

# Quanten- vorsprung

TEXT: NIKLAS WIRMINGHAUS      FOTOS: JUUSO WESTERLUND

Quantencomputer gelten als Wunderrechner der Zukunft. Hier könnte Europa gelingen, was bisher misslang: der Aufbau globaler Techkonzerne

Schwere Stahltüren versperren die fensterlosen Räume eines Bürohauses westlich von Helsinki. Die Wände sind blechverkleidet, das Labor düster, ein durchdringendes Surren ist zu hören. An vier mächtigen Pfeilern hängt in der Raummitte eine Art Tonne, groß wie ein Ölfass. Nach unten ist sie offen, dort baumeln vergoldete Kupferteile und Kabelgewirr.

Das also ist ein Quantencomputer. Oder jedenfalls ein Teil davon – eine entscheidende Zutat fehlt, die hält Jan Goetz in den Händen, promovierter Quantenphysiker aus München und CEO des deutsch-finischen Start-ups IQM: eine handtellergroße Halterung mit einem Chip in der Mitte, ein Quadratzentimeter klein. Es ist der Prozessor, das eigentliche Herzstück des Rechners. Stöpselt man ihn an die Kabel unterhalb der Tonne, kann der Chip beispiellose Rechenpower entfalten. Er ist allerdings auch sehr sensibel, weswegen der Rest der komplexen Apparatur allein dazu dient, ihn von der Außenwelt abzuschirmen – unter anderem indem die Umgebungstemperatur auf exakt minus 273,14 Grad Celsius gekühlt wird.

Die Idee, mithilfe der eigen-  
tümlichen Gesetze der Quanten-

physik neuartige Computer zu bauen, ist ein paar Jahrzehnte alt. Die praktische Umsetzung aber kam lange nicht vom Fleck, erst seit einigen Jahren gibt es wichtige Fortschritte. Auch wenn der kommerzielle Einsatz noch Jahre entfernt liegt, wecken die Maschinen große Hoffnun-

gen: auf Milliardeneinsparungen in Logistik und Finanzwesen, die Entdeckung neuer Medikamente, die Entwicklung ungleich leistungsfähigerer Batterien. In zwei Jahrzehnten könnten so 450 bis 850 Mrd. Dollar an zusätzlicher Wertschöpfung entstehen, prognostiziert BCG. Forscher, Unternehmen und Regierungen auf der ganzen Welt versuchen deshalb, sich für diese nächste Technologierevolution in Stellung zu bringen. Erst vor wenigen Wochen beschloss etwa die Bundesregierung, 2 Mrd. Euro aus dem Corona-Konjunkturpaket für Quantentechnologien auszugeben.

*Linke Seite: Innenleben des IQM-Quantencomputers in Helsinki.  
Unten: das Herzstück, der Chip*



## DER ZUG IST NICHT ABGEFAHREN

Gerade für Europa bietet sich hier eine Chance. Nachdem in der Computerindustrie und Digitalwirtschaft die Marktmacht im Wesentlichen an die USA und China verloren wurde, werden in der Quantenindustrie die Karten noch einmal neu gemischt. Noch haben die USA einen Vorsprung, aber Europa ist gut aufgestellt: Entscheidende wissenschaftliche Durchbrüche wurden hier erzielt, Institute in Deutschland, den →

Niederlande, Dänemark und Finnland betreiben Spitzenforschung. Offen ist, ob es endlich auch einmal gelingt, auf dieser Grundlage starke europäische Tech-Player zu formen. Die Voraussetzungen sind da – das lässt sich in Helsinki beobachten.

Jan Goetz, ein hagerer, zurückhaltender Typ mit jungenhaftem Gesicht, sagt: „Das Potenzial ist da, dass aus IQM ein richtig großer Technologiekonzern wird.“ Der CEO sitzt nun in einem verglasten Konferenzraum mit Blick übers Wasser, sein Start-up hat zusätzlich zum Bunkerlabor eine Etage in einem benachbarten Büroturm gemietet. Insgesamt 60 Mitarbeiter arbeiten für IQM in Finnland und am zweiten Standort in München, obwohl die Firma erst zwei Jahre alt ist.

