

Auf einen Blick

Vorwort	21
Einleitung	23
Teil I: Die Macht des Quantencomputing	29
Kapitel 1: Das Quantencomputing-Bootcamp	31
Kapitel 2: Ein Rückblick auf das frühe und klassische Computing	49
Kapitel 3: Die Wurzeln des Quantencomputing	69
Kapitel 4: Einführung in die Quantentechnologie 1.0.	91
Kapitel 5: Präsentation des Quantencomputing	105
Kapitel 6: Das Quantencomputing nimmt Fahrt auf	121
Teil II: Einsatzmöglichkeiten für das Quantencomputing	135
Kapitel 7: Die Wahl zwischen klassischem Computing und Quantencomputing	137
Kapitel 8: Erste Schritte im Quantencomputing	153
Kapitel 9: Alles dreht sich um den Stack	173
Kapitel 10: Das Rennen um das perfekte Qubit	193
Kapitel 11: Auswahl eines Qubit-Typs	207
Teil III: Sich mit dem Quantencomputing verschränken	227
Kapitel 12: Mit Quantencomputern Programmieren	229
Kapitel 13: Anwendungsbereiche des Quantencomputing	255
Kapitel 14: Algorithmen für Quantencomputer	273
Kapitel 15: Optionen für einen Cloud-Zugang zu Quantencomputern	297
Kapitel 16: Weiterbildung	321
Teil IV: Der Top-Ten-Teil	343
Kapitel 17: Zehn Mythen um das Quantencomputing	345
Kapitel 18: Zehn Antworten auf technische Fragen	355
Kapitel 19: Zehn geschäftliche Fragen beantworten	361
Kapitel 20: Zehn universitäre Forschungsprogramme	369
Abbildungsverzeichnis	375
Stichwortverzeichnis	379



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	21
Einleitung	23
Über dieses Buch	23
Leichtsinnige Annahmen über den Leser	25
In diesem Buch verwendete Symbole	25
Über das eigentliche Buch hinaus	26
Wie es jetzt weitergeht	26
TEIL I	
DIE MACHT DES QUANTENCOMPUTING	29
Kapitel 1	
Das Quantencomputing-Bootcamp	31
Verstehen, warum Quantencomputing so seltsam ist.	32
Die Macht des Quantencomputing verstehen	33
Puff, Magie – oder kurz: Qubit?	34
Superposition (Überlagerung) – die erste Quanten-Superkraft	37
Es ist kompliziert – das neue Must Have	38
Quantencomputing braucht Kohärenz	41
Die Leistung des Quantencomputing in Zahlen fassen	42
Was Quantencomputing für die Menschen bewirken kann	42
Die verschiedenen Arten von Quantencomputern	44
Quanteninspiriertes Computing	44
Gatterbasiertes Quantencomputing	45
Was stoppt uns?	47
Kapitel 2	
Ein Rückblick auf das frühe und klassische Computing	49
Warum der klassische Computer nicht verschwinden wird	50
Ein Blick in die Vorgeschichte der Computer	51
Rechnen mit dem Abakus, einem Vorläufer des klassischen Computers ..	51
Die Ausgrabung der Antikythera, einer frühen Planetenmaschine	53
Berechnen, warum der Rechenschieber nicht mehr rechnet	55
Was wir von den ersten Computern lernen können	56
Die Entstehung des klassischen Computings	57
Die Ankunft der Tabelliermaschinen	57
Ein mathematisches Modell für klassische Computer	60
In Gedenken an den ersten elektronischen Computer	63
Die Erfindung von Bytes als Dateneinheit verstehen	65
Der Aufstieg von ICs und Mikroprozessoren	66
Klassisches Computing und Quantencomputing verbinden	68

