

17. Jan. 17.50.43

RES169_Quantencomputer

Willkommen zum Forschungspodcast der Helmholtz-Gemeinschaft.

Ich bin Holger Klein.

Frank Wilhelm Mauch ist Gründer und Direktor des Instituts für Quantum Computing Analytics am Peter-Grünberg-Institut des Forschungszentrums Jülich.

Klingt schon mal geil.

Das heißt, es geht in dieser Sendung um Quantencomputer und das, wo ich nicht mal wirklich kapiert habe, wie überhaupt schon ein normaler Computer funktioniert.

Aber ich kann ja nachfragen.

Hallo Herr Wilhelm Mauch.

Hallo Herr Klein.

Was ist ein Computer?

Ein Computer ist eine Maschine, die Eingabe mittels einer Rechenvorschrift in Ausgabe umwandelt und das unglaublich schnell und unglaublich automatisiert.

Aber man kann es tatsächlich auf dieses einfache Rechnen von Eingabe auf Ausgabe und das natürlich mit Wiederholungen mehrfache Eingaben und Ausgaben runterbrechen.

Und wie macht der Computer das?

Also wie rechnet der?

Weil das ist ja, glaube ich, das, was dann den Quantencomputer letztlich fundamental unterscheiden wird.

Ja, da gibt es natürlich zwei Sorten von Antworten.

Ich fange mal mit der Theorieantwort an.

Die ist nämlich eigentlich ganz instruktiv.

Es wurde vor langer Zeit gezeigt von Alan Turing, dass alle Computer, die wir haben, sich auf ein einziges Modell herunterbrechen lassen, das bis heute für alle klassischen Computer, also für alle Nicht-Quantencomputer, für alle herkömmlichen Computer Gültigkeit hat.

Das heißt, dann auch die Turing-Maschine.

Und das ist sehr alt und sehr primitiv.

Und das besteht einfach dadurch, dass man einen großen Bandspeicher hat, auf dem man Dinge ablegen kann.

Man kann lesen und schreiben, man kann hin und her fahren und man kann das, was man gerade gelesen und geschrieben hat, miteinander verknüpfen und wieder auf das Band draufschreiben.

Das würde niemand heutzutage so bauen.

Statt Bandspeicher haben wir den Arbeitsspeicher oder den Festplattenspeicher unseres Computers.

Das Schreiben und das Lesen machen wir natürlich nicht mechanisch, sondern auch digital.

Und für die Rechenoperationen haben wir einen großen Befehlssatz.

Aber am Ende machen unsere modernen Computer das Gleiche, nur ganz viel effektiver.

Es ist übrigens ganz interessant, das war eigentlich nur als Gedankenexperiment gedacht, aber... [Siebert] Ach, ich dachte, das wäre eine echte Maschine, die Turing-Spartcom.

[Siebert] Nein, also das war als Gedankenexperiment gedacht, auch um Fragen zu beantworten, wie aufwendig ist denn eine Rechnung oder ist etwas überhaupt berechenbar, damit man ein einfaches Modell hat.

Es hat aber tatsächlich vor einigen Jahren eine Organisation in den Niederlanden tatsächlich ein Modell einer realen Turing-Maschine gebaut und zwar aus Lego.

Das kann man sich auch im Netz gefilmt anschauen.

Und letztlich, unsere klassischen Computer machen das Ganze nur viel besser.

[Siebert] Schneller und mit mehr Daten wahrscheinlich.

[Siebert] Schneller, mit mehr Daten und was natürlich jetzt im Augenblick der große Treiber des Fortschritts bei Computern ist, auch parallel.

Also man kennt es ja, wenn man sein neues Handy oder seinen neuen PC kauft, steht dann auch immer drin, wie viele Kerne hat denn der.

Das bedeutet letztlich wie viele Rechnungen... [Siebert] Habe ich auch nie verstanden.

[Siebert] Ja.

Es ist die Frage immer, wie viele Rechnungen kann der parallel durchführen.

Das ist ganz wichtig, weil man hat sich ja gewöhnt, Computer werden immer schneller und besser und das ist irgendwie auch beim wissenschaftlichen, auch beim wirtschaftlichen Fortschritt schon eingepreist, dass die immer besser werden.

Aber irgendwann hat man gemerkt, jetzt die Taktfrequenz noch groß über die 3 Gigahertz, die man so heutzutage in guten Situationen erreichen kann, hochzudrehen, stößt an seine physikalischen Grenzen.

Und stattdessen ging dann der Fortschritt darin, dass man einfach auf einen Chip gleich das Äquivalent von mehreren Chips gepackt hat.

Und überall, wo man sehr viel Daten gleichzeitig durch die Maschine drehen muss, kann man das dann eben in einem Zyklus, also 3 Gigahertz würde ja heißen, drei Millionen Rechenzyklen pro Sekunde.

Und wenn man jetzt mehrere Kerne hat, kann man halt bei acht Kernen dann acht dieser Rechenzyklen, also kann man pro Zeiteinheit acht dieser Rechenoperationen gleichzeitig machen.

Also hat man praktisch einen virtuellen 24 Gigahertz Prozessor.

Das hat man, wobei man natürlich beim Parallelisieren immer gucken muss.

Stimmt, da fallen ja auch mehrere Ergebnisse gleichzeitig raus.

Bei Quantencomputern wird es dann auch um eins spannen.

Noch nicht, noch nicht.

Ja, genau.

Aber beim klassischen Parallelcomputer muss man natürlich auch gucken, wenn ich jetzt mehrere Prozesse gleichzeitig habe, wie oft müssen die denn miteinander reden.

Weil wenn die miteinander reden, müssen die aufeinander warten und da geht Zeit verloren.

Also acht Kerne oder acht Prozessorkerne bedeutet jetzt nicht unbedingt acht Mal so schnell.

Wenn es gut läuft, sind das dann vielleicht sechs bis sieben Mal.

Wenn es schlecht läuft, bringt es ganz wenig, wenn man wirklich alles hintereinander durchmachen muss.

Und was Sie vielleicht schon mal gehört haben, ist, dass das der letzte Schrei ist, wenn es wirklich Aufgaben gibt, wo man ganz massiv parallel dran gehen muss.

Das ist oft der Fall in der künstlichen Intelligenz.

Da nimmt man gar nicht mehr den klassischen Prozessor, die klassische CPU, Central Processing Unit.

Die Grafikkarten nehmen die.

Man nimmt die Grafikkarten, genau.

Die können ganz, ganz wenig, aber die können das dann gleich hundertfach parallel und sind dann für bestimmte Aufgaben eben viel besser als eine Form aus vielen normalen CPUs.

Wo sind denn eigentlich, ja doch, wo sind die physikalischen Grenzen der

Taktfrequenz?

Oder warum gibt es die?

Also die eine physikalische Taktfrequenz, äh, Grenze ist, dass wir ja auch auf den verschiedenen Transistoren, die auf einem Prozessor sind, kommunizieren müssen.

Diese Kommunikation kann nicht schneller sein als die Lichtgeschwindigkeit.

Und in der Praxis, weil sich die Signale nicht im Vakuum, sondern auf dem Chip ausbreiten, ist es auch ein bisschen langsamer als die Lichtgeschwindigkeit.

Und die Elemente können nicht mehr so viel kleiner werden, weil man dann irgendwann an der Stelle ist, wo in einem Transistor nur noch ganz wenige Atome drin sind und das Modell des Transistors zusammenbricht.

So einem Transistor hat man ja Silizium, aber er funktioniert nur, weil auch ein ganz kleiner Anteil Störatome drin ist, Phosphor oder Stickstoff.

Und wenn ich ein Prozent Phosphor habe, aber nur 50 Atome, dann habe ich halt in der Hälfte meiner Transistoren überhaupt kein Phosphor mehr drin.

Dann tut es nicht mehr.

Verstehe.

Das andere Problem ist, dass wir irgendwann dazu kommen, dass die Wellenlänge des Lichts und die Fähigkeit – nicht Wellenlänge des Lichts, Wellenlänge von Mikrowellen – eine Rolle spielen.

Wenn ich sehr, sehr auf sehr schnelle Taktfrequenzen gehe, ist das nicht mehr so wie die Abläufe innerhalb meines Radios, dass ich verschiedene Leitungen zwischen Bauelementen habe, sondern dann funktioniert die Signalausbreitung

mehr wie Radar.

Dann wird das ein Problem, dass ich da Wellen managen muss.

Und das wird auch sehr viel kleiner, sehr viel schwieriger.

Und auch verschiedene Bauelemente kann man einfach auch vom Energieverbrauch nicht mehr höher takten.

Wenn Sie einen bestimmten Energieverbrauch pro Zeiteinheit haben und das nochmal verzehnfachen, dann wird die Leistung, die so ein Prozessor funktioniert, so hoch, dass Sie das nicht mehr kühlen können.

Tatsächlich ist das Kühlen von Hochleistungsrechnern heute schon sehr, sehr aufwendig.

[Siebert] Das heißt, die drei Gigahertz, die bei mir zu Hause vor sich hin rechnen, grenzen schon beinahe an Magie.

[Kehlmann] Das hat man schon ganz schön ausgeratzt.

Da hat man so bei physikalischen Gesetzen, wo man in der Physik sagt, na ja, bei der Skala wird es dann schwierig, haben dann Ingenieureinnen und Ingenieure gesagt, klar, wissen wir, aber jetzt reizen wir die Skala auch wirklich bis an ihre Grenze aus.

Das läuft meines Erachtens im Stichwort das Ende des Mooreschen Gesetzes, also das Gesetz, dass Rechner immer kleiner und leistungsfähiger werden, was eigentlich nur eine Verabredung der Halbleiterindustrie ist.

[Siebert] Ach komm, nee.

[Kehlmann] Doch, doch.

Also die haben sich mal hingestellt.

Also Moor, der Gründer von Intel, der war ganz, also der war insofern brilliant, der hatte eigentlich nur Datenpunkte und er hat dann gesagt, so alle paar Jahre halbiert sich die Größe eines Bauelementes und das wurde sehr, sehr lange durchgehalten.

Und die treffen sich alle paar Jahre und sagen dann, okay, wenn wir jetzt den Fortschritt weiterschreiben müssen, müssen die Transistoren zum 11, zum 8, zum 6 Nanometer Größenknoten kommen und das müssen wir irgendwie erreichen.

Und der Wettbewerb ist so hart, dass die das dann auch irgendwie alles wieder schaffen.

Das Ende des Moorschen Gesetzes wurde schon sehr, sehr oft vorhergesagt, also eigentlich schon in den 90er Jahren.

Und ich weiß gar nicht von wem diese Aussage ist, aber also paraphrasiert, Nachrichten über den Tod des Moorschen Gesetzes waren bis jetzt immer verfrüht.

Aber inzwischen wird es richtig teuer und auch vom Energieverbrauch richtig schwierig, das Moorsche Gesetz weiter durchzuhalten.

[Siebert] Jetzt haben wir hier noch "The Great Transistor Swindle".

[Kehlmann] Nein, nein, das ist kein Swindle.

Also das Großartige war, das hat Jahrzehnte gehalten, obwohl Gordon Moore nur drei Datenpunkte gesehen hat.

Und das hat dazu geführt, dass man jetzt extremes Ultraviolettlicht zur Chip-Herstellung braucht, weil Belichten, das Maskenherstellen funktioniert ja im Prinzip wie die gute alte chemische Fotografie auf Steroiden.

Das macht man jetzt mit Ultraviolett wegen kleinerer Wellenlänge und man trickst rum und man hat es bis jetzt immer geschafft.

Aber im Augenblick wird das eben teuer, das weiter mit den normalen Transistoren durchzuhalten, weshalb man sich jetzt auch diese neuen Computerparadigmen wie zum Beispiel Quantencomputer anguckt.

[Siebert] Dann gucken wir uns die mal an.

Was sind denn eigentlich Quanten?

[Kehlmann] Was sind Quanten?

Quanten sind die unteilbaren Einheiten von Dingen, die in der Natur vorkommen.

Also wenn ich eine Größe in der Natur habe, zum Beispiel die Energie, wie sie in Licht vorkommt.

Licht überträgt Energie.

Wenn ich meine Hand in die Sonne halte, wird es irgendwann warm.

Und versuche, diese Energie immer kleiner zu machen.

Da merke ich an einer bestimmten Stelle, da gibt es jetzt diskrete Einheiten, diskrete Klumpen, die ich nicht mehr kleiner machen kann.

Das sind die eigentlichen Quanten.

Und wenn man die erreicht hat, hat man dann die Gesetze der Quantenphysik, die dann auch anders sind auf dieser mikroskopischen Ebene als die Gesetze der Physik im Alltag, die man so um sich herum... [Siebert] Also der Quantenapfel fällt nicht unbedingt zu Boden.

[Kehlmann] Der Quantenapfel fällt nicht – der fällt schon auch zu Boden.

Aber zum Beispiel – also erstens mal ist natürlich ein richtiger Apfel so groß, dass die Effekte der Quantenphysik nicht richtig auftreten.

Und er fällt zu Boden.

Aber wenn ich vorhersagen möchte, wo genau und wann genau, dann habe ich Schwierigkeiten, das wirklich genau zu machen.

Und wenn der Apfel jetzt so ganz klein wäre und auch so präpariert wäre, dass man einen Quanteneffekt wirklich herauskitzeln kann, fällt das vielleicht auch an zwei Stellen zu Boden.

[Siebert] Das heißt, ich habe hinterher zwei Äpfel.

[Kehlmann] Sie haben nicht hinterher zwei Äpfel, aber Sie können zum Beispiel den Apfel auf zwei Wegen fallen lassen.

Und wenn der Apfel auf zwei Wege gezwungen ist – Sie haben zum Beispiel eine kleine Maske, während der runterfällt, das heißt, es gibt eine Platte, das gibt nur zwei Spalte oder zwei Löcher drin, wo der durch kann, und Ihr Apfel entsprechend sehr, sehr klein ist, dann wird der nicht an einer bestimmten Stelle aufschlagen.

Aber die wird erst mal nicht so aussehen wie die Stelle, wo Sie das klassisch erwartet hätten.

Und wenn Sie das dann wiederholen mit gleichartig präparierten Äpfeln, also Sie tun alles, was Sie vorher gemacht haben, um das Experiment zu machen, wird der woanders herauskommen.

Und wenn Sie das oft wiederholen, werden Sie dann merken, dass es bei Ihnen

am Boden ein Streifenmuster gibt.

Und dieses Streifenmuster kann man dadurch erklären, dass der Apfel sich eigentlich nicht entscheidet, durch welches dieser beiden Löcher er hindurch geht.

Und durch diese Überlagerung von zwei Alternativen erzeugt er ein völlig neues Bild.

Die Unteilbarkeit der Einheiten der Dinge in der Natur, die Sie eben genannt haben, wissen wir, dass die unteilbar sind?

Oder kann es auch sein, dass wir die nur noch nicht teilen können?

Also das ist immer so eine Unteilbarkeit unter bestimmten Bedingungen.

Und man kann dann, also sozusagen eine Einheit, in der ein Prozess abläuft.

Wenn wir ein Beispiel nehmen, die Beispiele sind natürlich jetzt alle ein wenig verkopft.

Aber wenn Sie einen Lichtstrahl nehmen, nehmen wir Lichtteilchen.

