

Ein Gesamtbild für Time&Frequency und Quantenkommunikation im X-WiN

Dr. Peter Kaufmann (DFN-Verein),
Dr. Susanne Naegele-Jackson (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg),
April 2022

Inhalt

Zusammenfassung.....	2
A) Einleitung.....	3
B) Bereich Time&Frequency (T&F)	3
B.1) Netztechnische Besonderheiten in T&F	3
B.2) Anwendungen in T&F.....	4
B.2.1) Mittelwertige T&F-Anforderungen.....	4
B.2.2) Hochwertige T&F-Anforderungen	5
C) Bereich Quantenkommunikation (QuC).....	6
C.1) Netztechnische Besonderheiten in der QuC.....	6
C.2) Anwendungen in der QuC.....	7
C.2.1) Sicherheitsanwendungen	7
C.2.2) Quantencomputing.....	8
C.2.3) Sensoranwendungen	9
D) Kombiniertes Backbone für T&F und QuC	10
E) DFN als Betriebspartner, Aufwendungen	11
F) Anstehende Aufgaben.....	12
G) Literatur.....	12

Zusammenfassung

Die beiden Anwendungsbereiche „Time&Frequency“ (T&F) und Quantenkommunikation (QuC) haben besondere technische Anforderungen an Datennetze.

T&F benötigt für den Transfer hochwertiger Signale eine bi-direktionale Verstärkung, die in herkömmlichen Datennetzen eine Aus- und Wiedereinkopplung der Signale an jedem Verstärkerstandort erfordert, was technisch und betrieblich besondere Aufwendungen erfordert. QuC erfordert mindestens in der Entwicklungsphase, zum Teil aber auch langfristig, eine von der üblichen Datenkommunikation abgesonderte Datenvernetzung.

Es sollte daher in Ergänzung zum X-WiN eine vom Bund (und eventuell einigen Ländern) finanzierte und vom DFN-Verein betriebene begrenzte, zusätzliche und separate Glasfaservernetzung (QuC-T&F-Netz) installiert werden, die in der kommenden Dekade für die Erforschung, Entwicklung und Nutzung von Anwendungen in beiden Bereichen zur Verfügung steht, ohne von den betrieblichen Anforderungen der sonstigen Datenkommunikation beeinträchtigt zu werden.

Ein solches deutsches QuC-T&F-Netz wäre auch der natürliche Ausgangspunkt um mit anderen im Aufbau befindlichen nationalen und europäischen Vernetzungen in beiden Bereichen zu kooperieren.

Summary

The two application areas "Time&Frequency" (T&F) and quantum communication (QuC) have special technical requirements for data networks.

For the transfer of high-quality signals, T&F requires bi-directional amplification, which in conventional data networks requires the signals to be decoupled and re-coupled at each amplifier location, which in turn requires special technical and operational expenditure. At least in the development phase, but sometimes also in the long term, QuC requires data networking that is separate from the usual data communication.

Therefore, in addition to the X-WiN, a limited, additional and separate fiber optic network (QuC-T&F network) financed by the federal government (and possibly some federal states) and operated by the DFN association should be installed, which will be used in the coming decade for research, development and use of applications in both areas without being affected by the operational requirements of other data communications.

Such a German QuC-T&F network would also be the natural starting point for cooperating with other national and European networks currently being set up in both areas.

A) Einleitung

Die folgende Darstellung soll für die beiden Bereiche „Time&Frequency“ (T&F) und Quantenkommunikation (QuC) eine Ergänzungsvariante für das X-WiN beschreiben, in der eine vom DFN-Verein betriebene zusätzliche und separate Glasfaservernetzung, das QuC-T&F-Netz, vorgeschlagen wird.

In den beiden Abschnitten B) und C) werden jeweils für die Bereiche T&F und QuC einige aktuelle Projektentwicklungen und Anwendungsausblicke beschrieben, aus denen sich Anforderungen an die Datenkommunikation ableiten lassen. Dabei wird auch begründet, weshalb auf den Glasfasern der herkömmlichen Datennetze (also in Gestalt von WDM-Kanälen) diese netztechnischen Anforderungen entweder gar nicht oder nur mit besonderem technischen Aufwand bedient werden können.

Im Abschnitt D) wird das Potential einer separaten, aber gemeinsamen Vernetzungsstruktur dargestellt.

Im Abschnitt E) wird begründet, warum der DFN-Verein diese Vernetzungsstruktur betreiben sollte, die vom Bund (und eventuell einigen Ländern) gesondert zu finanzieren ist. Dafür werden grobe Kostenabschätzungen dargestellt.

Schließlich werden in Abschnitt F) die daraus folgenden nächsten Aufgabenschritte beschrieben.

B) Bereich Time&Frequency (T&F)

Die europäischen Nationalen Metrologischen Institute (NMI) haben in den vergangenen Jahren viele Aktivitäten zur netzgestützten Bereitstellung von T&F entwickelt, die durch die Bereitstellung der von „Optischen Uhren“ abgeleiteten Signale zu genaueren, weltweit verfügbaren Zeitsignalen führen können und die zukünftig in Bereichen der Mess- und Sensortechnik eine Rolle spielen werden.

