

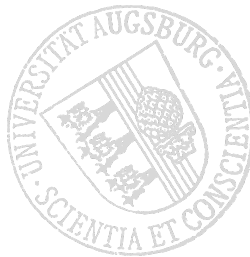
Seminar  
*Software Engineering für verteilte Systeme*  
Sommersemester 2022

# Bewertung der Quality of Experience von Videostreaming auf Basis von Netzwerkverkehr

???  
Matrikelnummer: ???  
???

Betreuer: Sven Beckmann  
Softwaremethodik für verteilte Systeme (Prof. Bauer)  
Universität Augsburg

**Zusammenfassung** Aufgrund stark ansteigender Datenmengen haben Anbieter von Videostreaming zunehmend Schwierigkeiten, qualitativ hochwertigen Service anzubieten. Entsprechend wichtig ist eine Evaluation der Quality of Experience (QoE), die in Verbindung mit der Quality of Service (QoS) steht und sich durch Metriken quantifizieren lässt. Zur Reduzierung der Datenmengen erscheint eine Umstellung der Erfassung dieser Metriken im Bereich von Videostreaming auf passives Monitoring sinnvoll. Diese Arbeit verschafft im Wesentlichen einen Überblick, inwieweit dies trotz zunehmender Verbreitung von Ende-zu-Ende Verschlüsselung beim Videostreaming möglich ist, zeigt auf, welche Metriken, Ansätze und Modelle hierfür existieren und geht auf deren Anwendungsmöglichkeiten und Limitationen ein.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Metriken der Qualitätsmessung im Bereich Videostreaming</b>	<b>1</b>
2.1	Quality of Service (QoS) . . . . .	1
2.2	Quality of Experience (QoE) . . . . .	2
2.2.1	Direkte QoE Metriken . . . . .	2
2.2.2	Indirekte QoE Metriken . . . . .	3
2.3	Zusammenhang QoE und QoS . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Bewertung der Quality of Experience von Videostreaming auf Basis von Netzwerkverkehr - Existierende Ansätze, Herausforderungen und Limitationen</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>8</b>
	<b>Literatur</b>	<b>9</b>

# 1 Einleitung und Motivation

In den letzten Jahren hat die Nachfrage sowohl für den Download als auch für Streaming von Videos enorm zugenommen. Gerade auch durch die Corona Pandemie hat sich hier ein explosionsartiger Anstieg ergeben, da die Ausbreitung des Virus in etlichen Regionen der Welt durch soziale Isolation hinausgezögert werden sollte. In der Folge bestand der Arbeitsalltag vielerorts aus Videokonferenzen im Rahmen von Home Office gefolgt von Livestreams und On-Demand Videos zur Bildung oder zur abendlichen Unterhaltung. Für die Netzbetreiber und Streamingdienste bedeutete dies teilweise bis heute phasenweise maximale Auslastung, sodass neben einer besseren Netzwerkzuweisung vor allem auch die Reduzierung des Datenverkehrs angestrebt wird. Einen Beitrag hierzu könnte der Umstieg auf passives Monitoring im Bereich der Bewertung der Quality of Experience von Videostreaming leisten. Statt hierfür durch aktives Monitoring zusätzliche Datenmengen zu verursachen, könnte lediglich der durch einen Videostream entstehende Netzwerkverkehr analysiert werden. Nachdem heutzutage aber nahezu alle Streaming Plattformen aufgrund von Vorgaben hinsichtlich der Privatsphäre der Nutzer ihre Inhalte Ende-zu-Ende verschlüsselt übertragen, stellt dieses Unterfangen durchaus eine Herausforderung dar.

Diese Arbeit setzt an diesem Punkt an und zeigt nach einer Vorstellung verschiedener Metriken zur Qualitätsmessung im Bereich Videostreaming (Kapitel 2) diverse existierende Ansätze für die Bewertung der Quality of Experience von Videostreaming anhand des Netzwerkverkehrs, deren Herausforderungen und Limitationen (Kapitel 3) auf. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung in Verbindung mit einem Ausblick im Rahmen von Kapitel 4.

