be a single provider or a concatenation of different provider's networks. QoS contribution to end-to-end performance from core network will be governed by the contributions from individual network components (whether single provider or multi providers); technology used (digital multiplexing, IP, etc.) transmission media (air, cable optical or metal) and other factors.

42 wik-zafaco-Gutachten (2021) Kapitel 3.

43 Siehe hierzu beispielsweise ITU (2016): ITU-T Y.2617 (06/2016), Abschnitt 7.1, wo die Ende-zu-Ende QoS in Public Telecommunications Data Networks (PTDN) dargestellt wird.

44 Die Begriffe QoS-Parameter und QoS-Metrik werden manchmal synonym verwendet. Aus der Sicht dieses Gutachtens, handelt es sich bei Parametern um durch den Betreiber eines Netzes einstellbare Größen wie etwa die aufgrund einer Konfiguration angestrebte Datenübertragungsrate. Metriken sind hingegen Messgrößen, die im Betrieb erfasst werden, beispielsweise die tatsächlich verfügbare Datenübertragungsrate.

45 ITU (2019), p. 25.

46 ITU (2018), p. 1.

2.3.2 Dienstequalität im Kontext von Kundenschutz

Die Netzneutralitätsverordnung verankert erstmalig Transparenzmaßnahmen für den Kundenschutz[47] und benennt verpflichtend konkrete QoS-Metriken (Artikel 3 und 4). Die Festlegungen in Artikel 4 Absatz 1 bilden die Grundlage für die auch in Deutschland für die Anbieter von Internetzugangsdiensten verbindlichen Produktinformationsblätter. Die bereitzustellenden Informationen haben die Datenübertragungsrate des Internetzugangsdienstes zum Gegenstand (siehe Infobox).

Die regulatorische Befassung mit weiteren QoS-Metriken, die über die Datenübertragungsrate hinaus gehen, findet sich u.a. in Artikel 102 EKEK[48] in Verbindung mit Anhang VIII sowie Artikel 104, Absatz 2 EKEK:[49] Latenz, Jitter und Paketverlustrate werden als wesentliche Merkmale des Internetzugangsdienstes in Anhang VIII, B.I.(1) i) benannt[50] und in Anhang X konkretisiert.[51] Die Möglichkeit, Informationen von Internetzugangsanbietern zu diesen Qualitätsmetriken einzufordern, soll sich dabei auch nach EKEK an den Zielen der Netzneutralitätsverordnung orientieren.

Eine explizite Berücksichtigung und auch Quantifizierung weiterer, über die Datenübertragungsrate hinausgehende Qualitätsmetriken, findet sich in den seit Oktober 2020 verfügbaren BEREC Leitlinien für VHCN (Very High Capacity Networks). Eine Konkretisierung dieser Metriken nimmt das BEREC jedoch nur in Bezug auf VHCN vor und quantifiziert diese für verschiedene VHCN-Anschlusstechnologien.[52]

Die hier ausgewiesenen Referenzwerte für Latenz, Jitter und Paketverlust stehen jedoch im Kontext von VHCN und können daher nicht als Maßstab für die in diesem Gutachten zu untersuchende Mindestversorgung herangezogen werden.[53]

Lediglich die Datenübertragungsrate im Down- und Upload hat in Deutschland aktuell eine Verbindlichkeit im Kontext des Kundenschutzes.

---

47 Der Kundenschutz ist im TKG in einem eigenständigen Teil 3 festgelegt.

48 Die Transparenzanforderungen im Sinne des Kundenschutzes sind auch im EKEK (EU) 2018/1972 Artikel 103 berücksichtigt.

49 Die Transparenzanforderungen im Sinne des Kundenschutzes sind auch im EKEK (EU) 2018/1972 Artikel 103 berücksichtigt.

50 Siehe EU (2018), EKEK (EU) 2018/1972 Anhang VIII Abschnitt B (I) 1 (i). Latenz, Verzögerungsschwankung und Paketverlust werden zu den wesentlichen Merkmalen des Internetzugangsdienstes gezählt.

51 Die im EKEK geforderte Konkretisierung dieser und weiterer QoS Metriken nimmt das BEREC in seinen seit Oktober 2020 verfügbaren Leitlinien vor. Dort findet sich auch eine Bestandsaufnahme zum Monitoring von Qualitätsparametern in den Mitgliedsstaaten. BEREC (2020a), S. 13.

52 Siehe BEREC (2020b), S. 6 ff., Abschnitt 3 “Criteria that a network has to fulfil in order to be considered a ‘very high capacity network’”. Da sich die Informationspflichten zu diesen Network Performance Parametern auf VHCN beziehen, sind sie im Kontext der Mindestversorgung nicht verbindlich. BEREC konkretisiert für die aktuell vorherrschenden Anschlusstechnologien die Network Performance Parameter und verweist darauf, dass lediglich zu den heute verfügbaren VHCN-Anschlusstechnologien Quantifizierungen vorgenommen werden können. BEREC (2020a), S. 10f.

53 Auf Vorleistungsebene wurden im Kontext der Breitbandförderung (zu einem Zeitpunkt, zu dem auch VDSL noch als förderwürdig galt) vertragliche Grenzwerte für die Paketverlustrate festgelegt. Diese haben bei VDSL technologiebedingt Relevanz auf dem Layer 1/2 (sog. Übersprechen).

Datenübertragungsrate im Down- und Upload – verbindliche regulatorische Festlegungen

Netzneutralitätsverordnung (EU 2015/2120)

In Artikel 3 dieser Verordnung wird neben dem Preis und dem Datenvolumen die Geschwindigkeit als relevanter Qualitätsparameter des Internetzugangsdienstes aufgeführt. Artikel 4, Absatz 1 d) legt den Anbietern entsprechende Transparenzmaßnahmen auf,[54] die dem Nutzer eine Transparenz über die Download- und Upload-Geschwindigkeit von Internetzugangsdiensten schafft, und zwar in Bezug auf

- die vermarktete minimale Geschwindigkeit,
- die normalerweise zur Verfügung stehende Geschwindigkeit,
- die maximale und die beworbene Geschwindigkeit.

Artikel 4, Absatz 4 verankert den Anspruch des Nutzers, dass die tatsächliche Leistung des Internetzugangsdienstes nicht „erhebliche, kontinuierlich(e) oder regelmäßig wiederkehrend(e)“ von der angebotenen Leistung in Bezug auf die Geschwindigkeit (und auch anderen Dienstqualitätsparametern) abweichen darf.

§ 57 TKG (Teil 3 Kundenschutz)

Die Datenübertragungsrate ist als einzige QoS-Metrik verpflichtend vorgegeben.

§ 52 Absatz 1 TKG sieht u.a. vor, dass die Anbieter Informationen zur „Dienstequalität einschließlich eines Angebots zur Überprüfbarkeit der Datenübertragungsrate“ bereitstellen.

§ 57 Abs. 4 Satz 1 Nr. 1 TKG regelt den Anspruch des Kunden bei einer festgestellten "erheblichen, kontinuierlichen oder regelmäßig wiederkehrenden Abweichungen bei der Geschwindigkeit“ bei Festnetz-Internetzugängen.

Eine Abweichung der Leistungserbringung von der vermarkteten kann mit dem von der Bundesnetzagentur bereitgestelltem Überwachungsmechanismus, dem Nachweisverfahren der Breitbandmessung Desktop-App, ermittelt werden. Das Nachweisverfahren stellt die tatsächliche Datenübertragungsrate im Down- und Upload den vertraglich in aussichtgestellten Leistungen minimale, normalerweise zur Verfügung stehenden und maximalen Datenübertragungsrate im Down- und Upload gegenüber. Der Verbraucher erhält am Ende einer Messkampagne eine Aussage, ob eine nicht vertragskonforme Leistung vorliegt. Im Falle einer festgestellten Abweichung bestehen Minderungs- oder außerordentliche Kündigungsansprüche.

Die Vorgaben des § 157 Absatz 3 TKG gehen mit der Berücksichtigung der Latenz für die Mindestanforderungen des Internetzugangsdienstes somit über die Vorgaben des Kundenschutzes hinaus. Gleiches würde für ggf. zu berücksichtigende Grenzwerte für Paketverlustrate und Jitter gelten.

54 Die getroffenen Festlegungen betreffen sowohl das Festnetz als auch das Mobilfunknetz. Für Letzteres wird jedoch in abgeschwächter Form auf die „geschätzte maximale Download- und Upload-Geschwindigkeit“ Bezug genommen.

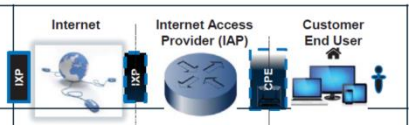
QoS-Leistungsabgrenzungen des European Broadband Mapping Projects[55]

Das European Broadband Mapping Project definiert 3 QoS-Abgrenzungen als Grundlage für eine Überprüfbarkeit der vertraglich vereinbarten Dienstequalität. Diese sind nachfolgenden dargestellt.

Die in dem European Broadband Mapping Project definierten QoS-Layer definieren unterschiedliche Datenerhebungsverfahren, angefangen von Infrastrukturinformationen von Netzbetreibern (QoS-1) wie z.B. der Breitband-Atlas der Bundesnetzagentur, über national zertifizierte Überwachungsmechanismen (QoS-2) mit ihren aktiven Messungen, wie die Breitbandmessung der Bundesnetzagentur, bis zu weiteren aktiven online Geschwindigkeits-Messangeboten (QoS-3).

Für die Überprüfung der Verfügbarkeit der vertraglich vereinbarten Datenübertragungsrate in Deutschland wurde auf die Abgrenzung der Leistung auf die Definition QoS-2 abgestellt, welche die Leistungserbringung auf den Streckenabschnitt zwischen Netzabschlusspunkt auf Seiten des Endkunden (NTP, network termination point) und Netzübergangspunkt zu anderen, zusammengeschalteten IP-Netzen für die Internetkonnektivität (IXP, Internet eXchange Point) festlegt.

Abbildung 4: Quality of Service Definition in Bezug auf die Erstreckung der Leistung

	The EU-Broadband mapping project collects data on different Quality of Service (QoS) definitions	
QoS-1: Theoretical	**What:** Predicted network performance / technical ability of existing infrastructure **Where:** Between core network of the Internet Access Provider (**IAP**) and Network Termination Point (**NTP**), where end user's **How**: Assessment / calculation by providers **Example:** EC/DESI Coverage data on a country, regional and rural level for nine broadband access technologies	QoS-1
QoS-2: Practice optimal	**What:** Line qualification **Where:** Between Internet Access Service (**IAS**) - from Internet Exchange Point (**IXP**) to Network Termination Point (**NTP**), **How:** Measurement by providers or initiatives •Panel measurements through probes **Example:** SamKnows, RIPE Atlas **Example:** Initiative Netzqualität (by German NRA)	QoS-2
QoS-3: Practice experienced 4	**What:** Actual user's experience when using Internet Access Service (**IAS**) **Where:** QoS triggered via the user terminal equipment (wired and wireless) Measurement including individual end user's environment **How:** Measurements via online speed tests **Examples:** Ookla, Akamai, Opensignal	QoS-3

Quelle: TÜV-Rheinland (2017): European Broadband Mapping Project, Folie 7

55 Das Projekt zielte auf die Erfassung der Datenübertragungsrate als zentralem Qualitätsparameter ab. Siehe www.broadband-mapping.eu sowie TÜV-Rheinland (2017): European Broadband Mapping Project.

2.4 Quality of Experience (QoE)

Ziel dieses Abschnitts ist es, das QoE-Konzept zu erläutern und Möglichkeiten einer Transformation von QoE in QoS vorzunehmen. Dazu wird auf Konzepte der ITU sowie bestehende QoE-Methoden und Metriken eingegangen.

2.4.1 Bestimmungsfaktoren der QoE

Der englische Fachbegriff „Quality of **Experience**“ bringt das charakterisierende Merkmal dieses Qualitätskonzepts zum Ausdruck: Die persönliche, d.h. individuelle Erfahrung des Nutzers, ist – neben der technischen Network Performance - maßgeblich für die Qualitätsbeurteilung durch den Nutzer (QoE).

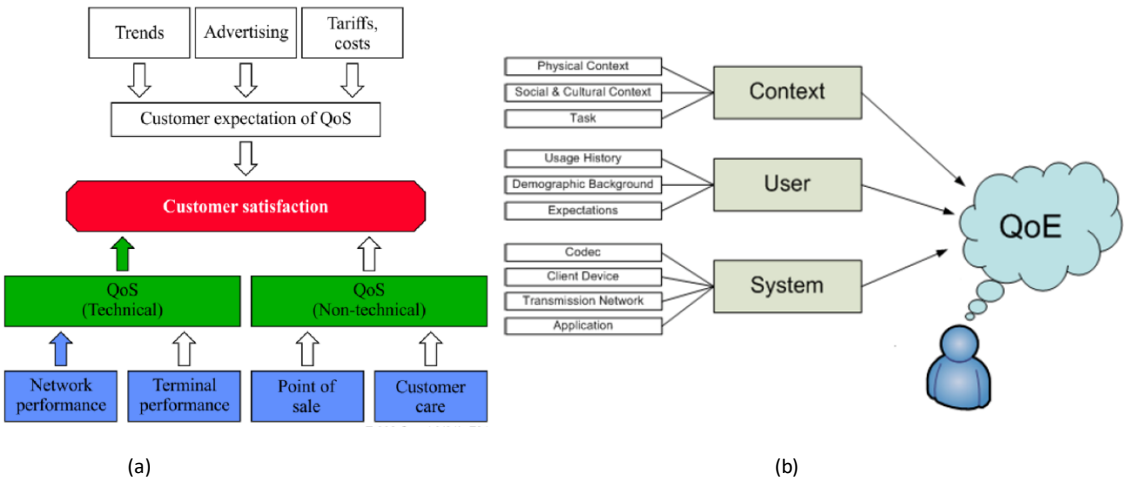
Es gibt eine Vielzahl von Bestimmungsfaktoren, die sich auf die QoE auswirken können. Hierzu zählt u.a. die Erwartung des Nutzers, die in der Regel durch die bisherige bzw. frühere Nutzung des Dienstes geprägt ist. Dabei spielen auch Faktoren wie der persönliche Gemütszustand oder die jeweilige Umgebung eine Rolle.[56] Die nachfolgende Abbildung 5 illustriert die Bestimmungsfaktoren der Nutzerzufriedenheit (customer satisfaction). Die weißen Kästen und Pfeile stellen den Bereich dar, der originär mit den individuellen Bestimmungsfaktoren des Nutzers in Zusammenhang steht.[57] Die Darstellung im rechten Teil der Abbildung 5 (b) erweitert den Nutzungskontext und seine Rolle bei der Qualitätsbewertung: Hier wird darauf abgestellt, in welchem Kontext und für die Bewerkstelligung welcher Aufgabe der Dienst genutzt wird (beispielsweise privat oder beruflich), die auszuführende Aufgabe sowie ggf. dabei verwendete Werkzeuge (Gerät, Anwendung).

---

56 Zu dieser Beschreibung siehe die Ausführungen in ITU (2021), ITU-T E-Series Supplement 9 (10/2021), S. 3. Letztlich könne die Diskrepanz aus individueller Wahrnehmung bzw. individuell dem Dienst zugesprochene Attribute einerseits und objektiv angebotener Leistung andererseits die Differenz aus QoE und QoS umschreiben.

57 Einen Grenzbereich von QoS und persönlichen (individuellen) Bestimmungsfaktoren stellt die „Terminal Performance“ dar (hier stellvertretend für das „Private Network“ inklusive des Endgeräts), welche durch das private Equipment des Nutzers bestimmt wird und anhand objektiv messbarer QoS-Metriken beschrieben werden kann.

Abbildung 5: Bestimmungsfaktoren der Nutzerzufriedenheit



Quelle: (a) ITU-T (2021), figure 1 „Factors influencing customer satisfaction",
(b) Schatz et al. (2013), pp. 219–263

2.4.2 QoE-Methoden und Metriken

Qualität von Diensten im Sinne von QoE ist in der ökonomischen Theorie des Konsumenten ein Bestimmungsfaktor für seinen (individuellen) Nutzen aus dem Konsum eines Produktes oder Dienstes. Dieser kann mathematisch durch eine Nutzenfunktion beschrieben werden,[58] in die neben den objektiven Merkmalen auch persönliche und subjektive Faktoren Eingang finden.

Der Nutzen bzw. die Nutzenfunktion wird in der ökonomischen Theorie durch die Präferenzen des Individuums beschrieben. Sie reflektieren die aus seiner Sicht bestehenden **relativen** Wertigkeiten von Produkten oder Produkten mit verschiedenen qualitativen Eigenschaften.

QoE-Metriken können als statistische Nutzenfunktionen interpretiert werden[59]. Vereinfacht formuliert, wird mit dem Konzept der Quality of Experience versucht, die Brücke zwischen der abstrakten und messbaren Anforderung an die Network Performance und der Bewertung durch den Nutzer zu schlagen.

---

58 Nutzenfunktionen sind, wie für die QoE beschrieben, immer individuell und subjektiv. Ein Grundpostulat der ökonomischen Theorie ist die Abhängigkeit des Nutzens vom Preis eines Dienstes oder Produkts, wobei der Preis die ordinale Ausdrucksform für die Opportunitätskosten darstellt. – Zusammenhänge von QoE-Metriken und erklärenden Größen sind Beispiele für Nutzenfunktionen. Die individuelle Zahlungsbereitschaft eines Nutzers reflektiert seine Bewertung für die jeweiligen Dienste oder Produkte.

59 Zur Bewertung von Diensten und Dienstequalitäten und statistischen Quantifizierung siehe beispielsweise Hoßfeld, T. et. Al (2020): From QoS Distributions to QoE Distributions: a System's Perspective, 4th International Workshop on Quality of Experience Management (QoE Management 2020), oder auch Yue, T., Wang, H., Cheng, S. (2018).

Für die Operationalisierung von Quality of Experience wurden verschiedenste Konzepte und Methoden erarbeitet. Sie unterscheiden sich nach der Art des Dienstes. Den verschiedenen Konzepten ist gemeinsam, dass sie zunächst versuchen, die subjektive Nutzererfahrung in eine numerische Bewertungsskala zu überführen und damit zu objektivieren.[60]

Hierzu werden etwa Bewertungssysteme wie der Mean Opinion Score (MOS) nach ITU-T-Empfehlung P.800 verwendet. Diese werden jedoch typischerweise in kontrollierten Nutzerstudien – unter definierten Bedingungen wie z. B. ITU-R BT.500 für Video-Bewertung – erhoben, was aufwendig ist. Es besteht daher weiterhin Forschungsbedarf zur Entwicklung weiterer Verfahren, die eine Transformation objektiv messbarer QoS-Metriken in die zu erwartenden subjektive Wahrnehmung erlauben und weniger aufwendig sind. Für die Entwicklung solcher Algorithmen ist der Abgleich mit kontrollierten Nutzerstudien entwickelt worden.[61]

Für die Überführung objektiv messbarer Qualitätsparameter (QoS – Network Performance) in eine ordinale oder kardinale QoE-Skala bedarf es statistischer Erhebungen, um zu ermitteln, mit welcher bestimmten (skalierten) Wertigkeit die subjektive Bewertung (QoE) eingeordnet werden kann.[62] Grundlage für die Bestimmung dieser Wertigkeit bilden dann Algorithmen, die die oben angesprochene Transformation vornehmen. Hier ist hervorzuheben, dass diese anwendungsspezifisch sind: Verschiedene Anwendungen können sich bei sonst gleichen Bedingungen unterschiedlich verhalten und ihre Leistung kann unterschiedlich wahrgenommen werden. In der Infobox sind Beispiele für etablierte QoE-Metriken und Anwendungsbereiche dargestellt.[63]

---

60 Wie bereits erläutert, ist QoE ein Parameter, der die Wahrnehmung der Güte eines Dienstes durch einen Nutzer bzw. einer Nutzergruppe widerspiegelt und damit die individuelle bzw. kollektive Bewertung durch die Gruppe widerspiegelt. Siehe dazu beispielsweise Cheetah NETWORKS (2020) oder auch die Ausführungen im wik-zafaco-Gutachten (2021), S. 58. (Mikro-)Ökonomische Ansätze versuchen die Zahlungsbereitschaft von Individuen an beobachtbaren Eigenschaften des Dienstes oder Produkts festzumachen. Vergleiche Varian, H. (2011), Kapitel 3, 4 und 7.

61 Für eine ausführlichere Darstellung von QoE-Konzepten im Kontext der Mindestversorgung verweisen wir auf das wik-zafaco-Gutachten (2021) und die dort angegebenen Quellen. wik-zafaco-Gutachten (2021), Abschnitt 3.1.2.

62 Siehe dazu auch die Ausführungen im wik-zafaco-Gutachten (2021), S. 59.
QoE wird zunehmend auch als direktes Ergebnis einer Serie von “good practices “ betrachtet, die ein ISP implementiert. Vergleiche hierzu McDonald, N. (2022), der dies im Zusammenhang mit Strategien des „traffic shapping“ und Staukontrollmechanismen darstellt.

63 Im weiteren Verlauf der Untersuchung kommen wir auf ausgewählte Konzepte zurück und wenden diese im Kontext der Frage eines Funktionierens der Dienste bzw. der im Alltag akzeptablen Nutzererfahrung an (siehe hierzu Abschnitt 6.5).

Beispiele für verschiedene Anwendungsbereiche und deren etablierte QoE-Metriken

Audio

- MOS: ITU-T P.863 (POLQA), ITU-T P.862 (PESQ)
- E-Model: ITU-T Rec. G.107

Video / Video-Streaming

- ITU-T P.1201 (IPTV), ITU-T P.1203 (Webstreaming Parameter-Model),
- ITU-T P.1204 (Webstreaming diverse Modes von Non-Reference bis Full-Reference)
- Peak-Signal-to-Noise Ratio (PSNR, eher veraltet) und Structural Similarity (SSIM)[64] zur Bewertung der Qualität von Standbildern, die sich auf Videos ausdehnen lassen sowie die Video Multimethod Assessment Fusion (VMAF) zur Bewertung von Streaming-Videos durch Netflix entwickelt. Neben der Bewertung der Videoqualität selbst können bei Video-Streaming-Diensten die Startverzögerung (Startup delay), Wiedergabeunterbrechungen (Stall events) und die Anzahl der Qualitätswechsel berücksichtigt werden.

Video-Conferencing

- Bisher keine etablierten Standards
- “lediglich” Study Group 12: ITU-T SG12 – VQEG

Web

- First Contentful Paint[65] - die Zeit, die ein Web-Browser benötigt, um einen ersten Teil der anzuzeigenden Webseite abzurufen (betrachtet wird das Document Object Model) und zu Rendern. Insbesondere Bilder, iFrames, Vector Grafiken, etc. sind hierin nicht enthalten.
- Page Load Time – die Zeit, die seit der Initiierung des Zugriffs durch den Nutzer vergeht, bis eine Webseite vollständig von einem Web-Browser geladen wurde.
- Above-the-Fold[66] – die Zeit, die die seit der Initiierung des Zugriffs durch den Nutzer vergeht, bis der im Browserfenster sichtbare Teil eine Webseite geladen und dargestellt wurde.

An dieser Stelle möchten wir bereits bestehende QoE Metriken in den Kontext der sich ständig weiterentwickelnden Anwendungen einordnen und auf die Abhängigkeit dieser Verfahren von konkreten Umsetzungsformen aufmerksam machen.

Die Forschung und Entwicklung in diesem Bereich sind im Fluss, nicht zuletzt, weil auch die zu bewertenden Dienste einem kontinuierlichen Wandel unterliegen. Aktuelle Entwicklungen gehen unter anderem in Richtung des Einsatzes maschinellen Lernens, um aus den komplexen, neutral beobachtbaren Metriken auf Zusammenhänge mit der Nutzererfahrung zu schließen, das heißt, für bestimmte gemessene Metriken die QoE vorherzusagen. Dabei geht es nicht darum, dass KI (künstliche Intelligenz) die subjektive

64 Wang, Z. / Bovik, A. C. / Sheikh, H. R. / Simoncelli, E. P. (2004), pp. 600–612.
65 Google Chrome Developers (2021).
66 Vergleichbar mit der Goldenen-Google-Regel, und ihrer Umsetzung unter Anwendung des MB @ Load Ansatzes („Wasserfall“-Messung) im Rahmen des wik-zafaco-Gutachtens (2021). Der Begriff selbst stammt aus dem Print-Bereich und bezieht sich auf den bei einer gefalteten Zeitung sichtbaren Bereich der ersten Seite.

Bewertung vornimmt, sondern durch geeignetes Training in der Lage ist, aus einer Kombination von gemessenen Metriken die – dienstspezifische – zu erwartende Quality of Experience vorherzusagen.[67]

Aus den beschriebenen Entwicklungen von QoE-Metriken geht hervor, dass für eine Qualitätsbewertung von Video-Streams aufwendige Modelle und Algorithmen von der ITU definiert werden. Dabei erfordert jede Anwendung ihre eigene Untersuchung. Methoden wurden und werden auf die bestehenden Techniken, wie Codecs und Auflösungen, optimiert und bedürfen aus diesem Grund auch einer stetigen Anpassung an die neuen Technologien. Diesen Zusammenhängen ist es immanent, dass die Erarbeitung von Qualitätsmethoden immer nur mit einem gewissen zeitlichen Abstand zu der Einführung von neuen Technologien bzw. Algorithmen erfolgen kann.

Die nachfolgenden Ausführungen machen wir am Beispiel Video-Streaming. Die ITU Study Group 12 beschäftigt sich in der Normungsarbeit mit dem Ziel, operative Leistungsaspekte, QoS und QoE Methoden für Multimediadienste zu erarbeiten. Hierzu zählen auch die recht jungen QoS/QoE-Bewertungen für Multimediadienste, die eine Reihe von algorithmischen Modellen zur Qualitätsbewertung von IPTV und Video-Streaming enthalten.

Zu den wesentlichen QoE-Modellen für Streaming ist zum Beispiel der Standard P.1201[68] zu nennen, der seit Oktober 2012 Gültigkeit hat. Dieser fokussiert die QoE Bewertung von IPTV bis zu einer maximalen Auflösung von 1920x1080 Pixel. Klassische IPTV-Dienste zeichnen sich typischerweise damit aus, ohne eine Adaption der Bildqualität zu arbeiten, da in vielen Fällen Multicast-Streaming eingesetzt wird. Die Bewertung erfolgt ausschließlich auf den Video-Codecs MPEG4 Part 2 (bei low resulution) und MPEG4 Part 10 [H.264] (bei low und high resolution). Im Gegensatz zu dem QoE Standard sind erste Produkte im deutschen Massenmarkt seit 2006[69] in Betrieb. Aktuell findet bei einigen Anbietern von IPTV-Produkten eine Ablösung vom Multicast- zum Unicaststreaming statt.[70] Die eingesetzten Set-Up-Boxen bieten bereits eine Unterstützung von 4K, sodass eine Anwendung von P.1201 in diesen Fällen bereits nicht mehr möglich ist.

Der Standard P.1203[71] gilt seit November 2016 und greift die Analyse von „adaptiv streaming“ auf. Hierbei handelt es sich um einen parametrischen, bitstream-basierten Algorithmus. Auch dieses Modell ist auf eine bestimmte Einsatzumgebung ausgerichtet und unterstützt beispielsweise die Analyse von Streams mit H.264/AVC. Für die Bewer-

---

67 Dies wird – aufbauend auf einer umfassenden Betrachtung von Metriken für Video-QoE (aber auch extended Reality und Gaming) – eindrucksvoll auch in der vorliegenden Komplexität für eine Vielzahl von Machine-Learning-basierten Verfahren zu QoE-Vorhersage in einem umfangreichen Überblick dargestellt: G. Kougioumtzidis et al. (2022), S. 19507–19538.
68 Vgl. ITU (2012).
69 Übersicht "Alice TV" https://www.iptv-anbieter.info/iptv-provider/alice-hometv-iptv.html.
70 Vgl. Lückerath, T. (2022).
71 Vgl. ITU (2017).

tung von weiteren Codecs bedarf es einer entsprechenden Weiterentwicklung der Algorithmen. Eingesetzt werden kann dieses Modell beispielsweise für die Bewertung von Video-Stream Portalen, z. B. YouTube, welches bereits seit 2005 verfügbar ist.

Im Jahr 2020 wurden schließlich mehrere Modelle veröffentlicht, die eine Qualitätsaussage über weitere Codecs wie H.264 oder VP9 erlauben und eine Bewertung bis 4k ermöglichen. Die unterschiedlichen Modelle nutzen für ihre Bewertung der Qualität unterschiedliche Informationen eines Bitstream-basierten Modells, über ein Pixel-basiertes Model hin zu einem hybriden Modell. Somit sind auch die Voraussetzungen für eine Qualitätsbewertung an den zu analysierenden Stream unterschiedlich und erlauben ggf. nur dann eine Analyse, wenn ein ausreichender Zugriff auf das Videomaterial möglich ist. Daher sind auch die heute typischerweise verwendeten Verschlüsselungen sowohl im Videostream als auch in der Transportschicht zu beachten.

2.5 QoE, QoS und angestrebte Mindestversorgung

In diesem Gutachten soll evaluiert werden, ob die Ermöglichung der Grundversorgung mit Telekommunikationsdiensten die Vorgabe der technischen QoS-Metriken Paketverlust und Jitter bedarf. Dabei sollen die Parameter hinsichtlich ihres Einflusses auf das Funktionieren der Dienste sowie die akzeptable Nutzererfahrung diskutiert und evaluiert werden.

Entsprechend bedarf es einer Definition dieser Begrifflichkeiten im Sinne

- einer akzeptablen Nutzererfahrung
- eines Funktionierens der Dienste

sowie deren Quantifizierung bzw. Übersetzung in quantitative Vorgaben, die das angestrebte Maß der Mindestversorgung repräsentieren sollen.

An dieser Stelle des Gutachtens führen wir aus, welche methodischen Schritte erforderlich sind, um die für eine akzeptable Nutzererfahrung oder ein Funktionieren von Diensten korrespondierende QoS-Parameter ableiten zu können. Diese umfassen:

(1) Feststellung bzw. Bestandsaufnahme des Zusammenhangs von Nutzererfahrung und Ausprägung der zu betrachtenden QoS-Metriken für die jeweiligen Dienste der Grundversorgung,

(2) Festlegung der für die Grundversorgung angestrebten akzeptablen Nutzererfahrung sowie

(3) Ableitung der technischen Mindestanforderungen an die betrachteten QoS-Parameter zur Ermöglichung der jeweiligen Diensteversorgung
    - im Sinne einer akzeptablen Nutzererfahrung als auch
    - im Sinne des Funktionierens der jeweiligen Dienste.

Zu (1) bedarf es daher statistisch belegter Zusammenhänge, die mit Hilfe von QoE-Metriken beschrieben werden können – wie in Abschnitt 2.4.2 vorgestellt.

Eine Einordnung des Versorgungsniveaus im Sinne einer akzeptablen Nutzererfahrung (Grundversorgung) sowie eines Funktionierens der Dienste kann anhand des statistisch beschriebenen Zusammenhangs zwischen Nutzerbewertung (QoE – ausgedrückt beispielsweise durch den MOS) und Ausprägung der QoS-Parameter vorgenommen werden (Einordnung der akzeptablen Nutzererfahrung im Sinne einer Grundversorgung im Kontext der beobachtbaren QoE- bzw. MOS-Bewertungen). In diesem zweiten Schritt sind letztlich QoE-Werte festzulegen, die für die akzeptable Nutzererfahrung bzw. das technische Funktionieren maßgeblich sein sollen.

Technisch formuliert, sind im dritten Schritt Werte der QoS-Parameter abzuleiten, die mit den festgelegten QoE-Werten korrespondieren.

Um die Methodik zu verdeutlichen, verweisen wir auf die Vorgehensweise des wik-zafaco-Gutachtens 2021. Für die Latenz wurde anhand des Telefondienstes, welcher mit den höchsten Ansprüchen an diese QoS-Metrik einhergeht, die Ableitung der technischen Mindestanforderung vollzogen. Es wurden 150 ms als maximale Latenz festgelegt, da aus den statistisch ermittelten QoE-Zusammenhängen hervorging, dass sich bei der Latenz oberhalb dieses Grenzwertes die Nutzerzufriedenheit (statistisch) verschlechtert.[72]

Die für die Latenz genutzte Methodik für die Ableitung von Grenzwerten ist illustrativ auch für die Paketverlustrate oder den Jitter. Es bedarf dazu entsprechender statistischer Daten, um – in Analogie zu dem dargestellten Beispiel – eine werturteilsbehaftete Festlegung sowie Ableitung von korrespondierenden Grenzwerten zu vollziehen.[73]

---

72 Siehe wik-zafaco-Gutachten (2021), Abschnitt 3.3. Die Festlegung für den Sprachtelefondienst erfolgte insofern nach Maßgabe der maximalen Qualität, die bis zu einem Grenzwert der Latenz in Höhe von 150 ms statistisch für sämtliche Nutzer die bestmögliche Qualität erlaubt. Erst bei Überschreitung dieses Grenzwertes sinkt diese kontinuierlich. Der abfallende Kurvenverlauf bringt dabei zum Ausdruck, dass mit jeder weiteren Erhöhung der Latenz bis dahin noch zufriedene Nutzer in das Lager der unzufriedenen Nutzer abwandern.
Im Kontext der Sprachtelefonie hat sich diese Festlegung durch das außergewöhnlich hohe Versorgungsniveau mit dieser (höchsten) Qualität abgeleitet, an der auch bei einer Realisierung über das Internet festgehalten werden sollte.

73 Für die Ableitung von technischen Mindestanforderungen für die Datenübertragungsrate wurde für Dienste mit diskreten Datenvolumina eine vergleichbare Vorgehensweise gewählt: Die Qualität der Dienste wird hier an der zeitlichen Dimension festgemacht und auf die von der ITU definierten „user centric QoS categories“ abgestellt. Für die Festlegung der Mindestqualität musste hier ein Werturteil über die tolerierte Übertragungsdauer im Sinne einer Mindestversorgung getroffen werden, um die Anforderungen an die Datenübertragungsrate ableiten zu können. Hier wurde anstelle der von der ITU angegebenen 2 Sekunden auf 4 Sekunden nach Maßgabe der goldenen Google-Regel angesetzt. Siehe wik-zafaco-Gutachten 2021, Abschnitt 3.1.2 sowie Tabellen 3-5 und 3-6.

