Navorsings- en oorsigartikels

Die voorgeskiedenis van kwantumberekening

P.H. Potgieter*
Departement Kwantitatiewe Bestuur, Unisa, Posbus 392, Unisarand 0003
E-pos: potgiph@unisa.ac.za

UITTREKSEL

Die hoofidees wat tans gestalte vind in die teorie en tegnologie van kwantumberekening is in die laat 1970's en vroeg 1980's deur fisici in die Weste en 'n wiskundige in die voormalige Sowjetunie neergelê. Dat dié teorie ook wortels in die Russiestalige vakliteratuur het, is nie algemeen bekend in die Weste nie. Daar word kortliks gekyk na die idee soos deur Benioff en (veral) Feynman in die Weste versprei, asook die voorstel van dié rekengrondslag deur Manin in die Russiese literatuur. Die outeur hoop om hiermee so 'n onpartydig moontlike sintese van die vroeë gedagtegeskiedenis rondom kwantumberekening aan te bied. Die rol van omkeerbare en onomkeerbare berekeningsprosesse word vlugtig bekyk soos dit verband hou met die ontstaan van kwantumberekening, asook die sogenaamde Inligtingsparadoks in die fisika. Die inligtingsteorie en die fisika het heelwat met mekaar te kommunikeer, soos hierdie paradoks uitwys.

ABSTRACT

The pre-history of quantum computation

The main ideas behind developments in the theory and technology of quantum computation were formulated in the late 1970s and early 1980s by two physicists in the West and a mathematician in the former Soviet Union. It is not generally known in the West that the subject has roots in the Russian technical literature. The idea, as propagated by Benioff and (especially) Feynman, is reviewed along with the proposition of a foundation for this kind of computation by Manin in the Russian literature. The author hopes to present as impartial a synthesis as possible of the early history of thought on this subject. The role of reversible and irreversible computational processes will be examined briefly as it relates to the origins of quantum computing and the so-called Information Paradox in physics. Information theory and physics, as this paradox shows, have much to communicate to each other.

1 INLEIDING

Kwantumberekening is 'n betreklik nuwe dissipline wat baie belofte inhou vir 'n vinnige en doeltreffende — in terme van ruimte én energie — toevoeging tot ons arsenaal van rekenapparatuur. Daar is in die laaste tien jaar algoritmes ontwikkel vir priemfaktorisering in polinoomtyd deur Peter Shor by Bell Labs (1994) en vir 'n soektog deur 'n ongeordende lys deur Lev Grover — ook van Bell Labs — in 1996 [10]. 'n Goeie oorsig oor die stand van kwantumalgoritmes is Peter Shor se aantekeninge [25]. Die tegnologie van kwantumrekenmasjiene is in sy kinderskoene, met min praktiese suksesse soos byvoorbeeld die priemfaktorisering in 2001 deur IBM van die getal 15 met behulp van 'n kwantumrekenaar. Fisici verwag egter dat daar oor die volgende paar jaar duidelike vordering sal wees en ondersoekspanne in onder andere die VSA, Duitsland, Japan en Australië werk aan 'n aantal verskillende benaderings om dié toestelle te realiseer. Weens die hoë nut van 'n vinnige, praktiese priemfaktoriseringsalgoritme om die openbare sleutelkriptografie, soos algemeen gebruik word deur banke en deur individue, te breek, behoort in gedagte gehou te word dat vordering op hierdie gebied nie noodwendig sonder geheimhouding sal gebeur nie. In hierdie bydrae sal gekyk word na die idees wat gelei het tot die formulering van 'n model vir kwantumberekening, veral na die afsonderlike en feitlik gelyktydige verskyning van dié idees in die VSA en in die Sowjetunie.

2 FORMELE BEGRIPPE VAN BEREKENBAARHEID

Die sterk behoefte om 'n formele definisie van *algoritme* of *berekening* te gee, het aan die wetenskaplike gemeenskap aan die begin van die twintigste eeu duidelik geword hoofsaaklik as gevolg van twee probleme wat deur Hilbert gestel is:

- die *Entscheidungsproblem* of Beslissingsprobleem: Bestaan daar 'n algoritme só dat dit, gegee 'n willekeurige stelling in eerste-orde-logika (byvoorbeeld Peano-rekenkunde), kan bepaal of dié stelling waar is in alle modelle van 'n teorie, al dan nie? en
- Hilbert se Tiende Probleem: Bestaan daar 'n algoritme wat, gegee 'n Diofantiese vergelyking, kan bepaal of die vergelyking enige heeltallige oplossings het, al dan nie?