Im EU-geförderten Projekt CLONETS und dessen Nachfolger CLONETS-DS [CLONETS-DS] werden dafür europäische Konzepte erarbeitet. Solche Konzepte sollen die Bereitstellung von T&F-Diensten in europäischen Gesamtstrukturen ermöglichen. Bisher gibt es auf jeweils nationaler Ebene, aber auch in länderübergreifender Zusammenarbeit eine Vielzahl von kleineren isolierten Vernetzungsstrukturen. Ein wichtiges Beispiel dafür ist die Verknüpfung der PTB in Braunschweig mit Partnern in Frankreich (LNE-SYRTE, Paris, FR), in Großbritannien (NPL, Teddington, UK) und seit kurzem in Italien (INRIM, Turin, IT).

B.1) Netztechnische Besonderheiten in T&F

Die Genauigkeit von T&F-Signalen an weit voneinander entfernten Orten wird von den Quellen („Uhren“), und den Übertragungsstrukturen und -Techniken (Glasfaser, Satelliten) bestimmt, wobei sich die zu wählende Technik an den Anforderungen der jeweiligen Nutzer und ihren Anwendungen (GPS: mittelhoch; Gravitationsfeldmessungen: hoch) orientiert.

Dazu einige technische Aspekte bezüglich der T&F-Signale:

- Aktuelle Atomuhren basierend auf Cäsium-Fontänenuhren arbeiten im Bereich von wenigen $10^{**}(-16)$ relativer Unsicherheit. Mit ihnen wird die derzeitige Internationale Atomzeit (UTC) bestimmt.

- Moderne „Optische Uhren“ basierend auf Ytterbium, Strontium, Aluminium, usw. können bis in den Bereich von $10^{**}(-18)$ relativer Unsicherheit vordringen, Der Transfer solcher hochgenauen Signale ohne Verschlechterung durch die zur Verfügung stehenden Übertragungstechniken ist bisher nur in Testumgebungen möglich.
- Über Satellitenverbindungen lassen sich die Signale mit einer relativen Instabilität von $10^{**}(-10)$ bei einer Mittelungszeit von 1 Sekunde übertragen, sodass man nach etwa einem Tag Mittelungszeit eine relative Transfergenauigkeit von wenigen $10^{**}(-16)$ erreicht.
- Glasfaserverbindungen erreichen eine relative Instabilität von $10^{**}(-15)$ bereits nach etwa einer Sekunde Mittelungszeit, sodass Uhrenvergleiche im Bereich von $10^{**}(-18)$ relativer Unsicherheit bereits nach wenigen Stunden Messzeit erreicht werden.

Die Nutzung von hochwertigen, mittels Glasfasern übertragenen T&F-Signalen erfordert allerdings bi-direktionale Verstärker in den Transfernetzen, da bereits der Hin- und Rückweg entlang getrennter Glasfasern (im gleichen Glasfaserbündel) zu unakzeptablen Laufzeitdifferenzen führt. Für die bi-direktionale Verstärkung müssen aus einem Datennetz die entsprechenden Wellenlängen-Kanäle ausgekoppelt, bi-direktional verstärkt und wieder eingekoppelt werden. Das wird in verschiedenen Netzumgebungen im C-Band (RENATER) oder im L-Band (SWITCH) durchgeführt und erfordert einigen speziellen technischen Aufwand.

Die Co-Existenz der T&F-Kanäle mit Datenkanälen wurde bereits gezeigt und ist daher im Grundsatz durchaus möglich, jedoch ist der technische Aufwand in eigenen Glasfasern deutlich geringer.

In einer GEANT-Projektskizze [GEANT-T&F-2021] vom 1. Dezember 2021 wird der Aufbau eines T&F-PoPs im CERN beschrieben, an den sich NRENs mit ihren nationalen Strukturen anknüpfen könnten. Bisherige Interessenten sind: SWITCH, RENATER, CESNET, PSNC.

B.2) Anwendungen in T&F

Die Bereitstellung von überall verfügbaren T&F-Signalen ist weltweit nicht mehr wegzudenken. Die bekannteste „Zeit-Anwendung“ dürfte die GPS-Signalisierung darstellen. Verbesserte, also genauere, Zeitsignale werden als Service bereits für einige spezielle Nutzergruppen bereitgestellt; prominente Beispiele sind T&F-Signale für die Finanzsektoren in London und Zürich.

Für die Zukunft sollte die Internationale Zeit UTC mit verbesserter Genauigkeit bestimmt werden, also als eine Neue-UTC. Für diese Nutzung müsste die globale Zeit auf der Grundlage optischer Uhren definiert werden. Um solche Uhren weltweit miteinander zu vergleichen benötigt man Transfergenauigkeiten im Bereich von $10^{**}(-18)$ (und besser). Das ist bisher nicht möglich, so dass die globale Zeit UTC weiterhin auf Cs-Uhren basiert.