Das ist so das akademische Beispiel, zwar das akademische Beispiel, aber vielleicht ganz gut vermitteln kann.

Also stellen Sie sich vor, Sie haben Licht, Sie merken, das prallt bei Ihnen auf der Haut auf, es wird immer wärmer.

Jetzt machen Sie das Licht immer schwächer, die Haut registriert das nicht mehr.

Aber Sie haben jetzt einen Detektor, der immer zählt, wie viel Energie jetzt durch das Licht ankommt.

Und Sie machen die... Wie viele Photonen auf mich aufschlagen.

Genau, Lichtteilchen, Photonen.

Und Sie machen das immer schwächer.

Irgendwann merken Sie, das kommt eben nicht so als kontinuierlicher Lichtstrahl, sondern das kommt in Klumpen, eben den Photonen, den Lichtteilchen.

Und wenn das Licht jetzt einfarbig ist, hat jedes Photon die gleiche Energie.

Weil die Lichtenergie ist pro Photon, ist proportional zur Frequenz.

Frequenz ist eins geteilt durch Wellenlänge und die Wellenlänge gibt mir an, welche Farbe das Licht hat.

Jetzt kann ich natürlich hergehen und mir ein spezielles Material suchen, das die Farbe des Lichts verändert.

Also ein Material, das bestimmte Eigenschaften hat.

Und wenn ich da mit Blau reingehe, kommt Rot heraus.

Es gibt bestimmte Materialien, die das machen.

Das sind bestimmte transparente Kristalle, die das tun.

Die verwendet man auch beim Bauen von Lasern.

Und jetzt hat blaues Licht am blauen Ende des Spektrums eine Wellenlänge von 400 Nanometern, am roten Ende 800 Nanometer.

Das passt, das ist gerade das Doppelte.

Das heißt, ein blaues Lichtteilchen hat die gleiche Energie wie zwei rote Lichtteilchen und sie haben dann mit diesem Prozess im Prinzip ein blaues in zwei rote geteilt.

Aber wenn sie jetzt bei der gleichen Farbe gucken, kommen die immer noch in diskreten Einheiten.

Und das ist sozusagen in der technologieorientierten Quantenphysik das, was wir meinen, wenn es nicht mehr geteilt werden kann.

Es gibt natürlich noch die fundamentale Physik, die Welt der Kolleginnen und Kollegen aus der Elementarteilchenphysik, wo man merkt, es gibt die Atome als Materiebausteine.

Wenn man reinguckt, stellt man fest, die bestehen aus Kern und Hülle.

Wenn man in den Kern reinguckt, gibt es da Protonen und Neutronen.

Dann schaut man da nochmal rein, da gibt es Quarks.

Und dann auf einmal haben wir Felder.

Genau.

Und Feld und Materie sind gar nicht so unterscheidbar.

Genau.

Ich glaube, bei Quarks sind wir jetzt ganz stabil.

Okay.

Da jetzt zu gucken, also da gab es jetzt noch dieses Myonenexperiment, wo man genau anschaut, ob das vielleicht doch das Standardmodell, was man dort hat,

vielleicht doch stimmt.

Das ist jenseits meiner eigenen Expertise hier jetzt was Qualifiziertes zu sagen.

Das ist relativ weit weg von der Arbeit.

Sie brauchen sich einfach nur den letzten Resonator anzuhören.

Da habe ich mit einer Kollegin von Ihnen vom DESI gesprochen über genau das.

Wunderbar.

Da ziehe ich den mal vor.

So, gucken wir Quantencomputer weiter an.

Wie funktioniert jetzt der Quantencomputer?

Also, ich habe eine Eingabe, da rechnet was und ich habe eine Ausgabe bei meinem herkömmlichen Computer.

Habe ich das beim Quantencomputer auch so?

Das haben Sie auch so.

Und tatsächlich, die Eingabe und die Ausgabe sind auch weiterhin binäre Daten.

Also weiterhin nehme ich meine Daten, Text, Sprache, Bilder, Messergebnisse und schlüssel sie erstmal auf in Nullen und Einsen.

Und so lese ich das auch aus.

Das heißt also, die Darstellung meiner Daten ist immer noch binär.

Der Unterschied passiert jetzt, wenn ich in die Rechnung hineinschaue.

In einem klassischen Computer teile ich die, wie wir gerade schon besprochen haben, möglicherweise auf so ein paar Stränge auf.

Aber in einem Strang habe ich da meine Daten in so ein paar Register aufgeteilt.

Hier steht die eine Information, hier steht die andere Information.

Und zu jedem Zeitpunkt, wenn ich in so ein Register angucke, hat es einen bestimmten Zahlenwert.

Kann ich immer mal checken.

Wunderbar.

Das entspricht in dem Bild, was wir von dem fallenden Apfel hatten, tatsächlich dem klassischen Apfel.

Wenn der Apfel runterfällt, dann ist er zu jedem Zeitpunkt an einem bestimmten Ort.

In erster Näherung fällt er gerade runter, in zweiter Näherung kriegt er dann noch ein bisschen Luftwiderstand.

Wenn der Wind von der Seite kommt, driftet er vielleicht noch in eine Richtung ab, aber er ist immer an einem bestimmten Ort.

In der Quantenphysik machen wir jetzt das Gleiche, was wir vorhin gesagt haben, dass der Apfel, wenn er zwei Löcher hat und die Löcher quantenmechanisch richtig designed sind.

Also wenn ich das dazu sage, vielleicht als kleiner Exkurs, dann habe ich immer im Hinterkopf, dass die klassische Physik, die wir kennen, ist sozusagen ein

Spezialfall der Quantenphysik.

Ein wichtiger Spezialfall.

Das heißt, ich muss immer dazu sagen, ich präpariere das so, dass etwas nicht Klassisches passiert.

Etwas, was mit der klassischen Physik nicht vereinbar ist.

Wenn ich das jetzt mache, haben wir ja gesagt, dann gibt es am Ende ein Bild, das dazu passt, dass der Apfel durch die beiden Löcher gleichzeitig geht.

So, jetzt mache ich das Gleiche im Quantencomputer mit Daten.

Jetzt erlaube ich meinen Registern, während gerechnet wird, bevor ich an einem Ergebnis schaue, mehrere Werte auf eine bestimmte Art und Weise gleichzeitig zu haben, auf eine quantenmechanische Art und Weise gleichzeitig zu haben.

Das heißt, ich kann, wenn ich zum Beispiel etwas an der Liste nachschaue, dem Register sagen, das, was du jetzt angucken sollst, ist nicht ein Eintrag in der Liste, das ist die ganze Liste.

Das heißt, so ein einzelnes Register kann unglaublich parallel verarbeiten.

Ich muss nicht vorher sagen, wenn ich achtmal parallel rechnen möchte, muss ich achtmal den Prozesse, muss ich acht Prozessoren bauen und die verschiedenen Rechnungen eine pro Prozessor laufen lassen, sondern ich kann das in meinem einzelnen Prozessor machen.

Das hat aber jetzt einen Pferdefuß, denn während ich rechne, wenn ich da jetzt nachgucken würde und der Quantencomputer beschließt gerade, in ganz vielen Werten gleichzeitig zu sein, was kommt denn da als Ergebnis raus?

Damit kann ich ja gar nichts anfangen.

Der bringt dann irgendwas.

Und das stimmt tatsächlich, dass er irgendwas bringt.

Er bringt alle möglichen Ergebnisse mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten.

Das heißt, ich muss am Schluss meinen Algorithmus so bauen, im Prinzip wie der Apfel, der dann hinter diesem Aufbau aufschlägt, dass diese Unsicherheit wieder rausgenommen wird, sodass ich am Ende ein vernünftiges Ergebnis bekomme.

Das ist die Kunst beim Programmieren von Quantencomputern.

Wenn Sie sagen, der Quantencomputer beschließt, wie beschließt er das?

Der hat ja kein Willen.

Ja, beschließen ist tatsächlich das falsche Wort.

Aber wenn wir den Quantencomputer programmieren, da haben wir eine Programmiersprache, die der Programmiersprache von einem klassischen Computer eigentlich relativ stark ähnelt.

In dem Sinn, es gibt eine Zeitachse, auf der sind Befehle angeordnet.

Und ich habe meistens außenrum eine Programmierumgebung, die dafür sorgt, dass ich mich mit den Details der Hardware nicht so richtig auseinandersetzen muss, dass es bequem zu programmieren ist.

Der Clou ist jetzt aber, dass mir durch diesen Charakter der Quantendaten, dadurch, dass die mehrere Werte gleichzeitig haben können, das nennt man eine Überlagerung von Werten, habe ich einfach Befehle in meinem Befehlssatz, den ich dem Quantencomputer geben kann, die das ausnutzen.

Die sagen, lieber Quantencomputer, wir wissen, du startest in 0, aber jetzt gehe bitte mal auf eine 50/50 Überlagerung von 0 und 1.

Und insofern, der Quantencomputer beschließt das nicht, sondern bei der Programmierung haben wir Befehle, die diese Überlagerungen erzeugen und dies uns zum Beispiel überlegen, uns erlauben.

Ich möchte was testen, wo ich einmal eine Eingabe 0 habe, einmal eine Eingabe 1 habe und ich sage meinem Register, okay, jetzt machen wir 0 und 1 gleichzeitig und schick mal das an den Test.

Wie sagen Sie dem Quantencomputer, dass er dieses Überlagern machen kann?

Also wirklich, ich kann nicht programmieren.

Ich erinnere mich dunkel an das, was wir damals in der Schule gemacht haben, das ist auch über 30 Jahre her.

Ist das nicht ein, ich weiß noch so, also "if then" und "else" gab es dann auch immer noch.

Und die Überlagerung wäre dann doch vielleicht dieses "else", oder?

Ja, die Überlagerung ist, ich würde das jetzt nicht als "else" bezeichnen, aber zum Beispiel, was man machen kann, da kann man vielleicht zurückgehen darauf, wie man sich mal ein Quantenqubit darstellen kann.

Also der Befehl, den man hier ausübt, vielleicht sage ich das erst mal, wenn ich jetzt ein Bit habe, könnte ich sagen, negiere das Bit.

Also gehe von 0 auf 1 oder gehe von 1 auf 0.

Das ist jetzt sehr hardware-nah und sehr primitiv gedacht.

Das kann ich auf einem klassischen Computer machen.

So verstehe ich es, das ist gut.

Und auf dem Quantencomputer habe ich mehr Möglichkeiten.

Also die klassischen Daten, das ist sozusagen das Teilchen und jetzt nutze ich in der Quantenphysik, dass ich Teilchen und Wellen glattseitig habe und nutze den Wellencharakter.

Wellen sind nicht diskret, Wellen sind kontinuierlich und dem sage ich jetzt, negiere das Bit, aber mach das nicht ganz, mach das nur zur Hälfte.

Man kann das so darstellen, das ist tatsächlich im Quantencomputing eine sehr gebräuchliche Darstellung.

Wenn ich ein Bit habe mit 0 und 1, dann ist das gleichwertig, also mathematisch gleichwertig und auch physikalisch gibt es da eine gewisse Ähnlichkeit, das sage ich dann vielleicht am Ende, einer Kugel.

Ich habe eine Kugel, eine Kugeloberfläche und die 0 schreibe ich an den Südpol und die 1 schreibe ich an den Nordpol.

Und alle Wege führen dahin.

Genau, aber ein klassischer Computer, der hat nur die 0 und die 1, das heißt, der kann die 0 setzen, er kann die 1 setzen oder er kann tauschen oder er kann einfach nichts tun.

Ein Quantencomputer folgt anderen Gesetzen, er darf nämlich die Kugel beliebig drehen.

Ja.

Und er darf auch nur die Kugel beliebig drehen.

Die Operation jetzt von 0 auf 1 zu gehen, kann man sich überlegen.

Südpol ist die 0, Nordpol ist die 1.

Jetzt drillt man einmal durch den Äquator und den Erdmittelpunkt eine Achse und um die rotiert man um 180 Grad.

Dann hat man von 0 auf 1 und von 1 auf 0 gedreht.

Aber im Quantencomputer sind alle Drehungen erlaubt, das heißt, ich kann die Drehung auch nur zur Hälfte machen und dann bin ich auf dem Äquator.

Was heißt das jetzt, auf dem Äquator zu sein?

Also diese Darstellung, die heißt nach ihrem Entdecker die Blochkugel oder Entdecker, nach dem der benutzt hat, Felix Bloch.

Was würde jetzt passieren, wenn ich das angucke?

Da würde ich mir schauen, auf welchem Breitengrad bin ich denn?

Und der bestimmt mir die Wahrscheinlichkeit, mit der ich auf der 0 und der 1 lande.

Das bedeutet also, wenn ich tatsächlich am Ende meiner ganzen Drehungen auf dem Äquator sitze und nachgucke, wo ist das Bit?

Da habe ich 50, 50, 50, 0 und 1.

Da habe ich sozusagen nichts rausgefunden.

Wenn ich aber am Ende auf der 1 lande, auf Nordpol lande, da habe ich mit

Sicherheit die 1.

Wenn ich auf dem Breitengrad Deutschlands lande, da bin ich so 75 Prozent bei der 1.

Und das bedeutet also einerseits, ich darf diese teilweisen Drehungen machen.

Ich kann jetzt eben sagen, ich starte im Südpol, ich möchte 50, 50, 0 und 1 haben.

Ich drehe mich auf den Äquator.

Und das ist mehr, als ich klassisch darf.

Gleichzeitig ist aber ein Quantencomputer auch eingeschränkt, denn die Operation, die ich klassisch machen darf, nämlich starte irgendwo und gehe auf den Südpol, die ist nicht erlaubt, weil das ist ja keine Drehung.

Und das ist sozusagen der Befehlssatz für ein Qubit.

Und Sie sehen schon, für 0 und 1 mussten wir jetzt imaginär über Audio auf eine Kugeloberfläche gehen.

Wenn Sie für mehr als ein Qubit gehen, explodiert die Zahl der Dimensionen und die Veranschaulichung stößt stark an ihre Grenzen.

Also für zwei Qubits kann man noch was tricksen.

Und danach hilft dann eben die harte Mathematik.

Ja.

Wenn Sie sagen, dass ich das klassisch nicht darf, müssen Sie nicht eigentlich eher sagen, ich kann das klassisch nicht?

Also weil mein 8-Kern-3-Gigahertz-Rechner, der wäre doch gar nicht in der Lage, auch nur diese eine Operation, also dieses eine Qubit zu rechnen, weil der gar nicht in der Lage wäre, in einer befriedigenden Zeit die Oberfläche der gesamten Kugel sich anzugucken.

Ich glaube, genau.

Nein, also das geht auch nicht ums Angucken.

Gleichzeitig an zwei Orten zu sein oder gleichzeitig zwei Register zu haben, widerspricht den Gesetzen der klassischen Physik.

Ja, okay, dann ist es doch.

Infolge der Gesetzen der klassischen Informatik.

Das heißt, ich muss das System dazu zwingen, den – wir haben ja schon gesagt, die klassische Physik ist so ein Grenzfall der Quantenphysik, und ich muss das System zwingen, nicht in diesen Grenzfall reinzufallen, sondern ich muss es dazu zwingen, das zu tun.

Das heißt, das ist eben – ja, es widerspricht den Gesetzen der klassischen Physik, deshalb der Begriff "nicht dürfen".