3 Dienste der Mindestversorgung – Dienstekategorien und ihre charakterisierenden Qualitätsanforderungen

Ziel dieses Kapitels ist es, eine Kategorisierung von Diensten elektronischer Kommunikation vorzunehmen, um die Relevanz der zu untersuchenden QoS-Parameter nicht anhand einzelner Dienste, sondern Dienstekategorien durchführen zu können. Dazu werden in diesem Kapitel Dienste anhand von Prototypen charakterisiert. Die Ausführungen abstrahieren dabei noch von der technischen, anwendungsspezifischen Umsetzungsform. Auf diese wird erst im weiteren Verlauf der Analyse eingegangen (zur transporttechnischen Realisierung siehe Kapitel 4, zur anwendungsspezifischen Realisierung Kapitel 4).

Kommunikationsdienste lassen sich nach verschiedenen Merkmalen unterscheiden. Wir unterscheiden im ersten Schritt nach Maßgabe der beiden folgenden Dimensionen:

- Richtung der Kommunikation
  - Uni-direktional
  - Bi-direktional
  - Multi-direktional
- Gegenstand des Kommunikationsdienstes
  - Inhalte (diskrete Inhalte)
  - kontinuierliche digitale Audio-/Videosignale
  - Dialogdienste

3.1.1 Bereitstellung von Informationen (uni-direktional)

Vereinfacht lassen sich Dienste dieser Kategorie als Übertragung von Inhalten / Informationen von A nach B charakterisieren (uni-direktional). Bei webbrowserbasierten Diensten handelt es sich um eine „primarily one-way“ Übertragung von Daten.[74] In diese *Kategorie der Bereitstellung von Informationen bzw. dem Austausch von Informationen* fallen Dienste wie E-Mail, Suchmaschinen, Online-Zeitungen und Online-Nachrichten, Online-Einkauf, Arbeitssuche, Online-Banking, Elektronische Behördendienste und auch soziale Medien.[75]

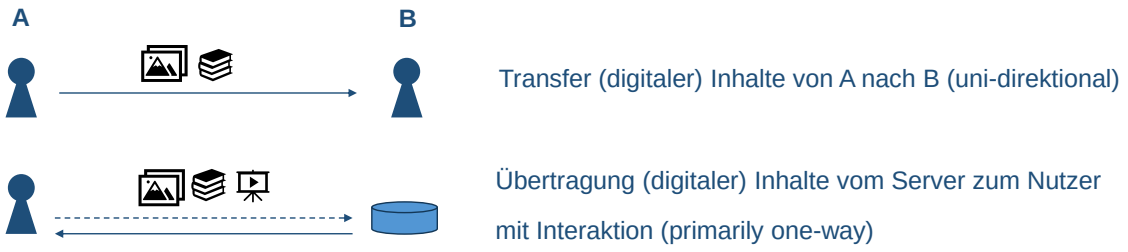
---

74 Zu dieser Einordnung als „primarily one-way“ siehe ITU (2018), table II.2.

75 Auch Streamingdienste können als eine Form der Informationsbereitstellung interpretiert werden. Da Streamingdienste noch weitere, charakteristische Merkmale aufweisen, die über das nicht weiter spezifizierte Transportieren eines Datenvolumens hinausgehen, haben wir sie an dieser Stelle nicht aufgeführt.

Abbildung 6 illustriert die Übertragung digitaler Inhalte von A nach B. Im unteren Teil der Abbildung wird mit der gestrichelten Linie die Anfrage des Nutzers an den Server mit Bitte um Übersendung der angefragten Inhalte dargestellt. Das mit diesen Anfragen einhergehende Datenvolumen ist typischerweise um ein Vielfaches kleiner als die gelieferten Inhalte, woraus sich die Charakterisierung als “primär” uni-direktional ergibt. An dieser Stelle vernachlässigen wir unter anderem noch die zeitliche Dimension als charakteristische Eigenschaft des Dienstes. Diese greifen wir in Abschnitt 3.1.3 auf.

Abbildung 6: Uni-direktionale sowie primarily one-way Übertragung digitaler Inhalte



Quelle: wik

3.1.2 Kontinuierliche digitale Audio- und Videosignale und Echtzeitanforderungen

Echtzeit-Dialogdienste erfordern eine kontinuierliche Übertragung von Ton- und ggf. Bildfluss.[76] Maßgeblich für die Qualität ist hierbei, dass das Audio- bzw. Videosignal beim Empfänger kontinuierlich wiedergegeben werden kann. Mit dieser Eigenschaft unterscheiden sie sich relevant von der Übertragung digitaler Inhalte, die sich durch das zugehörige Datenvolumen kennzeichnen lassen, welches keiner kontinuierlichen Ausgabe bedarf. Letztere bezeichnen wir daher auch als Dienste mit diskreten Datenvolumina.

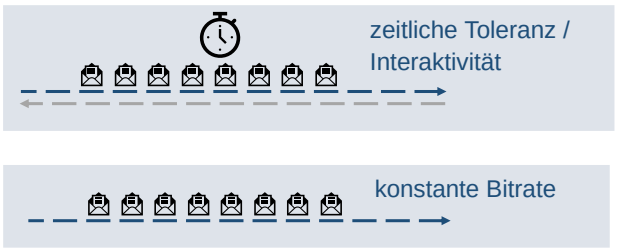
Anwendungsbeispiele für Dienste mit kontinuierlichen Datenströmen sind Audio- oder Videonachrichten, sowohl uni-direktional als auch bi- oder multi-direktional. Telefonie bzw. Videotelefonie und -konferenzen weisen darüber hinaus auch Echtzeitanforderungen auf, um Rede und Gegenrede zu ermöglichen, ohne sich gegenseitig ins Wort zu fallen.

Bei uni-direktionalen Diensten mit kontinuierlichen Datenströmen hat die Echtzeit eine untergeordnete Bedeutung, da eine zeitversetzte Übertragung keine Einschränkung der

76 Der Anwendungsfall der Textnachricht hat verdeutlicht, dass der Dialogdienst nicht zwingend in Echtzeit erfolgen muss. Das geht auch aus der Entwicklung der Kommunikationsdienste hervor, die sich über den Briefdienst, über die Telegraphie, Telefonie und dann auch Fax und Teletext entwickelt haben. Entsprechend gibt es bei den Dialogdiensten ein Kontinuum hinsichtlich des Anspruchs auf die zeitliche Dimension. Dabei spannen der (elektronische) Briefdienst als anspruchsloser und die Echtzeit-Telefonie als anspruchsvoller Dienst das Spektrum hinsichtlich der Ansprüche an die zeitliche Toleranz auf. Dazwischen liegen Nachrichtendienste, wie beispielsweise Messenger Services. Auch sei hier nochmals daran erinnert, dass an dieser Stelle des Gutachtens noch von protokolltechnischen Mechanismen, die auf der Anwendungsschicht angesiedelt sind und die Qualität des Dienstes beeinflussen, abstrahiert wird.

Qualität bei der Ausgabe beim Empfänger bedeuten muss. Anders ist dies, wenn der Live-Charakter des Dienstes von Relevanz ist.

Abbildung 7: Zeitliche Anforderungen der Dienste und Charakteristika von Datenströmen



Quelle: wik

Die Abbildung illustriert den kontinuierlichen Datenstrom, der sowohl für die uni-direktionale als auch für die bi- oder multi-direktionalen Dienste erforderlich ist.

3.1.3 Zeitliche Dimension, Interaktivität und Echtzeit

Prinzipiell weisen nicht nur Dialogdienste, sondern potenziell sämtliche Dienste, die mit einer Interaktion einhergehen, einen zeitlichen Anspruch auf. Dabei ist davon auszugehen, dass sich die Bedeutung des zeitlichen Anspruchs in Abhängigkeit des betrachteten Dienstes und Nutzers unterscheiden kann.[77]

Bei den bi- oder multi-direktionalen Dialogdiensten, wie Anrufe und Videoanrufe bzw. Videokonferenzen, ist die Echtzeit-Anforderung von großer Bedeutung, um Rede- und Gegenrede wie bei einem Vor-Ort-Gespräch zu ermöglichen. Wie bereits bei den bi- und multi-direktionalen Dialogdiensten ausgeführt, sind hier auch Abstufungen denkbar. Das illustriert ein Blick in die Vergangenheit: Mit der öffentlichen Telefonie und der über Jahrzehnte hinweg etablierten Qualität (PSTN)[78] wurde ein Niveau erreicht, dass aus Nutzersicht dem eines Gesprächs vor Ort entspricht (abgesehen von der fehlenden Visualisierung des Gesprächspartners und seiner Gesten). Funk, als Vorstufe der Telefonie, musste demgegenüber noch auf Basis eines zeitlich gestaffelten Rederechts realisiert werden. Der Dialog hatte damit noch eine andere Qualität.

77 Letztlich dürfte dies auch maßgeblich von der Erwartungshaltung des einzelnen Nutzers abhängen.

78 Da bei Sprachanwendungen im Internet auch Wideband-Audio, Stereo und andere Merkmale umgesetzt werden können, kann auch geschlussfolgert werden, dass die Qualität der Internet-basierten Sprachkommunikation die des PSTN sogar übertreffen kann. Technisch ist dafür der zur Verfügung stehende Frequenzbereich. Im IP-Netz ist die für das PSTN geltende Beschränkung auf das 3.1 KHz Frequenzband nicht mehr von Relevanz.

Heutzutage beliebte Messengerdienste (inkl. Sprachnachrichten) können als diskretionäre Datenübertragung eingeordnet werden und erfordern keinen kontinuierlichen Datenstrom.[79] Sie sind dennoch als interaktive (Dialog-)Dienste zu kennzeichnen.[80]

3.1.4 Dialogorientierte Dienste

Dialogdienste sind als interaktive Dienste zu charakterisieren. Ein Dialog kann sowohl schriftlich (in Form von Textnachrichten) als auch mündlich erfolgen und auch von Videodarstellung begleitet sein. Wie in Abbildung 8 dargestellt, kann zwischen bi-direktionaler und multi-direktionaler Kommunikation unterschieden werden. Sie sind als symmetrische Dienste einzuordnen („two-way“).[81] In der nachfolgenden Abbildung 8 haben wir die bi- und multi-direktionalen Dienste unter Vernachlässigung der technischen Implementierung vereinfacht dargestellt.

Abbildung 8: Bi- und multi-direktionale Kommunikation

Quelle: wik

79 Die Eigenschaft eines kontinuierlichen Datenstroms ist zunächst vollkommen unabhängig von der produktionstechnischen Frage, ob ein Dienst mit einer konstanten oder variablen Bitrate erzeugt werden soll. So können in Abhängigkeit von der Anwendung und den verwendeten Kodierungen (z.B. Codecs) konstante Bitraten verwendet werden. Gerade für Dienste mit kontinuierlichen Datenströmen (etwa Audio und Video) kommen heute allerdings meist Kodierungen mit variablen Bitraten zum Einsatz, damit sich der jeweilige Dienst an die schwankenden Datenraten des Netzes anpassen kann. Auf diese Zusammenhänge gehen wir in Kapitel 4 im Kontext der Anwendungsschicht ein.

80 Bei den Messengerdiensten sind sich die Nutzer des Umstands bewusst, dass eine Verzögerung der Interaktion auch nutzerbedingt verursacht sein kann. Allerdings unterschieden sich diese von einem Walkie-Talkie-Dienst “Push-to-Talk (PTT)” von 3GPP, der hier aber keine Rolle spielt.

81 Videokonferenzen mit mehr als 2 Teilnehmern gehen i.d.R. auch mit asymmetrischen Anforderungen an Upstream und Downstream einher. Allerdings ist diese Asymmetrie im Vergleich zu den als „primarily one-way“ kategorisierten webbrowser basierten Diensten nicht so bedeutend. Siehe dazu wik-zafaco-Gutachten (2021), Abschnitt 3.3.4.

3.1.5 Unterscheidung der Dienstekategorien „mit kontinuierlichen Datenströmen“ und „mit diskreten Datenvolumina“

Für den weiteren Verlauf der Analyse reduzieren wir die Unterscheidung von Diensten in die Kategorien „mit kontinuierlichen Datenströmen“ und „mit diskreten Datenvolumina“, die bereits auch im wik-zafaco-Gutachten 2021 Anwendung gefunden hat. Die zeitlichen Anforderungen in Form von Echtzeit und Kontinuität in Zusammenspiel mit der Größe des Datenstroms (Datenvolumen pro Zeiteinheit) sind dabei die charakterisierenden Eigenschaften dieser Kategorie.

3.2 Relevanz der zu untersuchenden QoS-Parameter im Kontext der abgeleiteten Dienstekategorien

In diesem Abschnitt sollen die zuvor dargestellten Dienstemerkmale in Beziehung zu den QoS-Metriken der Network Performance gestellt werden, um die Bedeutung der einzelnen Bestimmungsfaktoren auf die Qualität der Dienste herauszustellen.

3.2.1 Zusammenhang Datenübertragungsrate und Qualität

Die Datenübertragungsrate ist – sowohl für den Downstream als auch den Upstream – bereits Bestandteil der technischen Mindestvorgaben für den Internetzugangsdienst. Auch ist sie als einzige QoS-Metrik im Kundenschutz verankert.[82] Aufgrund ihrer Bedeutung für die netztechnische Realisierung von IP-basierten Diensten gehen wir mit den nachfolgenden Ausführungen auf den Zusammenhang von Qualität und Datenübertragungsrate ein.

Im wik-zafaco-Gutachten 2021 wurde der Zusammenhang von Dienstequalität und Datenübertragungsrate in Abhängigkeit der betrachteten Dienstekategorie betrachtet.

Für Dienste mit kontinuierlichen Datenströmen hat sie Einfluss auf die Qualität der Audio- und Videosignale. Dies wurde am Beispiel der Auflösung illustriert, wobei vereinfacht auf den Zusammenhang abgestellt wurde, dass mit steigender Auflösung auch das Datenvolumen steigt.[83]

Bei Diensten, die eine Übertragung von digitalen Inhalten/diskreten Datenvolumina zum Gegenstand haben, drückt sich die Datenübertragungsrate in Form des „Levels an Komfort“ aus: Je höher die verfügbare Datenübertragungsrate, desto schneller gelangen die Inhalte vom Sender zum Empfänger.

---

82 Siehe Abschnitt 2.3.2.

83 Dieser Zusammenhang wurde auch durch die Produktinformationen der Anbieter von Streaming- oder Videokonferenzdiensten dokumentiert. Siehe wik-zafaco-Gutachten (2021), Kapitel 3.3.

Für den Transport der digitalen Inhalte erfordert dies im Fall von Diensten mit kontinuierlichen Datenströmen eine höhere Datenübertragungsrate (in Abbildung 9 durch den sog. Throughput illustriert). Im Fall von Diensten mit diskreten Datenvolumina geht die Beschränkung der verfügbaren Datenübertragungsrate mit einer längeren Übertragungsdauer einher.

Für beide Kategorien von Diensten gilt aus Nutzersicht im Wesentlichen ein monotoner Zusammenhang: Je größer, desto besser; ohne jedoch darüber eine Feststellung zu treffen, dass der Nutzer ab einer bestimmten Höhe keine weitere Nutzensteigerung mehr wahrnimmt.

Abbildung 9: Datenvolumen und Anforderungen an die Datenübertragungsrate

geringes(r) Volumen (Umfang) der Inhalte

großes(r) Volumen (Umfang) der Inhalte

Quelle: wik

3.2.2 Zusammenhang Paketverlustrate und Qualität

Die Bedeutung der Paketverlustrate für die Dienstequalität steht – neben dem Jitter – im Fokus dieses Gutachtens.

Es ist aus unserer Sicht unstrittig, dass Paketverlust unerwünscht ist und a priori als qualitätseinschränkend angesehen wird; denn wenn Sender oder Empfänger indifferent wären, ob das versendete Paket auch beim Empfänger ankommt, könnte auf dessen Versand von vornherein verzichtet werden. Trotz dieser generellen Feststellung lassen sich Unterschiede anhand der bereits eingeführten Dienstekategorien festmachen.

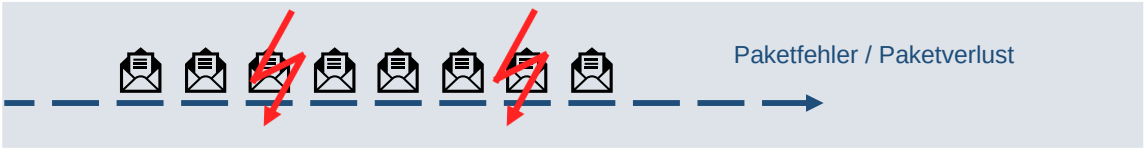
Kommt es bei der Übermittlung digitaler Inhalte zu Paketverlust oder Paketfehlern, hat dies die unvollständige Übertragung der digitalen Inhalte zu Folge. Dabei ist die Ursache, ob es sich um einen Fehler oder einen Verlust handelt, aus Sicht des Nutzers unerheblich, da in beiden Fällen das betroffene Paket beim Empfänger nicht verwertet werden kann.[84]

Unter der Annahme, dass verlorengegangene Daten dazu führen, dass die digitalen Inhalte beim Empfänger verfälscht ankommen, wird der Nutzer vermutlich sehr empfindlich

84 Aufgrund dieses Phänomens löst in beiden Fällen auch das TCP ein sogenanntes Re-Transmission aus. Paketfehler betrachten wir daher nicht als eigenständiges Phänomen, sondern ordnen es dem Paketverlust unter.

auf Paketverlust reagieren.[85] Da die fehlerhafte Übertragung oder der Verlust von Paketen jedoch keine Rücksicht darauf nimmt, ob eine relevante Verfälschung der Inhalte entsteht, ist ein Festhalten an dem Anspruch an Fehlerfreiheit für diese Kategorie eine nachvollziehbare Anforderung.

Abbildung 10: Paketverlust und Paketfehler



Quelle: wik

Bestimmt sich der Wert bzw. die Qualität des Dienstes nicht aus dem diskret übertragenen, digitalen Inhalt (Dienste mit diskreten Datenvolumina), sondern vielmehr durch die Eigenschaften des kontinuierlichen Datenstroms (insbesondere Echtzeit-Telefonie oder Video-Telefonie/Konferenzen bzw. Audio-/Videostreams), so besteht auch hier zunächst der Anspruch auf fehlerfreie Datenübertragung.

An einem Beispiel wollen wir illustrieren, warum der Paketverlust oder -fehler bei Diensten mit kontinuierlichen Datenströmen einen anderen Charakter hat. Dies liegt darin begründet, dass diese Inhalte – egal ob Audio oder Video – bei diesen Anwendungen einen flüchtigen Charakter haben. Durch die Kontinuität und die zeitliche Abfolge der Daten bzw. Informationen haben einzelne Bruchstücke bzw. Pakete nur einen Wert für den Nutzer, wenn sie an der richtigen Stelle (dem richtigen Zeitpunkt) korrekt wiedergegeben werden – beispielsweise beim Telefondienst. Ziehen wir eine Analogie zu einem (nicht digitalen) Dialog mit physischer Präsenz der Gesprächspartner, so können in ihrer Wirkung vergleichbare (externe) Phänomene auftreten, die punktuell dazu führen, dass die Worte des A nicht den Gesprächspartner B erreichen, beispielsweise durch beeinträchtigende Nebengeräusche (ausgelöst durch Dritte im Umfeld). Bei kleinen, schnell vorübergehenden Störungen beeinträchtigen sie den Dialog i.d.R. nicht. Im Fall von größeren, aber vorübergehenden Störungen gibt der Dialog die Möglichkeit der Nachfrage. Die Störung (der Paketverlust) wird zwar als störend empfunden, bedeutet aber nicht, dass der Dialogdienst nicht stattfinden kann.[86]

Prinzipiell können also sämtliche Dienste in ihrer Qualität durch Paketverlust beeinträchtigt werden. Ein Paketverlust ist für den Nutzer in seiner Wirkung damit vergleichbar, dass ihm weniger Pakete pro Zeiteinheit zugestellt werden (und damit auch Datenvolumen),

85 Wir finden es plausible, von derartigen, vermeintlich „normalen“ Nutzerpräferenzen auszugehen, denen zufolge vollständig übertragene Inhalte höher bewertet werden als unvollständig übertragene Daten.

86 Mittlerweiler ist VoIP ein stabiler Dienst, der weitgehendst störungsfrei abläuft. Siehe Jalendry, S., Verma, S. (2015).

was letztlich mit einer verminderten, ihm zur Verfügung stehenden Datenübertragungsrate identisch ist. Entsprechend lässt sich der Paketverlust als eine aus der Datenübertragungsrate ableitbare Größe charakterisieren.

3.2.3 Zusammenhang Latenz und Qualität

Die Latenz ist ebenso wie die Datenübertragungsrate bereits im TKG bei den Mindestanforderungen für den Internetzugangsdienst als relevante QoS-Metrik verankert und bedarf daher im Prinzip keiner weiteren Überprüfung im Rahmen dieses Gutachtens. Da es sich jedoch um eine Größe handelt, die für die Bestimmung des Jitters in einem sachlichen Zusammenhang steht, gehen wir hier auf sie ein.

In der Abbildung 11 wird die Paketlaufzeit vom Sender zum Empfänger durch das Auseinanderfallen von Startzeit am linken Ende der Verbindung und der gemessenen Ankunftszeit am Ziel beschrieben. Die Latenz (auch Verzögerung genannt) bezeichnet die Übertragungsdauer vom Sender zum Empfänger (One-Way-Delay). Sie wird in der Regel in Millisekunden ausgedrückt.

Abbildung 11: Latenz als zeitliche Differenz von Paketversendung und Paketempfang

Quelle: wik

Es ist eingängig, dass interaktive Dienste eine zeitliche Komponente aufweisen und dass die Dauer der Datenübertragung die Qualitätsbeurteilung durch den Nutzer beeinflusst.[87] Aber auch uni-direktionale Dienste, wie beispielsweise E-Mail, können aus Sicht des Nutzers eine zeitkritische Komponente haben.[88]

Abstrakt lässt sich bei Diensten mit kontinuierlichen Datenströmen und Echtzeitanforderungen die Auswirkung einer „zu großen“ Latenz in ihrer Wirkung mit einem Paketverlust gleichsetzen: Da die verspätet zugestellte Information nicht mehr „rechtzeitig“ an der richtigen Position des Audio- oder Videostroms eingeordnet werden kann, fehlt sie bei der

87 Dazu zählen bi- bzw. vorwiegend uni-direktionale Dienste.
88 Der Kategorie zeitkritischer Dienste sind beispielsweise auch Formen des Online-Gaming oder Börsen-Dienste. Die genannten zählen jedoch nicht zu dem Katalog der durch den Internetzugangsdienst zu ermöglichenden Internetdienste.

Wiedergabe. Die kontinuierliche Wiedergabe von Audio- und Videosignalen bei Dialogdiensten (und damit auch Echtzeitanforderungen) setzt der Latenz daher enge Grenzen im Bereich von Millisekunden.

Aus diesen Zusammenhängen leitet sich ab, dass Latenz für die Dienstequalität primär eine Bedeutung im Kontext von interaktiven Echtzeitdiensten hat. Dort bewegt sie sich im Bereich von Millisekunden. Die an die Latenz gestellten Anforderungen können dabei von Nutzer zu Nutzer unterschiedlich sein.[89] Um diese zu quantifizieren, bedarf es der Anwendung von QoE-Metriken und entsprechender Analysen.[90]

Zeitliche Anforderungen der anderen Dienste (ohne Anforderungen an Interaktivität und Echtzeit) weichen davon (deutlich) nach oben ab. Für sie spielt bei der Beurteilung der Qualität des Dienstes die Latenz im Millisekundenbereich keine Rolle; vielmehr kann die Dauer der Übertragung der Inhalte mit einem „Level an Komfort“ beschrieben werden.[91]

3.2.4 Zusammenhang Jitter und Qualität

In diesem Gutachten ist neben der Paketverlustrate der Jitter im Fokus der Analyse, um seine Bedeutung für die Qualität der Dienste der Mindestversorgung zu betrachten. Der Jitter als spezifische Kennziffer für die Variabilität der Verzögerung ist der zeitlichen Dimension der Dienstemerkmale zuzuordnen. Er hat bei Dialogdiensten mit Echtzeitanforderungen Relevanz und ist für die übrigen Dienste nicht von Bedeutung.[92]

Entsprechend der in Abschnitt 2.1 dargestellten Definition handelt es sich beim Jitter um eine aus der Latenz abgeleitete Kennziffer. Sie beschreibt die Variabilität der Paketlaufzeit anhand der Differenz von beobachteter minimaler und maximaler Latenz in einem definierten Zeitintervall. Das Phänomen des Jitters ist vereinfacht in Abbildung 12 skizziert. In der ersten Zeile der Grafik sollen die dargestellte Uhr und Stoppuhr die benötigte Dauer zum Ausdruck bringen, die ein Datenpaket benötigt, um vom Sender zum Empfänger übertragen zu werden. Ein ungestörter, idealtypischer kontinuierlicher Datenstrom kann durch eine uniforme Latenz beschrieben werden. Hier ist der zeitliche Abstand, in dem Pakete gesendet und empfangen werden, stabil. Dies soll durch gleich lange rote Doppelpfeile zwischen den Paketen zum Ausdruck gebracht werden (gleichbleibender Abstand zwischen den Paketen). Bleibt der Abstand jedoch nicht stabil – ausgedrückt durch die unterschiedlich großen Abstände zwischen den Paketen im unteren Teil der Grafik – so handelt es sich um eine schwankende Latenz, die als Jitter bezeichnet wird.

---

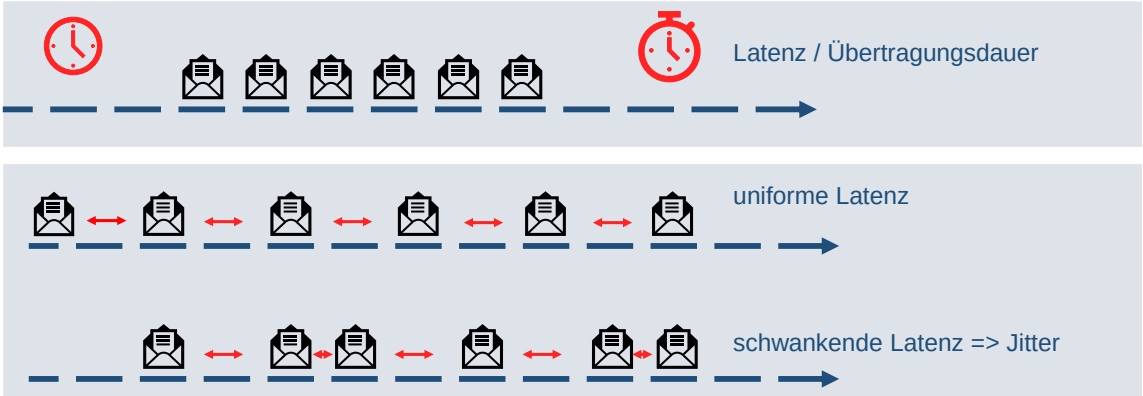
89 Produkte von Internet-basierten Dienste unterscheiden sich hinsichtlich ihres Umgangs mit Latenz. Siehe hierzu auch die Ausführungen in Abschnitt 4 und 6.

90 Hierzu verweisen wir auf Abschnitt 2.4.2 sowie auf die Ausführungen im wik-zafaco-Gutachten (2021), Abschnitt 3.3.3.

91 Siehe dazu auch die Darstellung im wik-zafaco-Gutachten (2021) und die Berücksichtigung der ITU-Kategorien „responsive, timely, non-critical“.

92 Siehe hierzu beispielsweise ITU (2003a): ITU-T G.114, S. 7 (A3)] oder auch ITU (2001): Table I.2.

Abbildung 12: Jitter als Variabilität der Verzögerung



Quelle: wik

Die Bedeutung des Jitters für die Dienstequalität leitet sich letztlich aus der Bedeutung der Latenz für interaktiven Echtzeitdienste ab, wie sie im vorstehenden Abschnitt 3.2.3 beschrieben wurde: Kommt es bei Diensten mit kontinuierlichen Datenströmen und Echtzeitanforderungen zu einem latenzbedingten Paketverlust, so leidet die Sprachqualität. Verspätet zugestellte Information werden nicht mehr „rechtzeitig“ an der richtigen Position des Audio- oder Videostroms eingeordnet und fehlen somit bei der Wiedergabe. Der Jitter als eigenständiges Maß adressiert damit das gleiche Phänomen wie die Latenz, nur unter Anwendung einer Maßgröße, die die Veränderung der Latenz über einen definierten Zeitraum beschreibt.

Mit einer Beschränkung der Latenz auf einen Maximalwert ist auch der Jitter beschränkt. Letztlich kann er sich nur innerhalb der Grenzen bewegen, die sich aus der festgelegten (bzw. festzulegenden) Toleranz der Latenz ergeben. Die Jitter sensitiven Anwendungen fangen die Schwankungen durch geeignete Jitterbuffer ab und wandeln Abweichungen zwischen den unterschiedlichen Verzögerungen in einen kontinuierlichen Strom um. Dies erfolgt durch eine entsprechende künstliche Verzögerung auf Ebene der Anwendung. Die hierbei entstehende maximale Verzögerung ist durch die Vorgaben des definierten maximalen Delay festgelegt. Das nachfolgende Beispiel illustriert die Berechnung des Jitters, die gewählten Werte für die maximal und minimal beobachtete Latenz sind rein illustrativ:

maximal tolerierte Latenz	150 ms
minimal beobachtete Latenz:	40 ms
maximale Variabilität der Latenz (Jitter):	110 ms

Bereits aufgrund dieser Zusammenhänge kann der Jitter als eine der Latenz untergeordnete Metrik angesehen werden.

3.2.5 Sonstige QoS-Merkmale und Schlussfolgerungen

Die für dieses Gutachten und die TKMV im Fokus stehenden Qualitätsmerkmale Datenübertragungsrate, Latenz, Jitter und Paketverlustrate beziehen sich direkt auf die netztechnische Leistungsfähigkeit des Internetzugangs.

Generell hat die Beurteilung der Qualität von Diensten elektronischer Kommunikation eine Vielzahl an Dimensionen. Die ITU hat im Zuge der Weiterentwicklung (Rec. ITU-T E.802)[93] ihres konzeptionellen Rahmens zur Bestimmung und Anwendung von QoS Parametern an der Überführung von QoS-Kriterien in messbare QoS Parameter ein Performance Model erstellt und Ansätze zur Operationalisierung ausgearbeitet.[94] Auf diese greifen wir zurück, um zu überprüfen, ob sich daraus noch weitere, für dieses Gutachten relevante QoS-Parameter ergeben.

Das Performance Model der ITU spannt eine Matrix mit den folgenden beiden Dimensionen auf:

- Funktion des Dienstes mit den Unterkategorien „Service Management“, „Connection Quality“, „Billing“, „Network/service Management by Customer“
- Qualitätsmerkmale der Dienste mit den Unterkategorien „Speed“, „Accuracy“, „Availabiltiy“, „Reliability“, „Security“, „Simplicity”, “Flexibility.

Für die von der ITU als „Connection Quality“ bezeichnete Funktionalität, welche für die Network Performance relevant ist, wird eine Unterteilung in die Kategorien „Connection Establishment“, „Information Transfer“ und „Connection Release“ vorgenommen. Diese fassen unter der Kategorie „Information Transfer“ die bekannten QoS-Metriken Bandbreite, Latenz, Jitter und Paketverlustrate zusammen.

Letztlich orientiert sich die Ableitung von QoS-Anforderungen und die Wahl geeigneter Metriken an den konkreten Zielsetzungen des Betrachters. So finden auf Seiten der Netzbetreiber weitere QoS-Metriken Anwendung. Diese sind in der Regel auf eine protokollbasierte Beobachtung und Steuerung der Paketströme ausgerichtet. Beispiele hierfür

93 Vgl. ITU (2007).
94 Vgl. ITU (2018).

sind ECN-Markings (Explicit Congestion Notification)[95] oder auch das sog. Packet-Reordering.[96] Sie können als untergeordnete QoS-Metriken kategorisiert werden und bedürfen keiner gesonderten Berücksichtigung.[97]

In Bezug auf die in diesem Gutachten im Fokus stehenden Zusammenhänge zwischen der Network Performance des Internetzugangsanbieters und der vom Nutzer realisierbaren Dienstequalität sind aus unserer Sicht keine über die Abschnitte 3.2.1 bis 3.2.4 hinausgehenden QoS-Metriken zu betrachten. Zwar gibt es auf Seiten der Netzbetreiber noch eine Vielzahl weiterer QoS-Metriken; diese finden jedoch im Kontext ihres Netz- und Verkehrsmanagements Anwendung.[98] Auf diese Zusammenhänge gehen wir in Abschnitt 4.3 im Kontext der (transport-)technischen Realisierung der Dienste und deren QoS-Implikationen ein.

Auf Basis der in diesem Kapitel analysierten Zusammenhänge – unter Vernachlässigung der technischen Realisierung der Internetdienste – lassen sich folgende erste Zwischenergebnisse festhalten:

- Die Paketverlustrate kann als eine abgeleitete Größe der Datenübertragungsrate interpretiert werden, da jeder Paketverlust mit einer verringerten effektiven Datenübertragungsrate einhergeht.
- Der Jitter ist eine aus der Latenz abgeleitete Größe, die für Echtzeitdialogdienste von Relevanz ist. Ist die tolerierte Latenz definiert, so ist die Vorgabe eines weiteren Grenzwertes für den Jitter nicht erforderlich.

---

95 Vgl. RFC (2001).

96 Packet-Reordering definiert den Prozess, mit dem ankommende Pakete in die ursprüngliche Reihenfolge, wie sie beim Sender bestand, gebracht werden. Es hat vor allem bei Diensten, die über unterschiedliche Wege realisiert werden Relevanz – bspw. bei Mobilfunkschnittstellen und zeitgleichem Zugang über verschiedene Antennen. Im Kontext des Festnetz-Internetzugangs ist es weniger relevant, da typischerweise nur ein Weg zum Endkunden zur Verfügung steht, so dass das beschriebene Phänomen nicht auftritt. Bei allen TCP-basierten Diensten ist durch das TCP-Protokoll sichergestellt, dass die IP-Pakete in der richtigen Reihenfolge verarbeitet werden. Siehe RFC (2006).

97 Siehe hierzu auch die Ausführungen zu ECN-Markings in Abschnitt 5.3.

98 In diesem Bereich gibt es eine Vielzahl von Firmen, die Internet Service Providern entsprechende Dienste anbieten und sich darauf spezialisiert haben, sog. Key Performance Indicator für die ISP zu entwickeln und zu monitoren. Siehe dazu Zelleke, L. (2023), oder auch die Unternehmen BM COM: QoS & QoE Monitoring [Blog], Preseem [Blog]: McDonald, N. (2022).

