

Perspektiven

Christoph Ernst, Jens Schröter & Martin Warnke

Der Quantencomputer – ein zukünftiger Gegenstand der Medienwissenschaft?

Der Quantencomputer gilt als Schlüsseltechnologie für das 21. Jahrhundert. Gegenwärtig treiben sowohl die großen Unternehmen der Technologiebranche als auch aufwändig finanzierte Forschungsprogramme verschiedener Nationalstaaten die Entwicklung dieser Maschinen voran. Quantencomputer beruhen auf der Idee, quantenphysikalische Erkenntnisse für die Informationsverarbeitung nutzbar zu machen. Sie stehen im Zentrum der Hoffnung, aus der informatischen Nutzung von Quanteneffekten vollkommen neue Technologien – sogenannte Quantentechnologien – entwickeln zu können. Ein „Quantenfieber“ (Schubert 2019) ist ausgebrochen und nicht wenige sehen die „nächste Revolution“ (Benrath 2020) bevorstehen.

Der Medienwissenschaft sind derartige Diskurse aus ihren Überlegungen zum Medienwandel und zu Medienumbrüchen gut bekannt (Schröter/Schwering 2014). Eine Semantik der Revolution, die radikale Veränderungen für ganz verschiedene Bereiche der Gesellschaft in Aussicht stellt, verbindet sich oft mit einer begrifflichen Anlehnung an bereits existierende Informationstechnologien (Balbi 2015). Zum Verständnis der zeitgenössischen Entwicklungen ist es allerdings entscheidend zu

beachten, dass sich die Innovationserwartungen zwar derzeit auf den Quantencomputer fokussieren, aber nicht auf diese Maschinen beschränkt sind. Im Fachdiskurs wird bereits von Technologien wie einem „Quanteninternet“ (Fürnkranz 2019), neuartigen „Quantum Sensing“ (Preskill 2018, S.6) und Verfahren der „Quantenkryptographie“ (ebd.) gesprochen. Auffällig ist an diesen Debatten, dass die Forschung zur Verbindung von Quantenphysik und Informationstheorie sehr grundsätzlich mit Fragen der Medialität der beschriebenen Prozesse befasst ist (Bub 2019). Gegenwärtig lässt sich, pointiert zugespitzt, die Entstehung eines Paradigmas quantenbasierter Medialität beobachten, das in einer ganzen Reihe spezifischer Quantentechnologien konkret wird und im Quantencomputer seinen sichtbarsten Ausdruck findet.

In der Medienwissenschaft liegen zum Quantencomputer erste grundlegende Darstellungen und Analysen vor (Warnke 2005; 2013; 2014). Angesichts der Entwicklungen im Forschungsfeld steht aber eine Theoretisierung des Quantencomputers als ‚neues‘ Medium ebenso aus, wie eine medientheoretische und medienhistorische Aufarbeitung der Verknüpfungen zwischen Quantenphysik und

Medientechnologie.¹ Als Perspektive für die zukünftige Forschung regt der vorliegende Beitrag deshalb dazu an, in die Diskussion zu ‚Quantenmedien‘ ganz generell einzutreten und diesen Diskurs mit einer Beschreibung des Quantencomputers als zukünftiger Medientechnologie beginnen zu lassen. Zu diesem Zweck wird im ersten Abschnitt zunächst ein Überblick über die zugrundeliegenden physikalischen Erkenntnisse und Funktionsweisen von Quantencomputern gegeben. Anschließend diskutiert der zweite Teil am Beispiel der Debatte um die sogenannte ‚Quantenüberlegenheit‘ exemplarisch Imaginationsprozesse, die gegenwärtig rund um den Quantencomputer ausgemacht werden können. Der dritte Teil weitet den Blick auf eine generellere Betrachtung von Quantenmedien und ihrer Archäologie aus, bevor ein knappes Schlusswort pointiert Konsequenzen für die medienwissenschaftliche Forschung zusammenfasst.

Zur Theorie und Geschichte der Quantencomputer

Es war ein Randphänomen, ein physikalisches Detail, das Anlass dazu gab, die Physik des ausgehenden 19. Jahrhunderts um die Quantenphysik zu

ergänzen und damit eine physikalische Zeitenwende einzuläuten. Und dann kam noch die Welt der Atome hinzu, zu der die klassische Physik, die so wohl gegründet und komplett aussah, keine sinnvollen Feststellungen treffen konnte.

Die Urszene bestand darin zu erklären, mit welchem Farbschein ein Körper leuchtet, wenn er erhitzt wird. Wir kennen das Phänomen etwa vom Schein des Holzofens, dem Glühen des Glases bei dessen Formung, und von Bildern aus Schmieden, wenn der Metallblock von tiefrot über orange bis hellgelb glüht, während er heißer wird, auch von der Farbe des Sonnenlichts. Max Planck, geradezu die Idealfigur des klassischen Physikers, kam nicht umhin, in die Theorie der Strahlungsfarbe ein Element einzubauen, welches das bis dahin unzulängliche Strahlungsgesetz plötzlich in Übereinstimmung mit den Messungen brachte: er führte die Quantenhypothese ein, die Behauptung, Energie sei nicht unendlich fein verteilbar, sondern stets nur in abgemessenen Paketen vorhanden. Diese Hypothese brachte schließlich – überraschenderweise – Theorie und Experiment miteinander zur Deckung. Dies war nicht mit der klassischen Physik vereinbar und missfiel Planck daher durchaus. Erst nach langem Ringen machte er deshalb im Jahr 1901 seinen Vorschlag publik (Planck 1901). Diese unteilbare Energiemenge, das Wirkungsquantum, wurde daraufhin nach ihm benannt und er bekam 1918 den Physik-Nobelpreis für seine Entdeckung. Das Planck'sche Wirkungsquantum ist tatsächlich sehr klein, weshalb die Naturforschung es

1 Auch hier existieren erste Beiträge (vgl. etwa Dippel/Warneke 2017), aber verglichen mit der durchaus ausdifferenzierten Diskussion der Implikationen der Quantenphysik in der Philosophie ist die medienwissenschaftliche Debatte eher überschaubar. Einen wunderbaren Metatext zum Motiv zukünftiger ‚Quantenmedien‘ und ihrem utopischen Potenzial liefern allerdings bereits Hillgärtner/Wiemer 2013.

auch bis dahin hatte übersehen können. Wird sein Zahlenwert aufgeschrieben, kommt erst an der siebenundzwanzigsten Stelle nach dem Komma etwas anderes als eine Null vor. Es spielt also praktisch für alle Belange unserer täglichen Lebenserfahrung keine Rolle, wohl aber auf Skalen des sehr Kleinen, für Atome und ihre Bestandteile.

Albert Einstein kam zu ähnlichen Annahmen und Schlüssen, als er untersuchte, mit welchen Energien Elektronen aus einem Metall herausgeschlagen werden, wenn es mit Licht bestrahlt wird. Heute wird dies ‚Photoelektrischer Effekt‘ genannt und kommt in jeder Digitalkamera vor. Einstein bekam dafür (und nicht etwa für die Relativitätstheorie) 1921 den Nobelpreis. Er traf 1905 die „Annahme, daß die Energie des Lichtes diskontinuierlich im Raume verteilt sei“ (Einstein 1905, S.133) und stellte damit seine besondere Begabung unter Beweis, aus scheinbar nebensächlichen Beobachtungen fundamentale Schlüsse zu ziehen. Immerhin bedeutet das doch nichts Geringeres, als dass Licht eine Ansammlung von sehr kleinen Teilchen ist. Dies stellte den Auftakt zur Epoche der Teilchenphysik dar, die heutzutage die Physik völlig dominiert.

