**Verbundprojekt**

# QUICSAT

## Neue Protokollentwicklungen für schnelles Internet über Satellit

## Schlussbericht

## FKZ: 50YB2113


| Autoren | Verantwortlichkeit |
|---|---|
| Bernd Jungblut | ND SatCom |
| Michael Weixler | ND SatCom |
| Martin Steindl | ND SatCom |

| Prüfung | |
|---|---|
| Jörg Deutschmann | Projektleiter FAU Erlangen-Nürnberg Informatik 7 |
| Michael Weixler | Projektadministrator ND SatCom |

| Freigabe | |
|---|---|
| Bernd Jungblut | Projektleiter ND SatCom |


Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 50YB2113 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

INHALTSVERZEICHNIS

**1. ZUSAMMENFASSUNG ..... 3**

**1.1 Hintergrund, Ziele und Umfang ..... 3**

**1.2 Literaturverzeichnis ..... 3**

1.2.1 Maßgebliche Dokumente ..... 3
1.2.2 Referenz-Dokumente ..... 3

**1.3 Abkürzungen ..... 5**

**2. HINTERGRUND DES VORHABENS ..... 6**

**3. KURZDARSTELLUNG ..... 8**

**3.1 Aufgabenstellung ..... 8**

**3.2 Voraussetzungen des Projekts ..... 8**

**3.3 Kurzdarstellung der beteiligten Partner ..... 8**

3.3.1 Friedrich-Alexander-Universität (FAU), Lehrstuhl Informatik 7 ..... 8
3.3.2 ND SatCom (NDS) ..... 8

**3.4 Planung und Ablauf ..... 8**

**3.5 Wissenschaftlicher und technischer Stand ..... 9**

3.5.1 Wissenschaftlicher Stand bei SatCom Anforderungen für QUIC ..... 10
3.5.2 Technischer Stand bei SatCom Anforderungen für QUIC über GEO ..... 12

**3.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen ..... 12**

**4. EINGEHENDE DARSTELLUNG ..... 14**

**4.1 Verwendung der Zuwendung mit Gegenüberstellung der Ziele und Ergebnisse ..... 14**

4.1.1 Vergleich NDS Messungen vs. FAU Simulationen ..... 15
4.1.2 Resultate der QUIC über SKYWAN Messungen im NDS Testbed ..... 15
4.1.3 Untersuchungen mit Cysec ARCA SATCOM Geräten im NDS Testbed ..... 15

**4.2 Notwendigkeit und Angemessenheit des Projekts ..... 16**

**4.3 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit ..... 17**

**4.4 Während der Durchführung des Projekts bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen ..... 17**

**4.5 Veröffentlichungen ..... 17**

VERZEICHNIS DER BILDER

Abb. 1: Performance Enhancing Proxy (PEP) zur Realisierung von Split TCP ..... 6
Abb. 2: ARCA SATCOM Lösung mit QUIC VPN Tunnel ..... 7
Abb. 3: Testbed-Elemente bei NDS ..... 9
Abb. 4: QUIC + HTTP/3 im Internet (6 Feb. 2025) ..... 10
Abb. 5: BBRv1, BBRv2 und CUBIC ohne Paketverluste [RD18] ..... 11
Abb. 6: BBRv1, BBRv2 und CUBIC mit Paketverlusten [RD18] ..... 12
Abb. 7: ARCA SATCOM mit TCP-PEP vs. OpenVPN ..... 13
Abb. 8: ARCA SATCOM Gerät ..... 15

VERZEICHNIS DER TABELLEN

Tabelle 1: Maßgebliche Dokumente ..... 3
Tabelle 2: Referenz-Dokumente ..... 4
Tabelle 3: Gegenüberstellung Ziele / Ergebnisse ..... 14

# 1. ZUSAMMENFASSUNG

## 1.1 HINTERGRUND, ZIELE UND UMFANG

Dieses Dokument ist der öffentliche NDS Schlussbericht des QUICSAT Projekts.

In einer Kurzdarstellung wird ein Überblick über die Zielsetzung, die beteiligten Projektpartner, die Planung und den wissenschaftlich-technischen Stand zu Beginn des Projekts gegeben.

In der eingehenden Darstellung werden die erzielten Ergebnisse dargestellt und der Fortschritt bei anderen Stellen diskutiert, auf Notwendigkeit und Angemessenheit des Projekts eingegangen sowie der voraussichtliche Nutzen und die Verwertbarkeit dargestellt.

## 1.2 LITERATURVERZEICHNIS

### *1.2.1 Maßgebliche Dokumente*

Die hier aufgeführten Dokumente sind maßgeblich für dieses Projekt.

| ID | Referenz | Titel |
|---|---|---|
| [AD1] | FKZ 50YB2113 | Zuwendungsbescheid |
| [AD2] | QUICSAT Vorhabenbeschreibung | Vorhabenbeschreibung „QUICSAT“ (16.6.2021) |
| [AD3] | NDS (AP4500) | Änderungsantrag (2.8.2024) |

**Tabelle 1: Maßgebliche Dokumente**

### *1.2.2 Referenz-Dokumente*

Die hier aufgeführten Dokumente sind vertraglich nicht maßgeblich, auf sie wird aber in diesem Bericht Bezug genommen.

| ID | Referenz | Titel |
|---|---|---|
| [RD1] | https://arxiv.org/abs/2202.08228<br>https://interop.cs7.tf.fau.de | QUIC Interop Runner – Satellite Edition |
| [RD2] | https://github.com/quicwg/base-drafts/wiki/Implementations | QUIC Implementations |
| [RD3] | RFC 9002<br>https://datatracker.ietf.org/doc/rfc9002/ | QUIC Loss Detection and Congestion Control |
| [RD4] | RFC 9000<br>https://datatracker.ietf.org/doc/rfc9000/ | QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport |
| [RD5] | https://github.com/private-octopus/picoquic/blob/master/README.md | picoquic |
| [RD6] | https://datatracker.ietf.org/doc/draft-ietf-quic-qlog-quic-events/ | QUIC event definitions for qlog |
| [RD7] | https://datatracker.ietf.org/doc/draft-ietf-quic-qlog-main-schema/ | qlog: Structured Logging for Network Protocols |
| [RD8] | https://github.com/quiclog/qvis | Qvis: A set of QUIC and HTTP/3 visualization tools |