## 2 Metriken der Qualitätsmessung im Bereich Videostreaming

Durch Metriken ist grundsätzlich definiert, welche Größen in welcher Form und zu welchem Zeitpunkt gemessen und ins Verhältnis gesetzt werden müssen, um eine Aussage über den Zustand eines Systems treffen zu können [1, S. 4]. Zur Untersuchung der Zufriedenheit eines Nutzers mit einer in Anspruch genommenen Dienstleistung im Internet lässt sich zwischen Quality of Service (QoS) und Quality of Experience (QoE) Metriken unterscheiden. Da diese speziell im Bereich des Videostreamings häufig vermischt werden, erfolgt nachfolgend zunächst eine Vorstellung beider Bereiche und der jeweiligen Metriken gefolgt von deren Gemeinsamkeiten bzw. Überlagerungen.

### 2.1 Quality of Service (QoS)

Der Term QoS beschreibt hierbei die Gesamtleistung eines Streamingdienstes oder -netzwerks und all jener Faktoren, die Aussagen über die Qualität der Performance jeder einzelnen Komponente der Vorbereitung, Erzeugung, Verarbeitung, Bereitstellung und Übertragung der Videos in einem Netzwerk ermöglichen [2, S. 8]. Um hierbei genau

feststellen zu können, wie gut die einzelnen Abschnitte funktionieren, wurden Metriken entwickelt, die über jeden Part Aussagen ermöglichen. Die **wichtigsten Metriken** sind hierbei wie folgt:

- **Verfügbarkeit**: Unter Verfügbarkeit wird im Rahmen von QoS das Verhältnis der Anzahl an Anfragen mit erfolgreichen Antworten zu allen Anfragen zusammengefasst. [2, S. 15]
- **Durchsatz**: Der Durchsatz ist die verfügbare Bandbreite innerhalb eines Netzwerks für die Zustellung von Videoinhalten. Er sollte groß genug sein, um den durch den Nutzer angeforderten Inhalt in der gewünschten Qualität übertragen zu können. [2, S. 15]
- **Übertragungsverzögerung**: Damit wird die Verzögerung der Übertragung der Antwort bei einer Ende-zu-Ende Anfrage innerhalb der Komponentenkette des Service Providers bezeichnet. [2, S. 15]
- **Jitter**: Der Begriff Jitter beschreibt die Verzögerungsvariation zwischen aufeinanderfolgenden Paketen in einem Datenstream. Tritt besonders starker Jitter auf, kann es zu Problemen mit dem Puffer, dem Zwischenspeicher von Daten kommen, sodass Datenpakete dort an falscher Stelle eingereicht werden oder verloren gehen. In der Anwendungsschicht kann dieser auf Kosten zusätzlicher Verzögerung geglättet werden, um so eine Minderung der Videoqualität zu verringern. [3, S. 3]

## 2.2 Quality of Experience (QoE)

Die Quality of Experience (QoE) untersucht die Zufriedenheit eines Nutzers mit einem **benutzen System**. Je nach persönlicher Wahrnehmung unterscheidet sich die QoE von Nutzer zu Nutzer. Im Rahmen diverser Forschungsprojekte fand eine Objektivierung dieser individuell, subjektiv wahrgenommenen QoE Faktoren statt, um diese auf einer quantitativen Ebene vergleichen zu können. Zur Qualitätsanalyse von Internetvideostreaming haben sich dabei direkte und indirekte Metriken herauskristallisiert, die sowohl der Bildverarbeitung als auch der Audioanalyse entstammen und in Kombination eine final berechnete Bewertung der Qualität ermöglichen.