4 Realisierung von Internetdiensten – grundlegende transporttechnische Zusammenhänge

Im voranstehenden Kapitel wurden die Internetdienste charakterisiert und in Bezug auf ihre spezifischen Qualitätsmerkmale analysiert. Dabei wurde von der netz- und anwendungstechnischen Umsetzung der Dienste im Internet abstrahiert.

Im Fokus dieses Kapitels steht die technische Realisierung und deren Bedeutung für die Dienstequalität von Internetdiensten. Methodisch werden dabei zuerst die Merkmale von IP-Netzen als paketbasiert arbeitende Netze vorgestellt. Anhand des (OSI-)Schichtenmodells wird die inhaltliche Abgrenzung der nachfolgenden Unterabschnitte in diesem Kapitel erläutert (Transportschicht). Die Befassung mit der Anwendungsschicht erfolgt in Kapitel 4.

Ziel der Darstellung ist es, ein Verständnis über die produktionstechnischen Zusammenhänge der Qualität von Internetdiensten und dem ihnen zugrunde liegenden Transportnetz zu schaffen. Darauf aufsetzend soll für die im Gutachten vorzunehmende Evaluierung der Relevanz von Grenzwerten für die QoS-Metriken Paketverlust und Jitter erfolgen.

4.1 Charakterisierung von IP-Netzen

4.1.1 Best-Effort-IP-Netze versus qualitätsgesicherte Netze

Die charakterisierenden, zentralen Merkmale des Internet lassen sich wie folgt beschreiben:

Das IP-basierte Internet ist ein warteschlangen- und paketbasiert arbeitendes Netz (PTDN: Public Telecommunication Data Network).[99] Es unterscheidet sich in seiner Funktionsweise von einem leitungsvermittelt arbeitenden Netz, dessen bekanntestes Beispiel das PSTN ist (Public Switched Telephony Network).

Das Internet besteht aus einer Vielzahl von zusammengeschalteten Netzen, was in seiner Namensgebung zum Ausdruck kommt: Internet = inter-network. Das Internet Protokoll (IP) als offener Standard bildet dafür die technische Grundlage. Es ermöglicht das „Zusammenschalten“ verschiedener bestehender Netze, die ihrerseits sehr unterschiedliche Eigenschaften haben können.

99 ITU (2016): Abschnitt 7.1.

Das Internet arbeitet nach dem Best-Effort-Prinzip.[100] Aus der Bezeichnung „Best Effort“ geht hervor, dass für die Realisierung der Dienste kein Qualitätsstandard vorgesehen bzw. implementiert ist, sondern dass vielmehr auf Basis von verfügbaren Kapazitäten und jeweils zeitpunktbezogener Nachfrage nach Übertragungskapazitäten die Datenpakete transportiert werden. Im IP-Netz werden die Transportkapazitäten bzw. die Netzabschnitte durch statistisches Multiplexing allen Nutzern und Anwendungen „gleichzeitig“ zugänglich gemacht, und es wird darauf verzichtet, den Zugang zum Netz in Fällen der Überlast zu beschränken.[101] Best-Effort ist somit letztlich der Verzicht auf eine Qualitätsdifferenzierung von Diensten.[102] „Best Effort“ ist dabei aber nicht mit einem Mangel an Leistung zu verwechseln;[103] es wird lediglich keine Garantie für eine bestimmte Leistung zu einem bestimmten Zeitpunkt übernommen.[104,105]

Die Bestandteile eines IP-Netzes als Teil des Internet sind in der nachfolgenden Abbildung vereinfacht dargestellt. Transportwege, Netzknoten (IP-Router) und Interconnection-Einrichtungen stellen die wesentlichen Elemente des IP-Netzes dar, welches der Netzbetreiber in seiner Größe (Dimensionierung der Kapazitäten) und Struktur (Vermaschung der Netzknoten untereinander) in Abhängigkeit des von ihm zu bewältigenden Verkehrsaufkommens ausgestaltet.[106]

---

100 Vgl. Ash, G. R. (2007), S. 134 f. Eine anschauliche Definition findet sich auch bei Linux (2005), die Best Effort wie folgt definieren: „*Best effort* refers to a network service that attempts to deliver messages to their intended destinations but which does not provide any special features that retransmit corrupted or lost packets. Thus, there are no guarantees regarding delivery. […]”

101 Die Dienstereralisierung und damit auch die Dienstequalität ist für das IP-Netz und damit den Netzbetreiber allein auf die Transportfunktion reduziert. Dieser Entwicklung geht eine lange Phase des Wettbewerbs verschiedener Implementierungsstrategien von Qualität voraus, die mit der Entscheidung zur Netzneutralität ein Ende gefunden hat: Die Frage, ob nun ein Mindestmaß an Dienstgüte von allen Netzen gefordert werden sollte oder ob man sich auf ein gemeinsames Minimum beschränkte, wurde zugunsten letzterer Variante und damit der Best-Effort-Eigenschaft entschieden. Siehe beispielsweise Mccauley, J. / Shenker, S. / Varghese, G. (2023), S. 64-74.

102 Siehe dazu im Kontext von Qualitätsdifferenzierung ebenfalls Ash, G. A. (2007), S. 134 f. sowie die Ausführungen in Abschnitt 2.2.1.

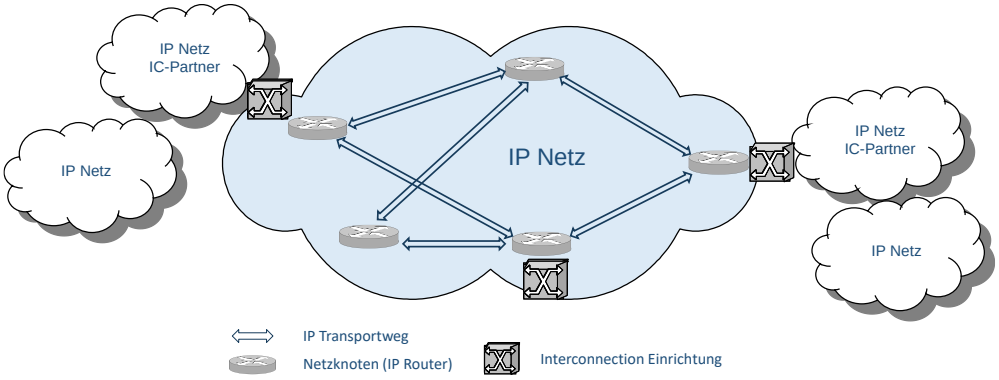
103 Die Leistungsfähigkeit des IP-basierten Transportnetzes ist daher immer im Kontext einer konkreten Verkehrslast zu beurteilen; sie unterscheidet sich damit grundlegend von der dienstebezogenen Einhaltung von Qualitätsmerkmalen in TDM-Netzen (Time Division Multiplexing), denen auch das PSTN zuzuordnen ist. Die TDM-basierten Netze reservieren im Umfang der angestrebten (und vermarkteten) Qualität die erforderlichen Übertragungskapazitäten, so dass lediglich die Nicht-Verfügbarkeit in Form der Blockierung zu einer „Enttäuschung“ des Nutzers führt.

104 Diese Zusammenhänge konstituieren die Produktionsbedingungen für die Anwendungsentwickler, die Lösungsansätze implementieren, damit die Anwendungen „elastisch“ auf die variable Netzqualität reagieren können. Auf die Lösungsansätze, die auf der Anwendungsschicht implementiert werden, gehen wir in Abschnitt 4 näher ein.

105 Eine Ausnahme bilden qualitätsgesicherte Dienste (sog. Managed Services), wie die öffentliche Sprachtelefonie. Diese wird in Abgrenzung zu Voice over IP (VoIP) auch als NGN-Voice bezeichnet.

106 Vergleiche Hackbarth, K.-D. / Kulenkampff, G. / Plückebaum, T. (2016).

Abbildung 13: Internet: Inter-network und elementare Bestandteile des IP-Transportnetzes



Quelle: wik

Aufgrund der Charakteristiken dieses paketbasierten Warteschlangensystems unterscheidet sich das IP-Netz grundlegend von dem traditionellen Telefonnetz, über welches ein qualitätsgesicherter, bi-direktionaler Sprachdienst in Echtzeit realisiert werden konnte: Im PSTN wurden den Endnutzern die verfügbaren Netzkapazitäten auf Basis des Blockierungssystems[107] in Form von 56 bzw. 64 kbps Sprachkanälen zur Verfügung gestellt. Auf diese Weise stand dem Endkunden für die Dauer der Nutzung des Dienstes eine gleichbleibende Qualität zur Verfügung. Überstieg die Nachfrage nach Telefonverbindungen die verfügbaren Kapazitäten, konnte keine Verbindung geschaltet werden. Dies wurde dem Nutzer durch Wiedergabe des Besetzt-Zeichens angezeigt. Entsprechend stand dem Nutzer der Dienst zu der definierten Qualität oder gar nicht zur Verfügung (0-1 Ausprägungen). Die Betrachtung von (Paket-)Verlust während einer geschalteten Verbindung war damit obsolet. Latenzen waren allein entfernungsbedingt und setzten sich zusammen aus der Zeit zum Aufbau und Abbau der Verbindung und der entfernungabhängigen Verzögerung zwischen beiden Endgeräten.[108] Die Qualität des vom Endkunden genutzten Telefondienstes wurde auf diese Weise durch den Netzbetreiber für alle Nutzer einheitlich festgelegt und die Sprachqualität wurde vor allem durch die physikalische Qualität der Leitungen bestimmt.

107 Vgl. Xiao, X. (2008), S. 38.

108 Mittels des sogenannten E Modells der ITU lassen sich Grenzwerte für die Verzögerung und Echo einer Sprachverbindung im PSTN berechnen, was zu Werten von 25 ms Verzögerung für eine durchschnittliche nationale und 100 ms für eine internationale Verbindung und entsprechende Echo Werte von 30 bis 150 ms führt. Vergleiche ITU (2004): ITU-T Rec G.108, Amendment 2 (03/2004) Application of the E-model: A planning guide, ITU (1999): ITU G.109 Definition of categories of speech transmission quality sowie ITU (2003b): ITU-T Rec G.108, Amendment 1 (09/2003): Application of the E-model: A planning guide, Amendment 1: New Appendix I – The relationship between and interaction of talker echo and absolute delay.

Die Qualität von Diensten in Best-Effort-IP-Netzen hängt demgegenüber maßgeblich vom Verhältnis verfügbarer Transportkapazitäten einerseits und der nutzerinduzierten Verkehrslast ab und wird also nicht durch den Netzbetreiber kontrolliert.

Im Umkehrschluss bedeutet dies: Sind hinreichende Transportkapazitäten verfügbar, verlieren die geschilderten Phänomene Latenz, Paketverlust und Jitter ihre Bedeutung. Die Knappheit an Transportkapazitäten ist somit immer ein relatives Phänomen von zu einem Zeitpunkt nachgefragten zu den angebotenen Kapazitäten.[109]

4.1.2 Schichtenmodell und protokollbasierte Realisierung von Diensten

Ausgehend vom OSI-Modell[110] kann eine schichtbezogene Einordnung der protokolltechnischen Realisierung von IP-basierten Dienten dargestellt werden. Das OSI-Modell sieht sieben Schichten vor:

Schicht 1 (“Physical Layer”) ist die Bitübertragungsschicht, in der die elektrische, optische oder akustische Kodierung von Signalen festgelegt wird sowie die entsprechenden (physischen) Schnittstellen.

Schicht 2 (“Data Link Layer”) bezeichnet die Abschnittsicherungsschicht, in der u.a. der auf Schicht 1 kodierte Bitstrom zu größeren Dateneinheiten (“Frames”) gruppiert wird, ggf. der Medienzugriff geregelt wird und abschnittsweise Mechanismen zur Fehlererkennung und gff. Fehlerbehebung realisiert werden.

Schicht 3 (“Network Layer”) sieht die Zusammenschaltung von vielen Punkt-zu-Punkt-Verbindungen zu einem komplexen Netz vor, in der adressierbare Endpunkte miteinander kommunizieren können. Die Schichten 1–3 definieren die netzspezifischen Übertragungseigenschaften.

Schicht 4 (“Transport Layer”) definiert zwischen den Endpunkten eines Netzes ablaufende Protokolle, die ggf. die Leistungsmerkmale des Netzes an die Anforderungen der Anwendungen “anpassen”, soweit das möglich ist. So kann beispielsweise auf einem Netzdienst, der Übertragungsfehler oder Paketverluste zulässt, durch Einsatz eines geeigneten Transportprotokolls eine fehlerfreie Übertragung realisiert werden.

Schicht 5 (“Session Layer”, Kommunikationssteuerungsschicht) dient der Organisation einer Verbindung entsprechend den Anforderungen einer Anwendung,

Schicht 6 (“Presentation Layer”) der Repräsentation (Kodierung) der zwischen den Anwendungen auf den Endpunkten ausgetauschten Informationen und

Schicht 7 (“Application Layer”) schließlich der Anwendungsfunktionalität.

---

109 Latenz, Paketverlust und Jitter hängen bei einem Transportweg dann im Wesentlichen nur noch von den Prozessorkapazitäten in den beiden Enden der Verbindung ab.

110 Vgl. ITU (1994), S. 28 ff.

Während das OSI-Modell eine (künstliche) Aufteilung in die Schichten 5, 6 und 7 vornimmt, lassen sich diese in der Praxis nur schwer voneinander trennen. Dies erklärt sich aufgrund folgender Zusammenhänge: Nur die (Realisierung einer) Anwendung kennt die zu übertragenden Daten und kann diese geeignet für die Übertragung repräsentieren bzw. kodieren. Auch ist die Organisation der Übertragung – etwa in logische Abschnitte, Transaktionen o.ä. – eng mit der Semantik der jeweiligen Anwendung verwoben. Hinzu kommt, dass die Schichten 1 – 4 traditionell systemnah bzw. durch das Betriebssystem implementiert wurden (etwa durch die BSD-Socket-Abstraktion), während die restlichen anwendungsspezifischen Funktionen in dem (oder den) Nutzerprozess(en) der Anwendung Eingang fanden.

Dementsprechend sieht das Internet-Modell zwar auch Schichten vor, allerdings nur vier: Die Schichten 1 – 3 des OSI-Modells repräsentieren dann ein konkretes physisches Netz (auch als "Link" bezeichnet), die IP-Schicht entspricht der Schicht 3 des OSI-Modells – allerdings netzübergreifend, die Transportschicht im Internet-Modell der Schicht 4 des OSI-Modells und die Anwendungsschicht des Internet-Modells den Schichten 5 – 7 des OSI-Modells.[111]

Abbildung 14: OSI-Schichtenmodell und TCP/IP basierte Protokolle

	ISO/OSI Schicht	TCP/IP Schicht	Protokolle Beispiele
7	Application Layer (Anwendungsschicht)	Application Layer	HTTP1.1, HTTP2, HTTP3, SMTP, IMAP; FTP, DHCP,ssh, MQTT
6	Presentation Layer (Darstellungsschicht)		
5	Session Layer (Sitzungsschicht)		
4	Transport Layer (Transortschicht)	Transport Layer	TCP, UDP, QUIC
3	Network Layer (Vermittlungsschicht)	Internet Layer	IP, IPSec, Ipv&, ICMP
2	Data Layer (Sicherungsschicht)	Network Access Layer	Ethernet
1	Physical Layer (Bitübertragungsschicht)		

Quelle: in Anlehnung an Development Support (2021),; zuletzt besucht 10.12.2022

Die für unsere Analyse wichtigen Schlussfolgerungen wollen wir anhand von Abbildung 14 herausstellen. In der tabellarischen Darstellung findet sich in der mittleren Spalte das Internet-Modell (Überschrift TCP/IP-Schicht). Hier ist direkt ersichtlich, dass die Anwendungsschicht auf der Transportschicht aufsetzt.

111 Eine ausführliche Darstellung zum Vergleich der Konzepte liefert Williams, L. (2023).

Das IP bildet – gemeinsam mit dem Transmission Control Protocol (TCP) und dem User Datagram Protocol (UDP) eine universelle Transportschicht, die im Internet netzübergreifend verfügbar ist.[112] Diese universelle Verfügbarkeit erlaubt eine klare Trennung bzw. Entbündelung von Transport- und Anwendungsschicht und ermöglicht eine dezentrale Diensterealisierung, bei der die Intelligenz der Diensterealisierung in den Endgeräten der Nutzer bzw. der Server angesiedelt ist.

Diese klare Trennung hat zur Folge, dass

- sich die Rolle des Netzbetreibers auf die Bereitstellung einer IP-basierten Transportplattform unter Einsatz des IP reduziert, die typischerweise von Anwendungen auf den Endpunkten in Verbindung mit TCP und UDP genutzt wird,[113]
- Diensteanbieter unabhängig von den Netzbetreibern Dienste entwickeln, in ihrer Qualität differenzieren und vermarkten können,
- aufwendige (öffentliche) Standardisierungsverfahren für die netzübergreifende Realisierung von Diensten an Bedeutung verloren haben.[114]

4.2 Bedeutung der Transportschicht für die Dienstequalität

4.2.1 Transportschicht mit TCP und UDP

Das Internet liefert wie beschrieben einen Best-Effort-Dienst. Es ist von anderen, sogenannten „managed IP-networks“ bzw. „managed IP-services“, zu unterscheiden[115]. Um unter Einsatz des IP erforderliche Funktionen für verschiedene Klassen von Anwendungen gemeinsam bereitzustellen, wurden im Laufe der Zeit eine Reihe von Transportprotokollen entwickelt. Traditionell gab es zwei verschiedene dieser Protokolle: Das User

---

112 Das ebenfalls auf Ebene der Transportschicht dargestellte QUIC ist ein jüngeres Protocol, welches in Zusammenspiel mit dem UDP Anwendung findet. Auf seine Bedeutung wird an späterer Stelle eingegangen (siehe Abschnitt 4.2.2.1).

113 Das Erfordernis, als Netzbetreiber Netz und Dienst im Verbund zu produzieren (und zu kontrollieren), hat durch die Offenheit des Internet Protokolls und damit dem Internet als offene Transportplattform die Relevanz genommen, die zu Zeiten des PSTN noch Bestand hatte. Im offenen Internet kann der Netzbetreiber vielleicht annehmen, welche Protokolle verwendet werden, aber nicht selbst bestimmen, letztlich auch nicht, für welche Dienste welches der Protokolle genommen wird.

114 Diese Zusammenhänge bilden letztlich die Voraussetzungen ab, auf deren Erhalt die Netzneutralitätsverordnung abzielt (vergleiche dazu auch die Ausführungen in Abschnitt 2.2.1). Ihrzufolge sind die Netzbetreiber dazu verpflichtet, IP-Pakete diskrimminierungsfrei zu transportieren, damit Diensteanbieter frei von Marktzutrittsschranken ihre Dienste über das Internet vermarkten können. Diese dynamische und innovative Entwicklung wird darüber hinaus von folgenden Faktoren unterstützt: (1) Weiterentwicklung auf allen Schichten oberhalb des IP, was sich in den Fortschritten in den Hardware-Komponenten der Endgeräte und Server widerspiegelt, (2) dynamische Entwicklung der Best-Efford-IP-Netze durch stetigen Fortschritt in deren Komponenten (Übertragungs- und Prozessor-Geschwindigkeiten), zu diesem Aspekt vergleiche Myamoto, et al (2019).

115 Die Nutzung von sog. managed IP-services setzt spezielle kontraktuelle Vereinbarungen des Kunden mit dem Dienste-/Netzbetreiber voraus. Ein prominentes Beispiel für einen managed IP-service ist der Sprachtelefondienst, den beispielsweise die Deutsche Telekom oder Vodafone ihren Kunden im Bündel mit dem Internetzugang anbietet.

Datagram Protocol (UDP) und das Transmission Control Protocol (TCP). Mit diesen beiden Protokollen konnten somit zwei verschiedene Diensteklassen unterstützt werden:

- TCP stellt die Abstraktion eines verbindungsorientierten bi-direktionalen Datenstroms zwischen zwei Endpunkten bereit, der fehlerfrei und reihenfolgeerhaltend vom Sender zum Empfänger übertragen wird. Dabei stellt das TCP Mechanismen bereit, die auf einen Ausgleich von Paketverlust abzielen und helfen sollen, die Überlastung des Netzes zu vermeiden. Aufgrund der systemimmanenten Behebung des Paketverlusts ist die Verwendung des TCP für fehlerintolerante Dienste prädestiniert.[116]

- UDP hingegen nimmt keine Leistungsanpassungen des IP-Dienstes vor, reicht also nur den Best-Effort-Dienst des unterliegenden Netzes unverändert an die Anwendung weiter.

Die Leistungsmerkmale der beiden Protokolle sind in der nachfolgenden Tabelle 1 vergleichend gegenübergestellt. Ihre qualitätsbezogene Funktion stellen wir in Abschnitt 4.2.3. vertiefend vor.

Tabelle 1: TCP und UDP im Vergleich

*)	TCP	UDP
Zuverlässigkeit	Hoch	Niedriger
Geschwindigkeit	Niedriger	Hoch
Transfermethode	Pakete werden nacheinander zugestellt	Pakete werden im Datenstrom zugestellt
Fehlererkennung & -behebung	Ja	Nein
Congestion control	Ja	Nein
Empfangsbestätigung	Ja	Nur die Prüfsumme
	fehlerintolerant	**fehlertolerant**
	OHNE determinierte Mindestanforderungen	MIT determinierten Mindestanforderungen

Quelle: basierend auf Klusaitė, L. (2021)

116 Zu den neueren Entwicklungen zur Fehlererkennung und -behebung unter Einsatz von UDP in Verbindung mit QUIC siehe Abschnitt 4.2.2.1.

4.2.2 Weiterentwicklungen im Bereich der Transportschicht

4.2.2.1 QUIC

Seit einigen Jahren wird aufbauend auf UDP ein neues Transportprotokoll entwickelt, das seinen Ursprung im Kontext des World Wide Web hat: QUIC [RFC 9000, 9001, 9002, 8999].[117] Ursprünglich auf eine Initiative von Google zurückgehend, wurde QUIC in der Zwischenzeit gemeinschaftlich von führenden Internet-Unternehmen und Geräteherstellern entwickelt und standardisiert.

QUIC lässt sich aktuell wie folgt in die Protokollumgebung eingliedern: QUIC setzt auf UDP auf und ist zunächst vor allem für den Webzugriff entwickelt worden. Es wird in Verbindung mit HTTP/3 eingesetzt. Es gestattet aber auch die Übertragung von Echtzeitdatenströmen, was derzeit in der Standardisierung entwickelt wird, und eignet sich damit als zuverlässiges Transportprotokoll auch für andere Dienste, die bisher von TCP unterstützt wurden. QUIC liefert analog zu TCP eine verbindungsorientierte Kommunikation zwischen zwei Endpunkten, garantiert fehler- und verlustfreie Übertragung von verschiedenen Datenströmen, zwischen denen keine Sequenzerhaltung garantiert wird, innerhalb eines Datenstroms hingegen schon. QUIC hat Sicherheitsmechanismen und Verschlüsselung inhärent verankert. Im Gegensatz zu UDP und TCP ist QUIC nicht im Betriebssystem, sondern als Bestandteil der Anwendung implementiert. Diese Eigenschaft hat den Vorteil, dass QUIC somit flexibler einsetzbar ist und sich einfacher anpassen lässt.

4.2.2.2 Sonstige Weiterentwicklungen

Weitere Entwicklungen sind das Datagram Congestion Control Protocol (DCCP) [RFC 5596] und das Stream Transmission Control Protocol (SCTP) [RFC 4960]. Aufgrund mangelnder Akzeptanz im Markt haben diese jedoch für den Nutzer keine wesentliche Bedeutung. Ihre wesentlichen Eigenschaften werden inzwischen durch andere Protokolle erbracht (wie das oben genannte QUIC und RTP [RFC 3550] über UDP).[118]

Allen Transportprotokollen ist, unabhängig von ihrem sonstigen Funktionsumfang, gemein, dass sie Anwendungen auf den Endpunkten über Portnummern adressieren: So etwa Port 80 für HTTP, 443 für HTTPS.

4.2.3 Qualitätsbezogene Mechanismen auf Ebene der Transportschicht

Wie bereits beschrieben, liefert das IP-Netz einen Best-Effort-Dienst, in dem Datenpakete Ende-zu-Ende übertragen werden, wobei das Netz keine Zusagen zu Datenrate, Verlust-

---

117 Vergleiche hierzu: Langley et al. (2017), S. 183–196 oder auch InApp (2022).
118 Vgl. Ince, Z. / von Seck, R. (2022)

rate, Latenz und Jitter trifft. Es ist die Aufgabe der Transportprotokolle bzw. schlussendlich der sie nutzenden Anwendungen, das Netzverhalten zu beobachten und entsprechend flexibel auf die Beobachtungen zu reagieren.

In diesem Abschnitt erläutern wir qualitätsbezogene Mechanismen, die in direktem Zusammenhang mit der Transportschicht stehen, und stellen einen Bezug zu den QoS-Metriken bzw. den Anforderungen der Dienstekategorien her.

Die dargestellten, in den Protokollen der Transportschicht eingebauten Mechanismen sind letztlich im Protokollstack der Anwendung, die auf den Endgeräten der Nutzer installiert ist, verankert. Insofern ist diese Form der Qualitätssicherung zwar der Transportschicht zuzuordnen, sie kann jedoch vom Netzbetreiber nicht beeinflusst werden. Ihm stehen andere Möglichkeiten der Staukontrolle und damit der Beeinflussung der Network Performance zur Verfügung.

4.2.3.1 UDP

Das UDP ist in seiner Funktion auf eine geordnete Übertragung von IP-Paketen beschränkt[119] und nimmt keine weiteren Anpassungen oberhalb von der IP-Schicht vor. Es ist für Anwendungen mit kontinuierlichen Datenströmen prädestiniert und eignet sich als Grundlage für Anwendungen, die beispielsweise Echtzeiteigenschaften haben.[120] Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, ist im UDP weder eine Staukontrolle noch eine Verlusterkennung und Fehlerbehebung verankert. Leistungsmerkmale, wie die starre Fehlerkorrektur und die damit verbundenen Übertragungswiederholungen, die im TCP verankert sind, sind für Dienste mit kontinuierlichen Datenströmen und Echtzeitanforderungen nachteilig, da sie die Eigenschaften des zu übertragenden Datenstroms negativ beeinträchtigen.[121]

4.2.3.2 Qualitätskontrollmechanismen auf Ebene der Transportschicht

Die Qualitätskontrollmechanismen auf Ebene der Transportschicht zielen auf die dem Warteschlangensystem immanenten QoS-Metriken Paketverlust und Latenz ab, die – wie wir in Abschnitt 3.2 gezeigt haben – aus Nutzersicht für die Qualität von Internetdiensten von Bedeutung sind.

---

119 UDP beschränkt die Fehlererkennung auf die Prüfsumme. Es gibt keine Sequenznummern, die das Erkennen von fehlenden Paketen ermöglichen.

120 Aro, T.O. et al (2019).

121 UDP wird meist in Zusammenhang mit dem Echtzeit-Transport-Protokoll RTP [RFC 3550, 3551] als Grundlage für die Übertragung von Echtzeitmedien (Audio, Video) eingesetzt. Vergleiche bspw. Kulenkampff, G. (2000), S. 9.

Aus Perspektive des Netzbetreibers kommt den QoS-Metriken Paketverlust und Latenz eine produktionstechnische Bedeutung zu:

- Paketverluste werden auf der Transportschicht durch die Überlastung des Netzes verursacht.[122] Daher haben sie eine wichtige Funktion als Feedback-Signal zur Steuerung der Übertragungsrate.
- Latenz beeinflusst die Agilität dieser Feedback-Schleife und bestimmt, wie schnell ein Protokoll auf geänderte Umgebungsbedingungen reagieren kann.
- Jitter hat in diesem Zusammenhang keine Bedeutung, weil das Transportprotokoll die Latenz misst und die entsprechenden Timeout-Berechnungen bereits die Variabilität der Latenz berücksichtigen.[123]

Die nachfolgend dargestellten protokolltechnischen Verfahren und Mechanismen zielen auf eine Optimierung von Fehlerkorrekturmechanismen und Staukontrolle ab, um für die Realisierung von Internetdiensten eine bestmögliche Network Performance zu unterstützen.

Fehlerkorrektur- und Staukontrollmechanismen

Die grundlegenden Zusammenhänge des im TCP angelegten Staukontrollmechanismus lassen sich wie folgt erklären: Jeder Router verfügt (vereinfacht) über eine Warteschlange pro Netzschnittstelle. Diese Warteschlange nimmt Datenpakete auf, wenn pro Zeiteinheit mehr Pakete an das entsprechende Netz weitergeleitet werden sollen als aufgrund der Netzkapazität versendet werden können. Eine Warteschlange hat eine endliche Größe, und wenn diese erreicht ist – also die Warteschlange voll ist –, verwirft der Router neu ankommende Pakete. Ein so entstandener Paketverlust dient dem Transportprotokoll auf den Endpunkten als Signal, die Datenrate anzupassen, konkret: sie zu reduzieren.[124] Dieses einfache Verfahren wird als Drop-Tail bezeichnet, weil immer Pakete am Ende der Warteschlange verworfen werden. Mit der Adaption der Datenrate wird bezweckt, die Überlast im Netz und damit auch den Paketverlust zu reduzieren.[125]

Ein zuverlässiges Transportprotokoll wie TCP oder QUIC geht dabei grob wie folgt vor: Gesendete Daten bzw. Pakete werden nummeriert und ihr Erhalt wird durch den Empfänger bestätigt. Fehlende Pakete bzw. deren Inhalte werden nach entsprechender Benachrichtigung erneut gesendet. Das Protokoll misst kontinuierlich die pro Zeiteinheit empfangenen Datenpakete sowie die Latenz bzw. Umlaufzeit. Aus der variablen Latenz

---

122 Davon abzugrenzen sind Paketverluste, die auf den unteren Schichten (Layer 1 und Layer 2) entstehen können. Ein bekanntes Beispiel ist der Paketverlust bei kupferbasierten Anschlussleitungen, die mit xDSL-Technologien realisiert werden. Hier kann es zu einem Paketverlust infolge des sog. „Übersprechens“ kommen. Vergleiche hierzu zum Beispiel Zuloaga, G. / Plückebaum, T. (2022).

123 Vgl. Thombre, S. (2018).

124 Paketverluste im Internet sind primär Überlast geschuldet, seltener Bitfehlern auf den unterliegenden Netzen, so dass diese Interpretation zwar grob, aber gerechtfertigt ist.

125 Aus Perspektive des Endkunden verzögern sich infolge dieser Mechanismen an der Grenze die Zustellung der digitalen Inhalte.

bzw. Umlaufzeit leitet das Protokoll über Statistiken (etwa gewichtete, gleitende Mittelwerte) ein eigenes Zeitverhalten ab, etwa Zeitschranken, bis wann mit einer Bestätigung eines gesendeten Paketes zu rechnen ist, so dass bei Verlust ein Zeitgeber abläuft und ein erneutes Senden anstößt. Aus der Latenz, den beobachteten Paketverlusten (oder ECN-Markings, siehe dazu Abschnitt 4.3.5) und/oder den empfangenen Paketen wird die Datenrate ermitteln, mit der der Sender Daten übertragen darf. Dieser Wert wird typischerweise einmal pro Umlaufzeit angepasst.

Latenzbezogene Verfahren der Staukontrolle

Latenzsensitive Protokolle sind darauf ausgelegt, Warteschlangen gar nicht erst entstehen zu lassen, gleichgültig, ob aktives Warteschlangenmanagement im Einsatz ist oder nicht. Hierzu wurden Staukontrollmechanismen (nicht nur) für TCP entwickelt, die die Messung der Umlaufzeit nicht nur zur Berechnung von Zeitgebern einsetzen, sondern auch für die Bestimmung der Sendedatenrate.[126]

Eine im Laufe einer Verbindung ansteigende Latenz zeigt an, dass sich Warteschlangen im Netz bilden und eine Verringerung der eigenen Senderate angeraten sein kann. Ein Sinken der Latenz hingegen zeigt, dass Warteschlangen abgebaut werden und das Netz eine höhere Senderate tolerieren kann. Paketverluste werden auch bei dieser Klasse von Staukontrollalgorithmen in der Regel einbezogen, weil auch hier das TCP den Jitter auf der Anwendungsebene beim Nutzer ausgleicht.

Latenz wird also einerseits zur Berechnung von Zeitgebern eingesetzt, andererseits können Trends in der Latenz zur Anpassung der Sendedatenrate verwendet werden. Jitter, also die Variabilität der Umlaufzeit, spielt hierbei eine untergeordnete Rolle: Die Berechnungsalgorithmen im ersten Fall sorgen durch etwa die Nutzung gleitender Mittelwerte dafür, dass sich kurzfristige Schwankungen der Umlaufzeit nicht negativ auf die Protokollfunktion auswirken. Im zweiten Fall werden Trends beobachtet und damit ebenso kurzfristige Schwankungen bewusst ausgeblendet. Ausreißer der Latenz nach oben können zwar zu Timeouts des Transportprotokolls führen („spurious timeouts“), treten allerdings eher selten auf; außerdem gibt es Erkennungsmechanismen, um den raren Einfluss auf die Performance des Protokolls zu begrenzen.

Schlussfolgerungen

Jitter als eigenständige QoS Kategorie hat im Kontext von Qualitätskontrollmechanismen auf Ebene der Transportschicht keine Bedeutung. Qualitätsmaßnahmen, die auf den Jitter abstellen, sind auf der Anwendungsschicht angesiedelt, auf die wir in Abschnitt 4 eingehen.

---

126 Zu den latenzbezogenen Verfahren der Staukontrolle siehe u.a. Ludwig, R. / Katz, R. H. (2000); RFC (2003b) sowie RFC (2005)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es universelle Transportprotokolle im Rahmen der schichtbezogenen Implementierung der Protokolle möglich machen, qualitätsbezogene Mechanismen zu etablieren. Sie ermöglichen es, das Netzverhalten zu beobachten und die gewonnenen Informationen für Zwecke der Verkehrssteuerung auszuwerten bzw. flexibel auf Einschränkungen der Network Performance zu reagieren. Paketverlust und Latenz sind dabei die relevanten Steuerungsgrößen.

