



**QTF-Backbone**  
für die Quantenzukunft

**Peter Kaufmann (DFN-Verein)**

## **QTF-Backbone:**

**Konzept für eine Deutschland-  
weite F&E-Infrastruktur zur  
Entwicklung von Quanten-  
technologien und hochpräzisen  
Zeit/Frequenz-Anwendungen**



# Inhalt

- Motivation/Ziele
- Anwendungsbeispiele
- Konzept
- Internationale Einordnung
- Umsetzung

# Motivation/Ziele

## Motivation 1:

- Zwei wichtige netztechnische Entwicklungsbereiche auf Grundlage der modernen Physik:
  - ❖ Neue quantenbasierte Techniken: Quantennetze, Quantencomputer, Quantensensorik;
  - ❖ Hochpräzise Zeitmessungen (im Bereich von Genauigkeiten von 1 Min. seit dem Urknall) und stabile Frequenzgenauigkeiten (Time&Frequency);
- Beide Bereiche werden große technische, wirtschaftliche und wissenschaftliche Auswirkungen entfalten, z.B. in:
  - ❖ Sicherer Datenkommunikation,
  - ❖ Überwachung kritischer Infrastrukturen,
  - ❖ Geodynamische Messungen (Vulkanismus, Meeresspiegel, Bodenschätze),
  - ❖ Wissenschaft (Astronomie, Elementarteilchenphysik)

## Motivation 2:

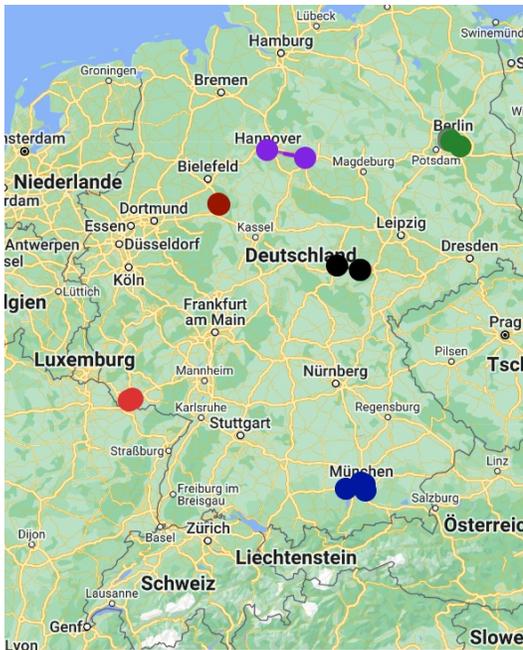
- In beiden Bereichen spielen fasergebundene Kommunikationsnetze eine zentrale Rolle.
- Und es gilt: Es ist nichts „fertig“ und es finden weltweit sehr umfangreiche F&E-Arbeiten statt, samt Übergänge in erste kommerzielle Nutzungen.
- Beide Bereiche haben jeweils spezielle netztechnische Anforderungen an eine Datenübertragung, die entweder hohen Spezialaufwand erfordern oder zu störenden Interaktionen mit der üblichen Datenkommunikation führen kann – zumal bei hochdynamischen F&E-Arbeiten;

## Motivation 3:

- **Erfahrungen:** Im DFN-Betriebsnetz (X-WiN) keine Kapazitäten/Valenzen für besondere Netztechniken (z.B. bi-direktionale Verstärker, aufkommende Quantenanforderungen);
- Quantentechnik und hochwertige T&F bilden wichtige Zukunftstechniken; Noch viel F&E nötig; Viel Know-how in Deutschland verfügbar, mit anwachsenden Netzbedarfen haben;
- **Große Programme:** Weltweit (USA, China, EU) und national; Beispiele aus DE
  - BMFTR-Handlungskonzept vom 26. April 2023;
  - BMFTR-Rahmenprogramm FITS2030 vom 24. Januar 2025;

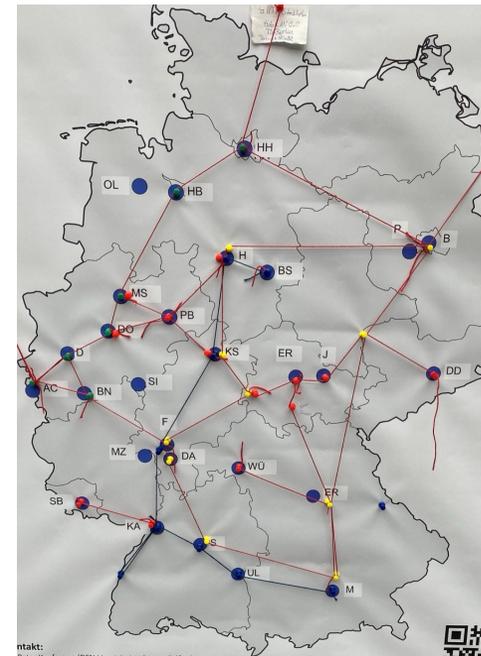
# QTF-Backbone Vision

## von einzelnen Testbeds...



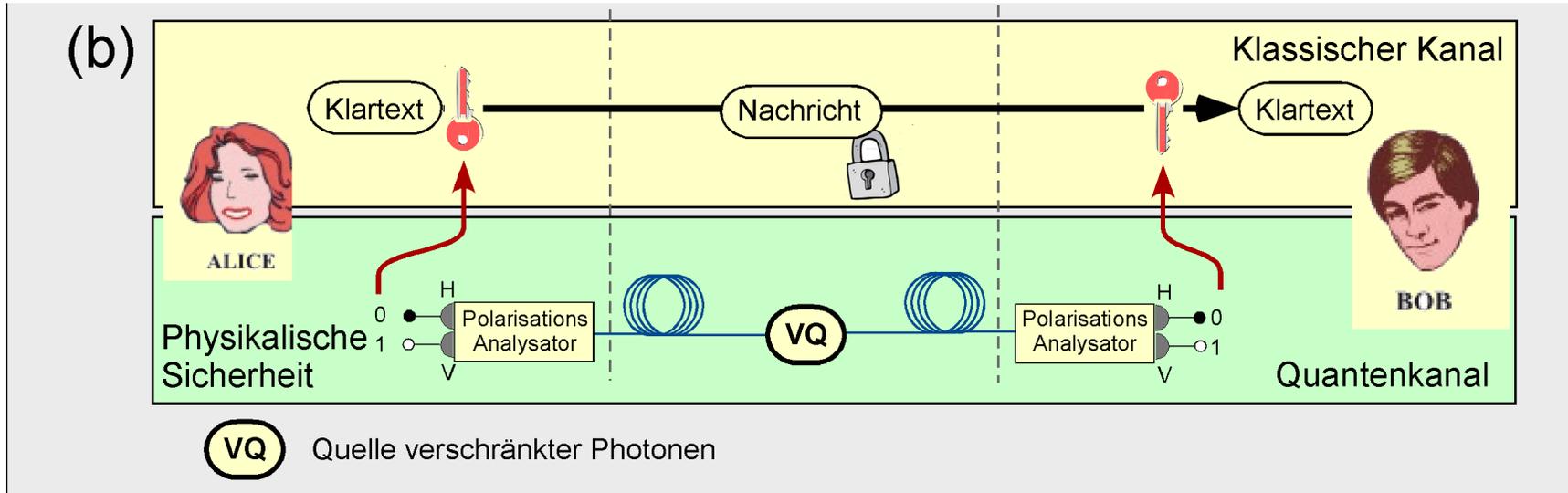
<https://www.squad-germany.de/testbeds/>

## ....zu einem deutschlandweiten, EU-integrierten Netzwerk



# Anwendungsbeispiele

# Anwendung: Sichere Quantenkommunikation, (QKD)



Zufallsschlüssel: ..... 01000111010001111000010101010111010111010010110 .....

# Anwendung: Verteiltes Quanten-Computing

- Kombination von Qu-Computern zur Vergrößerung der Kapazitäten
  - ❖ Früher: Grid-Computing;
  - ❖ Heute: Clouds, HPC-Verbünde;
  - ❖ Morgen: Auch Verteiltes Qu-Computing;
- Blind-Quanten Computing (BQC)
  - ❖ Sicherer remote Zugriff auf Qu-Computer;
  - ❖ Resultate können nur „zu Hause“ gesehen/verstanden werden;

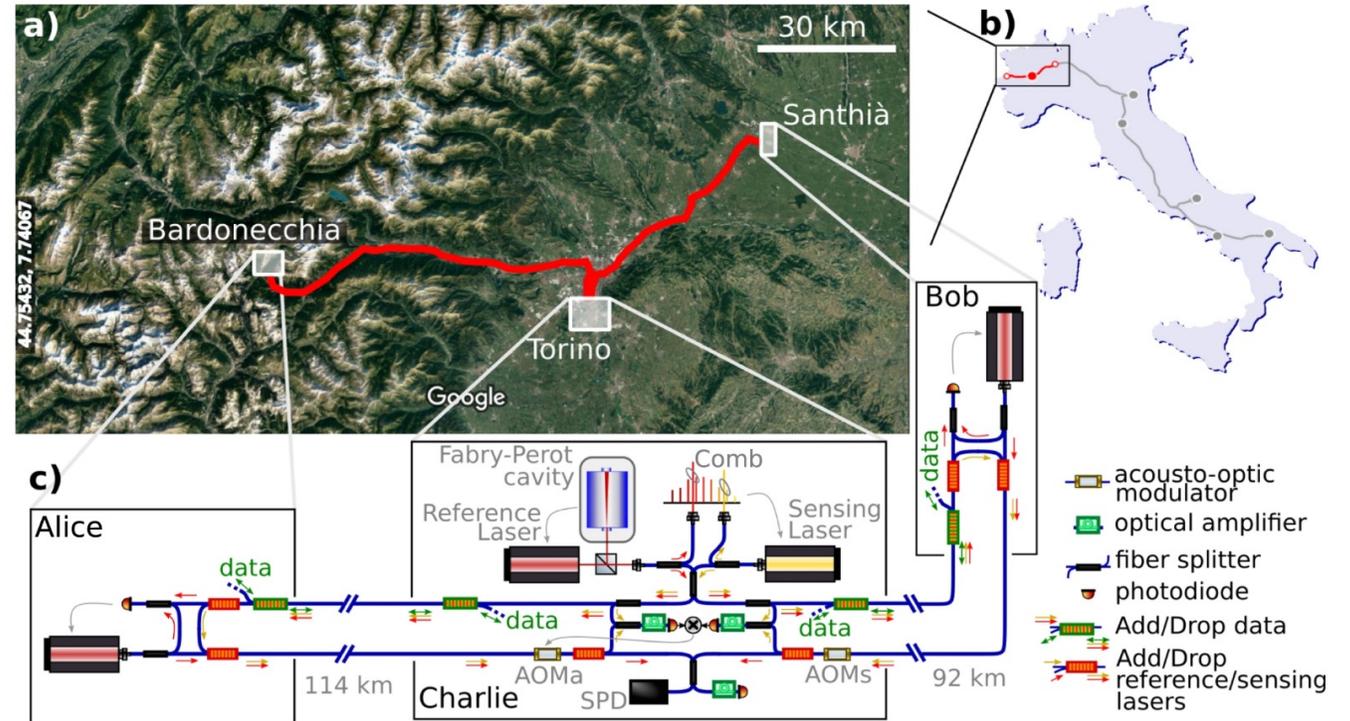
# Anwendung: Quanten-Sensorik

- Eröffnet neue Konzepte für einwirkungsarme und hochpräzise Messungen (Materialanalysen, Medizinische „Aufnahmen“/ „Bildgebungsverfahren“, ...) mittels Verschränkung/Entanglement;
- Der Möglichkeitsraum wird sich erst im Tun entfalten;

# Anwendung: Synergie von Zeit&Frequenzverteilung mit Qu-Kommunikation

## Twin-field QKD:

- Vielversprechende Technik für Langstrecken-Glasfasernetze (Toshiba-GEANT in 2024);
- Erfordert Stabilisierung der optischen Länge der Komm.-Kanäle zwischen den Parteien.
- Daher: Synchronisation von Lasern und Detektoren für reduzierte Quantenbitfehlerraten (hier: Italien)

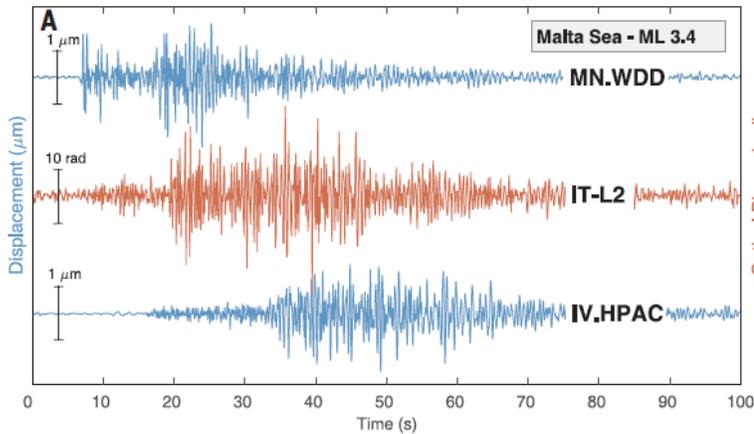


Clivati, C., *et al.* Coherent phase transfer for real-world twin-field quantum key distribution. *Nat Commun* **13**, 157 (2022).