### 2.2.1 Direkte QoE Metriken

Unter dem Begriff direkte Metriken finden sämtliche Faktoren Berücksichtigung, die direkten Einfluss auf die durch einen Nutzer wahrgenommene Qualität der Medienwiedergabe haben. Dies kann beispielsweise die Audio- oder Videoqualität betreffen [3, S. 5]. Grundsätzlich können diese von verschiedenen Daten und Datenschichten entstammen und sind daher von großer Vielfalt. Die wichtigsten direkten Metriken im Bereich des Internetvideostreaming sind wie folgt:

- Spitzen-Signal-Rausch-Verhältnis (PSNR von engl. Peak-Signal-to-Noise-Ratio): Die PSNR ist ein qualitatives Maß und beschreibt das Verhältnis zwischen einem

ursprünglichen Nutzsignal, welches zur Übertragung komprimiert wird, und der Verfälschung der Darstellung durch Rauschen nach Dekomprimierung auf Seite des Empfängers. Es wird also ein unkomprimiertes und rauschfreies Bild als Referenz verwendet, weshalb man bei Metriken dieser Art von Metriken mit vollständiger Referenz spricht. Zur Berechnung dieses Maßes wird der mittlere quadratische Fehler (MSE von engl. Mean Squared Error) für jeden Pixel zwischen einem Originalbild und dem letztlich empfangenen und dargestellten Bild berechnet. Sind die Pixel beider Bilder hierbei nahezu identisch, liegt kaum Rauschen vor und das Spitzen-Signal-Rausch-Verhältnis fällt in der Folge sehr hoch aus. [3, S. 5]

- **Strukturelle Ähnlichkeit (SSIM von engl. Structural Similarity):** Die SSIM stellt eine Erweiterung der PSNR durch weitere Faktoren dar, die die Videoqualität beeinflussen und vom menschlichen Auge wahrgenommen werden können. Hierbei werden Luminanz, Kontrast und strukturelle Ähnlichkeit kombiniert, um das Originalbild und das empfangene Bild zu vergleichen. Es handelt sich daher auch um eine Metrik mit vollständiger Referenz. [3, S. 5]
- **Video-Qualitäts-Metrik (VQM):** Wie die beiden zuvor beschriebenen Metriken basiert auch die VQM auf einem Vergleich des ursprünglichen mit dem empfangenen Bild und ist somit eine Metrik vollständiger Referenz. Hierbei werden auf den Bildern wahrnehmbare Artefakte, verschwommene Bereiche, globales Rauschen und Block- bzw. Farbverzerrungen gemessen. [3, S. 5]
- **Mean Opinion Score (MOS):** Der MOS ist in seiner ursprünglichen Form ein numerisches Maß für die Qualität der Übertragung von Audiostreams und berücksichtigt neben Verzögerungen und Jitter auch den verwendeten Codec und Paketverlust, jeweils auf Anwendungsebene. Immer häufiger werden auch Erweiterungen des MOS verwendet, bei denen beispielsweise auch der PSNR miteinfließt. [3, S. 6]

### 2.2.2 Indirekte QoE Metriken

Der Term indirekte Metriken fasst die Faktoren zusammen, die zwar die Medienwiedergabe beeinflussen, aber nicht direkt im Zusammenhang mit der Qualität des Inhalts stehen. Sie hängen sehr davon ab, welche Art von Inhalt angefordert beziehungsweise übertragen wird und sind dabei nicht nur anhand des Netzwerkverkehrs auszumachen, da häufig Laufzeitinformationen benötigt werden. Nachfolgend sollen ausgewählte indirekte Metriken vorgestellt werden, von denen aufgrund der expandierenden Natur des Videostreamings erwartet wird, dass sie zukünftig an Relevanz gewinnen werden, wenn gleich sie bislang im Bereich der Netzwerkforschung noch nicht im Zentrum der Untersuchungen standen. [3, S. 6]

- **Startzeit:** Die Metrik Startzeit beschreibt die Zeitspanne, die zwischen der Anfrage eines Nutzers für einen gewünschten Medieninhalts und der tatsächlichen Wiedergabe vergeht. [3, S. 6]