4.3 Handlungsparameter der Netzbetreiber zur Qualitätssicherung

In den ersten Abschnitten von Kapitel 4 konnten wir zeigen, dass die Implementierung eines Warteschlangensystems in paketbasierten Netzen und weitestgehender Abwesenheit der Priorisierung von Diensten (und damit unter Beachtung der Anforderungen an die Netzneutralität) zur Konsequenz hat, dass die Einhaltung von dienstespezifischen Qualitätsanforderungen vom Verhältnis zwischen den vom Dienst benötigten technischen Leistungsmerkmalen und den aktuell jeweils in der Ende-zu-Ende-Verbindung verfügbaren Ressourcen zur Bereitstellung des Dienstes abhängig ist.[127]

Frühe Bestrebungen der Netzbetreiber, eine Qualitätssicherung auf der Transportschicht zu implementieren, hatten wir in Abschnitt 2.2.1 ausgeführt. Aufgrund der Netzneutralitätsverordnung haben sie für die Realisierung von Internetdiensten ihre Bedeutung weitestgehend verloren. Eine Ausnahme bildet der öffentliche Telefondienst (NGN-Voice). Er fällt in die Kategorie der Qualitätssicherung für Spezialdienste, die einer strengen Begründungspflicht unterliegen. Entsprechend ist die diskriminierungsfreie zur Verfügungstellung der Ressourcen des öffentlichen IP-Netzes der Regelfall. Sie werden den TCP- oder UDP-basierten Transportanfragen diskriminierungsfrei zur Verfügung gestellt. Der Netzbetreiber ist hinsichtlich einer inhaltlichen Spezifizierung des IP-Paketes blind. Er verarbeitet lediglich die adressierungsrelevanten Informationen im Header des IP-Pakets.

---

127 Da wir an dieser Stelle auf die Handlungsparameter des Netzbetreibers abstellen, beziehen sich die „verfügbaren Ressourcen“ auf sein Netz bzw. die Netzabschnitte, über die die in Rede stehende Leistung erbracht wird. Abstrakt formuliert sind damit die technischen Kapazitäten sämtlicher Funktionalitäten im Netz gemeint, die zur Erbringung der Transportleistung erforderlich sind. Eine detailliertere, aber dennoch abstrahierende Darstellung von Funktionseinheiten im IP-basierten Netz findet sich in: Hackbarth, K.-D. / Kulenkampff, G. / Plückebaum, T. (2016).

IP-Header

Der IP-Header [RFC 791] enthält – neben Versionsfeld (IPv4, IPv6), Headerlänge, Längenfeld und Fragmentierungsinformationen einige Felder, die von jedem Router interpretiert werden (können); diese Informationen finden sich ggf. in abgewandelter Form auch im IPv6-Header [RFC 8200]:

- Quell- und Ziel-IP-Adresse: Dient der Weiterleitung der IP-Pakete in jedem Router auf dem Weg von der Quelle zum Ziel.
- Restlebensdauer (Time-to-live, TTL): Heute als Hop-Count gemessen (1 Hop entspricht 1 traversierten Router); wird von jedem Router um 1 dekrementiert; wenn TTL = 0, wird das Paket verworfen. Damit wird vermieden, dass bei Inkonsistenzen in den Routing-Tabellen Pakete endlos im Netz kreisen können.
- Prüfsumme: Zur Erkennung von Bit-Fehlern im IP-Header. Diese muss nach jeder Aktualisierung des Header (also einem TTL-Dekrement) neu berechnet werden.
- Type-of-Service-Feld (TOS):
  - Differentiated Services ("diffserv")-Codepoint: 6 Bits [RFC2474] – hiermit können Dienstanbieter Pakete klassifizieren und entsprechend der Klassifikation weiterleiten bzw. behandeln. Dadurch lassen sich innerhalb eines autonomen Systems (AS), also z.B. eines ISP, Pakete bevorzugt weiterleiten, etwa um Leistungszusicherungen zu treffen bei der Realisierung von VPNs.[128]
  - ECN-Bits: 2 Bits [RFC3168] – siehe unten
- Protokolltyp: Welches Transportprotokoll innerhalb des IP-Pakets übertragen wird (z.B. TCP vs. UDP)
- Header-Optionen: Erweiterungen um Zusatzfunktionen, die für das Gros des Verkehrsaufkommens jedoch keine Bedeutung haben. Insbesondere verringert das Vorhandensein einer oder mehrerer IP-Optionen die Performance eines Routers, weil das entsprechende Paket dann nicht im sogenannten „Fast Path" effizient durch ASICs [Application-Specific Integrated Circuit] weitergeleitet werden kann, sondern zur weiteren Bearbeitung an die relative langsame CPU des Routers übergeben werden muss.

Da die auf der Transportschicht etablierten Mechanismen im Protokollstack der IP-Anwendungen (und damit auf den Endgeräten der Nutzer) implementiert sind, interagieren die IP-basierten Transportnetze lediglich mit den universellen Transportprotokollen und Warteschlangenmechanismen.

Die den Netzbetreibern zur Verfügung stehenden Handlungsparameter werden nachfolgend vorgestellt.

---

128 Siehe hierzu die Ausführungen in Abschnitt 2.2.1 zu den Strategien von Netzbetreibern und Standardisierungsorganisationen, qualitätsgesicherte Dienste in IP-Netzen bereitzustellen.

4.3.1 Netzdimensionierung und Einsatz hochleistungsfähigen Equipments

Die Netzdimensionierung stellt den zentralen Handlungsparameter der Netzbetreiber dar, mit dem sie indirekt die nachgeordneten Network Performance Parameter beeinflussen können.

Transportkapazitäten auf Schicht 3

Um das Transportnetz mit Blick auf die angestrebten Qualitätsziele hinreichend zu dimensionieren (umgangssprachlich wird auch von einer „Über"-Dimensionierung gesprochen), muss der Netzbetreiber sowohl auf den Übertragungswegen (Transport) als auch den Netzkonten (Aggregation und Übergänge) hinreichende Kapazitäten zur Bearbeitung der von den Endkunden gestellten Transportanfragen zur Verfügung stellen.[129]

Die Kapazitäten werden als Datendurchsatz pro Zeiteinheit ausgedrückt: in heutigen Netzen von Internetzugangsanbietern durch GigaBit pro Sekunde im Aggregationsnetz bzw. TeraBit pro Sekunde im Kernnetz. Die Angaben beziehen sich auf die Übertragungswege, die Schnittstellen bzw. für die Router auf die Maximalleistung des Gerätes (Systemdurchsatz).[130]

Sind die Kapazitäten größer als die zeitpunktbezogene Nachfrage, sind Paketverluste, Latenz und Jitter unbedeutend.

Mit dem heutzutage am Markt verfügbaren und in den nationalen IP-Netzen eingesetzten technischen Einrichtungen werden Übertragungsgeschwindigkeiten erreicht, die im Kernnetz im Terabit-Bereich liegen. Dadurch hat die Verarbeitungszeit von IP-Paketen in den Netzknoten praktisch an Bedeutung verloren.

An der Peripherie des Netzes sind Engpässe wahrscheinlicher als im Kernnetz. Dies liegt insbesondere an der deutlich geringeren Verkehrskonzentration im Aggregationsnetz und dem dort eingesetzten, weniger leistungsfähigen Equipment.

Netzübergabepunkte

Neben der Dimensionierung des eigenen Netzes hat auch die Dimensionierung der Netzübergabepunkte eine große Relevanz für die vom Netzbetreiber erzielbare Network Performance. Dies zeigt sich u. a. an den stetig stark steigenden Datendurchsätzen an den IP-Interconnection-Knoten, den sog. Internet Exchange Points.[131] Kapazitätsengpässe

---

129 Auf der Schicht 3 (IP) wird vor allem „Overdimensioning" verwendet, d.h. es wird versucht, dass die Netzkapazität auch bei starker Belastung nur zwischen 70-80% ausgelastet wird. Dazu kann auch ein hoher Vermaschungsgrad auf der IP-Ebene beitragen. Dies muss allerdings durch zusätzliche Verbindungen auf der physikalischen Ebene (Schicht 1) realisiert werden.

130 Siehe hierzu auch die Darstellung des IP-Netzes anhand von Transportwegen und Knoten in Abbildung 13.

131 DE-CIX Management (2023). Neben den Netzbetreibern sind es auch die Dienstanbieter, die mit ausreichenden Interconnects zu Transitprovider bzw. auch direkt zu den Netzbetreibern angebunden sein müssen, um Qualitätseinbußen zu vermeiden. Vergleiche Hetzner Online (2020).

an Zusammenschaltungsknoten sind in ihrer Wirkung mit den Beeinträchtigungen der Network Performance in den Einrichtungen im Netz des Betreibers identisch.

4.3.2 Transportkapazität im Rahmen der Schichten 1 und 2

Neben der Dimensionierung der Transportkapazitäten auf der IP-Schicht (Layer 3) kann der Netzbetreiber auch auf den darunter liegenden Schichten kapazitätserhöhende Maßnahmen ergreifen.

Auf der Schicht 1 kann ein Netzbetreiber weitere Direktverbindungen durch zusätzliche Kabel realisieren. Diese Strategie ist jedoch aufwendig und teuer. Alternativ können durch den Einsatz optischer Crossconnectoren direkte optische Verbindungen mit Hilfe optischer Wellenlängen zwischen zwei entfernten Endpunkten hergestellt werden. Auf diese Weise kann über mehrere direkte Kabelverbindungen ein Transportweg ermöglicht werden.

Netzbetreiber implementieren auch direkte IP-Verbindungen auf der Basis der Schicht 2 mittels sog. Label Switching. Dazu wird im IP-Paket am Netzeingang der Direktverbindung ein Label eingefügt (und am Netzausgang der Direktverbindung wieder entfernt). Es erlaubt (auf dem betreffenden Tranportabschnitt) die Routerdurchläufe auf die Funktion des Label-Switching zu reduzieren und auf das zeitaufwendige Auslesen von detaillierteren Adressinformationen im IP-Header zu reduzieren.[132]

4.3.3 Monitoring der Network Performance

Das Monitoring der Network Performance durch die Netzbetreiber ist eine zentrale Voraussetzung für die beschriebenen Maßnahmen der Netzdimensionierung und damit Qualitätssicherung. Sie kann auch als eigenständiger Handlungsparamameter der Netzbetreiber zur Qualitätssicherung angesehen werden (siehe dazu auch die Ausführungen in Abschnitt 2.2). Von regulatorischer Seite gibt es hier Bemühungen, einheitliche Verfahren anzusetzen.[133]

4.3.4 Warteschlangendimensionierung

Die Warteschlangendimensionierung kann als eine Besonderheit des Netzknotendesigns angesehen werden. Aufgrund der Rolle von Warteschlangen im IP-Transportnetz und der Möglichkeit, die Entscheidung über die Größe der Warteschlange unabhängig von der

---

132 Das Label-Switching wird auch dazu verwendet, um in einem öffentlichen Best-Effort-IP-Netz (fest oder mobil) virtuelle Netze für (größere) Geschäftskunden aufzubauen und diesen eine höhere QoS anzubieten, die von momentanen Netzschwankungen und Überlast im offenen Internet differenziert sind. Vergleiche: Soothar, K. K. et. al. (2019) sowie Obiodu, E. / Sastry, N. (2020), S. 14-21.

133 Siehe EU (2018): EKEK Anhang VIII sowie Anhang X.

Maximalperformance des Routers zu treffen, stellen wir sie als einen eigenständigen Handlungsparameter dar.

Die Größe der Warteschlange hat einen direkten Einfluss darauf, wie schnell Mechanismen des Drop-Tail greifen. Mit der Größe der Speicher an den Warteschlangen kann der Netzbetreiber das Zusammenspiel von Latenz, die infolge der Zwischenspeicherung entsteht, sowie Paketverlust steuern bzw. ausbalancieren und somit auf seine Network Performance Parameter Einfluss nehmen.

4.3.5 Unterstützende Verfahren für Staukontrolle

Bei den Betreibern von IP-Netzen sind verschiedene Verfahren für Staukontrolle (Congestion Control) im Einsatz (und immer neue in der Entwicklung), die sich dann natürlich in Einzelheiten unterscheiden. Begonnen hat diese Entwicklung 1988 mit der systematischen Beschreibung von Internet-Überlast und Mechanismen zur Vermeidung,[134] woraus sich dann im Laufe der Zeit eine Vielzahl von Varianten mit unterschiedlichen Eigenschaften entwickelt haben.[135] Diese Staukontrollalgorithmen lassen sich auf den Endpunkten oft unabhängig implementieren und konfigurieren, so dass verschiedene Varianten gleichzeitig im Internet im Einsatz sind. Aktuelle Varianten von Bedeutung sind insbesondere CUBIC [RFC 8312] und BBR (Bottleneck Bandwidth and Round-trip Propagation Time).[136]

Hintergrund für die Entwicklung weiterer Staukontrollmechanismen ist der folgende Zusammenhang: Es wurde erkannt, dass Drop-Tail den gravierenden Nachteil hat, dass es erst einmal Warteschlangen im Internet aufbaut – und zwar bis zu deren Kapazitätsgrenze. Somit kann es durch die Warteschlangen zu potenziell hohen Latenzen im Internet kommen. Deshalb wurden Verfahren zum aktiven Warteschlangenmanagement (Active Queue Management, AQM) entwickelt, die nicht erst darauf warten, dass eine Warteschlange voll wird.

Active Queue Management, AQM

Verfahren des AQM gehen dabei wie folgt vor: Sie definieren (vereinfacht und verallgemeinert) beispielsweise zwei Schwellwerte: Eine untere und eine obere Schranke. Ist die Warteschlange kürzer als die untere Grenze angibt, werden die Pakete eingereiht und dann weitergeleitet. Wird die untere Schranke überschritten, die obere aber noch nicht erreicht, wird ein eingehendes Paket zufällig – mit einer Wahrscheinlichkeit, die proportional zur Länge der Warteschlange steigt – verworfen. Auf diese Weise wird eine aufkommende Stausituation frühzeitig erkannt und an die beteiligten Endpunkte signalisiert, die dann ihre jeweiligen Senderaten reduzieren, bevor die Warteschlange voll ist. Sollte ihre

---

134 Vgl. van Jacobson (1988).
135 Vergleiche die aktuelle Übersicht in Wikipedia (2023): sowie beispielsweise RFC (2009).
136 IETF (2022).

Länge dennoch oberhalb der oberen Schranke ankommen, werden alle neu ankommende Pakete verworfen. Durch das geeignete Zusammenspiel von Transportprotokoll und Routern werden so die gemeinsam verfügbaren Ressourcen im Internet (diskriminierungsfrei) geteilt.

ECN-Markings

Explicit Congestion Notification (ECN) ist ebenfalls ein Verfahren zur Unterstützung von Warteschlangenmanagement und damit der Staukontrolle. Es wird in der RFC 3168 definiert und zeigt an, dass auf dem Transportweg eine Stausituation („Congestion") aufkommt.[137] Wenn zwei Endpunkte anzeigen, dass sie ECN unterstützen, kann ein ECN-fähiger Router in einer Lastsituation anders reagieren: Statt ein Paket zu verwerfen, kann er dieses markieren, indem er die zwei ECN-Bits im IP-Header entsprechend auf „1" setzt.[138] Diese ECN-Markierung signalisiert den Endpunkten, dass eine (Über-) Lastsituation vorliegt und die Senderate reduziert werden soll. Der Empfänger des Pakets spiegelt diese Information an den Sender in einem Header des Transportprotokolls (z.B. TCP oder QUIC). Ohne ECN wird ein Paket durch einen Router verworfen, und der Empfänger stellt diesen Verlust beispielsweise durch eine Lücke in den Sequenznummern der empfangenen Pakete fest, die dieser durch eine entsprechende Bestätigung dem Sender mitteilt. In beiden Fällen reagiert der Sender durch Reduktion der Sendedatenrate, um dazu beizutragen, die vorhandene Last abzubauen. ECN-Markings erfüllen damit die gleiche Aufgabe wie das Verwerfen von Paketen, allerdings ohne den Datenverlust.

ECN-Markings werden daher zur Steuerung der Verkehrslast und zur vorausschauenden Vermeidung von Verkehrslast-bedingtem Delay und Paketverlust eingesetzt; sie liefern – wenn verfügbar – das gleiche Signal bzw. Information zur aktuellen Verkehrslast an die Endpunkte, wie dies im Fall des Paketverlusts durch die Mechanismen des TCP geleistet wird.[139]

Die Vorteile bzw. Besonderheiten von ECN-Markings im Vergleich zum Verwerfen von IP-Paketen sind offenkundig: Wird ein Paket in einem Router X verworfen, um eine Lastsituation zu signalisieren, hat es ja auf dem Weg dorthin bereits eine Strecke durch das Netz durchlaufen, wofür Ressourcen aufgewendet werden mussten. Das Verwerfen eines Pakets macht diese bereits verrichtete Arbeit zunichte. Das Paket muss später ggf. erneut gesendet werden und erfordert damit wiederholt Arbeit. Bei ECN wird das Paket hingegen nicht verworfen, das Signal erreicht den Empfänger aber trotzdem.[140]

---

137 Vgl. RFC (2001).
138 Zur Darstellung des IP-Headers siehe Abschnitt 4.1.
139 vgl. Juniper (2022).
140 Zu den Vorteilen von ECN siehe auch Abschnitt 2 von RFC (2017).

4.3.6 Caching

Da die Qualitätssicherung im Transportnetz ein zeitpunktbezogenes, relatives Problem von verfügbarer zu nachgefragter Kapazität ist, gibt es auch Ansätze, die vom Netzbetreiber nicht direkt beeinflussbare Verkehrsnachfrage zu berücksichtigen.

Caching bezeichnet dabei die Strategie eines Netzbetreibers bzw. Serviceanbieters, häufig nachgefragte Daten in dezentralen Speichern temporär für zukünftige Anfragen zu halten. Somit können erneute Anfragen der selben Datenressource aus dem Datencache schneller und zumeist regional näher an dem Verbrauch (Nutzer) abgerufen werden. Neben einer Verkürzung der Wege geht insbesondere eine Reduktion der Kapazitätsnachfrage innerhalb des Aggregationsnetzes des Anbieters, aber auch im Transit und beim Serviceanbieter einher.

Getrieben von dem nahezu kompletten Ansatz der Ende-zu-Ende Verschlüsselung von webbasierten Diensten[141] hat sich das früher durch den Netzbetreiber implementierte Caching auf ein Serviceanbieter-Caching verschoben. Für einen Netzbetreiber sind die angefragten Ressourcen in der Anwendungsschicht - durch Verschlüsselung - nicht zu ermitteln, was einer temporären Zwischenspeicherung entgegensteht. Der Serviceanbieter, wie z. B. eine Streaming-Dienst, hat vollen Zugriff und Übersicht über die abgerufenen Daten seiner Plattform. In Zusammenarbeit mit Netzbetreibern können Caching-Systeme durch den Serviceprovider bereitgestellt und durch die Netzbetreiber betrieben werden. In der Regel profitieren hiervon alle drei Parteien:

- der Nutzer des Dienstes erhält über kurze Wege den Dienst mit einer guten Güte,
- der Anbieter reduziert belegte Ressourcen auf Aggregation und Transit und
- der Serviceanbieter reduziert seinerseits belegte Ressourcen auf Transitwegen zum Netzbetreiber.

Bekannte Serviceanbieter, die Caching-Server bei Netzbetreibern im Einsatz haben, sind u. a. Google (inklusive YouTube)[142], Netflix[143], Akamai[144].

---

141 Webbrowser Chromium zeigt ab Mitte 2018 unverschlüsselte Webseiten als unsicher an. Andere Browserhersteller folgten diesem Beispiel. Google Chromium Blog (2018).
142 Google Global Peer https://peering.google.com/#/.
143 Netflix Open Connect Appliances https://openconnect.netflix.com/en/.
144 Akamai Accelerated Network Partner https://www.akamai.com/de/why-akamai/network-operator/akamai-network-partnerships.

4.4 Evidenz von Paketverlust und Jitter – vereinzelte Angaben zur Network Performance

Um eine Einschätzung darüber zu gewinnen, welche Network Performance sich bei Betreibern von IP-Netzen tatsächlich beobachten lässt, haben wir eine entsprechende Recherche durchgeführt – mit einem Fokus auf Paketverlust (und Verzögerung, als dem Jitter übergeordnete Größe). Die limitierte Anzahl verfügbarer Angaben wird nachfolgend dargestellt.

IP-Kernnetz-Performance

Cisco hat in 2005 Network Performance Parameter ausgewählter VoIP Service Provider gegenübergestellt.

Tabelle 2: Network Performance ausgewählter VoIP-Netzbetreiber

Network parameter	Axiowave	Internap	Qwest	Verio/Viteria
Delay ms	65	45	50	55
Jitter ms *	0,5	0,5	2	1
Packet-loss %	0	0,3	0,5	1

* values based on RFC355, RFC3611

Quelle: Cisco (2005)

Ein Vergleich der von Cisco zusammengestellten Werte zeigt, dass die von Yu und Al Ajarmeh (2007) angegebenen Jitter-Grenzwerte für VoIP nicht im Entferntesten eine kritische Größe darstellen. Auch die beobachteten Werte für die Paketverlustrate liegen für zwei der Netzbetreiber deutlich unterhalb der unteren Grenze des definierten Intervalls. Die anderen beiden Angaben decken das Spektrum des Intervalls für akzeptablen Paketverlust im Intervall [0,5% – 1,0%] ab und genügen damit den dargestellten Grenzwerten für VoIP.

Der Netzbetreiber Verizon verwendet die von uns betrachteten QoS-Parameter für die proaktive Vermarktung seines Transportnetzes und veröffentlicht regelmäßig die KPIs (Key Performance Indicator) seiner Network Performance auf seiner Website. Dort wirbt Verizon, dass in ihrem Netz für VoIP die Jitter-bezogene Performance das vermarktete Service Level Agreement (SLA) von maximal 1,0 Millisekunden nicht verletzt.[145] Mit der Veröffentlichung dieser KPIs wirbt Verizon für die Nutzung seines Netzes und kann mit

145 Hier ist zu beachten, dass sich die Angaben zur Network Performance ausschließlich auf das Netz von Verizon beziehen und keine Ende-zu-Ende Bewertung für aus Sicht des Nutzers erlauben. Siehe Verizon (a): Verizon VoIP Voice Quality Service Level Agreement [Internet], https://www.verizon.com/business/terms/voipsla/voicequality/; auch wird für Sprache ein MOS von mindestens 4,0 zugesichert; zuletzt abgerufen: 19.05.2023.

den angegebenen Werten dessen Leistungsfähigkeit dokumentieren. Die Paketverlustrate bzw. die hier angegeben Paketzustellungsrate signalisiert den Kunden von Verizon die effektiv zur Verfügung stehende Datenübertragungsrate.[146]

Nachfolgend ist anhand der Statistik vom 19.05.2023 die „IP Latency Statistics“ die Network Performance von Verizon wiedergegeben. Die auf der Website zugänglichen Statistiken zur Network Performance dokumentieren für die verschiedenen Bereiche des Verizon Netzes monatliche Werte zu Latenz und Paketverlustrate.

Verizon

IP Latency Statistics – Monthly IP Latency Data (19.05.2023)

- Monthly latency figures of:
  - 45ms or less for regional round trips within North America.
  - 30ms or less for regional round trips within Europe.
  - 90ms or less for transatlantic round trips between London and New York.
- Packet delivery of:
  - 99.5 percent or greater for regional round trips within Europe and North America.
  - 99.5 percent or greater for transatlantic round trips between London and New York.

Quelle : Verizon (b) : https://www.verizon.com/business/terms/latency.html

Angaben zu Referenzwerten für Netzbetreiber konnten wir außerdem bei Microsoft im Lync Server 2013 Networking Guide v2.3 finden.[147] Hier handelt es sich um Angaben, die als Empfehlungen für das Network Management zu verstehen sind. Insofern machen sie keine Angaben zu erhobenen QoS-Metriken. Die Werte lassen dennoch insofern Rückschlüsse zu, als dass die genannten Grenzwerte offenbar einen Handlungsbedarf auf Seiten des Netzbetreibers auslösen sollten (der bei guter Network Performance nicht gegeben ist). Das Dokument stammt ursprünglich aus dem Jahr 2013 und wurde zuletzt 2015 aktualisiert. Die Werte sind entsprechend einzuordnen:

Auf Basis der Leistungsfähigkeit der (damaligen) IP-Netze sollten Netzbetreiber ihre Network Performance mit Blick auf Schwellwerte für Paketverlustrate und auch Jitter monitoren. Sollte die beobachtete Paketverlustrate von 1 % überschritten werden, sollte der Netzbetreiber eine Ursachenforschung vornehmen, um mögliche Engpässe im Netz zu beseitigen. Auch der Jitter wird von Microsoft als Indikator aufgeführt, der – als QoS-Metrik aus Sicht des Netzbetreibers – einen Wert von 3 % nicht übersteigen sollte.

---

146 Der Paketverlust ist für SLA Betrachtungen ein sehr interessanter Parameter, da dieser Rückschlüsse darauf zulässt wie sich Dienste verhalten werden. Bei Nutzung von TCP als Transportprotokoll wird sich auf der Dienste Ebene eine Reduzierung der Datenübertragungsrate und eine Erhöhung der Anwendungsbezogenen Laufzeit einstellen.

147 Microsoft (2015), S. 55 f.

Performance von Internetzugangsdiensten – Breitbandmessungen der Bundesnetzagentur

Für die Bedeutung der Grenzwerte für den Internetzugangsdienst wäre es aus unserer Sicht wünschenswert, nicht nur Angaben von großen (internationalen) IP-Backbone-Betreibern heranzuziehen, sondern auch Informationen von Anbietern aus dem deutschen Internetzugangsmarkt auszuwerten. Hierzu konnten wir jedoch keine Angaben finden. Um dennoch eine Indikation zur Network Performance zu geben, stellen wir auf die Ergebnisse der Breitbandmessung der Bundesnetzagentur ab.[148] Diese liefern zwar keine Statistiken zu Paketverlust (und Jitter), jedoch geben verfügbare Messergebnisse Auskunft über die im Netz beobachtete Latenz.

Wenn Latenzen im Netz gering sind, kann sich auch der Jitter als Variabilität der Latenz nur innerhalb dieser Grenzen bewegen. Darüber hinaus ist die Messung der Laufzeiten aus weiteren Überlegungen für die Dienstequalität von Bedeutung: Eine kürzere Laufzeit ist aus Sicht des Endkunden verbunden mit einem besseren Nutzungserlebnis. Geringe Laufzeiten sind insbesondere in den Anwendungsbereichen Home Office, Videokonferenzen, Collaboration Tools und Online-Spiele von großer Bedeutung. Vor allem der Bereich Home Office ist in den letzten Jahren für viele Endkunden wichtiger geworden.

Die Breitbandmessungen der Bundesnetzagentur zur Latenz zeigen, dass über 99,5 % der Nutzer ein Round-Trip-Delay von 300 ms oder besser erreichen.[149] Bei der Betrachtung über die unterschiedlichen Anschlussgeschwindigkeiten sind zum Teil Unterschiede in der Laufzeit zu erkennen. Bei einem Round-Trip-Delay von 300 ms liegen im schlechtesten Fall dennoch über 99 % aller Messungen unterhalb dieser Laufzeit.

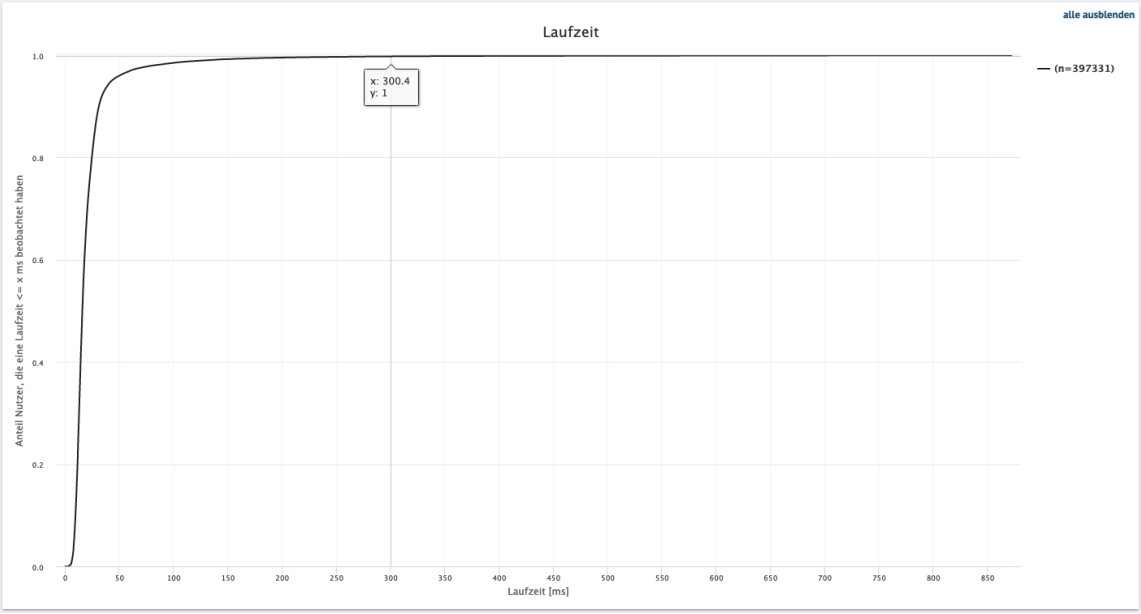
Diese Ergebnisse liefern Indikationen dafür, dass eine Überschreitung der in der TKMV festgelegten Latenz eine kleine Anzahl der deutschen Anschlüsse betrifft. Somit ist davon auszugehen, dass in diesem Punkt die Network Perfomance im deutschen Massenmarkt die Vorgaben erfüllen. Zu beachten ist hierbei, dass der Umkehrschluss, wie viele Anschlüsse von einer Laufzeit von über 300 ms betroffen sind, nicht gezogen werden kann. Eine Betrachtung eines Anschlusses, bei dem die TKMV Kriterien potenziell nicht erfüllt sind, ist im Einzelfall vorzunehmen.

---

148 Die Breitbandmessungen der BNetzA sind den Nutzern über die folgende Website zugänglich: https://breitbandmessung.de/interaktive-darstellung.

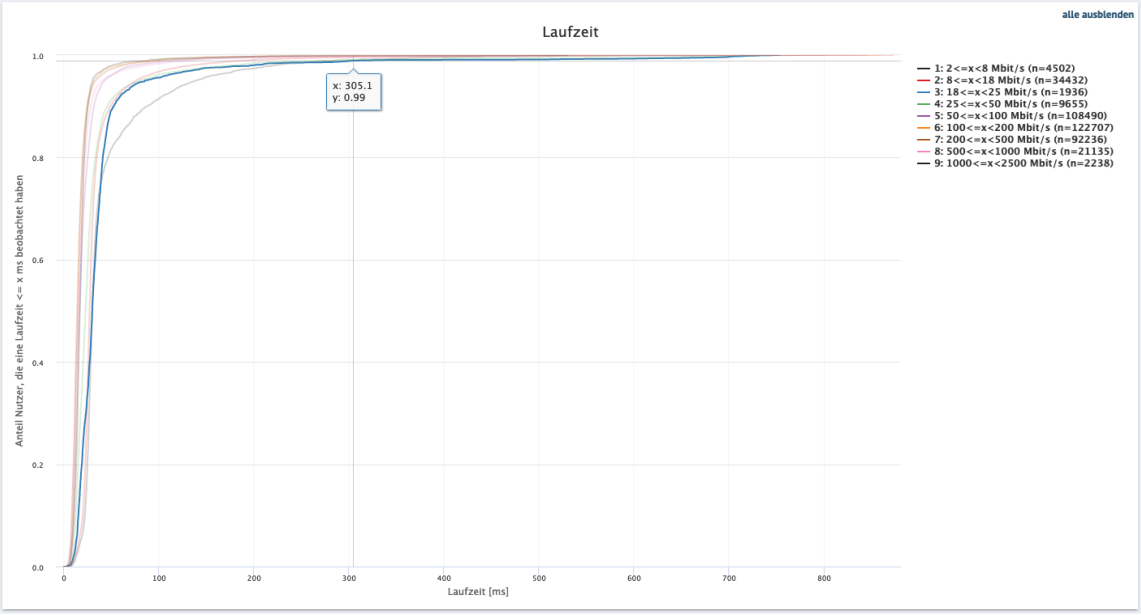
149 Die Laufzeitmessung wird von Servern der Breitbandmessung aus einem Anschluss der Breitbandmessung zu der Messanwendung und wieder zurück gemessen. Die Server befinden sich in Frankfurt in unmittelbarer Nähe zum Internet-Exchange DE-CIX. Die Nutzung einer Grenze von 300 ms Round-Trip-Delay für eine Einschätzung bei 150 ms One-Way-Delay ist als grobe Abschätzung zu verstehen, lehnt sich aber an der Interpretation der TKMV §1 an.

Abbildung 15: Latenz – Ergebnisse der Breitbandmessung Desktop-App (Einzelmessungen) für das Berichtsjahr 2021/2022



Quelle: Breitbandmessung – https://breitbandmessung.de/interaktive-darstellung

Abbildung 16: Latenz – Ergebnisse der Breitbandmessung Desktop-App (Einzelmessungen) für das Berichtsjahr 2021/2022



Quelle: Breitbandmessung – https://breitbandmessung.de/interaktive-darstellung

Im Rahmen von Einzelmessungen für Berichte wird die Laufzeit, wie zuvor dargestellt, erhoben. Die Implementierung folgt hierbei den BEREC-Empfehlungen und erfasst die

Laufzeit mittels WebSocket und baut somit auf TCP bzw. http auf. Das genutzte Protokoll ist somit fehlerintolerant und gleicht Verluste durch Retransmissons aus. Dies kann zu einzelnen Jitter-Ausreißern führen.[150]

Bei den Breitbandmessungen der BNetzA wird Jitter nicht erfasst.

Aufgrund der technischen Realisierung der Dienste mit kontinuierlichen Datenströmen kann jedoch festgehalten werden, dass zu großer Jitter in der Folge zu Paketverlust beim Endnutzer führt (auf der Ebene der Anwendung). Dies erfolgt nach Überschreiten eines Grenzwertes, der in der Anwendung bzw. dem Jitterbuffer verankert ist. Der Jitterbuffer ist insbesondere bei interaktiven Echtzeitkommunikationsdiensten wie z.B. der Sprachkommunikation (VoIP) zwar dynamisch, aber im unteren Millisekunden Bereich definiert.[151]

Die Breitbandmessung der Bundesnetzagentur betrachtet den Paketverlust nicht als eigenständige Messgröße. Ein Verzicht auf die Messung des Paketverlusts erklärt sich

- zum einen aus den Definitionen zur Feststellung einer Minderleistung zwischen der in Aussicht gestellten und der tatsächlichen Leistung. Diese ist nach den Konkretisierungen eine "erhebliche, kontinuierliche oder regelmäßig wiederkehrende Abweichung bei der Geschwindigkeit“ in der Allgemeinverfügung[152] für das Festnetz ausschließlich auf die Down- und Upload Datenübertragungsrate festgelegt,
- zum anderen daraus, dass diese bei der Erfassung der Datenübertragungsrate durch den direkten Einfluss des Paketverlustes auf die Transportprotokoll-Mechanismen berücksichtigt wird.