Die Beslissingsprobleem kan teruggevoer word na Leibniz en is onafhanklik suksesvol opgelos in die middel 1930's deur Alonzo Church en Alan Turing. Church het enige funksie wat deur sy Lambda-rekene gedefinieer kon word as *algoritme* gedefinieer. Turing het eers die begrip *algoritme* as identies met *rekursiewe funksie* geneem en later as funksie wat bereken word deur 'n sogenaamde Turing-masjien[1] — 'n geïdealiseerde toestel wat vandag nog voorgraadse studente laat kopkrap. Dit is later aangetoon dat die klasse van die rekursiewe funksie, funksies van die Lambda-rekene en die Turing-masjienberekenbare funksies een en dieselfde is. Hierdie — toe ietwat verbasende — gelykstelling

*Die outeur wil die stigting Pro Renovanda Cultura Hungariae Alapítvány vir sy ondersteuning en die Departement Wiskunde van die Boedapestse Universiteit vir Ekonomiese Wetenskappe en Publieke Administrasie vir sy ondersteuning en gasvryheid bedank wat 'n besoek aan laasgenoemde, waartydens 'n groot deel van die inligting hier vervat ingewin is, in die laaste deel van 2003 moontlik gemaak het.

[1] Die nuuskierige leser sal nabootsers vir Turing-masjiene op die Internet vind, o.a. op http://www.nmia.com/~soki/turing/.

van drie definisies met heel verskillende herkoms het die gedagte dat dít 'n toereikende definisie van berekenbaarheid is, sterk ondersteun. Die Beslissingsprobleem word dan ook, in die lig van die bevredigende definisie van 'n algoritme, as opgelos beskou.

3 OMKEERBARE EN ONOMKEERBARE BEREKENING

Aanvanklik is berekening as 'n essensieel onomkeerbare proses (minstens in die praktyk) beskou. 'n Berekening word *omkeerbaar* genoem indien daar 'n een-tot-een-verwantskap tussen die versameling van alle moontlike uitvoere en dié van alle moontlike invoere van die proses bestaan. Dit impliseer dat die invoer van 'n omkeerbare rekenproses altyd uit die uitvoer herwin kan word. Rekenprosesse in die alledaagse lewe is nie omkeerbaar nie. Ons voer byvoorbeeld 'n heelgetal in en ontvang as uitvoer **1** indien die invoer 'n priemgetal is en **0** andersins — die invoer kan beslis hier nie uit die uitvoer bereken word nie. Eintlik is wat hier beskryf word *logiese* omkeerbaarheid, in teenstelling met *fisiese* omkeerbaarheid wat gekarakteriseer word daardeur dat die entropie nie toeneem nie. Rolf Landauer het egter in 1960 al tot die gevolgtrekking gekom dat elke logies omkeerbare berekening ook in beginsel fisies omkeerbaar verwerklik kan word, dit wil sê sonder 'n toename in entropie [17]. Landauer het die minimale toename in entropie wat volg uit die vernietiging van een bis se inligting geïdentifiseer [18]. Die toename in entropie is minstens $(\ln 2)k$ waar k Boltzmann se konstante is: $k \approx 1,38 \times 10^{-23} JK^{-1}$. Die energie wat vereis word om een bis uit te wis teen 'n konstante temperatuur T is dus rofweg $kT \ln 2$. Charles Bennett [4] het Landauer se termodinamiese analise gebruik om die skynparadoks van Maxwell se Duiweltjie op te los. Bennett se oplossing is strydig met dié van Szillard (in 1929), omdat sy argument juis daarop berus dat dié Duiweltjie inligting *vernietig*.

3.1 Die Inligtingsparadoks

Die *Inligtingsparadoks* vir swart gate handel oor die inligtingsverlies wat moontlik gepaardgaan met die inval van 'n voorwerp of stelsel, sê maar die goue plaat op die ruimteskip Voyager 2, in 'n swart gat. Volgens die teoretiese astrofisika kan 'n swart gat geen ander eienskappe as massa, hoekmomentum en elektriese lading vertoon nie en derhalwe sou die inligting op die goue plaat oënskynlik verdwyn het. Volgens Stephen Hawking, wat baanbrekerswerk oor swart gate gedoen het, gaan dié inligting eenvoudig verlore. (Sien byvoorbeeld [12] vir 'n meer volledige bespreking.) Indien dít wel is wat gebeur, dan is die styging in temperatuur wat deur Landauer se werk geïmpliseer word, nie voorhande nie en daar word dus energie vernietig in die swart gat (se omgewing) wat strydig is met die wet van energiebehoud. Hawking sê:[2]

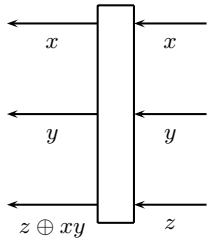
> What all this means is, that information will be lost from our region of the universe, when black holes are formed, and then evaporate. This loss of information will mean that we can predict even less than we thought, on the basis of quantum theory.