Also da geht es nicht um die Geschwindigkeit vom Abtasten, sondern das ist wirklich das – dieses mit der 50/50-Überlagerung, das ist sozusagen das Neue an der Quantenphysik.

Wer hat sich das ausgedacht?

Also wie ist man darauf gekommen, dass man das machen kann?

Oder ist das eine Notwendigkeit?

Das hat viele, viele Eltern.

Also es gab natürlich die Pionierinnen und Pioniere der Quantenphysik, also Niels Bohr, Heisenberg, Dirac, Albert Einstein und Freiwilling.

Aber die werden ja nicht damals schon gesagt haben, hey, daraus kann man eine Rechenmaschine bauen.

Genau, genau, genau, genau.

Die sozusagen diese ganzen konzeptionellen Fragen hingelegt haben.

Das wurde dann ein bisschen verbessert.

Dann gab es so ein kleines – Sache, weil das ist Bild von der Blochkugel, was ich eben gerade gesagt habe, wurde auch nicht von Quantencomputing erfunden.

Das wurde erfunden, um Kernspinnresonanz zu verstehen.

Und sozusagen in den späten 40er-Jahren, als man angefangen hat, Kernspinnresonanz zu entwickeln, hat man im Prinzip ganz primitive Quantencomputer gebaut und das nur nicht so genannt.

Hat man es verstanden, dass man die baut, oder hat man das noch nicht gesehen zu dem Zeitpunkt?

Man hat verstanden, dass man Quantenzustände hin und her schubst, um etwas Sinnvolles zu tun.

Aber man hat das nicht Computer genannt.

Es gab dann ein Interesse an der Nutzung von Quantenmechanik für Kommunikation und Informationsübertragung in den 80er-Jahren.

Da gab es die großen Namen, sind da alle ASP, Anfang der 80er, und dann Charlie Bennett und Gilles Brassat, Ende der 80er.

Fürs Quantencomputing gab es dann zu Beginn der 90er-Jahre auch eben mit dem Zusammenführen auch von Informatik als immer mehr Leitwissenschaft erste Ideen, wie man das nutzen kann.

Der große Name dort ist ein mathematischer Physiker aus Cambridge namens David Deutsch, der gezeigt hat, im stillen Kämmerlein, dass es für eine bestimmte Aufgabe, nämlich für das Testen eines sogenannten Orakels, also einer abstrakten Funktion, die ich testen müsste, eine Methode gibt, das mit Quantenphysik viel schneller zu machen und ohne Unsicherheit am Ende des Algorithmus, als das klassisch geht, der sogenannte Deutschalgorithmus.

Man hat dann zunächst mal versucht, man hat es bis heute versucht, für diesen Deutschalgorithmus, da gab es noch eine Erweiterung mit Richard Josa, Deutsch-Josa-Algorithmus-Anwendungen gefunden und ist daran gescheitert.

Dann gab es aber sozusagen den Urknall des Quantencomputing im Prinzip 1995.

Da haben Wissenschaftler von den Bell Laboratories, also damals hat sich die große Telefonfirma ein Forschungslabor geleistet, das es in dieser Form nicht mehr gibt, wo für zwei wirklich wichtige Aufgaben Quantenbeschleunigung gezeigt wurde.

Das eine ist das Durchsuchen einer unstrukturierten Datenbank, also wo man nur eine Liste hat und nichts anderes weiß.

Das ist zum Beispiel das umgekehrte Nachschauen in einem Telefonbuch.

Also Sie haben eine Nummer, Sie schauen nach dem Namen und natürlich würden Sie das im Internet machen und komischerweise, seit es das Internet hat,

kriegt man deutlich mehr Telefonbücher auf die Türschwelle geschmissen als früher.

Und man kann sich überlegen, wenn es da N Stück Einträge gibt, braucht man für einen durchschnittlichen Namen ungefähr N durch 2.

Bei Saarbrücken, wo ich gerade bin, hat 180.000 Einwohner, hat also vielleicht 100.000 Haushalte.

Da muss man im Schnitt 50.000 Mal nachschauen, es sei denn, man hat irgendwie Anton A.

Hohnen mit zwei A.

Oder Sigmund Selinski, da braucht man länger, also mit Z, Y.

Und es wurde gezeigt, dass man mit einem Quantencomputer mal ein Wurzel aus N braucht.

Also bei 100.000 Einwohnern, das geht jetzt dummerweise nicht auf, da braucht man dann ungefähr 330 Abfragen.

Und vor allen Dingen, das ist auch eine wichtige Eigenschaft, je größer die Liste wird, desto größer wird der Vorteil des Quantencomputers, weil die Wurzel wächst langsamer als die Zahl selbst.

Das war die eine Hälfte des Urknalls.

Die andere Hälfte des Urknalls war die Aufgabe, eine – das hört sich jetzt sehr verkopft an, aber bleiben Sie dabei.

Ich bemühe mich.

Eine lange, ganze Zahl in ihre Primfaktoren zu zerlegen.

Ja, Verschlüsselung, nicht?

Genau, Fair- und Entschlüsselung.

Ja, das geht ja bei kleineren Zahlen, geht das ganz einfach.

Aber je größer die Zahl wird, desto schwieriger wird das.

Und tatsächlich wächst das mit der Stellenzahl der Primzahl exponentiell.

Vor Corona hätte man jetzt, glaube ich, sehr, sehr lange erklärt, was exponentielles Wachstum ist.

Aber es wurde dann gezeigt von Peter Schor von den AT&T Bell Labs, der jetzt am MIT ist, dass das mit einem Polynomial, also mit einem in dem Sinn überschaubaren Aufwand in der Stellenzahl auf Quantencomputern lösbar ist.

Und das hat natürlich profunde Auswirkungen, wie Sie schon gesagt haben.

Das große Wunder der Kryptographie, ich habe ja gesehen, Sie haben auch den Kollegen Backes vor einer Weile interviewt.

Also das große Wunder eigentlich, dass ich sicher mit jemandem kommunizieren kann, den ich nie getroffen habe.

Ich muss ja nicht für HTTPS, muss ich nicht mich an der Telefonlaterne mit jemandem treffen und erstmal einen USB-Stick mit Codezahlen austauschen, sondern das geht über eine öffentliche Leitung.

Dieses Wunder kommt eben dadurch, dass Kryptographie dadurch sicher ist, dass bestimmte Rechenaufgaben so hart sind, dass das Wettrüsten zwischen Fair- und Entschlüsseler immer vom Fairschlüsseler gewonnen wird.

Also sprich, wenn jemand in die Nähe kommt, HTTPS zu verschlüsseln, da mache ich das Codewort ein bisschen länger und dann habe ich wieder Ruhe.

Und das würde aber natürlich bei Quantencomputer nicht mehr sein.

Wenn der Quantencomputer die Kryptographie einmal knackt, dann wird das auf der Art und Weise nicht mehr sicher sein.

Das ist natürlich erstmal technisch unglaublich spannend.

Es ist gesellschaftlich möglicherweise tatsächlich beunruhigend.

Aber das war ja der Beginn des Urknalls und seitdem haben wir auch andere Anwendungen gesehen.

Und immerhin ist der Schor-Algorithmus so hart, dass man sich dagegen absichern kann.

Das heißt, das Abhören von Kryptographie mit Quantencomputern geht dann halt gegen Leute, die quantensichere Kryptographie noch nicht haben.

Okay.

Warum hat es bis 1995 gedauert mit dem Urknall?

Was ist da genau passiert?

Lag das an Erkenntnis?

Lag das an Materialien, aus denen wir Qubits bauen?

Oder warum hat man das nicht sofort?

Also diese Erkenntnis war zunächst rein theoretisch.

Nach dem Urknall, dann kam die Idee, das zu bauen.

Aber das waren einfache Kenntnisse aus der theoretischen Informatik.

Und ich denke, das ist ja in der Wissenschaft oft so ein Kreisprozess.

Also es hat jemand an der Schnittstelle von zwei Arbeitsgebieten, nämlich Quantenphysik und Informatik, jemand mal eine Idee und erzählt dann Leuten, die entweder Quantenphysik oder Informatik kennen, von der Idee.

Und die lernen dann voneinander.

Wer Informatik studiert hat, hat nicht unbedingt Quantenphysik studiert.

Und wer Physik studiert hat, denkt nicht unbedingt so an Algorithmen.

Und dann gibt es immer größere und größere Workshops.

Mehr und mehr schlaue Leute kommen in das Gebiet.

Und so entwickeln sich dann diese Ideen.

Also man muss ja dazu wissen, wie Quantenphysik funktioniert.

Man muss wissen, dieser Befehlssatz, die Drehungen der Kugel und die Gegenstücke dazu in größeren Systemen, wie der aussieht, dass ich tatsächlich viele Details der traditionellen Quantenphysik nicht brauche, wenn ich als Informatiker und Informatikerin mich auf diese Anwendung konzentriere.

Gleichzeitig wissen Physikerinnen und Physiker nicht, dass das jetzt eine coole Aufgabe zu lösen ist.

Und so spiralisiert sich das eben.

Man sieht dann auch, also damals waren – ich habe noch was anderes geforscht in der Zeit – aber damals wurden halt die Konferenzen auch, die wuchsen dann in der Teilnehmerzahl von 30 Leuten auf 50 und auf 100.

Und dann gab es dann plötzlich mehrere Konferenzen.

Und so spiralisierte das sich dann eben hoch.

Und am Ende des Urknalls wurde dann auch immer klarer, was so die Anforderungskatalog ist, um tatsächlich dann Hardware zu bauen.

Und natürlich war das auch dann dadurch motiviert, dass man schon einen Horizont hatte, dass man im Prinzip in der Lage war, Quantensysteme tatsächlich zu steuern.

[Siebert] Sie sagten Hardwarebau, Anforderungen an die Hardware.

Wie weit sind wir denn davon entfernt, falls wir es überhaupt sind, dass ein Gerät da steht?

Gibt es überhaupt ein Gerät, das das kann?

Oder ist das alles noch was, was in der Theorie auf der Tafel stattfindet?

[Lesch] Nein, wir haben da also vielleicht gerade tatsächlich den zweiten Urknall.

Urknall gibt es eigentlich nur einen.

[Siebert] Ja, aber nicht bei uns.

[Lesch] Wenn Sie was über Kosmologie gehört haben.

Also da ging es ja zunächst mal darum, aus der Quantenphysik als Wissenschaft

zum Erklären von Beobachten eine Ingenieurskunst zu machen.

Nämlich also was, mit dem man was auch bauen kann.

Das hatte sich aber Mitte, Ende der 90er Jahre in ein paar Gebieten so entwickelt.

Zunächst mal gibt es verschiedene Hardwareplattformen, in denen man das bauen kann.

Da gibt es welche, die ähneln tatsächlich Computerchips, die stark gekühlt werden müssen.

Es gibt aber auch welche, die sogenannten Ionenfallen-Qubits, die ähneln mehr der Technologie von Atomuhren.

Dass man verschiedene Hardwareplattformen hat, ist beim Computer eigentlich auch nicht so ungewöhnlich.

Wenn man das Deutsche Museum geht, sieht man Computer, die basieren auf Relais, auf Röhren, auf mechanischen Elementen, auf Zahnräder.

[Siebert] Und irgendwann hat sich der Halbleiter durchgesetzt.

[Lesch] Genau, genau.

Und in dieser Findungsphase sind wir bei Quantencomputern im Augenblick auch.

Und da gab es ein ganz wichtiges Ergebnis von einem Hardwarelabor bei Google Ende des Jahres 2019.

Da wurde Quantenüberlegenheit gezeigt.

[Siebert] Quantenüberlegenheit?

[Lesch] Quantenüberlegenheit.

Das ist sozusagen der Test unter extremen Laborbedingungen, indem man einem Quantencomputer etwas geleistet hat, was die größten Supercomputer der Welt nicht mehr in akzeptabler Zeit können.

Und in dem Satz hat möglicherweise fast jedes Wort eine Fußnote.

Also, was sie gemacht haben ... [Siebert] Wir haben Zeit, Herr Wilhelm Mauchwein.

[Lesch] ... ist zunächst mal, was wurde dort eigentlich gebaut?

Man hat einen chipbasierten Quantencomputer gebaut.

Der hatte mehr als 50 Quantenbits.

Quantenbit haben wir schon gesagt ... [Siebert] Ich habe gerade gedacht, wie übersetze ich diese 50 in 50 Kugeln, die keine Kugeln mehr sind, sondern 50 Mal machen, was diese Kugeln ... Und mein Gehirn hat gerade ein bisschen wehgetan.

Aber ja.

[Lesch] 50 Mal.

Sie unterschätzen das Problem.

[Siebert] Vermutlich, ja.

[Lesch] Denn, wenn ich ... Also, in dem Fall waren es 53 Qubits.

Und wenn man sich fragt, warum baut jemand eine Primzahl an Qubits, das ist ganz einfach.

Die haben 54 gebaut und eins funktionierte nicht.

[Siebert] Wäre aber eine schöne Legende gewesen mit der Primzahl.

[Lesch] Nein, nein.

Die haben also ein 6x9-Rechteck gebaut.

Und dass von 54 53 funktionieren, ist bei dieser Technologie auch tatsächlich eine Leistung.

Das ist noch sehr früh.

Und jetzt, wir haben ja jetzt gesehen, wenn ich von einem Quantenbit, wenn ich das versinnbildlichen möchte, gehe ich auf eine Kugel.

Das heißt, für ein Bit brauche ich zwei Gleitkommazahlen.

Ich brauche den Längengrad, ich brauche den Breitengrad.

Wenn ich n Stück Qubits habe, brauche ich zwei Hoch- n .

[Siebert] Oh, ich habe es unterschätzt, ja.

[Lesch] Es ist nicht 2 Mal n , es ist 2 Hoch- n .

Und damit übersteigere ich den Arbeitsspeicher des größten Supercomputers der Welt.

Und wir wissen, wenn ich eine aufwendige Rechnung habe und die Festplatte kommt ins Spiel, dann geht die Geschwindigkeit in die Knie.

Und deshalb musste man die magische Zahl von 50 überschreiten.

Also das hätte man gebraucht, um das klassisch zu simulieren.

Und das zeigt uns eben auch, die Quantenüberlegenheit ist dann schwer umzuklären, weil wenn ich jetzt ein Qubit dazu nehme, verdoppelt sich der Speicherbedarf.

Das heißt, das Wettüben sozusagen für diesen Test, also der Quantencomputer ist jetzt da drin vorne und hat das sozusagen wohl unumkehrbar geschafft.

Jetzt muss man sich mal überlegen, was hat er denn eigentlich geschafft?

[Siebert] Genau, was hat er gerechnet?

[Lesch] Der hat ein physikalisches Phänomen namens Quantenchaos simuliert.

Das hat man gemacht, weil man vorher gezeigt hatte, dass das ein sehr Quantencomputer-freundliches Problem ist.

Also man hat was gemacht, was dem Quantencomputer optimale Startbedingungen gibt.

Das finde ich aber legitim.

Der Flug der Gebrüder Wright, der war eben auch nicht in einem Sturm oder bei Eis mit 20 Meckern an Passagieren an Bord, sondern der war unter sehr speziellen Bedingungen.

Und der nächste Schritt ist natürlich dann, auf gescheitete Bedingungen zu kommen.