Im Folgenden werden zuerst mittelwertige T&F-Anwendungen skizziert um die Breite der Nutzung zu verdeutlichen; diese Anwendungen benötigen keine bi-direktionale Verstärkung und können daher in klassischen Datennetzen genutzt werden.

Danach werden hochwertige T&F-Anwendungen beschrieben, die eine bi-direktionale Verstärkung benötigen und die damit vorrangige Kandidaten einer separaten T&F-Vernetzung wären.

B.2.1) Mittelwertige T&F-Anforderungen

Ein T&F-Anwendungsbereich sind Stromversorgungsnetze, wo eine genaue Zeitmessung dazu beitragen kann, Störungen im Netz anhand von Signallaufzeiten zu ermitteln; für eine präzise lokale Fehlerortung ist eine Taktgenauigkeit bis zu $1 \mu\text{s}$ notwendig. Mikrosekunden-

Genauigkeit ist auch bei der Norm IEC 61850 für die Automatisierung von Umspannwerken erforderlich.

Präzise Zeit und Zeitsynchronisation ist auch in Ethernet basierten seismischen Systemen notwendig. In solchen Systemen sind seismische Sensoren über das Netz verbunden und erhalten so ihre Zeitinformation, da diese Sensoren oftmals an Stellen sind, wo GPS-Signale nicht empfangen werden können (in verkabelten Observatorien am Meeresboden, in Höhlen, usw.). Durch die Genauigkeit der Zeitmarken der seismischen Daten kann die Stärke eines Erdbebens ermittelt werden und auch das Epizentrum (durch Auswertung der Ankunftszeiten eines Ereignisses) genau lokalisiert werden.

Ausserdem können seismische Tomographie-Modelle mit Hilfe von Zeitunterschieden bei Merkmalen von P- und S-Wellen erstellt werden.

T&F mit White Rabbit Technologie

Die White Rabbit (WR)-Technologie ist eine Erweiterung für die Zeitsynchronisation im Netz und wurde im Juni 2020 in die Standards integriert. WR erreicht Sub-ns-Genauigkeit (also besser als $10^{**}(-9)$ Sek) bei bidirektionaler Übertragung in einer einzelnen (Standard-) Glasfaser und wird durch die üblichen Datennetzverstärker bedient. Für die Taktsynchronisierung wird eine Hardware-Erweiterung mit Synchronous Ethernet (SyncE) benötigt; außerdem muss die genaue Verbindungsverzögerung bekannt sein. In WR wird diese präzise Verbindungsverzögerung durch die Verwendung von Hardware-Zeitstempeln, durch die Berechnung des für die Kalibrierung erforderlichen Fasersymmetriekoeffizienten und durch die Berücksichtigung fester hardwareabhängiger Schaltungsverzögerungen erreicht.

B.2.2) Hochwertige T&F-Anforderungen

Quantenuhren und Gravitationsfelder

Ein Anwendungsbeispiel für T&F-Signale ist die Verknüpfung der hochgenauen Quantenuhren (Atomuhren, Optische Uhren) mit den Effekten aus der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART). Gemäß der ART beeinflussen Massen (bzw. deren Gravitationsfelder) die Zeit. In der Nähe großer Massen (z.B. Sterne, Schwarze Löcher) verläuft die Zeit langsamer als im entfernten leeren Raum. Man kann solche Zeitdifferenzen auch bereits in der geringen Gravitationsvariation von irdischen Umgebungen messen.

So sind in einer Kooperation von INRIM (Italien) und PTB (Deutschland) Uhren in Turin und auf 1000 m Höhe an der IT-FR-Grenze platziert worden. Der Höhenunterschied zwischen Turin und der Bergregion hat Unterschiede in der Gravitationskraft zur Folge, die sich in unterschiedlichen Zeitabläufen bemerkbar macht. Im INRIM-PTB-Experiment konnte ein relativer Frequenzunterschied von $10^{**}(-13)$ gemessen werden, wie auch von der ART vorhergesagt [Italien-BB-2019].

Dieses Ergebnis zeigt zweierlei:

- Bereits irdische Gravitationsunterschiede führen zu Zeit- und Frequenzunterschieden von Uhren (wie von der ART vorhergesagt) und können mit den gegenwärtigen Messgeräten ausgewertet werden.
- Man kann solche Zeit- und Frequenzunterschiede mit der notwendigen Genauigkeit über Glasfasernetze messen - über rauschanfällige Satellitenverbindungen ist dies nur mit wesentlich längerer Messdauer möglich.

