

## Initiative für den Aufbau eines Glasfaser-Backbones für Quantenkommunikation und Zeit- und Frequenzverteilung in Deutschland

*(Vorbereitet u.a. in Zusammenarbeit mit dem SQuaD-Projekt)*

### Autoren

Prof. Dr. C. Becher (Universität Saarland)

Prof. Dr. K. Blaum (Max-Planck-Institut für Kernphysik)

Dr. J. Boumann (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Dr. T. A. Goebel (Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF)

Prof. Dr. S. Höfling (Universität Würzburg)

Prof. Dr. Urs Hugentobler (Technische Universität München)

Dr. P. Kaufmann (DFN-Verein)

Dr. T. Liebisch (Physikalisch-Technische Bundesanstalt)

Prof. Dr. C. Marquardt (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts)

Prof. Dr. D. Meschede (Universität Bonn)

Dr. S. Naegele-Jackson (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg)

Dr. H. Schnatz (Physikalisch-Technische Bundesanstalt)

Dr. N. Walenta (Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik HHI)

### Kurzfassung

Für optische Glasfasernetzwerke haben sich in den vergangenen Jahren zwei neuartige Technologien in den Vordergrund geschoben: Die optische Quantenkommunikation zur Realisierung physikalisch sicherer Nachrichtenübertragung und die optische Verteilung von Zeit- und Frequenzsignalen (engl. Time & Frequency, T&F) mit großem Genauigkeitserfolg. Die Weiterentwicklung und breite Nutzung dieser Technologien im Rahmen von FuE-Aktivitäten sowie bei zukünftigen wirtschaftlichen Anwendungen eröffnen neue Möglichkeiten wie z.B. die Chance für „Ende-zu-Ende-Sicherheit in einer hypervernetzten Welt“<sup>1</sup> oder verbesserte Positionierungssysteme<sup>2</sup>. Parallel zur unmittelbaren Entwicklung von Systemen und Komponenten im Rahmen von Initiativen wie z.B. QuNet<sup>3</sup>, QR.X<sup>3</sup> und SQuaD<sup>3</sup> erfordert dies jedoch den Aufbau und den Unterhalt einer geeigneten FuE-Infrastruktur auf nationaler und europäischer Ebene. Diese Infrastruktur, die Quantenkommunikation sowie Zeit- und Frequenzverteilung gemeinsam unterstützt (engl. „**QTF-Backbone**“), erfordert jedoch eine Perspektive für den Zeitraum von mindestens einer Dekade. Quantenkommunikation und Zeit- und Frequenzverteilung stellen besondere Anforderungen an eine derartige dedizierte Faserverbindung und versprechen große Synergien in der gemeinsamen Umsetzung – beide Bereiche sollen von den Fähigkeiten des komplementären Partners profitieren, um ihre volle spezifische Funktionsfähigkeit zu entfalten.

---

<sup>1</sup> Richtlinie zur Förderung von Projekten zum Thema „Ende-zu-Ende-Sicherheit in der hypervernetzten Welt

<sup>2</sup> <https://www.gpsworld.com/china-finishing-high-precision-ground-based-timing-system-a-worry-for-the-united-states/>

<sup>3</sup> QuNet, <https://www.qunet-initiative.de/>; QR.X., <https://quantenrepeater.link/>; SQuaD, <https://www.squad-germany.de/>

Die Quantenkommunikation umfasst über die sichere Nachrichtenübertragung hinaus zukünftig Fähigkeiten zur Verteilung verschränkter Zustände in den Bereichen Kommunikation, Sensorik und Computing und ist damit die Grundlage für langfristige Entwicklungen der Quantentechnologie insgesamt. Die Quantentechnologien haben bereits in den letzten Jahren und verstärkt aufgrund des Rahmenprogramms der Bundesregierung „Quantentechnologien - von den Grundlagen zum Markt“<sup>4</sup> und der Quantenflagship-Initiative der EU auch in Deutschland einen enormen Schub erhalten. Für die voranschreitende „zweite Quantenrevolution“ (Sicherheitsanwendungen, Quantencomputing, Quantensensorik) werden in der Zukunft die Verbesserungen photonischer Komponenten, neue Instrumente zur Kontrolle von Quantensystemen, oder der Einsatz von Quantensensoren eine immer größere Bedeutung erlangen. Hier können bereitgestellte Referenzen auf deutschlandweit zugreifbaren Faserverbindungen für alle Nutzer und Entwickler erhebliche Synergien erzeugen und damit den Wissenschaftsstandort Deutschland massiv stärken.