Und der hat also Quantenchaos simuliert.

Die Chaostheorie, das ist so die Theorie von Systemen, die ganz, ganz empfindlich von ihren Anfangsbedingungen abhängen.

Also Stichwort... [Siebert] Ach, der Flügelschlag des Schmetterlings.

[Lesch] Genau.

Und das ist in der klassischen Physik.

Es gibt eine Quantenversion davon.

Und man hat gezeigt, die ist wirklich schwer zu simulieren auf klassischen Computern.

Also da gibt es nach aktuellem Wissen keine Tricks, das irgendwie besser zu simulieren, als das sozusagen mit dem Kopf durch die Wand zu machen.

Das heißt, den vollen Speicher braucht man auch wirklich, um das zu tun.

Und man hatte eine Möglichkeit, vernünftig zu testen, die übrigens vom jüdischen Supercomputing Zentrum bei uns im Helmholtz implementiert wurde.

Man hatte eine Möglichkeit zu testen, dass der das auch richtig macht.

Denn Quantenhardware ist immer noch sehr fehlerbehaftet.

Aber man hat gezeigt, dass trotz der relativ wahrscheinlichen Fehler, die dort passieren, das Ergebnis noch ganz klar zeigt, dass da Quanteninformation auch wirklich im Spiel ist.

Also Sie sehen, das war so ein bisschen wie ein Formel-1-Renntest.

Wenn man da schnell fahren kann, heißt es noch lange nicht, dass ich das mit

meinen drei Kindern auf dem Rücksitz machen kann.

Aber immerhin, man hat diese Quantenüberlegenheit tatsächlich gezeigt.

Was wäre denn Ihre Prognose für Quantenhardware?

Also was wird der Halbleiter des Quantencomputers oder des Quantencomputings?

Das ist eine Frage, die gerade sehr viele Leute interessiert.

Ja, die ganzen Materialwissenschaften.

In den großen Forschungsprogrammen im EU-Quantentechnologie-Flaggschiff, in den USA, auch im deutschen Programm, das wir jetzt sehr bald erwarten, schaut man immer noch mehrere Plattformen an, weil man sieht, die liegen nahe beieinander.

Und möglicherweise dauert es sogar eine ganze Zeit, bis es eine eindeutig Beste gibt.

Also man kann sich vorstellen, dass man für bestimmte Aufgaben eher eine Ionenfalle nimmt und für andere Aufgaben eher so einen Supraleitenden Computerchip, wie das Google gemacht hat.

Gleichzeitig sind Halbleiterchips und stark gekühlte Atome noch gute Plattformen.

Also man kann so die Gruppe sehen, es gibt diese Ionenfallen und diese stark gekühlten Atome.

Was man da also nimmt, ist ein einzelnes Atom.

Bei der Ionenfalle ist es einmal ionisiert, also positiv geladen.

Und das ist ja schon ein ganz kleiner Baustein der Natur.

Das heißt, man weiß, da gelten die Gesetze der Quantenphysik.

Da ist es relativ, relativ in Anführungsstrichen, also ich als Theoretiker könnte es nicht, aber es ist relativ einfach.

Man weiß, was man tun muss, um da wirklich echte Quanteneffekte nachzuweisen.

Weil die Eltern der Quantenphysik haben das auch an Atomen gemacht.

Die Kunst bei der Nutzung dieser Atome ist es dann wirklich einen Computer zu bauen, wirklich eine Maschine zu bauen, wo ich die auch steuern kann.

Da muss ich dann mit Laserstrahlen reinkommen, wo ich viele, viele miteinander verschalten kann.

Das ist schwierig, weil ich das im Hochvakuum halten muss und ähnliche Dinge mehr.

Das ist so der eine Ansatz.

Der andere Ansatz bei den Halbleitern und Supraleitern ist, ich nehme extreme Nanoelektronik.

Das heißt, ich nehme im Prinzip die gleiche Idee wie bei der Herstellung von Chips, von integrierten Schaltkreisen und ich mache die so klein und ich benutze auch die richtigen Materialien, dass die Quanteneffekte zeigen.

Also bei klassischen Chips sind Quanteneffekte tatsächlich etwas, was man vermeiden möchte.

Aber man kann die eben auch rauskitzeln.

Und man weiß, dass rauskitzelnde Quanteneffekte, das ist schwer.

Da muss man sehr reine Materialien nehmen.

Da muss man das Design sehr sorgfältig machen.

Aber da ist man inzwischen sehr, sehr weit.

Aber wenn man das mal hat, ist das Herstellen von integrierten Schaltkreisen von Chips gar nicht mehr so schwierig.

[Siebert] Ich wollte gerade sagen, das klingt wie genau das Ding, was ich dann irgendwann möglicherweise auf dem Schreibtisch stehen habe.

[L] Das ist auf jeden Fall ein sehr kompaktes Bauelement.

Mit dem Schreibtisch gibt es eine Schwierigkeit, weil da die Quantenphysik so empfindlich ist, muss ich das immer noch sehr, sehr gut von Störungen aus der Umgebung isolieren.

Das heißt bedauerlicherweise, dass was für die Kolleginnen und Kollegen aus der Atomphysik das Ultrahochvakuum ist und der schwingungsgedämpfte optische Tisch, ist bei uns die Kälte.

Es kreucht und fleucht sehr viel rum.

Ihr habt es vielleicht schon in der Schule gehört, es gibt die Brownsche Bewegung.

Das heißt, wenn ich Material aufheize, fangen die Atome an sich zu bewegen und zu zittern.

Und da ich im Chip alles mögliche Material habe, wie den Chipträger, ich kann ja nicht freischwebende Bauelemente machen, gibt es da alles mögliche, was sich bewegen könnte und deshalb muss ich das stark kühlen.

Aber man kann sich natürlich jetzt überlegen, wenn ich einmal eine Kältemaschine habe und ich stelle die bei jemandem ins Rechenzentrum, ich mache also einen Zugang über die Cloud, kann ich da dann relativ viele dichtgepackte Chips reinbauen.

Und das Kühlen ist deutlich anders als in Rechenzentren, aber im Prinzip Rechenzentren wissen wie man kühlt.

Ich werde also nicht irgendwann ein Quantensmartphone in der Tasche haben, sondern mein Quantensmartphone wird einen Quantenterminal als App haben, für den Fall, dass ich mal irgendetwas sehr schnell rechnen will.

Ganz genau.

Und Sie werden möglicherweise Dienstleistungen haben, Cloud-Dienstleistungen, die durch Quantencomputer im Hintergrund viel schneller laufen als das heute geht.

Deutlich größerer Einzugsbereich bei der Stauanalyse ist so ein Beispiel.

Die Anwendungen, die wir für Quantencomputer kennen, sind auch Anwendungen aus dem Big Data, aus dem Hintergrundbereich der IT.

Das kann natürlich daran liegen, dass wir bei persönlichen Anwendungen noch nicht so genau geguckt haben.

Also Alan Turing hat auch nicht vorhergesehen, dass wir Computer zum Verschicken von Katzenbildern verwenden werden.

Und auch die klassischen Computer waren ja was, was im Hintergrund der

Gesellschaft gelaufen ist.

Also zwischen Alan Turing und dem PC liegen 35 Jahre.

Und so ist es bei der Anwendung für Quantencomputer auch.

Aber der Trend geht ja auch ohnehin zu Cloud-Zugang.

Und insofern bereitet uns das keine schlaflosen Nächte, dass das doch so extrem isoliert werden muss.

Sie sagten Stauanalyse.

Könnte man – wahrscheinlich könnte man das.

Stehen die Meteorologen bei Ihnen schon Schlange?

Weil ich könnte mir vorstellen, dass deren Modelle mit dem Quantencomputer sich sehr gut verstehen würden, oder?

Die stehen noch so ein bisschen – die sind noch nicht ganz so weit.

Also Fluiddynamik oder Gasdynamik auf Quantencomputern ist von den Hardwareanforderungen noch relativ weit weg.

Also man versucht natürlich jetzt – ja, wenn ich eine Million fehlerfreier Qubits habe, kann ich unglaublich Sachen machen.

Wir haben 50 fehlerbehaftete Qubits.

Und auf dem Spektrum zwischen 50 mit Fehlern und 100 – und einer Million ohne Fehler sind diese Anwendungen der Meteorologie relativ weit hinten.

Es gibt andere Anwendungen.

Bereich schnelle KI.

Also wenn ich vielleicht keine so großen Datenmengen habe, aber wenn es darauf ankommt, die Lösung nicht in einer Nacht, sondern in zehn Sekunden zu bekommen, ist ein ganz guter Anwendungsbereich.

Das ist – Haben Sie gerade gesagt, dass KI nur Statistik ist?

In der KI spielen statistische Methoden eine große Rolle.

Es ist aber natürlich mehr.

Aber es gibt Routineaufgaben in der KI oder in der KI-motivierten Optimierung.

Ja, wenn ich zum Beispiel eine Fabrik habe und ich möchte anhand von Sensordaten schauen, wann habe ich ein Problem mit meinen Produkten und ich finde das nach drei Tagen raus, dann habe ich möglicherweise drei Tage Ausschuss produziert.

Wenn ich das in einer Stunde herausfinde, habe ich möglicherweise zwei Autos, wenn es eine Autofabrik ist, einen Ausschuss produziert.

Und da können Quantencomputer einen großen Unterschied machen, weil das sind nicht wirklich Big Data, die dort rauskommen.

Das habe ich vielleicht mit Big Data trainiert.

Das heißt, ein überschaubarer Quantencomputer kann das tun.

Und es kommt aber wirklich auf die Zeit an und es ist was, was, wenn man es auf einem klassischen Computer macht, eben – da schlägt wieder die Exponentialfunktion drin – einfach sehr, sehr lange dauert und zu lange, um praktisch zu sein.

[Siebert] Wagen Sie eine Prognose, über was für einen Zeithorizont wir hier reden?

Wann werden wir erste Anwendungen, meinetwegen industrielle oder sogar Consumer-Anwendungen, sehen?

[Siebert] Ich bin ein Optimist und denke, dass wir im Zeithorizont von fünf bis zehn Jahren es erleben werden, dass Chemikalien und Prozesse in der Chemie mit der Hilfe von Quantencomputern optimiert werden und dass wir uns ziemlich sicher sind, dass wir das mit klassischen Computern nicht hingekriegt hätten.

Also, man kann natürlich Sachen mit Quantencomputern machen und nicht so genau hingucken, ob es auch klassisch funktioniert hätte.

Aber ich denke, der Bereich, was sozusagen das Übersetzen auf Quantencomputer angeht, ist Chemie und Materialwissenschaft die freundlichste Aufgabe.

Und weil die chemische Bindung ist auch ein Problem der Quantenphysik, das heißt, ich simuliere ein Quantensystem, nämlich das Molekül, mit einem anderen Quantensystem, also mit einem Quantencomputer.

Und die Kolleginnen und Kollegen aus der theoretischen Chemie sind bei der Benutzung extremer Computer auch wirklich Kummer gewöhnt.

Also, die sind jetzt auch bereit, mit noch etwas unfertiger Hardware zu arbeiten.

Und im Zeithorizont von fünf bis zehn Jahren bin ich sehr optimistisch, dass das benutzt werden wird, möglicherweise zur beschleunigten Entwicklung von Materialien oder – das ist eine der, auf Neudeutsch, Killer-Apps der Quantencomputer-Chemie, dass man chemische Prozesse mit deutlich, deutlich weniger Energie macht.

Ich hatte es ja vorhin gesagt, es ist vielleicht auch eine schöne Analogie, dass man zwei hoch 50 Zahlen braucht für einen 50-Qubit-Quantencomputer.

Die Kolleginnen und Kollegen aus der theoretischen Chemie kennen dieses Problem schon lange.

Weil wenn ich eine große Zahl von Elektronen in meinem Molekül habe, brauche ich im Prinzip auch exponentiell viel Speicher, um das zu simulieren.

Und es gibt natürlich Jahrzehnte von Fortschritt in der theoretischen Chemie, da Umwege zu finden.

Also rauszufinden, was muss ich eigentlich überhaupt nicht speichern?

Das ist eine Methode, die heißt Dichte-Funktionaltheorie.

Dafür gab es auch einen Chemienobelpreis.

Aber es gibt halt so ein paar harte Moleküle, bei denen das nicht geht, wo ich keinen Umweg habe, darum unglaublich viel klassischen Speicher zu benutzen.

Und das ist sehr klar, welche Aufgaben das sind.

Und deshalb sind die Kolleginnen und Kollegen aus der theoretischen Chemie auch die, die bei uns in der Schlange ganz, ganz vorne stehen.

Wo Sie sagten 50 Qubits.

Google hat 54 gebaut, 53 haben funktioniert.

Das sind 2% Ausfall.

Das ist viel.

Ist das ein prinzipiell fehlertolerantes System, so ein Quantencomputer?

Oder ein fehlertolerantes System als andere Maschinen?

In dem Fall hatten die Glück, dass eine kaputte Qubit war am Rand.

Und man konnte einfach alle Kopplungen damit abschalten.

Und das hatte ein Stückchen, ein Schmutzatom im Material an einer Stelle, wo man von ihm immer gestört wurde.

Generell sind Qubits, Quantencomputer sehr, sehr fehlerempfindlich.

Also, dass die Ausbeute so klein war, das Problem hätte man mit gefangenen Ionen nicht.

Denn gefangene Ionen, das sind letztlich immer die gleichen.

Jedes Calcium plus Ion ist exakt identisch mit jedem Calcium plus Ion vom gleichen Isotop.

Bei diesen neuartigen Bauelementen haben wir einfach viel weniger Erfahrung, als die, die Halbleiterindustrie hat.

Also es gibt zwar eine kleine Industrie mit supraleitenden Schaltkreisen, aber das ist vermutlich weniger als ein Tausendstel der Halbleiterindustrie.

Und da passiert dann so was.

Das größere Problem ist aber, die Natur möchte gerne klassisch sein, wenn sie groß wird, wenn sie makroskopisch wird.

Das Standardbeispiel ist, also ich weiß nicht, weshalb man als Beispiel immer Stühle nimmt, aber wenn ich auf einen Stuhl starre, ich kann tun, was ich will, der

ist nicht an zwei Orten gleichzeitig.

Ich kenne Zustände, da ist das so, aber über die reden wir jetzt hier nicht in der Öffentlichkeit.

Das ist eine Störung der Beobachtung.

Das ist sozusagen auch nicht was, was beobachtungunabhängig ist.

Aber jetzt habe ich ja beim Quantencomputer und deshalb muss ich auch die Quantensysteme isolieren, weil wenn die nicht isoliert sind, dann verbinden die sich mit der Umgebung und die Umgebung ist groß und die werden dann wie die Umgebung.

Das kann man schon fast schon buddhistisch interpretieren.

Ja, ich werde eins mit der Umgebung.

Buddhistisch, glaube ich bin was Religion angeht, nicht sattelfest.

Ja, doch, es gibt diesen Dalai Lama Witz.

Genau, genau.

Sie wissen, wie ein Fan-Buddhist im Ruhrgebiet ein Sandwich ordert.

Mach mich eins mit allem.

Mach mich eins mit allem.

Mit Allet.

Mit Allet, genau.

Geht nur mit Ruhrgebietsakzent.

Ich muss aufpassen, dass ich nicht mit dem Ellenbogen zu sehr gegen den Tisch haue.