IQM entwickelt und baut Quantencomputer. Verkauft hat das Unternehmen noch kein Gerät, doch es ist im Rennen um einen 20-Mio.-Euro-Auftrag einer finnischen Forschungsorganisation. Wie die Maschinen einmal aussehen sollen, veranschaulicht bisher nur ein verkleinertes Modell aus dem 3D-Drucker. Trotzdem sind von Investoren und aus einem EU-Programm über 30 Mio. Euro Risikokapital in das Start-up geflossen. Das ist bemerkenswert, denn es zeigt, dass sich Geldgeber in Europa endlich mehr trauen, auch bei risikoreichen, komplizierten Technologien. Das Potenzial von Quantencomputing ist riesig; das Risiko, dass es teure Fehlschläge geben wird, ebenfalls.

Zumal derzeit noch eher die Amerikaner die Nase vorn haben: Die Tech-Unternehmen IBM und Google, der Mischkonzern Honeywell und das Start-up Rigetti aus dem Silicon Valley gelten als technologisch führend. Ein Google-Team ließ im Herbst 2019 einen Quantencomputer in drei Minuten und 20 Sekunden eine Berechnung durchführen, für die ein herkömmlicher Supercomputer 10 000 Jahre gebraucht hätte. Die Maschine mit ihren 53 Qubits – so heißen die Quantenrecheneinheiten

analog zu klassischen Bits – beweise die Überlegenheit der neuen Technologie, hieß es bei Google. Der IQM-Computer in Helsinki hat erst fünf Qubits, doch CEO Goetz schreckt der Abstand nicht. „Wir wollen Firmen wie Google und IBM Paroli bieten. Im Moment sind die weiter, aber der Zug ist nicht abgefahren.“ Bis zur Kommerzialisierung sind noch viele Probleme zu meistern – wer da die besten Lösungen findet, kann schnell an die Spitze rücken.

Im subatomaren Bereich, das ist seit gut einem Jahrhundert bekannt, gelten die Gesetze der klassischen Physik nicht. Stattdessen ist höchst Bizarres möglich: Ein Teilchen kann im selben Moment zwei gegensätzliche Eigenschaften haben; zwei Teilchen können so miteinander verbunden sein, dass sich Änderungen am einen Objekt sofort auf das andere auswirken, obwohl sie nicht am selben Ort sind.

Beide Phänomene macht sich der Quantencomputer zunutze. Während Bits beim klassischen Computer nur die Werte 0 oder 1 annehmen können, ist es Qubits möglich,

beide gleichzeitig zu repräsentieren. Das bedeutet, dass sich die Summe möglicher Zustände – der Zahlenraum – mit jedem zugeschalteten Qubit verdoppelt. Schon 30 Qubits können mit einer Milliarde Zahlen auf einmal rechnen, bei 300 Qubits ist die Summe größer als die Zahl der Atome im sichtbaren Universum. Selbst wer die Physik dahinter nicht ganz versteht, sieht ein, dass ein solcher Rechenraum ungleich größer ist als das, was selbst die besten Supercomputer mit ihrer Beschränkung auf die Abfolge von Nullen und Einsen leisten können.

Ohne klassische Computer funktionieren aber auch die Quantensysteme nicht: Sie formulieren die Algorithmen, die zum Berechnen in die Quantencomputer gespeist werden, und lesen anschließend die Ergebnisse aus. Goetz nennt seine Maschinen daher lieber „Quantenbeschleuniger“, die auf die Begleitung klassischer Rechner angewiesen bleiben.