Die Zeit um 1900 war auch die der Spektroskopie, der Analyse des Leuchtens von Atomen und Molekülen. Es gab eine Menge empirischer Daten dazu, aber das theoretische Fundament war aus der klassischen Physik nicht zu gewinnen. Erst die Übertragung der Quantenhypothese auf den Atombau (Bohr 1913), für die Niels Bohr 1922 seinen Nobelpreis bekam, brachte hier

den Durchbruch. Bohr verbot den Elektronen der Atomhülle, beliebige Energiezustände einzunehmen, es sollten wiederum Vielfache des Planck’schen Wirkungsquantums sein, was auf einen Schlag zweierlei erklärte. Erstens machte das Bohr’sche Atommodell begreiflich, wieso Materie überhaupt stabil ist und warum die Elektronen entgegen der Vorhersage der Elektrodynamik bei ihren Umrundungen des Kerns nicht kontinuierlich Energie abstrahlen, um dann mit Getöse in diesen Kern zu fallen und das ganze Atom in einem Blitz zu entladen und enden zu lassen. Denn Elektronen tauschen ihre Energie nur paketweise und behalten im Atom, wenn sie dem Kern am nächsten sind, auch immer ein Rest-Quantum an Bewegungsenergie. Das ist kein geringer theoretischer Gewinn, denn schließlich besteht auch unsere makroskopische Welt aus Atomen und Molekülen, und wenn wir uns so umschauen, dann ist doch alles hübsch stabil, meistens wenigstens, wenn nicht gerade eine Atombombe explodiert. Dieser Mechanismus erklärte zweitens schlagartig die typischen Farben, mit denen Atome strahlen, wenn sie dazu angeregt werden. Das Bohr’sche Atommodell sagte präzise die Spektrallinien des Wasserstoffs voraus und konnte so empirisch bestätigt werden.

Also musste eine neue Theorie der Bewegung im Allerkleinsten her, die diesen Seltsamkeiten Rechnung trug. Und damit kommen wir zu den Grundlagen der Quantenmechanik und auch des Quantencomputings. Es waren vor allen Werner Heisenberg und Erwin Schrödinger, die diese neue Theorie der

Bewegung formulierten und dafür ihre Nobelpreise 1932 und 1933 erhielten. Diese Quantenmechanik ist nach und nach perfektioniert worden, und ihre Vorhersagen gehören in der theoretischen Physik zu den experimentell am genauesten bestätigten. Dennoch sind die Grundannahmen so abstrus, dass sie besser nicht für direkte Aussagen über Natur gelesen werden sollten, sondern als das, was sie sind: Theorie – Aussagen über Beschreibung von Natur.

Die erste Grundannahme besteht darin, die Theorie als eine lineare anzusetzen. Das ist durchaus nicht ungewöhnlich, das ist die klassische Mechanik auch. In diesem uns so wohl bekannten Zweig der Physik gibt es nämlich den Aspekt der Überlagerung von Bewegungen. So finden wir in der Wurfparabel eine gleichmäßig gleichförmige, kräftefreie Bewegung geradeaus, die sich dem durch die Erdanziehung beschleunigten freien Fall nach unten überlagert. Jede der Bewegungsarten hat dafür ihre eigene Dimension: x (vorn-hinten) für die gradlinig-gleichförmige und z (oben-unten) für die beschleunigte Bewegung. Das gibt es in der Quantenmechanik auch, allerdings haben dafür deren Urheber einen ganz anderen mathematischen Raum ersonnen als den uns so geläufigen dreidimensionalen – die Zeitdimension kommt als vierte dann noch hinzu. Es ist ein abstrakter Raum, der je nach Problemlage von einigen wenigen, zwei oder drei, bis zu unendlich vielen Dimensionen haben kann: der Hilbert-Raum. Nehmen wir ein typisches Bauelement eines Quan-

tencomputers: ein Elektron mit seinem seltsamen Drehimpuls, dem Spin. Dieser Spin macht das Elektron zu einem winzigen Magneten, denn seine Drehung setzt die Ladung des Elektrons in Bewegung, und so wird ein magnetisches Moment erzeugt. Das magnetische Moment kann in einem äußeren Magnetfeld vermessen werden, und die Messung ergibt dabei immer entweder die Ergebnisse *up* oder *down* (die kleine Magnetnadel zeigt nach oben oder nach unten), das Elektron dreht sich links-herum oder rechts-herum. Welcher Wert im Experiment gemessen wird, ist nicht sicher vorhersehbar, manchmal der eine, manchmal der andere, wie beim Wurf einer Münze.

Die lineare Theorie der Quantenmechanik baut daraus nun ihren abstrakten Raum mit hier genau zwei Dimensionen, deren Basiszustände $|up\rangle$ und $|down\rangle$ sind. Beide sind jeweils für sich schon Lösungen ihrer Bewegungsgleichung, der Schrödinger-Gleichung, und wegen deren Linearität eben auch ihre Summe – genau das bedeutet Linearität. Ein einzelnes Elektron wird dann also beschrieben als eine Vektorsumme – wie in der klassischen Mechanik mit ihren x - und z -Komponenten – allerdings aus $|up\rangle$ und $|down\rangle$:

$$|elektron\rangle = a^*|up\rangle + b^*|down\rangle.$$

Die im abstrakten Hilbert-Raum beschriebenen Zustände des Elektrons sind also Überlagerungen ihrer Basiszustände, die die klassische Physik so nicht zulassen kann. Denn wer hat je einen Kreisel sich gleichzeitig links- und rechts-herum drehen sehen? Diese

Überlagerung wird sich im Quantencomputer noch als sehr nützlich erweisen.

Die Objekte befinden sich in der Quantenmechanik also in Überlagerungs-Zuständen ihrer Basis-Zustände. Die Schrödinger-Gleichung beschreibt, was mit ihnen in der jeweiligen physikalischen Situation geschieht, also was geschieht, wenn Kräfte am Werk sind und Zeit verstreicht. Das Endergebnis ist wieder eine bestimmte, veränderte Überlagerung der Basiszustände. Schlussendlich folgt die Messung, welche selbst nicht mehr von der Theorie der Quantenmechanik beschrieben werden kann. Sie setzt die Theorie außer Kraft, ist ihr blinder Fleck, indem sie dann wieder nur genau einen der Basiszustände $|\text{up}\rangle$ oder $|\text{down}\rangle$ nachweist. Die Theorie der Quantenmechanik ist also nur gültig, solange keine Messung durchgeführt wird. Es darf nicht hingeschaut werden, ohne die fragilen Quanten-Phänomene zu zerstören, was Anlass gab zu einem breiten Spektrum aus bizarren Interpretationen (Everett 1956 mit seinem Multiversum), avancierten feministischen Positionen wie der des Agentiellen Realismus von Karen Barad (2007), der sich explizit auf die Naturphilosophie Niels Bohrs gründet, aber auch allerlei parawissenschaftlicher esoterischer Bewusstseins-Physik.

An dieser Stelle setzt die so schwierige Interpretationsarbeit an. Wie kommt es von angeblichen Überlagerungszuständen zu den reinen gemessenen Basiszuständen? Die heutzutage gelehrte Auffassung, die so genannte ‚Kopenhagener Deutung‘ lautet für

den Fall des Elektrons: Aus den anfänglich unterstellten Koeffizienten $a(t=0)$ und $b(t=0)$ der Überlagerung, den Anfangsbedingungen, berechnet die Schrödinger'sche quantenmechanische Wellengleichung kontinuierlich und deterministisch die $a(t)$ und $b(t)$ der Überlagerung am Ende, zum Zeitpunkt der Messung. Und aus den letzteren lässt sich die Wahrscheinlichkeit bestimmen, mit der man das Elektron als ein reines $|\text{up}\rangle$ oder ein reines $|\text{down}\rangle$ antrifft (Born 1926). Ist der Betrag von $a(t)$ größer als der von $b(t)$, misst man entsprechend häufiger ein $|\text{up}\rangle$ als ein $|\text{down}\rangle$. Es gibt immer nur Wahrscheinlichkeitsaussagen von Messungen reiner Zustände: Der Geigerzähler knattert, wenn er Kernzerfälle nachweist, die Messungen im Labor, etwa an Elektronen, sind in ihrer Gesamtheit verrauschte Einzelereignisse, die vermessenen quantenmechanischen Phänomene sind im Labor immer Gegenstand von Statistik, Zufallsprozesse.

Hieraus ergibt sich die paradoxe Situation, dass eine kontinuierliche Wellengleichung – die von Schrödinger – Wahrscheinlichkeiten von Teilcheneigenschaften berechnet. Die Theorie fordert also die paradoxe Koexistenz eines Wellenbildes mit einem Teilchenbild. Die Zustände der quantenmechanischen Objekte verändern sich kontinuierlich wellenartig vor der Messung. Findet diese statt, treten sie als ganze Teilchen in Erscheinung. Das ist auch der Grund dafür, dass es Interferenzmuster gibt, obwohl wir es mit Teilchen zu tun haben (Dippel/Warnke 2017).