Ja, und wenn ich jetzt eine Quantenmaschine baue, habe ich natürlich ein gewisses Dilemma.

Ich möchte meine Bits isolieren, ich möchte gerne aber auch programmieren.

Ich möchte meine Liste von Programmbefehlen da runterschicken von außen und ich möchte es am Ende auslesen.

Das heißt, ich muss sehr sorgfältig dann das Ding an bestimmten Stellen aufmachen, um lesen und schreiben zu können.

Und das ist so das Grund-Dilemma des Quanteningenieurwesens.

Das heißt, die Schnittstelle vergiftet das System.

Ganz genau, ganz genau.

Und das ist eine der großen Schwierigkeiten.

Die andere Schwierigkeit hat was wieder zu tun mit unserer Blochkugel.

Wenn Sie nämlich einen klassischen Computer haben, der nur zwischen 0 und 1 entscheidet, innen drin, in den Transistoren des Chips in Ihrem Computer, geht das über elektrische Spannungen.

Da gibt es einen Bereich der elektrischen Spannungen.

Ich kann das jetzt nicht auswendig.

Also wenn das jemand in der Schule zuhört und sagt, der Wilhelm Mauch hat da eine Zahl gesagt und die muss stimmen.

Nein, die muss nicht stimmen.

Der Wilhelm Mauch kennt das nicht auswendig.

Ich glaube, es ist zwischen $-0,5$ und $-0,1$ Volt.

Das entspricht der 1 und alles drüber entspricht der 0.

Das heißt, wenn es so eine kleine Störung gibt in meinem Chip, solange ich in diesen Bereichen liege, tritt kein Fehler auf und die Schaltungen sind auch so aufgebaut, dass das nicht rausdriftet.

Also wenn ich mal ganz knapp so am Rand bin, wo ich so zwischen der 0 und 1 bin, ist das so verschaltet, dass es mich wieder auf die 0 zurückzieht.

Das passiert beim Quantencomputer nicht.

Also Sie stellen sich vor, wir sind auf unserer Kugel.

Wir wollen vom Südpol auf den Äquator drehen.

Wir müssen genau den Drehwinkel von 90 Grad kriegen und wir machen das ein bisschen falsch um 1 % und dann machen wir die nächste Drehung um irgendeine andere Achse wieder ein bisschen falsch.

Dann habe ich ein bisschen mehr Fehler und so schaukelt sich der Fehler auf und aus kleinen Fehlern wird ein großer Fehler.

Dazu kommt noch, wenn man jetzt das Bild der Störungen nimmt, es gibt von außen eine Wärmebewegung.

Das heißt, es gibt von außen, von dem, dass ich den Quantencomputer aufgemacht habe, fängt das ganze Ding an zu zittern.

Und die Quanteninformation wird über die Zeit unscharf.

Und dieses Problem hätte ich mit der klassischen Information zwischen 0 und 1 und selbst korrigierend überhaupt nicht.

Das heißt, nicht nur, weil die Quantenphysik so empfindlich ist und nicht nur, weil die Hardware so neu ist, sondern auch, weil während des Rechnens der Quantencomputer ein wenig analog ist, ist er sehr, sehr empfindlich auf Fehler.

Das heißt, die Fehler werden uns immer begleiten.

Also tatsächlich bei klassischen Computern ist das so, dass klassische Hardwarefehler normalerweise nicht berücksichtigt werden.

Es sei denn, ihr klassischer Computer ist super sicherheitsrelevant.

Also es sei denn, der steuert ein Flugzeug oder steuert ein Kernkraftwerk oder so etwas.

Ansonsten geht man davon aus, der Blue Screen of Death, also der Softwarefehler passiert sowieso vor dem Hardwarefehler.

Bei Quantencomputern ist das nicht so.

Man schafft es inzwischen, so eine Fehlerwahrscheinlichkeit von einem Tausendstel zu bekommen für die schweren Operationen.

Für leichte Operationen schafft man es auch mit einem Millionstel.

Das ist erst mal die schlechte Nachricht.

Die gute Nachricht ist, es gibt eine Technik, die heißt fehlertolerantes Quantencomputing, die es uns erlaubt, die Information in einem Quantencomputer zu korrigieren und länger leben zu lassen als die Information in den Bestandteilen.

Und das ist im Prinzip ein wissenschaftliches Wunderwerk.

Also die Qubits, die gehen mit der Zeit kaputt.

Aber durch geschicktes Korrigieren lasse ich die Information weiterleben.

Aber der Preis dafür ist sehr hoch, weil ich dann im Prinzip mit tausendfacher Redundanz arbeiten muss, mindestens.

Also wenn ich an einem Qubit rechnen möchte, muss ich tausend physikalische Qubits, tausend Bauelemente haben.

Das heißt, Fehlertoleranz zu erreichen, das ist so unser langfristiges Ziel.

Sie sagten eben, dass eine kaputte Qubit sei am Rand gewesen.

Sind Qubits immer in Würfelform angeordnet?

Das sind sie nicht.

Also in dem Fall war es ein Rechteck.

Und das war auch so gebaut, dass immer nur benachbarte Qubits miteinander rechnen können.

Das ist auch so ein bisschen eine Konzession an die frühe Hardware.

Das bedeutet dann also, wenn ich Qubits habe, die an entgegengesetzten Ecken des Rechtecks sind, die können schon auch miteinander rechnen, aber ich muss

erst mal tauschen.

Ich muss die Informationen tauschen, bis die sich in der Mitte treffen, dann wieder zurücktauschen.

Das ist natürlich erst mal eine Konzession daran, dass es sehr schwer ist, jetzt eine langreichweitige Kopplung, ein Bus heißt das im Computerjargon zu machen, mit dem ich quer über den ganzen Chip koppeln kann.

Bei Ionenfallen und bei anderen optisch betriebenen Architekturen ist das ein wenig besser.

Da kann ich teilweise mit Licht oder teilweise mit relativ komplizierten mechanischen Schwingungen auch langreichweitig koppeln.

Also die aktuellen Ionenfallen-Quantencomputer, da sind die Ionen zwar aufgereiht wie auf einer Perlenschnur, aber die können sehr, sehr schnell auch über die Enden der Perlenschnur kommunizieren.

[Siebert] Sie, habe ich gelesen, koordinieren den Bau des ersten frei programmierbaren europäischen Quantencomputers.

Warum muss sowas koordiniert werden?

Also ich habe so, Steve Jobs hat doch auch in der Garage gebaut.

Können Sie das nicht alleine sozusagen?

[Lesch] Also gegenüber der Zeit zwischen dem ersten Computer und Steve Jobs waren ja mehrere Jahrzehnte.

Und auch Steve Jobs hat seinen Computer nicht zu Hause, nicht wirklich selber gebaut.

Er hat auch koordiniert.

Er war der Systemintegrator.

Er hat sich nämlich den Prozessor irgendwo bestellt.

Er hat die Materialien für die Platine bestellt.

Ich weiß tatsächlich nicht ganz genau, was er selber gemacht hat, aber er hat sich irgendwo ein Netzteil bestellt.

Die Kiste für den ersten Apple hat er tatsächlich selber aus Holz zusammengeschestert.

Der erste Computer von Google war übrigens eins weiter, der war aus Lego.

Also die Festplattenhalterung, das Gehäuse war aus Lego gebaut, weil es keine Gehäuse gab, die so viele Festplatten beinhalten konnten.

Das heißt, er hat auch schon Bauelemente, die es kommerziell gab, auf eine schlaue Art und Weise zusammengebaut.

Wir sind jetzt noch ein paar Runden früher.

Denn wir wollen jetzt arbeitsteilig die verschiedenen Komponenten zusammensetzen und die müssen auch miteinander funktionieren.

Das heißt, wir haben Partner, die bauen den quantenmechanischen Kern, die bauen den Prozessor.

Wir haben Partner, die bauen die Verbindung, die in den Prozessor hineingeht.

Also der Prozessor hat tatsächlich zwei Schichten.

Auf der einen Schicht sitzen die Qubits, auf dem anderen sitzt ein Teil der Steuerung.

Wir haben einen Partner, der baut das erste Messelement, also was die physikalischen Signale aus dem Prozessor nehmen und die so verstärkt, dass man die weiterverarbeiten kann.

Wir haben einen Partner, der baut die Übersetzung des Programms in elektrische Impulse, die der Prozessor verarbeiten kann.

Wir haben einen Partner, der baut die Firmware, also die Software, die ganz, ganz unten sitzt und dafür sorgt, dass der Quantencomputer immer funktioniert.

Wir haben einen Partner, der designt Anwendungen.

Da kommen einfach viele, viele Expertisen zusammen und das machen wir arbeitsteilig.

Und der Koordinator guckt eben, dass die Arbeitsteilung funktioniert, hat selber ein Arbeitspaket.

Bei uns eben der untere Teil der Software, die der Benutzer, wenn sie funktioniert, nicht sieht.

Und das habe ich tatsächlich auch schon gemacht, bevor ich nach Jülich gewechselt bin.

Ich war damals ausschließlich an der Universität des Saarlandes und das müssen wir eben koordinieren.

Tatsächlich die Amerikaner machen das teilweise alles in-house oder sehr viel davon in-house.

Also IBM und Google kaufen, glaube ich, im Wesentlichen nur die Kältemaschine

dazu und die kommissionieren die auch.

Aber ich glaube, es ist eine Stärke auch der Wissenschaft in Europa, dass man arbeitsteilig ganz gut arbeiten kann.

Und letztlich, je komplexer das Gerät wird, desto mehr muss man auch Arbeitsteilung machen.

Die Menschen, die unsere Ansteuerelektronik bauen, die müssen gar nicht Quantenmechanik und Quanteninformation vollständig verstehen.

Die müssen so ein bisschen was verstehen und die Schnittstelle.

Das heißt, ich denke, das arbeitsteilige und koordinierte Modell ist auch etwas, was alle in der Zukunft mehr oder weniger so machen werden.

Was bedeutet eigentlich frei programmierbar?

Anscheinend gibt es ein Problem der freien Programmierbarkeit.

Wie programmiert man denn sonst?

Also in dem Begriff gibt es zwei kleine Abgrenzungen.

Ja, wenn wir sowas kommunizieren.

Man hat ja immer so als Wissenschaftler die Herausforderung, man möchte das wissenschaftlich nicht falsch haben, aber auch nicht alle mit Details überfrachten.

Aber jetzt haben wir einen etwas längeren Podcast, jetzt reiße ich dir Details an.

Das eine ist, ich möchte mit dem Quantencomputer alles machen können, was die Gesetze des Quantencomputing mit dieser Zahl qubit erlauben.

Ich möchte nicht in meinem Befehlssatz eingeschränkt sein, sodass bestimmte Dinge nicht gehen oder bestimmte Dinge extrem schwer sein.

Es gibt Ansätze zum Quantencomputing namens adiabatisches Quantencomputing oder Quantensimulation, die sind nicht ganz frei programmierbar.

Da gibt es Dinge, die gehen einfach nicht.

Dafür sind die Sachen tendenziell etwas einfacher zu bauen.

Es ist immer noch super schwer, aber in der Abstufung etwas einfacher.

Das zweite ist, dass wir als öffentlich gefördertes Projekt auch unsere Nutzerinnen und Nutzer sehr nah an die Hardware dranlassen können.

Das heißt, selbst wenn wir den Leuten – normalerweise werden wir Benutzerinnen und Benutzern natürlich eine Programmierschnittstelle liefern, die ist noch relativ einfach.

Da kann man auch, wenn man möchte, direkt Maschinensprache benutzen.

Aber auch unterhalb der Maschinensprache gibt es was.

Ich kann diese Drehungen, von denen wir schon mal gesprochen haben, auch nativ, ohne das Hindernis einer Programmiersprache, einfach so einstellen.

Das ist was, womit sich Firmen, die auch so etwas entwickeln, ein wenig schwer tun.

Denn je näher man drankommt, desto mehr kapiert man natürlich auch Dinge, die vielleicht Firmengeheimnisse sind.

Und deshalb wollen wir Profi-Nutzern die Möglichkeit geben, zu hacken, also sehr direkt mit der Hardware zu arbeiten.

Das sind Nutzer, die vielleicht vorher gezeigt haben, dass sie es ganz gut kapieren, was sie dort machen.

Und eine Herausforderung ist auch, das System wirklich dann sicher zu machen.

Aber das ist der zweite Züge, den wir haben wollen.

Denn die Denkweise, wie man jetzt Quantencomputer programmiert, da gibt es tatsächlich verschiedene.

Eine, die sehr aus der Physik motiviert ist, eine, die sehr aus der Informatik motiviert ist.

Und ich erwarte selber, dass in zehn Jahren das Programmieren von Quantencomputern in so einer Mischform zwischen den heutigen Ansätzen geschieht, der Konzepte aus der Informatik und der Physik nutzt.

Das läuft so unter dem Stichwort "Codesigned" des Quantencomputing oder "Digital analoges Quantencomputing".

Und das kann man nur entwickeln, wenn einem die Programmierschnittstelle das nicht vorgibt.

Und das wollen wir so weit wie möglich eben realisieren.

Wie sähe das konkret aus?

Gibt es da schon irgendeine, ich sage mal, Übersetzung in die heutige Welt, die auch ich verstehen kann?

Hängt dann da trotzdem noch eine Tastatur dran?

Ja, der Programmspeicher und die Entwicklungsumgebung ist eher klassischer Computer.

Ja.

Weil es ist ja immer noch so, das Quantencomputerprogramm, das schreibt man, und da gibt es dann einen Übersetzer, einen Compiler.

Also Compiler für Übersetzer, der hat mehrere Schritte, der am Ende Befehle draus macht, die der Prozessor, also wirklich der Chip direkt versteht.

Das ändert sich alles nicht.

Es ändert sich letztlich nur, dass Sie in einem Schritt einen Befehl ausüben können, der Ihren klassischen Computer bei Speicher und/oder bei Zeit sofort in die Knie zwingen würde.

Das heißt, Sie haben eine Programmierschnittstelle.

Und in der Praxis sieht das auch so aus.

Die gibt es auch im Cloud.

Es gibt freien Cloud-Zugang auf ganz einfache Quantencomputer, dass Sie das entwickeln.

Es gibt eine Sprache, wie Sie auch visualisieren können, was Sie gerade machen.

Und das können Sie zunächst in einer kleinen Version, also deutlich unter 50 qubits, auf klassischen Computern testen.

Bis 20 kommen Sie da mit Ihrem Laptop.

Bis 40 kommen Sie mit normalen akademischen Clustern, also was noch kein Supercomputer ist, sondern was so ein typisches Physikinstitut einer Hochschule sich aus der Erstausrüstung eines Neuberufenden noch vernünftig leisten kann.

Und danach wird es dann dünn.

Aber man kann natürlich oft hergehen und sagen, ich entwickle und debugge jetzt eine kleine Version und dann kann ich einen Schalter umlegen.

Ich nehme die große Version und die teste ich dann auf einem echten Quantencomputer.

Und man merkt tatsächlich, also insbesondere kann man da das Engagement von IBM nicht zu wenig würdigen.

Die haben sehr früh einen ganz einfachen Quantencomputer mit fünf qubits in die Cloud gestellt und den Leuten gesagt, macht mal, ihr dürft es kostenlos machen.