Hierdie uitgangspunt impliseer dat swart gate nie deur die kwantummeganika (waar alle prosesse *omkeerbaar* is) beskryf word nie. Die volgende moontlikheid, soos voorgestaan deur Gerard 't Hooft (Nobel-pryswenner 1999, Universiteit Utrecht), is dat die inligting wel die swart gat verlaat. Dít kan gebeur óf deur middel van die Hawking-straling wat uiteindelik, volgens Hawking se teorie, die swart gat self tot niet laat gaan, óf deurdat die inligting op die gebeurtenishorison op 'n manier vasgevang word deur snare (*strings*) in dimensies anders as die gebruiklike ruimte-tyd. Die laasgenoemde oplossing is een van 'n aantal nuwe fisiese teorieë wat die kwantummeganika nuut sou kon begrond en voorts op nie-omkeerbare basis.

3.2 Omkeerbare rekenskemas

John von Neumann het in die 1950's gespekuleer dat elke *logiese* bewerking wat deur 'n rekenaar uitgevoer word teen temperatuur T noodwendig minstens energie van $kT \ln 2$ moet verstrooi [19]. Dít is nie strydig met Landauer se latere bevinding nie, maar is glad nie in die algemeen waar nie. In 1973 kon Charles Bennett bewys dat alle Turing-masjienberekeninge gedoen kan word deur *omkeerbare* Turing-masjiene en dat geen verstrooiing van energie dus noodwendig is nie [3]. Bennett het gebruik gemaak van Lecerf-omkering, soos ingevoer in 1963 deur Yves Lecerf [16], in sy beskrywing van 'n tipe omkeerbare Turing-masjien. Saam met die resultaat van Landauer beteken dít dat dit nie berekening self is nie, maar die uitvee of verlies aan inligting wat die entropie laat styg en hitte genereer.

Dit is onafhanklik deur Tommaso Toffoli en Edward Fredkin aangetoon dat elke logiese stroombaan vervang kan word deur 'n omkeerbare stroombaan én voorts dat slegs een omkeerbare logiese hek voldoende is — die *Toffoli-hek*. Dié hek bereken $(x, y, z) \mapsto (x, y, z \oplus xy)$ waar $\oplus$ optelling modulo 2 is. Dit staan ook bekend as 'n beheerde-beheerde-NIE-hek (*controlled-controlled NOT gate*, figuur 1) waar x en y die beheerelemente is.



Figuur 1: Die Toffoli-hek

In die kwantummeganika is 'n stelsel onderhewig aan 'n evolusie wat volledig tydomkeerbaar is tot op dié stadium dat 'n meting gemaak word. Derhalwe sou 'n kwantumstelsel slegs (maar wel!) 'n omkeerbare berekeningsproses kon uitvoer. Die ontdekkings van Bennett, Lecerf en Landauer het die skeiding tussen die kwantummeganika en die teorie van berekening oorbrug.

[2] `http://www.hawking.org.uk/text/public/dice.html`

4 FEYNMAN, BENIOFF EN DEUTSCH

Richard Feynman het, met sy voorspraak vir die ontwikkeling van 'n teorie en tegnologie vir kwantumberekening, onteenseglik 'n reuse-invloed op die wetenskaplike publiek gehad. Vanaf 1982 (in [7] en in openbare lesings o.a.) wys hy nie net uit dat die steeds voortdurende verdwerging van elektroniese komponente ons — vroeër of later — met kwantumeffekte in ons rekentoestelle sal konfronteer nie, maar ook dat 'n kwantumstelsel 'n baie meer kompakte voorstelling van inligting toelaat as 'n konvensionele bis-skikking. Selfs 'n kwantumstelsel met net twee *waarneembare* toestande het natuurlik oneindig veel toestande in die kwantumtoestandruimte. Voeg ons nog 'n tweetoestand-kwantumstelsel by, dan word die nuwe saamgestelde stelsel (in teenstelling met 'n klassieke stelsel) beskryf deur 'n toestand in 'n tensorproduk-ruimte, wat die welbekende interferensie- en superposisieverskynsels toelaat. Dit is juis hier waar die krag van die kwantumberekening sal lê. Feynman was in 'n groot mate gemotiveer deur die feit dat kwantumstelsels nie sonder eksponensiële vertraging op konvensionele rekenmasjiene nageboots kan word nie. Kwantumrekenaars sou dus nodig wees vir die doeltreffende simulasie van kwantumstelsels.