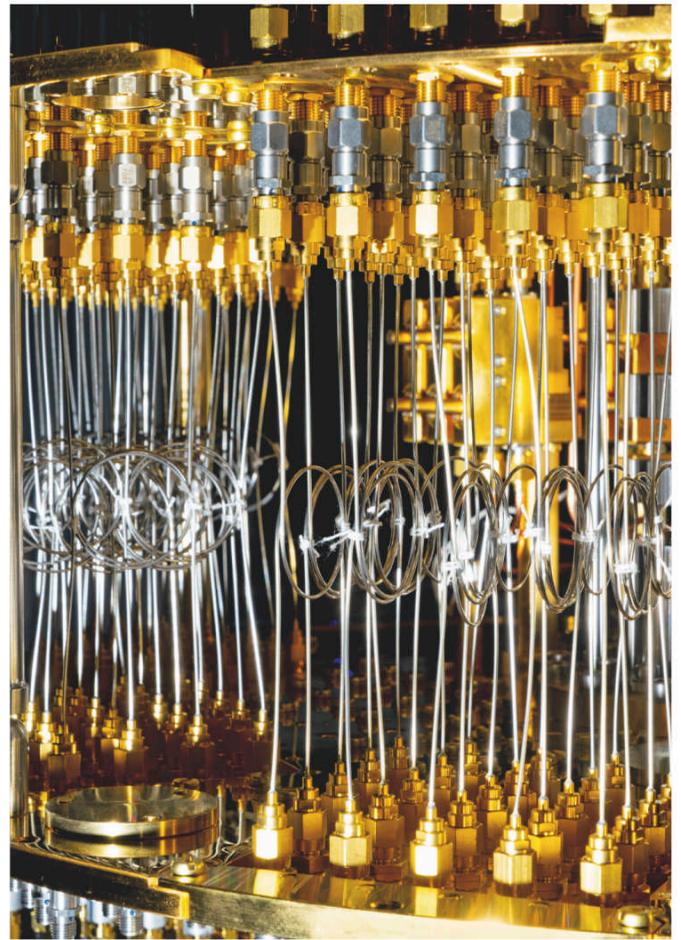
#### MÜHSAME FEHLERKORREKTUR

Es ist ein mühsames Verfahren. Die supraleitenden Qubits sind so fragil, dass sie selbst im Vakuum und bei Tiefsttemperaturen nur für Sekundenbruchteile im rechenfähigen Zustand bleiben. Messungen müssen daher häufig wiederholt werden, und die Ergebnisse sind fehleranfällig, weshalb ein Großteil der Qubits im Quantencomputer nur dazu da ist, die Fehler anderer Qubits auszugleichen. Der Aufwand für die Fehlerkorrektur ist bisher die größte Entwicklungshürde: Noch verhindert er die Skalierung der Qubit-Zahl auf ein Niveau, bei dem es wirklich interessant würde.

Denn erst mit Tausenden, vielleicht sogar erst Millionen von Qubits stünde ein universeller Quantencomputer für all die Anwendungen bereit, auf die man heute hofft – zum Beispiel die Simulation von Atomen und Molekülen, von der Pharma- und Werkstoffforschung profitie-

*Für Physik-Laien schwer zu entwirren: Kabelgewirr im Quantenlabor*





ren können, oder die Lösung logistischer Probleme wie die Berechnung von Verkehrssystemen und effizienten Routen. Der dritte große Anwendungsbereich ist ein zweischneidiges Schwert: Quantencomputer werden wahrscheinlich in der Lage sein, unsere heutigen Verschlüsselungssysteme zu knacken. Aber sie werden auch neue, noch sicherere Systeme entwickeln können. Was dagegen vermutlich nicht passieren wird: Wir werden wohl keine Quantencomputer auf dem Schreibtisch stehen haben. Ihr Einsatzort wird nach heutigem Kenntnisstand in Wissenschaft und Wirtschaft sein, begrenzt auf bestimmte Aufgabenbereiche.

Das Problem, dass mit der Zahl der Qubits auch die Fehler zunehmen, trifft natürlich auch IQM. Doch Goetz glaubt, einen Ausweg gefunden zu haben. „Man kann versuchen, blind die Hardware hoch-

*Links: IQM-Chef Jan Goetz und sein Quantencomputer als Modell aus dem 3D-Drucker*

*Rechts: Supraleitende Kupferkabel führen zum Quantenprozessor*

zuskalieren und den anderen hinterherzulaufen“, sagt er. „Oder man entwickelt Prozessoren, die genau auf eine Anwendung abgestimmt sind und keine Fehlerkorrektur mehr beinhalten. Das ist unser Ansatz, um möglichst schnell auf den Markt zu kommen.“

Das bedeutet, auf den Traum vom universellen Quantencomputer zunächst zu verzichten – und stattdessen auf Anwendungsnischen zu setzen. In maximal fünf Jahren will IQM bereit sein, Kunden für konkrete Problemfälle die passenden Ma-

schinen zu liefern – und so an IBM und Google vorbeiziehen.