| | | |
|---|---|---|
| [RD9] | https://datatracker.ietf.org/doc/rfc2474/ | Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers |
| [RD10] | | ARCA SATCOM Manual |
| [RD11] | https://quinn-rs.github.io/quinn/quinn.html | QUINN: pure-Rust, async-compatible implementation of the IETF QUIC transport protocol |
| [RD12] | https://www.wireguard.com/performance/ | WireGuard - VPN Performance |
| [RD13] | https://www.ietf.org/archive/id/draft-ietf-ccwg-rfc5033bis-03.html | IETF Workgroup CCWG - Specifying New Congestion Control Algorithms |
| [RD14] | https://ncs.uclouvain.be/assets/pdf/michel-phd.pdf | François Michel<br>Flexible QUIC loss recovery mechanisms for latency-sensitive applications, Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor in Applied Sciences, October 2023 |
| [RD15] | https://dl.acm.org/doi/10.1145/3697253.3697271 | Victor Kamel, Jinwei Zhao, Daoping Li, and Jianping Pan<br>StarQUIC: Tuning Congestion Control Algorithms for QUIC over LEO Satellite Networks<br>The 2nd ACM Workshop on LEO Networking and Communication 2024 (ACM MobiCom '24), November, 18–22, 2024, Washington D.C. |
| [RD16] | https://www.net.in.tum.de/fileadmin/TUM/NET/NET-2024-04-1/NET-2024-04-1_03.pdf | Minu Föger, Marcel Kempf<br>Accelerating QUIC with XDP, Seminar IITM WS 23 |
| [RD17] | https://srtlab.github.io/srt-cookbook/how-to-articles/using-netem-to-emulate-networks.html | Using NetEm to Emulate Networks |
| [RD18] | https://datatracker.ietf.org/meeting/114/materials/slides-114-anrw-on-the-suitability-of-bbr-congestion-control-for-quic-over-geo-satcom-networks-00 | Aitor Martin, Naeem Khademi<br>On the Suitability of BBR Congestion Control for QUIC over GEO SATCOM Networks, ANRW'22 July 26th |
| [RD19] | https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc3168 | The Addition of Explicit Congestion Notification (ECN) to IP |
| [RD20] | https://arxiv.org/pdf/2309.14273 | Constantin Sander, Ike Kunze, Leo Blöcher, Mike Kosek, Klaus Wehrle<br>ECN with QUIC: Challenges in the Wild, ACM Internet Measurement Conference 2023 (IMC'23) |
| [RD21] | https://doi.org/10.1145/3614454.3622998 | Deutschmann et al.,<br>Internet via Satellite: GEO vs. LEO, OpenVPN vs. Wireguard, and CUBIC vs. BBR |
| [RD22] | https://doi.org/10.1049/icp.2024.0851 | Jahandar et al.,<br>Performance of the QUIC transport protocol over geostationary satellite links |

**Tabelle 2: Referenz-Dokumente**

## 1.3 ABKÜRZUNGEN

| | |
|---|---|
| AF | Assured Forwarding PHB |
| BE | Best-effort, synonym zu Default Forwarding (DF) PHB |
| BBR | Bottleneck Bandwidth and Round-trip propagation time, a congestion-based congestion control algorithm |
| BDP | bandwidth-delay product, BDP = Bandbreite (bit/s) * RTT (s) |
| CC | Congestion Control |
| CUBIC | TCP and QUIC congestion control algorithm that uses a cubic function instead of a linear congestion window increase function |
| DF | Default Forwarding PHB |
| EF | Expedited Forwarding PHB |
| ECN | Explicit Congestion Notification |
| ECN-CE | Explicit Congestion Notification – Congestion Experienced |
| FEC | Forward Error Correction |
| GEO | Geostationäre Erdumlaufbahn |
| HTTP | Hypertext Transfer Protocol |
| IP | Internet Protocol |
| iperf | Tool zur Verkehrserzeugung (Client- und Server-Seite) |
| LFN | Long Fat Network, in RFC 1072 definiert für GEO Satcom-Strecke weil BDP größer als 12.500 Bytes |
| MSS | Maximum Segment Size, Nutzerdaten im TCP- Segment |
| PEP | Performance Enhancing Proxy |
| PHB | Per-Hop Behavior |
| PLR | Packet Loss Rate |
| QIR | QUIC Interop Runner |
| QUIC | IETF Standard RFC 9000 (ursprünglich Akronym für Quick UDP Internet Connections) |
| RED | Random early detection (RED), auch Random early discard oder Random early drop.<br>Vom IETF empfohlener aktiver Pufferverwaltungsmechanismus.<br>RED nimmt keine Rücksicht auf QoS Verkehrsklassen, Weighted RED (WRED) kann verschiedene Wahrscheinlichkeiten für verschiedene QoS Warteschlangen vergeben. |
| RTT | Round Trip Time |
| TC | Test Case |
| TCP | Transmission Control Protocol, RFC 793, RFC 5681, RFC 9293 |
| VPN | Virtual Private Network |
| VLAN | Virtual LAN, IEEE 802.1Q |

## 2. HINTERGRUND DES VORHABENS

Um dem Problem der schlechten Performance von Internetprotokollen bei hohen Latenzen entgegenzuwirken, kommen bei Satelliteninternet sogenannte Performance Enhancing Proxies (PEPs) zum Einsatz. PEPs greifen in eine TCP Verbindung ein, indem diese auf beiden Seiten der Satellitenverbindung terminiert wird und ein optimiertes, möglicherweise proprietäres Protokoll auf dem Satellitenkanal verwendet wird. Technisch werden PEPs im Modem des Benutzers sowie in der Infrastruktur des Satellitenbetreibers realisiert, vergleiche Abb. 1.