Technisch liegen der zweiten, inhaltlichen Begründung die folgenden Zusammenhänge zugrunde: Die implementierten Messmethoden zur Ermittlung der Datenübertragungsrate nutzen TCP. Somit werden Paketverluste bei der Übertragung durch Retransmissions ausgeglichen. TCP wertet Paketverluste als Teil seiner Congestion Control, was wiederum direkten Einfluss auf die maximal zu erreichende Datenübertragungsrate hat. Daraus folgt, dass die Effekte der Paketverluste unmittelbar im Rahmen der erfassten Datenübertragungsrate mit berücksichtigt sind.

150 Die Implementierung erfolgte aus technischen Gründen in TCP. Diese Umsetzung kann damit einhergehen, dass Paketverlust zu einer Erhöhung der Laufzeit führen kann.
151 Siehe auch Linphone (2017).
152 BNetzA (2021a).

5 Anwendungsschicht

In Abschnitt 4.1.2 haben wir anhand des Schichtmodells den gestapelten Protokollaufbau in Abgrenzung zur Transportschicht erläutert. An dieser Stelle wollen wir herausarbeiten, welche Mechanismen der Qualitätssteuerung der Anwendung bzw. Anwendungsschicht zuzuordnen sind und wie diese funktionieren.

Die Anwendungsschicht mit ihren zugehörigen Protokollen ist an den jeweiligen Endknoten der Kommunikationsverbindung angesiedelt, d.h. in den Rechnern der Nutzer bzw. Servern der Diensteanbeiter. Über das Internet realisierte Anwendungen und Produkte, die auf den lokalen Rechnern installiert sind, verwenden sowohl standardisierte als auch proprietäre Protokolle der Anwendungsschicht.[153] Ihnen allen gemeinsam ist das Zusammenspiel mit den Protokollen TCP bzw. UDP auf der Transportschicht (Schicht 4).

Aufgabe der Anwendungsschicht ist es, eine effiziente und sichere Kommunikation zwischen verschiedenen Anwendungsprogrammen innerhalb eines Netzes zu ermöglichen.[154] Die standardisierten Protokolle der Anwendungsschicht bilden dabei einen ubiquitären Aufsatzpunkt für Internetdienste bzw. Produkte. Bei der softwaretechnischen Implementierung von Anwendungen, finden die Protokolle der Anwendungsschicht Eingang.

Im qualitätsungesicherten Best-Effort-Internet hat die Anwendungsschicht in Zusammenspiel mit der Transportschicht für die Qualitätssicherung eine große Relevanz.[155] Viele, der in den letzten Jahrzehnten (weiter-)entwickelten Protokolle der Anwendungsschicht und deren Implementierungen in (neuen) Protokollstacks konnten einen Beitrag dazu leisten, die Network Performance zu verbessern bzw. Einschränkungen der Network Performance zu vermeiden bzw. abzumildern. Die beiden universellen Transportprotokolle UDP und TCP – welche für unterschiedliche Diensteklassen bzw. Dienstekategorien entwickelt und eingeführt wurde[156] – bilden dabei die Ausgangsbasis für eine dienstespezifische Implementierung.

Nachfolgend stellen wir relevante Technologien zur Qualitätssteuerung auf Anwendungsschicht vor. Zuvor geben wir einen Überblick zu den Protokollen der Anwendungsschicht, die auch für die Dienste der Mindestversorgung beispielhaft sind.

---

153 Wie in Abschnitt 4.1.2 anhand des OSI-Schichtmodells gezeigt wurde, sind im IP-Schichtmodell die Ebenen oberhalb der TCP/IP-Schicht (Schichten 5-7) zur übergreifenden Anwendungsschicht verschmolzen.

154 Dies ergibt sich aus dem schichtbasierten Protokollaufbau, wie wir ihn anhand des OSI-Modells dargestellt hatten. Siehe Abschnitt 4.1.2 und die dort angegebenen Quellen sowie Ionos (2022).

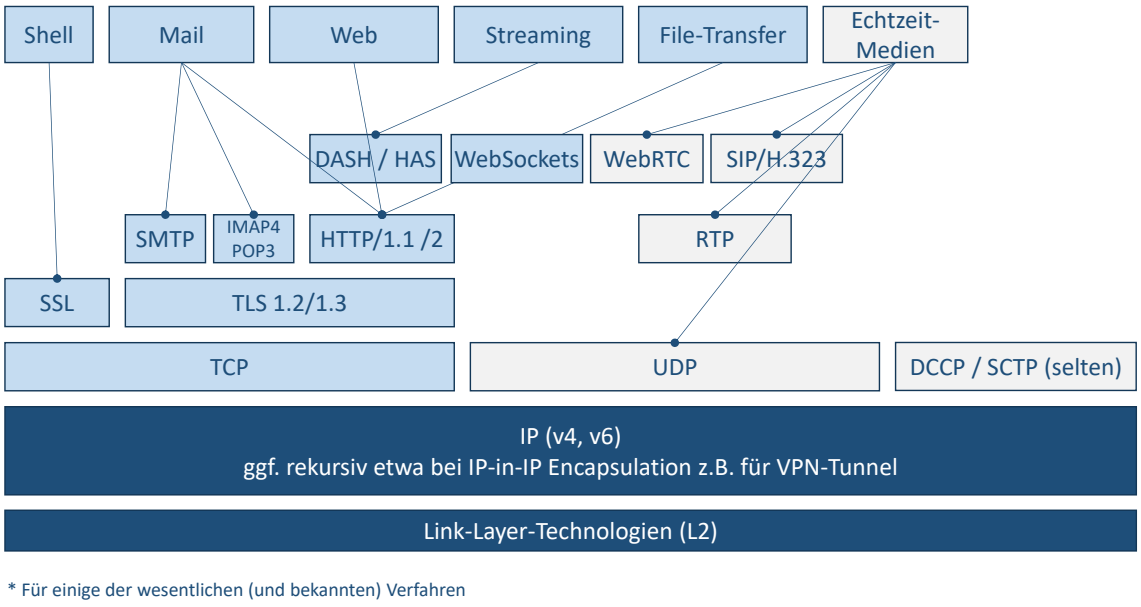
155 Xiao, X. (2008), S.48.

156 Siehe dazu die Ausführungen in Abschnitt 4.2 und dort angegebenen Quellen.

5.1 Protokolle der Anwendungsschicht – Beispielhafte Darstellung

Abbildung 17 zeigt Beispiele der Hierarchien und Interaktionen verschiedener Protokolle im heutigen Internet für verschiedene Dienste. So wird Mailzugriff durch E-Mail-Clients (wie Thunderbird) beispielsweise durch die Protokolle SMTP und IMAP und POP3 realisiert, typischerweise verschlüsselt über TLS, allerdings gibt es auch (hier nicht dargestellte) proprietäre Varianten wie etwa MS Outlook. Die meisten E-Mail-Diensteanbieter gestatten den Zugriff aber auch über eine Webschnittstelle, die dann HTTP verwendet. Die meisten Webdienste nutzen heute sichere (verschlüsselte) Protokolle, also HTTP über TLS/1.2 oder TLS/1.3. Media-Streaming setzt auf HTTP auf und führt oberhalb von HTTP durch Dynamic Adaptive Streaming over HTTP (DASH, Dynamic Adaptive Streaming over HTTP) bzw. HTTP-Adaptive Streaming (HAS) eine dynamische Anpassung an die variablen Eigenschaften des Internets durch. File-Transfer-Dienste nutzen oft HTTP oder auch proprietäre Protokolle. Echtzeitübertragungen als Bildtelefonie oder Videokonferenzen verwenden meist zur Signalisierung TCP-basierte Protokolle (SIP, H.323, HTTP) und UDP für die Echtzeitdatenübertragung.

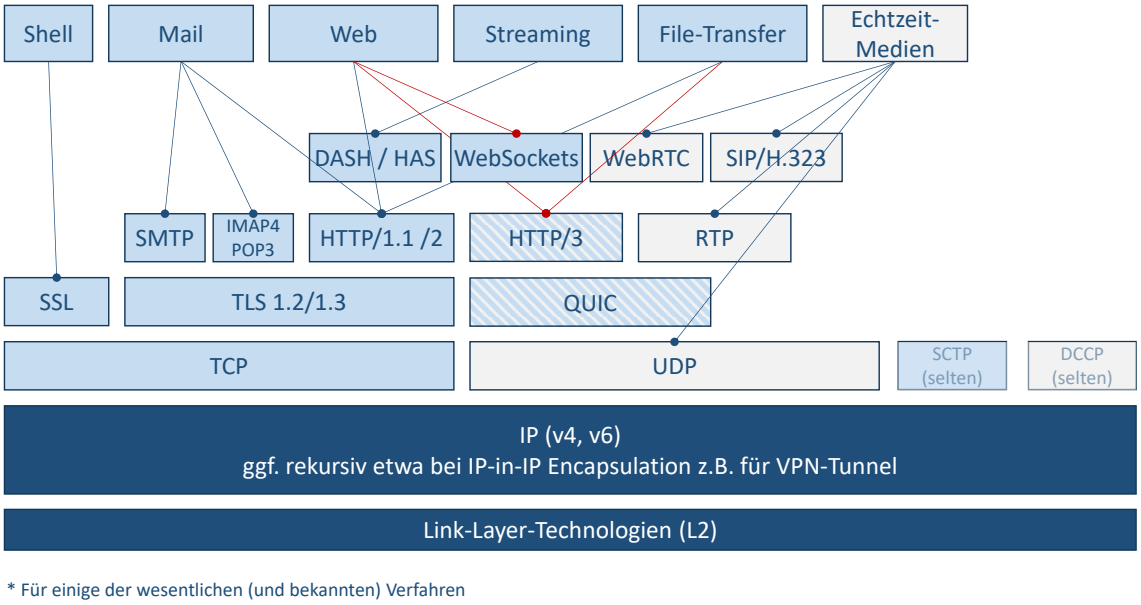
Abbildung 17: Bisherige Protokoll-Landschaft – TCP und UDP anhand ausgewählter Beispiele



Quelle: wik

Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 18, an welchen Stellen sich QUIC aktuell in die Protokollumgebung eingliedern lässt. QUIC setzt auf UDP auf und ist zunächst vor allem für den Webzugriff entwickelt worden (HTTP/3). [157]

Abbildung 18: Erweiterte Protokoll-Landschaft – UDP&QhttpHTTP/3 als Substitut zu TCP



Quelle: wik

5.2 Funktion der Anwendungsschicht für die Qualität von Diensten mit kontinuierlichen Datenströmen – Instrumente zum Umgang mit Paketverlust und Latenz

Bei der Übertragung von Audio- und Videosignalen kodiert der Sender (also die Anwendung) die zu übertragenden Inhalte (etwa Audio oder Video), teilt den kontinuierlichen Datenstrom auf diskrete IP-Pakete auf und sendet diese kontinuierlich, (meist) in regelmäßigen zeitlichen Abständen. In den Paketen vermerkt der Sender auch den Aufnahmezeitpunkt der Daten (Zeitstempel). Übertragungsrate und Paketgrößen hängen von der verwendeten Kodierung (Codec) ab. Beim Transport dieser Datenpakete über das Netz wird aus dem ursprünglich kontinuierlichen Datenstrom ein diskontinuierlicher, so dass die Datenpakete im Allgemeinen nicht in denselben zeitlichen Abständen beim Empfänger eintreffen, in denen sie abgesendet wurden. Der Empfänger nimmt die Pakete

157 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Abschnitt 4.2.2 und die dort angegebenen Quellen. Zur Verwendung von QUIC im Kontext von Multimedia-Anwendungen siehe auch Band, V. (2019) oder Kanagarathinam, M. et.al. (2022).

entgegen und speichert sie in einem Puffer zwischen, um sie dann – mit geringer zeitlicher Verzögerung – entsprechend der Zeitstempel nun wieder in Form eines kontinuierlichen Datenstroms wiederzugeben.

Die für diese Prozesse zum Einsatz kommenden Funktionen beschreiben wir in den nachfolgenden Unterabschnitten.

5.2.1 Codecs

Codecs finden bei Audio- oder Video-Signalen (inkl. Streaming) Anwendung. Der Codec definiert die Transformation der analogen oder digitalen Ton- oder Bildinformation in ein anderes digitales Signal.[158] Die Gesamtheit der Algorithmen dieser Transformation wird als Codec bezeichnet.[159]

> „Codec ist zunächst eine Abkürzung für Kodierer/Dekodierer (coder/decoder). Ein Codec wird im Allgemeinen für die Umkodierung eines Signals verwendet, zumeist von der analogen Form in eine digitale Form und umgekehrt, er findet aber auch für die Kompression von Signalen Anwendung (typisch: Sprache, Musik, Bild, Video).
>
> Vereinfacht ausgedrückt bestimmt der Codec maßgeblich die Datenübertragungsrate, die Latenz maßgeblich die Qualität. – Der Codec beachtet natürlich auch kritische Anforderungen an die Latenz. Diese reizt der Codec aber nicht vollständig aus, da er ja auch für Verzögerung auf dem Übertragungsweg und die involvierten Knoten, welche alle Latenz verursachen können, eine Toleranz einbauen muss. Insofern sind diese beiden Aspekte nicht vollständig voneinander zu trennen.“[160]

Für die verschiedenen Dienste ist eine Vielzahl von Codecs verfügbar; sie sind entweder als Industriestandards (beispielsweise bei der ITU oder ETSI) oder proprietär von einzelnen Unternehmen entwickelt worden.[161] Die verschiedenen Codices tragen dabei den Anforderungen unterschiedlicher Produkte Rechnung und sind Ausdruck einer Produktdifferenzierung.

---

158 Bei dieser Transformation kann eine Redundanz-, Irrelevanzreduktion oder eine Kombination aus beidem durchgeführt werden, zumeist mit dem Ziel eine Datenreduktion zu erwirken. Auf diese Verfahren gehen wir im weiteren Verlauf weiter ein.

159 Siehe wik-zafaco-Gutachten (2021), S. 65.

160 wik-zafaco-Gutachten (2021), S. 65, FN 130, – Zu verschiedenen Codices (alternativ zu G.711) siehe beispielsweise Internet Engineering Task Force IETF RFC 6716 (2012a).

161 Vgl. wik-zafaco-Gutachten (2021), S. 66. So ist beispielsweise der Codec für Mobilfunktelefonie auf geringe Bandbreitenanforderungen ausgelegt, da die ersten Mobilfunknetze lediglich geringe Bandbreiten zur Verfügung stellten.

5.2.2 Jitterbuffer

Beim Sprachdienst (und auch für audiovisuelle Kommunikation) kommt dem Einsatz von Jitterbuffern eine große Bedeutung zu. Dies wird von Paulsen anschaulich illustriert: [162]

> „Der Effekt, den dieser Beeinträchtigungsparameter auf die Dienstgüte hat, ist nicht unerheblich. Dessen Kompensation findet für gewöhnlich auf Seiten des Empfängers in einem Jitterbuffer statt. Dieser speichert ankommende Pakete, bevor sie an den Empfänger weitergeleitet werden, um so die Effekte von Verzögerungen und Vertauschungen zu minimieren. Sobald ein Paket die Kapazität des Buffers überschreitet, wird es verworfen (Pseudo-Verluste). In Abhängigkeit der Größe des Jitterbuffers erhöht sich allerdings auch die Ende-zu-Ende-Verzögerung und es verringert sich damit die Dienstgüte. Neben den fest dimensionierten Buffern werden daher häufig Buffer verwendet, deren Größe dynamisch an die aktuelle Übertragungsqualität angepasst werden können (adaptive Jitterbuffer).“

Aus dem Zitat wird deutlich, dass es das Einfügen eines Jitterbuffers erlaubt, aus in unregelmäßigen Zeitabständen empfangenen Datenpaketen einen konstanten Datenstrom für die Anwendung zu erzeugen, was durch eine künstliche Verzögerung auf dem Endgerät erreicht wird. Aus diesem Grund ist die Summe aller Verzögerungen inklusive einer Verzögerung durch einen Jitterbuffer für die Qualität des Dienstes zu betrachten, was es erlaubt (im Gegenzug) auf eine gesonderte Betrachtung des Jitters zu verzichten, da dieser von der Anwendung in den tolerierten Grenzen mit seinem definierten Speicher für den Transportweg kontrolliert wird: Bei über- oder unterschreiten der Grenzen stellt sich entweder ein Paketverlust ein oder – im Fall von dynamischen Jitterbuffern – erfolgt eine Anpassung in Form einer Vergrößerung des Buffers. Diese Vergrößerung hat direkten Einfluss auf die Ende-zu-Ende-Verzögerung, welche sich somit auch vergrößert. Daher ist auch ein Grenzwert für Jitter als eine ausschließlich abgeleitete Größe zu verstehen und muss im Kontext der jeweiligen anwendungstechnischen Umsetzung beurteilt werden. Durch die dynamische Anpassung tritt auch in diesem Fall beim Überschreiten einer vorgegebenen maximalen Verzögerung eine „Graceful Degradation“ ein; d.h., der entsprechende Dienst ist weiterhin nutzbar, allerdings mit verminderter Dienstgüte (in diesem Fall mit reduzierter Interaktivität).

Jitterbuffer kontrollieren bzw. korrigieren somit die bei der Übertragung durch das Internet entstandene Variabilität in der Latenz, die bei der Wiedergabe der Sprache beim B-Teilnehmer[163] ausgeglichen werden muss.[164] Gleichzeitig „soll“ der Jitterbuffer nicht zu groß gewählt werden, um die Überschreitung kritischer, störender Latenzwerte zu vermeiden und stattdessen den (begrenzten) Verlust von Datenpaketen zu tolerieren. Die Entscheidung darüber, wie die jeweiligen Abwägungen zu treffen sind, entscheidet dabei jeder

---

162 Paulsen, S. (2015), S. 56.

163 A-Teilnehmer und B-Teilnehmer sind stehende Begriffe in der Telekommunikation. Sie haben ihren Ursprung in der Telefonie. Der A-Teilnehmer repräsentiert den Anrufer, der B-Teilnehmer den Angerufenen.

164 Vergleiche Mo, T. / Hines, A. (2019) sowie die Ausführungen im Kontext des OSI-Modells (Abschnitt 4.1.2.

Anbieter bzw. Entwickler mit der Implementierung seines jeweiligen Produkts. Die genaue Ausgestaltung und auch die Flexibilität, mit der auf Paketverluste und Latenzvariation reagiert wird, kann zur Produktdifferenzierung eingesetzt werden.

5.2.3 Streamingbuffer

Buffer üben beim Video-Streaming die gleichen Funktionen aus wie beim Jitterbuffer: Sie tragen dafür Sorge, dass beim Anwender ein kontinuierlicher Datenstrom ausgegeben wird und eine im Zuge des Transports über das Internet entstandene Latenz nicht auf die Wiedergabe des Videos beim Nutzer durchschlägt. Die nachfolgende Tabelle 3 weist tolerierte Latenzen für verschiedene Videostreaming-Anwendungen aus. Die Höhe der Werte (im Sekundenbereich) bringt zum Ausdruck, dass innerhalb dieser Größenordnung Jitter keine Relevanz hat.

Tabelle 3: Tolerierte Latenz [s] bei Videostreaming verschiedener Anwendungen

Category latency level	Common http	Reduced level	Low level	Near real time
Application	streams of live events for large audience	OTT live streaming for news and sport	UGC live streams, game and e-sport	Two way web conferencing, telepresence, real time device control (cameras, drowns
Upper time [s]	45 +	18	5	1
Lower time [s]	18	5	1	< 1
Protocol	HLS, DASH	HLS tuned, DASH tuned	Low latency HLS, low latency DASH, RTSP,RTP	WebRTC

Quelle: siehe wik-zafaco-Gutachten 2021, S. 96; WIK auf Basis von Abbildung in Wowza Media Systems (2020)).

Die Funktionsweise des Streamingbuffers lässt sich wie folgt beschreiben:[165]

> „Die hohe Toleranz des Videostreamings in Bezug auf die Verzögerung (im Vergleich zu bi-direktionalen Echtzeitdiensten) wird insbesondere durch den Einsatz von Speichern (Buffern) beim Nutzer erreicht. Diese dienen dazu, Varianzen der Verzögerungen in der Übertragung des Videostreams (und damit in der Ankunft von Video-Datenpaketen, Jitter) auszugleichen. Zu diesem Zweck wird der Buffer zunächst mit den ersten Datenpaketen des Videos befüllt, bevor das Video beim Nutzer startet. Dabei fließen in der Folge alle weiteren Datenpakete in den Buffer und werden von dort aus für die Wiedergabe des Videos in einem konstanten Strom abgerufen. Zeitliche Verzögerungen in der Übermittlung können daher aufgefangen werden und erlauben somit eine deutlich größere Latenz als dies bei bi-direktionalen Echtzeitdiensten der

165 wik-zafaco-Gutachten 2021, S 93 f.

Fall ist.[166] Kommt es trotz dieser hohen Toleranz zu einer größeren Verzögerung, so kommt die Darstellung des Videos beim Nutzer ins Ruckeln; es entstehen Standbilder und der Bild- und Tonfluss wird gestört."

Für Video-Streaming wie etwa YouTube und viele andere webbasierte Dienste gilt, dass die vom Diensteanbieter verwendeten Algorithmen zur Anpassung der Videoqualität an die Netzumgebung und deren aktuelle Metriken (dynamisch) durch den Client vom Server heruntergeladen werden und sich damit zu beliebigen Zeitpunkten ändern können. Bei adaptivem Video-Streaming fragt der Client das wiederzugebende Video in kleinen Segmenten mit einer Dauer von typischerweise einer bis wenigen Sekunden an. Dabei beobachtet der Client für jedes Segment die momentane Empfangsdatenrate, den Pufferfüllstand, die Abspielverzögerung und/oder weitere Parameter sowie deren Trends und bestimmt daraus, in welcher Qualität (= kodierter Bitrate) das nächste Videosegment angefragt werden soll. Die Entwicklung von Algorithmen, die vorhersagen, unter welchen Umständen die angefragte Datenrate beibehalten, erhöht oder reduziert werden soll, ist komplex[167] und bis heute nicht abgeschlossen. Es werden immer wieder neue Algorithmen mit teils neuen Metriken und auch hier teilweise unter Einsatz maschinellen Lernens entwickelt.[168] Diese können dann unmittelbar den Kunden – auch in Kombinationen – zur Verfügung gestellt werden, was zu einer großen Dynamik führt.

5.2.4 Adaptive Verfahren

Die Implementierung von adaptiven Verfahren bei Diensten mit kontinuierlichen Datenströmen kann als Antwort der Anwendungsentwickler auf die Schwankung der Network Performance im Best-Effort-Internet verstanden werden. Kommt es zu einer Verknappung der im Netz verfügbaren Übertragungskapazitäten, versuchen die adaptiven Anwendungen eine Anpassung der Qualitätsparameter vorzunehmen, um den Dienst trotz der auftretenden Kapazitätsengpässe aufrechterhalten zu können.[169]

Die adaptiven Verfahren basieren auf der durch die Anwendung ermittelte aktuelle Ende-zu-Ende Netzperformance, deren Überschreitung von Schwellen in den Qualitätseinstellungen der Anwendung die Adaption des kontinuierlichen Datenstroms initiiert. Um stö-

---

166 Die Wirksamkeit des Jitterbuffers setzt natürlich voraus, dass die Datenübertragungskapazität beim Nutzer und dem zugehörigen Übertragungsweg größer ist als die mit der Qualität (Auflösung) des Videostreams einhergehende Datenübertragungsrate. Ansonsten wäre es ab dem Zeitpunkt, zu dem der Buffer komplett geleert ist, nicht mehr möglich, den Buffer neu zu bevorraten.

167 Huang, T. et al. (2012), Pages 225–238.

168 Beispiele für maschinelles Lernen finden sich u.a. bei Schatz et al. (2013), Juluri et al. (2015); Kuipers et al. (2010), S. 216–227.

169 Siehe wik-zafaco-Gutachten (2021) sowie die dortige Quellenangabe: „Dazu muss der Client dem Server die verfügbaren Kapazitäten mitteilen. Mit dieser Information kann dann der Server aus den zur Verfügung stehenden Codices denjenigen auswählen, der den jetzt (ggf. vorübergehend) reduzierten verfügbaren Datenübertragungsraten Rechnung trägt." Sowie zugehöriger Fußnotentext: „Dieser Fall ist im Kontext von Video-Anwendungen von Relevanz. Thinh, P. H. et al (2019) […]" sowie der aktualisierte Beitrag von Wowza (2022).

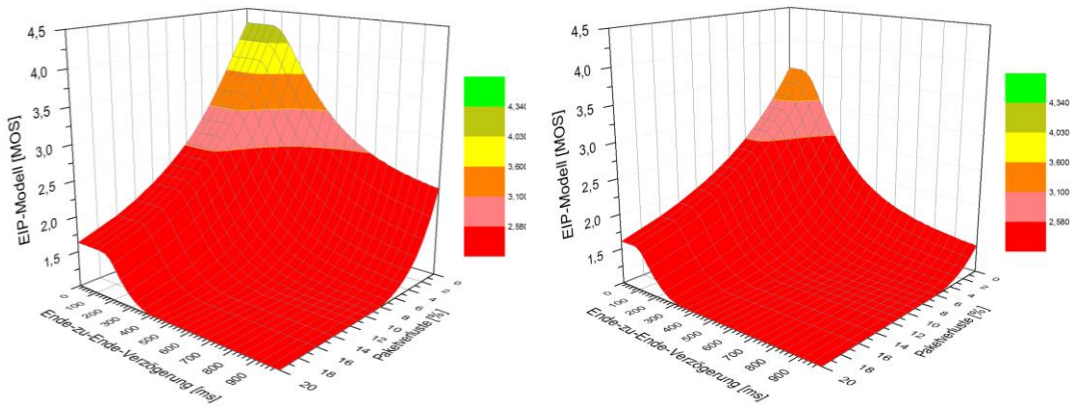
rende Effekte der Übertragung zu kompensieren, kann z. B. die Auflösung, die Bildwiederholrate oder die Stärke der Videokompression angepasst werden. Dies hat wiederum eine Auswirkung auf die Bildqualität.

Auch bei Jitterbuffern kommen adaptive Verfahren zur Anwendung. Bei steigender Latenz kann der Jitterbuffer vergrößert werden. Ggf. werden die Inhalte in einer Übergangsphase etwas langsamer wiedergegeben, oder Sprachpausen werden verlängert. Bei sinkender Latenz hingegen kann der Jitterbuffer reduziert werden.[170]

5.2.5 Interdependenzen zwischen den QoS-Parametern

Aus der Darstellung der verschiedenen Verfahren, die bei der Umsetzung von Diensten mit kontinuierlichen Datenströmen zum Einsatz kommen, können auch die Interdependenzen zwischen Paketverlust und Jitter bzw. Latenz abgelesen werden: Bei Diensten mit kontinuierlichen Datenströmen besteht aus Nutzersicht eine Substitutionsbeziehung zwischen den Anforderungen der Fehlerfreiheit (in der Grafik durch die Paketverlustrate ausgedrückt) und der Verzögerung (Latenz). Dies dokumentieren die nachfolgenden Abbildungen für den Sprachtelefondienst.[171]

Abbildung 19: EIP-Modell-Werte als Funktion der Paketverluste und der Ende-zu-Ende-Verzögerung



Codec G.711 Codec GSM

Quelle: Paulsen, S. (2015), S. 125

Bei den hier dargestellten EIP-Modell-Werten handelt es sich um eine Erweiterung des E-Modells, welches aus den Werten des R-Faktors gemäß ITU-T-Empfehlung G.107 den

170 Goetz, C. / Brunk, M. (2023).

171 Aus dem Vergleich der beiden Abbildungen geht hervor, dass die mit dem GSM Codec maximal erreichbare Qualität aus Nutzersicht – gemessen durch den MOS – unterhalb des Codex G.711 liegt. Dies liegt maßgeblich in der geringeren Kapazität der Datenübertragungsrate für den Sprachkanal bei GSM und der damit einhergehenden protokolltechnischen Umsetzung des Dienstes in den Endgeräten begründet.

MOS (Mean Opinion Score) ableitet.[172] Beim EIP-Modell werden sog. Beeinträchtigungsparameter wie Paketverlust und Latenz berücksichtigt.[173] Aus den Nutzengebirgen sowohl für den Sprachtelefondienst nach ITU-T G.711[174] als auch für den GSM Codec geht hervor, dass Paketverlust und Latenz in einem substitutionalen Zusammenhang stehen. Jeder horizontale Schnitt durch das grafisch dargestellte Nutzengebirge repräsentiert letztlich eine statistische Indifferenzkurve bzgl. der Kombinationsmöglichkeiten von maximalen Schwellwerten für die Paketverlustrate und die Latenz. Dass auch die Datenübertragungsrate einen Einfluss auf die Bewertung hat, kommt in dem Vergleich der beiden Codecs zum Ausdruck: Mit dem Codec G.711 erreicht das Nutzengebirge höhere Werte als im Fall es GSM-Codec, der mit einer deutlich geringeren Datenübertragungsrate einhergeht als G.711.[175]

Die Beobachtung, dass eine definierte Qualität über verschiedene Kombinationen von QoS-Parametern erreicht werden kann, impliziert, dass die Festlegung in Bezug auf die Dienstequalität unbestimmt bleibt.

Diese Zusammenhänge sind im Kontext der Festlegung von Grenzwerten für die Paketverlustrate problematisch, wenn aufgrund von Substitutionsverhältnissen zwischen den QoS-Parametern keine eindeutigen bzw. nur bedingte Rückschlüsse von einem Parameterwert auf die erreichbare Dienstequalität unter Einbeziehung von QoE-Analysen möglich sind.

5.3 Weitere Verfahren zur Behebung von Paketfehlern bei interaktiven Diensten

Paketverlust wird – wie in Abschnitt 4.2 ausgeführt – im TCP/IP (oder auch durch Einsatz von QUIC (Quick UDP Internet Connections) in Zusammenspiel mit UDP und http/3) über Automatismen gelöst, die eine entsprechende Verarbeitungszeit – wenn auch nur im Bereich von Millisekunden bis Sekunden – in Anspruch nehmen. Da der Paketverlust ein systemimmanentes Merkmal des IP-Netzes ist, finden bei der Implementierung dieser interaktiven Dienste ohne Fehlertoleranz Verfahren Anwendung, die ein Funktionieren auch bei einem vorübergehend erhöhten Paketverlust erlauben. Generell ist es nicht auszuschließen, dass es zeitweise auch zu einem anhaltenden, burstbedingten und damit merklichen Paketverlust kommt. Dieser Fall ist aber weit weniger von Bedeutung als der Erstgenannte.

---

172 Der „transmission rating factor“ R ist ein von der ITU definierter Parameter, welcher sich aus den Parametern einer Sprachverbindung berechnet und im sogenannten E-Modell verwendet wird. Er kann u.a. zur Planung von Übertragungskapazitäten herangezogen werden, vergleiche ITU (2014) .

173 Siehe hierzu Paulsen, S. (2015), S. 68 ff.

174 ITU (1988).

175 G.711 geht mit einer Datenrate von 64 kbps einher (ITU-T Rec G711). GSM-Codecs benötigen für die Sprachtelefonie etwa 13 kbps. Siehe ETSI (2023).

Um derartige, in der Regel vorübergehende, Beeinträchtigungen der Interaktivität möglichst zu minimieren, werden bei der Entwicklung von Anwendungen spezielle Verfahren gewählt, um die Beeinträchtigung der Nutzererfahrung möglichst gering zu halten. Diese sind aus der Realisierung von Anwendungen mit kontinuierlichen Datenströmen bekannt. In diesem Kontext sind die folgenden Verfahren bzw. Umsetzungsstrategien zu nennen:

Sendewiederholung

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit der Sendewiederholung, um die Nachteile eines Paketverlusts zu kompensieren.[176] Dies ist jedoch nur möglich, sofern die Latenz bzw. Umlaufzeit hinreichend niedrig ist, so dass eine erneute Übertragung eines fehlenden Paketes rechtzeitig zur Wiedergabe möglich ist. In diesen Fällen lässt sich auf diese Weise der Paketverlust ausgleichen. – Heutige Anwendungen verfügen über Techniken, die es ihnen erlauben, dynamisch durch die fortwährende Messung der Netzeigenschaften zu entscheiden, ob ein Sendewiederholen vorteilhaft ist.

Error Concealment

Sollten Inhalte dem Empfänger tatsächlich nicht rechtzeitig zur Verfügung stehen, können die fehlenden Inhalte durch Inter- oder Extrapolation angenähert werden. So kann beispielsweise bei Audio der letzte Inhalt wiederholt werden, was bei dem pro Audiopaket kodierten Zeitintervall (z.B. 10–20 ms) kaum wahrnehmbar ist.

Neuere Codecs umfassen auch Mechanismen zum Umgang mit Paketverlust.[177] Hier können Algorithmen Anwendung finden, die auf Basis der empfangenen Pakete den Inhalt der Fehlenden approximieren und somit die durch den Paketverlust entstandene Lücke im kontinuierlichen Datenstrom füllen.

Forward-Error-Correction

Bei diesem Verfahren wird versucht, pro-aktiv den negativen Effekten eines Paketverlusts entgegenzuwirken, indem die erforderliche Information mehrfach, d.h., in mehreren IP-Paketen redundant versendet wird. Auf diese Weise wirkt sich der Verlust einzelner Pakete nicht nachteilig auf die Realisierung des Dienstes aus.

Redundanz lässt sich durch einfache Verdoppelung der Übertragung erzielen. Diese Verfahren kommen eher bei Anwendungen zum Einsatz, die mit kleinen IP-Paketen einhergehen, wie etwa bei der Audio-Übertragung [RFC 2198], was sich aus den technischen Zusammenhängen erklärt: Bei kleinen Datenpaketen überwiegt oftmals der Overhead pro Paket (Paket-Header) und die Bearbeitungszeit pro Paket, so dass eine geringfügige Erhöhung des Datenvolumens pro Paket nur unwesentlich ins Gewicht fällt.

---

176 Das gilt insbesondere auch für Dienste mit kontinuierlichen Datenströmen, aber auch jede andere Form fehlerempfindlicher und gleichzeitig zeitkritischer Dienste.