Anwendungsoptionen liegen in der gesamten Geologie/Geodäsie/Rohstofferkundung. Denkbar wäre eine Analyse geologischer Formationen (Gesteinszusammensetzungen, Metallerze, Erdgas, Erdöl) mit Hilfe der aus der unterschiedlichen Massendichte resultierenden

Gravitationsunterschiede und deren Umsetzung in Zeit/Frequenz. Eine weitere Möglichkeit wäre eventuell die verbesserte Vorhersage von Vulkaneruptionen, die sich durch vorhergehende unterirdische Magmabewegungen vermuten lassen. Und schließlich können auf der Grundlage der Gravitationsunterschiede weltweit einheitliche Höhenlinien bestimmt werden um damit beispielsweise den Anstieg des Meeresspiegels zu messen – bisher lassen sich Anstiege z.B. im Pazifik oder im Atlantik nicht genau genug vergleichen.

Referenzsignale

Weitere Anwendungsgebiete finden sich in der Grundlagenphysik (z. B. Symmetrieverletzungen des Äquivalenzprinzips in der ART oder der Lorentz-Transformation bei der Erdbewegung um die Sonne bzw. der Messung des Massenverhältnisses von Elektron und Proton und anderes), in der Bereitstellung genauer Referenzsignale für die Quantensensorik (siehe auch unten) oder für die erdabgestützte Kalibrierung von Satellitennavigationssystemen (z.B. das europäische Galileo-System).

In der Radioastronomie werden mit dem VLBI-Konzept große Teleskope mit entsprechender Auflösung nachgebildet. Für die nächste Generation der VLBI-Systeme soll eine Positionsgenauigkeit von 1 mm auf globaler Ebene erzielt werden, was entsprechend verbesserte Referenzsignale erfordert.

In Deutschland bestehen potentiell Anforderungen in den einschlägigen F&E-Abteilungen von Hochschulen und Forschungseinrichtungen. Ein Ende 2021 diskutiertes Beispiel aus dem Geodäsiebereich betrifft eine mögliche Zusammenarbeit von TUM/Observatorium Wettzell (Prof. Schreiber) mit PTB-Braunschweig und GFZ-Potsdam über eine DFN-Vernetzung. In dieser Kooperation, deren Vorantrag inzwischen von der DFG genehmigt wurde, soll es u.a. auch um die Auswertung von ISS-Uhren-Experimenten in Korrelation zu irdischen Uhren gehen.

C) Bereich Quantenkommunikation (QuC)

Die Quantenkommunikation wird seit einigen Jahren weltweit mit hohen Einsätzen vorangetrieben. Treiber dafür sind vor allem Sicherheitsgefahren und deren Abwehr, wofür der Begriff QKD (Quantum Key Distribution) stellvertretend steht. Neben den USA und Europa ist in diesem Bereich China mit großem Erfolg sowohl in der wissenschaftlichen Arbeit wie auch in der technischen Umsetzung (z.B. Quantentestbed Peking-Schanghai) tätig.

Auf europäischer Ebene (Flagship-Projekt, EuroQCI) und auf deutscher Ebene (QuNet-Projekt und andere) gibt es eine Vielzahl von QKD-Aktivitäten mit Experimenten und Pilotinstallationen (auch außerhalb von Laborumgebungen). Ein prominenter QKD-Showcase war im August 2021 die Durchführung einer sicheren Quanten-VC zwischen Büros (nicht Labors) im BMBF und im BSI in Bonn. Im GEANT-Netz wird als ein Beitrag zusammen mit TOSHIBA und ihrer Twin-Field-Technik ein QKD-Showcase über eine Entfernung von bis zu 600 KM vorbereitet. QKD ist aber nicht das alleinige Anwendungsfeld für die Quantenkommunikation der Zukunft. Weitere Ausführungen dazu im Kapitel C.2.

C.1) Netztechnische Besonderheiten in der QuC

Es ist davon auszugehen, dass die E2E-Quantenkommunikation zunächst im QLAN- und QMAN-Bereich starten wird, weil sich dort die Vorteile der Quantenverschränkung durch die begrenzten Entfernungen ohne Repeater ausnutzen lassen. Im QWAN-Bereich wird man die E2E-Quantenkommunikation vorerst mittels „Trusted Nodes“ herstellen.

Um das Potential von Quantennetzen optimal nutzen zu können, ist es erforderlich, dass Knoten, die an Verschränkungen und deren Zustands-Messungen beteiligt sind, genau synchronisiert sind, da sich sonst die Verschränkungs-Zustände nicht verifizieren lassen. Das bedeutet, dass Quantennetze auf eine möglichst niedrige Jittertaktverteilung angewiesen sind. Bei Photonen-Zufallsermittlung ist sogar der Massstab im Pikosekundenbereich ($10E-12$) erforderlich, was mit der White-Rabbit-Technik möglich ist (GPS-basierte Verfahren bieten nur sub-Nanosekunden Präzision). Man kann zwar im Nanosekundenbereich mit GPS Verschränkungen noch gut nachweisen, allerdings beeinträchtigt das Hintergrundrauschen im Jitter-begrenzten Koinzidenzintervall die Genauigkeit merklich. Für Quantensysteme, die eine noch höhere Jitterauflösung (Femtosekundenbereich $10E-15$) verlangen, müssen optische Zeitübertragungssysteme eingesetzt werden (Cäsium-Atomuhr als Referenzsignal über Glasfaser).