- **Systemantwortzeit:** Damit wird der Zeitraum zwischen dem Befehl oder der Aktion eines Nutzers und der Antwort des Systems beispielsweise beim Pausieren eines Videos ausgedrückt. Im Bereich von Videokonferenzen kann diese indirekte Metrik hergenommen werden, um zu bestimmen, inwieweit von einem flüssigen und interaktiven Austausch zwischen den einzelnen Teilnehmern gesprochen werden kann. [3, S. 6]
- **Übermittlungssynchronisierung:** Diese Metrik stellt dar, wie synchron das von einem Teilnehmer eingespeiste Signal bei allen anderen Teilnehmern ankommt. Das Ziel hierbei ist es, alle Mitglieder eines Meetings auf denselben Stand innerhalb eines Konversationsverlauf zu bringen und somit eine akkurate Simulation eines persönlichen Gesprächs zu ermöglichen. [3, S. 6]
- **Aktualität:** Mit Aktualität ist die Zeitspanne zwischen Contenterstellung und Ankunft bei den Nutzern gemeint. Gerade bei Videostreaming von Live Events oder Sport ist eine möglichst geringe Zahl für diese Metrik enorm wichtig, um dem Nutzer das Gefühl zu geben, tatsächlich dabei zu sein. Weiterhin werden durch Aktualitätszahlen im niedrigen Millisekundenbereich (je nach Teilnehmerzahl beziehungsweise Relevanz in Verbindung mit der zuletzt vorgestellten Übermittlungssynchronisierung) grundsätzlich überhaupt flüssige Konversationen über das Internet möglich. [3, S. 6–7]
- **Puffern (Buffering):** Der Begriff Puffern bezeichnet im Bereich des Internetvideostreamings das beim Empfänger auftretende Ruckeln bei der Medienwiedergabe in Form von kurzen Standbildern, das durch leere Zwischenspeicher ausgelöst wird. Ist die Verbindung zum Internet stabil genug und bietet diese genug Durchsatz, so sind diese Zwischenspeicher stets bereits mit dem Content einiger darauffolgender Frames gefüllt. Kommt es allerdings zu Unterbrechungen, die über die Dauer des vorausgeladenen Medieninhalts hinausgehen, oder wird eine Qualität angefordert, die den Durchsatzrahmen sprengt, so werden die Zwischenspeicher schneller geleert als sie befüllt werden können und das hier beschriebene Puffern tritt ein. [3, S. 7]

## 2.3 Zusammenhang QoE und QoS

Die eben vorgestellten Metriken für Quality of Service und Quality of Experience von Videostreaming sind in der Realität oftmals schwer zu unterscheiden, da sie sich zum einen teilweise überschneiden und zum anderen beispielsweise zur Reduzierung reservierter Ressourcen auch am effektivsten kombiniert eingesetzt werden. In der Folge finden sich in der Literatur manche Metriken auch dem jeweils anderen Teilbereich zugeordnet, was auch daran liegt, dass beide Bereiche ähnliche Charakteristika aufweisen. Es scheint immer mehr zur gängigen Praxis zu werden, die beiden Bereiche nicht weiter zu unterscheiden und diese und deren Metriken stattdessen unter dem Begriff Quality of Performance (QoP) zusammenzufassen. Dies ist exemplarisch in Abbildung 1 dargestellt.

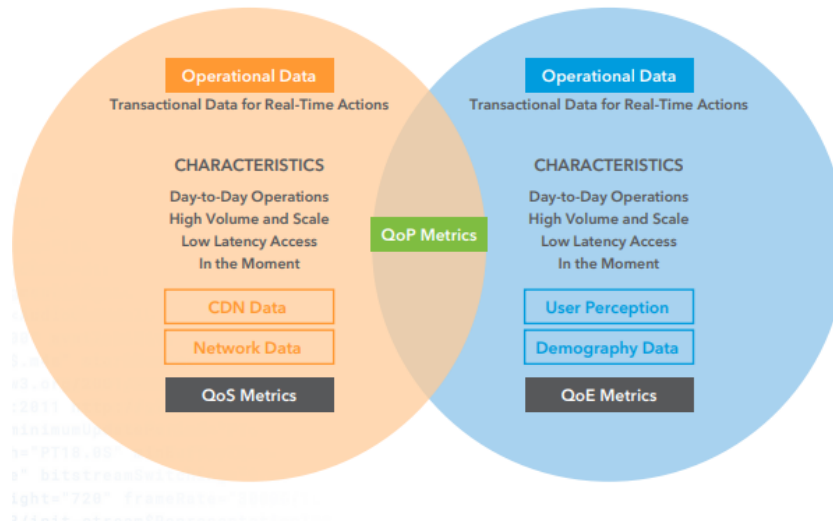


Abbildung 1: Exemplarische Darstellung von QoS, QoE und QoP [2, S. 8]