Das ist der Stoff, aus dem Quantencomputer gebaut werden (Williams/Clearwater 2000; Warnke 2013; Warnke 2014). Ihre Elementarobjekte sind nicht binäre Schalter, Bits, 1 oder 0, sondern quantenmechanische Objekte, etwa Spin-Systeme, mit binären Basiszuständen, die sich aber überlagern dürfen. Die Quantenschalter, *Qubits*, dürfen in der Theorie gleichzeitig $|1\rangle$ und $|0\rangle$ sein:

$$|\text{qubit}\rangle = a^*|1\rangle + b^*|0\rangle$$

Werden sie einem gezielten quantenmechanischen Experiment unterworfen, bei welchem sie durch sogenannte ‚Quantengatter‘ geschickt werden, berechnet die Schrödinger-Gleichung als Resultat das physikalische Ergebnis einer neuen Mischung von $|1\rangle$ und $|0\rangle$. Das Experiment realisiert eine Berechnung, die – und das ist der Clou – mit allen möglichen Kombinationen der Anfangszustände der *Qubits*, parallel ausgeführt wird.

Bei einem Register von *Qubits* der Länge – sagen wir – acht, errechnet der Quantencomputer gleichzeitig die Resultate der Inputs $|0,0,0,0,0,0,0,0\rangle$ über $|0,0,0,0,0,0,0,1\rangle$ bis $|1,1,1,1,1,1,1,1\rangle$, das sind 256 verschiedene Inputs, wenn die *Qubits* des Registers entsprechend als Überlagerungen ihrer beiden Basiszustände präpariert werden. Je länger das Register ist, desto dramatischer ist die Effizienz-Steigerung gegenüber einem Digitalcomputer, der Register aus gewöhnlichen Bits besitzt, die jeweils nur einen Zustand einnehmen können, die strikt nacheinander abgearbeitet werden müssen.

Die Theorie des Quantencomputers ist die Quantenmechanik. Spezielle quantenphysikalische Experimente realisieren die Schaltelemente von Quantencomputern, die Quantengatter. Die Quantenmechanik beschreibt die kontinuierliche Entwicklung der Zustände der *Qubits* im Hilbert-Raum, die am Ende im Akt der Messung auf binäre, diskrete Messereignisse projiziert werden. Quantencomputer sind Analogcomputer. Sie können nur solche Berechnungen verkörpern, für die sich ein physikalisches Experiment ersinnen lässt, sie sind also nicht universell (Warnke 2005). Such- und Sortieroperationen sind ihre Domäne, aber auch die Zerlegung großer Zahlen in ihre Primfaktoren und Optimierungsprobleme (Williams/Clearwater 2000).

Wie schwierig jedoch die Konstruktion eines Quantencomputers ist, zeigen – stark vereinfachend gesagt – zwei Grundprobleme: Einerseits sieht sich die Forschung der mathematisch-symbolischen Frage gegenüber, klären zu müssen, bei welchen Klassen komputationaler Probleme und auf Grundlage welcher Algorithmen ein Quantencomputer überhaupt einen signifikanten *speedup*-Vorteil gegenüber traditionellen Computern bietet (Hagar/Cuffaro 2019, S.11). Andererseits stellt sich auf der physikalisch-materiellen Seite die Frage, mit Hilfe welcher Maschinen sich die für *Qubits* nötigen Quanteneffekte technisch realisieren und stabilisieren lassen können – hier werden verschiedene Ansätze verfolgt (einen Überblick gibt Meier

2015, S.87-122).² Die Analyse von Quantencomputern kann nicht einfach die der Digitalcomputer fortsetzen. Die Analyse muss neu – und zwar in der Physik – ansetzen, denn die Erkenntnisse zu Digitalcomputern helfen kaum, wenn der Quantencomputer verstanden werden soll. Quantencomputer sind der Logik, dem Symbolischen und dem Text nicht mehr so sehr verwandt wie der Digitalcomputer, über den die Medienwissenschaft schon ausgiebig räsoniert hat. Ein Blick in die Rechnergeschichte, auf die Analogrechner, bringt hier mehr als ein Fokus auf die Frauen und Männer, die im Zweiten Weltkrieg den Code der deutschen Wehrmacht geknackt haben.

Quantencomputer tragen zudem die epistemologische Last der Quantenmechanik und deren kontraintuitive Postulate: den Welle-Teilchen-Dualismus, die Überlagerung paradoxer Zustände wie bei Schrödingers Katze (Schrödinger 1935, S.812), die spukhafte Fernwirkung (Einstein/Born 2005, S.254ff.) und die nachträgliche Wahrscheinlichkeitsinterpretation einer deterministischen Theorie. Bei einer Deutung wird die Medienwissenschaft sich nicht nur mit Physik auseinandersetzen müssen, sondern auch mit Spiritismus und Esoterik, welche im Diskurs um Quantenmechanik bisweilen grassieren, ironisch aufgegriffen von Hillgärtner und Wiemer (2013).

² Siehe zu den unterschiedlichen Möglichkeiten, *Qubits* zu realisieren insb. S.107-109.

Quantencomputer und die Imagination zukünftiger Technologie

Im September 2019 verdichteten sich die Hinweise, dass einem Forschungs-Team von Google im Bereich des Quantencomputings ein epochaler Durchbruch gelungen sei. Journalist_innen der Financial Times stießen auf einem Server der NASA auf ein offenbar versehentlich veröffentlichtes Paper mit dem Titel *Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor* (Arute et al. 2019). Schon bald folgte eine ganze Flut von Artikeln, in denen die mutmaßliche Sensation für die breite Öffentlichkeit gedeutet und eingeordnet wurde. Googles Team könnte, so der Tenor der Berichte, bewiesen haben, dass sich die Vision eines Quantencomputers allmählich in eine technologische Realität verwandelt – mit potenziell massiven Folgen für die ganze Gesellschaft.

Als zukünftige Möglichkeiten, die sich mit Quantencomputern verbinden, verweisen diese potenziellen Folgen auf ein Geflecht an Vorstellungen, Erwartungen, Hoffnungen und Befürchtungen, das als Prozess der kollektiven Imagination einer zukünftigen Technologie wie dem Quantencomputer gegenwärtig eine soziale Gestalt gibt. In der Wissenschafts- und Technikforschung werden derartige kollektive Imaginationsprozesse als „sociotechnical imaginaries“ (Jasanoff/Kim 2015), „Leitbilder“ (Giesel 2007) oder „Technikzukünfte“ (Grunwald 2012) bezeichnet. Ihre Leistung ist es, zwischen Gruppen heterogener Akteur_innen geteilte Vorstellungen über eine als wünschens-

wert erachtete Zukunft zu konstituieren (Jasanoff 2015, S.4, dazu auch Ernst/Schröter 2020).

Auf das Paper des Google-Teams bezogen dient der titelgebende Begriff *Quantum Supremacy* (also Quantenüberlegenheit) als Fokalisierungspunkt für diese Imaginationsprozesse. Im Jahr 2012 von John Preskill geprägt, beschreibt ‚Quantenüberlegenheit‘ den Zustand, dass ein Quantencomputer gegenüber den stärksten existierenden traditionellen Supercomputern bei komplexen Berechnungen signifikante Geschwindigkeitsvorteile (aber auch geringere Energiekosten) aufweist. Diese Rechenaufgabe darf, so das bei Preskill genannte Kriterium, dabei ausdrücklich für den Zweck dieser Demonstration der Überlegenheit entworfen sein, benötigt also keinerlei praktischen Anwendungsnutzen (Preskill 2012; 2018, S.7; 2019). Doch warum die ganze Aufregung rund um Quantencomputer, wenn Quantenüberlegenheit eine Rechenspielerlei ohne jeglichen Nutzen ist?

Grundsätzlich betrachtet sind Quantencomputer eine für Wissenschaft und Industrie interessante Zukunftstechnologie, weil sie aufgrund ihrer *Qubits* mit Komplexitäten umgehen können, die für traditionelle Computersysteme nicht zu bewältigen sind.³ Entscheidend ist dafür eine „separation between

quantum and classical complexity“ (Preskill 2012, S.3), die bei Preskill sogar als die treibende Kraft hinter der Entwicklung von Quantencomputern generell gesehen wird (Preskill 2012, S.14).⁴ Das Paper des Google-Teams behauptet, die Überlegenheit eines Quantencomputers, der auf Googles *Sycamore*-Prozessor mit 53 *Qubits* beruht, demonstriert zu haben (Arute et al. 2019, S.506). Dabei wurde eine höchst spezialisierte mathematische Aufgabe in 200 Sekunden gelöst, für welche die gegenwärtig schnellsten klassischen Supercomputer rund 10.000 Jahre benötigen würden (ebd., S.505). Warum das Google-Team seinen Erfolg als einen epochalen „Milestone“ (ebd.) feiern kann, erklärt sich⁵ mit Blick auf die Bedeutung von Quantenüberlegenheit innerhalb des Fachdiskurses.