177 Wikipedia liefert hierzu eine gute Übersicht: Wikpedia (2023a).

Ein Beispiel: Das Opus-Audio-Codec[178] kann in Bitraten bis zu 6 kbps operieren, GSM-Codecs bei 13.2 kbps für Full Rate (GSM 06.10). Nehmen wir großzügig 16 kbps an, so sind das 2000 Bytes/s. Oft werden Audiosegmente in 20 ms Einheiten kodiert bzw. übertragen, was dann 40 Bytes entspricht. Die Paket-Header von IP, UDP und RTP (Real Time Protocol) zusammen machen ebenfalls 40 Bytes aus. Die typische Maximalgröße eines IP-Paketes kann mit 1280 Bytes angenommen werden, so dass eine redundante Übertragung möglich ist, ohne die maximale Paketgröße zu überschreiten.

Im Fall von Anwendungen mit großer Nutzlast (wie etwa Video) würde dieses Verfahren aufgrund des Datenvolumens die Gefahr einer Überlast weiter verstärken und würde den intendierten Effekt ins Gegenteil verkehren, weshalb solche Ansätze nur bei multicastbasierten Verfahren zum Einsatz kamen.[179] Hier müssten dann auch mehr Pakete übertragen werden. In diesen Fällen können auch Redundanzkodierungen eingesetzt werden, die dann aber aus den Inhalten von k Paketen n–k zusätzliche Pakete berechnen und dann n Pakete versenden (n > k). Der Empfänger muss dann lediglich (beliebige) k aus n Paketen empfangen und kann die Inhalte vollständig rekonstruieren [RFC 5109]. Für n = k+1 werden oft die einfache Exklusiv-Oder-Operation eingesetzt, für n > k+1 beispielsweise Reed-Solomon-Codes[180] oder andere mathematische Verfahren. Mit der Redundanzkodierung einher geht eine potenzielle Erhöhung der Latenz, da ggf. auf den Empfang von Paket n gewartet werden muss, bis Paket 1 dekodiert werden kann. Der durch die Redundanzkodierung erzeugte Overhead wird durch 1 – n/k bestimmt.

Motion Estimation / Motion Compensation / Motion Compression

Je größer bzw. umfangreicher die von einer Anwendung zu übertragenden Daten sind, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einem Paketverlust kommt. So arbeiten Videocodecs mit einer Technik bei der Bilddarstellung, die sich darauf beschränkt, lediglich die sich verändernden Teile des Bildes zu codieren und damit das zu übertragende Datenvolumen zu reduzieren.

Die verfügbaren Verfahren sind danach zu unterscheiden, ob sich die Anpassung jeweils auf das einzelne Bild (Frame) bezieht oder eine Kodierung ist, die auf die aufeinander folgenden Bilder (Frames) abzielt.

(1) Unabhängig von anderen Frames: „Intra-Frames or I-Frames“. Diese sind unabhängig von vorangehenden (oder späteren) Frames und werden quasi als Standbild kodiert. Dabei wird „räumliche Redundanz“ zur Reduktion des Datenvolumens ausgenutzt, also etwa, dass in natürlichen Bildern oft Flächen existieren, Farbverläufe oft kontinuierlich sind usw.

---

178 Opus] https://opus-codec.org
179 RFC (2012).
180 Zum Reed-Solomon-Code siehe beispielsweise Riley, M., Richardson, I. (1996).

(2) Abhängig von anderen Frames: „Inter-Frame-Kodierung bzw. Predictive Frames oder P-Frames“. Diese beziehen sich typischerweise auf das zeitliche unmittelbare Vorgänger-Frame und kodieren nur noch die Änderungen ggü. diesem. Hier wird „zeitliche Redundanz“ ausgenutzt, d.h., es wird die Beobachtung ausgenutzt, dass sich zeitlich benachbarte Frames in einem Video meist nur begrenzt ändern (außer vielleicht bei einem Szenenwechsel).

Hierbei finden verschiedene Techniken Anwendung: z.B. die Bestimmung des Deltas zum Vorgängerbild, so dass dann nur die Änderungen kodiert werden müssen. Um das Delta zu minimieren, kann ein Videokompressionsverfahren auch Motion Compensation einsetzen, d.h., es wird ermittelt, wie sich Teile eines Frame relativ zum Vorgänger verschoben haben. Dann kann das Codec einen Bewegungsvektor (z.B. 3 Pixel nach rechts und zwei nach oben) angeben und dadurch das zu kodierende Delta reduzieren. Die Suche nach solchen Verschiebungen ist aufwendig im Encoder, aber einfach für den Decoder, da dieser lediglich das Ergebnis mitgeteilt bekommt.

Diese Verfahren werden bei allen modernen Videokompressionsverfahren angewendet und beschränken sich somit nicht nur auf Videokonferenzen. Bei Konferenzen sind sie besonders effektiv, da sich typischerweise die Personen vor der Kamera nicht besonders stark bewegen und die Hintergründe so gut wie statisch sind.[181]

181 Die Verfahren wurden bereits in den frühen MPEG Versionen eingesetzt. Siehe Richardson, I. E. (2004).

6 Dienste der Mindestversorgung und Relevanz von Paketverlustrate und Jitter

In diesem Abschnitt stellen wir auf die Dienste der Mindestversorgung ab und betrachten die Anforderungen an die QoS-Parameter Paketverlustrate und Jitter aus Perspektive der Anwendungen, um Erkenntnisse über mögliche Grenzwerte zu gewinnen.

Dazu nehmen wir in einem ersten Schritt eine Einordnung der Dienste der Mindestversorgung in die bekannten Protokoll-Familien vor und stellen die Zusammenhänge zu den bisherigen Ausführungen der technischen Realisierung in den Abschnitten 4 und 4 her.

In den weiteren Unterabschnitten dieses Kapitels gehen wir der Frage einer Quantifizierung von Grenzwerten für die Qualitätsparameter Paketverlustrate und Jitter nach. Unter der Hypothese, dass Grenzwerte für Paketverlustrate und Jitter als technische Mindestanforderungen des Internetzugangs in der TKMV zu berücksichtigen wären, müssten diese entsprechend quantifiziert werden. Dazu machen wir eine Bestandsaufnahme von Grenzwerten für die Dienste der Mindestanforderung und versuchen, diese in den Kontext der akzeptablen Nutzererfahrung bzw. des Funktionierens der Dienste einzuordnen.

6.1 Einordung der Dienste der Mindestversorgung in die Protokoll-Landschaft

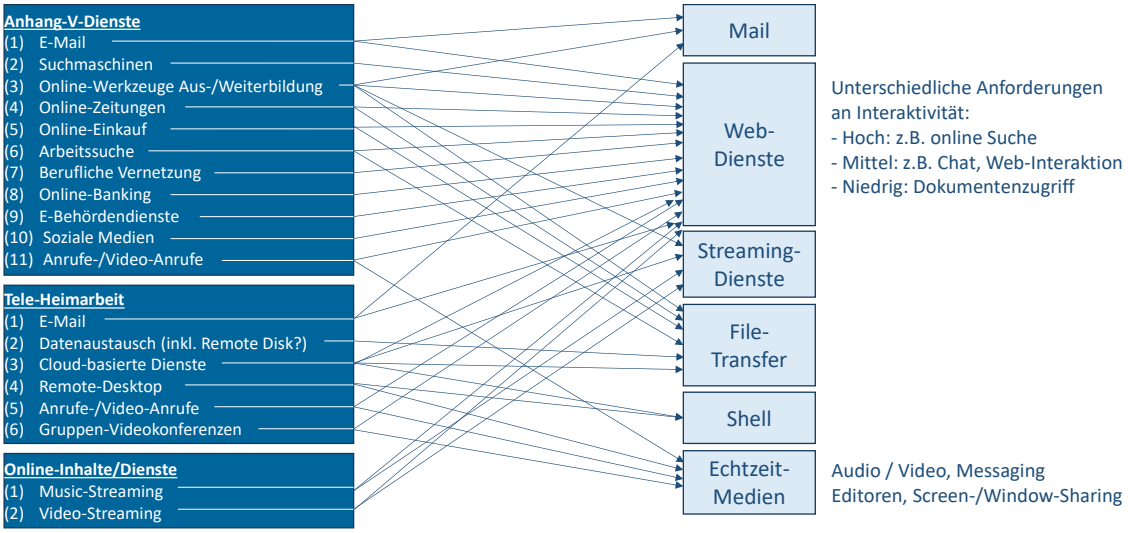
Das Spektrum der von dem Internetzugang nach § 157 Absatz 3 TKG zu ermöglichenden Dienste ist in der nachfolgenden Abbildung 20 im linken Teil zusammenfassend dargestellt und bekannten Protokoll-Gruppen illustrativ zugeordnet.

Mit der Darstellung wollen wir folgende Aspekte verdeutlichen:

Der Großteil der Anhang V-Dienste kann als webbasierter Dienst charakterisiert werden. Wie bereits im wik-zafaco-Gutachten 2021 gezeigt wurde, werden oft eine Vielzahl von unterschiedlichen Diensten in Gestalt eines Portals auf einer Website vereint. So bieten Produkte im Bereich des Einkaufs neben einer textbasierten Darstellung der Angebote auch Bilder und Videos an oder eröffnen die Möglichkeit für einen Anruf, um mit einem Berater telefonieren zu können.[182] Beispielhaft können hier Dienste, für die diese Integration bereits heute eine große Relevanz hat, genannt werden. So haben Soziale Netzwerke (z.B. YouTube.de), Online-Nachrichten (z.B. bild.de) als auch Dienste der Kategorie Online-Werkzeuge der Aus- und Weiterbildung (z.B. wbsTraining.de) einen hohen Anteil an Video-Integration auf ihren Seiten.

182 Vgl. wik-zafaco-Gutachten (2021), Kapitel 2.

Abbildung 20: Dienste der Mindestversorgung – Gruppierung entsprechend der protokolltechnischen Umsetzung



Quelle: wik

Aus Abbildung 20 geht hervor, dass nicht nur E-Mail-Dienste, sondern auch Telefonie, Videotelefonie und Videokonferenzen über webbasierte Anwendungen realisiert werden.

Die beschriebene Entwicklung der Dienste (und auch der Dienste der Mindestanforderungen), die über Webbrowser zur Verfügung gestellt werden, zeigt, dass mittlerweile verschiedene Dienste als interaktiv gekennzeichnet werden können. Für den Dienst „Informationssuche“ bzw. „Suchmaschinen“ kann hier das Leistungsmerkmal der automatischen Vervollständigung der Suchanfrage beispielhaft angeführt werden. Diese Funktion ist bereits seit einigen Jahren in den Browsern verankert und trägt aus Nutzersicht zu einer Verbesserung des Komforts bei der Nutzung von Suchmaschinen bei.[183]

Die technische Integration dieser verschiedenen Funktionalitäten auf einer Website geht mit spezifischen technischen Anforderungen einher. Ihr Einsatz bzw. Aufruf wird über den Browser gesteuert. Jeder in eine Website integrierte Dienst benötigt eine individuelle TCP (Transmission Control Protocol) - oder UDP (User Datagram Protocol)-Verbindung. Im

183 Aus anekdotischer Evidenz kann hierzu ausgeführt werden, dass Nutzer das Funktionieren dieses interaktiven Leistungsmerkmals auch als einen Indikator für das Funktionieren ihres Internetzugangsdienstes heranziehen, und zwar in folgender Form: Wird bei der Eingabe einer Suchanfrage von der Suchmaschine kein Vorschlag zur weiteren Eingrenzung der Suche unterbreitet, so wird dies als Unterbrechung der Internetverbindung gewertet.

Fall von UDP kommen weitere zugehörige, die jeweiligen Anforderungen der Dienste bestmöglich unterstützenden Protokolle[184] zur Anwendung.[185]

Die qualitätsbezogenen Anforderungen an die Basisdienste, die sich anhand der Kategorien

- Dienste mit kontinuierlichen Datenströmen und
- Dienste mit diskreten Datenvolumina

festmachen lassen, bleiben von dieser Integration jedoch unberührt. Sie müssen erfüllt werden, unabhängig davon, ob sie über den Webbrowser oder eine eigenständige Anwendung realisiert werden. Daher halten wir bei unserer nachfolgenden Analyse an der bekannten Kategorisierung der Dienste fest und verwenden sie nachfolgend bei der Untersuchung von Grenzwerten für die Paketverlustrate und die Toleranz für die Variabilität der zeitlichen Verzögerung für die Dienste der Mindestversorgung.

6.2 Grenzwerte für Dienste mit diskreten Datenvolumina – verfügbare Angaben zu technischen Anforderungen der Dienste

Abbildung 21 zeigt die Dienste der Mindestversorgung und blendet nur diejenigen aus, die wir explizit in der Kategorie „Dienste mit kontinuierlichen Datenströmen“ gelistet haben.

Wie zu Beginn von Kapitel 6 ausgeführt, werden auf Websites integrierte Audio- und Videoanwendungen über separate UDP- oder TCP-Verbindungen realisiert. Da es sich unabhängig von der technischen Realisierung über den Browser um Dienste mit kontinuierlichen Datenströmen handelt, brauchen wir sie in diesem Abschnitt nicht zu betrachten und fokussieren hier auf Grenzwerte für Dienste mit diskreten Datenvolumina. Da die recherchierten, nachfolgend vorgestellten Angaben von Anbietern stammen, die eine Webintegration von Diensten vornehmen, ist die hier von uns gewählte Kategorisierung nicht immer trennscharf.

---

184 Die Auswahl der verwendeten Protokolle eines Dienstes ist Bestandteil der Diensteentwicklung, die – aus Anbietersicht und Adressatenkreis – bestmöglich erfolgt.

185 Der überwiegende Teil der Kommunikation wird mittels HTTP, meist TLS (Transport Layer Security) verschlüsselt, übertragen. Innerhalb von HTTP werden Webseiten in Form von Text, Medien (u.a. Bilder und Video) und zum Teil interaktiven Funktionen übermittelt. Hierbei wird mit HTTP jeweils ein Datenelement übertragen. Für einen längeren, interaktiven Austausch von Informationen werden auf HTTP aufbauende erweiterte Protokolle wie WebSockets eingesetzt. Vergleiche Ionos (2020): Was ist WebSocket? (zuletzt abgerufen 27.06.2023) Diese Kommunikation wird mittels TCP umgesetzt. Aktuelle Webbrowser bieten zudem auch Unterstützung für webbasierte Echtzeitkommunikation. Diese Dienste wie Sprachtelefonie oder Video-Konferenz sind typischerweise fehlertolerant implementiert, um die Anforderungen der Echtzeitkommunikation umsetzen zu können. Hierfür wird die Sprache oder das Video mit RTP übertragen, welches wieder UDP das Transportprotokoll nutzt. Somit sind in aktuellen Browser nicht mehr nur fehlerintolerante, sondern auch fehlertolerante Anwendungen nutzbar.

Abbildung 21: Dienste der Mindestversorgung mit diskreten Datenvolumina

Anhang-V-Dienste
(1) E-Mail
(2) Suchmaschinen
(3) Online-Werkzeuge Aus-/Weiterbildung
(4) Online-Zeitungen
(5) Online-Einkauf
(6) Arbeitssuche
(7) Berufliche Vernetzung
(8) Online-Banking
(9) E-Behördendienste
(10) Soziale Medien
(11) Anrufe/Videoanrufe

Tele-Heimarbeit
(1) E-Mail
(2) Datenaustausch (inkl. Remote Disk?)
(3) Cloud-basierte Dienste
(4) Remote-Desktop
(5) Anrufe-/Video-Anrufe
(6) Gruppen-Videokonferenzen

Online-Inhalte/Dienste
(1) Music-Streaming
(2) Video-Streaming

Quelle: wik

Angaben finden sich in aller Regel bei den Anbietern, die auf ihrer Website auch Audio- und Video-basierte Leistungsmerkmale integriert haben. Dies ist beispielsweise bei YouTube oder Online-Werkzeugen der Aus- und Weiterbildung der Fall. Die Anforderungen beziehen sich dabei meistens auf die Datenübertragungsrate.[186] Angaben zur Paketverlustrate und dem Jitter wurden von diesen Anbietern nicht gemacht.

Für die übrigen Angebote webbasierter Produkte lassen sich nur vereinzelt Angaben finden. Diese beziehen sich im Wesentlichen auf sogenannte Systemvoraussetzungen, die sich auf die Leistungsfähigkeit der vom Nutzer eingesetzten Endgeräte beziehen. Beispielhaft seien hier die Anforderungen an die Erstellung einer digitalen Steuererklärung[187] oder das Online-Banking[188] genannt. Typische Anforderungen beziehen sich auf den verwendeten Browser, den (freien) Arbeitsspeicher oder auch im Fall eines Anbieters von Online-Banking auf die Bildschirmauflösung.[189] Aufgrund seiner Funktion für die Realisierung der webbasierten Internetdienste und die in Kapitel 4 vorgestellten, protokollbasierten Mechanismen, ist den Anforderungen an den zu verwendenden Browser eine hohe Relevanz beizumessen. Dieser sollte möglichst auf dem aktuellen Stand sein, damit (u.a.) die protokollbasierten Mechanismen zur Verbesserung der Dienstequalität[190] greifen können.

186 Bei einem Angebot im Kontext Aus- und Weiterbildung war ebenfalls ein Grenzwert für die Latenz angegeben (wbstraining.de).
187 ElsterFormular: Hier wird ein DSL-Anschluss empfohlen, der nicht weiter spezifiziert wird.
188 Vergleich hierzu die Angaben der Volksbank Dreiländereck (2009).
189 Siehe die in der vorstehenden Fußnote angegebene Quelle.
190 Vergleiche Abschnitt 4.2 und Abschnitt 4.

6.3 Evaluierung von Grenzwerten für eine akzeptable Nutzererfahrung und ein Funktionieren der Dienste mit diskreten Datenvolumina

6.3.1 Paketverlust

Bei der Entwicklung des Internet Protokolls sowie der zugehörigen Protokolle der Transportschicht wurde der Beeinträchtigung der Dienstequalität durch Paketverlust eine besondere Bedeutung beigemessen. In Verbindung mit dem TCP und dessen Fehlerkontrollmechanismen sollte sichergestellt werden, dass Qualitätseinbußen durch Paketverlust oder Paketfehler kompensiert werden. Die zugehörigen Mechanismen haben wir in Kapitel 4 dargestellt. Fehlerfreiheit ist daher protokolltechnisch sichergestellt. Fehler können innerhalb von Millisekunden behoben werden, weswegen der Paketverlustrate bei dieser Dienstekategorie keine Bedeutung zukommt.

Die beschriebenen Verfahren der Fehlerkontrolle bzw. Behebung sind insbesondere bei zeitkritischen (interaktiven) Diensten mit kleinen Datenvolumina sehr leistungsfähig, weswegen sich gerade in diesem Bereich zunehmend interaktive Leistungsmerkmale beobachten lassen.[191]

Aufgrund der Größenordnung der Fehlerbehebung im Millisekundenbereich ist auch die Auswirkung des Paketverlusts auf die tolerierte Übertragungsdauer, welche maßgeblich die Nutzererfahrung[192] beeinflusst und damit die QoE bestimmt, quasi unberührt. Voraussetzung ist, dass dem Nutzer die für die Dienste der Mindestversorgung festgelegte Datenübertragungsrate auch tatsächlich zur Verfügung steht.

Aufgrund dieser Zusammenhänge gibt es daher keine Notwendigkeit, Grenzwerte für eine maximale Paketverlustrate zu bestimmen bzw. festzulegen, um die Fehlerfreiheit übertragener Inhalte und damit ein Funktionieren der Dienste zu gewährleisten.

6.3.2 Irrelevanz von Grenzwerten für Jitter bei Diensten mit diskreten Datenvolumina

In Kapitel 3 hatten wir erläutert, dass Jitter – als eine aus der Latenz abgeleitete Größe – als eigenständige QoS-Metrik lediglich für Echtzeit-Dialogdienste eine Relevanz hat. Für die Übertragung diskreter digitaler Inhalte hat sie keine Bedeutung.[193]

---

191 Die automatische Vervollständigung von Suchanfragen ist ein solches Beispiel.
192 In diesem Gutachten sowie in wik-zafaco-Gutachten 2021 auch ausgedrückt durch das „Level an Komfort“.
193 Siehe hierzu auch wik-zafaco-Gutachten 2021, wo gezeigt wurde, dass Echtzeit-Dialogdienste der maßgebliche Bestimmungsfaktor für Anforderungen an die Latenz darstellen.

Selbst die Latenz stellt für die webbasierten Dienste der Mindestanforderung – sofern sie die Übertragung diskreter Datenvolumina betreffen – keine Relevanz dar, die in einer Größenordnung der Anforderungen an die Echtzeitdialogdienste stehen.[194]

6.4 Grenzwerte für Dienste mit kontinuierlichen Datenströmen

Für die Frage der Bestimmung produktspezifischer Grenzwerte in Bezug auf die technischen Parameter Paketverlustrate und Jitter wird nachfolgend auf öffentlich verfügbare Angaben abgestellt. Die Darstellung gliedert sich dabei nach den verschiedenen Dienste-Typen in der Kategorie der Dienste mit kontinuierlichen Datenströmen, die Bestandteil der Dienste der Mindestanforderungen sind.

6.4.1 Verfügbare Grenzwerte zu Paketverlustrate und Jitter– Angaben von Produktanbietern und Stakeholdern

Grenzwerte aus ITU-T G.1010

Die Tabelle zeigt die Grenzwerte aus ITU-T G.1010 für verschiedene Audio- und Videoanwendungen.

Für den Jitter sind folgende Grenzwerte zu unterscheiden:

- Für die Sprachdienste ist ein Grenzwert von 1 ms angegeben, der im Fall von „High quality streaming audio“ unterschritten werden soll.
- Für Videotelefonie liegt der Grenzwert deutlich höher, er beträgt 80 ms.[195]
- Für Videostreaming (uni-direktional) wird Jitter als irrelevant angesehen. Hier ist kein Grenzwert angegeben.

---

194 Remote-Desktop-Dienste als Anwendungen der Teleheimarbeit wurden im wik-zafaco-Gutachten auch der Kategorie „Dienste mit kontinuierlichen Datenströmen“ zugeordnet, für die auch Latenz-Grenzwerte zu finden waren.

195 Dieser Wert ist weniger streng als für die anderen Audiodienste. Er orientiert sich an der Synchronisation von Bild und Sprache (Lippensynchronisation). Die angegebenen 80 ms als Obergrenze für den Jitter liegen dabei noch unterhalb der Beschränkung der Latenz auf 150 ms. Erst wenn diese überschritten würden, käme es bei der Lippensynchronisation zu Einschränkungen.

Tabelle 4: Performance targets for audio and video applications

Service	Sym.	Trans-rate kb/s up	Trans-rate kb/s down	Mean delay **Sec.**	Jitter **Sec.**	PLR (Note 2) %
Voice conv.	bid.	4-64	4-64	< 0,150	<0,001	<3
Voice message	un.	4-32		<1	<0,001	<3
High quality streaming audio	un.		16-128 NOTE 3	<10	<<0,001	<1
Video phone	bid.	16-384	16-384	<0,150 (<0,400)	< 0,08 (lip. syn.)	<1
Video	un.		16-384	<10		<1

NOTE 2 –
Exact values depend on specific codec, but assumes use of a packet loss concealment algorithm to minimize effect of packet loss.
NOTE 3 - Quality is very dependent on codec type and bit-rate

lip-syn = lip synchronisation

Quelle: ITU (2001): ITU-T G.1010 (11/2001)

Für die Paketverlustrate werden zwei Grenzwerte angegeben:

- Für Sprachdienste soll die Paketverlustrate unterhalb von 3 % liegen.
- Für Videotelefonie und auch Videostreaming (sowie „High quality streaming audio“) soll die Paketverlustrate geringer sein als 1 %.

Grenzwerte aus ITU-T G.114

Die nachfolgend dargestellten Grenzwerte aus der ITU-T Empfehlung G.114 stehen im Kontext der Analyse zulässiger Verzögerung für Sprachtelefonie. Sie bildeten auch die Grundlage für die im wik-zafaco-Gutachten 2021 verwendeten Zusammenhänge zwischen Nutzerzufriedenheit und Latenz.[196] Der für den Jitter angegebene Grenzwert beträgt 50 ms. Für die Paketverlustrate ist eine Grenze von 5 % angegeben.

Tabelle 5: Grenzwerte für ITU G.114 für Sprachtelefonie

	G.114
Latenz	150 ms, max 400 ms
Jitter	50 ms
Paketverlustrate	5 %

Quelle: ITU (2003a): ITU-T G.114, https://www.itu.int/rec/T-REC-G.114

Studie von Yu und Al Ajarmeh (2007) zur PSTN-Qualität bei VoIP

Ergebnisse einer Studie von Yu und Al Ajarmeh aus dem Jahr 2007[197] weisen ebenfalls Grenzwerte für Latenz, Jitter und Paketverlustrate aus. Die Werte für Latenz und Jitter

196 Vgl. wik-zafaco-Gutachten (2021), S. 104.
197 Vgl. Yu, J. / Al Ajarmeh, I. H. (2007).

liegen zwischen den Angaben der beiden zuvor vorgestellten ITU-Werte. Lediglich die Grenzwerte für die Paketverlustrate sind bei guter Qualität anspruchsvoller.

Tabelle 6: Akzeptable Sprachqualität und Beispielwerte konkreter Network Performance für VoIP

Network parameter	good	acceptable	poor
Delay ms	0-150	150-300	>300
Jitter ms	0-20	20-50	>50
Packet-loss %	0-0,5	0,5-1,0	>1

Quelle: Yu, J. / Al Ajarmeh, I. H. (2007)

Angaben von Produktanbietern

Die Verfügbarkeit von Grenzwerten von Produktanbietern zu Paketverlustrate und Jitter ist ebenfalls sehr überschaulich.[198] Angaben zur Paketverlustrate für Videokonferenzanwendungen, die wir recherchieren konnten, finden sich in nachfolgender Tabelle.

Tabelle 7: Grenzwerte für Videokonferenzanwendungen

	Jitter	**Paketverlust**	
Anwendung	Obergrenze	Obergrenze	Quelle
Videokonferenzen	<40-30 ms	<2-1%	MS Teams, Zoom

Quelle: Zoom (2023), https://support.zoom.us/hc/en-us/articles/202920719-Meeting-and-phone-statistics,
Microsoft (2021): Microsoft Teams: https://docs.microsoft.com/en-us/skypeforbusiness/optimizing-your-network/media-quality-and-network-connectivity-performance

Eine konkrete Angabe mit auffällig hohem Grenzwert für die Paketverlustrate konnten wir bei Cisco für das Videokonferenz-Produkt webEx finden. Cisco wirbt damit, dass ihre Anwendung selbst bei einer Paketverlustrate in Höhe von 50 % noch funktioniert:[199]

> "We are also happy to announce that both the audio and video streams are independently resilient for impairment scenarios up to a remarkable 50% packet loss with the combined implementation of a number of either new or updated media resiliency techniques."

198 Aus ökonomischer Sicht könnte erwartet werden, dass Diensteanbieter ein Interesse daran haben, die technischen Anforderungen ihrer Produkte gegenüber den Nutzern transparent zu machen, damit diesen eine bestmögliche Nutzererfahrung zu Teil wird. Andererseits wollen sie aber vielleicht auch vermeiden, dass mit der Angabe von Grenzwerten potenzielle Nachfrager verunsichert werden, weil sie die geforderten technischen Grenzwerte nicht erreichen.

199 Vgl. Cisco (2021), S. 9.

Bei den Anbietern von Videostreamingdiensten finden sich in aller Regel nur Angaben zur benötigten Datenübertragungsrate ([Mbps] im Down- und Upload) sowie in wenigen Fällen zur Latenz.[200]

6.4.2 Einordnung der erhobenen Jitter-Grenzwerte

Bereits in Abschnitt 2.2.1 hatten wir Referenzwerte aus ITU-T G.1010 vorgestellt, die aus dem Jahr 2001 stammen und die wir in Tabelle 4 erneut aufgegriffen haben. Die dortigen Grenzwerte für den Jitter sind im Vergleich zu den anderen Angaben deutlich strenger: sowohl zu denen in ITU-T G.114 angegebenen Grenzwerten als auch im Vergleich zu denen aus der Studie von Yu und Al Ajarmeh (2007). Dies wollen wir unter Berücksichtigung der von uns in Abschnitt 4 dargestellten Zusammenhänge zur Entwicklung von IP-basierten Anwendungen in den entsprechenden Kontext zu stellen:

Die strengen Vorgaben aus ITU-T G.1010 an den Jitter können sicherlich nach wie vor als vertretbar angesehen werden, wenn sie in den Kontext der Anwendung gestellt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Jitter durch einen Jitterbuffer auf Kosten der Verzögerung minimiert wird.[201] Daher müssen die Werte auf Ebene der Anwendung und nicht auf Transportebene eingeordnet werden. Die strengen Jitter-Anforderungen stehen letztlich in der Tradition leitungsvermittelter Netze,[202] die in Abwesenheit eines Jitterbuffers nur eine sehr begrenzte Toleranz hinsichtlich der Variabilität der Verzögerung aufwies.

Zusammenfassend lässt sich daher festhalten, dass die angegebenen Grenzwerte für den Jitter grundsätzlich die anwendungsspezifischen Anforderungen reflektieren, die im

---

200 Vergleiche wik-zafaco-Gutachten (2021), Kapitel 3. Dabei sind die bandbreitenbezogenen Angaben in der Regel in Abhängigkeit der Auflösung durch den Nutzer wählbar. Grundsätzlich entscheiden die meisten Streaming-Plattformen – egal ob Video oder Audio – automatisch, welche Qualität gewählt wird. Die automatische Auswahl ist adaptiv und passt sich an die verfügbare Datenübertragungsrate an. Die Anbieter von Streamingplattformen bieten in der Regel dem Nutzer, die Auflösung manuell zu steuern. Angaben hierzu finden sich bei den Streaming-Anbietern im Hilfebereich. Siehe unter anderem:

Netflix: https://help.netflix.com/de/node/11559,
Amazon Prime: Sharma, A (2023), https://www.guidingtech.com/how-to-change-amazon-prime-video-quality/,
Disney Plus: https://help.disneyplus.com/csp?id=csp_article_content&sys_kb_id=d9a5844fdbf37018db5ed404ca961990,
Youtube: https://support.google.com/youtube/answer/91449?hl=de&co=GENIE.Platform%3DAndroid.
Bei Spotify findet sich beispielsweise eine extra Schaltfläche in den Einstellungen; siehe Spotify: https://support.spotify.com/de/article/audio-quality/.

201 Durch weitere Verfahren sind auch weitere Überschreitungen des Jitter über die Grenzen eines Jitterbuffer hinaus möglich. Anwendungen nutzen in diesen Fällen Error Concealment, um Probleme zu mindern. Siehe Abschnitt 4.

202 Leitungsvermittelte Netze sind bzw. waren das klassische Fernsprechnetz (PSTN) auf der Basis von analogen Leitungen Telexnetze, das ISDN auf der Bais von 64 kbit/s sowie das 2G Netz unter GSM (GPRS als Paketvermittlung ist darauf aufgesetzt). Heute spielen leitungsvermittelte Netze kaum noch eine Rolle. Das klassische PSTN hatte auf der Basis von elektromechanischen Wähler-Vermittlungsstellen HDW bzw. EMD einen hohen Zuverlässigkeitsgrad insb. unter kritschen Umständen.

Zusammenspiel mit dem Jitterbuffer greifen.[203] Sie sind daher nicht mit Referenzwerten für die Network Performance der Netzbetreiber zu verwechseln.

6.4.3 Einordnung der erhobenen Grenzwerte zur Paketverlustrate

Für die Einordnung der vorgestellten Grenzwerte zur Paketverlustrate gelten vergleichbare Zusammenhänge wie bereits beim Jitter.

Bereits in Note 2 zu Tabelle 4 findet sich der Hinweis der ITU-T G.1010, dass die Grenzwerte zur Paketverlustrate bereits Fehlerkorrekturalgorithmen berücksichtigen.[204]

In Abschnitt 5.2 hatten wir erläutert, dass (Telefonie-)Anwendungen verschiedenste Fehlerkorrekturalgorithmen verwenden und daher in der Lage sind, die im Transportnetz entstandenen Paketverluste zu kompensieren (oder abzumildern). Wie groß das Spektrum kompensierbarer Paketverluste vermeintlich ist, illustrieren die Angaben von Cisco in Bezug auf das Videokonferenz-Produkt WebEx. Der angegebene Wert von 50 % ist das Zehnfache der sonst von uns bei der Recherche beobachteten tolerierten Paketverlustraten. Diese Beobachtung unterstreicht die Innovationskraft der Anwendungsentwickler: Die in diesem Beispiel tolerierten Paketverlustraten übersteigen die Toleranz anderer Anwendungen deutlich. Aus Nutzersicht mag es dennoch divergierende Einschätzungen zur Dienstequalität bei hohen Paketverlustraten dieser Anwendung geben. Wie diese sich darstellen und ob der Großteil der Nutzer die Einschätzung von Cisco teilt, dass die Anwendung bei derart hohen Paketverlusten noch in ausreichender Qualität funktioniert, oder ob einzelne Nutzer Qualitätseinbußen infolge des Paketverlusts nicht doch schon bei einer geringeren Paketverlustrate als 50 % als nicht tolerierbar angesehen werden, können wir nicht beurteilen. Wir konnten keine QoE-Analysen zu diesem Produkt finden, die uns eine genauere Einschätzung hätten liefern können. Unabhängig von der tatsächlichen Beurteilung der Qualität durch den Nutzer ist – den Aussagen von Cisco zufolge – jedoch davon auszugehen, dass die Anwendung selbst bei der hohen Paketverlustrate noch technisch funktioniert, selbst wenn diese Einschätzung von keinem oder nur wenigen Nutzer geteilt werden sollte.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es in den Netzen zu kaum (1 %) Paketverlust kommt. Auf der anderen Seite gibt CISCO den Umgang mit Verlustraten von 50 % an. Diese Feststellungen erwecken den Eindruck, dass die dargestellten Empfehlungen von 1 % - 5 % (siehe G.1010 / G.114) durch angepasste Anwendungen weiter an Gewicht verlieren. Auf der anderen Seite haben wir gezeigt, dass mit Verlustraten oberhalb dieser

---

203 Auch für die Werte von Yu und Al Ajarmeh gilt, dass sie im Kontext der zugrundeliegenden Anwendung und unter Berücksichtigung ggf. angewendeter Kompensationsmechanismen auf Protokoll- und Anwendungsebene beurteilt werden können.

204 Die Gründe für eine Toleranz gegenüber dem Paketverlust erklären sich aber auch allein aus der biologisch hohen Redundanz der menschlichen Sprache und seines Hörvermögens. Vergleiche dazu Jäger, T. F. (2010) oder auch Papke, R. (2013).