Kapitel 3	
Die Wurzeln des Quantencomputing	69
Die Schlüssel zur Quantenmechanik identifizieren	71
Die Grundlagen der Elementarteilchen kennenlernen	72
Die Kosten der Kohärenz	74
Auswirkungen der Unsicherheit erkennen	75
Die Geschichte der Quantenmechanik – ein Überblick	77
Die Entwicklung der klassischen Mechanik – ein Rückblick	77
Der Beginn der Quantenrevolution	80
Die Fortsetzung der Quantenrevolution	83
Die Grundlagen für das Quantencomputing schaffen	86
»Spukhafte Fernwirkungen« erkennen	88
Kapitel 4	
Einführung in die Quantentechnologie 1.0	91
Die Suche nach Lasern an der Grenze des Machbaren	92
Das Studium der Quantenmechanik nach 1930	93
Wettlauf um Solarzellen (1890er Jahre)	95
Beobachtung von Elektronenmikroskopen (1931, 1965 und 1981)	97
Die Optimierung des Transistors (1947)	97
Zeitmessung mit Atomuhren (1955)	99
Die Entstehung von Masern und Lasern (1953 und 1960)	100
Abtastung für NMR- und MRT-Geräte (1977)	102
Auswirkungen der Quantentechnologie 1.0 – eine Abschätzung	104
Kapitel 5	
Präsentation des Quantencomputing	105
Einen Rahmen für Quantencomputer zusammenzimmern	106
Die Theoriebildung in den 1960er und 1970er Jahren	107
Vorhersage von Quantencomputing und Nanotechnologie	107
Mit Reversibilität einen kühlen Kopf bewahren	109
Quantisierung von Geld – ein Hit	109
Klonen von Quantenzuständen ist ein No-go	109
Bedauern von Dingen, die man nicht haben kann	110
Die Entdeckung eines Sterns (in der Informationstheorie)	110
Entstehung der Grundlagen in den 1980er Jahren	110
Ausweitung der Turing-Maschinen auf den Quantenbereich	110
Quantencomputing – eine Stellungnahme	111
Beschreibung eines universellen Quantencomputers	111
Das CNOT-Gatter öffnen	111
Modellierung eines echten Quantencomputers	111
Quantenglühbirnen zur Optimierung	112
Der Durchbruch in den 1990er Jahren mit Algorithmen und Hardware	112
Verbindung mit der Quantenkommunikation	113
Vorstellung des ersten quantenspezifischen Algorithmus	113
Mit dem Shor-Algorithmus das Multiversum erschüttern	114
Calling Quantum für die Verteidigung	115
Anfänge der Quantenfehlerkorrektur	116

Der Trick mit Grovers Algorithmus 116
 Manifestation eines funktionierenden Quantencomputers 117
 Sieben Glücks-Qubits in der Hardware treffen 118
 Der Startschuss für das Quantencomputer-Rennen von heute 119

Kapitel 6

Das Quantencomputing nimmt Fahrt auf 121

Den technischen Fortschritt anschieben – 2000-2010 122
 Die Ausführung von Shors Algorithmus wird möglich 122
 Ein Quantensprung in der Ausbildung 123
 Spukhafte Fernwirkung in astronomischen Weiten erleben 124
 Auf dem Weg zu einem vollständig implementierten Computer 125
 Mehr Ressourcen investieren – 2010-2015 126
 Auslieferung eines funktionierenden Annealers von D-Wave 127
 Die Software gibt sich die Ehre 127
 Mit Edward Snowden eine Quantenpanik auslösen 127
 Mit Google (quadratische?) Wurzeln für das Quantencomputing schlagen 128
 Der weitere Fortschritt – 2016 bis heute 129
 Das Angebot des Quantencomputing über die Cloud 129
 Verabschiedung eines Gesetzes 129
 Mit IBM zur Universalität 130
 Verkündung der Quantenvorherrschaft mit Google und anderen 130
 Ein Nobelpreis für die Verschränkung 131
 Quantennutzen mit IBM durchsetzen 131
 Herausfinden, was für das Quantencomputing noch benötigt wird 132

TEIL II

EINSATZMÖGLICHKEITEN FÜR DAS QUANTENCOMPUTING 135

Kapitel 7

Die Wahl zwischen klassischem Computing und Quantencomputing 137

Grenzen des klassischen Computings 137
 Das Mooresche Gesetz – eine Ära geht langsam zu Ende 138
 Exponentielle Wachstumsschmerzen 142
 Der Kampf gegen festgefahrene Denkmuster 144
 Die Quintessenz 146
 Herausfinden, wofür Quantencomputing die richtige Lösung ist 146
 Bereiche, in denen Quantencomputing überlegen ist 147
 Und wie steht es mit den Quanten heute? 149
 Frühzeitiger Zugang erwünscht 151
 Bedarf an den Möglichkeiten des Quantencomputing 152

Kapitel 8

Erste Schritte im Quantencomputing 153

Fünf Klassen von Lösungen identifizieren 154
 Nach diesem Algorithmus tanzen 158
 Die Entscheidung, ob Sie jetzt anfangen sollen 159

16 Inhaltsverzeichnis

Einbindung Ihrer Organisation	161
Wie man ein Projektteam zusammenstellt	164
Einbindung eines geschäftsführenden Projektponsors	166
Die Abhängigkeit von Algorithmus-Experten	167
Ziele setzen	168
Quanteninspirierte Lösungen in Betracht ziehen	169
CPUs und GPUs	170
Verwendung spezieller Hardware	170
Quanteninspirierte Lösungen einbeziehen	170