Preskill postuliert im Zug der Exposition seiner Kriterien, die Demonstration von Quantenüberlegenheit würde zeigen, dass kein bisher noch unbekanntes physikalisches Gesetz existiert, das die mögliche zukünftige Überlegenheit von Quantencomputern prinzipiell verhindert (Preskill 2012, S.2). Ist dieser Nachweis einmal

3 Die Möglichkeit eines Quantencomputers wurde bereits in den 1970er und 1980er-Jahren erwogen. In den 1990er-Jahren folgte dann die Ausarbeitung von Beispielen für mathematische Probleme, in denen Quantencomputer überlegen sein könnten (Hagar/Cuffaro 2019, S.9-11).

4 Im Feld der Diskussion zu Quantencomputern existieren zwei Formen der Unterscheidung in klassisch vs. nicht-klassisch, einmal als Unterscheidung innerhalb der Geschichte der Physik und einmal als Unterscheidung innerhalb der Geschichte des Computings.

5 Wie ebenfalls der Presse zu entnehmen, hat ein Team des Google-Konkurrenten IBM sofort eingewendet, dass die Aufgabe mit den richtigen Algorithmen von klassischen Computern auch in zweieinhalb Tagen gelöst werden könne (Pednault et al. 2019).

erbracht – und genau das reklamiert das Google-Team für sich (Arute et al. 2019, S.505) –, dann folgt daraus, dass eine bestimmte Ära in der Geschichte der Entwicklung von Quantencomputern eingeleitet wurde, und zwar die Ära sogenannter *Noisy Intermediate-Scale Quantum Technologies* (NISQ). NISQ ist ein diachroner Begriff, den Preskill (2018) in einem Paper mit dem Titel *Quantum Computing in the NISQ Era and Beyond* entworfen hat. Die NISQ-Ära ist eine Phase, in der Quantencomputer im Bereich nutzloser Anwendungen zwar gegenüber klassischen Supercomputer überlegen sind, aber noch dahingehend *noisy* bleiben, als die Stabilisierung der *Qubits* nach wie vor sehr fehleranfällig ist. „Intermediate“ bezieht sich auf die Menge der *Qubits*: Realistisch erwartbar sind nach Preskill Systeme in der Spannbreite von 50 bis wenigen Hundert *Qubits*, wobei bei ca. 50 *Qubits* die Grenze der Leistungsfähigkeit klassischer Supercomputer vermutet wird (Preskill 2018, S.5). Sind diese NISQs einmal realisiert, beginnt die eigentliche Zukunft des Quantencomputings. Doch Preskill stellt fest, dass das Erscheinen dieser Systeme ein „significant step toward the more powerful quantum technologies of the future“ (Preskill 2018, S.1) sei.

Vor dem Hintergrund dieser Zukunftserwartungen innerhalb der Fach-Community ist der Claim des Google-Teams, Quantenüberlegenheit demonstriert zu haben, also nicht nur legitimiert, sondern auch sehr bemerkenswert. Es scheint der Nachweis erbracht, dass die Zukunftsmaschine ‚Quantencomputer‘ im Begriff ist, zuneh-

mend die Potenziale einzulösen, die man ihr schon seit ihrem Entstehen zugeschrieben hat (vgl. etwa Meier 2015). Was dieses Beispiel einer auf die Zukunft bezogenen historischen Bedeutung der Quantenüberlegenheit also medienwissenschaftlich wichtig macht, ist nicht nur die physikalische Fachdiskussion selbst, sondern die mit ihr einhergehende Mobilisierung übergreifender *imaginaries* beziehungsweise Technik-zukünfte. Über diese kann ein Abgleich zwischen Vorstellung über die Zukunft von Quantencomputern innerhalb des Fachdiskurses und einer zunehmend größer werdenden Menge an allgemeinen gesellschaftlichen Erwartungen an diese Maschinen stattfinden (vgl. auch Ernst/Schröter 2020, S.51-60).

Als Experte im Feld ist Preskill dabei allerdings deutlich reservierter, als manches, was in der Öffentlichkeit bereits jetzt an Zukunft des Quantencomputings diskutiert wird. So bemerkt er in seiner Beschreibung der NISQs, dass Quantencomputer gegenüber klassischen Computern eigentlich viel zu unterschiedlich (quasi zu ‚fremd‘) seien, als dass man derzeit wirklich sicher etwas über die zukünftige Entwicklung dieser Maschinen sagen könnte (Preskill 2018, S.1). So sei es zwar plausibel, davon auszugehen, dass diese Maschinen in einigen Dekaden gesellschaftliche Effekte haben könnten, aber inwiefern diese Effekte zum Beispiel kommerziell nutzbar sind, sei gegenwärtig noch vollkommen offen (Preskill 2018, S.1, S.5).

Preskills Vorbehalte unterstreichen gleichwohl den strategischen Charakter einer Kategorie wie NISQ und bestäti-

gen so die soziale Bedeutung geteilter Zukunftsvorstellungen. Denn als eine geteilte Vorstellung über die Entwicklung von Quantencomputern beruht die Formulierung von Quantenüberlegenheit bei Preskill auf einer imaginären, als solchen aber für die Forschung in den Labors handlungsleitenden Timeline, innerhalb derer das Erscheinen von NISQs überhaupt erst die Bedeutung des besagten historischen ‚Milestone‘ erlangt. Wesentlich ist dafür die Annahme, dass mit dem Erscheinen von NISQs die bisher unklare Zukunft der Quantencomputer in ihren Möglichkeiten realer wird. In der Zukunftsforschung bezeichnet man diesen Prozess als das Auftauchen von „Futuribles“ (Jouvenel 1967, S.33-34). *Futuribles* sind in Utopien und ähnlichen Diskursformen tradierte Möglichkeiten, die aufgrund eines Ereignisses (Entdeckung oder Erfindung) ihren Status von nicht realisierbaren Möglichkeiten, die noch in einer fernen Zukunft liegen, zu realisierbaren Möglichkeiten ändern, die nunmehr in einer nahen Zukunft liegen. Ältere Utopien, im gegebenen Fall etwa ältere Medienutopien, erweisen sich im Lichte der neuen Möglichkeiten dann *ex post* als Informationsquellen und beeinflussen die Imagination dieser jetzt real gewordenen Möglichkeiten.

Auf Preskills Erörterungen von NISQs bezogen, ergibt sich daraus ein aufschlussreiches Bild. Das Demonstrieren von Quantenüberlegenheit und das Erscheinen von NISQs markiert innerhalb der Fachcommunity den Startpunkt der Zukunft des Quantencomputers. Allerdings wird auch die

Unbestimmtheit und Fremdheit dieser Technologien konstatiert, was wiederum die Bedeutung der derzeit zur Verfügung stehenden *imaginaries* betont. Auffällig ist dabei, dass zur Kompensation dieser Fremdheit auch im Fachdiskurs eine enge Anlehnung an ältere Utopien und Visionen der derzeitigen ‚klassischen‘ digitalen Medienkultur stattfindet. Deutlich wird das mit Blick auf die Unterscheidung analog/digital, deren Karriere bekanntlich weit über Computertechnologie im engeren Sinne hinausreicht (Schröter 2004a) und die infolge des Siegeszuges digitaler Medien inzwischen als Leitunterscheidung ganzer Gesellschaftsanalysen bemüht wird, etwa einer „digitalen Gesellschaft“ (Nassehi 2019).