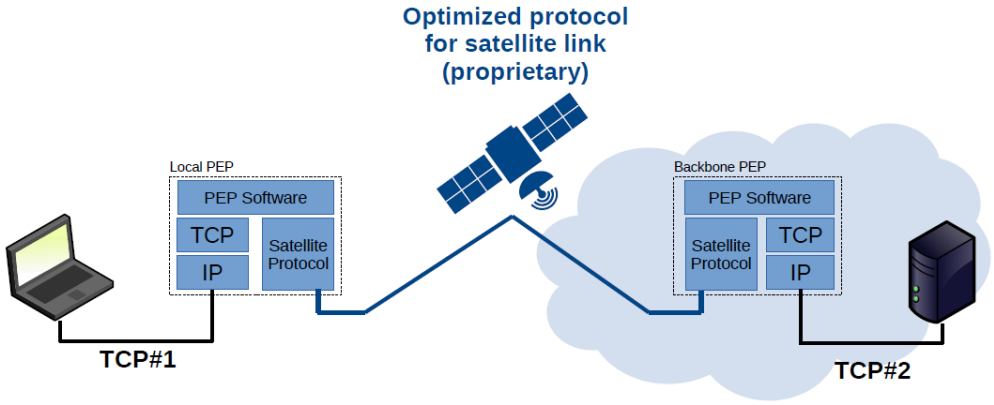



**Abb. 1: Performance Enhancing Proxy (PEP) zur Realisierung von Split TCP**

Die Anforderungen an heutige Internetzugänge sind hoch. Ein besonderes Augenmerk gilt dem neuen Transportprotokoll QUIC, welches das Potenzial besitzt, das bisher etablierte TCP zu ersetzen. Oberstes Ziel von QUIC ist das schnellere Laden von Websites. Zusätzlich verwendet QUIC verschlüsselte Header auf der Transportschicht, so dass keine PEPs mehr eingesetzt werden können.

QUIC ist bei der IETF mit dem RFC9000 standardisiert. Die Version des Hypertext Transfer Protocols, HTTP/3, basiert ebenfalls auf QUIC.

Auf Basis erster QUIC Implementierungen sind damit vergleichende Untersuchungen an realen Satcom-Lösungen mit einer kontrollierbaren Produkt-Verifikationsumgebung im Förderprojekt „QUICSAT“ möglich.

Die FAU untersucht wissenschaftlich die Protokoll-Mechanismen und führt eigene Messungen in realen Systemen durch. Weiterhin unterstützt die FAU mit diesem gewonnenen Wissen die Messungen und Untersuchungen auf Basis eines realen VSAT Produkts im Verifikations-Testbed der NDS: bei vergleichbaren Messungen im möglichst identischen Testaufbau (mit GEO-Latenz) sind nur hier reproduzierbare Einblicke in die Terminal-interne Paketbehandlung sowohl auf Sender- als auch auf Empfängerseite möglich.

Das in diesem Schlussbericht beschriebene Projekt „QUICSAT“ liefert somit vergleichbare Leistungsaussagen sowohl für reale kommerzielle Satcom Services als auch reproduzierbare Messergebnisse aus dem Laborumfeld dank der bei den beiden Verbundpartnern gleichen Stimulationsumgebung.

Die wesentlichen Ziele seitens QUICSAT waren:

- Aufbau einer stabilen und reproduzierbaren Evaluationsumgebung bei beiden Verbundpartnern

- Systematische Erzeugung von Protokollierungsdaten, die von beiden Verbundpartnern generiert und ausgewertet werden können
- Einblick in das VSAT Produkt SKYWAN bei Stimulierung mit verschiedenen QUIC Implementierungen bzw. im Vergleich mit TCP
- Analyse der bei beiden Verbundpartner gemachten Messungen
- Vergleich der Messergebnisse bei unterschiedlichen Konfigurationsparametern, Protokoll-Implementierungen, Beaufschlagung mit unterschiedlichem Nutzerverkehr
- Identifizierung von QUIC Schwachstellen bzw. der einzelnen Implementierungen
- Ableitung von Empfehlungen zur Nutzung von QUIC über GEO-Satelliten

Im Laufe des Projekts wurde ein neues Produkt ARCA SATCOM (ein QUIC-VPN-Router bzw. -Server) von Cysec identifiziert und als neues AP4500 [AD3] in der Projekt-Schlussphase in die Untersuchung im NDS Testlabor eingebaut und vermessen. Dieses Produkt realisiert einen (verschlüsselnden) QUIC-basierten Tunnel über die GEO-Satellitenstrecke und ist gleichzeitig ein PEP für TCP Verbindungen.

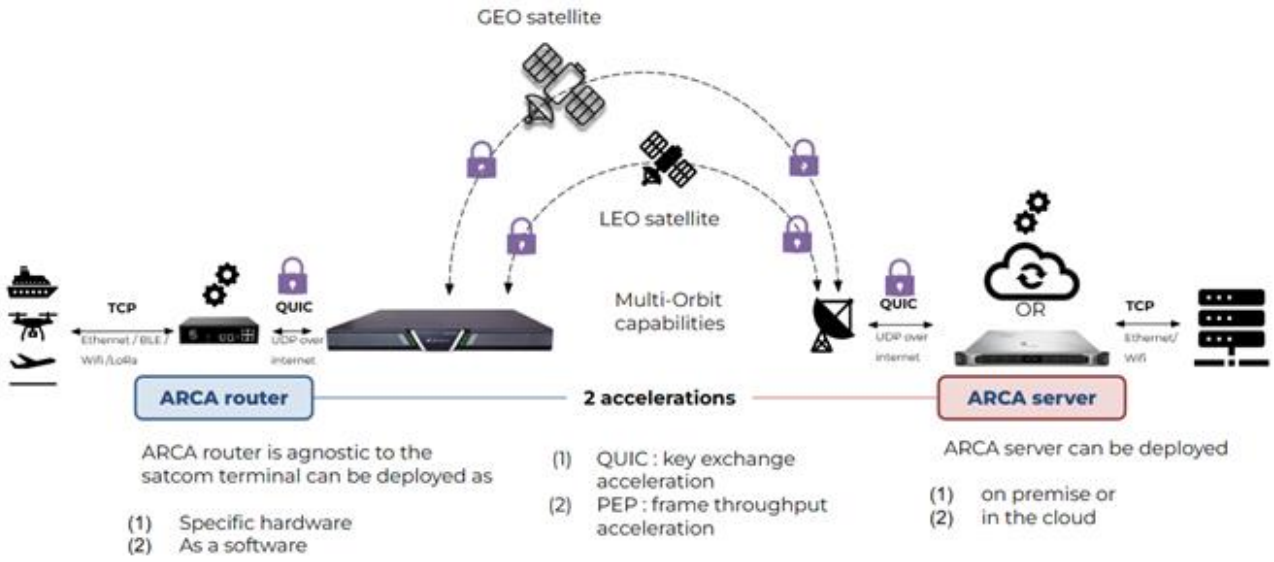



**Abb. 2: ARCA SATCOM Lösung mit QUIC VPN Tunnel**

Die ARCA SATCOM Lösung wird als effiziente VPN Lösung für TCP-PEP (klassische Split-TCP Lösung auf Basis QUIC) angeboten und ist patentiert (EP4346255A1, veröffentlicht 2024-04-03).