Kapitel 9

Alles dreht sich um den Stack **173**

Den Stack analysieren	173
Die Bestandteile des Stacks klassischer Computer untersuchen	174
Und jetzt: Der Stack für Quantencomputer	175
Qubits und Steuerungshardware	176
Fehlerkorrektur-Firmware	177
Fehlerkorrekturschicht	177
Hardware-orientierte Quantencompiler	178
Compiler und Optimierer auf Logikebene	179
Algorithmusgesteuerte Anwendungen	180
Cloud-basierter Quantendienst und Software-Entwicklungskit	180
Annealing als mögliche Alternative	181
Annealing im mittelalterlichen Modus	184
Probleme, die durch Annealing gelöst werden können	185
Weiter zum Quantenglühen	187
Erkennen, wo Quanten-Annealer erfolgreich sind	188
Erkennen, wo Quanten-Annealer versagen	189
Die Wahl des Quantencomputer-Typs	189

Kapitel 10

Das Rennen um das perfekte Qubit **193**

Identifikation der drei Erfolgslevel von Qubits	196
Das Rennen um den gezielten Quantenvorteil gewinnen	196
Ein Besuch des Qubit-Zoos	199
Dekonstruktion von Qubits	200
Definition der Modalitäten des Quantencomputing	202
Kartierung der Modalitäten-Landschaft	204
Was als Nächstes kommt	205

Kapitel 11

Auswahl eines Qubit-Typs **207**

Spieler anhand der Scorecard unterscheiden	208
Qubits basierend auf Ionen-Fallen	211
Supraleitende Qubits	213
Photonen-Qubits	217
Das Beste vom Rest	219

Eine Strategie für das Quantencomputing wählen..... 222
 Die Vorteile der Cloud nutzen 224
 Ein Wort über Unternehmen 225

**TEIL III
 SICH MIT DEM QUANTENCOMPUTING VERSCHRÄNKEN 227**

**Kapitel 12
 Mit Quantencomputern Programmieren..... 229**

Herausfinden, was wir tun 230
 Herausfinden, wie es geht 233
 Zurück zu den BASICS 236
 Die Anforderungen für ein Quanten-Programm beschreiben 237
 Komponenten einer Quantenprogrammierungsumgebung 238
 Bestandteile eines Quantenprogramms 239
 Wie ein Entwickler denken 240
 Tipps, um ein hervorragender Softwareentwickler zu werden..... 241
 Eine Entwicklungsumgebung einrichten 243
 Woher Sie Ihr Quantum bekommen..... 244
 Erste Schritte mit Strangeworks Python SDK..... 244
 Lassen Sie uns etwas optimieren..... 245
 Singing QAOA-ooooo 247
 Erste Schritte mit QAOA 248
 Einen Quantenalgorithmus in seine Einzelteile zerlegen 252
 Die Frage: Wie geht es weiter?..... 254

**Kapitel 13
 Anwendungsbereiche des Quantencomputing..... 255**

Denken in drei Kategorien 255
 Kryptografie mit Quanten knacken..... 257
 Die Suche nach Walter in einem Meer gestreifter Hüte 260
 Das Bargeld ergattern..... 261
 Sich versichern, dass Quantum die Zukunft prägt..... 262
 Mit Logistik die Welt in Schwung bringen 263
 Träumen vom maschinellen Lernen..... 266
 Auf der Suche nach dem neuen Öl in Quantum..... 266
 Materialismus matters!..... 267
 Mit Simulationen zu besserer Gesundheit..... 268
 Neue Arzneimittel entwickeln 269
 Neuartige Nebelfelder erkennen 270

**Kapitel 14
 Algorithmen für Quantencomputer 273**

Algorithmen des Quantencomputing konkreten Anwendungen zuordnen..... 274
 Die Grundlagen von Quantenalgorithmen verstehen 275
 Algorithmen Anwendungsfällen zuordnen 276
 In die Forschung investieren 276

18 Inhaltsverzeichnis

Ein Besuch im Quantenzoo	278
Eine neue Art Zeit finden	278
Der Deutsch-Jozsa-Algorithmus.....	281
Shor-Quantencomputing für sehr große Zahlen	282
Mit Grover auf der Suche	284
Der Quantenphasenschätzungsalgorithmus.....	285
Der Simonsche Algorithmus	286
Die Quanten-Fourier-Transformation (QFT)	288
Der Vaidman'sche Quanten-Zeno-Effekt	290
Linearität entdecken mit dem HHL-Algorithmus	291
Lösen und Simulieren mit QAOA.....	292
Zurück auf dem Boden der Tatsachen mit VQE	293
Weitere Algorithmen – eine kurze Bewertung	294
Was auf uns zukommt	295