Dass die Imaginationen rund um Quantencomputer dabei die Differenz analog/digital auf ganz verschiedene Weise als Kategorie zur Beschreibung dieser neuen Technologien bemühen, zeigt sich am bereits erwähnten Beispiel des analogen Charakters der *Qubits*, welche die Vermutung nahelegen, dass Quantencomputer paradigmatische ‚post-digitale‘ Maschinen sein könnten. Gleichwohl bleibt die Imagination möglicher praktischer Anwendungsszenarien dieser ‚post-digitalen‘ Computer derzeit noch dem Vorstellungshorizont der Medialität klassischer Digitalrechner verpflichtet. Exemplarisch veranschaulicht werden kann dies mit Blick auf einen der zentralen „Faszinationskerne“, der sich im 20. Jahrhundert mit Computern verbunden hat, und zwar der „Simulation“ (Glaubitz et al. 2011, S.103-117), die im Fachdiskurs derzeit insbesondere am Beispiel der Simula-

tion von Quantendynamiken, etwa von Molekülen in der Chemie, diskutiert wird.

In zwei Abschnitten seines Papers *Quantum Computing in the NISQ era and beyond* konstatiert Preskill (2018, S.13), dass die mit klassischen Computern aus Komplexitätstheoretischen Gründen extrem schwierige Simulation von Quantendynamiken das eigentliche Zukunftspotenzial von Quantencomputern sein könnte. Bei Anlass einer kurzen Darstellung möglicher technischer Lösungen unterscheidet er dazu zwischen einem *analog quantum simulator* und einem *digital quantum simulator*. So heißt es: „When we speak of an analog quantum simulator we mean a system with many qubits whose dynamics resembles the dynamics of a model system we are trying to study and understand. In contrast, a digital quantum simulator is a gate-based universal quantum computer which can be used to simulate any physical system of interest when suitably programmed, and can also be used for other purposes. Analog quantum simulation has been a very vibrant area of research for the past 15 years, while digital quantum simulation with general purpose circuit-based quantum computers is just now getting started“ (Preskill 2018, S.13).

Preskill nutzt hier eine semiotisch inspirierte Variante der Unterscheidung von analog/digital, die überdies das Leitbild des Digitalrechners als universell programmierbarer Maschine aufgreift und auf eine mögliche Applikation der neuen Quantentechnologien projiziert.

Gibt dieses Beispiel einen knappen Einblick in den Rückgriff auf die etablierte Mediengeschichte zur Beschreibung der zukünftigen Entwicklungen, so illustriert es zugleich, dass – wenn sich ein universell programmierbarer Quantencomputer in eine ganze Genealogie von zukünftigen Quantentechnologien einreicht, die zu medialen Zwecken (hier: Simulation) verwendet werden – sich auch die oben bereits angedeutete Frage in verschärfter Form stellt: Welche Spuren haben die Quantenphysik und die von ihr aufgezeigten Effekte bereits in der bisher bekannten Mediengeschichte hinterlassen?

Will man die Geschichte der Quantenmedien von der derzeit imaginierten Zukunft des Quantencomputers als einer im Kern noch fremden Zukunftstechnologie her erklären⁶, dann ist also zu zeigen, wie sich das

⁶ Interessante Materialien, um die gegenwärtigen Imaginationen um Quantencomputer zu analysieren, bietet die Science-Fiction. Nennen könnte man etwa die Romane *Hologrammatica* und *Qube* von Tom Hillebrand (2018/2020), in denen Quantencomputer als Gehirnersatz und -erweiterung, also als ‚Ausweitung des Menschen‘ im Sinne McLuhans dargestellt werden. Viel Aufmerksamkeit hat auch die *Trisolaris*-Trilogie von Cixin Liu (2017/2018/2019) auf sich gezogen, in der unter anderem Quantencomputer in der Gestalt der *Sophons* als Waffen im Krieg zwischen der Erde und den Außerirdischen eingesetzt werden – und zwar als Waffen in einem Informationskrieg, denn die *Sophons* sollen einerseits die Entwicklung von neuem physikalischen Wissen blockieren, können aber andererseits jede Kommunikation auf der Erde beobachten. In beiden fiktiven Darstellungen werden Quantencomputer also wie selbstverständlich als Medien imaginiert (siehe auch Ernst/Schröter 2020, S. 96-103).

bisherige Verhältnis von Quantenphysik und Mediengeschichte ausgestaltet. Das Erscheinen des Quantencomputers setzt die Medienwissenschaft in die Pflicht, die bisherige Geschichte der ‚Quantenmedien‘ aufzuarbeiten.

Stichpunkte zu einer Medienarchäologie der Quantenmedien

Der Begriff ‚Quantenmedien‘ wäre dann sinnlos, wenn er die offenkundige Tatsache bezeichnen würde, dass Medien, insofern sie (neben Institutionen, Programmen, Inhalten, Praktiken etc.) auch materielle und technologische Artefakte sind, letztlich aus denselben Elementarteilchen bestehen wie alle anderen materiellen Objekte. Auch soll er hier nicht verwendet werden für verschiedene mediale Anordnungen, durch die Wissen über Quantenphänomene erzeugt werden kann (vgl. Galison 1997).

Wir schlagen vielmehr vor, dass es neben a) Medien, deren Entstehung nicht auf quantenmechanisches Wissen angewiesen sind, b) Quantenmedien erster Stufe und c) Quantenmedien zweiter Stufe gibt. Unser Vorschlag ist also, die Mediengeschichte abhängig von der – wie schon betont wurde – absolut zentralen Rolle der Quantentheorie im 20. Jahrhundert zu gliedern.

a) Als Nicht-Quanten-Medium kann man zum Beispiel die Fotografie bezeichnen, eine Technologie, die im 19. Jahrhundert lange vor den ersten Schritten von Planck zur Quantenmechanik entstanden ist. Sie setzte zu ihrer Entwicklung kein quantenmechanisches Wissen voraus

und wurde gleichsam empirisch durch Experimente mit lichtempfindlichen Silberhalogenid-Emulsionen gefunden (vgl. Schaaf 2000 als eine schöne Studie, die Talbots experimentelles Ringen um die Fotografie nachzeichnet). Allerdings ist dieses Beispiel komplex: Zwar wurden fotochemische Effekte schon lange beobachtet und in zahllosen fotografischen Experimenten nutzbar gemacht, doch gelingt eine schlüssige theoretische Erklärung erst mithilfe der Quantentheorie im zwanzigsten Jahrhundert (vgl. Sponer 1930). Anders gesagt: Fotografie basiert letztlich – und das ist im Grunde wenig überraschend – auch auf Quanteneffekten, um diese nutzbar zu machen, war aber keine explizite Quantentheorie erforderlich. Ähnliches gilt auch für die Elektrizität als Grundlage aller elektronischen Medien. Elektrische Funktionalität war schon relativ früh bekannt und konnte daher praktisch genutzt werden, auch wenn erst mit der Quantenelektrodynamik im 20. Jahrhundert eine konsistente Erklärung für die elektromagnetischen Phänomene gefunden wurde (vgl. Feynman 2006).

b) Mit der Entwicklung der Quantenmechanik im zwanzigsten Jahrhundert setzt eine rasche Entwicklung von Technologien ein, die dieses Wissen voraussetzen. In diesem Sinne gilt: „Nicht die Digitalisierung ist die Revolution des zwanzigsten Jahrhunderts, sondern die Quantenmechanik, die ihre technische Implementierung erst ermöglicht hat“ (Hagen 2002, S.222). Oder um es anders zu sagen: „By some estimates, 30 percent of the United States’ gross national product is said

to derive from technologies based on quantum theory. Without the insights provided by quantum mechanics, there would be no cell phones, no CD players, no portable computers. Quantum mechanics is not a branch of physics; it is physics“ (zitiert in Barad 2007, S.252). So ist der Laser, der in einem CD (oder DVD oder Blu-Ray etc.)-Player die Disc abtastet, ein Beispiel für stimulierte Emission, die zuerst 1916 von Albert Einstein mit quantentheoretischen Argumenten vorhergesagt wurde. Der Laser war und ist auch eine Bedingung für die Herstellung von Holografien – die etwa in der einfachen Form des sogenannten Regenbogen-Hologramms als Sicherheitsmerkmal auf zahlreichen Banknoten und Kreditkarten sind. Auch hat Einstein schon 1905 eine quantentheoretische Erklärung für den fotoelektrischen Effekt geliefert, die letztlich, über die Arbeiten von Boyle und Smith (Nobelpreis 2009) zu eben jenen Bildsensoren geführt haben, die in Digitalkameras und Scannern anzutreffen sind.⁷ Die Halbleiter-Technologie, die in Gestalt des Transistors für moderne Computertechnologien grundlegend ist, kann theoretisch mit der Quantenmechanik beschrieben werden. Allerdings zeigen diese Beispiele auch: Das quantenmechanische Wissen ist oft nicht direkt notwendig (praxisnähere Konzepte aus der Chemie oder der Festkörperphysik sind oft hilfreicher), beziehungsweise gehen aus den theoretischen Konzep-