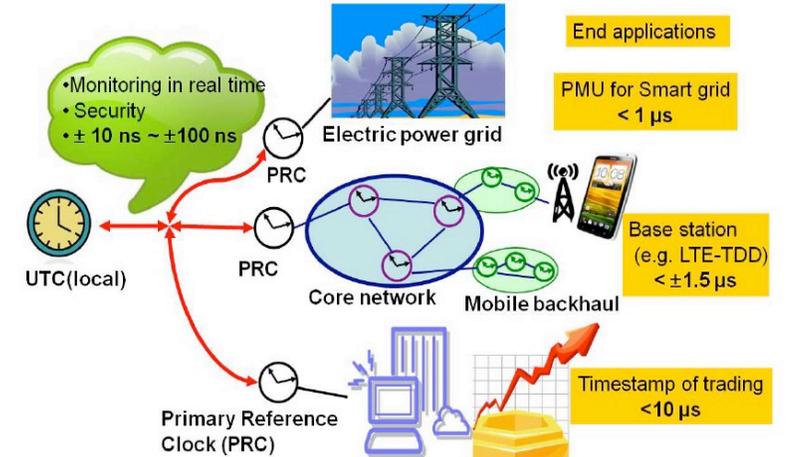
## ***Anwendung: Ein perfektes „Mikrofon“***

- Überwachung von kritischer Infrastruktur (Bauwerke, Glasfasernetze, Energienetze,...).
- Glasfasern: Empfindlich gegenüber physikalischen Störungen wie Temperatur, Dehnung, akustische Vibrationen, Strom, Druck usw.;
- Detektion möglicher Seitenkanalangriffe auf Quantenkommunikationsnetze;
- Verteilte optische Sensorik: orts aufgelöste Messungen entlang eines Glasfaserstrangs, Längenänderungen bis hin zu wenigen  $1\text{E}-15$  m messbar;
- Fiber-Sensing Arbeitsgruppe in GEANT;

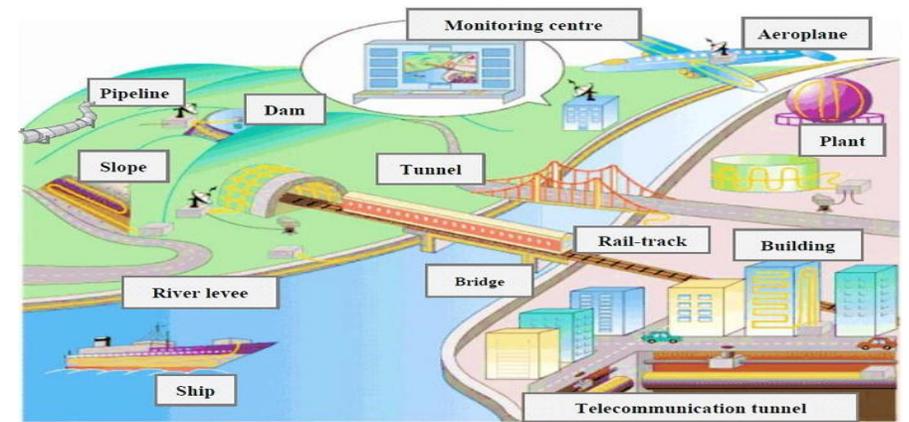
# Critical Infrastructure: Distributed Sensing



Marra, G.; et al.; Ultrastable laser interferometry for earthquake detection with terrestrial and submarine cables *Science*, **2018**, *361*, 486-490



Tseng, DOI: 10.1080/19315775.2013.11721643

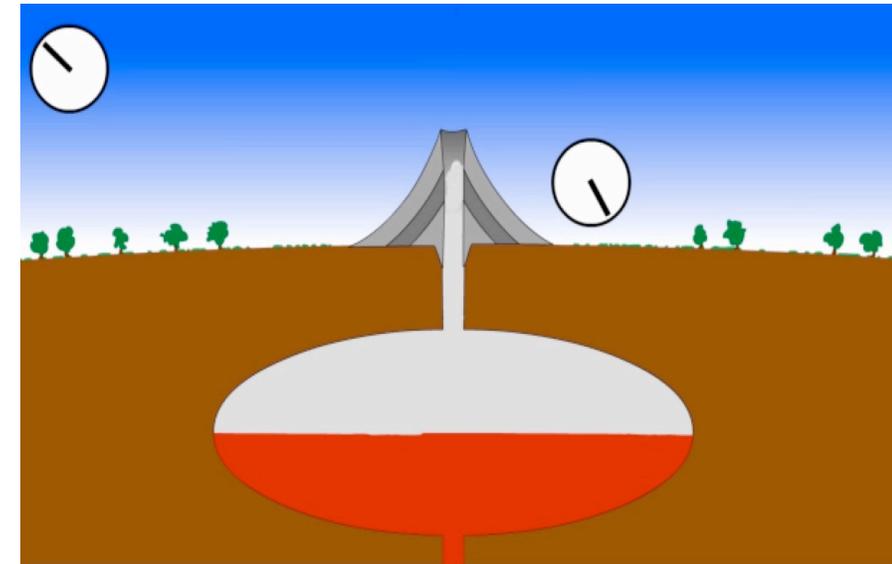
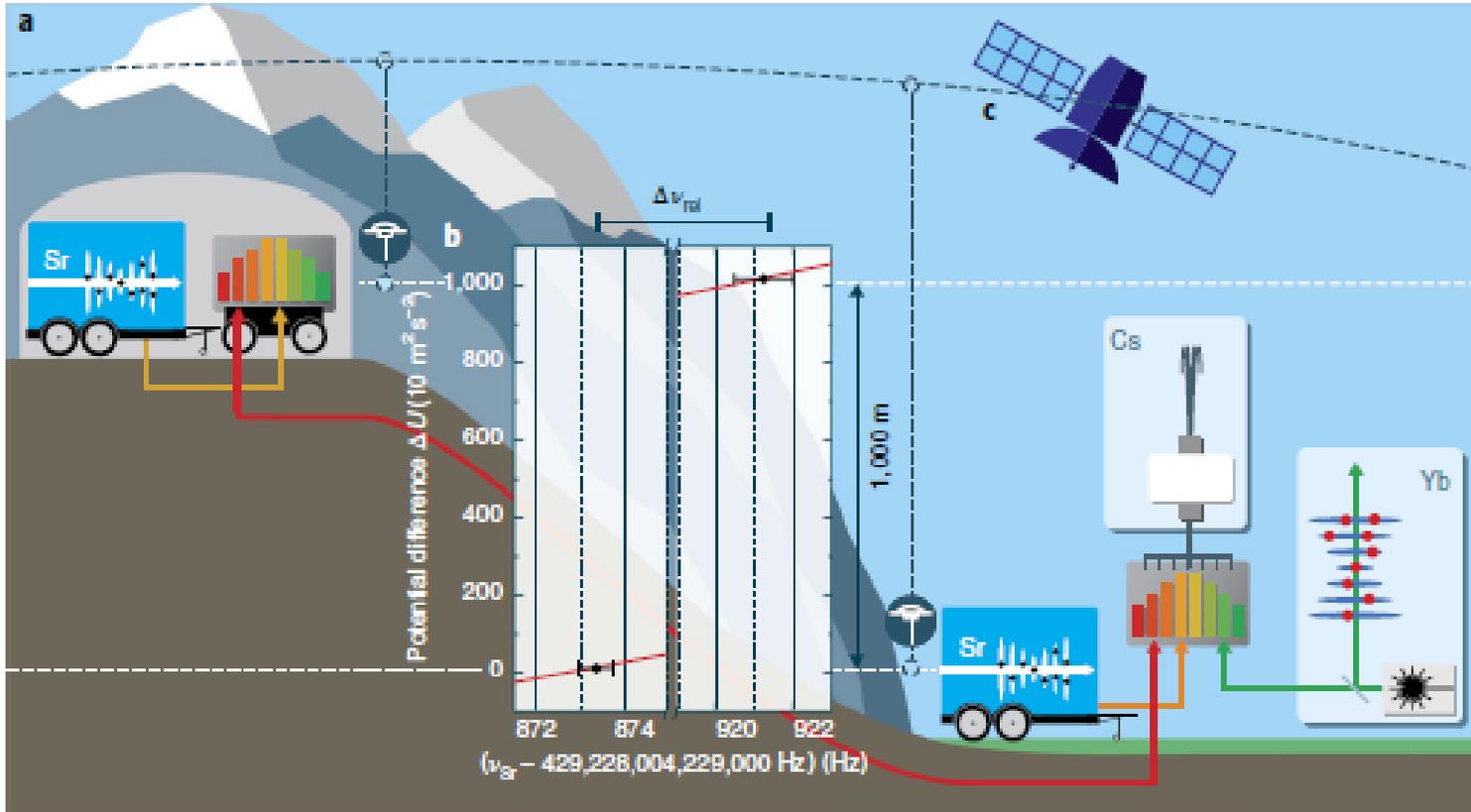


Lu, P., et al.; doi.org/10.1063/1.5113955

# Anwendung: Geodynamische Messungen

- Änderungen der Schwerkraft setzen sich in Änderungen der Zeit um (Allg. Rel. Theorie);
- Uhren mit einem Genauigkeitsbereich von  $10^{-18}$  führen in den Bereich von 1 cm Höhenunterschied im Schwerkraftpotential der Erde;
- Damit lassen sich Massentransportphänomene (Grundwasserspiegel, Anstieg des Meerwasserspiegels, Schmelzen von Eisschilden, Magmabewegungen) oder Bodenstrukturen (Rohstoffe) sehr exakt bestimmen;

# From dm- to cm-Height Systems, Geophysics



R. Bondarescu, et al.; *Geophys. J. Int.* (2015) **202**, 1770–1774

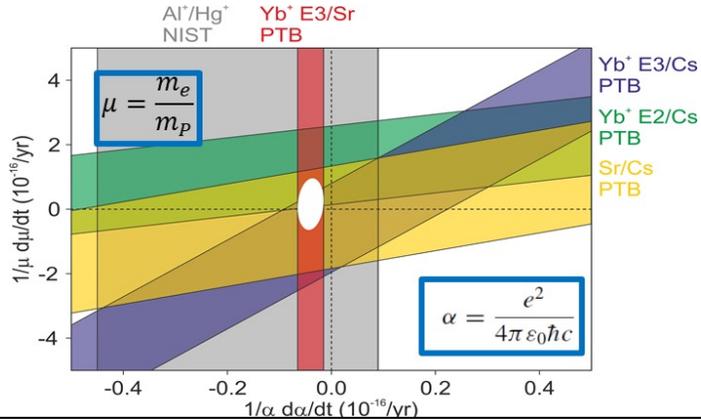
Grotti, J.; et al: *Nature Physics*, **2018**, *14*, 437-441

# Anwendung: Naturwissenschaften (Physik, Astronomie)

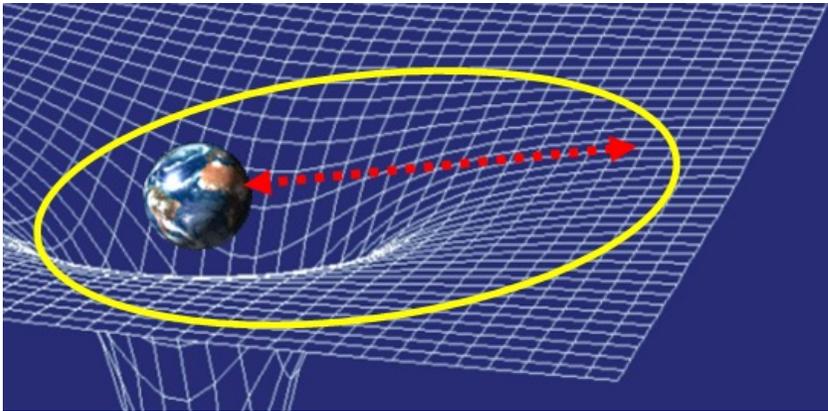
Stabile und genauere Uhren führen zu neuen Bedingungen:

- Steigerung der Genauigkeit der VLBI-Geodäsie (Square Kilometer Array; neues Deutsche Zentrum für Astronomie);
- Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie (Verletzung Lorentz-Symmetrie);
- Zeitliche Variation fundamentaler Konstanten (z.B. dem Massenverhältnis von Elektron und Proton);
- Messung von Gravitationswellen;
- Suche nach „Dunkler Materie“ (Dark Matter);