# 3. KURZDARSTELLUNG

## 3.1 AUFGABENSTELLUNG

Das primäre Ziel des QUICSAT Projekts war die Definition, Realisierung, sowie Durchführung von Test des QUIC Protokolls im GEO-stationären Betrieb.

Dazu sollten Labor-Messungen mit bestehenden VSAT Produkten als auch Messungen an kommerziellen Live-Systemen durchgeführt und verglichen werden.

Ein Vergleich zwischen TCP sowie die mögliche Eignung von QUIC als VPN Tunnel einer kommerziellen TCP-PEP Lösung war Teil der Messreihen.

Das QUICSAT Projekt wurde als Verbundprojekt mit den Partnern Friedrich-Alexander-Universität Informatik 7 (FAU, Konsortial-Leitung) und ND SatCom (NDS) im Zeitraum 1. Oktober 2021 bis 30. November 2024 durchgeführt.

## 3.2 VORAUSSETZUNGEN DES PROJEKTS

Für das QUICSAT Projekt waren die folgenden hilfreichen Voraussetzungen erfüllt:

- FAU hat Erfahrung mit QUIC durch Mitarbeit bei der IETF sowie durch ESA Aktivitäten zu QUIC.
- NDS baut VSAT Systeme mit QoS Erweiterungen und kann produktinternes Verhalten bei Übertragung von den verschiedenen QUIC Implementierungen im Detail genauer untersuchen.

## 3.3 KURZDARSTELLUNG DER BETEILIGTEN PARTNER

Das Projekt wurde als Verbundprojekt mit den nachfolgend vorgestellten Partnern durchgeführt.

### *3.3.1 Friedrich-Alexander-Universität (FAU), Lehrstuhl Informatik 7*

Aufgaben: Verbundleitung sowie Messaufbauten mit Interop Runner [RD2], einer eigengestalteten Laufzeit-Umgebung inklusive Logging-Erweiterungen. Durchführung von Live-Messungen über am Institut installierte VSAT Terminals verschiedener kommerzieller Satcom Internet-Services.

### *3.3.2 ND SatCom (NDS)*

Aufgaben: Aufbau QUIC Testbed für koordinierte Messungen in Abstimmung mit FAU. NDS stellte vorkonfigurierte SKYWAN VSAT Router, einen SatLink Emulator und die Server für Interop Runner bzw. die aufgebaute automatisierte Testumgebung zur Stimulierung mit QUIC oder anderem Protokoll-Verkehr.

## 3.4 PLANUNG UND ABLAUF

Nach der Kick-Off Besprechung wurde zwischen FAU und NDS festgelegt, den beim FAU vorhandenen Interop Runner als erstes Testbed in die Verifikationsumgebung bei NDS zu übernehmen und an die NDS Testautomatisierung anzupassen.

Auf die Definitions- und initiale Messphase folgte die Entscheidung, auf ein zwischenzeitlich am FAU entwickeltes Testbed umzustellen. Dieses zweite FAU Testbed wurde im Folgenden bei NDS übernommen und in die Testautomatisierungsmöglichkeiten eingebaut.

Damit wurden alle weiteren Messungen bei FAU und NDS ausgeführt.

GEO Latenzemulation (L-Band)

Server für QUIC Client und QUIC Server

19“ Rack mit SKYWAN Modems

**Abb. 3: Testbed-Elemente bei NDS**

Ergebnisse der Testreihen mit SKYWAN wurden an das NDS Projekt Engineering Team weitergegeben, die Erkenntnisse mit dem kommerziellen QUIC VPN Tunnel an dessen Hersteller weitergeleitet. Beobachtungen am untersuchten QUIC Congestion Control Algorithmus flossen über FAU in laufende IETF Aktivitäten ein.

### 3.5 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND

QUIC ist von IETF standardisiert, in allen Browsern integriert und im Einsatz. https://w3techs.com/ führt Messungen im Internet durch.