⁷ In Smartphones werden eher CMOS-Sensoren verwendet – die zwar anders aufgebaut sind, aber ebenso auf dem fotoelektrischen Effekt basieren.

ten nicht direkt Technologien hervor⁸ – solche Übergänge vom Wissen zu einer konkreten Technologie zu untersuchen, sind ein vorzügliches Anwendungsgebiet medienarchäologischer Verfahren (vgl. Hagen 2002).

c) Obwohl also die Mediengeschichte des zwanzigsten Jahrhunderts bereits im Kern eine Geschichte des quantenmechanischen Wissens war, wird nun eine „Quantenrevolution“ (Fürnkranz 2019, S.17) verkündet: Aus dem Computer wird der Quantencomputer, aus der Kryptographie die Quantenkryptographie und aus dem Internet das Quanteninternet (Fürnkranz 2019). Hat sich eine einschneidende Veränderung ereignet? Oder handelt es sich eher um eine sensationalistische Rhetorik wie jene, die seit geraumer Zeit das Digitale umgibt (vgl. Schröter 2004a)? Obwohl Sprache und Geld etwa seit jeher digitale Codes waren und es schon im 19. Jahrhundert mit der Telegraphie ein dezidiert digitales Medium gab, wird gegenwärtig viel von ‚Digitalisierung‘ geredet, als ob zuvor alles analog gewesen sei.⁹ Ist die viel beschworene Digitalisierung nicht eher die Ausbreitung mikroelektronischer, daher letztlich quantenbasierter, Technologien – also eher eine ‚Quantenmechanisierung‘?

Allerdings kann man begründet argumentieren, dass der Quantencom-

⁸ Das würde auch erklären, warum in vielen Mediengeschichten (z.B. Winston 1998) die Quantenmechanik gar nicht oder nur sehr am Rande erwähnt wird.

⁹ Unsinnige Begriffsprägungen wie ‚analoges Buch‘ (etwa im Unterschied zum E-Book) breiten sich aus.

puter (in seinen verschiedenen technischen Ausprägungen, siehe oben) das zentrale Prinzip der so genannten Digitalisierung, nämlich die binäre Codierung, wie sie für Computer bislang zentral war,¹⁰ eben zu überwinden vermag – zumindest in dem Sinne, dass ein gegebenes *Qubit* nun eben 0 und 1 gleichzeitig sein kann. Das heißt, obwohl die Mikrochips (auf der Basis von Silizium als Halbleiter) also bereits auf quantenmechanischem Wissen beruhen, ist die Form der Informationsverarbeitung – klar getrennt in 0 oder 1 – noch klassisch. In Quantencomputern wird die Form der Informationsverarbeitung selbst unter Ausnutzung von Quanteneffekten realisiert – dasselbe gilt für die Quantenkryptographie. In diesem Sinne kann, sofern Quantencomputer und Quantenkryptographie Verfahren zur Übertragung, Speicherung und Verarbeitung von Information und mithin Medien sind, von Quantenmedien zweiter Stufe gesprochen werden (im Unterschied z.B. zu ‚normalen‘ Computern als Quantenmedien erster Stufe).

Medienhistorisch bedeutet das zunächst, dass die bisherigen binär-digitalen Von-Neumann-Maschinen nicht das ‚Ende der Mediengeschichte‘ sind.¹¹ Offenbar entstehen neue Tech-

nologien und diese lassen sich in eine medienhistorische Betrachtung integrieren. So beschreibt Kittler (1999, o.S.) Mediengeschichte als Eskalation: „In einer strategischen Kette von Eskalationen entstand der Telegraph, um die Geschwindigkeit von Botenposten zu überbieten, der Funk, um die Verletzlichkeit von Unterseekabeln zu unterlaufen, und der Computer, um die ebenso geheimen wie abhörbaren Funksprüche zu entschlüsseln“. Dann wären Quantencomputer die Antwort auf eine mit PGP (*Pretty Good Privacy*) und verwandten Verfahren verschlüsselte Netzkommunikation zum Beispiel von kriminellen Menschen, sowie Terrorist_innen, denn diese ist mit konventionellen Computern nicht mehr zu dechiffrieren (zumindest benötigt das zuviel Zeit). Im Sinne von Winston wäre dies eine „supervening social necessity“ (1998, S.6), die die Entwicklung der Quantencomputer antreibt.¹² Nicht zufällig war einer der ersten Algorithmen für die damals noch hypothetischen Quantencomputer einer zur Primfaktorzerlegung (vgl. Shor 1997) – und viele der heute verwendeten Verschlüsselungen basieren eben

schiede zwischen einzelnen Medien. [...] [E]in totaler Medienverbund auf Digitalbasis wird den Begriff Medium selber kassieren“ (S.7f.).

10 Das Binärprinzip ist aber historisch kontingent und lediglich aufgrund seiner einfachen schaltungstechnischen Implementierbarkeit allgegenwärtig (vgl. Schröter 2004a).

11 So lässt sich zumindest eine Stelle bei Kittler (1986) interpretieren: „Vor dem Ende, geht etwas zu Ende. In der allgemeinen Digitalisierung von Nachrichten und Kanälen verschwinden die Unter-

12 Auch das medienhistorische Modell von Winkler (1997), in dem neue Medien auf die von alten Medien produzierten ‚Wünsche‘ antworten, würde es erlauben, den Wunsch nach Quantencomputern zu beschreiben – eben als den Wunsch, die von den bisherigen digitalen Medien angehäuften Datenmengen irgendwie beherrschen zu können.

auf der Schwierigkeit solcher Faktorisierung (vgl. Schröter 2004b, S.368f.). Allerdings wäre dann auch das Homebanking unbescholtener Bürger_innen nicht mehr sicher – wenn eben jene kriminellen Menschen über Quantencomputer verfügten. Allerdings gibt es auch Verschlüsselungsverfahren, die Quantencomputern standhalten können sollen (vgl. Bernstein et al. 2009), die zwar aufwändiger sind, aber dann eben bevorzugt zu entwickeln sein werden.

Noch komplizierter wird die Situation, wenn es funktionsfähige Verfahren der Quantenkryptographie gäbe – die theoretisch eine absolut unbeobachtbare Geheimkommunikation ermöglichen.¹³ Es gibt zwar bereits kommerzielle Lösungen,¹⁴ diese können jedoch noch gehackt werden (vgl. Lydersen et al. 2010). Wenn es aber funktionierende Quantenkryptographie gäbe, würde das absolut sichere politische und militärische Kommunikation ermöglichen, vielleicht auch absolut sicheres Homebanking, aber eben womöglich auch eine unbeobachtbare kriminelle und terroristische Kommunikation. Müsste nun – im Sinne von Winston – eine „suppression of radical potential“ (Winston 1998, S.11) einsetzen? Wird die Nutzung von Quantencomputern wie von Quantenkryptographie in der Zukunft stark reguliert werden müssen? Welche Verschiebungen in der Verteilung von

Beobachtbarkeit und Unbeobachtbarkeit wird dies auslösen?

Allerdings ist die Verschlüsselung keineswegs die einzige ‚necessity‘, die die Entwicklung von Quantencomputern antreibt – vielleicht nicht einmal die Wichtigste. Dass gerade große Digitalkonzerne wie Google die Entwicklung von Quantencomputern vorantreiben, hängt damit zusammen, dass angenommen wird, dass Quantencomputer große Datenmengen sehr viel schneller und effektiver durchsuchen und so Muster erkennbar machen als konventionelle Computer (vgl. Pandey/Ramesh 2015): Der Zusammenhang mit den Geschäftsmodellen von Google und Facebook et cetera ist offensichtlich.