# Test of Fundamental Physics



N. Huntemann *et al.*, PRL 113, 210802 (2014)



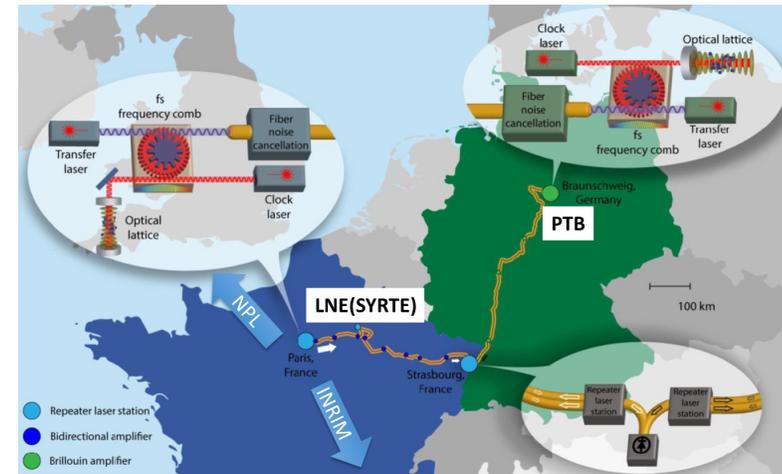
P. Delva, *et al.*; PRL 118, 221102 (2017)

# Searches for dark matter



➤ Variations of the fine structure constant:  $< 5 \times 10^{17}$  (@  $10^3$ s)

B.M. Roberts, *et al.*; New J. Phys. 22 (2020) 093010



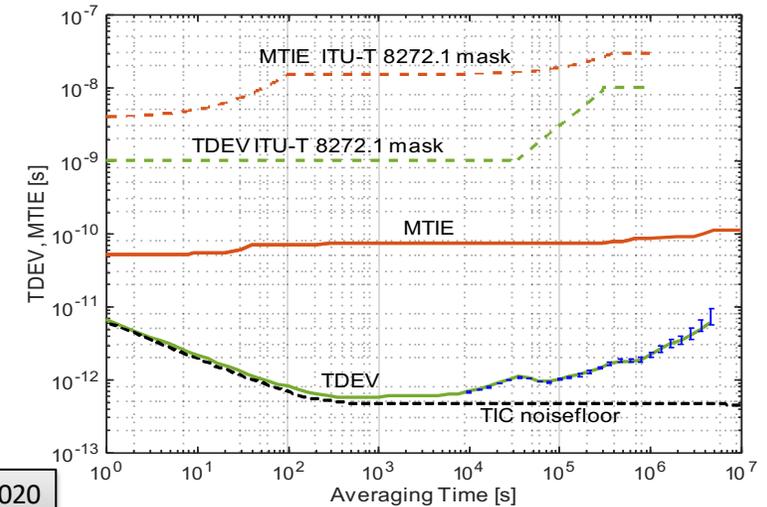
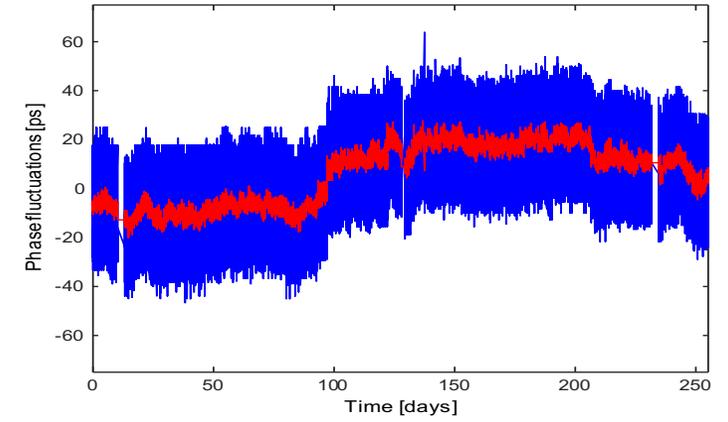
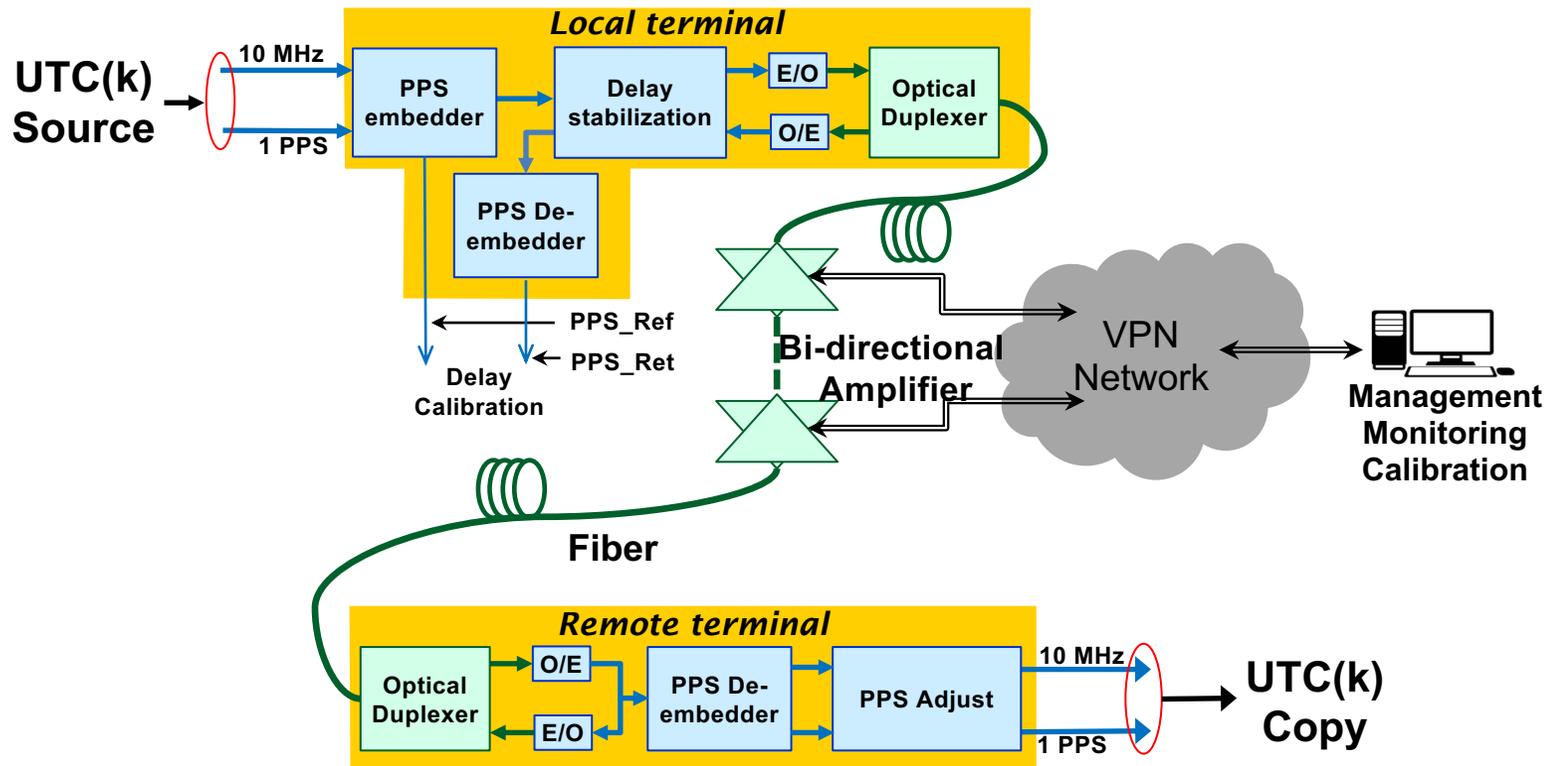
C. Lisdat, *et al.*; Nature Communications 7, 1244 (2016)

# Anwendung: Neudefinition der SI-Sekunde

## (System-International)

Für 2030 geplant, aber nur realisierbar, wenn internationale Vergleiche über Glasfaserverbindungen die erforderlichen Genauigkeiten von  $1\text{E}-18$  über große Entfernungen bereitstellen können.

# Fiber-based UTC-Dissemination



➤ Instability  $\approx 10$  ps over 275 days

➤ Repeatability  $< 30$  ps

L. Sliwczynski *et al.*, *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, pp. 67-73, 2020  
doi: 10.1109/MCOM.001.1900599.

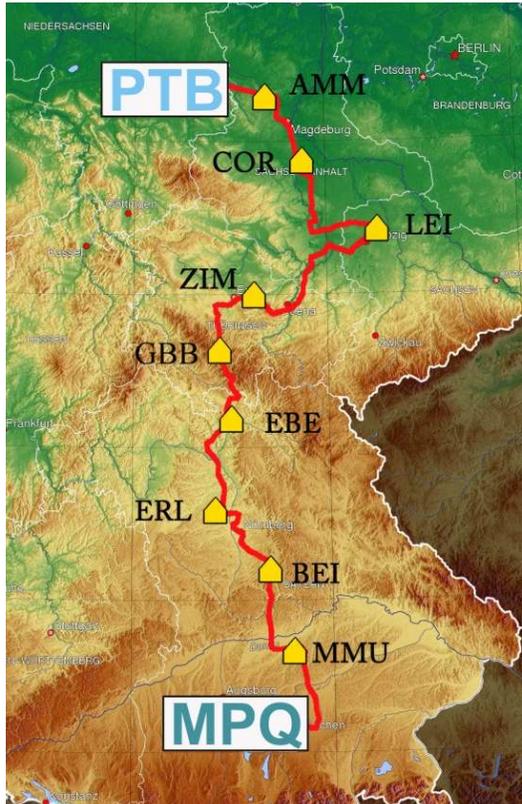
# Anwendung: Infrastrukturelle Anwendungen der Zukunft

- Terrestrische Fasernetze als Sicherheits-Backup zu Satelliten (GNSS);
- Galileo Precise Timing Facility (Ersatz für GPS) gibt Erd-Positionen bis 1 m genau;
- Genauigkeit hängt von der Zeitauflösung (30 cm pro ns) ab;
- Moderne Atomuhren (optische Uhren) sind 2-3 Größenordnungen genauer;  
Daher: Positionen mittels terrestrischer Fasernetze noch genauer;
- Verteilung der koordinierten Weltzeit UTC
  - an Finanzrechenzentren (zur Zeitstempelung von Transaktionen),
  - nachhaltige Energienetze
  - mobiles 5G-Internet ermöglichen.

➤ Neuartige Anwendungen jenseits unserer heutigen Vorstellungen

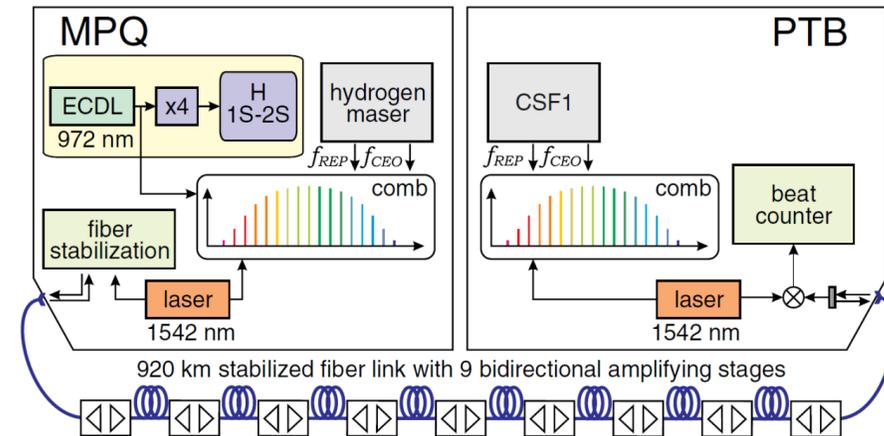
# Über Glasfasern werden die besten Zeit- und Frequenz Signale zugänglich!