### 3 Bewertung der Quality of Experience von Videostreaming auf Basis von Netzwerkverkehr - Existierende Ansätze, Herausforderungen und Limitationen

Viele der in Kapitel 2 vorgestellten **Metriken sind aufwendig** in der Durchführung und in der vorausgehenden Beschaffung der dafür notwendigen Datengrundlage. **Diese Daten können in ihrer Gesamtheit oftmals unter anderem wegen Verschlüsselung nur durch aktives Monitoring erfasst werden.** Das bedeutet, es muss zusätzlicher Datenverkehr in das Netzwerk eingespeist werden, der das zu untersuchende Signal initiiert, sodass anhand dessen Verhalten eine Performanceanalyse hinsichtlich eines bestimmten Dienstes für das Netzwerk ermöglicht wird. Üblicherweise findet diese Art des Monitoring allerdings nur für einen Einblick in Echtzeit in einem Netzwerk mit ausreichend Kapazität und wenig Nutzern Anwendung, da durch den zusätzlich entstehenden Netzwerkverkehr in diesem Fall keine Komplikationen auftreten. Doch gerade in Zeiten von Homeoffice und damit verbundenen Videokonferenzen ist eben dies vielerorts problematisch, die Leitungen oft ohnehin schon überlastet. Eine auf aktivem Monitoring basierende Bewertung der Quality of Experience würde hier das Problem nur verschärfen, sodass es wesentlich sinnvoller und interessanter wäre, lediglich den ursprünglichen Netzwerkverkehr von verschlüsselten Daten mithilfe von sogenannten passiven Methoden zu erfassen und auszuwerten. Aufgrund der limitierten Grundlage an Daten hat sich dies lange als eine große Herausforderung ausgezeichnet, mittlerweile existieren aber einige Ansätze. Nachfolgend soll exemplarisch eine Vorstellung ausgewählter bereits existierender Ansätze, deren zugrundeliegende Metriken und der letztlich dennoch verbleibenden Limitationen erfolgen.

- Ein auf maschinellem Lernen und kontrolliertem Experimentieren basierender Ansatz findet sich in [4]. Darin wird mithilfe von passivem Monitoring der verschlüsselte Netzwerkverkehr untersucht, der beim Abspielen von YouTube Videos im Google Chrome Browser unter verschiedenen, durch Linux Traffic Control (TC) emulierten Netzwerkkonditionen entsteht. Die variierten Größen sind hierbei zum Beispiel die Down- und Upload Bandbreite, die Rundreisezeit (RTT von engl. Round Trip Time) eines Datenpakets von der Quelle bis zum Ziel und zurück, Paketverlust und Jitter. Der Netzwerkraum wird auf der Grundlage der Verteilung realer Messungen abgetastet, indem die beiden öffentlichen Datensätze RTR-NetzTest (über 1 Million Elemente) und MobiPerf (40 000 Elemente) anhand des RTT kombiniert werden. Auf Basis der gemessenen Daten werden verschiedene Modelle maschinellen Lernens mit einer Datenaufteilung im Verhältnis von 80:20 auf Training bzw. Validierung trainiert, um Abschätzungen sowohl für den bereits als direkte Metrik vorgestellten Mean Opinion Score (MOS) treffen zu können als auch die indirekte Metrik Startzeit zu bestimmen und Aussagen über die allgemeine Qualität zu formulieren. Je mehr Netzwerkparameter dabei in das Modell eingespeist werden, desto höher fällt die Genauigkeit jeweils aus. So wurden Änderungen in der Qualität während der Videowiedergabe mit einer Genauigkeit von 90,4 %, die Startzeit mit 99,9 %, Buffering mit 63,1 %, die Auflösung des Videos mit 77,3 % und der MOS in einer quantisierten Form mit 73,2 % durch das inputreichste Modell korrekt vorhergesagt. Limitiert ist dieser Ansatz vor allem durch den zugrundeliegenden Datensatz. Dieser wurde lediglich in Google Chrome auf einem Linux System gestützt auf TCP-basierten YouTube Videoflüssen aufgenommen. Eine Vielzahl von Videos wird in der Realität aber über Browser oder Mobilgeräte angefordert und abgespielt. Da der grundsätzliche Ansatz dieses Papers jedoch mit Anpassungen übertragbar ist, könnte dieser zukünftig auch auf anderen Systemen zum Beispiel zur Erstellung größerer Datensätze zum Einsatz kommen.
- Ein Ansatz für die Analyse des mobilen, durch Videostreaming ausgelösten Datenverkehrs findet sich in [5]. Dieser basiert ebenfalls auf maschinellem Lernen in Kombination mit Random Forest Algorithmen und ist vor allem dadurch motiviert, dass ein starker Aufwärtstrend in der Nachfrage nach Videostreaming oder -download über Mobilgeräte erkennbar ist. Wie bereits in Kapitel 1 erwähnt wurde, ist der meiste Netzwerkverkehr verschlüsselt, um die Privatsphäre der Nutzer zu garantieren. So war es auch das Ziel dieses 2016 veröffentlichten Papers, ein Framework zu entwickeln, das es den Service Providern insbesondere ermöglicht, zentrale QoE Metriken für verschlüsselten Netzwerkverkehr zu ermitteln. Ähnlich zu [4] handelt es sich dabei vor allem um Buffering, Auflösung und Qualitätsänderung während der Videowiedergabe. Für die Erstellung des Frameworks wird zunächst ein Datensatz mit Informationen über 390 000 verschiedene unverschlüsselte Videosessions analysiert, die mittels eines Web Proxy auf dem Netzwerk eines Mobile Service Providers gesammelt wurden. Ausgehend von den dadurch gewonnenen Erkenntnissen über die Quality of Experience und die grundsätzliche Videoübermittlung wird dann eine allgemeine Methode für verschlüsselten Netzwerkverkehr