Dass Geldgeber bereit waren, Millionen in seine Firma zu stecken, darüber staunt Mikko Möttönen immer noch. Der bullige Finne ist einer von Goetz' Mitgründern, er hat einen Lehrstuhl an der benachbarten Aalto University und ist Chefwissenschaftler von IQM. Als Quantenforscher ist er eine Koryphäe, mit 24 Jahren war er schon promoviert; der Alltag hingegen ist nicht so seine Sache. Ratlos steht er vor seiner verschlossenen Labortür, weil sein Schlüssel nicht mehr funktioniert. Und als er im Restaurant die Rechnung fürs Mittagessen bezahlen will, fällt ihm seine Geheimzahl nicht ein.

Bei Pizza mit Extrakäse und Pepperoni spricht Möttönen über die Entstehung von IQM. An Quantencomputern werkelt er schon seit Jahren, als er kurz vor Weihnachten 2017 →

# Komplexer Kühltank

Im Quantencomputer wird die Temperatur Etage für Etage bis fast auf den absoluten Nullpunkt gesenkt – erst dann kann der Chip seine Arbeit tun

## BITS UND QUBITS

Im Qubit können sich zwei Zustände überlagern – Bits können nur 0 oder 1



Quelle: „Nature“

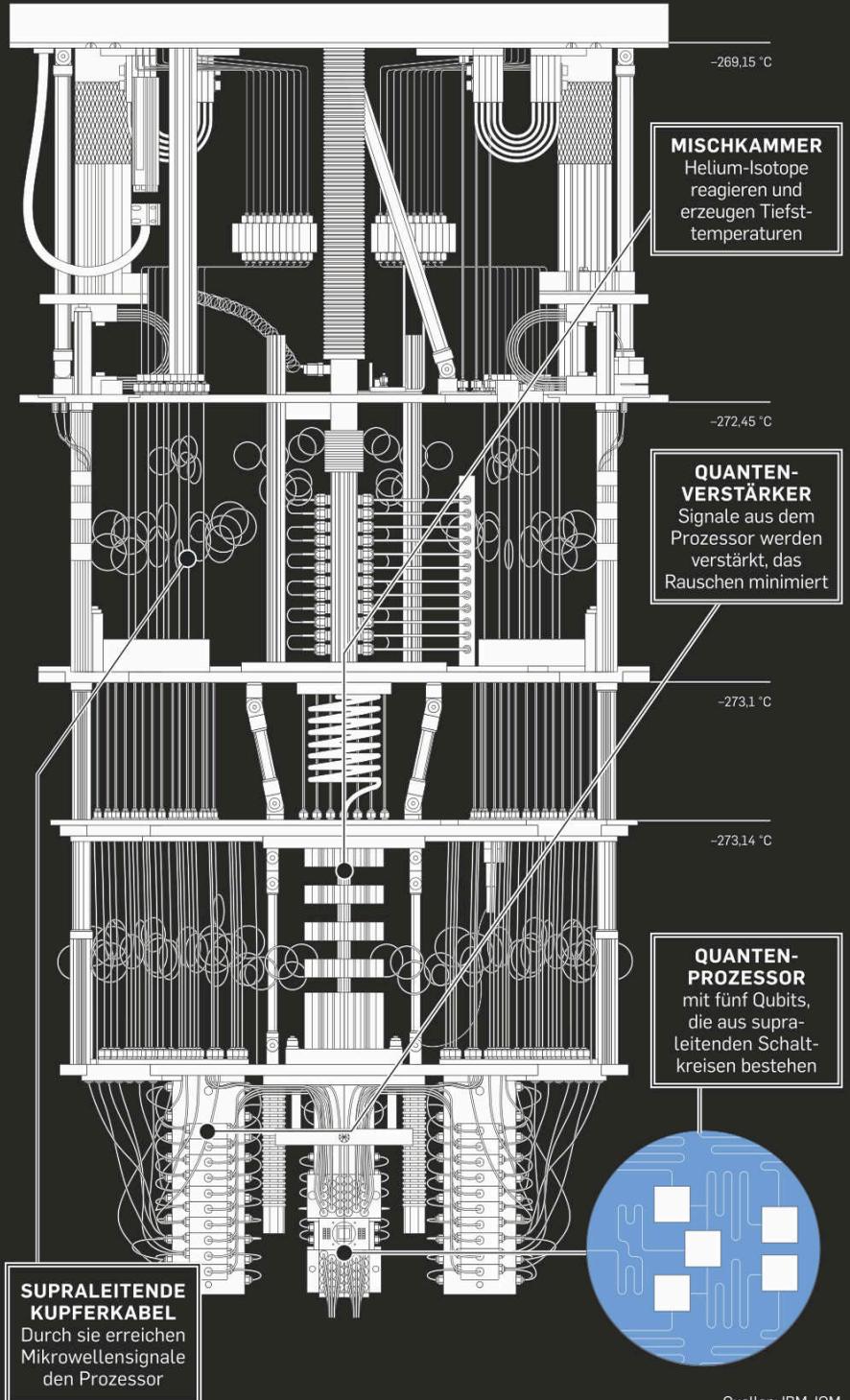
## STAATSMILLIARDEN FÜR QUANTENCOMPUTER

Investmentprogramme für Quantentechnologien, in Mrd. Dollar

		Israel <b>0,4</b>	Australien <b>0,13</b>	Korea <b>0,03</b>	Niederlande <b>0,15</b>	Japan <b>0,3</b>
EU	<b>1,2</b>	Russland <b>0,8</b>				
		Indien <b>0,9</b>				
USA	<b>1,3</b>	Kanada <b>0,9</b>				
Frankreich	<b>1,7</b>	UK <b>1,3</b>				
Deutschland	<b>2,7</b>					
China	<b>10</b>					

**GESAMT: 22**

Quelle: Qureca; Stand: August 2020



Quellen: IBM, IQM

eine E-Mail bekam, die wie eine Initi-  
 alzündung wirkte. Ein ehemaliger No-  
 kia-Aufsichtsrat schrieb ihm, er wür-  
 de gern Möttörens Labor besichtigen.  
 Wenn sich solche Leute für die Tech-  
 nologie interessieren, dachte der For-  
 scher, dann sind wir hier etwas Gro-  
 ßem auf der Spur. Er beriet sich mit  
 Freunden und Geldgebern – und  
 gründete im Februar 2018 eine Fir-  