Die werk van Paul Benioff in 1980–1982 is heelwat minder bekend as Feynman se popularisasie. In sy artikel in 1980 [1] (en in 1982 in [2]) beskryf Benioff vir die eerste keer 'n kwantummeganiese model vir 'n (omkeerbare) Turing-masjien. Die uitdruklike doel is nie om 'n nuwe rekenparadigma daar te stel nie, maar om 'n beskrywing van 'n rekenmasjien te gee in die terme van die mees fundamentele bekende fisika. Hy laat egter die moontlikheid oop dat die kwantumbeskrywing van rekenmasjiene wel gevolge sal hê vir die werking van dié toestelle. In 1985 het David Deutsch 'n *universele* kwantumrekenmasjien beskryf [6] vir dié nuwe rekenmodel, soortgelyk aan die universele Turing-masjien. Deutsch het ook die benadering deur kwantumlogiese stroombane met behulp van die *Deutsch-hek* (kwantumeweknie van die Toffoli-hek) gevestig.

5 UIT DIE SOWJET-KUBERNETIKA

Die bydrae van die Sowjetunie op die gebied van die teoretiese rekenaarwetenskap en verwante gebiede was groot. Min wetenskaplikes sal nie met die meeste van die name L.V. Kantorovitch[3], A.P. Ershov[4], P.S. Novikov[5], S.A. Lebedev[6], A.N. Kolmogorov[7], L.A. Levin[8] of Yu.V. Matiyasevich[9] vertroud wees nie. Dit was veral onder die vaandel van die *kubernetika* wat hierdie wetenskaplikes gewerk het.

Kubernetika, waarvan die term deur Norbert Wiener in 1948 bekend gemaak is in sy invloedryke werk *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*, het in die Weste in die dekades na die verskyning van dié werk versplinter in die dissiplines van operasionele navorsing, stelselteorie, beheerteorie en inligtingsteorie. Ten spyte van 'n minder gunstige begin as in die VSA, het die kubernetika in die USSR 'n groot impak op die wetenskaplike gemeenskap gehad. In die Sowjetunie is die kubernetika in die tydperk onmiddellik na die Tweede Wêreldoorlog as 'n instrument van die VSA se imperialistiese ideologie en as 'n pseudowetenskap afgemaak [8]. Derhalwe moes Sowjet-wetenskaplikes besonder versigtig omgaan met terminologie, terwyl hulle hard gewerk het aan rekenaarstelsels vir militêre doeleindes. Die vertaling van die bogenoemde bekende boek van Norbert Wiener is byvoorbeeld met tien jaar vertraag [8] weens die kwansuis spekulatiewe en filosofiese aard daarvan op 'n stadium toe die owerhede reeds aktief die vertaling van Westerse vakliteratuur na Russies bevorder het. Die sirkulasie van enkele eksemplare van dié boek het egter die regte klimaat geskep vir 'n oplewing in die kubernetika en teoretiese rekenaarwetenskap na Stalin se dood in 1953. Dié ideologiese ommekeer was so groot dat die kubernetika in 1961 in die Kommunistiese Party se program opgeneem is as 'n sleutelwetenskap vir die skepping van die materiële en tegniese grondslae van kommunisme [9].

Die *Great Soviet Encyclopedia* [24] definieer kubernetika kort- en breedweg, in die Engelse vertaling van sy derde uitgawe, as „Cybernetics, the science of control, communications and data processing." Hoewel die USSR reeds teen die middel 1960's 'n agterstand van minstens vyf jaar teenoor die VSA gehad het op die gebied van rekenaartegnologie en al verder en verder veld verloor het [14], het die 1960's en veral die vroeë 1970's 'n bloeitydperk vir die kubernetika en rekenaarwetenskap in die Sowjetunie geword. Binne die — skielik polities korrekte — kubernetika was daar ruimte vir die wiskundige logika en teorie van berekening om te ontwikkel ná dekades van ontmoediging. Teen die 1980's het kubernetika ook in die Sowjetunie as wetenskap doodgeloop, deels onder Westerse invloed en deels weens 'n te noue assosiasie met die staatsideologie [26]. Dié negatiewe verwikkeling in die studie van kubernetika in die USSR is moontlik deels te blameer daarvoor dat Yuri[10] Manin se opmerkings in sy boek *Berekenbaar en Onberekenbaar* [20] (sover dié outeur kon vasstel) nie vertaal en wyer gelees is nie. Dié boek bevat [22] 'n uittreksel van die Russiese uitgawe van die bekende handboek van Manin, *A Course in Mathematical Logic* (reeds in 1977 in Engels vertaal). Manin skryf in 1980 [20] ($\mathbb{C}$ en c staan vir die versameling komplekse getalle),