entwickelt, die damit dann auch abschließend validiert wird. Nur durch passives Monitoring werden hierbei Genauigkeiten von 78 bis 93,5 % für die Berechnung der QoE Metriken bei unverschlüsselten und 76 bis 91,8 % bei verschlüsseltem Datenverkehr erreicht.

- Auch [6] thematisiert die Schätzung der Quality of Experience von Internetvideos, in diesem Fall konkret YouTube Videos. Ihr Entwurf basiert auf passivem Monitoring und beinhaltet die Analyse von verschlüsseltem Netzwerkverkehr mithilfe von Modellen maschinellen Lernens auf der Grundlage von Features des Datenverkehrs. Dafür kommt ihr YouQ genanntes System zum Einsatz, das verschiedene Werkzeuge zur Überwachung und Analyse von zentralen Performance Indikatoren auf Anwendungsebene enthält, mit denen die für die Modelle benötigten Daten gesammelt werden können. Wie bei den bereits vorgestellten Ansätzen werden lediglich ausgewählte QoE Metriken wie die gesamte Anzahl an Bufferingevents, deren durchschnittliche Dauer, die Startzeit und die prozentuale Wiedergabezeit auf den verschiedenen Qualitätsstufen berücksichtigt. Damit erfolgt auf Basis von zwei Quantifizierungsfunktionen eine Klassifizierung in hohe, mittlere oder niedrige QoE. Beim Testen mit einer Sammlung von Datensätzen, die lediglich passive Aufzeichnungen des Netzwerkverkehrs von 1060 verschiedenen YouTube Videos über 39 unterschiedliche Netzwerkkapazitätsszenarien enthalten, sind mit diesen drei Klassen Genauigkeiten von bis zu 84 % erreicht worden. Der prozentuale Anteil an korrekten Einschätzungen erreicht sogar 91 %, wenn lediglich zwischen hoher und niedriger Quality of Experience unterschieden wird.
- Bereits 2012 veröffentlichten Schatz et al. mit [7] einen Konferenzartikel, der das passive Monitoring der Quality of Experience aus der Sicht von Internetdiensteanbietern beschreibt. Aufgrund der zunehmenden Konkurrenzsituation in diesem Bereich, die gleichzeitig mehr Auswahlmöglichkeit für den Kunden bedeutet, in Verbindung mit nahezu exponentiell ansteigenden Mengen an Datenverkehr ist es natürlicherweise für Anbieter ein wichtiges Anliegen, auch die Qualität der Nutzererfahrung beim Videoschauen zu berücksichtigen. Im Rahmen dieses Papers sind drei Modelle entstanden, die jeweils auf unterschiedlichen Metriken basieren. So vergleicht M1, der erste der hierbei entwickelten Ansätze, die Zeit für den Download eines gesamten Videos mit der Videolänge, die allerdings problematisch in der Beschaffung ist. Nachdem oftmals Videos auch nicht gänzlich angesehen werden, ist dieses Modell für die meisten Fälle ungeeignet bzw. nicht genau genug. Daher wurde mit M2 ein weiteres Modell entwickelt, das auf der Frequenz von Buffering basiert, welches zum einen anhand von aus dem Netzwerkverkehr extrahierbaren Variablen, aber auch mittels Schätzungen berechnet wird. Da so schon allein aufgrund der Berechnungsformel mit Ungenauigkeiten gerechnet werden muss, ist auch dieser Ansatz kaum anwendbar. Entsprechend wurde mit M3 ein finales, drittes Modell erstellt, welches alle verwendeten Parameter mithilfe von passivem Monitoring entweder direkt aus dem Netzwerkverkehr entnimmt oder auf Basis dessen berechnet. Die Grundidee hierbei ist es, den Status des Videobuffers als