Und das war natürlich Teil eines Neudeutsch-Freemium- Angebots.

Ja, also irgendwann, wenn man groß haben will, wird es dann teuer.

Aber die haben es geschafft, dass Leute mit einer Hacker-Mentalität in der Lage waren, ohne formale Quantenphysikausbildung mit Quantencomputern umzugehen und damit interessante Dinge zu machen, weil das Gefühl des Programmierens gar nicht anders ist.

Man sieht, hier gibt es ein paar Sachen, die funktionieren anders.

Und ich kann mich da schlecht reinversetzen, weil ich dafür also tatsächlich viel zu alt bin.

Aber man hat so den Eindruck, die Hacker-Mentalität und des Akzeptierens der

in den Algorithmus runtergebrochenen Gesetzen der Quantenphysik wirkt wirklicherweise wie das Hacken in einem sehr schrägen Videospiel.

Also man hat eine Umgebung mit ihren eigenen Gesetzen und durch Interaktion mit diesen Gesetzen lernt man, was sie tun und kommt damit ganz gut zurecht.

Und das scheint tatsächlich was natürlicher Einstieg gerade für sehr junge Leute, also Teenager, ins Quantencomputing zu liefern.

Das ist vom Gefühl gar nicht so viel anders als ein klassischer Computer mit ein paar seltsamen Gesetzen.

Was für interessante Dinge haben die Leute denn auf diesem IBM-Gerät gerechnet oder rechnen lassen?

Muss man ja eher sagen.

Also sehr viele von den Quantenalgorithmien, die man kennt, sind relativ abstrakt.

Das Beschleunigte Abfragen hatten wir gerade schon von der Datenbank.

Oder da kann man auch andere Dinge mit Beschleunigt Abfragen oder das Parallele Durchprobieren.

Und man ahnt gar nicht, was es für Aufgaben gibt für Paralleles Durchprobieren und Beschleunigtes Abfragen.

Also das geht von Schiffe versenken über Vorhersagen auf dem Finanzmarkt.

Beim Schiffe versenken muss man sich noch überlegen, was passiert, wenn man ein Schiff in Überlagerung abfragt, ob es dann explodiert.

Und das ist eine Frage, über die man sich schon Gedanken gemacht hat.

Aber tatsächlich Schiffe versenken, verschiedene Finanzmarkt Dinge, Optimierungen gibt es wie Sand am Meer, irgendwelches Management von Flotten.

Aber gerade diese spielerischen Sachen.

Mir fällt jetzt kein griffiges Beispiel ein, aber ich glaube für Schiffe versenken ist ein ganz gutes.

Man fragt verschiedene Schiffe mal parallel ab und kriegt ein gewisses Gefühl, wo ein sein könnte und kommt dann schnell auch zum Ziel.

[Siebert] Dann muss ich aber die Daten, die dann da rausfallen, ich bleibe beim Schiffe versenken, die muss ich ja dann aber irgendwie interpretieren, damit ich überhaupt ein Gefühl dafür bekomme, wo das Schiff sein könnte.

Das passiert dann aber wieder auf meinem Computer zu Hause oder macht das auch der Quantenrechner?

[Lesch] Also der Clou bei Quantencomputing ist, dass man den Zufall, der einem die Parallelität ermöglicht.

Also dass ich beim parallelen Rechnen bin ich in verschiedenen Alternativen, aber wenn ich angucken möchte, kriege ich eine davon mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit.

Den muss ich am Ende wieder loswerden.

Deshalb nicht alles, was ich auf einen Parallelrechner tun kann, hat dann gleich eine Quantenbeschleunigung.

Also es gibt dann einen gewissen Zoo von algorithmischen Elementen, wie Optimierung, wie Abfragen eines Tests, mit denen das geht, wo ich weiß, dass ich die Methode habe, den Zufall wieder loszuwerden.

Also das Beispiel vom Telefonbuch, hatte ich ja gesagt, es geht tatsächlich so, dass ich am Anfang massiv quantenparallel das Telefonbuch abfrage.

Das heißt, schon beim ersten Blick auf mein Telefonbuch mit 100.000 Anwendern wird das korrekte Element markiert.

Aber ich schaff's nicht in einer Präparation.

Ich muss die tatsächlich einige Male wiederholen, um die falschen Lösungen zu unterdrücken und die richtige Lösung zu verstärken.

Aber es geht eben glücklicherweise schneller als klassisch.

Eben nur die Wurzel statt der Hälfte.

Und das ist in einen richtigen Quantenalgorithmus schon eingebaut.

Man kann das vielleicht so unterscheiden.

Also der Begriff des Algorithmus ist hier ein bisschen unscharf.

Das Finden eines echt fundamental neuen Quantenalgorithmus ist für Leute, für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in der Informatik ein Karriereproblem.

Also wenn man in seiner Karriere ein oder zwei findet, ist man großartig.

Wenn man keinen findet, aber Algorithmen gut verstanden hat, ist man immer noch ein großartiger Wissenschaftler oder Wissenschaftlerin.

Aber darüber hinaus gibt es das, wo man sagt, okay, hier gibt es jetzt ein ganz abstraktes Problem, wie das Abfragen eines Tests.

Das hat jemand erfunden.

Da war ich, es gibt Quantenbeschleunigung.

Jetzt gucke ich, welche Real-World-Aufgabe, welche angewandte für Menschen nützliche Aufgabe kann ich durch dieses Element beschleunigen.

Und da gibt es eben eine Menge zu tun.

Und das ist eben nicht ein Karriereproblem für berühmte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler.

Und da geht man eben her und sagt, oh, das Vorhersagen von Finanzmarktentwicklungen, das kann ich runterbrechen auf eine Optimierung und die kann ich jetzt beschleunigen.

Oder das Abfragen von verschiedenen Interpretationen eines Datensatzes, das ist ein Abfrageproblem.

Und das kann ich mit Quantencomputern beschleunigen.

Also das ist so die zweite Ebene der Algorithmenentwicklung hier.

Also wir hatten ja vorhin schon mal mein Quantenhandy, das kein Quantenhandy ist, sondern ein Handy mit einem Terminal zum Quantencomputer.

Was für sinnvolle Anwendungen werde ich denn überhaupt in meinem Alltag sehen?

Und wie kommen wir da hin?

Also es sind größtenteils Anwendungen im Hintergrund der IT.

Auch jetzt ist es schon, dass einer der leistungsfähigsten Computer, den Sie täglich verwenden, ist der, der Ihnen zeigt, wo heute Stau ist.

Bis wir aber dort wirklich nützliche Anwendungen haben, ist es schon noch ein gewisser Weg.

Wir sind gerade an dem Punkt, weil wir einmal Quantenüberlegenheit gezeigt haben, dass wir wissen, Quantenüberlegenheit ist im Prinzip lösbar, aber die Aufgabe hat keinen gesellschaftlichen Nutzen aus dem Testen von Quantencomputern.

Das heißt, wir sind jetzt aber an so einer Stelle, dass ich jetzt nicht einfach mit Papier und Bleistift oder durch Rumspielen an meinem eigenen klassischen Computer zu Hause wirklich weiterkomme, bessere Quantenanwendungen zu entwickeln, sondern das muss man schon mit dem Quantencomputer wirklich testen.

Weil es gibt so was in der Informatik, was ganz wichtig ist, das nennt man eine Heuristik.

Das ist was, das kennt man auch aus dem Alltag, das ist ein Algorithmus.

[Siebert] Das Vorurteil ist eine Heuristik.

[Lesch] Ja, aber in der Informatik ist es dann auch noch ein Algorithmus, wo man keinen mathematisch geschlossenen Beweis hat, dass der wirklich funktioniert.

Aber beim Probieren stellt man fest, der funktioniert.

Zum Beispiel sehr große Teile der künstlichen Intelligenz.

Vieles in der KI ist nicht erklärbar, aber man sieht am Ende, es hat vernünftige Ergebnisse.

Entweder das Ergebnis, dass ich da tatsächlich ein tolles Ergebnis kriege, oder ich kriege das Ergebnis, dass ich die Kriterien, dass ich meine KI falsch trainiert

habe.

Ja, es gibt ja so Sachen, dass KI diskriminiert und einfach die Regeln rausfindet.

Aber das nennt man eine Heuristik.

Und ich kann mich eben nicht am grünen Tisch hinsetzen, wie bei den ersten Quantencomputer-Anwendungen, dass man mit Papier und Bleistift sagt, so, baue einen Quantencomputer und hier ist das Rezept, das wird funktionieren.

Sondern gerade die kurzfristig erreichbaren Algorithmen haben so den Charakter von Heuristiken.

Das heißt, man hat beim Testen gesehen, das liefert mir eine gute Beschleunigung, man hat eine Idee deshalb, aber um das wirklich gut zu entwickeln, muss man Zugang zum Quantencomputer haben.

Das heißt, das, was jetzt jenseits der 50 Qubits kommt, das ist wirklich im besten Sinne des Wortes ein wissenschaftliches Großgerät.

Das kann man über die Cloud benutzen und man kann Algorithmen, die man im Kleinen entwickelt hat, dann im Großen testen und einen Benchmark machen, wie gut funktioniert das wirklich.

Und man kennt, wenn man mal die Computerzeitschrift anguckt, das ja auch.

Da gibt es verschiedene Tests für Hardware und man lernt da was über die Hardware und man lernt was über den Test, den man dort eigentlich laufen lässt.

Und deshalb ist es jetzt auch durch den Urknall dieses Experiments von Google, sind wir jetzt dahin gekommen, dass viel mehr Forschungseinrichtungen, öffentliche, aber auch Firmen jetzt an Quantencomputer rankommen wollen, an die ersten Prototypen, weil man nur damit in der Quanteninformation wirklich weiterkommt.

Und dass man damit von den hohen Anforderungen von bewiesenen Algorithmen runterkommt, mit heuristischen Algorithmen sozusagen die Anforderung von einer Million Qubits, die man eigentlich hätte, langsam runterschraubt und die Zahl der Qubits, die man braucht, hochschraubt, bis man sich in der Mitte trifft und dass man sich auch bei der Sauberkeit, bei der Fehleranfälligkeit der Qubits annähert, dass man vielleicht lernt, mit bestimmten Fehlern auch zu leben und die einzubauen.

Diese Strategie heißt Fehlervermeidung, dass ein physikalischer Fehler dem Algorithmus eigentlich gar nichts macht.

Auch dazu müssen letztlich die Hardwareentwickler und die Softwareentwicklerinnen zusammenarbeiten.

Eine ganz wichtige Sache, die man schon gemerkt hat, ist, dass die Algorithmen aus der Optimierung oder aus der theoretischen Chemie wirklich die klassischen und die Quantencomputer ganz eng zusammenspannen.

Das heißt, die äußere Schleife ist eigentlich ein klassischer Computer, der aber einen Rechenschritt hat, der aufwendig ist und Quantenbeschleunigung hat.

[Siebert] Über wie viel Zeit reden wir da eigentlich?

Also ich habe hier so, ich habe jetzt mein Problem, mein chemisches Problem oder chemikalisches Problem.

Mein Computer rechnet so, irgendwann sagt mein Computer, so reicht, ich komme nicht weiter.

Jetzt spiele ich die Daten an den Quantencomputer und erwarte das Ergebnis.

Wie lange wartet mein Rechner darauf, dass das Ergebnis zurückkommt?

Also über den Daumen, reden wir über Sekunden, Minuten, Stunden, Tage?

[Kehl] Das klassische Wissenschaftliche, es kommt darauf an.

Aber tatsächlich ist die Taktung von Quantencomputern gar nicht so schlecht.

Und wenn Sie ein Unterprogramm Ihres klassischen Computers haben, also die Idee ist es, man hat ein klassisches Computerprogramm, das an einer Stelle ein Unterprogramm aufruft in einem Quantencomputer.

So einmal das Unterprogramm laufen lassen dauert eigentlich so eine Millisekunde.

Und meistens möchte man ein paar Varianten des Unterprogramms laufen lassen und noch ein bisschen Statistik einsammeln.

Das heißt, da kommt man dann auf Minuten.

Das geht also sehr, sehr fix.

Normalerweise, wenn dann der klassische Computer weiterrechnet, braucht der sogar länger.

Was eigentlich ganz schlau ist, weil dann können Sie Ihren Quantencomputer für den Job eines anderen Kunden verwenden, sozusagen.

Und das andere, was an dem Ansatz ganz attraktiv ist, ist die Operation, die Computer normalerweise am zuverlässigsten und mit den wenigsten Fehlern machen, ist sich auf die Null zurückzusetzen.

Das heißt, die Idee ist, ich habe so ein kurzes Stückchen Quantenalgorithmus, das so eine Millisekunde rennt oder vielleicht läuft oder vielleicht zehn Millisekunden.

Dann gibt es was aus.

Ich drücke den Reset-Knopf und nach einer weiteren paar Millisekunden ist das Ding frisch initialisiert und kann wieder loslaufen.

Das ist also schon eine ganz geschickte Methode, wie die Softwareentwicklung und die Schwächen der Hardware voneinander gelernt haben, um gut aufeinander einzugehen.

Und das wird sicherlich der erste Schritt sein, wie man tatsächlich dann auch Quantenvorteil kriegen kann.

Das alles, was Sie da erzählen, das ist alles so weit vorne aus meiner Perspektive, dass ich mich die ganze Zeit frage, wie sind Sie da hingekommen?

Das war eine der Länge des Lebens angemessen mehrschrittige Geschichte.

Also ich wollte, ich habe letztlich, also ich fange früh im Leben an, aber wir machen den Schnelldurchlauf.

Ich fand Quantenphysik, als ich davon so populärwissenschaftlich in der Schule gehört habe, spannend.

Das war wann ungefähr?

Das war Ende der 80er Jahre.

Da war aber klar, man kann das in der Schule nicht vernünftig behandeln.

Also die Schwierigkeit beim Sprechen Quantenphysik über das Mikrofon ist, dass man da in Sprache und nicht in Mathematik redet.

Und Mathematik lässt sich auch schlecht mit Audio übertragen.

Also viele, viele Unklarheiten, die beim Verbalisieren passieren, werden in der Sprache der Mathematik klarer.

Weshalb man im Physikstudium auch erstmal ordentlich Mathe zu Beginn macht.

Ich wollte das aber gescheit lernen, hatte dann aber gleichzeitig den Impetus, was bauen zu wollen.

Deshalb habe ich dann auch, also ich hatte auch ein Interesse an Mathematik.

Ja, ich bin theoretischer Physiker, das heißt, ich finde Abstraktionen toll und habe tatsächlich Schwierigkeiten, einen Nagel gerade in die Wand zu hauen.

Und das wollte ich lernen.

Und deshalb habe ich auch nicht Mathematik studiert, weil ich was bauen wollte und den Bezug zur Natur haben wollte und habe dann also mich für Physik entschieden.

Ich stamme aus einer Familie ganz ohne akademischen Hintergrund und habe dann also versucht, so ein bisschen rauszufinden, wo wird coole Physik gemacht und fand erstmal so die Elementarteilchenphysik.

Total spannend, bin dann nach Karlsruhe gegangen, weil das dort gemacht wurde.

Und Elementarteilchenphysik ist immer noch spannend, aber so zur Zeit der Diplomarbeit war mir dann klar, dass in diesen großen spannenden Fragestellungen mein Beitrag als Diplomant nur ein sehr kleiner sein kann.