## PTB Braunschweig – MPQ Garching (München)



K. Predehl et al., Science **336**, 441 (2012)

### Präzisionsmessungen



Matveev et al., PRL **110**, 230801 (2013)

- Hydrogen 1S-2S Frequency: 2466 061 413 187 018 (11) Hz
- Relative uncertainty:  $4.5 \times 10^{-15}$

# Anwendungsbeispiele im QTF-White Paper

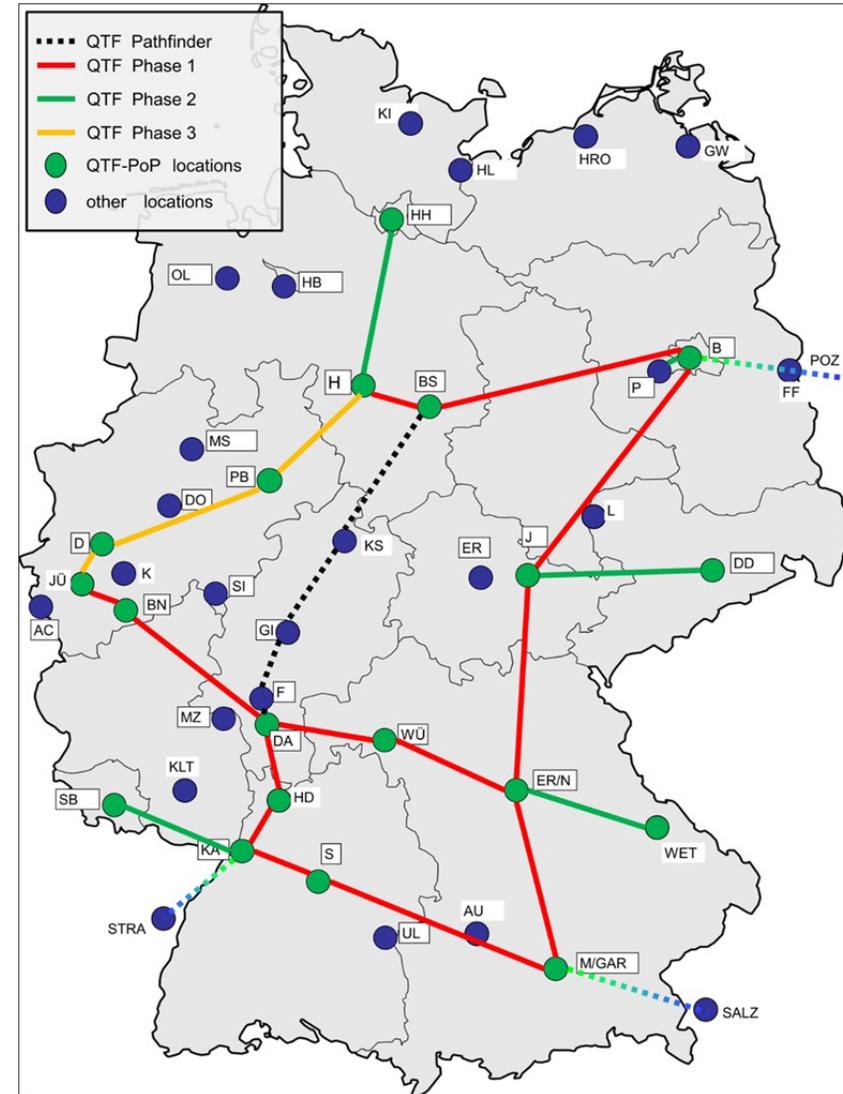
- #1. Secure Quantum Communication and Quantum Repeaters
- #2. Wide-Area Network for Quantum Computing
- #3. Synergy between Time & Frequency Distribution and Quantum Networks
- #4. Precision Measurements in Fundamental Physics
- #5. Infrastructure Monitoring and Seismic Observation through Optical Sensing
- #6. Global Reference Frames for Navigation and Geosciences
- #7. Contributions to a Unified Height System and Gravity Satellite Missions Support
- #8. Enhanced Astronomical Observations through Timekeeping
- #9. Redefinition of the SI Second via Optical Clock Comparisons
- #10. Resilience at Critical Timing Facilities

# Konzept

## Phase model for the implementation

|            | Anzahl der PoPs<br>(ILA-S) | Länge der Glasfaser (km) |
|------------|----------------------------|--------------------------|
| Pfadfinder | 1 (3)                      | 450                      |
| Phase-1    | 12 (tbd)                   | 2300                     |
| Phase-2    | 4 (tbd)                    | 840                      |
| Phase-3    | 2 (tbd)                    | 440                      |
| Summe      | 19 (3 + tbd)               | 4030                     |

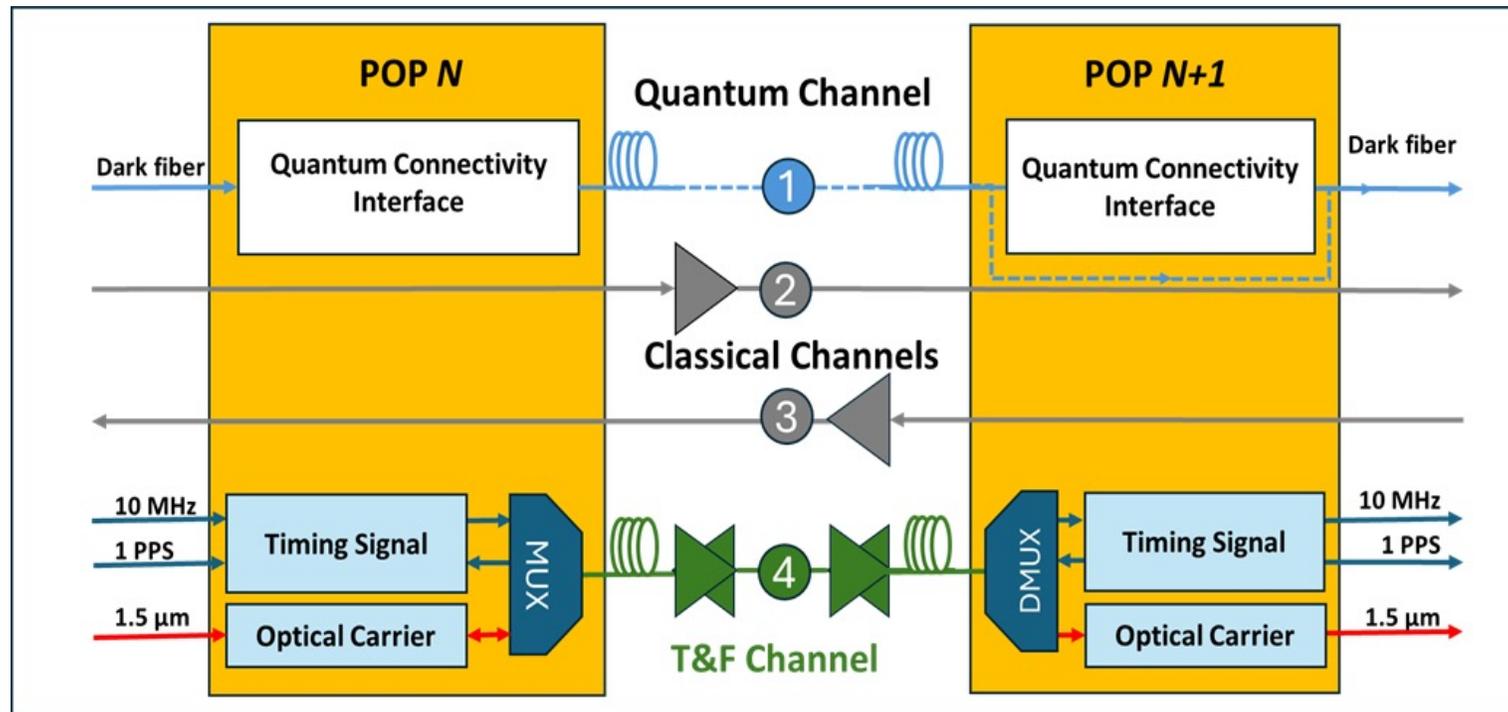
***Tabelle 1: Anzahl der PoPs und geschätzte Verbindungslänge für verschiedene Implementierungsphasen.***



## Operative Vorteile einer QTF-Implementierung

- Stabiles, flexibles Eco-System für F&E und Pilotnutzung in DE;
- Keine/wenige langwierige Faserbeschaffungen für jedes Einzelprojekt;
- Hybride Anwendungen: Kombination Quantum mit klassischen Verfahren wegen mangelnder Reichweite, z.B. Trusted Nodes;
- Neue Ergebnisse/Verfahren ausprobieren, wachsende Reichweiten (z.B. Qu-Repeater) integrieren und in die vorhandene Struktur einbauen.

**Netzwerkschicht: Vier-Faser-Ansatz der zwei PoPs mit separaten Dark Fibres für die Quantenkommunikation und die Zeit- und Frequenzverbreitung verbindet.**



# Übersicht Finanzen

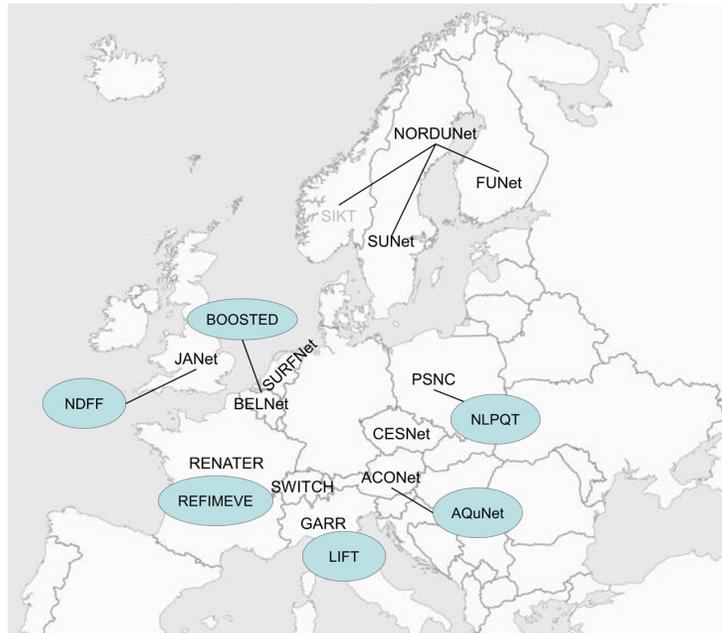
|   |  |
|---|--|
| Nutzer  | Throughout Germany, See: <a href="https://www.ptb.de/cms/nc/qtf-de-backbone/liste-der-unterstuetzer.html">https://www.ptb.de/cms/nc/qtf-de-backbone/liste-der-unterstuetzer.html</a> |
| Finanzierungsbedarf für die Installation:             | 87 Million €   |
| Geplanter Beginn der Installations- und Pilotphase:   | ca. 1 Jahr nach Finanzierungsbestätigung   |
| Dauer der Installations- und Pilotphase:              | 10 Jahre über 4 Phasen   |
| Geplanter Beginn der eingeschwungenen Betriebsphase:  | Nach der 10-jährigen Installations- und Pilotphase   |
| Dauer der eingeschwungenen Betriebsphase:             | 10+ Jahre  |
| Finanzierungsbedarf für den eingeschwungenen Betrieb: | 6 Millionen € p.a.   |

# International

# Internationale Vergleiche zu QTF-DE-Backbone

## Nationale Implementierungen in Europa

- Italien
- Frankreich
- Polen
- Tschechien
- Österreich
- Schweiz
- Belgien
- Niederlande
- Finnland
- Sci
- Un
- ...



Die *enabling Technology* des 20. Jahrhunderts waren Satelliten (GNSS, Kommunikation, Grace/GOCE....)  
 Die *enabling Technology* des 21. Jahrhunderts sind **Glasfasern!**

## Entwicklungen in China

### Beijing-Shanghai Quantum Backbone Network

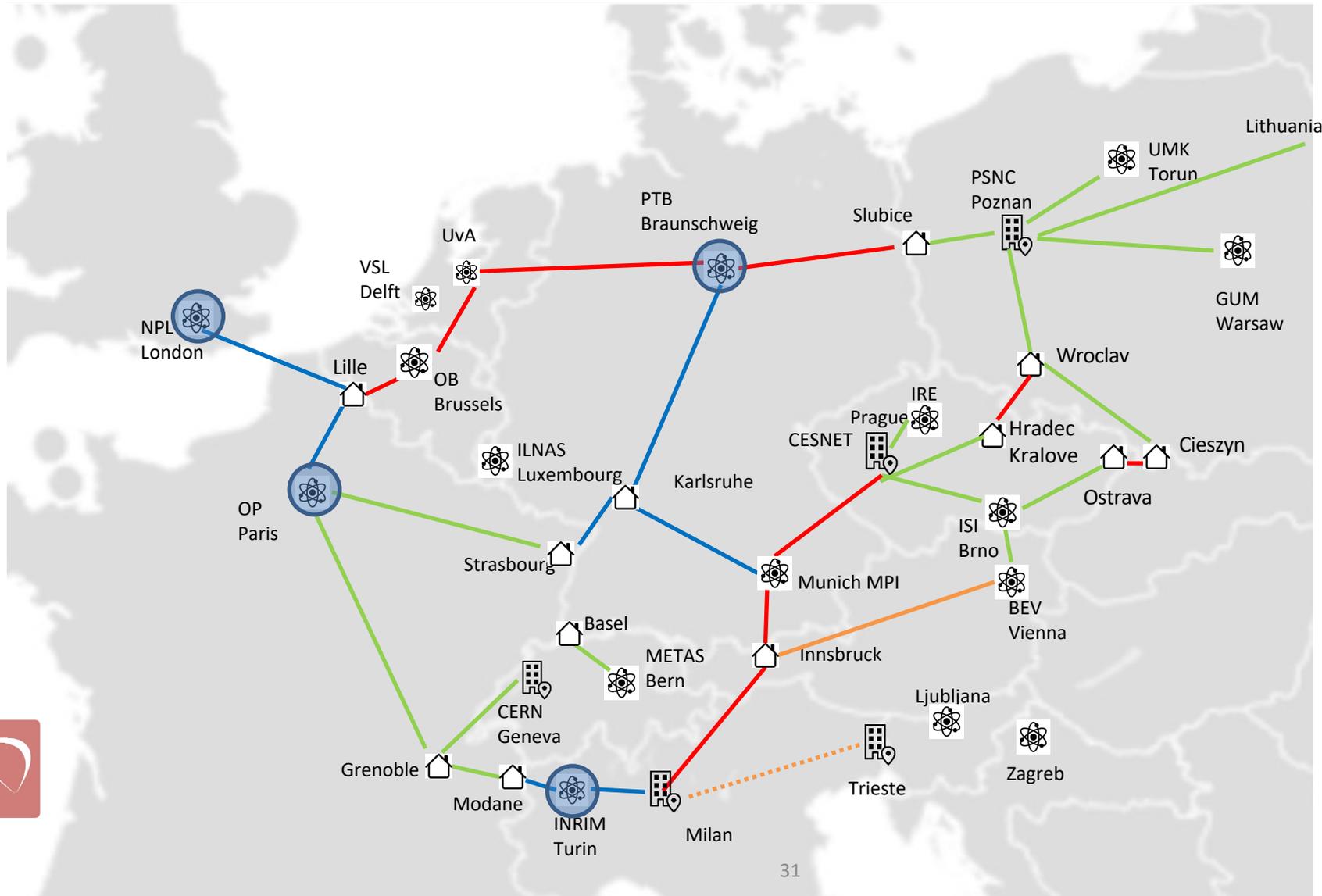


- Total Length 2000 km
- 2013.6-2016.12
- 32 trustable relay nodes
- 31 fiber links
- Metropolitan networks
- Existing: Hefei, Jinan
- New: Beijing, Shanghai
- Customer: ICBC; Xinhua News



illion)  
(0.3 billion)