 ma zum Bau von Quantencomputern.  
 „Ich sagte mir: ‚Lass es uns versu-  
 chen.‘“ Wenig später machte er Goetz,  
 der als Postdoc an der Aalto Universi-  
 ty arbeitete, zum CEO – weil der immer  
 „alles so schnell erledigt“ bekomme.  
 Möttören dagegen blieb an der  
 Uni und beschränkt sich bei IQM auf  
 eine beratende Tätigkeit. Es sei trotz-  
 dem „sicherlich die aufregendste Auf-  
 gabe meiner Karriere“, sagt er. „Natür-  
 lich ist das Ganze ein Risiko – wenn es  
 das nicht wäre, hätte es schon jemand  
 gemacht.“

#### ACHT JAHRE ABSTAND

Noch immer passiert es in Europa zu  
 selten, dass aus Top-Wissenschaft  
 Top-Unternehmen hervorgehen.  
 „Das Umschalten auf angewandte  
 Forschung ist in den USA 2010 pasi-  
 siert und in Europa leider erst 2018“,  
 sagt Frank Wilhelm-Mauch, Phys-  
 ikprofessor an der Universität des  
 Saarlands und dem Forschungszen-  
 trum Jülich, ein Kenner der Szene.  
 Trotzdem ist er überzeugt, dass Eu-  
 ropa weiter oben mitspielen kann.  
 „Das ist ein Marathon, den können Sie  
 auch in der zweiten Hälfte gewinnen.“  
 Mut machen Wilhelm-Mauch zum ei-  
 nen Start-ups wie IQM oder auch AQT  
 aus Innsbruck, ebenfalls eine akade-  
 mische Ausgründung. Zum anderen  
 glaubt er an die Stärke der europä-  
 ischen Forschung. „Für den nächsten  
 Schritt braucht es das Engagement  
 der Wissenschaft. Dafür ist Ausdauer  
 nötig, das leisten Firmen nicht allein.“

Selbst die großen Techno-  
 logiekonzerne arbeiten daher mit  
 Partnern aus der Forschung, häu-  
 fig mit europäischen Instituten. So  
 kooperiert Intel seit 2015 mit der

Technischen Universität Delft und  
 Microsoft seit 2018 mit der Uni Ko-  
 penhagen. Google kaufte für seine  
 Quanteninitiative eine ganze For-  
 schergruppe der kalifornischen Uni-  
 versität Santa Barbara auf, die im  
 Konzern nun von einem Deutschen  
 geleitet wird, dem Aachener Infor-  
 matiker Hartmut Neven.