Und habe dann erstmal die theoretische Nanoelektronik gesehen.

Da gab es irgendwie spannende quantenmechanische Rechnungen und Leute, die Bauelemente gemacht haben.

Theoretische Nanoelektronik?

Man modelliert nanoelektronische Bauelemente.

Also theoretisch gleich modellierend.

Das heißt auch manchmal mesoskopische Physik, also mittelgroße Physik.

Und zu Ende meiner Doktorarbeit war das dann so, dass nach dem Algorithmenuhrknall, also nach Shaw und Grover, hat jemand mal vernünftig ausgeschrieben, was sind so die Anforderungen an Quantencomputerhardware.

Es wurde auch von inzwischen Helmholtz-Kollegen aufgeschrieben, von David DiVincenzo, auch vom Forschungszentrum Jülich, der damals noch bei IBM war.

Und diese Liste hat die ganzen benachbarten Gebiete elektrisiert und alle haben geguckt, kann ich denn diese Kriterien eigentlich erfüllen?

So auch die theoretische Nanoelektronik.

Das heißt, in unserer Community schwamm das dann hoch und tatsächlich mein Doktorvater, Gerd Schön aus Karlsruhe, hat so den ersten vollständigen Bauplan für so einen supraleitenden Quantencomputerchip 1998 entwickelt.

Da war ich noch nicht dabei.

Und das hatten wir vorhin schon gesagt, diese theoretische Nanoelektronik, das sind genau die Bauelemente auf einem Chip, die schon wirklich es erlauben, in die Quantenmechanik einzusteigen.

Also wir haben schon ähnliche Bauelemente angeschaut, die wir heute Qubits nennen.

Wir hatten noch die Motivation von Quantencomputing noch nicht.

Und dann gab es eben für mich den Punkt, was ich als Postdoc machen möchte.

Und tatsächlich, ich war für mein Promotionsthema, das hatte ich schon bei einer Diplomarbeit gemacht und ich wollte mich ein bisschen verändern, aber jetzt natürlich auch nicht dramatisch.

Und tatsächlich, ich habe kurz vor der Jahrtausendwende promoviert, als die Unternehmensberatungsindustrie unglaublich Leute angezogen hat.

Und ich habe auf Unternehmensberatungskosten sehr, sehr viele schöne Abendessen gehabt.

Aber dann kam die große Chance bei einer experimentellen Arbeitsgruppe, weil ich immer die Arbeit nahe an Experimenten geschätzt habe, in einer experimentellen Arbeitsgruppe, die mal so ein erstes Quantenbit designt hatte, was anders war als das, was mein Doktorvater gemacht hatte, mitzuarbeiten.

Die hatten einfach formulierbare und schwer verantwortbare Fragen aus der Preisklasse.

Kann das überhaupt funktionieren?

Übersehen wir nicht was?

Und wenn es funktioniert, wonach müssen wir genau gucken?

Und das war die Chance des Lebens in diesem coolen Gebiet und nah an Experimentatoren, damals an der TU Delft in den Niederlanden, in der Gruppe von Hans Moi, da direkt mit dabei zu sein.

Und da habe ich mir gesagt, okay, das machst du jetzt mal mit der akademischen Karriere, bist du dir gar nicht so sicher.

Aber wenn du nach einem Jahr aufgibst, bist du immer noch keine 30, alles gut.

Und da bin ich dann dabei geblieben.

Ich fand das faszinierend, einerseits die abstrakten Gesetze der Quantenphysik benutzen zu müssen und andererseits ein Apparat zu bauen.

[Siebert] Der eigentlich gar nicht auf diese Gesetze hören sollte.

[Lesch] Genau.

Und weil letztlich ist das Beherrschen eines physikalischen Gesetzes, davon muss man eigentlich drei Dinge tun.

Man muss es verstehen, man muss es einmal gelehrt haben und man muss was draus gebaut haben.

Und das war dann einfach mein Gebiet.

Das war im Prinzip, da habe ich gesehen, das, weshalb ich Physik studiert habe, das gibt es da.

Also ein Beispiel ist das Messproblem in der Quantenphysik.

Das ist so noch das philosophische Schmankerl gegen Ende.

Also ein Quantensystem ist in so einer Überlagerung von Zuständen.

Und sobald sie gucken, sobald sie messen, entscheidet es sich aber für eine der Möglichkeiten, die dann auch zu der gemessenen Größe passt.

Also es gibt die Unschärferelation, man kann nicht den Ort und die Geschwindigkeit gleichzeitig präzise bestimmen, beides ist ein wenig unscharf.

Aber in dem Moment, in dem sie messen, ist der Ort nicht mehr unscharf.

Dann ist es ja da, wo sie geguckt haben, dafür ist dann die Geschwindigkeit maximal unscharf.

Wenn man sich das genau anhört, also vorher habe ich einen Zustand.

Alles, was ich über das System jemals wissen darf, weiß ich.

Aber ich kann eine Messung nicht vorhersagen.

Das heißt, die physikalische Realität entsteht nicht zur Messung.

Also wenn man sich da nicht drüber entsetzt ist, dann hat man nicht aufgepasst.

Ja, das ist also eine Sache, die das Weltbild, das Dinge unabhängig von der Beobachtung existieren, herausfordert.

Das war das, was Einstein geärgert hat.

Das war, was ihn philosophisch geärgert hat, weshalb er geglaubt hat, dass die Quadphysik irgendwann wieder zusammenbricht.

Und man hat sich das dann so rumnavigiert, man hat gelernt, damit zu arbeiten.

Es gab diese große Episode in der Geschichte der Quantenphysik, so ungefähr von 1940 bis 1980 mit einem kleinen Pause Ende der 60er Jahre, wo es verpönt war, über diese Fragen nachzudenken.

Also da hat man akzeptiert, so nach dem Motto, dass mit der Messung, das ist halt abstrakt und man wiederholt das Experiment eh und in der Klausur kommt es gar nicht dran.

Ja, also das fragt man sich dann gar nicht mehr.

Aber das Beherrschen der Quantentechnologien fordert einen raus, diese Fragen wieder zu stellen.

Es gibt ein schönes Buch, wie diese grundlegenden Fragestellungen dahingedümpelt sind in den 50er bis 70er Jahren.

Das heißt "How the Hippies Saved Physics".

Es gab so einen kleinen Leseclub in Berkeley, wo die Leute das diskutiert haben und die durften sich irgendwie auch nicht erwischen lassen.

Das war die Zeit des Pragmatismus, als man Quantenphysik genommen hat, um Kernspaltung und Transistor und Laser und sowas zu entwickeln, was auch Quantenphysik innen drin hat, aber keine Quanteninformationen benutzt.

Aber das fand ich, dass man zurückkommt auf diese Grundfragen, ein Apparat baut und um den zu bauen, die auch wirklich gut verstehen muss.

Beim Quantenphysik, also um jetzt noch uns ganz zu verwirren und keine Sorge, wenn Sie das Problem für unlösbar halten, es ist nicht gelöst, weil der Messapparat, der gehorcht ja auch dem Gesetz der Quantenphysik.

Wie kann der Messapparat, das Quantensystem stören, selber ein Quantensystem sein?

Warum ist der Messapparat, was ich zeige rechts, zeige links, nicht auch dann gleichzeitig zeige rechts, zeige links?

Da wird es dann wirklich schwierig.

Also wir müssen jetzt hergehen und Messapparate bauen, die am Quantenlimit messen.

Das heißt, wir wissen, die Messung stört.

Das heißt, das Allerwichtigste am Messapparat ist, dass wir den abschalten können.

Ich will ja, die Messung stört.

Das heißt, während mein Quantencomputer in seinen Überlagerungen ist, darf ich nicht messen.

Der Messapparat muss ganz entkoppelt sein.

Aber wohin weiß denn der Messapparat, wann er wieder messen darf?

Ich schalte ihn auf eine geeignete Art und Weise an.

Aber dann stört er ja wieder.

In dem Moment, wo ich messe, ist es mir egal, dann ist meine Rechnung vorbei.

Okay.

Aber das heißt, ich muss den Messapparat so gut verstehen, dass ich genau weiß, wie diese Störung zustande kommt und wie ich sie abschalten kann.

Ein Beispiel, was man manchmal diskutiert und was da gar nicht so irrelevant ist, ist die Frage, ob ein im Wald, ohne dass jemand hört, umfallender Baum eigentlich ein Geräusch macht.

Ja.

Und die Antwort ist leider ja, denn ein Geräusch ist eine Druckwelle und Sie sehen, das Umfallen hat die Blätter bewegt und er hat ein Geräusch gemacht.

Sie können das in den Blättern rekonstruieren.

Das heißt, nicht hingucken reicht nicht für nicht messen.

Die Messe entsteht nicht im Bewusstsein, die entsteht im Messapparat.

Jetzt müssen wir also einerseits an diesem schwierigen Messproblem navigieren und andererseits eine Maschine bauen, die dann auch solche Eigenschaften hat, dass sie sich gut ein- und ausschalten kann, dass das Messergebnis schnell liefert, dass sie wenig Fehler macht.

Und diesen Kontrast von Elektrotechnik, wie man diesen Messapparat baut, und den Gesetzen der Quantenphysik, dieses Verbinden von verschiedenen Ebenen des Verständnisses, das finde ich unabhängig von den Ergebnissen des Quantencomputing, sozusagen.

Das war für mich am Anfang die Fragestellung, weshalb ich da unbedingt hingehen wollte.

Ihr erstes Qubit sah anders aus als das Ihres Doktorvaters.

Wie sah Ihr's aus?

Also das hatte mein Postdoc-Chef gemacht und es war nicht so unähnlich.

Es war ein kleiner supraleitender Schaltkreis.

Supraleiter sind Materialien, die den elektrischen Strom ohne Widerstand leiten.

Und in unserem Fall ist das meistens ein ganz simples Material, nämlich Aluminium, das sehr stark gekühlt wird.

Das meines Doktorvaters entsprach auch des ersten experimentellen

Nachweises, der 1999 kam.

Das hat für die 0 und 1 die elektrische Ladung genommen.

Das heißt, man hatte eine kleine supraleitende Insel, also ein kleines, vielleicht 10 Nanometer großes supraleitendes Bauelement.

Und geladen war 1 und nicht geladen war die 0.

Das ist wunderbar klein.

Das ist auch konzeptionell sehr transparent, hat aber den Nachteil, dass es sehr, sehr empfindlich auf rauschende Ladung reagiert.

Und Ladungsrauschen ist leider in der Physik allgegenwärtig.

Das liegt daran, dass die Materialien verspannt sind und da gibt es leicht geladene Atome, die so langsam hin und her hüpfen.

Das heißt, die Quanteninformation, die lebte im ersten Experiment vielleicht so eine Nanosekunde, also eine Millionstelsekunde.

Das Design, was mein Postdoc-Chef vorgeschlagen hatte und was wir dann vollständig ausgearbeitet haben, hat stattdessen die gleichen Bauelemente in einen Ring gemacht.

Und in dem Ring kann ein Kreisstrom fließen.

Man weiß so von Spulen, kreisender Strom heißt Magnetfeld hoch, Magnetfeld runter.

Das heißt, man hat 0 und 1 in der Richtung des Magnetfelds dargestellt.

Und das war ganz deutlich stabiler gegenüber Rauschen.

Das lebt deutlich länger und hat auch die Möglichkeit, sich sehr gut verschalten zu lassen, weil die Magnetfelder, die da entstehen, gar nicht mal so klein sind.

Beide Architekturen haben sich in modifizierter Art und Weise auch durchgesetzt.

Die Fluss-Qubits von meinem Postdoc-Chef, die mit den Magnetfeldern, die leben vor allen Dingen für sogenannte adiabatische Quantencomputer.

Die sind nicht ganz frei programmierbar, dafür sind sie schon sehr groß.

Groß sind sie von vielen Qubits.

Genau, viele Qubits.

Das Ladungscubit ging durch mehrere Entwicklungsgenerationen, mit denen man zwar das Ladungsrauschen nicht wegbekommen hat, aber den Effekt des Ladungsrauschens auf die Quanteninformation minimiert hat.

Und der Enkel dieses Qubits, der heißt Transmon.

Und das ist so das Arbeitspferd von den meisten Arbeitsgruppen, einschließlich Google.

Sie sind jetzt theoretischer Physiker.

Was muss man denn eigentlich machen, um bei Ihnen mitspielen zu dürfen?

Theoretische Physik lernen?

Das ist auf jeden Fall mal ein guter Start.

Es ist nicht zwingend notwendig.

Also eine meiner Doktorandinnen hat einen Master in Informatik und hat dann sich noch auch Dinge in theoretischer Physik entsprechend drauf geschafft.

Wir sehen immer mehr für uns jetzt in der Theorie, dass das Ergebnis sich ändert, wenn man angewandt wird.

Was meine ich damit?

In der Grundlagenforschung und so in der Oldschool Physik ist das Ergebnis vielleicht eine Formel oder eine Gruppe von Formeln.

Und dann zog irgendwann der Computer ein und dann hat man mit Computersimulationen noch verschiedene Kurven, verschiedene Graphen dazu gemacht und dann das war das Ergebnis.

Wir werden jetzt anwendungsnah.

Das heißt, die Methoden, die wir entwickeln, die sollen nicht mal eine Kurve machen, sondern die sollen den Quantencomputer besser machen.

Das heißt, wir publizieren unsere Forschung jetzt immer mehr auch in Form von Software.

Und wenn die Software ganz neu ist, natürlich, wir machen die ersten tollen Sachen, die wir machen können.

Schließlich müssen meine Doktoranden promovieren und dafür was Neues zur Wissenschaft beitragen und meine Habilitanten müssen habilitieren und so weiter.

Aber eine stabile Version davon entwickeln wir dann natürlich zu einem Punkt, wo die direkt auch bei anderen Leuten mit eingebettet werden kann und dort nützlich sein kann.

Das heißt, in unserem Team haben wir jetzt auch immer mehr Softwareentwicklerinnen, Softwareentwickler, sowohl was die Architektur der Software angeht, weil Physikerinnen und Physiker können natürlich per Definition alles, aber richtig gelernt zu haben, wie man Software macht, die sich auch nach zehn Jahren noch warten lässt und die auch skalierbar ist und die sich auch leicht auf neue Plattformen portieren kann, führt dazu, dass wir immer mehr Softwareentwickler einstellen, dass wir auch die Schnittstellen gerade machen, weil wir Benutzerinnen und Benutzer haben, die vielleicht auch weniger frustrationstolerant sind als das weniger tolerant für Kommandozeilen sind.

Da gibt es dann auch Aufgaben wie unsere Software schließt sich einerseits an Programmierumgebungen an, andererseits aber relativ direkt an Hardware, also letztlich an modifizierte und weiterentwickelte Laborelektronik und da gibt es Leute bei uns, die Schnittstellen programmieren.

Also insofern wird auch das Team meines Instituts breiter.

Wenn wir jetzt auf das Open SuperQ Projekt gehen, wo solche Experimentatoren dabei sind, da sind viele Leute mit Elektrotechnikausbildung, weil da geht es drum Mikrowellenbauelemente.

Also Mikrowellen fangen so bei einem Gigahertz an und wir operieren so typischerweise auf fünf bis zehn Gigahertz.