> Dit is moontlik dat vir die beter begrip van sulke verskynsels 'n wiskundige teorie van kwantumoutomate ontbreek. Die wiskundige model van sulke objekte moet heel vreemde eienskappe vertoon in vergelyking met dié van deterministiese prosesse. Hiervoor is die rede dat die kapasiteit van die kwantumruimte dramaties groter is: indien daar in die klassieke geval N diskrete toestande is, dan is in die kwantumteorie (volgens die superposisiebeginsel) die toestandruimte in $\mathbb{C}^N$. In klassieke stelsels het die samevoeging van stelsels met N_1 en N_2 toestande onderskeidelik bloot die produk aantal toestande, maar in die kwantumgeval is dit $\mathbb{C}^{N_1 N_2}$.
>
> Hierdie growwe berekeninge toon dat dié stelsels met kwantumgedrag potensieel ver meer ingewikkeld is as die klassieke weergawe. Byvoorbeeld: omdat die stelsels geen unieke regte dekomposisie het nie, kan die toestand van die kwantumoutomaat op vele maniere waargeneem word as heeltemaal verskillende toestande van virtuele klassieke outomate. Aan die einde van [17] byvoorbeeld kan 'n regtig leersame berekening gevind word: vir die kwantummeganiese beskrywing van die metaanmolekule moet waardes op 'n tralie in 10^{42} punte uitgereken word. Indien ons aanneem dat in elke punt in totaal 10

> Lehetséges, hogy az ilyen jelenségek jobb megértéséhez a kvantumautomaták matematikai elmélete hiányzik. As ilyen objektumok matematikai modellt mutathatnának az egészen szokatlan tulajdonságokkal rendelkező determinisztikus folyamatokra. Ennek egyik oka az, hogy a kvantumtér térfogata lényegesen nagyobb a klasszikusokénál: ott, ahol a klasszikusban N diszkrét állapot van, a szuperpozíciójukat megengedő kvantumelméletben c^N elemi térfogat van. A klasszikus rendszerek egyesítésikor az N_1 és N_2 állapotszámok összeszorzódnak, a kvantumos változatban $c^{N_1 N_2}$ adódik.
>
> Ezek a durva számítások megmutatják, hogy a rendszerek kvantumos viselkedése potenciálisan sokkal bonyolultabb a klasszikus utánzatokénál. Például, amiat hogy a rendszernek nincs elemekre való egyértelmű felbontása, a kvantumautomata állapota sokféleképpen tekinthető teljesen különböző virtuális klasszikus automaták állapotainak. Pl. a [17] végén található egy igen tanulságos számítás: A metánmolekula kvantumechanikai számbavételéhez háló módszerrel 10^{42} pontban kell számítást végezni. Ha úgy vesszük, hogy minden pontban összesen 10 elemi műveletet kell

[3] Gebruik van rekenaars in optimering, veral in ekonomiese beplanning.

[4] Teoretiese en stelselprogrammering, saamsteller-ontwerp, in 1974 benoem tot *Distinguished Fellow of the British Computer Society*.

[5] Bewys in 1952 dat die woordprobleem vir groepe onoplosbaar is, werk in die wiskundige logika en teorie van algoritmes.

[6] Inwerkingstelling van die eerste rekenaar met gestoorde program in die Sowjetunie en ook op die Europese vasteland in Kiëf in 1951 [8].

[7] Grondlegging van waarskynlikheidsteorie, konsipiering van die Kolmogorov-kompleksiteitsmaat, onder vele andere.

[8] Toevalligheid, algoritmiese inligtingsteorie, berekenbaarheid.

[9] Oplos van Hilbert se Tiende Probleem.