Dass Deutschland 2 Mrd. Euro  
 aus dem Konjunkturpaket in Quant-  
 enttechnologien stecken will, hat die  
 Szene regelrecht euphorisiert. Nur in  
 China verteilt der Staat höhere För-  
 dersummen. Noch stimmen die Mi-  
 nisterien ab, wie und wohin genau  
 das Geld fließen wird. Klar ist, dass  
 es nicht allein um die Förderung von  
 Forschung und Wirtschaft geht, son-  
 dern auch um geopolitisches Kalkül.  
 „Das ist eine sicherheitsrelevante  
 Technologie“, sagt Wilhelm-Mauch.  
 „Ich weiß nicht, ob man sich da in  
 Zukunft auf die USA verlassen kann.“

Auch IQM-Gründer Goetz plä-  
 diert für eine europäische Quanten-  
 industrie – sonst bestehe das Risi-  
 ko, dass den hiesigen Unternehmen  
 „entweder der Zugang komplett ab-  
 geschnitten wird oder man nur tech-

*Mikko Möttönen, Professor an  
 der Aalto University und Mitgründer  
 von IQM, in seinem Labor*

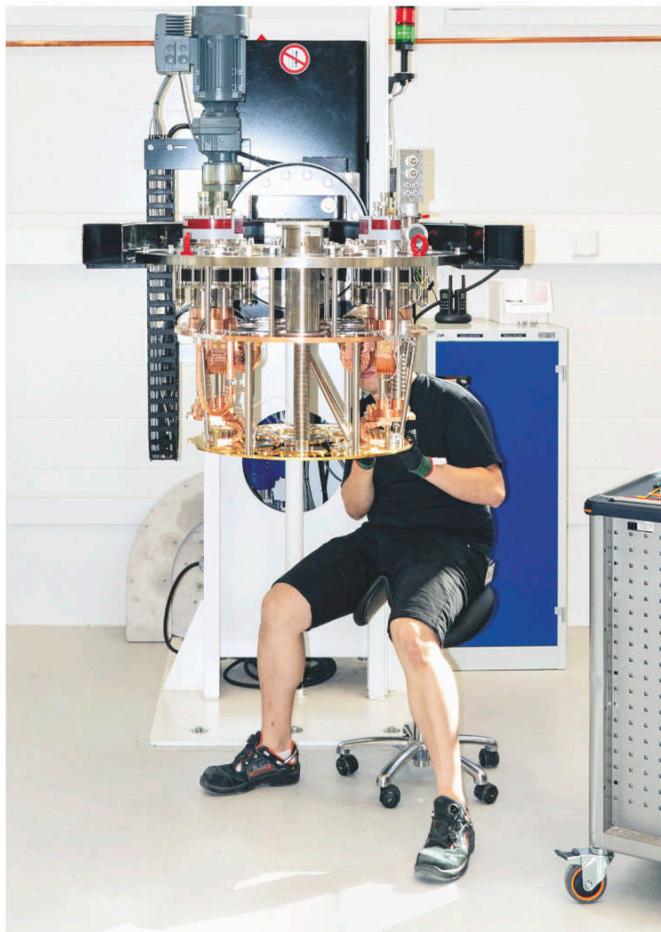


nisch minderwertige Produkte be-  
 kommt“. In der Szene gibt es etwa  
 Befürchtungen, ein wichtiges Bau-  
 teil für das Auslesen der Qubits nicht  
 mehr aus den USA beziehen zu kön-  
 nen. Goetz' Wunsch wäre daher, „die  
 ganze Wertschöpfungskette in Eu-  
 ropa zu haben“. Bei vielen Kompo-  
 nenten funktioniert das schon, die  
 Chips werden etwa im Reinraum der  
 Aalto University hergestellt.

Die mächtige Kühlapparatur,  
 die den Chip umschließt, ist eben-  
 falls ein europäisches Produkt – ge-  
 nauer eine holländisch-finnische  
 Co-Produktion. Bluefors heißt der  
 Hersteller, man findet ihn in einem  
 unglamourösen Gewerbegebiet im  
 Norden Helsinkis, wo er zwei Bauten  
 von einer darbenenden Spritzgießerei  
 übernommen hat.