# GÉANT-Aktivitäten | Netzwerk von Netzwerken



## Solution:

- Red lines are proposed for GN5-2
- These will interconnect national 'islands' of frequency networks
- Support redefinition of the SI second
- Primary users are national frequency reference providers
- Secondary users are research institutes that connect via their national frequency provider

-  NMI Frequency reference
-  Research institute
-  Hut for housing RLS



# Umsetzung

# Förderanforderungen

- Kosten nicht aus Betriebsmitteln/Anschlusskosten vom DFN (oder von anderen F&E-Einrichtungen);
- Gesamtstaatliche Aufgabe und erfordert entsprechende Förderungsmittel (analog wie Aufbau „DFN-Netz“ bis ca. 2002);
- Problem: Vielfalt der Inhalte (Qu-Netz/Computer/Sensorik und Zeit/Frequenz) passt nicht in die spezifischen Förderstrukturen der Ministerien (Forschung, Bildung, Wirtschaft, Inneres,...)
- Einige Kontakte mit BMFTR seit 2024, Verweise auf andere ...
- Suche nach der richtigen „Eingangstür“. Entscheidungen auf höherer Ebene erforderlich!

# Jüngere Aktivitäten

- Vorschlag im „Priorisierungsverfahren für umfangreiche Forschungsinfrastrukturen“, Herbst 2024;
- Formal abgelehnt, da keine finanzielle Eigenbeteiligung angeboten;
- Gespräche im BMFTR;
  
- Erstellung eines QTF-BB-White-Papers;
- Veröffentlichung in aRXiv im Juni 2025, mit großer Unterstützung und Beteiligung;

## Letter-of-Interests

- Adva Network Security GmbH, Berlin
- DFN e.V.
- Fraunhofer Gesellschaft, München
- infosim GmbH, Würzburg
- KEEQuant GmbH, Fürth
- LRZ München
- Nokia GmbH & Co. KG, Nürnberg
- HU Berlin, Institut für Physik
- TU Berlin
- TU München
- Universität Bonn
- Universität Erlangen, Zentrum Nationales Hochleistungsrechnen
- Universität Hannover, Inst-Erdmessung
- Universität Mainz, Inst-Physik
- Universität Paderborn, Inst-Photon. Quantensysteme
- Universität Stuttgart
- Universität Würzburg, Lehrstuhl Technische Physik
- \* DESY
- \* HZ Dresden-Rossendorf
- \* GSI HZ für Schwerionenforschung GmbH
- \* FZ Jülich GmbH
- \* KIT Karlsruhe
- \* Max-Planck-Gesellschaft, München
- \* QuNET
- \* TU Braunschweig
- \* TU Ilmenau
- \* TU München, Inst-Satellitengeodäsie
- \* Universität Düsseldorf, Inst-Experimentalphysik
- \* Universität Hannover, Inst-Festkörperphysik
- \* Universität Hannover, Inst-Quantenoptik
- \* Universität München, Fak-Physik
- \* Universität Saarbrücken
- \* Universität Ulm

Further supporters and information at: <https://www.ptb.de/cms/qtf-de-backbone.html>

# QTF-BB-White Paper, Juni 2025

## List of Authors:

- Klaus Blaum (Max Planck Institute for Nuclear Physics), Peter Kaufmann (German National Research and Education Network, DFN), Jochen Kronjäger (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), Stefan Kück (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), Tara Cubel Liebisch\* (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), Dieter Meschede (University of Bonn), Susanne Naegele-Jackson (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg), Stephan Schiller (Heinrich Heine University Düsseldorf), Harald Schnatz (Physikalisch-Technische Bundesanstalt)

## List of Contributors:

- Laura Agazzi (German Aerospace Center, DLR), Soroosh Alighanbari (Heinrich Heine University Düsseldorf), Joachim Ankerhold (University of Ulm), Georgy Astakhov (Helmholtz Center Dresden Rossendorf), Christoph Becher (Saarland University), Hendrik Bekker (University of Mainz), Oliver Benson (Humboldt University of Berlin), Ulrike Blumröder (Technische Universität Ilmenau), Enrico Brehm (DESY), Dagmar Bruss (Heinrich Heine University Düsseldorf), Dmitry Budker (University of Mainz), José R. Crespo López-Urrutia (Max Planck Institute for Nuclear Physics), Christian Deppe (TU Braunschweig), Fei Ding (Leibniz Universität Hannover), Wolfgang Ertmer (Leibniz Universität Hannover), Marc Fischer (Menlo Systems GmbH), Jakob Flury (Leibniz Universität Hannover), Johann Furthner (German Aerospace Center, DLR), Andreas Gritsch (Technical University of Munich), Tobias Heindel (Technische Universität Berlin), Luis Hellmich (DESY), Bruno Hoefft (Karlsruhe Institute of Technology), Sven Höfling (University of Würzburg), Ronald Holzwarth (Max Planck Institute for Quantum Optics, Menlo Systems GmbH), Urs Hugentobler (Technical University of Munich), David Hunger (Karlsruhe Institute of Technology), Nils Huntemann (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), Fedor Jelezko (University Ulm), Klaus Jöns (Paderborn University), Philippe Jousset (GFZ Helmholtz Centre for Geosciences), Jonas Kankel (DESY), Thomas Klügel (Federal Agency for Cartography and Geodesy), Uwe Konrad (Helmholtz Center Dresden Rossendorf), Michael Kramer (Max Planck Institute for Radio Astronomy), Markus Krutzik (Ferdinand-Braun-Institut), Gerd Leuchs (MPI for the Science of Light, Erlangen), Christian Lisdat (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), Yuri Litvinov (GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research), Peter van Loock (University of Mainz), Christoph Marquardt (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg), Tanja Mehlstäubler (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Leibniz Universität Hannover), Peter Micke (GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research), Jürgen Müller (Leibniz Universität Hannover), Ekkehard Peik (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), Thomas Pfeifer (Max Planck Institute for Nuclear Physics), Ernst Maria Rasel (Leibniz Universität Hannover), Helmut Reiser (Leibniz Supercomputing Centre, LRZ), Andreas Reiserer (Technical University of Munich), Manfred Rieck (Deutsche Bahn AG), Stephan Ritter (TOPTICA Photonics AG), Lakshmi Priya Kozhiparambil Sajith (DESY), Vera Schäfer (Max Planck Institute for Nuclear Physics), Piet O. Schmidt (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Leibniz Universität Hannover), Steffen Schön (Leibniz Universität Hannover), Ulrich Schreiber (Technical University of Munich), Harald Schuh (GFZ Helmholtz Centre for Geosciences), Henrik Schulz (Helmholtz Zentrum Rossendorf), Ullrich Schwanke (Humboldt University of Berlin), Christine Silberhorn (Paderborn University), Christian Smorra (Heinrich Heine University Düsseldorf), Nicolas Spethmann (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), Simon Stellmer (University of Bonn), Uwe Sterr (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), Thomas Stöhlker (Helmholtz Institute Jena), Jürgen Stuhler (TOPTICA Photonics AG), Sven Sturm (Max Planck Institute for Nuclear Physics), Stefan Ulmer (Heinrich Heine University Düsseldorf), Tobias Vogl (Technical University of Munich), Thomas Walther (Technical University of Darmstadt), Harald Weinfurter (Ludwig Maximilian University of Munich), Lars von der Wense (University of Mainz), Fabian Wolf (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), Steven Worm (DESY), Yang Yang (DESY), Michael Zopf (Leibniz Universität Hannover)

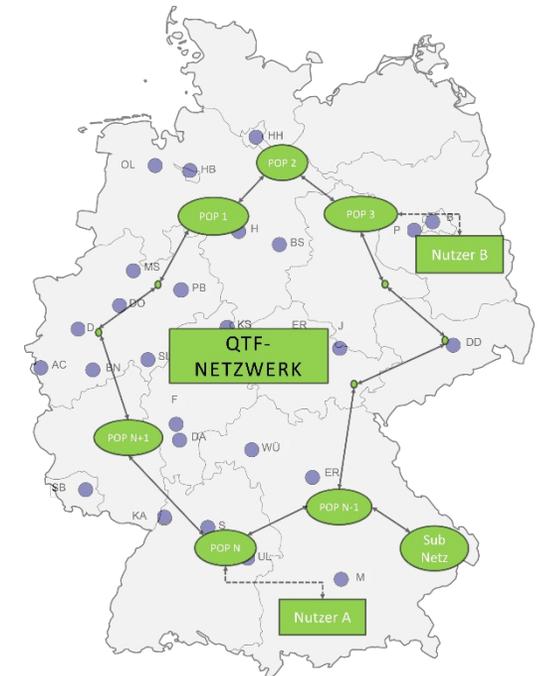
## List of Supporters:

- Rene Baas (Deutsche Telekom AG), Stefanie Barz (University of Stuttgart), Immanuel Bloch (Max Planck Institute for Quantum Optics), Johannes Bouman (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie), Ralf-Peter Braun (Network Consultant), Tommaso Calarco (Forschungszentrum Jülich GmbH), Thomas Eickermann (Forschungszentrum Jülich GmbH), Helmut Griebner (ADVA), Thomas Halfmann (Technical University of Darmstadt), Andreas Hanemann (Technical Hochschule Lübeck), Harald Hofmann (German Aerospace Center, DLR), Peter Holleczek (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg), Oliver Holschke (Deutsche Telekom AG), Franz Kärtner (DESY), Heike Kaufmann (German National Research and Education Network, DFN), Imran Khan (KEEQuant GmbH), Carsten Klempt (German Aerospace Center, DLR), Jan Kodet (Technical University of Munich), Peter Michler (University of Stuttgart), Martin Migura (German National Research and Education Network, DFN), Wilfried Nörtershäuser (GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research), Ralf Paffrath (German National Research and Education Network, DFN), Achim Peters (Humboldt University of Berlin), Randolf Pohl (University of Mainz), Fritz Riehle (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), Roman Schnabel (University of Hamburg), Peter Thirolf (Ludwig Maximilian University of Munich), Thomas Udem (Max Planck Institute for Quantum Optics), Christian Weinheimer (University of Münster), Lisa Wörner (German Aerospace Center, DLR)

Published at: <https://arxiv.org/abs/2506.03998>

## Zusammenfassung der Initiative für einen deutschen QTF-Backbone

- **Verteiltes Großgerät/Großwerkzeug („Eco-System“)** für die Erforschung/Entwicklung/Pilotnutzung von Anwendungen für Quantum (Q) und Zeit/Frequenz (TF);
- **Perspektive für eine Dekade (oder mehr);**
- **DFN-Verein betreibt dediziertes Glasfasernetz;**  
(Ergänzung zum „normalen“ deutschen Wissenschaftsnetz (X-WiN))
- **Integration vorhandener Strukturen und Länder-Initiativen;**
- **Anbindung diverser F&E-Nutzer (öffentl./kommerz.) in ganz DE;**
- **Interface zu Europa, Deutschland bleibt kompetitiv**  
(Europäische Fasernetze, EuroQCI, CLONETS-DS GÉANT);



## Weltweite politische/ökonomische Entwicklungen:

- Sicherheitsaspekte (zivil, militärisch)
  - Technologische Souveränität für DE/EU
  - Ökonomische Souveränität für DE/EU
- 
- **Preiswertes Vorhaben im allgemeinen Zielkanon  
„die Zukunft gestalten“**

## ➤ **Hilfe/Unterstützung sind sehr willkommen**

### **QTF-BB-Kernteam:**

Klaus Blaum (MPI-HD), Peter Kaufmann (DFN), Jochen Kronjäger (PTB),  
Stefan Kück (PTB), Tara Cubel Liebisch (PTB), Dieter Meschede (Uni-Bonn),  
Susanne Naegele-Jackson (Uni-Erlangen-Nürnberg),  
Stephan Schiller (Uni-Düsseldorf), Harald Schnatz (PTB)

### **Kontakte:**

- Initiative für einen QTF-BB: <https://www.ptb.de/cms/en/qtf-de-backbone.html>
- Mail an die QTF-BB-Gruppe: [qtf-bb-info@listserv.dfn.de](mailto:qtf-bb-info@listserv.dfn.de)
- QTF-BB-WhitePaper (veröffentlicht bei arXiv) vom Juni 2025:  
<https://arxiv.org/abs/2506.03998>

# ZUSATZFOLIEN

# BMBF-26. April 2023: Quantentechnologien-Handlungskonzept-S28

## 5. Meilensteine und Mittelplanung

Der Erfolg des Handlungskonzepts wird an Meilensteinen gemessen, die als forschungspolitische Ebene der Zielerreichungskontrolle dienen. Sie werden regelmäßig überprüft und bei Bedarf der dynamischen Entwicklung des internationalen Forschungsfelds angepasst. Zum Ende der Laufzeit des Handlungskonzepts **im Jahr 2026** sollen in Deutschland je nach Technologiestrang folgende Meilensteine erreicht sein:

### > Quantencomputing

Ziel ist, dass Deutschland technologisch zu den führenden Akteuren im Quantencomputing außerhalb der EU aufschließt....