[10] Daar bestaan 'n Babelse verwarring om die transliterasie van name uit die Russies. Volgens die standaard ISO 9 (1995) skryf mens vir die algemene naam Юрий in die Latynse alfabet *Ûrij*, maar dít word selde of nooit so aangetref. Die outeur volg in die hoofteks hier die gewoonte om dié naam *Yuri* (soos – Gagarin) te skryf, wat ook gebruiklik is onder Russe self wat só heet. Die Afrikaanse fonetiese transkripsie word eerder heeltemaal vermy, maar in die verwysings kom die Hongaarse transkripsie voor soos gebruik in dié spesifieke bron.

elementêre bewerkings uitgevoer moet word en veronderstel dat elke bewerking teen werklik lae temperatuur plaasvind ($T = 3 \cdot 10^{-3}$ K), dan moet ons soveel energie verbruik as wat op Aarde in ongeveer een eeu opgewek word.

Tydens 'n dergelike verwesentlikingsprogram sal die eerste struikelblok wees om die juiste balans te vind vir die wiskundige en fisiese beginsels. Kwantumoutomate sou abstrak wees — die wiskundige modelle moet slegs voldoen aan die algemene beginsels van die kwantumteorie, sonder fisiese implementasie. Nou is die evolusie van die model 'n unitêre rotasie in eindigdimensionele Hilbert-ruimte en die virtuele dekomposisie in deelstelsels stem ooreen met die ruimte se tensorproduk-dekomposisie. Iewers moet steeds in hierdie prentjie die plek gevind word van interaksies, wat tradisioneel met Hermitiaanse operatore en waarskynlikhede beskryf word. (Outeur se vertaling uit die Hongaarse vertaling van die oorspronklike.)

elvégezni, és feltesszük, hogy minden számítás igen kis hőmérsékleten megy végbe ($T = 3 \cdot 10^{-3}$ K), akkor ennyi energiát kell felhasználnunk, amennyit a Földön hozzávetőleg egy évszázad alatt állítanak elő.

Egy ilyen program megvalósítása során az első nehézség a matematikai és fizikai elvek megfelelő egyensúlyának megtalálása. A kvantumautomatának abszraktnak kell lennie, a matematikai modellnek csupán az általános kvantumelméleti elveket kell kielégítenie, a fizikai realizáció meghatározása nélkül. Ekkor az evolúció modellje unitér forgatás a véges dimenziós Hilbert-térben, a részrendszerekre való virtuális felbontás pedig a tér tenzorszorzattá való felbontásának felel meg. Valahol meg kell találni eben a képben a kölcsönhatások helyét, amiket tradicionáliian Hermite-operátorokkal és -valószínűséggel írnak le.

Manin wys duidelik hier op die belangrikheid van die superposisiebeginsel vir kwantumberekening, soos Feynman twee jaar later ook sou doen. In die Russiese vakliteratuur word daar algemeen verwys na hierdie opmerkings in 1980 van Manin as die vroegste spekulasie op skrif oor die onderwerp van kwantumberekening. In [11], byvoorbeeld, vermeld A.K. Guts:

In die jaar 1980 het Yu.I. Manin gewys op die onvermydelike behoefte aan 'n teorie van kwantumrekentoestelle. (Outeur se vertaling)

В 1980 г. Ю.И. Манин указал на необходимость разработки теории квантовых вычислительных устройств.

Nóg meer duidelik skryf Yu.G. Neizvestniy [23], byvoorbeeld:

Die idee van kwantumberekening is die eerste keer geopper deur Yu.I. Manin in die jaar 1980, maar hierdie probleem het eers aktief onder bespreking gekom na die verskyning van 'n artikel deur die Amerikaanse teoretiese fisikus R. Feynman in 1982. In hierdie werke is die gebruik van die toestande van 'n kwantumstelsel vir berekeningsoperasies voorgestel. (Outeur se vertaling)

Идея квантовых вычислений впервые была вы-казана Ю. И. Маниным в 1980 году, но активно эта проблема стала обсуждатьс я после появления в 1982 году статьи американского физика-т еоретика Р. Фейнмана. В этих работах было предложено использобать для вычисленний операсии с состояниям и квантовой системы.

Dié erkenning aan Manin vir sy idee word egter ongelukkig nog selde in die Westerse vakliteratuur aangetref, met enige uitsonderings soos Manin se eie uitstekende oorsig van kwantumalgoritmes [21] of Knill e.a. se inleidende teks [15]. 'n Gedeeltelike vertaling in Engels van Manin se opmerkings kan gelees word op 'n kursustuisblad[11] van die Universiteit van Karlsruhe. Verder is daar enkele verwysings in vertalings uit Russies, byvoorbeeld die leerboek [13] van Kitaev e.a.