Im letzten Jahrzehnt wurden Technologien für die Verteilung von Zeit- und Frequenzsignalen über Glasfasern entwickelt, die es erlauben Frequenz- oder Zeitmarken ohne Genauigkeitsverlust über große Strecken zu vergleichen. Die Nutzung von genauerer Frequenz und Zeitmarken wird große volkswirtschaftliche und wissenschaftlich-technische Möglichkeiten eröffnen, wie unten im „Überblick über ausgewählte Anwendungsfälle“ skizziert. Mit der Demonstration der Zeit- und Frequenzverteilung in höchster Qualität und auf hohem TRL-Level zwischen der PTB und dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching, dem SYRTE in Paris sowie weiteren europäischen Partnern wurde das Potenzial eines QTF-Backbones als einem neuen Referenzsystem für höchste Ansprüche bereits bewiesen. Es sei daran erinnert, dass die Einrichtung des GNSS (Global Navigation Satellite System), das Nutzern schon heute ein Präzisionsreferenz-System bietet, enorme wirtschaftliche Perspektiven eröffnet hat. Auf die europäische GNSS-Industrie entfällt mehr als ein Viertel des weltweiten GNSS-Marktanteils. Die Europäische GNSS-Agentur (GSA) geht davon aus, dass die Einnahmen des globalen GNSS-Marktes aus Geräten und Diensten von 150 Milliarden Euro im Jahr 2019 auf 325 Milliarden Euro im Jahr 2029 steigen werden. Verbesserte Positionierungssysteme für selbstfahrende Autos und für unbemannte Luftfahrzeuge sind ein vielversprechender Markt. Die dafür notwendige GNSS-Basis wird von einem terrestrischen, redundanten QTF-Backbone für Sicherheitsanwendungen profitieren.

Eine erste Umsetzung eines *QTF-Basisnetzes*, die beide technologische Entwicklungen aufnimmt, die Quantentechnologien und die Zeit- und Frequenzverteilung, kann auf mehreren Teststrecken in Deutschland sowie auf die Vorarbeiten zur Gesamtnetzarchitektur im Rahmen der BMBF-Quanteninitiative<sup>3</sup> und des Projektes CLONETS-DS der EU<sup>5</sup> aufbauen. Die Verbindung dieser Teststrecken zu einem mittelfristig verfügbaren Backbone ist der naheliegendste Weg, um in ganz Deutschland Nutzern und Entwicklern schon bald einen Zugang zu diesen Zeit- und Frequenzinformationen höchster Qualität sowie zu den fortschrittlichsten Protokollen im Bereich der Quantenkommunikation zu gewähren.

Die Strategie für die technische Realisierung eines QTF-Backbones als Basisnetz einer bundesweiten Infrastruktur soll in einem nachfolgenden "White Paper" vorbereitet werden, das sich unmittelbar auf das im „Handlungskonzept Quantentechnologien“<sup>6</sup> auf Seite 28 aufgeführte kombinierte Glasfaser-Backbone bezieht. Nach Vorstellungen der Bundesregierung soll ein „bundesweites Glasfaser-Backbone für die Quantenkommunikation und die Zeit- und Frequenzverteilung“ bis spätestens 2026 realisiert werden. Ergänzend sei auf die EuroQCI- und GÉANT-Initiativen verwiesen, die den Auf- und Ausbau von terrestrischen Netzen (optische Glasfaser-Infrastruktur) in der Hoheit der europäischen Mitgliedsstaaten sieht<sup>7,8</sup>. Das QTF-Backbone kann ein wesentlicher Beitrag Deutschlands für diese europäischen Initiativen liefern.