Grundlage für eine Abschätzung der Quality of Experience zu verwenden. Dafür werden die Wiedergabezeiten der Videoframes mit den Zeitstempeln der empfangenen Pakete verglichen. Diese Methode erzeugt höhere Kosten als die vorherigen, da die Größe jedes Videoframes und die Videoframerate aus den Metadaten extrahiert werden müssen. Sie soll dafür aber auch für höhere Genauigkeit bei der Vorhersage von Verzögerungen bei der Wiedergabe und somit bei der Abschätzung der QoE sorgen. Ein Vergleich der geschätzten Verzögerungen mit tatsächlich, während kontrollierter Experimente auftretender Verzögerungen wurde durchgeführt wie in Abbildung 2 zu sehen ist und legt aufgrund hoher Korrelation zwar eine hohe Genauigkeit nahe, welche allerdings im Rahmen dieses Papers nicht weiter evaluiert oder berechnet wurde.

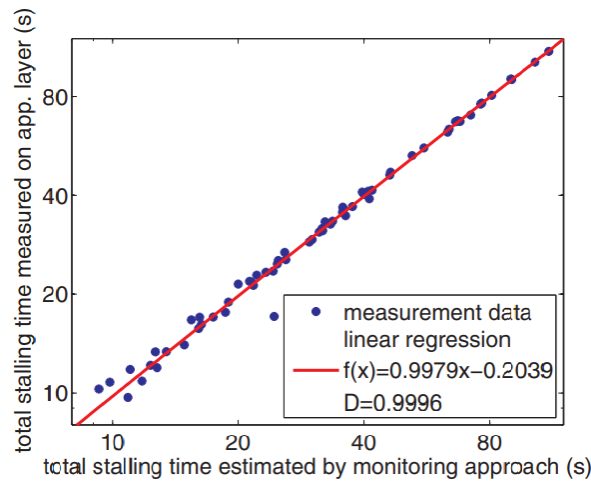


Abbildung 2: Vergleich geschätzter und gemessener Bufferingzeit [7]