Ergänzend soll der **Vernetzungsgrad der Unternehmen** im Ökosystems erfasst werden im Sinne, mit wie vielen Unternehmen oder wissenschaftlichen Partnern besteht im Durchschnitt eine Kooperation oder sonstige wirtschaftliche Vernetzung wie Kapitalbeteiligungen, Ausgründungen usw.

### > Quantensensorik:

Im **Jahr 2026** soll In Deutschland folgender Entwicklungsstand erreicht sein:

- **Fünf neue Produkte in der Quantensensorik am Markt, sowie**
- **Optische Uhren, die die Anforderungen der nächsten Generation der Galileo-Uhren erfüllen.**

### > Quantenkommunikation und Post-Quanten-Kryptografie:

In der Quantenkommunikation und der Post-Quanten-Kryptografie will die Bundesregierung **bis 2026** folgende Meilensteine erreichen;

- **Realisierung eines bundesweiten Glasfaser-Backbones für die Quantenkommunikation und die Zeit- und Frequenzverteilung.**

- **BDI fordert Mittel für Quantencomputer** (veröffentlicht am 11.08.2023, TSp)
  - Der Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) fordert die Bundesregierung dazu auf, Mittel freizumachen, um einen deutschen Quantencomputer aufzubauen. Zuletzt war bekannt geworden, dass die Ampelkoalition die Mittel für das Quantencomputing massiv kürzen will. Der BDI fürchtet deshalb eine Förderlücke.
  - Zwar begrüße der Verband, dass die Bundesregierung bis 2026 insgesamt 2,18 Milliarden Euro investieren möchte, um die Quantentechnologie weiterzuentwickeln. Der Finanzplan bis 2027 stehe jedoch im Widerspruch dazu. Dass in der Haushaltsaufstellung für das Jahr 2024 knapp 200 Millionen Euro für den Bau eines deutschen Quantencomputers fehlen, hemme den Aufbau eines erst entstehenden Quantenökosystems in Deutschland in einer kritischen Phase.
  - Der Verband fordert mit Blick auf das entsprechende Handlungskonzept der Regierung (<https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230426-handlungskonzept-quantentechnologien.html>) einen konkreten Fahrplan, der die geplanten Ausgaben für die Technologie bis 2026 enthält und mittels Zielvorgaben Fortschritte messbar macht. „Das Handlungskonzept darf **keine Liste von Einzelaktivitäten sein, sondern muss die Elemente des Quantenökosystems – Fachkräfte, Infrastruktur, anwendungsbezogene Use Cases – strategisch miteinander verbinden**“, sagte Iris Plöger, Mitglied der BDIHauptgeschäftsführung.
  - Das in dem Handlungskonzept genannte Arbeitsgremium müsse aus ihrer Sicht mit Expert:innen aus Wirtschaft und Wissenschaft besetzt werden und brauche eine wirksame Koordinierungsfunktion. Ebenso betonte Plöger,
    - **regionale Cluster der Quantentechnologie müssten strategisch untereinander vernetzt werden.**

## **BMBF-Rahmenprogramm: „Forschung und Innovation für Technologische Souveränität 2030“ (FITS2030, veröffentlicht 24. Januar 2025)**

S.11: „Im Zentrum der BMBF-Aktivitäten zur Stärkung der digitalen und technologischen Souveränität Deutschlands und der EU steht die Förderung von innovativen und exzellent vernetzten **Deep-Tech-Innovationsökosystemen.**“

S.14: “Innovationsförderung lassen sich vom Gedanken innovativer Ökosysteme leiten. Deep-Tech-Innovationsökosysteme decken die gesamte Innovationskette von der Grundlagenforschung bis zur Anwendung in Forschungsfabriken und Experimentierräumen ab.

...

Das wichtigste Instrument ist dabei die vorwettbewerbliche **Projektförderung in transdisziplinären Konsortien**, um Forschende mit Anwendern zu vernetzen. Aber auch der Aufbau von Infrastrukturen, Angebote an Startup-Inkubatoren, ...“.

S.15: “Das Hauptaugenmerk liegt auf den Deep-Tech-Aspekten von Digitalität wie bspw. im Bereich der Quantentechnologien, Mikrochips und KI-Algorithmen.“

## BMBF-26. April 2023: Quantentechnologien-Handlungskonzept-S28

### 5. Meilensteine und Mittelplanung

Der Erfolg des Handlungskonzepts wird an Meilensteinen gemessen, die als forschungspolitische Ebene der Zielerreichungskontrolle dienen. Sie werden regelmäßig überprüft und bei Bedarf der dynamischen Entwicklung des internationalen Forschungsfelds angepasst. Zum Ende der Laufzeit des Handlungskonzepts **im Jahr 2026** sollen in Deutschland je nach Technologiestrang folgende Meilensteine erreicht sein:

#### > Quantencomputing

**Ziel ist, dass Deutschland technologisch zu den führenden Akteuren im Quantencomputing außerhalb der EU aufschließt.** Dabei geht es primär um Wettbewerbsfähigkeit im rein technischen Sinne wie die Verfügbarkeit von Quantenhardware, deren Leistungsfähigkeit sowie eine Potenzialschätzung für die Skalierung, Fehlerrate und Fehlerkorrektur. Zu den messbaren technologischen Zielen gehören **im Jahr 2026**:

- . Verfügbarkeit eines international wettbewerbsfähigen Quantenrechners mit mindestens 100 individuell ansteuerbaren Qubits, skalierbar auf 500 Qubits.
- . Entwicklung leistungsfähiger Spezialhardware für geeignete Anwendungsfelder des Quantencomputing.
- . **Darüber hinaus soll die technoökonomische Entwicklung des unternehmerischen Ökosystems für Quantencomputing in Deutschland innerhalb der EU zu den Top Drei gehören und mindestens das Niveau von wichtigen außereuropäischen Industriestaaten wie den USA oder Japan erreichen. Zugehörige quantitative Indikatoren umfassen**
  - \* Umsätze, Mitarbeiterzahl und Profitabilität kumuliert über die Unternehmen des Ökosystems in Deutschland
  - . Entwicklung der Patentzahl mit Bezug zu Quantencomputing durch Unternehmen des Ökosystems und durch deutsche Forschungseinrichtungen
  - . Grad der Abdeckung von QC-relevanten Technologiezweigen durch Unternehmen des Ökosystems

**Ergänzend soll der Vernetzungsgrad der Unternehmen im Ökosystem erfasst werden im Sinne, mit wie vielen Unternehmen oder wissenschaftlichen Partnern besteht im Durchschnitt eine Kooperation oder sonstige wirtschaftliche Vernetzung wie Kapitalbeteiligungen, Ausgründungen usw.**

- . Im Quantencomputing sind mindestens 60 Endanwender in Deutschland aktiv, unter anderem in Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft.

#### > Quantensensorik:

In der Quantensensorik will die Bundesregierung die vielversprechenden technologischen Entwicklungen in Wirtschaft, Gesellschaft und staatlichen Institutionen in die Anwendung bringen. Im **Jahr 2026** soll in Deutschland folgender Entwicklungsstand erreicht sein:

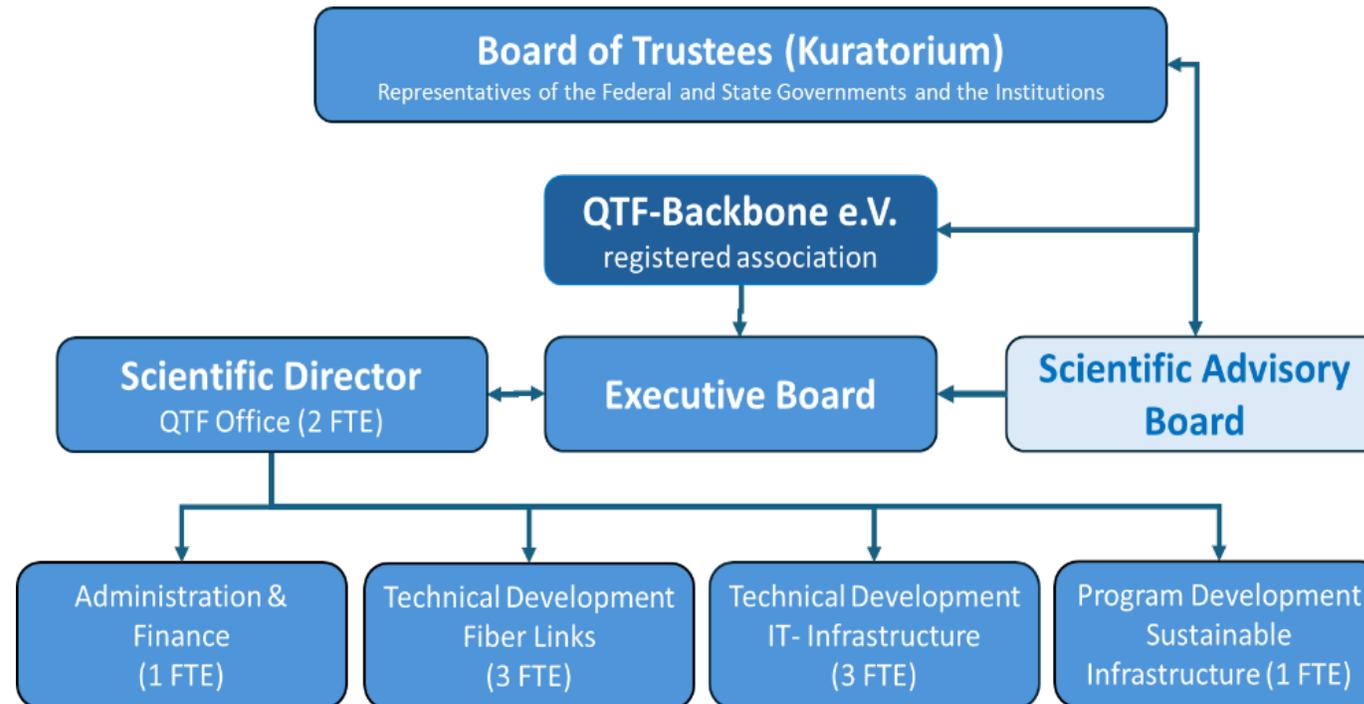
- . **Fünf neue Produkte in der Quantensensorik am Markt, sowie**
- . **Optische Uhren, die die Anforderungen der nächsten Generation der Galileo-Uhren erfüllen.**

#### > Quantenkommunikation und Post-Quanten-Kryptografie:

In der Quantenkommunikation und der Post-Quanten-Kryptografie will die Bundesregierung **bis 2026** folgende Meilensteine erreichen;

- . Etablierung von ersten abhörsicheren, d.h. quantenverschlüsselten, Kommunikationsteststrecken zwischen ausgewählten Behördenstandorten.
- . Weitere Start-ups/Firmen sind im Bereich der Quantenkommunikation in Deutschland gegründet
- . **Realisierung eines bundesweiten Glasfaser-Backbones für die Quantenkommunikation und die Zeit- und Frequenzverteilung.**