---

<sup>4</sup> [https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/5/31432\\_Rahmenprogramm\\_Quantentechnologien.html](https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/5/31432_Rahmenprogramm_Quantentechnologien.html)

<sup>5</sup> CLONETS-DS Deliverables, [https://clonets-ds.eu/?page\\_id=98](https://clonets-ds.eu/?page_id=98)

<sup>6</sup> <https://www.quantentechnologien.de/artikel/handlungskonzept-quantentechnologien-der-bundesregierung.html>

<sup>7</sup> EuroQCI Concept of Operations, Version 2, 19 Juni 2023, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/euroqci-conops-concept-operations>

<sup>8</sup> <https://wiki.geant.org/display/NETDEV/OTFN>

## Überblick über ausgewählte Anwendungsfälle des deutschen QTF-Backbones

Sowohl im Bereich der Quantenkommunikation als auch in der Zeit- und Frequenzverteilung sind Anwendungsfälle nicht nur zum Nutzen verschiedener Forschungsfelder (z.B. Quantentechnologien, Grundlagenphysik, Geodäsie, Astronomie) absehbar, auch wirtschaftliche Perspektiven (z.B. Neudefinition der SI-Sekunde) rücken mehr und mehr ins Licht. Wir nennen hier einige ausgewählte Anwendungsfälle, die mit der Bereitstellung eines allgemein zugänglichen, dedizierten deutschen QTF-Backbones realisiert werden können:

- **Quantenkommunikation** bietet physikalisch sichere Nachrichtenverbindungen. Terrestrische Fasernetze werden sowohl für Nahbereiche als auch Langstrecken jenseits von ca. 200 km erforderlich sein. Für die Quantenkommunikation sind erste Teststrecken in Betrieb<sup>3</sup>. Ein ausgedehntes QTF-Basisnetzes würde die Erforschung, Entwicklung und Erprobung von komplexen Quantenkommunikationsnetzen ermöglichen.
- **Mit der Quantensensorik** eröffnen sich neue Konzepte für verteilte Sensoren auf Basis optischer Technologien, die Frequenzreferenzen wie hier vorgeschlagen benötigen.
- **Eine weiträumige Vernetzung** für das verteilte Quantencomputing und die Verteilung von verschränkten Zuständen oder gar die visionäre Realisierung eines Quanteninternets wird ohne ein dediziertes Glasfasernetz nicht realisierbar sein<sup>9</sup>. Das QTF-Backbone würde hier eine essenzielle Glasfaserinfrastruktur für die Forschung liefern.
- **Synergie von Zeit & Frequenzverteilung mit Quantenkommunikation** über Glasfaser ist für die Synchronisation von Lasern und Detektoren erforderlich und auch um reduzierte Quantenbitfehlerraten aufgrund von Pfadlängenschwankungen zu erzielen, wie in Italien<sup>10</sup> bereits nachgewiesen werden konnte.
- **Ein perfektes Mikrofon** für die Überwachung von kritischer Infrastruktur wie Bauwerken und auch Glasfasernetze selbst: Glasfasern weisen eine hohe Empfindlichkeit gegenüber externen physikalischen Störungen wie Temperatur, Dehnung, akustische Vibrationen, Strom, Druck usw. auf. Verteilte optische Sensorik erlaubt orts aufgelöste Messungen entlang eines einzigen durchgehenden Glasfaserstrangs, wobei kleinste Längenänderungen bis hin zu wenigen 1E-15 m messbar werden<sup>11</sup>. Dies kann darüber hinaus genutzt werden, mögliche Seitenkanalangriffe auf Quantenkommunikationsnetze zu detektieren.
- **Präzisionsmessungen** mit und an Atomen, Ionen und Molekülen ermöglichen neue Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie (Verletzung der Lorentz-Symmetrie), oder die Suche nach einer zeitlichen Variation fundamentaler Konstanten wie z.B. dem Massenverhältnis von Elektron und Proton. Diese werden durch die Zeit- und Frequenzreferenz-Systeme erst ermöglicht.
- **Geodynamische Messungen:** Frequenz- oder Phasenvergleiche zwischen weit entfernten Uhren enthalten dynamische Informationen über die physikalische Umgebung der Faser in der Geologie oder Meeresforschung, z. B. die Erkennung von Abweichungen des europäischen Höhensystems sowie Bodenbewegungen, die durch Erdbeben, Vulkane oder Tsunamis verursacht werden. Weiterhin liefert eine Vernetzung von entfernten Uhren ein erforderliches Referenzsystem, um Phänomene des globalen Wandels (Anstieg des Meeresspiegels etc.) global zu analysieren.
- **In der Astronomie** werden durch stabile und genauere Uhren neue Bedingungen für die Steigerung der Genauigkeit der VLBI-Geodäsie geschaffen. Für das Square Kilometer Array oder das neue Deutsche Zentrum für Astronomie wird das QTF-Backbone eine wichtige Rolle spielen.
- **Die für 2030 geplante Neudefinition der SI-Sekunde** ist nur realisierbar, wenn internationale Vergleiche über Glasfaserverbindungen die erforderlichen Genauigkeiten von 1E-18 über große Entfernungen bereitstellen können<sup>12</sup>.
- **Infrastrukturelle Anwendungen der Zukunft:** Eine Glasfaserinfrastruktur wie das QTF-Backbone kann nicht nur das dringend benötigte GNSS-Backup für kritische Infrastrukturen wie z.B. für die Galileo Precise Timing Facility liefern, sondern auch die Verteilung der koordinierten Weltzeit UTC an Finanzrechenzentren (zur Zeitstempelung von Transaktionen), nachhaltige Energienetze oder ein mobiles 5G-Internet ermöglichen. Dies könnte zu neuartigen Anwendungen führen, die unsere heutigen Vorstellungen noch übersteigen.