Quantenkommunikation wird in Zukunft häufig durchaus in Co-Existenz mit klassischen Datenkanälen auf der gleichen Glasfaser durchgeführt werden können; im jetzigen Entwicklungsstadium werden aber meistens eigene Glasfasern vorgezogen um gegenseitige Störungen (zwischen klassischen Datenkanäle und Quantenkanälen) auszuschließen und um ungestörter experimentieren zu können, z.B. mit continuous-variable-QKD (cv-QKD) oder mit den erwähnten Zeitübertragungssystemen.

Bestimmte Anforderungen (z.B. mit discrete-variable-QKD, dv-QKD), in denen einzelne Photonen übertragen und detektiert werden müssen, werden aber wohl sogar auf Dauer separierte Glasfasern benötigen. Es ist schwer vorstellbar, dass die Behandlung einzelner oder weniger Photonen mit dem nötigen Störabstand zu klassischen Datenkanälen auf einer Glasfaser mit ausreichender betrieblicher Stabilität erreicht werden kann.

Hieraus folgt mindestens mittelfristig der Bedarf für eigene separate QuC-Glasfaserstrukturen.

C.2) Anwendungen in der QuC

Die folgenden Darstellungen sollen zeigen, dass nicht nur Sicherheitsentwicklungen sondern auch andere Anwendungen der „zweiten Quantenrevolution“ die Mittel der QuC nutzen können (und werden) und damit der Bedarf für Quantennetze breiter angelegt sein wird als nur aus der Sicht der sicheren Kommunikation. Die möglichen Quanten-Anwendungen werden oft in drei große Bereiche unterteilt:

- a) Sicherheitsanwendungen (QKD, ...)
- b) (verteiltes) Quantencomputing
- c) Sensoranwendungen

Für eine größere Zahl von Nutzern im DFN-Bereich (Forscher, Entwickler, Lehrende usw., also Wissenschaftler/Ingenieure jenseits der QKD-Entwickler) könnten die Anwendungsbereiche b) und c) dabei von steigendem Interesse sein und somit den Zugang zu experimentellen Quantennetzen erfordern.

C.2.1) Sicherheitsanwendungen

Aktuell stehen QKD-Anwendungen im Vordergrund der Diskussionen und der meisten Programme/Projekte und Pilotinstallationen. Mit QKD-Anwendungen sollen die für die Zukunft erkennbaren und erwartbaren Angriffe auf die sicherheitsrelevante IT-Infrastruktur abgewehrt werden. Für die Implementierung der QKD-Technik gibt es auch die meisten technischen Entwicklungen, sowohl in der Forschung als auch in der Industrie, inclusive bereits verfügbarer Geräte.

QKD ist ein Vehikel um Datennetze zu schützen und wird zukünftig auch in der DFN-Infrastruktur zur Anwendung kommen. Allerdings werden die ersten Anwendungsumgebungen sicherlich im Bereich Politik (Sicherheitspolitik) und Wirtschaft (z.B. Finanzsektor) erfolgen und erst dann die allgemeine „kritische Infrastruktur“ erfassen.

C.2.2) Quantencomputing

Beim Quantencomputing lassen sich zwei durch unterschiedliche Sicherheitsanforderungen gekennzeichnete Bereiche unterscheiden, das normale „Distributed-Quanten-Computing“ und das gesicherte „Blind-Quantum-Computing“.

a) Distributed-Quanten-Computing (DQC)

Im normalen DQC werden rechenintensive Großrechneranwendungen mit Hilfe von Quantencomputern bearbeitet, wobei oft nur speziell geeignete Teilaspekte mit den Quantencomputern behandelt werden. Wegen der noch geringen Kapazität der einzelnen Quantencomputer können auch mehrere (verteilte) Quantencomputer in die Lösung einzelner Probleme einbezogen werden. Dabei kann man zwischen der unabhängigen Berechnung eines Problems auf zwei Quantencomputern, die am Ende ihre Teilergebnisse nur klassisch kommunizieren, und der interaktiven Quantenrechnung auf zwei Quantencomputern unterscheiden.

Wie im gängigen verteilten HPC wird man daher im zukünftigen DQC verschiedene klassische Großrechner und Quantencomputer in unterschiedlicher Art und Weise über klassische Datennetze und Quantennetze miteinander verknüpfen.

b) Blind-Quantum-Computing (BQC)

In einer etwas anderen Nutzungsvariante wird ein Quantencomputer Dritten zur Nutzung zur Verfügung gestellt. Die Nutzer wollen aber ihre vertraulichen Anwendungen/Daten nicht offenbaren, und zwar nicht nur nicht externen Angreifern gegenüber, sondern auch nicht gegenüber den Betreibern des Quantencomputers.