Werte nicht zu rechnen ist, da sich die Netzbetreiber nicht an einzelnen Diensten, sondern an der Leistungsfähigkeit ihrer Transportplattform ausrichten, um gegenüber anderen Netzbetreibern wettbewerbsfähig zu sein.[205]

6.5 Evaluierung von Grenzwerten für Dienste mit kontinuierlichen Datenströmen – QoE Metriken als Beurteilungsmaßstab

Aufgabe dieses Gutachtens ist es u.a., die Rolle der Qualitätsparameter Paketverlustrate und Jitter für das Funktionieren der Dienste sowie für die Ermöglichung einer alltäglich akzeptablen Nutzererfahrung zu analysieren und daraus Schlussfolgerungen für ein effizientes Verwaltungshandeln abzuleiten.

Zu diesem Zweck haben wir in den voranstehenden Kapiteln die Dienste der Grundversorgung hinsichtlich ihrer charakterisierenden Qualitätsanforderungen (Kapitel 3) sowie ihre technische Realisierung (Kapitel 4 und 4) untersucht sowie in diesem Kapitel 6 eine Bestandsaufnahme hinsichtlich einer Quantifizierung der Qualitätsparameter vorgenommen.

Es konnte gezeigt werden, dass Internetdienste und damit auch die für dieses Gutachten relevanten Dienste der Grundversorgung in ihren Anforderungen an Qualitätsparameter produktionstechnisch nicht eindeutig definiert sind. Infolge der Trennung von Transport- und Anwendungsschicht und den bestehenden protokolltechnischen Mechanismen funktionieren Anwendungen auch bei Einschränkungen der Network Performance, und statistisch lässt sich mit abnehmender Network Performance in der Regel eine (wenn auch) abnehmende Nutzerzufriedenheit beobachten. Dieser Zusammenhang wird auch als sog. Graceful Degradation bezeichnet. Mit ihr geht in der Regel einher, dass ein technisches Funktionieren noch gegeben ist, obwohl ein Teil oder sogar die Mehrheit der Nutzer die Einschränkung der Dienstequalität als nicht mehr zumutbar bewertet.[206] Aufgrund dieser Zusammenhänge ist ausgehend von einer bestmöglichen Nutzerzufriedenheit mit deren kontinuierlicher Abnahme bei sich kontinuierlich verschlechternden Qualitätsparametern zu rechnen. Ein technisches Funktionieren, wie es beim traditionellen Telefondienst (PSTN) durch das Blockierungssystem durch den Netzbetrieb gesteuert wurde, greift nicht bei den Internetdiensten, die auf einem Warteschlangensystem beruhen. Es ist daher genauso schwierig und werturteilsbehaftet, die Qualität für ein Funktionieren

---

205 Siehe hierzu auch die veröffentlichten SLAs von Verizon in Abschnitt 4.4.

206 Wie merklich die „Graceful Degradation“ bei einer Verschlechterung der Qualitätsparameter greift ist von Dienst zu Dienst bzw. Nutzer zu Nutzer unterschiedlich. Time-Out-Abbrüche von Anwendungen greifen in der Regel erst dann, wenn der Nutzer aufgrund der verschlechterten Dienstequalität bereits die Nutzung eingestellt bzw. ein Funktionieren angezweifelt hat. Ein prominentes Beispiel ist die Mobilfunktelefonie: Ein Gesprächsabbruch erfolgt i.d.R. erst Sekunden später, nach dem mindestens ein Teilnehmer seinen Gesprächspartner nicht mehr hören konnte. Siehe dazu auch Darstellung im wik-zafaco-Gutachten (2021), S. 104. Letztlich kann für Internetdienste festgestellt werden, dass ein Funktionieren individuell und nicht objektiv beurteilt wird.

des Dienstes festzulegen, wie bereits für die Entscheidung über die angestrebte Mindestqualität des Dienstes im Sinne der akzeptablen Nutzererfahrung.

In Abschnitt 2.5 haben wir dargestellt, welche methodischen Schritte bei der Festlegung von Grenzwerten für die Paketverlustrate (und – in Abhängigkeit von seiner Relevanz – für den Jitter) vorzunehmen sind, um eine Quantifizierung der technischen Anforderungen sowohl im Sinne der Grundversorgung als auch im Sinne eines technischen Funktionierens vornehmen zu können. Derartige Festlegungen können nur unter Rückgriff über die zugrundeliegenden statistischen Zusammenhänge getroffen werden und sind dabei werturteilsbehaftet.[207]

Die Verfügbarkeit von QoE-Metriken und die Abbildung der Zusammenhänge von QoS-Parameter-Ausprägungen und Qualität – ausgedrückt durch die QoE – stellen somit eine notwendige Voraussetzung für die Festlegung von Grenzwerten für die Paketverlustrate und den Jitter dar, und zwar um

- eine fundierte Basis für die Festlegung der angestrebten Dienstequalität heranziehen zu können (sowohl der Dienstequalität für die akzeptable Nutzererfahrung als auch für ein Funktionieren des Dienstes),
- die mit den angestrebten Qualitäten korrespondierenden technischen Grenzwerte festlegen zu können.

Bereits in Abschnitt 2.4.2 haben wir QoE-Metriken für die verschiedenen Dienste vorgestellt und auch in Abschnitt 5.3 die Zusammenhänge dargestellt, die die Interdependenz von Dienstequalität und QoS-Metriken erläutern und auch veranschaulicht, welchem Wandel diese Methoden unterliegen. Sich technisch stetig weiterentwickelnde Dienste bedürfen daher entsprechend aktueller bzw. aktualisierter QoE-Analysen.[208] Diese sind

---

207 Die Einhaltung der abgeleiteten Grenzwerte für die technischen QoS-Parameter soll die angestrebten Dienstequalität ermöglichen. Diese Herangehensweise stützt sich auf die Hypothese, dass es einen eindeutigen Zusammenhang zwischen den Werten des betrachteten QoS-Parameters und der QoE gibt. Dieser kann durch eine statistische Nutzenfunktion beschrieben werden, die den Zusammenhang zwischen QoE und QoS beschreibt. Anhand dieser Kurve sind die Werte zu bestimmen, die (1) die QoE im Sinne der angestrebten MINDESTversorgung für den betrachteten Dienst bzw. (2) den Grenzwert für ein Funktionieren des Dienstes repräsentieren sollen. Mit anderen Worten, es ist DER Grenznutzer zu identifizieren, dessen Nutzererfahrung den Maßstab für die Festlegung der Mindestversorgung repräsentieren soll.

208 In verschiedenen Studien wurden diese Algorithmen zur Transformation von QoS-Parametern in QoE-Approximationen entwickelt und angewendet. Hierbei handelt es sich um Verfahren, die anhand externer Faktoren und in Abwesenheit subjektiver Bewertung eine Transformation von QoS in QoE vollziehen. Siehe hierzu beispielsweise Kowalik, K. / Andruloniw, P. / Partyka, B. / Zwierzykowski, P. (2022). Es gibt viele Ansätze, die anwendungsspezifische Formalisierungen verwenden und dabei viele Bestimmungsfaktoren berücksichtigen, deren Zusammenhänge im Allgemeinen zunächst empirisch bestimmt werden müssen. Beispiele hierfür finden sich bei Schatz et al. (siehe Abbildung 5); Juluri et al. (2015) oder auch Kuipers et al. (2010), pp. 216–227.

in der Regel jedoch bestenfalls mit zeitlichem Abstand verfügbar und es besteht die Gefahr, dass sie zu diesem Zeitpunkt bereits von den technischen Neuerungen auf der Diensteebene überholt wurden.[209]

Beobachtete Interdependenzen zwischen verschiedenen QoS-Metriken erschweren die Bestimmung eines eindeutigen Zusammenhangs einzelner QoS-Parameter in Bezug auf die Nutzererfahrung (QoE): Wegen des substitutiven Charakters von QoS-Parametern, grafisch dargestellt am Beispiel der Telefonie unter Berücksichtigung von Latenz und Paketverlust (vergleiche Abbildung 19), ist hier der Zusammenhang unbestimmt.[210]

Bei unserer Recherche konnten wir – mit Ausnahme der bekannten Darstellungen zu Telefonie[211] – keine öffentlich verfügbaren Dokumentationen finden, die die gesuchten Zusammenhänge zwischen QoE und den in diesem Gutachten zu untersuchenden QoS-Parametern darstellen. Verfügbar sind lediglich die in diesem Kapitel vorgestellten einzelnen (Grenz-)Werte.

Die Spannbreite der tolerierten Werte auf der einen Seite und die Dynamik bei der Entwicklung von Methoden und Verfahren auf Ebene der Anwendungen, die Einschränkungen des Paketverlusts zu kompensieren auf der anderen Seite, lassen uns aus ökonomischer und technischer Sicht zu einer Zurückhaltung bei der Vorgabe von Grenzwerten für den Paketverlustraten.

Losgelöst von dem Funktionszusammenhang zwischen den untersuchten Qualitätsparametern Jitter und Paketverlustrate einerseits und dem Funktionieren dieser Dienste bzw. der ermöglichten alltäglich akzeptablen Nutzererfahrung andererseits, können auf einer übergeordneten Betrachtungsebene und unter Beachtung effizienten Verwaltungshandelns folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Der **Jitter** hat lediglich bei Echtzeit-Dialogdiensten Bedeutung. Für diesen Qualitätsparameter erübrigt sich die Vorgabe eines zusätzlichen Grenzwertes bereits aus der Fähigkeit des Jitterbuffers, die Variabilität der Verzögerung nach Maßgabe des Grenzwertes für die Latenz zu korrigieren.

---

209 Wie groß der Timelag hierbei ist bzw. sein kann, verdeutlicht folgendes Beispiel: Der Standard ITU-T P.1201 ist seit dem 14.10.2012 als QoE-Metrik für IPTV-Systeme verfügbar (ITU (2012)). Erste in Deutschland verfügbare Produkte starteten bereits im Jahre 2006 (https://www.iptv-anbieter.info/iptv-provider/alice-hometv-iptv.html).

210 Eine hilfsweise Orientierung an den jeweils strengsten Werten ist im Kontext des Innovationspotentials der Produkt- und Anwendungsentwickler aus wettbewerblicher Sicht zweifelhaft.

211 Vergleiche Abschnitt 5.2.5 in diesem Gutachten.

Obwohl der Paketverlust die Dienstequalität beeinflusst bzw. diese beeinflussen kann, sehen wir von der Vorgabe von einzuhaltenden Grenzwerten aus folgenden Überlegungen ab:

- Die Paketverlustrate ist eine der Datenübertragungsrate nachgelagerte Größe; die Datenübertragungsrate ist eine hinreichende Anforderung, um eine alltäglich akzeptable Nutzererfahrung zu ermöglichen.
- Dienstespezifische Anforderungen an die Mbps in Down- und Upstream erfordern weniger werturteilsbehaftete Annahmen als qualitätsbezogene Festlegungen zu Paketverlustraten;
- auch unterliegen sie nicht
  - dem dynamischen Wandel, wie er sich in Bezug auf die sich stetig weiterentwickelnden Anwendungen und deren Kompensationsmechanismen vollzieht;
  - den (ausgleichenden) Interdependenzen von QoS-Parametern, die einer Festlegung von Grenzwerten im Sinne von Mindestanforderungen ausgesetzt sind.

7 Möglichkeitsanalyse

Das TKG fordert eine Konkretisierung von Datenübertragungsrate im Download und Upload sowie der Latenz für die Mindestversorgung mit einem Internetzugangsdienst.

Um der Zielsetzung des TKG zu genügen und somit die Dienste der Mindestanforderungen zu ermöglichen, sollen weitere, gegebenenfalls zu betrachtende Qualitätsparameter wie Jitter sowie Paketverlustrate analysiert und bewertet werden.

In diesem Teil des Gutachtens werden die Möglichkeiten zur Ermittlung dieser Qualitätsparameter für eine Prüfung einer Unterversorgung nach TKG § 160 betrachtet. Hierfür kommen die in der TKMV (Telekommunikationsmindestversorgungsverordnung) aufgeführten Anforderungen in Betracht, sowie eine Beurteilung, wie die ggf. weiteren zu betrachtenden Qualitätsparameter auch erhoben werden könnten. Hierzu betrachten wir, wie die Werte messtechnisch erhoben werden können, welche Vorgabe des BEREC es hierbei gibt und auch welche Einschränkungen das BEREC hierzu äußert.

In der TKMV § 2 werden die regelmäßig zu erfüllenden Anforderungen an den Dienst für die Datenübertragungsrate im Download von mindestens 10 Mbps, im Upload von mindestens 1,7 Mbps, sowie eine Latenz von höchstens 150 ms festgelegt. Zu beachten ist hierbei, dass insbesondere für die Latenz nach § 1 das arithmetische Mittel aus der Signallaufzeit zwischen dem Netzabschlusspunkt und dem Referenzpunkt der Breitbandmessung Desktop-App sowie der Rückrichtung zu betrachten sind.

Für die Erhebung der in der TKMV bereits festgelegten Parameter könnte auf die Breitbandmessung Desktop-App zurückgegriffen werden. Diese umfassen aktuell die Messung für den Download und Upload sowie die Latenz (nur bei Einzelmessungen). Diese Umsetzungen orientieren sich an den Guidelines zu den Messmethoden des Gremiums Europäischer Regulierungsstellen für elektronische Kommunikation (BEREC). Ausgeführt sind diese in der BEREC-Veröffentlichung Net Neutrality Regulatory Assessment Methodology BoR (22) 72.[212] Die vom BEREC formulierten Zusammenhänge und Anforderungen werden nachfolgend dargestellt, da sie auch im Kontext einer Evaluierung der in diesem Gutachten im Vordergrund stehenden QoS-Metriken von Bedeutung sind.

Down- und Uploadmessungen werden mittels verschlüsselter WebSocket-Verbindungen realisiert. Die Nutzung von WebSocket als Applikationsprotokoll sowie TCP als Transportprotokoll bildet hierbei ein angemessenes Gleichgewicht zwischen den konkurrierenden Anforderungen an Genauigkeit, Plattformunabhängigkeit, einfache Implementierung und Transparenz. Die typische Nutzung von Endanwendern wird hierdurch – wie in BoR (22) 72 ausgeführt – ebenso widergespiegelt, da TCP ein typisches Transportproto-

212 Vgl. BEREC (2022).

koll von weit verbreiteten Diensten wie HTTP ist. Für eine Umsetzung einer Internetgeschwindigkeitsmessung sollen weitere Anforderungen berücksichtigt werden, hierzu zählen u. a.:

- Eine Nutzung von endnutzertypischen Endgeräten sollte unterstützt werden.
- Die Ergebnisse müssen die für den Endnutzer verfügbare Geschwindigkeit objektiv widerspiegeln, welche durch Faktoren wie Paketverluste oder Latenzzeiten beeinflusst werden kann.
- Die Durchführungszeit sollte so kurz sein, dass diese für den Nutzer frustrationsfrei durchgeführt werden kann.
- Die Messgegenstellen sollten so nah wie möglich an Internet Exchange Punkten platziert sein, sodass mit einem transparenten Peering kurze Pfade sowie Latenzen erreicht werden können.
- Der Test Traffic soll neutral zu anderem Traffic behandelt werden.
- Die Anwendung soll störende Faktoren wie z. B. Messungen via WLAN oder parallelen Traffic so weit wie möglich betrachten.
- Die Nutzung von mehreren parallelen Verbindungen zwischen Messserver und Messclient wird empfohlen, um eine Sättigung der Anschlussleitung zu erreichen.

In der Breitbandmessung Desktop-App werden diese Anforderungen berücksichtigt und umgesetzt. Detaillierte Informationen hierzu werden in einer technischen Spezifikation bereitgestellt.[213]

Messung der verfügbaren Datenübertragungsrate

In diesem Kontext wird auf die verfügbare Datenübertragungsrate abgestellt. Um diese zu erfassen, ist insbesondere der Punkt der Nutzung von TCP und den damit einhergehenden Retransmissions im Falle von Paketverlust zu beachten, ausgelöst entweder durch Paketfehler oder durch (präventiven) Paketverlust bei Sättigung von Netzknoten auf dem Pfad. Da laut BEREC die Datenübertragungsrate auf den erfolgreich übertragenen TCP-Nutzdaten („Goodput“) auf Empfängerseite berechnet wird, spiegelt sich möglicher Paketverlust somit durch die Retransmissions und dem damit verbundenen geringeren Goodput unmittelbar in der Datenübertragungsrate wider.

Messung von Latenz

Die Messung der Latenz wird innerhalb der Breitbandmessung für Einzelmessungen als Round-Trip Delay (RTT)[214] Messung realisiert und basiert auf dem Austausch von WebSocket Control Frames zwischen Messserver und Messclient. Diese Anfragen werden

213 Vgl. BNetzA (2021b).
214 Die Nutzung von Round-Trip Delay und Round-Trip Time ist in dem Kontext als synonym zu verstehen. Die Begriffe werden je nach Standardisierungsgremium unterschiedlich bevorzugt genutzt.

von den auf der Übertragungsstrecke beteiligten Netzknoten weitergeleitet und vom angesprochenen System in umgekehrter Richtung beantwortet. Die Latenz entspricht der Zeit, die vom Absenden der Anfrage bis zum Erhalt der Antwort vergangenen ist (Round-Trip Delay).

Eine Latenzmessung besteht aus zehn im Abstand von jeweils einer Sekunde aufeinanderfolgend gesendeten WebSocket PING-Frames vom Messserver zum Messclient, wobei der Messclient diese mit einem WebSocket PONG-Frame beantwortet. Die Werte werden in der Breitbandmessung als arithmetisches Mittel zu einem Wert zusammengefasst. Einzelne Latenzmessungen, die einen Timeout von einer Sekunde überschritten haben, werden bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt.

Die Messung eines One-Way Delay zwischen dem Messserver und dem Messclient, wie dies z. B. in RFC 7679 beschrieben wird, ist innerhalb der Breitbandmessung nicht sinnvoll umsetzbar. Hierfür müsste eine sehr genaue Synchronisierung der Uhrzeiten zwischen beiden Systemen hergestellt werden. Dies wird in BoR (22) 72 ebenfalls reflektiert und im Kontext einer Endanwendermessung als unpraktikabel angesehen. Die Latenzen zwischen Messserver und Messclient können in der jeweiligen Richtung unterschiedlich sein, dies ergibt sich bereits aus der asynchronen Struktur von IP-Netzen und deren Routen zwischen zwei Endpunkten. Dennoch wird aus Praktikabilitätsgründen die Messung einer Latenz als Round-Trip Delay bevorzugt.

In der TKMV §1 wird als Näherung zu dem One-Way Delay das arithmetische Mittel aus den beiden One-Way Delay von Hin- und Rückrichtung definiert. Dies entspricht dem halben Wert der Latenz des gemessenen Round-Trip Delay der Breitbandmessung.

Messung von Jitter

Nach BEREC kann zusammen mit der Latenzmessung auch die Schwankung der Latenz (Jitter) gemessen werden. Diese beruht entsprechend der zuvor beschriebenen Messmethodik der Latenz genauso auf einer Betrachtung des Round-Trip Delay bzw. im Kontext von Jitter auf deren Schwankung und nicht auf einer Schwankung des One-Way Delays in der jeweiligen Verbindungsrichtung. Neben dieser Abweichung (One-Way vs. Round-Trip Delay) stellt auch BEREC fest, dass die Anzahl der Latenzmessungen i. a. R. begrenzt ist, sofern eine akzeptable Durchführungszeit erreicht werden soll. Diese merkt in dem Kontext auch an, dass durch die begrenzte Anzahl der ermittelten Latenzwerte, die Ableitung der Schwankung der Latenz (Jitter) von begrenztem Wert ist.

Messung von Paketverlust

Explizite Messungen der Paketverluste sollen nach BEREC nicht mittels TCP umgesetzt werden, da dieses Protokoll Paketverluste eigenständig durch Retransmission ausgleicht (siehe oben). Die Nutzung von ICMP (Internet Control Message Protocol) oder UDP (User Datagram Protocol) ist zu bevorzugen. Entsprechende Voraussetzungen bei einer

Implementierung, z. B. in einem Web-Browser oder einer installierbaren Anwendung, müssen hierfür erfüllt sein. Des Weiteren ist die Mindestzahl von zu übertragenden Paketen zu beachten. Diese müssen eine ausreichende Anzahl aufweisen, um eine geforderte Auflösung der zu erwartenden Paketverlustrate zu ermöglichen. Zu diesem Aspekte hat auch BEREC in BoR (22) 72 angemerkt, dass zur Einhaltung der genannten Anforderungen umfangreiche Messungen durchgeführt werden müssten. Dies liegt darin begründet, dass heutzutage die modernen Netze eine sehr geringe Paketverlustrate aufweisen. Um diese erfassen zu können, ist eine hohe Anzahl von Paketen zu übertragen. Dieses Erfordernis steht dabei jedoch in Widerspruch zu den Vorgaben einer möglichst kurzen Durchführungszeit der Breitbandmessung.

Umsetzung der Latenz, Jitter und Paketverlust Messung

Bei der Messung der Latenz kann gleichzeitig eine Bestimmung des Jitter und des Paketverlustes durchgeführt werden. In diesem Zusammenhang muss insbesondere darauf geachtet werden, dass

- ICMP oder UDP als Protokoll genutzt wird,
- kein paralleler Traffic auf der Anschlussleitung vorliegt,[215]
- die Anzahl der Einzelmesspunkte eine ausreichende Anzahl aufweist.

Hierbei kann die Anzahl der durchzuführenden Einzelmesspunkte anhand der gewünschten Genauigkeit und Auflösung abgeleitet werden. Bei einer zu erwartenden geringen Paketverlustrate im niedrigen einstelligen Bereich [216] ist zu erwarten, dass eine Auflösung von einer oder gar zwei Nachkommastellen nötig ist, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Für die Messung einer Verlustrate mit einer Nachkommastelle bedeutet dies, dass mindesten 1.000 Einzelmessungen durchgeführt werden müssen. Bei einer Auflösung von zwei Nachkommastellen entsprechend mindestens 10.000 Einzelmessungen.

Durch die Kombination aus der Nutzung des Anschlusses ohne parallelen Datenverkehr und dem zeitlichen Abstand von bis zu 1 Sekunde zwischen den Einzelmesspunkten resultiert hieraus eine Messdauer von ca. 17 Minuten (bei 1.000 Einzelmesspunkten), bzw. ca. 2 Stunden und 45 Minuten (bei 10.000 Einzelmesspunkten), in der der Anschluss nicht anderweitig genutzt werden kann.

---

215 Paralleler Verkehr kann zu einer deutlichen Steigerung der Latenz führen, da in IP-basierten Netzen Zwischenspeicher und Queue Management Systeme eingesetzt werden. Hohe Speicherfüllstände führen hierbei zu einer Verzögerung der zu übertragenden Pakete, was wiederum zu einer höheren Latenz, Jitter und ggf. Paketverlustbewertung führen kann. Siehe hierzu auch RFC 7567 (2015) und Gettys, J. / Nichols, K. (2011).

216 Vgl. Abschnitt 4.4 sowie Abschnitt 6.4.3.

Bestimmung einer Unterversorgung nach § 160TKG

Eine Bestimmung einer Unterversorgung soll durch die Bundesnetzagentur festgestellt werden. Hierzu wurde im Entwurf der TKMV[217] im Teil B. auch auf die Mitwirkung von Petenten verwiesen, die mit Hilfe von Protokollen der Breitbandmessung eine Informationsbasis für die Behörde liefern sollen. Vorgaben für eine Durchführung von Messungen und Voraussetzungen für ein Messprotokoll wurde in Anlehnung an die Allgemeinverfügung[218] der Bundesnetzagentur (Az. 120-3945-1/2021) für eine Auslegung einer vorliegenden Unterversorgung in dem Entwurf der TKMV bereits getroffen. Auch nennt die TKMV in § 1 die Breitbandmessung Desktop-App als Referenzmesspunkt zur Messung der Latenz eines Netzanschlusspunktes.

Bei der Breitbandmessung Desktop-App ist in diesem Kontext zu beachten, dass das sogenannte Nachweisverfahren der Breitbandmessung Desktop-App die Vorgaben der Allgemeinverfügung für die Minderungsregelungen im Festnetz umsetzt und ausschließlich eine Erfassung und Bewertung der Datenübertragungsrate im Download und Upload vorsieht.

Eine konkrete Ausgestaltung und gegebenenfalls eine Einbettung der Parameter Jitter und Paketverlust in ein mögliches Nachweisverfahren einer Unterversorgung, wie dies im Entwurf der TKMV beschriebenen Anlehnung an die bestehende Allgemeinverfügung veröffentlicht wurde, bedarf einer Definition durch ein detailliertes Messkonzept nach den bereits beschriebenen Vorgaben des BEREC.

217 Vgl. BNetzA (2022a).
218 Vgl. BNetzA (2021a).

8 Zusammenfassende Evaluation

Ausgangspunkt dieses Gutachtens bildete die Frage, ob im Kontext der Grundversorgung mit einem Internetzugang neben der Datenübertragungsrate und der Latenz noch weitere Qualitätsparameter wie Jitter oder die Paketverlustrate ebenfalls in der TKMV vorgegeben werden müssen, um die Dienste der Grundversorgung stets zu ermöglichen bzw. ein Funktionieren sicherstellen zu können.

Um diese Frage zu beantworten, wurden sowohl die Zusammenhänge von Network Performance Parametern (Quality of Service Parameter, QoS) und der vom Nutzer wahrgenommenen Quality of Experience (QoE) sowie netz- und protokolltechnische Aspekte aus der Perspektive der Diensterealisierung herausgearbeitet.

Die Analyse kommt auf Basis technischer und ökonomischer Zusammenhänge zu dem Ergebnis, dass es für die Ermöglichung der Dienste der Grundversorgung neben den Datenübertragungsraten im Downstream und Upstream sowie der Latenz keiner weiteren Qualitätsparameter bedarf. Diese Bewertung lässt sich dabei wie folgt zusammenfassen:

Mit dem QoS-Parameter Paketverlustrate wird das Verhältnis von gesendeten Datenpaketen einer Datenquelle zu empfangenen Datenpaketen an einem Ziel erfasst, um zu ermitteln, welcher Anteil verloren geht. Auf der IP-Schicht (Layer 3) ist ein Paketverlust immer einer Last-Situation geschuldet: Bei aufkommender Verkehrslast kommt es an den Routern zu Warteschlangen, die entweder bei überlaufendem Speicher einen Paketverlust auslösen oder bereits durch Verkehrsmanagementmaßnahmen bei anwachsenden Warteschlangen zu einem pro-aktiven Verwerfen von Paketen führen (sog. Random Early Detection RED Verfahren). Die Verkehrslast als Ursache des Paketverlusts ist dabei immer ein relatives Phänomen von dem punktuellen Aufeinandertreffen von nachgefragten und verfügbaren Transportkapazitäten im IP-Kernnetz.

Für die Frage, welche Anforderungen an den Internetzugang im Sinne der Grundversorgung an die Leistungsmerkmale der Anschlusslinie zu stellen sind, ist die Paketverlustrate jedoch von nachrangiger Bedeutung: Letztlich reduziert die Paketverlustrate die beim Nutzer verfügbare Datenübertragungsrate. Da auf der Anschlusslinie von einer Situation ohne Last ausgegangen werden muss, um dienstespezifische Mindestanforderungen zu ermitteln, kann auf diesem Netzsegment kein Paketverlust auf Schicht 3 entstehen. Ein Paketverlust kann lediglich an den Eingängen der Anschlussleitung entstehen, wenn versucht wird, ein Datenvolumen über die Anschlusslinie zu übertragen, das dessen Kapazität übersteigt. Die Festlegung der Datenübertragungsrate im Down- und Upstream ist daher für dieses Netzsegment notwendig und hinreichend, es bedarf keiner zusätzlichen Vorgabe eines Grenzwertes für die Paketverlustrate.

Anders als auf der Anschlusslinie ist die Paketverlustrate im IP-Kernnetz insofern ein relevantes Phänomen, als dass das IP-Best-Effort-Internet ein warteschlangenbasiertes und damit qualitätsungesichertes Netz ist. Da die Nachfrage nach Transportkapazitäten

im Best-Effort-Netz nicht beschränkt wird, sind Lastsituationen von den Netzbetreibern nur indirekt beinflussbar und können nicht vollständig kontrolliert werden.

Was für den Paketverlust festgestellt werden kann, gilt auch für den Jitter: Er ist ein Phänomen des Kernnetzes. Er beschreibt die Variabilität der gemessenen Paketlaufzeiten und charakterisiert damit deren Variation. Dieser Wert hat seine Relevanz bei der Echtzeit-Sprach- oder Video-Übertragung, da er die Kontinuität des Datenstroms stört. Der Jitter wird durch eine schwankende Verkehrslast und damit Verarbeitungsgeschwindigkeit an den Routern verursacht. Entsprechend ist er – ebenso wie die Paketverlustrate – im Best-Effort-Netz nicht durch den Netzbetreiber direkt kontrollierbar.

Die beschriebenen, im Kernnetz entstehenden Einschränkungen der Network Performance wirken sich diskriminierungsfrei auf alle Endkundenanschlüsse des Netzbetreibers aus, egal ob diese über einen ADSL- oder Gigabit-Anschluss verfügen. Ist die Anschlusslinie nach Maßgabe der Vorgaben der TKMV dimensioniert, so bestehen keine Bedenken hinsichtlich der Erreichung der angestrebten Qualität bzgl. Paketverlustrate und Jitter. Daher handelt es sich bei diesen Phänomenen nicht um ein spezifisches Mindestversorgungsthema, sondern vielmehr um eines der Vertragserfüllung durch den Internetzugangsanbieter und damit des Kundenschutzes.

Unabhängig davon, dass Paketverlust (und Jitter) als kernnetzspezifische – und damit nicht als anschlussspezifische – Phänomene eingeordnet wurden, konnte gezeigt werden, dass dem Paketverlust innerhalb des warteschlangenbasierten IP-Best-Effort-Netzes eine qualitätssichernde Funktion zukommt und er daher integraler Bestandteil des Systems ist. Die protokolltechnischen Implementierungen auf Transport und Übertragungsschicht machen sich das Phänomen des Paketverlusts zu eigen: Sie gehen mit Mechanismen einher, die einerseits der Entstehung bzw. Verstärkung von Lastsituationen (die den Paketverlust verursachen) entgegenwirken. Andererseits trägt der Einsatz des TCP-IP bzw. QUIC in Verbindung mit UDP bei Diensten mit diskreten Datenvolumen einer fehlerfreien Datenübertragung Rechnung. Paketverlust wird von diesen Protokollen durch erneute Übersendung geheilt.

Für Dienste mit kontinuierlichen Datenströmen, die bei bi-direktionalen Echtzeitdiensten über das UDP realisiert werden (und bei denen keine Fehlerkontrolle auf der Transportschicht erfolgt), sind protokolltechnische Mechanismen auf der Anwendungsschicht angesiedelt. Hier kommen Algorithmen zur Anwendung, die Paketverluste, die nicht ausgeglichen werden können, durch (Fehler-)Korrekturalgorithmen auffangen. Diesen Algorithmen kommt auch in Bezug auf den Jitter eine große Relevanz zu: Sogenannte Jitterbuffer tragen dafür Sorge, dass im Kernnetz entstandene Schwankungen der Latenz, die zu einem diskontinuierlichen Datenstrom führen, beim Empfänger wieder in einen kontinuierlichen Datenstrom überführt werden. Dies gelingt mit Hilfe einer vorübergehend Zwischenspeicherung und leicht verzögerter Wiedergabe. Sofern die Verzögerung beschränkt ist (Latenz < 150 ms) und diese Beschränkung eingehalten wird, konstituiert

diese damit auch implizit eine Obergrenze für die Variabilität der Verzögerung (d.h. den Jitter).

Wie bereits ausgeführt, können Netzbetreiber nur indirekt die Lastsituation in einem warteschlangenbasierten Best-Effort-Netz beeinflussen. Dennoch haben sie verschiedene Möglichkeiten, dieser entgegenzuwirken. Dazu zählen der Einsatz hochleistungsfähigen Equipments mit hohen Verarbeitungsgeschwindigkeiten und Transportkapazitäten, Verkehrsmonitoring und vorausschauenden Kapazitätsupgrades sowie Lastverteilungsmaßnahmen. Der wettbewerbliche Markt für Internetzugänge schafft die Anreize, leistungsfähige Transportnetze für die Nutzung von Internetdiensten bereitzustellen. Aufgrund dieser Rahmenbedingungen ist heutzutage davon auszugehen, dass die Paketverlustrate in IP-Kernnetzen i.d.R. kleiner als 0,5 %/1,0 % ist. Das Instrument des Kundenschutzes, umgesetzt mit Hilfe von Breitbandmessungen, trägt ergänzend dazu bei, dass Einschränkungen der Network Performance – auch in Bezug auf Paketverlust und Jitter – in den heutigen IP-Netzen in der Regel nur kurzfristig und vorübergehend auftreten.

Aus der Perspektive des Nutzers ist festzuhalten, dass die von ihm wahrgenommene Qualität (QoE) des Dienstes auch durch die QoS Parameter Paketverlustrate und Jitter beeinflusst wird. Dies bringen u.a. Veröffentlichungen der ITU zum Ausdruck, die Grenzwerte differenziert nach Dienstekategorie angeben. Dabei ist zu beachten, dass die aus ITU-Veröffentlichungen bekannten (strengen) Grenzwerte für Paketverlustrate oder Jitter von den anwendungsspezifischen protokolltechnischen Algorithmen abstrahieren, die in der Lage sind, den im IP-Transportnetz entstehenden Einschränkungen der Network Performance entgegenzuwirken.

Die Bedeutung eingeschränkter Network Performance auf die QoE des Nutzers dokumentiert sich aber auch in veröffentlichten, dienstespezifischen QoE-Analysen. Diese geben Aufschluss über die empirisch beobachteten Zusammenhänge zwischen Network Performance Parametern und der durch den Nutzer wahrgenommenen Dienstequalität. Der MOS (Mean Opinion Score) stellt eine – insbesondere aus dem Bereich der Sprachtelefonie bekannte – QoE-Metrik dar, die auch im Bereich anderer Dienste mit kontinuierlichen Datenströmen Anwendung findet.