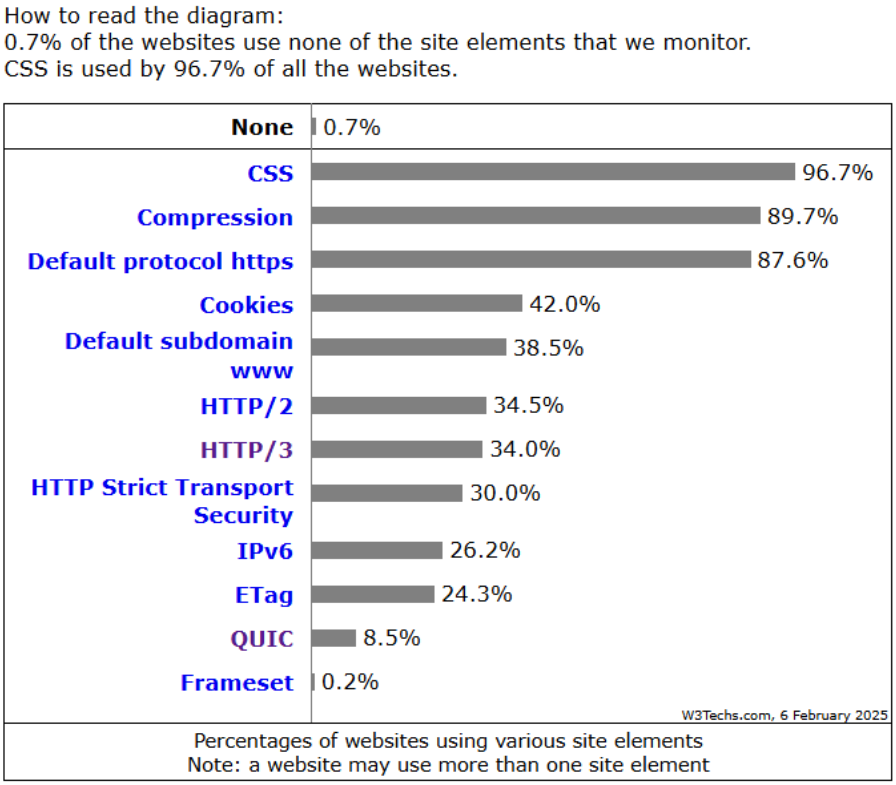



**Abb. 4: QUIC + HTTP/3 im Internet (6 Feb. 2025)**

Mit der Zunahme von HTTP/3 und Einsatz auf allen großen Websites ist QUIC im Internet omnipräsent. Microsoft meldet zu „SMB über QUIC“, dass QUIC auch zum Dateiserver-Zugriff vom Windows 11-Gerät auf SMB-Server (Windows Server 2022 Datacenter, jede Edition von Windows Server 2025 oder höher) unterstützt wird, was auf Home Office / VPN Anwendungen abzielt. Damit ist QUIC auch im Unternehmenseinsatz angekommen.

QUICv1 ist veröffentlicht als IETF RFC 9000, QUICv2 wurde in RFC 9369 (Mai 2023) als Proposed Standard veröffentlicht. QUIC Version 2 bringt keine nennenswerten funktionalen Änderungen mit sich, sondern soll primär Ossifizierung des Protokolls bekämpfen. IETF selbst schreibt: „This document specifies QUIC version 2, which is identical to QUIC version 1 except for some trivial details.”

### *3.5.1 Wissenschaftlicher Stand bei SatCom Anforderungen für QUIC*

Paketverluste sind ein Problem für Transportprotokolle (TCP oder QUIC), ebenso wie hohe Latenz und Latenz-Sprünge. Mit Forward Error Correction (FEC) und neuen CC Verfahren werden diese Probleme adressiert und Lösungsansätze vorgeschlagen. Exemplarische Beispiele sind:

- Untersuchung zu FEC für QUIC in [RD14],
- Untersuchung und Messung neuer CC BBRv3 Varianten über Starlink mit LEO-spezifischen Link-Unterbrechungen beim Hand-Over (Paketverluste und Latenz-Sprünge) in [RD15].

Im verwendeten picoquic [RD5] haben diese jüngsten Untersuchungen noch keinen Eingang gefunden, picoquic nutzt das CC Verfahren BBRv1.

Durch Vergleich der CC Verfahren BBRv1, BBRv2 und CUBIC über simulierte GEO Links in [RD18] wird gezeigt, dass picoquic mit BBRv1 sehr performant ist und auch bei kleineren Pufferlängen (kleiner als BDP) den Link vollständig auslastet (Abb. 5).

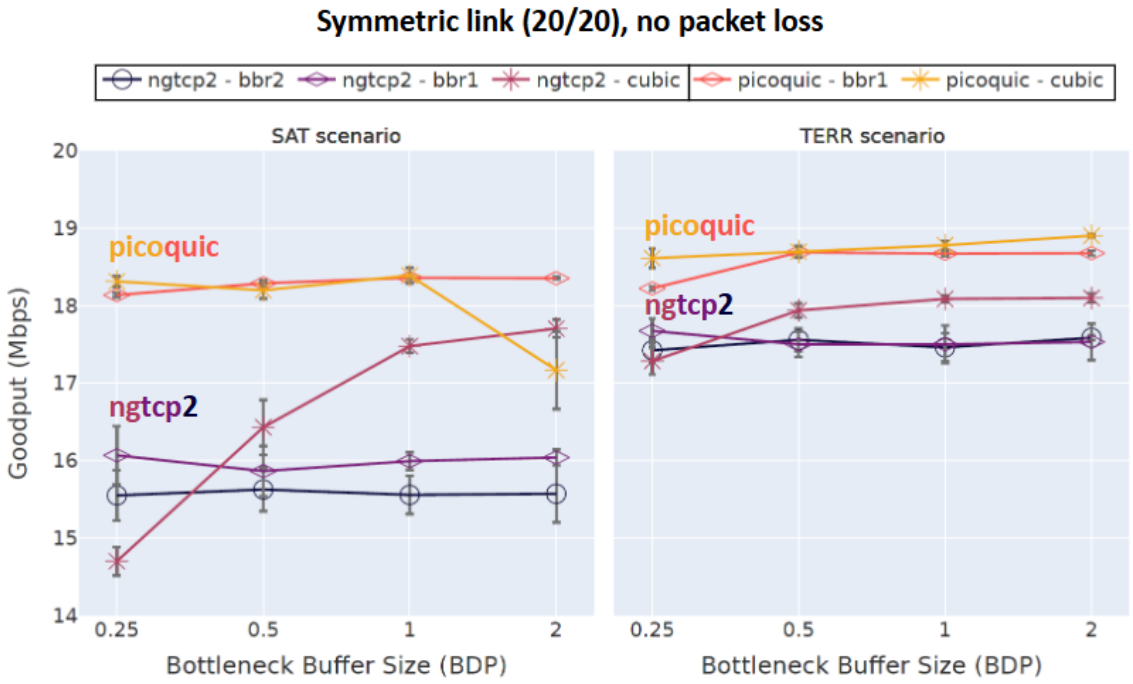
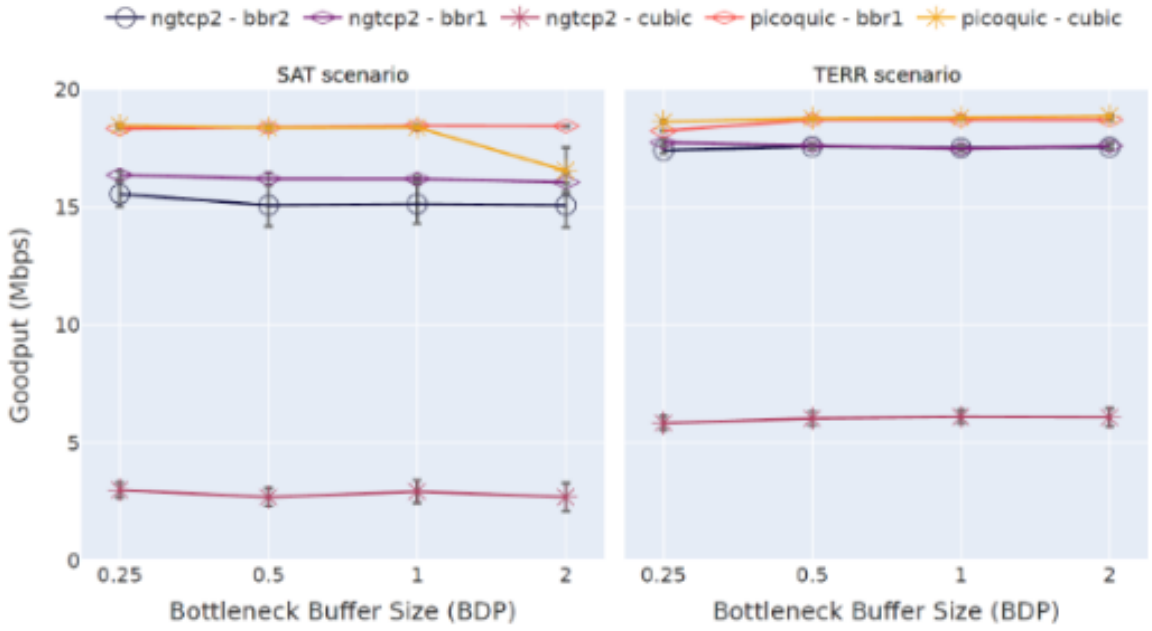