Für diese Ziele ist das Konzept des BQC geeignet. Die Nutzerdaten werden hier vom Client als (transformierter) QuBit-Input per Quantennetz zum Quantencomputer transportiert; dort wird gerechnet und das Ergebnis liegt als QuBit-Output vor. Es wird zurück zum Client transportiert und erst dort im Abgleich mit den originalen Input-Daten können die Qubit-Output-Daten zu den gewünschten finalen klassischen Output-Daten umgewandelt und „verstanden“ werden. Im Quantencomputer selber kann ein Angreifer (incl. Betreiber) die Daten nicht „verstehen“. Client und Quantencomputer (Server) müssen über gewisse Quantenfunktionalitäten verfügen, wie z.B. Quantenspeicher, Qubit-Erzeugung, Qubit-Transport, QuBit-Detection u.a.

Auch hier kann es zur Kombination mehrerer Quantencomputer (Server) mit einem Client kommen, was den Bedarf zur Quantenkommunikation bzw. zur klassischen Datenkommunikation zwischen den beteiligten Client/Server-Komponenten noch variieren lässt.

C.2.3) Sensoranwendungen

Der Bereich der Quantensensoranwendungen ist sehr vielfältig und in seinen zukünftigen Ausprägungen bisher wohl kaum zu überblicken. Im Folgenden werden einige grundlegende Eigenschaften und einige Anwendungsbereiche skizziert.

In der klassischen Sensorik interagieren viele geladene Teilchen (meistens Elektronen) oder viele Photonen mit dem Untersuchungsgegenstand und werden dann durch möglichst empfindliche Nachweiskomponenten ausgewertet. Beispiele sind optische Linsen oder Detektoren der am Untersuchungsgegenstand gestreuten Elektronen.

In der Quantensensorik macht man sich eine gegenüber der klassischen Sensorik deutlich gesteigerte Messempfindlichkeit durch den gezielten Einsatz einzelner oder weniger Quantenobjekte nutzbar. Statt viele Photonen oder Elektronen an den Messgegenstand heranzuführen wird im Extremfall ein einzelnes verschränktes Quantenteilchen A in den Messbereich (den Messkopf) eingebracht. Dort interagiert es mit der Untersuchungsumgebung und das Ergebnis wird wegen der Verschränkung mit dem Quantenteilchen B, das sich abgesondert in der Auswertekomponente befindet, ausgewertet.

Damit kann man die Messempfindlichkeit bis hinunter in den Bereich einzelner Atome ausdehnen, was naturgemäß enorme Auswirkungen in vielen Bereichen haben kann:

- In der Medizintechnik können damit Untersuchungen kleinster Krankheitsstrukturen durchgeführt werden.
- Die industrielle Fertigung kann bisher unerreichte Genauigkeiten erzielen und kleinste Störungen erkennen.
- Ausgedehnte erdumfassende Messungen im Bereich der Langbasisinterferometrie (z.B. VLBI in der Radioastronomie, einheitlich geeichte Höhenmessungen für den Meeresspiegel und andere Erdmessungen) können deutlich verbessert werden - hier kommen auch die bereits oben erwähnten hochwertigen T&F-Referenzsignale ins Spiel.

Koordination und Synchronisation

Der Einsatz von Quantenverschränkungen liefert Vorteile bei allen Anwendungen, bei denen Koordination gefordert ist, und eignet sich damit auch für die Quanten-Zeit-Synchronisation (Quantum clocks). Weitere Anwendungen, die große Koordination erfordern und wo man sich die Verschränkungseigenschaft zu Nutze machen kann sind z.B. Wahlverfahren; denkbar ist auch die Koordination von Online-Gaming zwischen zwei Spielern.

Die Vorteile bei der Koordination ergeben sich dadurch dass, wenn zwei QuBits an verschiedenen Orten miteinander verschränkt sind, eine Messung an Qubit-1 dann an QuBit-2 das gleiche Ergebnis liefert wird, obwohl die Antwort zufällig ist und auch vorher nicht feststeht.

Bisher gab es für Quantum Clock Synchronisation mit dem Ziel einer einheitlichen globalen Uhrzeit zwei Verfahren, die beide entweder Licht oder Materie zwischen zwei Punkten austauschen und damit anfällig sind für Störungen durch Atmosphäre, wie z.B. Temperatur und Reibung. Bei diesen Verfahren handelt es sich einmal um die Einstein Synchronisation, wo z.B. mit Laserverbindungen für Zeittransfer gearbeitet wird und zum anderen um eine Quantenadaptation des Eddington Protocols zum Slow Clock Transport.

Ein neues drittes Verfahren für die Quanten-Zeit-Synchronisation basiert nun auf Verschränkung, und zwar derart, dass sogar absolute Phasenübereinstimmung durch Entanglement Purification erzielt wird.

Häufig werden sich der Messkopf und die Auswertekomponente einer Quantensensoranwendung in räumlicher Nähe befinden, wofür allenfalls ein kurzreichweitiges QLAN erforderlich sein wird. Denkbar ist aber auch, dass die Auswertekomponente entfernt

vom Messkopf stationiert ist, z.B. in Form eines Quantencomputers. Dafür, aber auch bei Anwendungen, wo Sensoren geografisch über weite Flächen der Erdoberfläche verteilt sind (siehe oben: Koordination und Synchronisation), werden ausgedehnte Quantennetze (QMAN, QWAN) für die Kommunikation erforderlich sein.