Mikrowellenbauelemente zu machen, die sehr sauber, sehr präzise sind und das auch noch bei niedrigen Temperaturen, da braucht es auch wiederum genau dieses Fachwissen.

Die Leute, die unsere Kältemaschine weiterentwickeln, haben ein ganz eigenes Fachwissen.

Das heißt, die Community wächst und wird interdisziplinärer.

Wir haben jetzt die Herausforderung, den neuen Kolleginnen und Kollegen auch das Lastenheft und sozusagen das Minimum an Quantenphysik, das man doch beherrschen sollte, dann zu lehren.

Deshalb gibt es auch inzwischen Studiengänge in Quantum Engineering, in Quanteningenieurwesen, wo man den Teil der Physik lernt, den man dort braucht und die Grundlagen von Ingenieurwissenschaften.

Also tatsächlich bei der Heimatuniversität.

Wir haben ja in Helmholtz immer neben unserer Stelle in Helmholtz auch eine Heimatuniversität, wo wir lehren und wo unsere Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter ihre Abschlüsse machen.

Das ist bei mir die Universität des Saarlandes.

Da haben wir so einen Studiengang Bachelor und Master, der tatsächlich auch ganz ordentlich inzwischen nachgefragt wird.

Und da müssen wir natürlich dann aus der vollständigen Physikausbildung die Sachen, die man nicht braucht, chirurgisch mitnehmen, damit man nicht einfach das Doppelte studiert.

Aber das entwickelt sich immer mehr, auch teilweise schon an Fachhochschulen.

Also gerade in der Informatik an Fachhochschulen gibt es regelmäßig Quantencomputing-Vorlesungen und die Kolleginnen und Kollegen dort, die wissen natürlich auch ganz genau, wie man Wissen sozusagen passgenau aufbereitet.

Und wir sind mit denen im Gespräch, auch Weiterbildungen für berufstätige Informatikerinnen und Informatiker, Ingenieurinnen und Ingenieure aufzusetzen.

Und dazu ist natürlich praktisch, dass viele der Menschen dort auch mal bei uns

ausgebildet werden.

Also eine meiner Doktorandinnen der ersten Generation hat jetzt zum Beispiel eine Professur an der Ostbayerischen Technischen Hochschule in Regensburg.

Sie sagten eben Mikrowellen.

Was machen Sie denn mit den Mikrowellen?

Ja, die Mikrowellen, also diese sehr hochfrequenten Signale, brauche ich, um meinen Quantencomputer zu steuern und auszulesen.

Es gibt da das Prinzip der Resonanz.

Wenn ich auf ein Bauelement mit der genau richtigen Frequenz einstrahle, kann ich das sehr leicht motivieren.

Kennt man vielleicht aus dem Chemieunterricht von Spektrallinien, wenn das Licht die richtig Frequenz hat.

Bei uns ist jetzt alles mehrere Größenordnungen der Frequenz.

Unten drunter folgt aber den gleichen Gesetzen.

Das heißt, unsere Resonanzfrequenzen sind so bei 5 Gigahertz.

Das heißt, wenn ich ein Qubit von 0 nach 1 schubsen möchte oder auch nur der Hälfte schubsen, entspricht das letztlich einem Mikrowellenpuls bei einer Frequenz von ungefähr 5 Gigahertz.

Da gibt es eine schöne auch hemmsärmliche Umrechnung.

20 Gigahertz entsprechen einem Kelvin an Temperatur.

Das heißt, für 5 Gigahertz muss ich deutlich unter 0,2 Kelvin sein.

Darum auch der Bedarf nach Kühlung.

Ihre Schnittstelle besteht also aus Mikrowellen?

Ganz genau.

Es gibt Mikrowellengeneratoren, die dann Pulse aussenden.

Also wir haben ein Mikrowellensignal, das ich für eine ganz bestimmte Zeit und mit einer ganz bestimmten Wellenform ein- und ausschalten.

Das ist wirklich cool, wenn ich das mal so sagen darf.

Also diese Mikrowellen, also die Mikro... Das sind natürlich nicht die Wasserresonanz... Natürlich.

...Reitbandsignale im Vakuum, sprich Mikrowellenherde.

Schon klar.

Aber man hat da spannende Analogien.

Also das Gebiet, das heißt Stromkreisquanten-Elektrodynamik.

Ja.

Circuit-Quantum-Elektrodynamics.

Ja, auf Englisch 4 Wörter, auf Deutsch 1.

Wo man einfach hergeht und sagt, na, Mikrowellen sind Strahlung und nach den Erkenntnissen von James Clerk Maxwell gehöre ich dem gleichen Gesetzen wie

dem Licht.

Aber alles bei niedrigeren Frequenzen.

Und im Prinzip lässt man sich da inspirieren von der Physik von Atomen in Lichtfeldern.

Nur das Atom, das holt man sich nicht aus der Natur, sondern das ist mein Qubit-Stromkreis, mein kleiner Stromkreis, der ähnliche Eigenschaften hat wie ein Atom.

Und der natürlich den einen Vorteil hat, ich kann den designen.

Ich kann dem die Eigenschaften geben, die ich ihm geben möchte.

Und das Zweite ist, das ist relativ groß.

Das koppelt auch ordentlich stark an Strahlung an.

Und dann muss ich die Strahlung dorthin bringen aus meinen Mikrowellensignalen.

Ich möchte das natürlich nicht bestrahlen.

Ich möchte das passgenau abliefern.

Das heißt, ich tue das Tonlicht in einem Wellenleiter.

Also Wellenleiter kennt man, den man kennt, ist das Glasfaserkabel, wo das Licht gezwungen wird, der Glasfaser entlang zu laufen.

In der Mikrowellenwelt ist der Wellenleiter, Fachausdruck ist ein Co-Planer Waveguide, kann man sich vorstellen, die über 30-Jährigen werden sich erinnern, Coaxialkabel, das ist das, womit man sein Fernseher in die Wand

gesteckt hat.

Und die diesen Mittelleiter haben, den man auch braucht.

Ich weiß, in meiner ersten Studentenwohnung wohnte ich im dritten Stock eines, im zweiten Obergeschoss eines Gebäudes mit drei Obergeschossen.

Und mein Vermieter hatte die Instantenkabel mit einer Lüsterklemme zusammengeflickt, was heißt, hieß nur, der im vierten Stock hatte noch ein Fernsehbild.

Das darf man also nicht machen, weil das ist eine Mikrowellenleitung.

Und auf dem Chip schneidet man die einfach horizontal durch.

Also anstatt den Mantel und den Leiter in der Mitte zu haben, hat man zwei Drähte außen, einen in der Mitte.

Aber letztlich leitet man das mit einem platten Coaxialkabel hin, also auf dem Chip und zum Chip tatsächlich mit einem Coaxialkabel.

Und um die Mikrowellen zu speichern und einzusperren, bei Licht bräuchte man da zwei extrem gute Spiegel, damit das Licht nicht rauskommt.

Hier macht man einfach einen kleinen Schnitt in einen der Leiter des Coaxialkabels, der wirkt als Spiegel.

Und man kann dann so den ganzen Baukasten der Optik auf den Chip und auf die Mikrowellen ersetzen.

Dazu braucht man natürlich Mikrowellen mit hoher Präzision.

Man braucht eine Mikrowellenquelle, die so gut ist wie ein Laser.

Das gibt es erfreulicherweise.

Das darf nur ganz geringe Verluste haben, weil die Störungen von der Quantenphysik, dazu gehören auch Mikrowellenverluste.

Man treibt da Materialien zu gewissen Extremen.

Man musste da mal zeitlang durchprobieren, was ist eigentlich der Chipträger, das Substrat, auf das ich das drauf machen kann.

Und wechsel da irgendwie von Aluminiumoxid über Saphir und jetzt ist man bei undotiertem Silizium.

Undotiert?

Also das heißt, Silizium wirkt nur in Computern, indem man da Störstellen einbringt und ohne Störstellen ist es eigentlich ein vernünftiger Isolator.

Und das musste man alles durchgehen.

Aber das ist die Rolle von Mikrowellen.

Das ist unser Gegenstück für das, was für die Kollegen aus der Atomphysik das Licht ist.

Und weil wir so große Atome haben, die können wir da ganz starke Kopplung bekommen.

Aber man muss eben diese Mikrowellen so bei niedrigen Radarfrequenzen dann auch entsprechend gut managen.

Und die Mikrowellenwellenlänge ist relativ gut.

Also wenn man beim Hören seine Suchmaschine der Wahl zur Hand hat, also

DuckDuckGo zum Beispiel oder Google, und eine Bildersuche nach Quantencomputer macht, dann die Hälfte der Bilder sieht aus wie ein richtig hängender Kronleuchter.

Und das Bild dieses Kronleuchters, das sagt einem eigentlich ein paar spannende Sachen.

Wenn Sie das bei Autofahren hören, bitte erst anhalten.

Das eine ist, man sieht diese horizontalen Platten, die entweder Kupfer oder Goldfarben aussehen.

Tatsächlich, da ist Kupfer drin.

Warum?

Kupfer ist ein klasse Wärmeleiter.

Die Kühlung sitzt in der Wand.

Das ganze Ding wird im Prinzip in eine Tonne reingetan, die gekühlt ist.

Und dadurch geht die Wärme sehr sehr schnell.

Kennt man von der Kupferpfanne.

Wenn man sich eine leisten kann und kein Induktionsherd hat, wird es gut an die Wand angekoppelt und damit wird die Wärme schnell abgeführt.

Die verschiedenen Platten sind, von oben nach unten wird es immer kälter, weil sie verschiedene Kühlflüssigkeiten haben.

Vergoldet ist es, oder vermessigt ist es, weil auch die Wärmestrahlung aus der Umgebung das Ding ausheizt.

Das heißt, man möchte was haben, was gut reflektiert.

Beim Auto nimmt man da weiß, weil ein goldenblinkendes Auto nicht lange golden blinkt und auch irgendwie komisch aussieht.

Aber reflektierend ist noch ein bisschen besser als weiß.

Dann sieht man eine Unmenge an Leitungen.

Das sind Koaxialkabel, die man einzeln führen muss, weil die alle Filter haben.

Das ist ein ganzer Lametta-Aufbau von Leitungen.

Dann sieht man eine ganze Menge von Bauelementen.

Ganz unten dran hängt der Chip.

Man sieht eine ganze Menge von anderen Bauelementen.

Das ist so die Peripherie, die die Mikrowellen an den richtigen Ort schickt.

Die ist relativ groß.

Eine der großen Herausforderungen für unsere ingenieurwissenschaftlichen Kollegen und Kolleginnen ist es, die Dinge kleiner zu machen.

Die Herausforderung gab es in der Mikrowellentechnik noch nicht, weil die nicht so klein sein mussten und weil man auch nicht so viele brauchte.

Aber das ist so ein Beispiel, dass man diese Mikrowellensignale managt, ohne auf diese großen Elemente zurückgreifen zu müssen, wo wir tatsächlich auch die Mikrowellentechnik wirklich herausfordern mit dem, was wir tun.

Wir hatten es eben schon mal kurz.

Denken Sie, das wird irgendwann ein Kasten sein, der in der Ecke steht und vor sich hin brummt?

Oder wird das immer tendenziell auf so einem Laborniveau bleiben, wie es jetzt gerade ist?

Ich bin sehr optimistisch, dass wir dazwischen landen.

Wir sind schon bei den nicht-universellen Quantencomputern so weit, dass die in Rechenzentren gut laufen können.

Und die Leute, die das betreuen, sind weitergebildete Technikerinnen und Techniker.

Also Leute, die nicht einschlägig Fachwissen studiert haben, die aber weitergebildet sind, wie man mit den besonderen Herausforderungen dieser speziellen Maschine umzugehen hat und die einmal im Jahr den Hersteller-Service kommen lassen.

Und ich denke, auch bei universellen Quantencomputern werden wir an den Punkt kommen.

Man muss eben die Warnsignale der Kältetechnik und der Ansteuerungstechnik zu lesen wissen.

Man kann viel Ferndiagnose machen.

Und tatsächlich, auch moderne Supercomputingzentren müssen sehr, sehr stark gekühlt werden.

Tatsächlich, der Energieaufwand der Kühlung ist dort viel höher, weil wir müssen nur einmal runterkühlen.

Und wenn es einmal kalt ist, entsteht keine weitere Wärme.

Während klassische Supercomputer ständig Wärme produzieren und der jüliche Supercomputer, der jetzt gerade gebaut wird, wird auch eine großartige Fernwärmequelle sein.

Das wird immerhin weiter genutzt.

Und ich denke, auf das Niveau, dass man auch runter von den Höchstleistungsrechenzentren zu normalen Rechenzentren gibt, mit einer sozusagen relativ wartungsarmen Systembetreuung, ich denke, das ist relativ realistisch.

Die Kältemaschinen, die kaufen wir fast von der Stange.

Also diese Kältetechnik, die wir benutzen, die ist etabliert, die ist wartungsarm, die behält auch ihre Rohstoffe, die hat keine Verbrauchsmaterialien.

Wir haben in unserem Projekt, in Open SuperQ, einen Kältemaschinenhersteller mit dabei, der die Sachen nach unseren Vorgaben weiterentwickelt und einen Teil der Entwicklungskostenrechnung eben an die Europäische Union schickt.

Weil diese Aufbauten mit diesen vielen Kabeln, die sind zum Beispiel kaum wartbar.

Und eine Sache, die die gemacht haben, ist, mal vernünftige, modulare Kabelbäume zu bauen.

So dass ich das Ding von der Seite aufmache, mal zehn Kabelbaum mit zehn Kabeln rausnehme, nähen, warte und nicht das ganze Ding auseinanderbauen und auftauchen muss.

Aber ansonsten ist das, denke ich, Technik, die sich robust machen lassen kann

auf dem Rechenzentrumsniveau.

Und im Augenblick ist das unser einziges Ziel.

Der Supercomputer, der in Jülich im Bau sich befindet, ist das der letzte Supercomputer, der da hingebaut wird, weil Sie irgendwann die Supercomputer dieser Welt ersetzen werden, mit Ihren Rechnern?

[Siebert] Keinesfalls.

Es gibt eine Reihe von High-Performance-Computing-Anwendungen, wo wir noch keine Idee haben, ob die Quanten beschleunigt werden können.

Und teilweise Hinweise darauf haben, dass das vermutlich Nicht-Quanten überhaupt nicht besonders stark Quanten beschleunigt werden kann.

Oder wo der Break-Even-Point, wo der Quantencomputer überholt, sehr, sehr weit draußen ist.

Also letzteres würde nur heißen, das ist nicht der letzte Supercomputer, aber es hört irgendwann auf.

Aber wahrscheinlich wird es immer Aufgaben geben, wo die Quantenbeschleunigung nichts bringt, wo dieses extreme Parallelisieren nichts bringt, oder wo ich die Informationen am Ende nicht wieder auf einen Pfad zusammenführen kann.

Insofern denke ich, Quantencomputing wird ein sehr wichtiger Beschleuniger sein, ähnlich auch wie das Neuromorphic-Computing, also das Hirn-nachahmende Computing.

Und es wird sich dort hoffentlich fest etablieren, aber es wird nicht der letzte sein.

Frank Wilhelm Mauch, vielen Dank.

Ich herzlich danken, hat mir Spaß gemacht.

[Musik] [Ende]