**Abb. 5: BBRv1, BBRv2 und CUBIC ohne Paketverluste [RD18]**




Symmetric link (20/20, PLR = 0,1%)

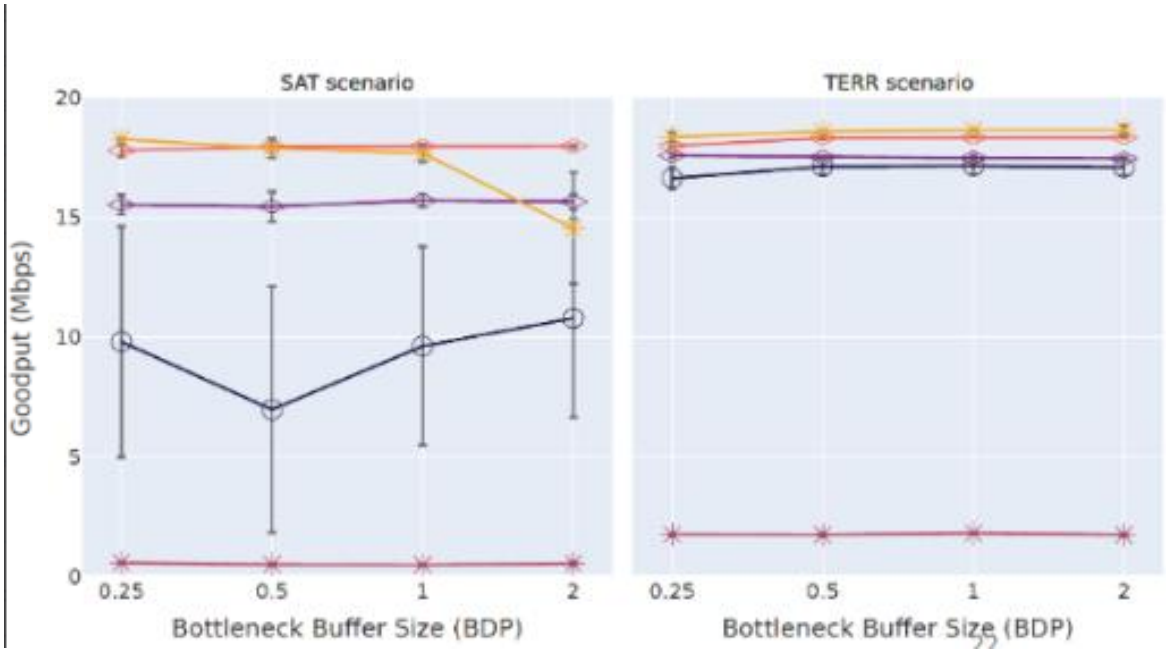



**Abb. 6: BBRv1, BBRv2 und CUBIC mit Paketverlusten [RD18]**

Die Messergebnisse aus der Simulationsumgebung (Abb. 6) zeigen, dass selbst mit Paketverlusten die picoquic Implementierung mit BBRv1 optimal ist für GEO Links. Diese Ergebnisse wurden durch eigene Messungen bestätigt [RD21, RD22].

### *3.5.2 Technischer Stand bei SatCom Anforderungen für QUIC über GEO*

In den NDS Messungen wurden 565ms als realistische GEO-Latenz eingefügt und mit ähnlichen Bandbreiten auf realen SKYWAN Produkten getestet. Ein Systemmerkmal von SKYWAN ist, dass wegen der MESH-Fähigkeit ein Single-Hop Betrieb zwischen jeweils 2 SKYWAN Stationen im TDMA Netz genutzt wird, die GEO Latenz also immer gleich ist.

## 3.6 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN

NDS wurde von FAU eingeladen als Stakeholder zum ESA QUICOPTSAT Projekt und hat an Online-Besprechungen teilgenommen.

Cysec bietet seit 1H2024 ein QUIC-VPN-Router Produkt mit integriertem TCP-PEP an mit dem Versprechen, besseren Durchsatz zu liefern als z.B. OpenVPN.