<sup>9</sup> Quantum Internet Alliance; <https://quantuminternetalliance.org/>

<sup>10</sup> Clivati, C., et al. Coherent phase transfer for real-world twin-field quantum key distribution. *Nat Commun* **13**, 157 (2022).

<sup>11</sup> Noe, S., et al. Long-range fiber-optic earthquake sensing by active phase noise cancellation. *Sci Rep* **13**, 13983 (2023).

<sup>12</sup> Roadmap towards the redefinition of the second: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2307/2307.14141.pdf>

## Anhang 1: Leistungserwartungen an ein Quantenkommunikationsnetz

Die Quantenkommunikation verspricht einen Paradigmenwechsel in der Art und Weise, wie Sicherheit, d.h. Sicherheit gegen Lauschangriffe hergestellt wird: Statt algorithmischer Sicherheit, die das Brechen von Verschlüsselungen durch Funktionen unwahrscheinlich macht, deren Umkehrung extrem aufwendig ist, werden Lichtsignale mit Quantenüberlagerungszuständen eingesetzt. Diese werden bei Abhörversuchen (d.h. immer Kopierversuchen) zerstört und realisieren damit physikalische, d.h. konkret messbare Sicherheit aufgrund des sogenannten „no cloning“-Theorems. Die Quantenkommunikation erzeugt über den Quantenkanal einen gemeinsamen Schlüssel für Sender und Empfänger (QKD=Quantum Key Distribution). Die eigentliche Nachricht wird mit diesem Schlüssel kodiert und sicher übertragen.

Der QTF-Initiative geht es um den Aufbau leistungsfähiger Fasernetze für die Anwendung und Erprobung von Quantentechnologien, die im Unterschied zu Satelliten-Systemen breite Anbindungen von Einrichtungen aller Art und robuste Kanalstrukturen bieten.

Erdgebundene Netzwerke mit physikalischer Quantensicherheit sind an vielen Orten im Aufbau, in Einzelfällen schon in Betrieb<sup>13</sup>. In Europa gibt es die EuroQCI-Initiative<sup>14</sup>, deren Ziel der Auf- und Ausbau von Quantenkommunikationsinfrastruktur in Europa ist und zu der die hier vorgestellte Initiative beitragen kann. Aktuell bestehende Netze realisieren in erster Linie Punkt-zu-Punkt-Sicherheit, weil an den Knotenpunkten „Messe und leite weiter“-Verfahren angewendet werden, die die Quanteninformation zerstören, und deren praktische Reichweite mit sinnvoller Schlüsselrate ca. 100 – 200 km beträgt. Ein signifikanter Ausbau dieser Teststrecken ist notwendig, um sowohl komplexe Netzstrukturen für den Quantenschlüsselaustausch zu erforschen und zu erproben als auch neue Forschungsgebiete zu erschließen. Perspektivisch sollen insbesondere Quantenrepeater Ende-zu-Ende-Sicherheit zwischen beliebigen Netzknoten herstellen.