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

In einer Zeit rasant zunehmenden Internetverkehrs haben Internet Service Provider damit zu kämpfen, den Nutzern einen qualitativ hochwertigen Service anzubieten. Dies betrifft insbesondere den Bereich des Videostreamings. Um hier die Qualität der Service-nutzung zu quantifizieren, wurden verschiedene Metriken für die Quality of Service (QoS) und die Quality of Experience (QoE) von Videostreaming entwickelt. Die QoS beinhaltet all jene Faktoren, anhand deren die Performance der verschiedenen Komponenten des Streamingservices evaluiert werden. Die Metriken der QoE hingegen versuchen die Zufriedenheit eines Nutzers mit einem Streamingdienst zu quantifizieren und lassen sich in direkte Metriken wie den Mean Opinion Score (MOS) und indirekte Metriken wie Puffern (Buffering) unterteilen. Gerade bei Videostreaming beeinflussen schlechte Qualität bzw. Qualitätsänderungen, Unterbrechungen durch Buffering, Verzerrungen durch Jitter und Paketverlust die Quality of Experience stark negativ, was sich in der Folge auch auf

die Bewertung des dafür zuständigen Betreiber auswirkt. Nachdem die Nutzer heutzutage oftmals die Wahl zwischen verschiedenen Anbietern haben und bei Einschränkungen in der Nutzung diesen dann auch wechseln, existiert eine Konkurrenzsituation, die die Internetdienstanbieter dazu zwingt, eben jene QoE zu untersuchen. Zur Vermeidung zusätzlichen Datenverkehrs wird dafür immer mehr auf passives Monitoring der verschlüsselten Videodatenstreams zurückgegriffen. Um dennoch Informationen über die Quality of Experience extrahieren zu können, wurden verschiedene Systeme entwickelt, die Metriken wie die Startzeit, den Mean Opinion Score (MOS) oder Qualitätsänderungen auch auf Basis von verschlüsseltem Netzwerkdaten vorhersagen bzw. ermitteln können. Sie basieren meist auf maschinellem Lernen und werden anhand der Charakteristika von unverschlüsseltem oder kontrolliert erzeugtem Netzwerkverkehr trainiert. So werden je nach Komplexität des Modells und der zu schätzenden Metriken bereits Genauigkeiten erreicht, die sich zwar immer mehr den 100 % annähern, allerdings häufig noch in Verbindung mit Limitationen wie Gebundenheit auf ein Betriebssystem oder einen Browser verbunden sind. Aufgrund zunehmender Nachfrage von Seiten der Provider für Modelle, die die Bewertung der Quality of Experience von Videostreaming anhand des Netzwerkverkehrs ermöglichen, kann mit Spannung beobachtet werden, wie sich diese in den kommenden Jahren verändern und verbessern werden.

## Literatur

- [1] A. Sowa. „Metrik-Definition und Begriffsabgrenzung“. In: *Metriken-der Schlüssel zum erfolgreichen Security und Compliance Monitoring*. Springer, 2011, S. 3–20. DOI: [10.1007/978-3-8348-8194-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8194-6_2).
- [2] Akamai - *Measuring Video Quality and Performance: Best Practices*. 2020. URL: <https://www.akamai.com/site/en/documents/white-paper/measuring-video-quality-and-performance-best-practices.pdf> (besucht am 20.06.2022).
- [3] R. Serral-Gracià u. a. „An overview of quality of experience measurement challenges for video applications in IP networks“. In: *International Conference on Wired/Wireless Internet Communications*. Springer. 2010, S. 252–263.
- [4] M. J. Khokhar, T. Ehlinger und C. Barakat. „From network traffic measurements to QoE for internet video“. In: *2019 IFIP Networking Conference (IFIP Networking)*. IEEE. 2019, S. 1–9.
- [5] G. Dimopoulos u. a. „Measuring video QoE from encrypted traffic“. In: *Proceedings of the 2016 Internet Measurement Conference*. 2016, S. 513–526. DOI: [10.1145/2987443.2987459](https://doi.org/10.1145/2987443.2987459).
- [6] I. Orsolic u. a. „Youtube QoE estimation based on the analysis of encrypted network traffic using machine learning“. In: *2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. IEEE. 2016, S. 1–6.

- [7] R. Schatz, T. Hoßfeld und P. Casas. „Passive youtube QoE monitoring for ISPs“. In: *2012 Sixth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing*. IEEE. 2012, S. 358–364. DOI: [10.1109/IMIS.2012.12](https://doi.org/10.1109/IMIS.2012.12).

## Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen angefertigt habe, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat.

Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind als solche gekennzeichnet.

Augsburg, 21.06.2022

(???)