6 SLOTOPMERKINGS EN GEVOLGTREKKING

In die vakliteratuur was Paul Benioff die eerste om 'n gedetailleerde model vir 'n rekenmasjien gebaseer op die beginsels van die kwantummeganika te beskryf. Benioff behoort as dié pionier van kwantumberekening beskou te word op grond van sy bydraes. Yuri Manin het onafhanklik en in dieselfde jaar in [20] gewys op die moontlikheid van sulke masjiene én op die krag wat opgesluit lê in die superposisiebeginsel. Weens die redes hierbo genoem was die impak van Manin se stellings buite die Sowjetunie weining of min. 'n Bietjie later het Richard Feynman ook op die krag van die superposisiebeginsel begin wys en met baie groot sukses dié idees aan die wetenskaplike publiek verkondig. Nieteenstaande Feynman se impak behoort die wetenskaplike publiek die vroeër gepubliseerde werk van Benioff en Manin as die ware begin van kwantumberekening in die vakliteratuur te erken.

Die Inligtingsparadoks illustreer op betreklik dramatiese wyse die wisselwerking tussen inligtingsteorie en die grondslae van die fisika. Om formeel te dink oor berekening kan ons insae gee in die fisika (soos in die geval van Bennett se oplossing van die skynparadoks van Maxwell se Duiweltjie) en sulke denke kan ook gebruik word om fisiese teorieë te yk, soos in die geval van die Inligtingsparadoks. Hoewel kwantumrekenaars niks kan doen wat nie op 'n konvensionele rekenaar of Turing-masjien stadig nageboots kan word nie [5], is die *bewerkingspoed* van kwantumrekenaars van so 'n aard dat alle toegepaste wetenskaplikes hulle konsep van wat in praktyk uitrekenbaar is, sal moet herdink indien — of wannneer — die tegnologie vir die produksie van kwantumrekentoestelle op redelike skaal ontwikkel is. Teoretiese rekenaarwetenskaplikes moet ook 'n duidelike definisie van *berekening* hê en hoewel kwantumrekenaars niks hieraan sal verander nie, kan 'n omwenteling in die sienings van die fisika 'n groot uitwerking op die rekenaarwetenskap hê, al is dit aanvanklik net konseptueel. Veral die snaarteorie het baie duidelike aanknopingspunte met inligtingsteorie en 'n goeie aanslag op die Inligtingsparadoks deur snaarteoretici, behoort van groot belang vir ons te wees.

Verwysings

[1] Benioff, P. (1980). The Computer as a Physical System: A Microscopic Quantum Mechanical Hamiltonian Model of Computers as Represented by Turing Machines, *Journal of Statistical Physics*, 22(5), 563–591.

[2] Benioff, P. (1982). Quantum Mechanical Models of Turing Machines That Dissipate No Energy, *Phys. Rev. Lett.*, 48, 1581–1585.

[3] Bennett C.H. (1973). Logical Reversibility of Computation, *IBM Journal of Research Development*. Beskikbaar aanlyn:- `http://www.aeiveos.com/~bradbury/Authors/Computing/Bennett-CH/` [Besoek op 2003-10-31].

[4] Bennett C.H. (1982). The Thermodynamics of Computation - a Review, *International Journal of Theoretical Physics*, 21(12), 905–940. Beskikbaar aanlyn:- `http://www.aeiveos.com/~bradbury/Authors/Computing/Bennett-CH/` [Besoek op 2003-10-31].

[5] Davis, M. (2003). The Myth of Hypercomputation. In *Alan Turing : Life and legacy of a great thinker*, Teuscher, C. ed. (Heidelberg : Springer Verlag).

[6] Deutsch, D. (1985). Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer, *Proceedings of the Royal Society of London Ser. A*, A400, 97–117.

[11] `http://iaks-www.ira.uka.de/home/grassl/Academia/QECC/zitate.html`

[7] Feynman, R.P. (1982). Simulating Physics with Computers, *International Journal of Theoretical Physics*, 21 (6/7), 467–488.

[8] Gerovitch, S. (2001). 'Mathematical Machines' of the Cold War: Soviet Computing, American Cybernetics and Ideological Disputes in the Early 1950s, *Social Studies of Science*, 31(2), 253–288. Beskikbaar aanlyn:- http://web.mit.edu/slava/homepage/articles/soc-stu.pdf [Besoek op 2004-1-20.]

[9] Gerovitch, S. (2001)."Russian Scandals": Soviet Readings of American Cybernetics in the Early Years of the Cold War, *The Russian Review*, 60(4), 545–568.

[10] Grover, L.K. (1996), A fast quantum mechanical algorithm for database search. Beskikbaar aanlyn:- http://citeseer.nj.nec.com/grover96fast.html [Besoek op 2002-10-22].