Welche futuristischen Medientechnologien im Bereich künstlicher Intelligenz (vgl. Lloyd/Mohseni/Rebentrost 2013) oder neuer holografischer Displaytechnologien, die bislang ebenfalls an dem Problem zu großer und zu komplexer Datenmengen kranken (vgl. Winston 1998, S.341), durch die hohe Rechengeschwindigkeit von Quantencomputern möglich werden könnten – darüber kann derzeit nur spekuliert werden. Medientheoretisch wäre erneut festzuhalten, dass mit dem Quantencomputer, trotz allem Gerede über die Digitalisierung, wieder analoge Technologien wiederkehren: „Quantum computers are analog devices“ (Friesen et al. 2002, S.1). Die im Grunde schon lange bekannte Tatsache, dass ‚digital‘ nicht nach ‚analog‘ kommt und realiter beide Formen meistens gemischt auftreten (vgl. Schröter 2004a), wird erneut bestätigt. Mutmaßlich werden in Zukunft die Quantencomputer die

13 Geschichte und Prinzip der Quantenkryptographie werden dargestellt in Singh (2000, S.383–422); siehe auch Fürnkranz (2019, Kapitel 2.6).

14 Siehe etwa: <https://www.idquantique.com/> (15.02.2020).

konventionellen binär-digitalen Computer nicht ablösen, sondern beide Technologien werden koexistieren, da sie in speziellen Bereichen unterschiedliche Stärken und Schwächen haben.¹⁵ Für viele Aufgaben werden klassische Computer weiterhin ausreichen oder sogar besser geeignet sein – spezielle Rechenprobleme werden dann vielleicht an einen integrierten Quantenchip delegiert.

Weiterhin wurde diskutiert, ob die Nutzung von Verschränkungen (vgl. Fürnkranz 2019, S.47-54) den Begriff des Kanals, wie er mindestens seit Shannon und Weaver zentral für jenen der Kommunikation ist, affiziert: „Alle Information ist damit den Materialitäten verschrieben, in denen Codes übermittelt (oder verrauscht) werden. Dagegen setzt Anton Zeilinger seinen quantenphysikalischen Ansatz, der von der Verschränkung zweier entfernter Teilchen und damit der Überflüssigkeit einer Medientheorie des Kanals ausgeht“ (Ernst 2004, S.58).¹⁶ Allerdings kommt es wohl eher zu einer Vervielfältigung in Quantenkanäle und klassische Kanäle (vgl. Fürnkranz 2019, S.92), sodass auch keine überlichtschnelle Kommunikation möglich ist, wie es angesichts von Verschränkungsphänomenen zunächst scheint. Die Medientheorie des Kanals wird

also nicht überflüssig, sondern um einen weiteren Kanaltyp ergänzt.

Fazit: Perspektiven für die medienwissenschaftliche Forschung

Was lässt sich aus diesen Beobachtungen für die Medienwissenschaft festhalten? Zunächst ist festzustellen, dass Quantencomputer eine Zukunftstechnologie sind, die in der Medienkultur der klassischen Digitalrechner entstanden ist und auch auf lange Sicht ihre Anwendungsmöglichkeiten in diese Kultur integrieren wird. Gleichwohl wird ihnen das Potenzial zugesprochen, diese Kultur in einer noch unklaren Weise zu überschreiten. Insbesondere ist noch unklar, welche Praktiken sich entwickeln werden. Das wird nicht vorhergesagt werden können, aber genau deshalb ist es notwendig, die kollektiven soziotechnischen Imaginationsprozesse rund um Quantencomputer auf breiterer Grundlage zu beschreiben. Dass das Erscheinen von Quantencomputern die Medienwissenschaft dabei in durchaus überraschender Form auf die noch ungeschriebene Geschichte der Quantenmedien verweist, ist in dieser Hinsicht ein Symptom.

Dabei muss es darum gehen, die Querbezüge zur bereits existierenden Forschung systematisch aufzuarbeiten. Gleichzeitig aber ist die Geschichte der Quantenmedien auch eine theoretische Herausforderung, der sich bisher nur Theorien wie etwa Karen Barads Agentieller Realismus gestellt haben (vgl. Barad 2007). Inwiefern historisches Verständnis und theoretische Reflexion ineinandergreifen

15 Generell verschwinden alte Medien in der Regel nicht, sondern verändern ihre Funktion und existieren in speziellen Nischen weiter (ein gutes Beispiel dafür ist die analoge Schallplatte).

16 Zum sehr seltsamen Phänomen der Verschränkung siehe Bub (2019).

können, demonstriert insbesondere die vor dem Hintergrund einer allgemeinen Geschichte der Quantenmedien vorzunehmende Einordnung des Quantencomputers als ein Analogrechner eigener Art.

Nicht überraschend ist es daher, dass in der Medienwissenschaft vielleicht noch sehr unschwellig, in anderen Feldern, etwa der Philosophie des Geistes, aber bereits sehr explizit die Frage gestellt wird, was die Quantenphysik über natürliche Phänomene wie etwa das Bewusstsein aussagen (Atmanspacher 2019) – Phänomene also, die sich durch Informationsver-

arbeitung auszeichnen. Kosmologische Deutungen wie die, dass mit Schwarzen Löchern oder anderen natürlichen Phänomenen gerechnet werden kann, sind ebenso unterhaltsame Gedankenspiele (Meier 2015, S.155-165) wie die ironische Vorwegnahme eines zukünftigen, quantenbasierten „instantanen Kommunion-Mediums“ (Hillgärtner/Wiemer 2013, S. 74). Sie haben aber einen ernsten Kern, sofern uns Quantencomputer tatsächlich dazu aufordern könnten, das Verhältnis von Informationsverarbeitung und Materie historisch wie systematisch neu zu begreifen.

Literatur

Atmanspacher, Harald: „Quantum Approaches to Consciousness.“ (2019). <https://plato.stanford.edu/archives/win2019/entries/qt-consciousness/> (05.01.2020).

Arute, Frank et al.: „Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor.“ In: *Nature* 574, 2019, S.505-511.

Balbi, Gabriele: „Old and New Media: Theorizing Their Relationships in Media Historiography.“ In: Kinnebrock, Susanne/Schwarzenegger, Christian/Birkner, Thomas (Hg.): *Theorien des Medienwandels*. Köln: Halem, 2015, S.231-249.

Barad, Karen: *Meeting the Universe Halfway: Quantum Physics and the Entanglement of Matter and Meaning*. Durham/London: Duke University Press, 2007.

Benrath, Bastian: „Quantencomputer: Die nächste Revolution“. (2020) <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/netzkonferenz-dld/quantencomputer-die-naechste-revolution-16585851.html> (05.03.2020).

Bernstein, Daniel/Buchmann, Johannes/Dahmen, Erik (Hg.): *Post-quantum Cryptography*. Berlin/Heidelberg: Springer, 2009.

Bohr, Niels: „I: On the Constitution of Atoms and Molecules.“ In: *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 26 (151), 1913, S.1-25.

Born, Max: „Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge.“ In: *Zeitschrift für Physik* 37 (12), 1926, S.863-867.

Bub, Jeffrey: „Quantum Entanglement and Information.“ (2019). <https://plato.stanford.edu/archives/spr2019/entries/qt-entangle/> (01.03.2020).