## Organisatorische Struktur des QTF-Backbone e.V.



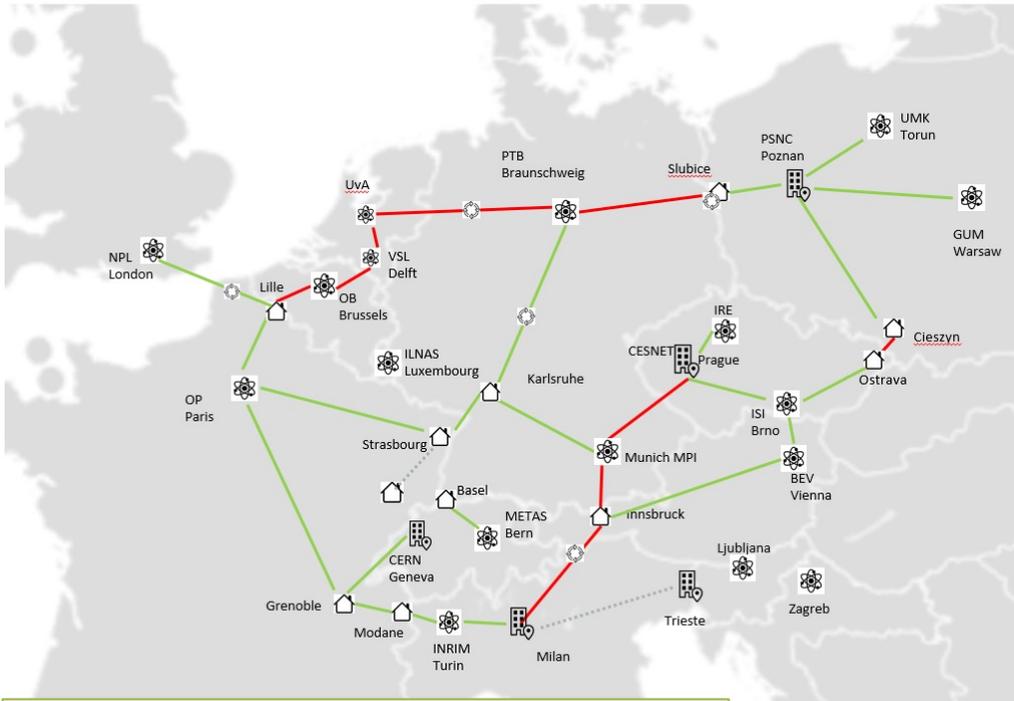
## Quanten-Computer in Deutschland

- FZ Jülich
- LRZ München
- Ebingen/IBM (bei Ulm)
- ....

# QTF-Backbone trägt zu EU-Initiative bei

## Mögliche GÉANT Infrastruktur

Proposed C-TFN: Option A



**QTF-Backbone wird integriert**

## EuroQCI

**DECLARATION ON A  
QUANTUM COMMUNICATION  
INFRASTRUCTURE  
FOR THE EU**

**All 27 EU Member States** have signed a declaration agreeing to **work together** to explore how to build a **quantum communication infrastructure (QCI)** across Europe, boosting European capabilities in quantum technologies, cybersecurity and industrial competitiveness.



**QTF-Backbone hilft Konzepte zu klären**

## Folgerung/Ziele:

- In Ergänzung zum „normalen“ deutschen Wissenschaftsnetz eine zusätzliche/separate Glasfaservernetzung („QTF-Backbone“) für die Erforschung, Entwicklung und Nutzung von Anwendungen in den Bereichen Quantentechnologien und Zeit-&Frequenzsignale;
- Finanziert vom Bund (und eventuell einigen Ländern);
- Betrieben vom DFN-Verein (mit lokaler Kooperation), ohne Beeinträchtigung der „normalen“ Datenkommunikation;
- Mittelfristiger Zeitrahmen: Eine Dekade;

## QTF-Backbone Vision

### Ziele:

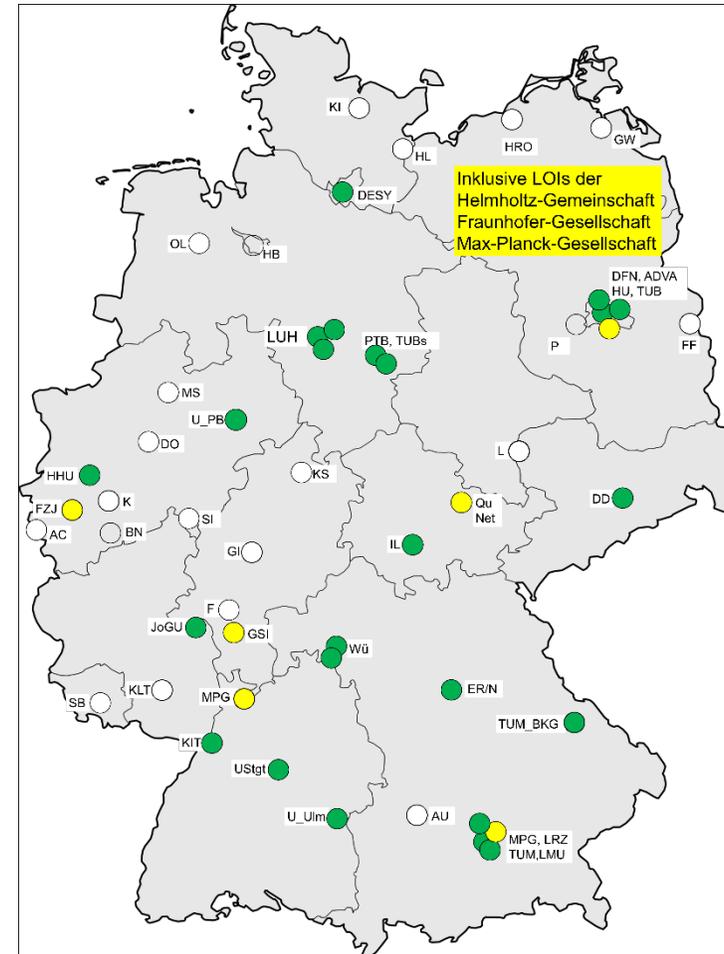
- die Erforschung und Entwicklung von Anwendungen in den Bereichen QTF
- Stimulierung von Innovationen dieser Technologien in der Industrie ermöglichen

### Praktische Umsetzung:

- Angemietete Dunkle Glasfaserpaare
- Der DFN-Verein betreibt ein dediziertes Glasfasernetz („QTF-DE-Backbone“)

## Bestehende Aktivitäten

- LOIs (von 30 Stakeholdern, weitere werden erwartet)
- Erfassung des „Status quo“ der PoPs: Adressen, Einrichtungen, Räume
- 1 Seite F&E-Projektbeschreibungen bzw. Anwendungsfälle werden von Stakeholders erarbeitet
- Gründung des QTF-Backbone e.V.
- Konzeptpapier (White Paper) für eine deutschlandweite FIS, QTF-Backbone
- Internationale Verbindungen sichern (Zusammenarbeit mit GÉANT, ESFRI-Antrag "FOREST")
- Implementierung von Testbeds für Q+TF
- Vorschlag für SQuaD: Aufbau von Verbindungen für Twin-Field-QKD, verschränkungsbasierte QKD und CV-QKD zusammen mit der Telekom (Nutzung von Q+TF)



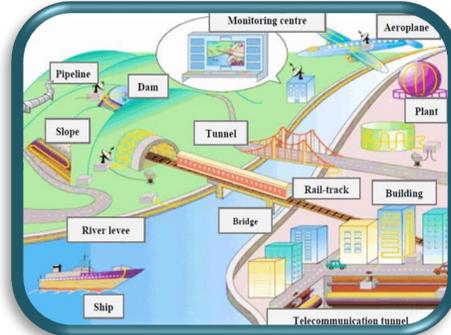
# F&E braucht bessere Uhren/Referenzfrequenzen

## Quantenkommunikation



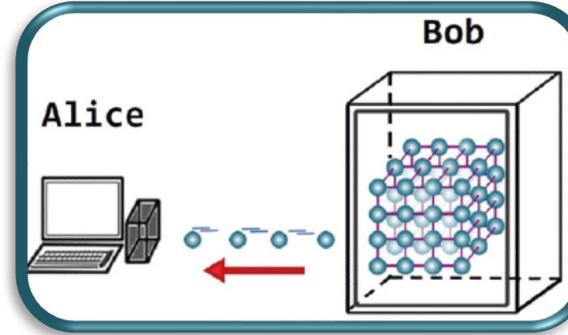
[https://qusco-itn.eu/wp-content/uploads/2019/07/sha\\_re\\_image.jpg](https://qusco-itn.eu/wp-content/uploads/2019/07/sha_re_image.jpg)

## Verteilte Sensorik



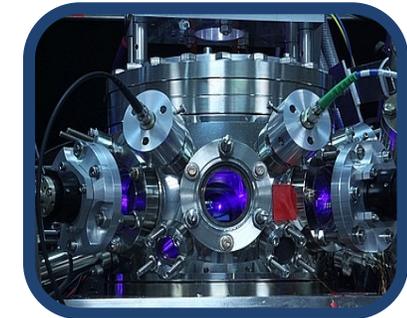
Lu, P., *et al.*; [doi.org/10.1063/1.5113955](https://doi.org/10.1063/1.5113955)

## Quanteninternet



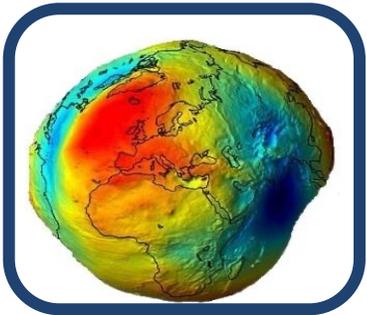
C. Greganti, *et al.*; *New J. Phys.* 18 (2016) 013020  
<https://quantuminternetalliance.org/>

## Präzisionsmessungen



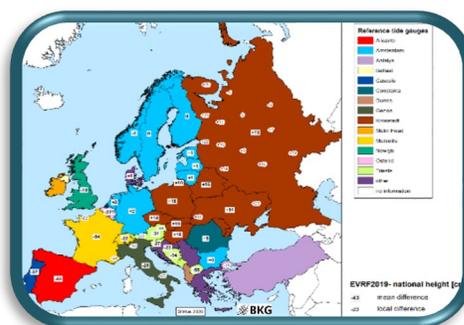
<https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt4/fb-43/ag-432.html>

## Geodynamische Messungen



[https://www.weltderphysik.de/typo3temp/assets/\\_processed\\_/2/b/csm\\_2005\\_lhc-tunnel\\_CERN\\_09\\_70a51515c6.jpg](https://www.weltderphysik.de/typo3temp/assets/_processed_/2/b/csm_2005_lhc-tunnel_CERN_09_70a51515c6.jpg)

## Vereinheitlichung von Höhensystemen



<https://www.bkg.bund.de/DE/Das-BKG/Wir-ueber-uns/Geodaesie/Integrierter-Raumbezug/Hoehe-Europa/hoehe-europa.html>

## Astronomie



[https://www.nasa.gov/sites/default/files/images/419813main\\_Europe\\_SN2007gr.jpg](https://www.nasa.gov/sites/default/files/images/419813main_Europe_SN2007gr.jpg)