[11] Гуц, А.К. (2002). Комплексный анализ и информатика (Omsk: Omsk State University Publishers, 2002). Beskikbaar aanlyn:- http://users.univer.omsk.su/~guts/tfkp.htm [Besoek op 2004-01-26].

[12] 't Hooft, G. (1995). Black holes, Hawking radiation, and the information paradox, *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, 43(1-3), 1–11.

[13] Kitaev, A.Yu., Shen, A.H., Vyalyi, M.N. (2002). *Classical and Quantum Computation* (Providence: American Mathematical Society).

[14] Klimenko, S.V. (1999). Computer Science in Russia: A Personal View, *IEEE Annals of the History of Computing*, 21(3), 4–15.

[15] Knill, E., Laflamme, R., Barnum, H., Dalvit, D., Dziarmaga, J., Gubernatis, J., Gurvits, L., Ortiz, G., Viola L., Zurek W.H. (2003). Introduction to Quantum Information Processing, *arXiv.org e-Print archive*, quant-ph/0207171. Beskikbaar aanlyn:- http://arxiv.org/abs/quant-ph/0207171 [Besoek op 2004-1-22].

[16] Lecerf, Y. (1963). Machines de Turing réversibles, Récursive insolubilité en $n \in N$ de l'équation $u = \theta^n$, où θ est un isomorphisme de codes, *Comptes Rendus*, 257, 2597–2600. Beskikbaar aanlyn:- http://www.cise.ufl.edu/~mpf/rc/Lecerf/lecerf.html [Besoek op 2004-1-27].

[17] Li, M. & Vitányi, P. (1997) *An Introduction to Kolmogorov Complexity and Its Applications (2nd ed.)* (New York: Springer Verlag).

[18] Lloyd, S. (1999). Rolf Landauer (Obituary), *Nature*, 400, 720.

[19] Lloyd, S. (2000). Ultimate physical limits to computation, *Nature*, 406, 1047–1054. Beskikbaar aanlyn:- http://xxx.lanl.gov/abs/quant-ph/9908043 [Besoek op 2003-10-31].

[20] Манин, Ю.И. (1980). Вычислемое и невычислимое (Советское Радио, Москва) In die vertaling as: Manyin, Ju. I. (1986), *Bevezetés a kiszámithatóság matematikai elméletébe* (Műszaki Kiadó, Budapest).

[21] Manin, Yu. I.: Classical computing, quantum computing, and Shor's factoring algorithm, Beskikbaar aanlyn:- http://arxiv.org/abs/quant-ph/9903008/ [Besoek op 2004-1-27].

[22] Minc, G.E. (1982). Resensie van [20] in *Zentralblatt für Mathematik und Ihre Grenzgebiete*, 471, 18.

[23] Неизвестный, Ю.Г. (2003). Квантовый компютер и его полупроводниковая элементарная база, Beskikbaar aanlyn:- http://psj.nsu.ru/lector/neizvestniy/ [Besoek op 2004-1-27].

[24] Prokhorov, A. M. (Ed) (c1973–c1983). *Great Soviet Encyclopedia* (London : Collier Macmillan), 12, 341–349.

[25] Shor, P. (2000), Introduction to quantum algorithms. Beskikbaar aanlyn:- http://xxx.lanl.gov/abs/quant-ph/0005003, [Besoek op 2002-10-21].

[26] Vucinich, A. (2002). Soviet Mathematics and Dialectics in the Post-Stalin Era: New Horizons, *Historia Mathematica*, 29(1), 13–39.

Kort biografie van die outeur

Petrus Potgieter (jaargang 1968) verwerf in 1992 die graad M.A. aan Kent State University in die VSA en in 1996 die graad Ph.D. in wiskunde aan die Universiteit van Pretoria. Hy doseer twee jaar aan die Universiteit van Stellenbosch en is sedert 1997 verbonde aan die Departement Kwantitatiewe Bestuur by die Universiteit van Suid-Afrika, tans as medeprofessor. Sy hoofbelangstellings in die akademie is die grondslae van berekening en die wiskunde van finansies. Die temas wat hierdie studievelde verbind is eerstens die verband van beide met die waarskynlikheidsteorie en tweedens die siening dat albei hulself besig hou met die koppelvlak tussen 'n agent (rekentoestel óf belegger) en 'n stelsel (menslike waarnemers óf die ekonomie) deur middel van goed gedefinieerde seine (invoer/uitvoer óf pryse, respektiewelik).