- Dippel, Anne/Warnke, Martin: *Interferences and Events: On Epistemic Shifts in Physics through Computer Simulations*. Lüneburg: meson press, 2017.
- Einstein, Albert: „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt.“ In: *Annalen der Physik* 322 (6), 1905, S.132-148.
- Einstein, Albert: „Zur Quantentheorie der Strahlung.“ In: *Mitteilungen der Physikalischen Gesellschaft Zürich* 18, 1916, S.47-62.
- Einstein, Albert/Born, Max: *Albert Einstein Max Born, Briefwechsel 1916-1955*. München: Langen Müller, 2005.
- Ernst, Christoph/Schröter, Jens: *Zukünftige Medien: Eine Einführung*, Wiesbaden: Springer VS, 2020.
- Ernst, Wolfgang: „Den A/D-Umbruch aktiv denken – Medienarchäologisch, Kulturtechnisch.“ In: Schröter, Jens/Böhnke, Alexander (Hg.): *Analog / Digital – Opposition oder Kontinuum?: Zur Theorie und Geschichte einer Unterscheidung*. Bielefeld: transcript, 2004, S.49-65.
- Everett III, Hugh: *Theory of the Universal Wavefunction*. PhD-Thesis, Princeton University, 1956.
- Feynman, Richard: *QED. The Strange Theory of Light and Matter*. Princeton/Oxford: Princeton UP, 2006.
- Friesen, Mark/Joynt, Robert/Eriksson, M. A.: „Pseudo-digital Quantum Bits“ (2002). <https://arxiv.org/pdf/quant-ph/0208105.pdf> (15.02.2020).
- Fürnkranz, Gösta: *Vision Quanten-Internet: Ultraschnell und hackersicher*. Berlin/Heidelberg: Springer, 2019.
- Galison, Peter: *Image and Logic: A Material Culture of Microphysics*. Chicago/London: Chicago UP, 1997.
- Giesel, Katharina D.: *Leitbilder in den Sozialwissenschaften: Begriffe, Theorien und Forschungskonzepte*. Wiesbaden: Springer VS, 2007.
- Glaubitz, Nicola/Groscurth, Henning/Hoffmann, Katja/Schäfer, Jörgen/Schröter, Jens/Schwering, Gregor/Venus, Jochen: *Eine Theorie der Medienumbrüche 1900/2000*. Siegen: Universi, u.a. 2011.
- Grunwald, Armin: *Technikzukünfte als Medium von Zukunftsdebatten und Technikgestaltung*. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2012.
- Hagar, Amit/Cuffaro, Michael: „Quantum Computing“ (2019). <https://plato.stanford.edu/archives/win2019/entries/qt-quantcomp/> (01.03.2020).
- Hagen, Wolfgang: „Die Entropie der Fotografie: Skizzen zu einer Genealogie der digital-elektronischen Bildaufzeichnung.“ In: Wolf, Herta (Hg.): *Paradigma Fotografie: Fotokritik am Ende des fotografischen Zeitalters*. Bd.1. Frankfurt a. M.: Suhrkamp, 2002, S.195-235.

Hillebrand, Tom: *Hologrammatica*. Köln: Kiepenheuer und Witsch, 2018.

Hillebrand, Tom: *Qube*. Köln: Kiepenheuer und Witsch, 2020.

Hillgärtner, Harald/Wiemer, Serjoscha: „Materialien zur Quantenkommunikation.“ In: Ralf Adelman/Ulrike Bergermann (Hg.): *Das Medium meiner Träume*. Berlin: Verbrecher, 2013, S.51-76.

Jasanoff, Sheila: „Future Imperfect. Science, Technology, and the Imagination of Modernity.“ In: Jasanoff, Sheila/Kim, Sang-Hyun (Hg.): *Dreamscapes of modernity: Sociotechnical Imaginaries and the Fabrication of Power*. Chicago/London: Univ. of Chicago Press, 2015, S.1-33.

Jasanoff, Sheila/Kim, Sang-Hyun (Hg.): *Dreamscapes of Modernity. Sociotechnical imaginaries and the Fabrication of Power*. Chicago/London: Univ. of Chicago Press, 2015.

Jouvenel, Bertrand: *Die Kunst der Vorausschau*. Neuwied/Berlin: Luchterhand, 1967.

Kittler, Friedrich: *Grammophon Film Typewriter*. Berlin: Brinkmann und Bose, 1986.

Kittler, Friedrich: „Von der Implementierung des Wissens: Versuch einer Theorie der Hardware“ (1999). <https://nettime.org/Lists-Archives/nettime-l-9902/msg00015.html> (15.02.2020).

Liu, Cixin: *Die drei Sonnen*. München: Heyne, 2017.

Liu, Cixin: *Der dunkle Wald*. München: Heyne, 2018.

Liu, Cixin: *Jenseits der Zeit*. München: Heyne, 2019.

Lloyd, Seth/Mohseni, Mahoud/Rebentrost, Patrick: „Quantum Algorithms for Supervised and Unsupervised Machine Learning.“ (2013). <https://arxiv.org/pdf/1307.0411.pdf> (15.02.2020).

Lydersen, Lars/Wiechers, Carlos/Wittmann, Christoffer/Elser, Dominique/Skaar, Johannes/Makarov, Vadim: „Hacking Commercial Quantum Cryptography Systems by Tailored Bright Illumination.“ In: *Nature Photonics* 4 (10), 2010, S.686-689.

Meier, Christian J.: *Eine kurze Geschichte des Quantencomputers: Wie bizarre Quantenphysik eine neue Technologie erschafft*. Hannover: Heise, 2015.

Nassehi, Armin: *Muster: Theorie der digitalen Gesellschaft*. München: C. H. Beck, 2019.

Pandey, Abhishek/Ramesh, V.: „Quantum Computing for Big Data Analysis.“ In: *Indian Journal of Science* 14 (43), 2015, S.98-104.

Pednault, Edwin/Gunnels, John/Maslov, Dmitri/Gambetta, Jay: „On ,Quantum Supremacy‘.“ (2019). <https://www.ibm.com/blogs/research/2019/10/on-quantum-supremacy/> 10.04.2020.

Planck, Max: „Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum.“ In: *Annalen der Physik* 309 (3), 1901, S.553-563.

Preskill, John: „Quantum Computing and Entanglement Frontier: Rapporteur talk at the 25th Solvay Conference.“ (2012). <https://arxiv.org/abs/1203.5813> (02.03.2020).

Preskill, John: „Quantum Computing in the NISQ Era and Beyond.“ (2018). <https://quantum-journal.org/papers/q-2018-08-06-79/> (02.03.2019).

Preskill, John: „Why I Called It ‚Quantum Supremacy‘.“ (2019). <https://www.quantamagazine.org/john-preskill-explains-quantum-supremacy-20191002/> (02.03.2020).

Schaaf, Larry: *The Photographic Art of Henry Fox Talbot*. Princeton: Princeton UP, 2000.

Schubert, Christian: „Im Quantenfieber.“ (2019) <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/wie-die-quantentechnologie-die-wirtschaft-bewegt-16527306.html> (05.03.2020).

Schrödinger, Erwin: „Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik I.“ In: *Die Naturwissenschaften* 23 (48), 1935, S.809-812.

Schröter, Jens: „Analog / Digital – Opposition oder Kontinuum?“ In: ders./ Böhnke, Alexander (Hg.): *Analog / Digital – Opposition oder Kontinuum?: Zur Theorie und Geschichte einer Unterscheidung*. Bielefeld: transcript, 2004a, S.7-30.

Schröter, Jens: „Technik und Krieg. Fragen und Überlegungen zur militärischen Herkunft von Computertechnologien am Beispiel des Internets.“ In: Segeberg, Harro (Hg.): *Die Medien und ihre Technik: Theorien – Modelle – Geschichte*. Marburg: Schüren, 2004b, S.356-370.

Schröter, Jens/Schwering, Gregor: „Modelle des Medienwandels und der Mediengeschichtsschreibung.“ In: Schröter, Jens (Hg.): *Handbuch Medienwissenschaft. Unter Mitarbeit von Simon Ruschmeyer und Elisabeth Walke*. Stuttgart: J.B. Metzler, 2014, S. 179-190.

Shor, Peter W.: „Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer.“ In: *SIAM Journal on Computing* 26 (5), 1997, S.1484-1509.

Singh, Simon: *Geheime Botschaften: Die Kunst der Verschlüsselung von der Antike bis in die Zeiten des Internet*. München: Hanser, 2000.

Sponer, H.: „Der photochemische Primärprozeß.“ In: *Zeitschrift für angewandte Chemie* 43, 1930, S.823-830.

Warnke, Martin: „Quantum computing.“ In: ders./Coy, Wolfgang /Tholen, Georg Christoph (Hg.): *HyperKult 11. Zur Ortsbestimmung analoger und digitaler Medien*. Bielefeld: transcript, 2005, S.151-172.

Warnke, Martin: „Quantencomputer: Taktlos.“ In: Kassung, Christian/Macho, Thomas (Hg.): *Kulturtechniken der Synchronisation*. Paderborn: Wilhelm Fink, 2013, S.269-287.

Warnke, Martin: „Quantencomputer / Quantenkryptographie.“ In: Schröter, Jens (Hg.): *Handbuch Medienwissenschaft: Unter Mitarbeit von Simon Ruschmeyer und Elisabeth Walke*. Stuttgart: J.B. Metzler, 2014, S.369-371.

Williams, Colin P./Clearwater, Scott H.: *Ultimate Zero and One – Computing at the Quantum Frontier*. New York: Copernicus, 2000.

Winkler, Hartmut: *Docuverse: Zur Medientheorie der Computer*. München: Boer, 1997.

Winston, Brian: *Media Technology and Society: A History from the Telegraph to the Internet*. London/New York: Routledge, 1998.