## GNSS backup, Zeitstempel, 5G Netze

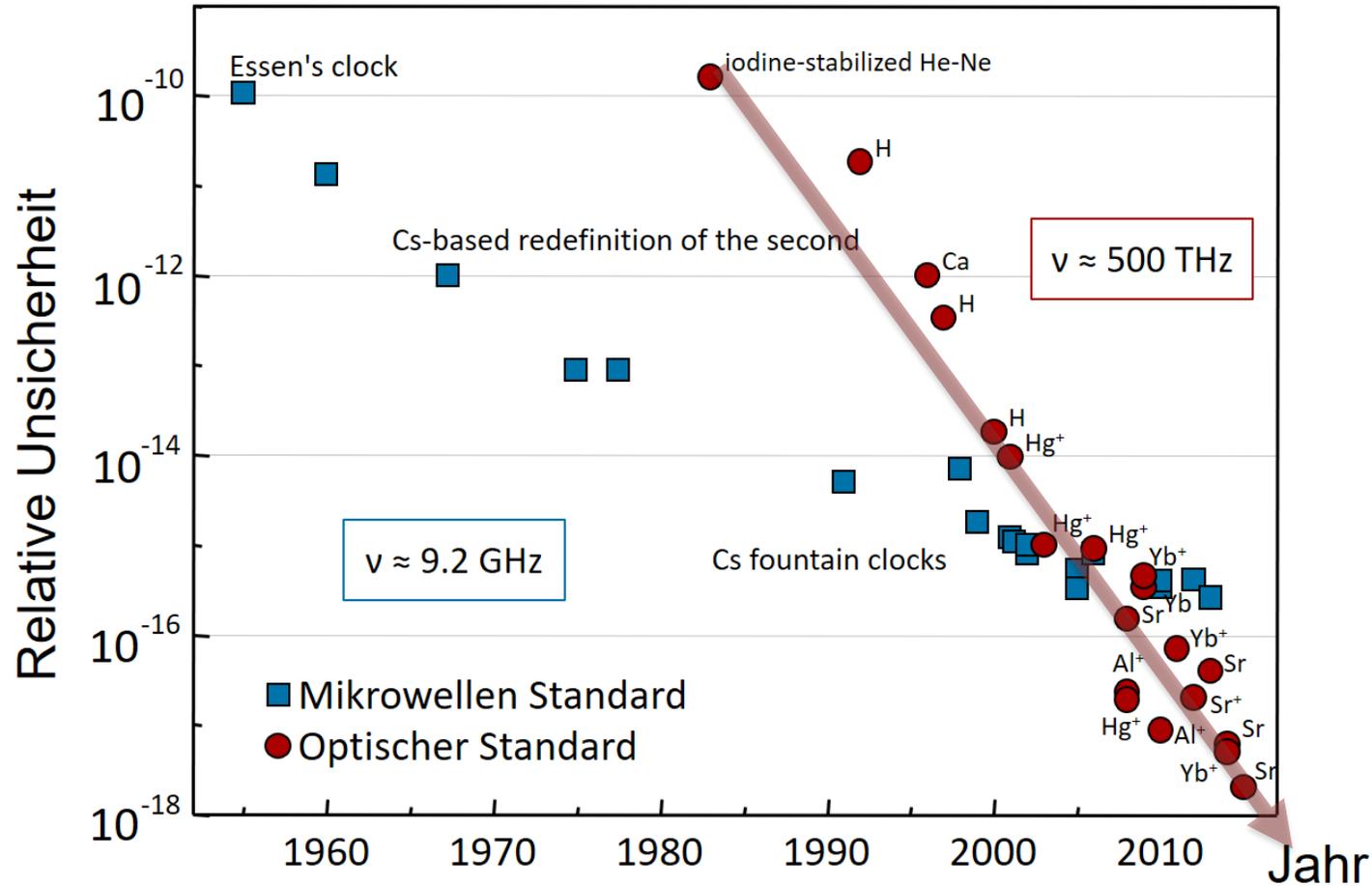


<https://phys.org/news/2019-07-europe-gps-rival-galileo-outage.html>



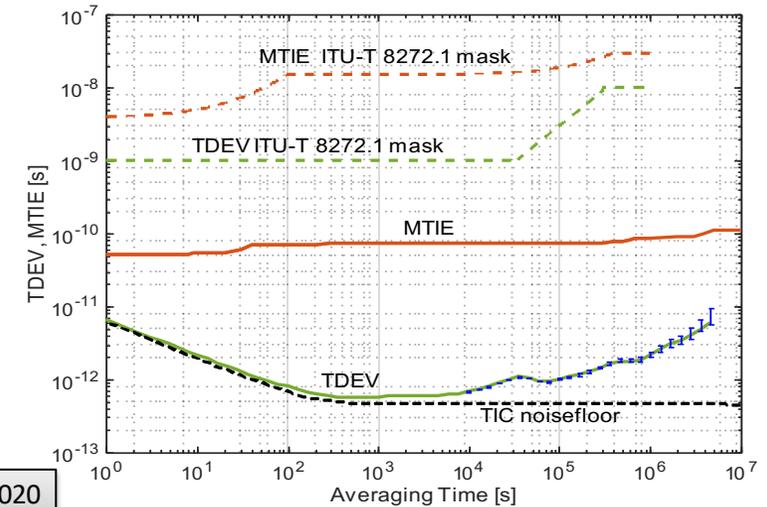
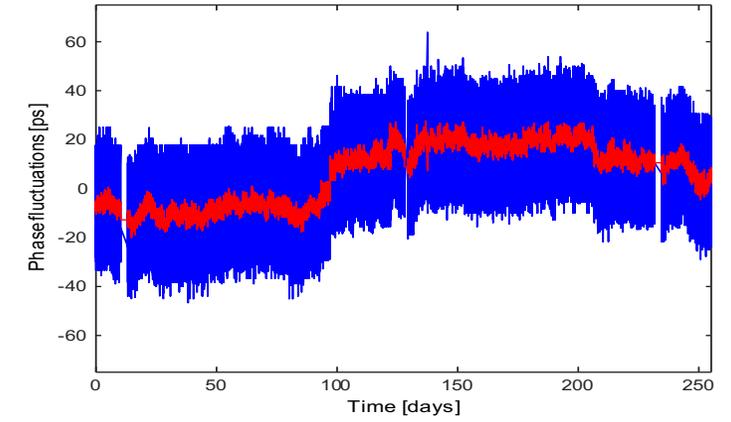
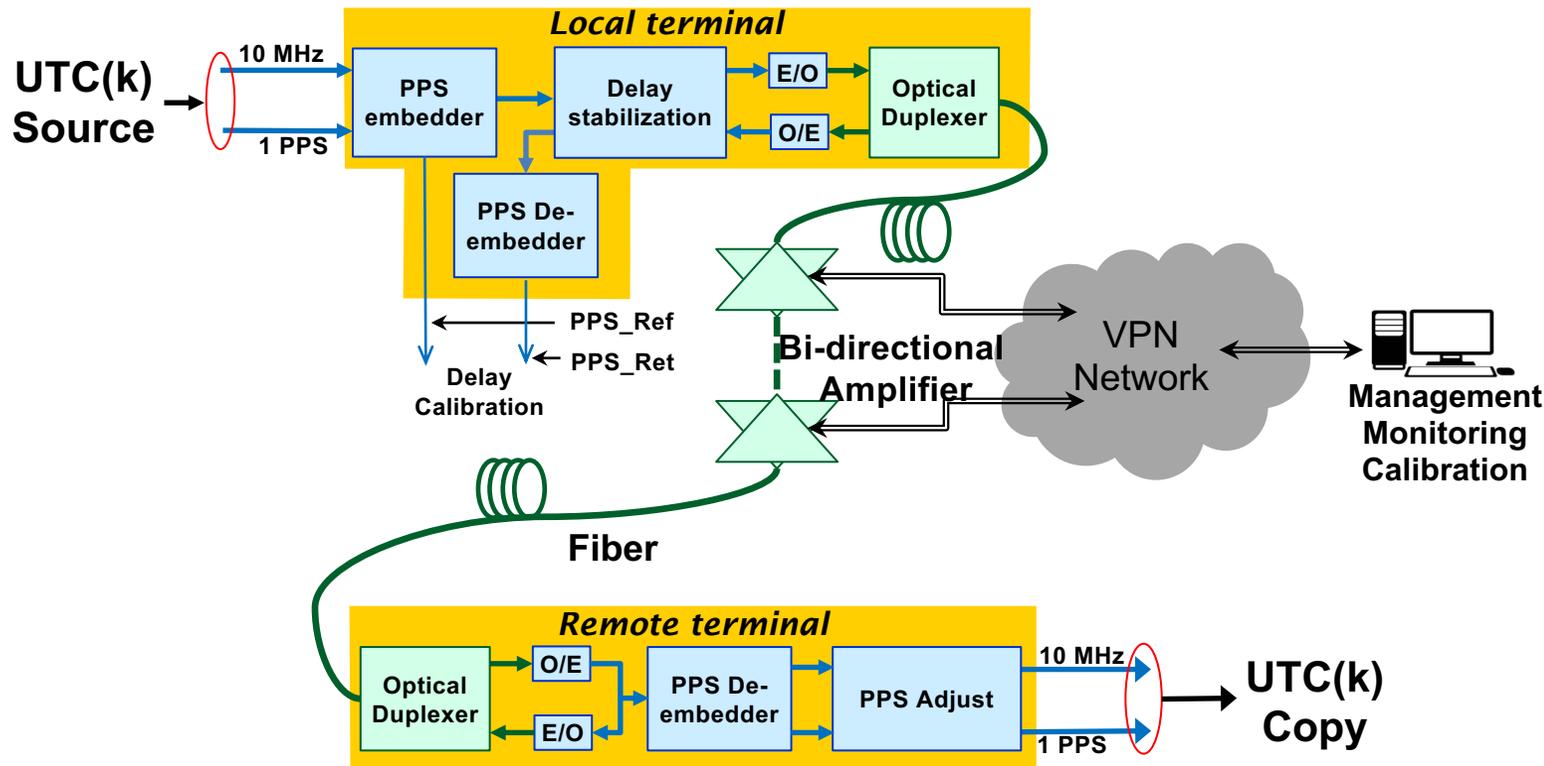
[https://static.dw.com/image/49166446\\_303.jpg](https://static.dw.com/image/49166446_303.jpg)

# Die besten Zeit- und Frequenzsignale sind noch nicht zugänglich



Optische Frequenz Normale mit einer Unsicherheit von wenigen  $10^{-18}$  werden nur in Nationalen Metrologie Instituten, wie der PTB, oder wenigen Laboren weltweit erreicht!

# Fiber-based UTC-Dissemination



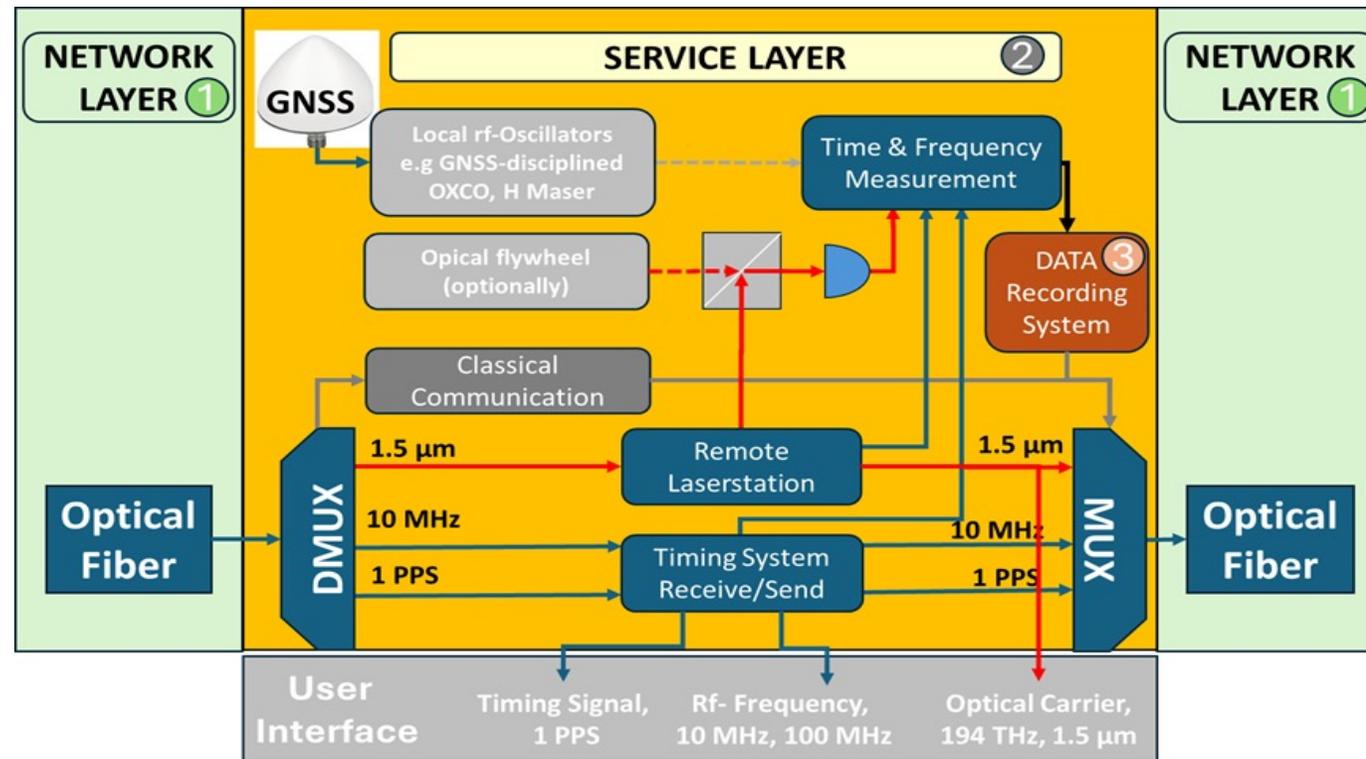
➤ Instability  $\approx 10$  ps over 275 days

➤ Repeatability  $< 30$  ps

L. Sliwczynski et al., *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, pp. 67-73, 2020  
doi: 10.1109/MCOM.001.1900599.

## Schnittstelle der Schichten 1, 2 und 3: Typische T&F-Infrastruktur eines PoPs.

(PoPs stellen sowohl eine Zeitinfrastruktur als auch eine optische Infrastruktur bereit, die Zeit- oder Frequenzvergleiche im gesamten Netz ermöglicht)



## NREN-Based Q and TF Networks in Europe

### National Implementations

- Italy
- **France → REFIMEVE has the status as a National RI**
- Poland
- Czech Republic
- Austria
- Switzerland
- Netherlands
- Finland
- Sweden
- United Kingdom
- ...