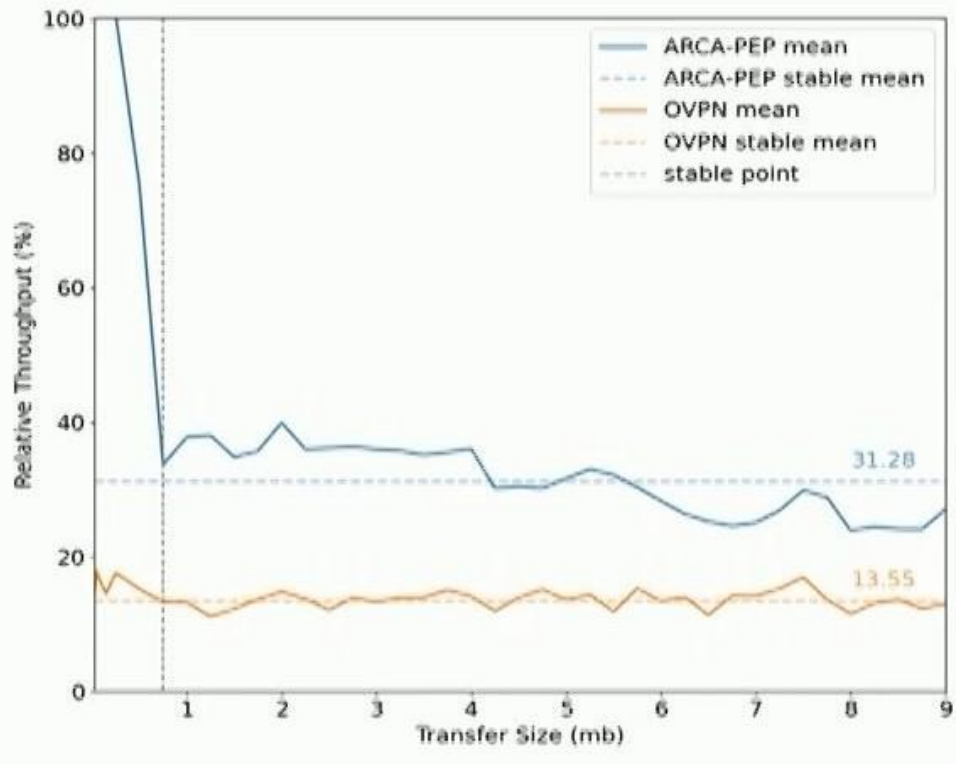



**Abb. 7: ARCA SATCOM mit TCP-PEP vs. OpenVPN**

Cysec hatte im Juni 2024 angeboten, NDS bei Messungen im Rahmen von QUICSAT mit der neuen ARCA SATCOM Lösung zu unterstützen. Entsprechend wurde AP4500 definiert um deren QUIC VPN-Appliance im noch laufenden QUICSAT Projekt zu testen. Cysec hatte dafür Testbetreuung zugesagt.

# 4. EINGEHENDE DARSTELLUNG

## 4.1 VERWENDUNG DER ZUWENDUNG MIT GEGENÜBERSTELLUNG DER ZIELE UND ERGEBNISSE

Inhaltlich wurden alle geplanten Ziele erreicht und durch die folgenden Aktivitäten teilweise übertroffen:

- Aufbau von 2 unterschiedlichen Messumgebungen (QIR und FAU Testbed)
- zusätzliche Einbindung des Cysec QUIC-VPN-Routers

Im Folgenden werden die Ziele des QUICSAT Projekts und die erzielten Ergebnisse gegenübergestellt.

| Ziel | Ergebnisse |
|---|---|
| Ziel 1:<br>Definition der Testumgebung | • Interop Runner bei beiden Partnern installiert<br>• im Laufe des Projekts wurde erkennbar, dass<br>  ○ Interop Runner großen Aufwand bei der Integration in die automatisierte Testumgebung bei NDS verursacht<br>  ○ Interop Runner sowie die davon genutzten QUIC Implementierungen aus dem Internet ständig Änderungen ziehen, wodurch stabile/reproduzierbare Messungen fast unmöglich sind |
| Ziel 2:<br>Auswahl der geeignetsten QUIC Realisierung für spätere Vergleichsmessungen | • Alle QUIC Protokoll-Implementierungen wurden bei beiden Partnern betrieben und Messungen durchgeführt<br>• FAU hatte aufgrund seiner Untersuchungen die beiden Kandidaten picoquic und Quiche als beste Kandidaten für die weitere Untersuchung vorgeschlagen<br>• NDS adaptierte für seine SKYWAN bezogenen Tests picoquic als QUIC Client und QUIC Server |
| Ziel 3:<br>Durchführung von Messungen bei NDS im Testbed | • NDS machte mit den ausgewählten QUIC Implementierungen Testläufe, wobei Fokus auf QoS Konfigurationen im SKYWAN VSAT Router lag<br>• Messungen mit unterschiedlichen Satelliten-Link-Konfigurationen (Bandbreite, symmetrische/-asymmetrische Bandbreite)<br>• Vergleich von TCP, UDP und QUIC mit jeweils gleicher QoS und Satelliten-Link-Konfiguration |
| Ziel 4:<br>Bewertung der Messergebnisse in Arbeitstreffen | • Austausch der umfangreichen LOG-Dateien sowie generierter Diagramme zu den Messungen<br>• Interpretation der Messergebnisse<br>• Ableitung von zukünftigen Produktverbesserungen |
| Ziel 5:<br>Einbau der im Projekt beschafften Cysec Produkte in die vorhandene Testumgebung und Durchführung der automatisierten Messreihen | • NDS beschaffte beide ARCA SATCOM Router, installierte und betrieb diese mit Unterstützung von Cysec<br>• Messreihen durchgeführt für QUIC-Tunnel als auch TCP-PEP über QUIC-Tunnel<br>• weitere Messreihen mit veränderten Konfigurationseinstellungen in den ARCA SATCOM Geräten durchgeführt |

**Tabelle 3: Gegenüberstellung Ziele / Ergebnisse**

### 4.1.1 Vergleich NDS Messungen vs. FAU Simulationen

Die NDS Testcases wurden am FAU in einer NetEm [RD17] Netzwerk-Simulationsumgebung simuliert. Abweichend von NDS Messungen wurden dort keine Service Aggregate (PHB AF13 oder EF) nachgestellt.

### 4.1.2 Resultate der QUIC über SKYWAN Messungen im NDS Testbed

Das SKYWAN System mit seinen QoS Mechanismen hatte einen deutlichen Einfluss auf QUIC Übertragungen.

Der Netzplaner kann durch QoS Konfiguration in jeder SKYWAN Sende-Station die QUIC Sessions mit garantierter Sendebandbreite (EF_TRUNK) oder per dynamisch angeforderter vordefinierter Sendebandbreite (EF_DYNAMIC) übertragen. Alternativ lässt sich QUIC Verkehr wie anderer Verkehr einer der AFxy PHB Klassen zuweisen zur Differenzierung von anderem Nutzerverkehr.