Einen besonderen Quantendienst für viele Quantenanwendungen stellen Quanten-Random-Number-Generatoren (QRNG) dar. Erst QRNG erzeugen vollständig zufällige „Zufallszahlen“. Diese müssen erzeugt, verteilt und genutzt werden. Auch dafür werden die Eigenschaften von Quantennetzen benötigt.

D) Kombiniertes Backbone für T&F und QuC

Beide oben beschriebenen Arbeitsgebiete stellen besondere technische Anforderungen an die Netzübertragungstechnik. Die jeweiligen Anforderungen können mit technischem Aufwand zumindest teilweise in parallelen Wellenlängen-Kanälen der klassischen Datennetze verwirklicht werden, manche Anforderungen benötigen aber jetzt und zumindest in der noch länger andauernden Entwicklungsphase oder sogar dauerhaft eigene Glasfaserverbindungen.

Die Anwendungen in beiden Arbeitsgebieten haben über die netztechnischen Besonderheiten hinaus auch verschiedentlich inhaltlich starke Überlappungen. Quanteneigenschaften und extrem genaue Zeitmessungen sind physikalisch eng korreliert. Das betrifft einmal die sogenannten „Sensortechniken“, in denen sehr genaue Zeit- und Stabilitätsanforderungen (die über die Heisenberg'sche Unschärferelation der Physik miteinander verknüpft sind) bestehen, aber auch die Zeittaktungen in Quantennetzen. Und es betrifft nicht zuletzt auch den Sicherheitsbereich, in dem eine volkswirtschaftlich wichtige Zeitinfrastruktur (Stichwort: GPS, bzw. Galileo) vor „Angriffen“ geschützt werden muss, also QKD-basierte Sicherheit ein Zukunftsthema ist.

Vor diesem Hintergrund gibt es in den verschiedenen T&F- und QuC-Entwicklungs-umgebungen eine wachsende Diskussion darüber, ob und inwiefern für beide Bereiche eine gemeinsame, aber vom Datennetz abgesonderte, Glasfaserstruktur genutzt werden kann (sollte). Beispiele dafür sind die Beschreibung eines Italienischen Backbone [Italien-BB-2019], die Planungsdiskussionen in GEANT für die zukünftigen Netzausbauten [TNC-2022] oder Diskussionen im T&F-EU-Projekt CLONETS-DS [CLONETS-DS].

Eine (verknüpfte) Doppelglasfaservernetzung könnte auf jeweils einer Glasfaser vorrangig T&F- bzw. QuC-Anwendungen bedienen, die von den angeschlossenen Nutzern entwickelt und eingesetzt werden. Durch den Zugriff der Nutzer auf beide Glasfaserstränge könnten aber auch fallweise Entwicklungen durchgeführt werden, die beide Arbeitsgebiete beinhalten wie beispielsweise die Verwendung hochwertiger T&F-Signale in Quantenanwendungen. Als Stichwort sei hier das Thema „Quanten-Clocks“ genannt, wo die Schwingungen des Kristalls der Atomuhr dem Pendeln einer Uhr bei der Zeitmessung entsprechen. Das Netzmanagement dieser Doppelfaserstruktur wird klassische Aufgaben aber auch neue „logistische“ Anforderungen beinhalten, wie z.B. QKD-Schlüsselverteilungen.

Die bei einer Vernetzung sowieso übliche Beschaffung einer Doppelfaserstruktur könnte also insgesamt sehr nützlich in beiden Arbeitsbereichen verankert werden, samt der Möglichkeit zur Kombination der jeweils hochwertigen Systemtechnik.

E) DFN als Betriebspartner, Aufwendungen

Der DFN-Verein organisiert für die deutsche F&E-Community die nationale und internationale Datenkommunikation, angefangen von der grundlegenden technischen Netzinfrastruktur bis hin zu wichtigen Anwendungen. Insofern ist der DFN-Verein auch der natürliche Partner für die deutsche F&E-Community beim Betrieb spezieller Datennetze, die (noch) nicht oder nicht leicht in die gängige Datennetzarchitektur integriert werden können.

Im EU-Projekt CLONETS-DS werden von T&F-Anwendern bereits entsprechende Konzepte zum Betrieb von Spezialnetzen durch die NRENs entwickelt. Für den QuC-Bereich dürfte mit zunehmenden QuC-Experimenten im deutschen F&E-Bereich ebenfalls der Bedarf nach einer gesonderten QuC-Infrastruktur wachsen. Wie oben beschrieben, gibt es technische und inhaltliche Gründe beide Arbeitsgebiete mit einer kombinierten T&F- und QuC-Infrastruktur zu versorgen.

Der Betrieb dieser Infrastruktur durch den DFN-Verein dürfte bei den (potentiellen) Nutzern auf große Zustimmung stoßen.