Untersuchungen zeigen ferner, dass es aus Nutzersicht Interdependenzen zwischen den QoS-Parametern gibt,[219] so dass ein bestimmtes Qualitätsniveau (QoE) auch über verschiedene Kombinationen von Ausprägungen der QoS-Parameter erreicht werden kann. Unterschiedliche Bewertungen der Einschränkungen der Network Performance dokumentieren sich beispielsweise auch in der Implementierung dienstespezifischer Anwendungen. Als Beispiele können hier YouTube und Netflix genannt werden: Während für YouTube ein schneller Start des Videos selbst bei eingeschränkter Qualität wichtig ist, wird demgegenüber bei Netflix ein späterer Start zugunsten besserer, stabiler Qualität toleriert. Diese Form der Qualitätsdifferenzierung – hier am Beispiel von Streaming-

219 Nutzersicht bedeutet hier, dass die vollständige Ende-zu-Ende Verbindung betrachtet wird.

Diensten – hat sich auf der Plattform des Best-Effort-Internet entwickeln können, bei der weder aus Nutzer- noch aus Anbietersicht ein uniformes Verständnis von Dienstequalität vorliegen muss.

Um ein umfassendes Bild der vom Nutzer erfahrenen Dienstequalität zu erhalten, sind jedoch noch weitere Bestimmungsfaktoren in die Betrachtung einzubeziehen. Die Endgeräte des Nutzers sowie die Leistungsfähigkeit seines Heimnetzes (inkl. WiFi) sowie die Einrichtungen der Diensteanbieter haben einen Einfluss auf den Ende-zu-Ende realisierten Dienst, weswegen der Internetzugangsanbieter die angestrebte Dienstequalität selbst bei uneingeschränkter Network Performance nicht Ende-zu-Ende kontrollieren kann. Ebenso sind hier die zusammengeschalteten IP-Netze zu nennen, die in die Wertschöpfungskette eingebunden sein können.

Aufgrund dieser Zusammenhänge und der im Markt implementierten Lösungsansätze auf Transport- und Anwendungsschicht bedarf es aus Sicht der Gutachter keiner weiteren Vorgaben von technischen Mindestanforderungen. Vielmehr kann unter Wahrung der Netzneutralität und durch die Separierung von Netz und Anwendungen ein wettbewerbliches Umfeld für die Entwicklung und Innovationsdynamik von IP-basierten Anwendungen geschaffen werden, das sowohl den Phänomenen eingeschränkter Network Performance als auch der, der Mehrheit der Nutzer zur Verfügung stehenden Datenübertragungsrate Rechnung trägt. Maßnahmen des Kundenschutzes flankieren diese Anreizstrukturen und machen sie überprüfbar.

Die Anschlusslinie stellt demgegenüber den Bottleneck für die Grundversorgung mit einem Internetzugang dar. Für sie ist die Vorgabe des TKG, die Datenübertragungsrate im Down- und Upstream sowie die Latenz mit Mindestanforderungen in der TKMV zu quantifizieren, hinreichend. Einer Vorgabe von Grenzwerten für die Paketverlustrate oder den Jitter bedarf es nicht. Auch konnten keine weiteren Qualitätsparameter identifiziert werden, die im Kontext des Gutachtenauftrages von Relevanz wären.

Literaturverzeichnis

Akamai: Netzwerkbetreiber, Akamai Network Partnerships [Internet], https://www.akamai.com/de/why-akamai/network-operator/akamai-network-partnerships (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Aro, T. O. et al (2019): Application of Transmission Control Protocol (TCP) and User Datagram Protocol (UDP) in Teleconference System, in: Journal of Computer Science and Control Systems; Oradea Tomo Vol 12, N.º 2, (Oct 2019) p. 15-19

Ash, G. R. (2007): Traffic Engineering and QoS Optimization of Integrated Voice and Data Networks, Elsevier, 2007

Band, V. (2019): QUICsilver: Optimising QUIC for use with Real-Time Multimedia Traffic, Vivian Band (2038561) April 22, 2019, https://csperkins.org/research/thesis-msci-band.pdf (zuletzt abgerufen: 25.08.2023)

BEREC (2011): A framework for Quality of Service in the scope of Net Neutrality, BoR (11) 53, 8. December 2011; https://www.berec.europa.eu/sites/default/files/files/doc/berec/bor/bor11_53_qualityservice.pdf (zuletzt abgerufen: 26.06.2023)

BEREC (2016): BEREC-Leitlinien zur Umsetzung der europäischen Netzneutralitätsregeln durch die nationalen Regulierungsbehörden, Nicht-autorisierte Übersetzung des BEREC-Dokuments BoR (16)127 durch die Bundesnetzagentur, August 2016, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Netzneutralitaet/LeitlinienDeu.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (zuletzt abgerufen 26.06.2023)

BEREC (2016a): Report on OTT services, BoR (16)35, January 2016, https://www.berec.europa.eu/sites/default/files/files/document_register_store/2016/2/BoR_%2816%29_35_Report_on_OTT_services.pdf (zuletzt abgerufen: 25.08.2023)

BEREC (2020a): BEREC Guidelines detailing Quality of Service Parameters, BoR (20) 53, 6 March 2020, https://www.berec.europa.eu/sites/default/files/files/document_register_store/2020/3/BoR%20%2820%29%2053%20-%20QoS%20Guidelines%20FINAL.pdf (zuletzt abgerufen: 26.06.2023)

BEREC (2020b): BEREC Guidelines on Very High Capacity Networks, BoR (20) 165, 01 October 2020, https://www.berec.europa.eu/sites/default/files/files/document_register_store/2020/10/BoR_%2820%29_165_BEREC_Guidelines_VHCN.pdf (zuletzt abgerufen, 04.07.2023)

BEREC (2022): BEREC Net Neutrality Regulatory Assessment Methodology, BoR (22) 72, 9 June 2022, https://www.berec.europa.eu/en/document-categories/berec/regulatory-best-practices/methodologies/berec-net-neutrality-regulatory-assessment-methodology-0

BlogGeek.Me: Opus, WebRTC Glossary [Internet], https://webrtcglossary.com/opus/ (zuletzt abgerufen: 05.07:2023)

BM COM: QoS & QoE Monitoring [Blog], https://bmcom.com/solutions/qoe-qos-management/ (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

BNetzA (2015): Breitbandmessung [Internet]: https://breitbandmessung.de/interaktive-darstellung, (zuletzt abgerufen: 26.06.2023)

BNetzA (2021a): Verfügung Nr. 99/2021 (Amtsblatt 23/2021 vom 08.12.2021), Allgemeinverfügung, Az.: 120-3945-1/2021, https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Breitband/Breitbandgeschwindigkeiten/Allgemeinverfuegung_neu.pdf?__blob=publicationFile&v=4

BNetzA (2021b): Technische Spezifikation, Breitbandmessung, Stand 13. Dezember 2021, zafaco GmbH im Auftrag der Bundesnetzagentur, https://download.breitbandmessung.de/bbm/Technische_Spezifikation_der_Breitbandmessung.pdf

BNetzA (2022a): Verordnung über die Mindestanforderungen für das Recht auf Versorgung mit Telekommunikationsdiensten (TK-Mindestversorgungsverordnung – TKMV), Entwurf der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Bearbeitungsstand: 16.03.2022, 10:13, https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Grundversorgung/EntwurfTKMV.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (zuletzt abgerufen 05.07.2023)

BNetzA (2022b): Ausschreibung Gutachten zum Entschließungsantrag 05/22 – Los 3: Mehrpersonenhaushalte, Geschäftszeichen 2022/018/Z25-7 - Los 3

Cheetah NETWORKS (2020): QoS vs QoE: Demystifying Quality of Service and Quality of Experience [Blog], https://cheetahnetworks.com/blog/qos-vs-qoe-demystifying-quality-of-service-and-quality-of-experience/#:~:text=In%20short%2C%20QoS%20refers,as%20experienced%20by%20the%20customer (zuletzt abgerufen: 21.06.2023)

Cisco (2005): QoS Cisco - Quality of Service - in VOIP implementations [Blog], posted by VoIP Info, September 16, 2005, https://www.voip-info.org/qos/ (zuletzt abgerufen: 05.07.2023)

Cisco (2021): Bandwidth Planning in your Cisco Webex Meetings Environment, https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/conferencing/webex-meetings/white_paper_c11-691351.pdf

DE-CIX Management (2023): Zahl des Jahres Datenverkehr steigt 2022 an den weltweiten DE-CIX Internetknoten um ein Viertel auf 48 Exabyte, Pressemitteilung [Blog], 16. Januar 2023, https://www.de-cix.net/de/unternehmen/medien/pressemitteilungen/zahl-des-jahres-datenverkehr-steigt-2022-an-den-weltweiten-de-cix-internetknoten-um-ein-viertel-auf-48-exabyte (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Development Support (2021): ISO/OSI Referenzmodell [Blog], https://dev-supp.de/netzwerk-anonymitaet/iso-osi-referenzmodell (zuletzt abgerufen: 10.12.2022)

Disney Plus: Videoqualität auf Disney+ [Blog], https://help.disneyplus.com/csp?id=csp_article_content&sys_kb_id=d9a5844fdbf37018db5ed404ca961990 (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Elster: Anforderungen ElsterFormular, https://www.elster.de/eportal/infoseite/anforderungen_elsterformular (zuletzt abgerufen 30.06.2023)

ETSI (2003): Technical Report: Satellite Earth Stations and Systems (SES); Broadband Satellite Multimedia; IP Interworking over satellite; Performance, Availability and Quality of Service, (ETSI TR102157, V1.1.1 (2003-07)), https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102100_102199/102157/01.01.01_60/tr_102157v010101p.pdf (zuletzt abgerufen: 05.07.2023)

ETSI (2023): ETSI Mobile Codecs technology page, https://www.etsi.org/technologies/codecs?jjj=1692981638552, (zuletzt abgerufen: 25.08.2023)

EU (2015): Verordnung (EU) 2015 (2120) DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 25. November 2015 über Maßnahmen zum Zugang zum offenen Internet und zur Änderung der Richtlinie 2002/22/EG über den Universaldienst und Nutzerrechte bei elektronischen Kommunikationsnetzen und -diensten sowie der Verordnung (EU) Nr. 531/2012 über das Roaming in öffentlichen Mobilfunknetzen in der Union, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R2120&from=DE (zuletzt abgerufen 26.06.2023)

EU (2018): RICHTLINIE (EU) 2018/1972 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über den europäischen Kodex für die elektronische Kommunikation (EKEK) (Neufassung) (Text von Bedeutung für den EWR), L 321/36, Amtsblatt der Europäischen Union, 17.12.2018, CELEX-Nr: 32018L1972, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L1972%20 (zuletzt abgerufen: 26.06.2023)

EU (2023): Breitband Glossar, https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/policies/broadband-glossary#ecl-inpage-kt8pwekw, (zuletzt abgerufen: 25.08.2023)

G. Kougioumtzidis et al. (2022): Survey on Multimedia Services QoE Assessment and ML-Based Prediction, IEEE Access, Vol 10, 2022, S. 19507–19538, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3149592., https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9706206 (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Gettys, J. / Nichols, K. (2011): Bufferbloat: Dark Buffers in the Internet: Networks without effective AQM may again be vulnerable to congestion collapse, ACM Digital Library, Queue, Volume 9, Issue 11, November 2011, pp 40–54, https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/2063166.2071893 (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Goetz, C. / Brunk, M. (2023): What is a jitter buffer used for?, Answer [Blog], TechTarget, 14 Mar 2023, https://www.techtarget.com/searchunifiedcommunications/answer/What-is-a-jitter-buffer-used-for (zuletzt abgerufen 30.06.2023)

Google Chrome Developers (2021): First Contentful Paint, Performance Audits [Internet / Docs], Thursday, May 2, 2019, Updated on Friday, June 4, 2021, https://developer.chrome.com/docs/lighthouse/performance/first-contentful-paint/ (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Google Chromium Blog (2018): A secure web is here to stay, February 8, 2018, https://blog.chromium.org/2018/02/a-secure-web-is-here-to-stay.html (zuletzt abgerufen: 06.07.2022)

Google Global Peer: Our Edge Network is how we connect with ISPs to get traffic to and from users, How it works [Internet], https://peering.google.com/#/ (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Hackbarth, K.-D. / Kulenkampff, G. / Plückebaum, T. (2016): Analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz, Version 2.3, Referenzdokument, WIK-Consult GmbH, Bad Honnef, 15. August 2016, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Marktregulierung/Massstaebe_Methoden/Kostenmodelle/Breitbandnetz2x/Referenzdokument_AnalytKM_Breitbandnetz_v2_3_20160815.pdf?__blob=publicationFile&v=2https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Marktregulierung/massstaebe_methoden/kostenmodelle/breitbandnetz2x/artikel.html (zuletzt abgerufen: 04.07.2023)

Heise-Online: Bandbreiten-Rechner [Internet], https://www.heise.de/netze/tools/bandbreitenrechner/ (zuletzt abgerufen 23.06.2023)

Hetzner Online (2020): Ab sofort direktes Peering mit der Deutschen Telekom, 2. März 2020, https://www.hetzner.com/de/news/03-20-dtag (zuletzt abgerufen: 06.07.2023).

Huang et al. (2012): Confused, timid, and unstable: picking a video streaming rate is hard. Proceedings of the 2012 ACM Internet Measurement Conference (IMC), November 2012, Pages 225–238

Hoßfeld, T. et. Al (2020): From QoS Distributions to QoE Distributions: a System's Perspective, 4th International Workshop on Quality of Experience Management (QoE Management 2020), https://arxiv.org/pdf/2003.12742.pdf (zuletzt abgerufen: 24.08.2023)

IETF (2022): Internet Draft, BBR Congestion Control, 7 March 2022, https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-cardwell-iccrg-bbr-congestion-control (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

InApp (2022): QUIC vs TCP: The Full Story [Blog], July 14, 2022, https://inapp.com/blog/quic-vs-tcp-the-full-story/#:~:text=TCP%20and%20QUIC%20have%20two,between%20the%20client%20and%20server (zuletzt abgerufen: 26.06.2023)

Ince, Z. / von Seck, R. (2022): SCTP: Are you still there? TUM, Seminar IITM WS 21/22, Network Architectures and Services, May 2022, https://www.net.in.tum.de/fileadmin/TUM/NET/NET-2022-07-1/NET-2022-07-1_09.pdf (zuletzt abgerufen: 04.07.2023)

Ionos (2022): Anwendungsschicht: Alles Wissenswerte über die siebte Ebene des OSI-Modells, Ionos KnowHow [Blog], 04.11.2022, https://www.ionos.de/digitalguide/server/knowhow/anwendungsschicht/ (zuletzt abgerufen 27.06.2023)

Ionos (2020): Was ist WebSocket?, Web-Entwicklung [Blog], 16.03.2020, https://www.ionos.de/digitalguide/websites/web-entwicklung/was-ist-websocket/ (zuletzt abgerufen 27.06.2023)

IPTV-Anbieter.info: "Alice TV" via IPTV - mehr zur Einstellung des Angebotes, Hintergründe zur Schließung des IPTV-Angebotes von Alice/O2 [Blog], https://www.iptv-anbieter.info/iptv-provider/alice-hometv-iptv.html (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

ITU (1988): ITU-T Recommendation G.711 (11/1988), Pulse code modulation (PCM) of voice frequencies, GENERAL ASPECTS OF DIGITAL TRANSMISSION SYSTEMS, TERMINAL EQUIPMENTS (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

ITU (1994): ITU-T Recommendation X.200 (07/1994), Information technology – Open Systems Interconnection – Basic Reference Model: The basic model (abgerufen 30.06.2023)ITU (1999): ITU G.109 (09/1999), Definition of categories of speech transmission quality, SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS, International telephone connections and circuits – General definitions (zuletzt abgerufen: 05.07.2023)

ITU (2001): ITU-T G.1010 (11/2001), End-user multimedia QoS categories, SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS, Quality of service and performance (zuletzt abgerufen: 27.06.2023)

ITU (2003a): ITU-T G.114 (05/2003), One-way transmission time, SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS, International telephone connections and circuits – General Recommendations on the transmission quality for an entire international telephone connection, (zuletzt abgerufen: 27.06.2023)

ITU (2003b): ITU-T Rec G.108, Amendment 1 (09/2003), Application of the E-model: A planning guide, Amendment 1: New Appendix I – The relationship between and interaction of talker echo and absolute delay, SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS International telephone connections and circuits – General definitions (zuletzt abgerufen: 05.07.2023)

ITU (2004): ITU-T Rec G.108, Amendment 2 (03/2004), Application of the E-model: A planning guide, Amendment 2: New Appendix II – Planning examples regarding delay in packet-based networks, SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS International telephone connections and circuits – General definitions (zuletzt abgerufen: 05.07.2023)

ITU (2007): ITU-T E.Recommendation E.802 (02/2007), Framework and methodologies for the determination and application of QoS parameters, SERIES E: OVERALL NETWORK OPERATION, TELEPHONE SERVICE, SERVICE OPERATION AND HUMAN FACTORS Quality of telecommunication services: concepts, models, objectives and dependability planning – Terms and definitions related to the quality of telecommunication services (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

ITU (2008): ITU-T E.800 (09/2008), Definitions of terms related to quality of service, SERIES E: OVERALL NETWORK OPERATION, TELEPHONE SERVICE, SERVICE OPERATION AND HUMAN FACTORS, Quality of telecommunication services: concepts, models, objectives and dependability planning – Terms and definitions related to the quality of telecommunication services (zuletzt abgerufen: 27.06.2023)

ITU (2008, 2009, 2011): E.800, Definitions of terms related to quality of service (zuletzt abgerufen am 20.11.2023)

ITU (2010): ITU-T Y.2613, General technical architecture for public packet telecommunication data network (zuletzt abgerufen am 20.11.2023)

ITU (2011): ITU-T Y.1541 (12/2011), Network performance objectives for IP-based services, SERIES Y: GLOBAL INFORMATION INFRASTRUCTURE, INTERNET PROTOCOL ASPECTS AND NEXT-GENERATION NETWORKS, Internet protocol aspects – Quality of service and network performance (zuletzt abgerufen: 27.06.2023)

ITU (2012): ITU-T P.1201 (10/2012), Parametric non-intrusive assessment of audiovisual media streaming quality, SERIES P: TERMINALS AND SUBJECTIVE AND OBJECTIVE ASSESSMENT METHODS, Models and tools for quality assessment of streamed, media, (zuletzt abgerufen 06.07.2023)

ITU (2014): ITU-T Rec. G.107 (06/2015), The E-model: a computational model for use in transmission planning, SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS, International telephone connections and circuits – Transmission planning and the E-model (zuletzt abgerufen: 24.08.2023)

ITU (2016): ITU-T Y.2617 (06/2016), Quality of service guaranteed mechanisms and performance model for public packet telecommunication data networks, SERIES Y: GLOBAL INFORMATION INFRASTRUCTURE, INTERNET PROTOCOL ASPECTS AND NEXT-GENERATION NETWORKS, INTERNET OF THINGS AND SMART CITIES, Next Generation Networks – Packet-based Networks (zuletzt abgerufen: 27.06.2023)

ITU (2017): ITU-T Rec. P.1203 (10/2017), Parametric bitstream-based quality assessment of progressive download and adaptive audiovisual streaming services over reliable transport, SERIES P: TELEPHONE TRANSMISSION QUALITY, TELEPHONE INSTALLATIONS, LOCAL LINE NETWORKS, Models and tools for quality assessment of streamed media (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

ITU (2018): ITU-T E.802 (02/2007)/Amd.2 (06/2018), Framework and methodologies for the determination and application of QoS parameters, Amendment 2, SERIES E: OVERALL NETWORK OPERATION, TELEPHONE SERVICE, SERVICE OPERATION AND HUMAN FACTORS, Quality of telecommunication services: concepts, models, objectives and dependability planning – Terms and definitions related to the quality of telecommunication services (zuletzt abgerufen: 27.06.2023)

ITU (2019): ITU-T P.10/G.100 (11/2017)/Amd.1 (06/2019), Vocabulary for performance, quality of service and quality of experience, Amendment 1, SERIES P: TELEPHONE TRANSMISSION QUALITY, TELEPHONE INSTALLATIONS, LOCAL LINE NETWORKS, Vocabulary and effects of transmission parameters on customer opinion of transmission quality, SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS, International telephone connections and circuits – Transmission planning and the E-model (zuletzt abgerufen: 06.07:2023)

ITU (2021): ITU-T E-Series Supplement 9 (10/2021), ITU-T E.800-series – Guidelines on regulatory aspects of QoS, SERIES E: OVERALL NETWORK OPERATION, TELEPHONE SERVICE, SERVICE OPERATION AND HUMAN FACTORS (zuletzt abgerufen: 27.06.2023)

Jäger, T. F. (2010): Redundancy and reduction: Speakers manage syntactic information density, Cogn Psychol. 2010 August ; 61(1): 23–62. doi:10.1016/j.cogpsych.2010.02.002

Janevski, T. (2015): QoS/QoE frameworks for converged services and applications "New Issues in Quality of Service Measuring and Monitoring www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/Europe/Documents/Events/2015/11%20QoS/QoS%20Workshop%20-%20Day%202%20-%20Session%201%20new.pdf

Juluri et al. (2015): Measurement of Quality of Experience of Video-on-Demand Services: A Survey, IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 1, Firstquarter 2016, pp. 401-418, Date of Publication February 2015

Juniper (2022): Understanding CoS Explicit Congestion Notification [Blog], 13-Dec-22, https://www.juniper.net/documentation/us/en/software/junos/cos/topics/concept/cos-qfx-series-explicit-congestion-notification-understanding.html (zuletzt abgerufen: 26.06.2023)

Kanagarathinam, M. et.al. (2022): Enhanced QUIC Protocol for transferring Time-Sensitive Data, in: 2022 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Seoul, Korea, Republic of, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCWorkshops53468.2022.9882167

Klusaitė, L. (2021): TCP vs. UDP – die beiden Protokolle im Vergleich [Blog], Apr 05,2021, https://nordvpn.com/de/blog/tcp-vs-udp/ (zuletzt abgerufen: 26.06.2023)

Kowalik, K. / Andruloniw, P. / Partyka, B. / Zwierzykowski, P. (2022): Telecom Operator's Approach to QoE, Journal of Telecommunications and Information Technology 2/2022

Kuipers et al. (2010): Techniques for Measuring Quality of Experience, in: Osipov, E. et al. (eds) Wired/Wireless Internet Communications, Proceedings WWIC 2010, LNCS 6074, pp. 216–227, Springer, Berlin, Heidelberg 2010, https://doi.org/10.1007/978-3-642-13315-2_18

Kulenkampff, G. (2000): Der Markt für Internet Telefonie - Rahmenbedingungen, Unternehmensstrategien und Marktentwicklung (Nr. 206), WIK Diskussionsbeitrag Nr. 206, Bad Honnef, 2000

Langley et al. (2017): The QUIC Transport Protocol: Design and Internet-Scale Deployment. Proceedings ACM SIGCOMM, August 2017, https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3098822.3098842 (zuletzt abgerufen: 04.07.2023)

Linphone (2017): Introduction to our new RTP adaptive jitter buffer algorithm Primary tabs, Mar 30, 2017, News [Blog], https://www.linphone.org/news/introduction-our-new-rtp-adaptive-jitter-buffer-algorithm (zuletzt abgerufen: 26.06.2023)

Linux (2005): Best Effort Definition, The Linux Information Project (LINFO), http://www.linfo.org/best_effort.html (zuletzt abgerufen: 04.07.2023)

Lückerath, T. (2022): Arnim Butzen über die Magenta TV-Pläne der Telekom, Telekom-TV-Chef im DWDL.de-Interview, DWDL.de, 30.06.2022, https://www.dwdl.de/interviews/88560/arnim_butzen_ueber_die_magenta_tvplaene_der_telekom/ (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Ludwig, R. / Katz, R. H. (2000): The Eifel Algorithm: Making TCP Robust Against Spurious Retransmissions. Proc. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Volume 30, Issue 1, January 2000, pp 30–36, https://doi.org/10.1145/505688.505692 (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Mccauley, J. / Shenker, S. / Varghese, G. (2023): Extracting the Essential Simplicity of the Internet. Communications of the ACM3, Vol. 66 No. 2,

McDonald, N. (2022): What is QoE? A Look at Subscriber Quality of Experience for ISPs [Blog], Preseem, April 7, 2022, https://preseem.com/2022/04/what-is-qoe/ (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Microsoft (2015): Lync Server 2013, Networking Guide v2.3, update published June 2015, https://www.microsoft.com/en-gb/download/details.aspx?id=39084 (zuletzt abgerufen 04.07.2023)

Microsoft (2021): Media Quality and Network Connectivity Performance in Microsoft Teams, Article [Blog] 26.08.0221: https://docs.microsoft.com/en-us/skypeforbusiness/optimizing-your-network/media-quality-and-network-connectivity-performance (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Mo, T. / Hines, A. (2019): Jitter buffer compensation in Voice over IP quality estimation

Myamoto, et al (2019): Ultrahigh-speed Transmission Technology for Future High-capacity Transport Networks, NTT Technical Review 11, Vol. 17, No. 5, May 2019, https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr201905fa1_s.html (zuletzt abgerufen: 19.05.2023)

Netflix: Netflix in HD-Videoqualität streamen, Hilfe Center [Blog], https://help.netflix.com/de/node/11559 (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Netflix: Open Connect [Internet], https://openconnect.netflix.com/en/ (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Obiodu, E. / Sastry, N. (2020): From ATM to MPLS and QCI: The Evolution of Differentiated QoS Standards and Implications for 5G Network Slicing, in *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 4, no. 2, pp. 14-21, June 2020, doi: 10.1109/MCOMSTD.001.1800041

Opus: Opus Interactive Audio Codec [Internet], https://opus-codec.org (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Papke, R. (2013): Sprachverstehen im Störgeräusch und Lokalisationsfähigkeit Normalhörender in Abhängigkeit vom Lebensalter, Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Medizinischen Fakultät der Julius-Maximilian-Universität Würzburg

Paulsen, S. (2015): QoS/QoE-Modelle für den Dienst Voice over IP (VoIP), Dissertation Universität Hamburg, https://ediss.sub.uni-hamburg.de/bitstream/ediss/6749/1/Dissertation.pdf (zuletzt abgerufen 26.06.2023)

RFC (1997) 2198: RTP Payload for Redundant Audio Data, September 1997, https://www.rfc-editor.org/rfc/pdfrfc/rfc2198.txt.pdf (zuletzt abgerufen: 26.06.2023)

RFC (2001)3168: The Addition of Explicit Congestion Notification (ECN) to IP, September 2001, https://www.rfc-editor.org/rfc/pdfrfc/rfc3168.txt.pdf (zuletzt abgerufen: 26.06.2023)

RFC (2002) 3393: IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM), November 2002, https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc3393 (zuletzt abgerufen: 26.06.2023)

RFC (2003a) 3550: RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications, July 2003, https://www.rfc-editor.org/rfc/pdfrfc/rfc3550.txt.pdf (zuletzt abgerufen: 26.06.2023)

RFC (2003b): 3522: The Eifel Detection Algorithm for TCP (zuletzt abgerufen am 20.11.2023)

RFC (2005): 4138: Forward RTO-Recovery (F-RTO): An Algorithm for Detecting Spurious Retransmission Timeouts with TCP and the Stream Control Transmission Protocol (SCTP) (zuletzt abgerufen am 20.11.2023

RFC (2006) 4737: Packet Reordering Metrics, November 2006, https://www.rfc-editor.org/rfc/pdfrfc/rfc4737.txt.pdf (zuletzt abgerufen: 26.06.2023)

RFC (2009): 5681: TCP Congestion Control (zuletzt abgerufen am 20.11.2023)

RFC (2012a) 6716: Definition of the Opus Audio Codec, Internet Engineering Task Force, September 2012, https://tools.ietf.org/html/rfc6716 (zuletzt abgerufen: 05.07:2023)

RFC (2012b) 6683: Guidelines for Implementing Digital Video Broadcasting - IPTV (DVB-IPTV) Application-Layer Hybrid Forward Error Correction (FEC) Protection, August 2012, https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6683 (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

RFC (2015) 7567: IETF Recommendations Regarding Active Queue Management, July 2015, https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7567 (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

RFC (2017): 8087: RTP Payload for Redundant Audio Data (zuletzt abgerufen am 20.11.2023)

Richardson, I. E. (2004): H.264 and MPEG-4 Video Compression: Video Coding for Next-generation Multimedia, John Wiley & Sons, 06.02.2004

Riley, M., Richardson, I. (1996): Reed-Solomon Codes an introduction to Reed-Solomon codes: principles, architecture and implementation, https://www.cs.cmu.edu/~guyb/realworld/reedsolomon/reed_solomon_codes.html (zuletzt abgerufen: 25.08.2023)

Schatz, R. / Hossfeld, T. / Janowski, J. / Egger-Lampl, S. (2013): From Packets to People: Quality of Experience as a New Measurement Challenge, Proc. of Data Traffic Monitoring and Analysis, Part of the Lecture Notes in Computer Science Book (LNCS) book series, volume 7754, pp. 219–263, January 2013

Sharma, A. (2023): How to Change Amazon Prime Video Streaming Quality on Any Device [Blog], Guiding Tech, February 23, 2023, https://www.guidingtech.com/how-to-change-amazon-prime-video-quality/ (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Jalendry, S. , Verma, S. (2015): A Detail Review on Voice over Internet Protocol (VoIP), International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), V23(4),161-166 May 2015

Soothar, K. K. et. al. (2019): Implementation of Multiprotocol Label Switching VPN over IPv6, IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, Vol.19 No.12, December 2019, http://paper.ijcsns.org/07_book/201912/20191220.pdf (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Spotify: Audioqualität, Hilfe zur App [Blog], https://support.spotify.com/de/article/audio-quality/ (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Stallings, W. (2007): Data and Computer Communications 8th edition 2007 Pearson Education, Inc.

Telekommunikationsgesetz (2021)

Thinh, P. H. et al (2019): A Hybrid of Adaptation and Dynamic Routing based on SDN for Improving QoE in HTTP Adaptive VBR Video Streaming, IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.19 No.7, July 2019, http://paper.ijcsns.org/07_book/201907/20190708.pdf (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Thombre, S. (2018): Network Jitter Analysis with varying TCP for Internet Communications, 3rd International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Pune, India, 2018, pp. 1-7, doi: 10.1109/I2CT.2018.8529816. https://ieeexplore.ieee.org/document/8529816 (zuletzt abgerufen: 11.08.2023)

TÜV-Rheinland (2017): European Broadband Mapping Project [Internet], http://www.broadband-mapping.eu (zuletzt abgerufen: 11.05.2023)

Van Jacobson (1988): Congestion Avoidance and Control, ACM SIGCOMM 1988: Symposium proceedings on Communications architectures and protocols, August 1988, https://doi.org/10.1145/52324.52356 (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Varian, H. (2011): Grundzüge der Mikroökonomik, 8., überarbeitete und verbesserte Auflage, München

Verizon (a): Verizon VoIP Voice Quality Service Level Agreement [Internet], https://www.verizon.com/business/terms/voipsla/voicequality/ (zuletzt abgerufen: 19.05.2023)

Verizon (b): IP Latency Statistics [Internet], https://www.verizon.com/business/terms/latency.html (zuletzt abgerufen: 26.06.2023)

Volksbank Dreiländereck (2009): Technische Voraussetzungen für das Online-Banking der VB3, https://www.vb3.de/content/dam/f0213-0/Downloads/Online-Banking/Browsereinstellungen/Die%20wichtigsten%20Vorraussetzungen%20und%20Hinweise%20f%C3%BCrs%20Online-Banking.pdf (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Wang, Z. / Bovik, A. C. / Sheikh, H. R. / Simoncelli, E. P. (2004): Image quality assessment: from error visibility to structural similarity, in IEEE Transactions on Image Processing, vol. 13, no. 4, pp. 600–612, April 2004, doi: 10.1109/TIP.2003.819861

WBS Training: Lernen von zu Hause, https://www.wbstraining.de/lernen-von-zu-hause/ (zuletzt abgerufen: 06.07.2023).

weblogographic.com (2023): Unterschied zwischen Bandbreite und Datenrate, Zuhause–Technologie, [Blog], Juli 2023, https://weblogographic.com/difference-between-bandwidth-and-data-rate-1530 (zuletzt abgerufen 23.06.2023)

Wikipedia (2023): Packet loss concealment [Internet], last edited on 17 June 2023, https://en.wikipedia.org/wiki/Packet_loss_concealment (zuletzt abgerufen 06.07.2023)

wik-zafaco-Gutachten (2021): Gutachten Mindestanforderungen Internetzugangsdienst, Kulenkampff, G. et al, im Auftrag der Bundesnetzagentur, Bad Honnef, 15. Dezember 2021, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Grundversorgung/Gutachten_WIK_zafaco_Mindestanforderungen.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (zuletzt abgerufen: 26.06.2023)

Williams, L. (2023): TCP/IP vs OSI Model – Differences between Them, (Blog) https://www.guru99.com/difference-tcp-ip-vs-osi-model.html (zuletzt abgerufen: 04.07.2023)

Wowza Media Systems (2020): What Is Low Latency and Who Needs It? (Update) [Blog], September 9, 2022, https://www.wowza.com/blog/what-is-low-latency-and-who-needs-it (zuletzt abgerufen: 26.062023)

Wowza Media Systems (2022): CBR vs VBR: Difference between Constant Bitrate and Variable Bitrate (Update) [Blog], October 31, 2022, https://www.wowza.com/blog/cbr-vs-vbr (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Xiao, X. (2008): Technical, Commercial and Regulatory Challenges of QoS – An Internet Service Model Perspective, Elsevier

Youtube: Qualität von Videos ändern [Blog], https://support.google.com/youtube/answer/91449?hl=de&co=GENIE.Platform%3DAndroid (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Yu, J. / Al Ajarmeh, I. H. (2007): Call Admission Control and Traffic Engineering of VoIP, in Proceedings of the Second IEEE International Conference on Digital Telecommunications (ICDT 2007), San Jose, CA, USA, 2007

Yue, T., Wang, H., Cheng, S. (2018): Learning from users: a data-driven method of QoE evaluation for Internet video. Multimed Tools Appl 77, 27269–27300. https://doi.org/10.1007/s11042-018-5918-4 (zuletzt abgerufen: 12.08.2023).

Zelleke, L. (2023): What is QoS in networking? Plus how to monitor QoS [Blog], comparitech, March 6, 2023, https://www.comparitech.com/net-admin/what-is-qos/ (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Zoom (2023): Accessing meeting and phone statistics, last updated April 20, 2023, https://support.zoom.us/hc/en-us/articles/202920719-Meeting-and-phone-statistics (zuletzt abgerufen: 06.07.2023)

Zuloaga, G. / Plückebaum, T. (2022). In-Building Telecommunications Infrastructure. WIK Working Paper No. 5, Bad Honnef. December 2022, https://www.wik.org/fileadmin/files/_migrated/news_files/WIK_Working_Paper_No5_In-Building-Telecommunications-Infrastructure.pdf