Verfahren	Charakteristika	Anwendung
<b>PtP-Protokolle</b> <b>1. Generation</b> <b>realisiert, in Betrieb<sup>15</sup></b>	Punkt-zu-Punkt-Quantensicherheit zwischen Knoten. Längere Strecken können nur mit „Trusted Nodes“ (klassischen Knoten) überbrückt werden.	QKD (Schlüsselerzeugung) Reichweite 1000 km > 100 Mbps demonstriert <sup>16</sup>
<b>Verschränkungsverteilung</b> <b>2. Generation</b> <b>demonstriert, im Aufbau</b>	Punkt-zu-Punkt-Quantensicherheit mit Quantenspeicherung an den Zwischenknoten	QKD (Schlüsselerzeugung); Reichweite 100 – 200 km > 110 bit / s demonstriert <sup>17</sup>
<b>Quantenrepeaterknoten</b> <b>3. Generation</b> <b>in der Entwicklung</b>	Ende-zu-Ende-Sicherheit zwischen beliebigen Knoten mit perspektivischer Realisierung eines Quanteninternets für spezifische Anwendungen	QKD, QT-Verfahren mit Verschränkungsverteilung; Vernetzung von Quantencomputern und Sensoren Reichweite 1.000 km <sup>18</sup>

Table 1: Verfahren und Anwendungen der Quantenkommunikation in Fasernetzen

<sup>13</sup> Einige existierenden und geplanten Netzen in China, Großbritannien, Italien, Niederlande, USA.

Netzen in China: China Nature **589**, 214 (2021); <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.00221>;

<sup>14</sup> Euro-QCI (European Quantum Communication Initiative); <https://qt.eu/ecosystem/quantum-communication-infrastructure>

<sup>15</sup> Der Betrieb von QKD-Netzen für einen echten Einsatz ist in Europa allerdings noch ausstehend (u.a. wegen fehlender Zertifizierung und Standardisierung).

<sup>16</sup> Schlüsselraten: Nature Phot. **17**, 416 (2023); Nature Phot. **17**, 422 (2023); Überbrückte Distanzen: Phys. Rev. Lett. **130**, 210801 (2023);

<sup>17</sup> Artikel: PNAS **116**, 6684 (2019); Nature Commun. **13**, 6134 (2022); Appl. Phys. Lett. **117**, 124002 (2020)

<sup>18</sup> Artikel: Nature **607**, 69 (2022); arXiv:2308.08892; arXiv:2308.08891; PRL **130**, 213601 (2023); arXiv:2309.0022;

<https://aws.amazon.com/de/blogs/quantum-computing/category/quantum-technologies/amazon-quantum-solutions-lab/>

## Anhang 2: Leistungsniveaus für die Zeit- und Frequenzübertragung

Eine Zeitunsicherheit im Sub-Nanosekunden-Bereich und/oder relative Frequenzunsicherheit von besser als  $1E-15$  war bisher nur in nationalen Metrologieinstituten oder einigen wenigen Labors weltweit erreichbar. Diese überlegenen Zeit- und Frequenzsignale an weitere Nutzer in der Industrie und an Forschungseinrichtungen in ganz Deutschland zu verteilen ist technisch nur über dedizierte bi-direktionale dunkle Glasfasern möglich.

Die Angaben der Tabelle wurden in Europa für Entfernungen von mehr als 600 km nachgewiesen und dürfen auch für das QTF-Netzwerk erwartet werden. Zum Vergleich ist in der Tabelle die erreichbare Zeitübertragung mithilfe von GNSS und Internetnetzwerken aufgeführt. Wir heben hervor, dass eine Zeitübertragung über Glasfasern mit kommerzieller Technologie (ELSTAB) es ermöglicht, beispielsweise die Übertragung von Zeitskalen an jeden Ort durchzuführen und damit eine Netzwerksynchronisierung mit Zeitinstabilitäten von weniger als  $1E-11$  s (10 ps) für Mittelungszeiträume zwischen 10 s und 10 Tagen und mit einer Unsicherheit in der Größenordnung von  $5E-11$  s (50 ps) zu erreichen.