Mit weiteren QoS Filtereinstellungen kann gezielt ein kritischer QUIC Datenstrom priorisiert werden.

Bei QUIC BBR wie bei QUIC CUBIC konnte die ganze konfigurierte Bandbreite genutzt werden.

Das aggressivere BBR verursachte dabei mehr Drops in der sendenden SKYWAN VSAT Station und erreichte auch schneller die maximale Datenrate.

Im Vergleich mit TCP erreichte picoquic (und andere QUIC Implementierungen) mit BBRv1 den besten Durchsatz im SKYWAN Testbed.

### 4.1.3 Untersuchungen mit Cysec ARCA SATCOM Geräten im NDS Testbed

Cysec ist Hersteller von VPN Lösungen und hat mit ARCA SATCOM eine QUIC-basierte Client-/Server-Lösung neu entwickelt, das sich aufgrund der zusätzlichen TCP-PEP Funktionalität als Vorschaltgerät für Satelliten-Modem positioniert.

**Abb. 8: ARCA SATCOM Gerät**

Für vergleichende Messungen zu bisherigen Tests wurden die zwei ARCA SATCOM Geräte in den Messaufbau eingefügt. Ziel war es, in der automatisierten Testumgebung möglichst einfach zwischen Tests mit bzw. ohne ARCA SATCOM Geräten umzuschalten.

Im ARCA SATCOM Produkt ist zusätzlich ein TCP-PEP integriert, der TCP Verbindungen lokal terminiert und somit alle TCP Applikationsdaten im QUIC Stream überträgt.

Von Interesse war wie die unterschiedlichen IP Datenströme behandelt werden sobald ein QUIC Tunnel besteht sowie das Verhalten mit TCP-PEP.

ARCA SATCOM erzeugt immer einen QUIC Tunnel. Dazu wird zwischen ARCA Router und ARCA Server eine sichere verschlüsselte QUIC Verbindung aufgebaut, über die dann alle Nutzerdaten getunnelt werden. Die QUIC Instanzen im ARCA Router und ARCA Server wurden für die Messungen entsprechend der GEO-Latenz und nutzbarer Bandbreite konfiguriert.

Für unsere Tests wurden verschiedene ARCA SATCOM Firmware-Releases bereitgestellt und aufgespielt.

Im Vergleich der CC Verfahren (BBR versus CUBIC) im ARCA Tunnel waren die Durchsatzwerte ähnlich.

## 4.2 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DES PROJEKTS

- Neue, innovative Technologie
  - Dank FAU konnte bei NDS der Bereich Protokoll-Messungen massiv vorangebracht werden. Neue Testframeworks stehen mit Projektende für zukünftige Produkt-Verifikationsmessungen inkl. Visualisierung der Ergebnisse zur Verfügung.
  - Mit der Projekterweiterung auf die Vermessung der ARCA SATCOM Lösung wurde ein neues VPN Produkt getestet. Das Fremdprodukt konnte sowohl bezüglich seiner TCP-PEP Funktionalität als auch zur Nutzung als QUIC VPN Tunnel ohne TCP-PEP auf seine Eignung in einer Gesamtlösung mit SKYWAN auf eine Gesamt-Leistungsfähigkeit zum jeweiligen Entwicklungsstand analysiert werden.
- Technologische Risiken
  - keine
- Nutzung der Erfahrung der Partner für effektive Umsetzung
  - An der FAU entstand ein effizient nutzbares und einfacher integrierbares Testframework im Projekt QUICSAT. Es erlaubt neben extensiver Protokollierung kontrollierte und wiederholbare Ausführungen der Messreihen..
  - In den Workshops, dem regen Austausch der einzelnen Messdiagramme mit Interpretation der Ergebnisse und Anregungen für weitere Messungen / Parameterselektion und sogar am Laboraufbau wirkte das Team von FAU mit Expertise zu QUIC, dessen Protokollmechanismen und dem eigentlichen Messen an Netzwerk-Protokollen maßgeblich mit.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich viele Weiterentwicklungsmöglichkeiten hinsichtlich:

- Pflege des FAU Testframeworks für fortlaufende Produkt-Verifikationen bei NDS
- Optimierung bei Durchsatz und Reduzierung der Paketverluste im SKYWAN Produkt. Konkrete Ansatzpunkte sind:
  - Dynamische Pufferlängen
  - Signalisierung für Congestion Control
  - Puffersystem Algorithmen
  - Network Management System Transport-Protokoll

Im Gesamten wurden die beantragten Projektmittel somit angemessen eingesetzt, um die Ziele des Projektes zu bearbeiten und zu erreichen.

### 4.3 VORAUSSICHTLICHER NUTZEN UND VERWERTBARKEIT

Die folgenden Punkte werden in einem separaten Verwertungsplan fortgeschrieben:

- Erfindungen und Schutzrechte
- Wirtschaftliche Erfolgsaussichten
- Wissenschaftlich/technische Erfolgsaussichten
- Wissenschaftlich/wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

### 4.4 WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG DES PROJEKTS BEKANNT GEWORDENER FORTSCHRITT BEI ANDEREN STELLEN

Es gibt einige QUIC Implementierungen und Weiterentwicklungen. Im Projekt wurden nur frei verfügbare Implementierungen genutzt, wie diese bei Endkunden einsatzbar wären.

Während der Messungen mit dem Interop Runner wurden die insgesamt verfügbaren QUIC Implementierungen verglichen. Der Interop Runner holt sich laufend neuere Implementierungen (falls verfügbar), sodass laufend mit neueren Software-Ständen getestet wurde. Deshalb wurde zuerst die Anzahl der getesteten QUIC Implementierungen bei NDS reduziert und im nächsten Schritt die QUIC Implementierungen bei NDS auf picoquic eingeschränkt. Grund: picoquic war in allen Messungen sehr performant und stabil bei GEO Latenzen.

### 4.5 VERÖFFENTLICHUNGEN

Im Zusammenhang mit dem QUICSAT Projekt wurden vom FAU viele Veröffentlichungen getätigt oder angemeldet.

[Ende des Dokuments]