Die Werkhalle, in der früher  
 Plastikparschweine vom Band lie-  
 fen, hat Bluefors komplett umge-  
 baut. Im Erdgeschoss gibt es nun  
 zwei lichtdurchflutete Produktions-  
 straßen, wo die Verdünnungskryo-  
 state zusammengebaut werden – so  
 heißen die Superkühlschränke rich-  
 tig. Durch die Anlage führt Chief  
 Sales Officer David Gunnarsson, ein  
 Schwede mit fusseligem Bart und  
 mittellangen Haaren, selbst promo-  
 vierter Physiker und seit fünf Jahren  
 im Unternehmen.

Für einen Verkäufer tritt Gun-  
 narsson bescheiden auf, aber bei  
 Bluefors haben sie auch nie von der  
 Welteroberung geträumt. Vor zwölf  
 Jahren gründeten die beiden Nie-  
 derländer Rob Blaauwgeers und Pie-  
 ter Vorselman das Unternehmen als  
 Spin-off eines technischen Instituts  
 in Helsinki. Blaauwgeers hatte dort  
 an der Verbesserung von Kryosta-  
 ten gearbeitet, die damals umständ-  
 lich zu handhaben waren: Bis zu ei-  
 nen Monat dauerte es, bis ein Gerät  
 auf die gewünschte Temperatur he-  
 runtergekühlt war, dazu musste  
 ständig teures Helium nachgefüllt  
 werden. Blaauwgeers entwickelte  
 das Gerät so weiter, dass der Kühl-  
 vorgang in 24 Stunden zu schaffen  
 war – und die Labortechniker →



in der Zwischenzeit nach Hause gehen konnten.

Es war ein kräftiger Innovationsprung, doch der Markt schien begrenzt: Forschungsabteilungen und Unis interessierten sich dafür, die Gründer hofften, eines Tages vielleicht zehn oder 20 Kryostate im Jahr zu verkaufen. „Die ersten Jahre waren hart“, sagt Gunnarsson. Doch um 2012 herum zog die Nachfrage an: Supraleitende Schaltkreise setzten sich als wichtigste Quantencomputertechnologie durch, ein regelrechter Boom entstand. Für jedes neue Gerät brauchte es einen Kryostaten – und Bluefors als Markt- und Technologieführer war auf einmal so etwas wie der Lieferant von Schaufeln für den Quantengoldrausch.

In den vergangenen fünf Jahren wuchs das Geschäft um je 20 bis 30 Prozent, heute baut die Firma zwischen 150 und 200 Kryostate pro

*Links: David Gunnarsson von Bluefors posiert in der Werkhalle des Kühlgerätespezialisten*

*Rechts: Ein Bluefors-Mitarbeiter schraubt einen Verdünnungskryostat zusammen*

Jahr, Kostenpunkt je um eine halbe Million Euro. Inzwischen liefert Bluefors nicht mehr nur die Kühlarchitektur, sondern auch das Equipment, mit dem die Chips programmiert und ausgelesen werden. 2019 wurden damit 60 Mio. Euro umgesetzt. „Wenn die Firma so weiterwächst, müssen wir uns in drei oder vier Jahren wieder ein neues Werk suchen“, seufzt der Chefverkäufer.

Gunnarsson weiß, dass der Boom kein Naturgesetz ist. „Gerade erleben wir einen Rausch.“ Man werde sehen müssen, wie weit der Boom

trage. In der Szene gibt es die Furcht vor einem „Quantenwinter“: dass zu hohe Erwartungen geweckt werden, die weder kurz- noch mittelfristig zu erfüllen sind, dass in der Folge Budgets gekürzt werden und Player verschwinden. Das Risiko bestehe, sagt Frank Wilhelm-Mauch. „Die Community ist groß, und es gibt Akteure, die akzeptieren, nur kurzfristig dabei zu sein.“ Aber er sei „optimistisch, dass wir mit Dämpfern gut umgehen können“ – man habe „den Hype-Cycle noch gut im Griff“.

Wie die Zukunftstechnologie wissenschaftliche Rückschläge, geopolitische Störfeuer und konjunkturelle Schwankungen verdaut, wird die Zukunft zeigen. Aber man braucht keine Qubits, um sich auszurechnen, dass Europas wichtigste Chance auf eine Kräfteverschiebung in der Digitalwirtschaft derzeit die Quantentechnologie ist. ◇