Frequenz oder Zeit (Signalübertragung)	Nachgewiesene Leistungsniveaus (Instabilitäten und Unsicherheiten bei der Übertragung)	Verfahren zur Rauschunterdrückung
Frequency transfer (fiber, CW optical carrier)	Instability: $1E-15$ @ 1s; $1E-20$ @ 1 day Uncertainty $<1E-20$ , <sup>19</sup> <b>Instability and uncertainty of remote signal is given by local reference</b>	Active frequency cancellation
Frequency transfer (fiber, RF/MW carrier)	Instability: $1E-13$ @ 1s; $1E-17$ @ 1 day, <sup>20</sup> <b>Instability and uncertainty of remote signal is limited/given by local reference</b>	Active frequency cancellation using ELSTAB
Frequency transfer (free-space)	Instability $10^{-15}$ @ 1 day <sup>21</sup>	GNSS Precise Point Positioning (PPP)
Time transfer (fiber)	Instability $\approx 2E-12$ s (2 ps) <sup>22</sup>	Two-way comparison
Time transfer (fiber)	Instability $< 1E-11$ s (10 ps), Uncertainty $< 5E-11$ s (50 ps) <sup>20</sup>	Active phase cancellation using ELSTAB
Time transfer (fiber)	Instability $< 1E-9$ s (1ns), Uncertainty $1.5E-11$ s (15 ps) RMS <sup>23</sup>	White Rabbit with PTP-HA
Time transfer (free-space)	Instability $<1E-8$ s (10ns) @ 1 day	GNSS One-Way Technique
Time transfer (internet)	Instability $10-50E-6$ s (10-50 $\mu$ s), Uncertainty $50-500E-9$ s (50–500 ns) <sup>24</sup>	Precision Time Protocol (PTP) Default

**Table 2: Die Instabilität bezieht sich auf die Reproduzierbarkeit einer Messung oder des Durchschnitts einer Reihe von Messungen; wie gut zwei Zeitsignale synchronisiert werden können, wird durch die Instabilität der Uhren begrenzt. Die Unsicherheit bezieht sich auf das Verhältnis des beobachteten Messergebnisses zu einem "absoluten" korrekten Wert, z.B. im Fall der Zeit auf die Differenz zwischen dem übertragenen Signal und UTC.**

Die Umsetzung der Zeit- und Frequenzübertragung über Glasfasern mit den Spezifikationen in der obigen Tabelle und damit der Zugang zu den Zeit- und Frequenzsignalen, die z.B. von der PTB erreicht werden, ist in Deutschland bisher begrenzt. Es ist davon auszugehen, dass der QTF-Backbone die in der obigen Tabelle dargestellten Zeit- und Frequenzspezifikationen für eine Vielzahl von Nutzern in ganz Deutschland bereitstellen wird.

<sup>19</sup> S. Raupach et. al., "Brillouin Amplification Supports  $1 \times 10^{-20}$  Uncertainty in Optical Frequency Transfer over 1400 Km of Underground Fiber." Physical Review A 92, no. 2 (August 24, 2015). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.92.021801>.

<sup>20</sup> Ł. Śliwczyński et al., "Calibrated optical time transfer of UTC(k) for supervision of telecom networks," *Metrologia*, vol. 56, no. 1, p. 15006, 2018-11, doi: 10.1088/1681-7575/aaef57.

<sup>21</sup> S. Droste, et. al. New J. Phys. 17 (2015) 083044; Petit, G. GPS Solut 25, 22 (2021)

<sup>22</sup> J. Kodet et. al., "Two-Way Time Transfer via Optical Fiber Providing Subpicosecond Precision and High Temperature Stability." *Metrologia* 53, no. 1 (February 1, 2016): 18–26. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/1/18>.

<sup>23</sup> A. Minetto, et. al., "Nanosecond-level Resilient GNSS-based Time Synchronization in Telecommunication Networks through WR-PTP HA," 2023, TechRxiv. Preprint. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.22032446.v1>

<sup>24</sup> IEEE 802.1AS