Die Investitions- und Betriebskosten einer gesonderten T&F und QuC-Infrastruktur können nicht aus den bestehenden Finanzierungsstrukturen des DFN-Vereins aufgebracht werden, weder über die Nutzerentgelte der X-WiN-Anwender, die i.w. dem Betrieb der Commodity-Dienste dienen, noch über die Mitgliedsbeiträge des DFN-Vereins.

Solche Kosten müssen längerfristig aus Bundesmitteln über das BMBF (und das BMWi?) bereitgestellt werden. Einige Bundesländer (z.B. Bayern und Thüringen) haben darüber hinaus Landesinitiativen zur Quantenkommunikation gestartet, an denen auch Universitäten und Forschungseinrichtungen beteiligt sind. Hier kann es bei der aufzubauenden QuC-T&F-Backbone-Struktur zu Synergien kommen, und zwar technisch, betrieblich und auch finanziell.

Eine genauere Kostenabschätzung kann erst in Zusammenhang mit einer detaillierten Projektspezifikation ausgearbeitet werden. Die folgenden groben Abschätzungen können daher nur die Dimension der Kosten zeigen:

- Glasfaserkosten: Ein Netz über 2000 KM mit 550 EU/KM (DFN-interner Durchschnitt) erfordert ca. 1,1 Mio. EU/Jahr für die Anmietung einer (doppeladrigen) Glasfaser.
- Personalkosten: 4-8 Personen zu 120 KEU/Jahr erfordern ca. 0,5-1,0 Mio. EU/Jahr.
- Investitionskosten für die Geräte im QuC-T&F-Netz (klassische und besondere QuC-T&F-Komponenten): Einige Mio. EU (z.Z. noch schwer abschätzbar: 10-20 Mio. EU?)

Die von den (potentiell) beteiligten Nutzergruppen für ihre inhaltlichen F&E-Arbeiten notwendigen Aufwendungen bleiben völlig außerhalb der hiesigen Betrachtungen und müssen anderweitig über F&E-Projekte erbracht werden.

Summa Summarum dürfte die Höhe der notwendigen Finanzen für die QuC-T&F-Netzinfrastruktur für den Betrieb jährlich im niedrigen einstelligen Millionenbereich liegen, zuzüglich der auf die Jahre zu verteilenden Investitionskosten.

F) Anstehende Aufgaben

Für die Umsetzung der oben beschriebenen Zielsetzungen sind eine Vielzahl von Entscheidungs- und Arbeitsprozessen erforderlich. In grober Näherung gehören dazu die folgenden Stufen:

- a) In der DFN-GF und im DFN-Vorstand muss über die Zielsetzung und Umsetzung diskutiert und entschieden werden.
- b) Bei einer positiven Entscheidung sollten wichtige Einrichtungen in den QuC/T&F-Bereichen (DLR, MPG, FhG, FZ Jülich, PTB, diverse Universitäten) in die Diskussion einbezogen und zur Unterstützung für das Konzept gewonnen werden.
- c) Danach sollten DFN und die Unterstützer gemeinsam Gespräche mit dem BMBF (und eventuell anderen Kostenträgern) zur finanziellen Absicherung des Konzeptes führen.
- d) Wenn vom BMBF positive Signale kommen, kann parallel mit der Feinarbeit begonnen werden. Je nach Fortgang der Gespräche und Planungen müssen in Arbeitsgruppen die detaillierten Ausarbeitungen vorgenommen werden:
 - Identifikation der potentiellen Nutzergruppen;
 - eine Topologie des T&F/QuC-Backbone ableiten;
 - die besonderen netztechnischen Anforderungen analysieren;
 - die besonderen netztechnischen Geräte mit ihrer Verfügbarkeit identifizieren;
 - die Kosten für den Aufbau und den Betrieb zusammenstellen;
 - die Schnittstellenanforderungen der potentiellen Nutzergruppen an den T&F/QuC-Backbone definieren.

Alle Teilergebnisse führen schließlich zu einem Gesamtprojektplan, dessen Förderung vom BMBF bewilligt wird und der anschließend implementiert werden kann.

G) Literatur

Literatur zu wissenschaftlichen und technischen Fragestellungen für die Bereiche T&F und QuC ist nahezu unerschöpflich und entwickelt sich hochdynamisch. Auf der Webseite des X-WiN-Labors gibt es dazu im Abschnitt Quantentechnologien umfangreiche Hinweise.

Hier werden nur einige Hinweise aufgeführt, die sich speziell mit der Problematik von T&F- und QuC-Backbones befassen:

- [CLONETS-DS]: [https://clonets-ds.eu und private Kommunikation]
- [TNC-2022]: [GEANT-WP6-TNC2022-proposals, Nov.2021, unpublished]
- [GEANT-T&F-2021]: [GEANT-Draft: T&F hub CERN, V3, Dez. 2021, unpublished]
- [Italien-BB-2019]: [Calonico, D; Clivati, C; Italien Quantum Backbone, 2019, Il Nuovo Saggiatore, Vol. 35, No 3-4]