Kapitel 15

Optionen für einen Cloud-Zugang zu Quantencomputern ... 297

Erkundung der wichtigsten Optionstypen.....	298
Anbieter öffentlicher Clouds.....	298
Hersteller von Quantencomputern.....	300
Blick auf die Zugangsanbieter	302
Die Bedeutung von Amazon Braket	303
Auf Azure Quantum zählen	305
Google Quantum AI.....	307
Die Quantencomputer-Anbieter geben sich die Ehre	309
Mit Strangeworks das Quantenpotenzial entfesseln	312
Ein klassischer Katalog von Quantentechnologien	314
Compute-Anbieter	316
Geführte Anwendungen	318

Kapitel 16

Weiterbildung..... 321

Online-Kurse.....	322
MIT Quanteninformationswissenschaften.....	323
Quantenkryptografie.....	324
Quanteninternet und Quantencomputer: Wie werden sie die Welt verändern?.....	324
Quantencomputer verstehen.....	324
Quantensuche	325
Quanten-ML	326
Quantencomputing: Weniger Formeln – mehr Verstehen.....	326
Schwarzer Opal.....	326
Tutorials und Dokumentationen nutzen	327
Nielsen und Chuang	327
Dokumentation für Forest und pyQuil	327
Dokumentation für Ocean	327
Dokumentation für Xanadu's Strawberry Fields	328

IBM Q – Vollständiges Benutzerhandbuch	329
John Preskills Anmerkungen zur Quanteninformatik	330
Qiskit-Anleitungen	331
Der Quantenalgorithmus-Zoo	331
Ein Spielplatz für Quantencomputer	332
Quantum Katas	332
Quanten-ML für Datenwissenschaftler	333
Unstrukturierte Vorgehensweisen beim Lernen	334
Blogs	334
Paper	336
Quantencomputing offen gestalten: Lektionen aus Open-Source-Projekten	337
Interaktion und Spaß	338
Communities	338
Interaktive Lernwerkzeuge	339
Videos	341

**TEIL IV
DER TOP-TEN-TEIL 343**

**Kapitel 17
Zehn Mythen um das Quantencomputing 345**

Quantencomputing wird erst in 10-15 Jahren kommerziell verfügbar sein	346
Ein Qubit kann eine 0 und eine 1 zur gleichen Zeit sein	347
Quantencomputer werden die klassischen Computer ersetzen	348
Nur ein Physiker kann Quantencomputer programmieren	349
Quantencomputer werden bald alle Probleme klassischer Computer lösen.	349
Wir sollten alle »die Klappe halten und rechnen«.	350
Bald wird es nur noch eine kleine Anzahl von Quanten-Hardware- Unternehmen geben	350
Quantum-Unternehmen haben alle Spezialisten, die sie für das Wachstum der Branche benötigen	351
Quantencomputing wird die Datenverschlüsselung zerstören	352
Die quantensichere Kryptografie bietet vollständige Datensicherheit	352

**Kapitel 18
Zehn Antworten auf technische Fragen 355**

Wird die Quantentechnologie ihren Weg in ein Verbraucherprodukt finden?	355
Ist die Quantenwelt real? Wird Ant-Man unsere Welt retten?	356
Wie erklärt man einem Dummy das Quantencomputing?	357
Wohin geht die Reise im Bereich des Quantencomputing?	357
Wann wird das Quantencomputing kommerziell nutzbar?	358
Was ist die coolste Anwendung von Quantencomputern?	358
Wo wird das Quantencomputing den größten Umbruch bewirken?	359
Wie lange dauert es, bis der Shor-Algorithmus RSA bricht?	359
Wie kann man Quantencomputing in der Fertigung einsetzen?	359
Wo ist die Überschneidung zwischen Quantencomputing und KI/ML?	360

Kapitel 19**Zehn geschäftliche Fragen beantworten 361**

Wie kann ich den Markt für ein neues Unternehmen, ein Produkt oder eine Dienstleistung einschätzen?	361
Wie bewerte ich den Bedarf meines Arbeitgebers, ein Early Adopter zu sein (oder nicht)?	362
Welche Rollen und Berufe werden im derzeitigen Entwicklungsstadium benötigt?	363
Welchen Hintergrund braucht man, um Programmieren auf Quantencomputern zu lernen?	363
Welchen Rat können Sie Neulingen geben?	364
Welche Universitätsprogramme würden Sie empfehlen?	364
Wer ist der derzeit führende Entwickler von Quantencomputern?	365
Was sollte ich tun, wenn ich eine Idee für ein Start-up habe?	366
Welche Gewohnheiten haben Ihnen bei Ihrer Karriere geholfen?	366
Was sind Ihre größten gelernten Lektionen?	367

Kapitel 20**Zehn universitäre Forschungsprogramme 369**

Universität Oxford, UK	370
Universität California, Berkeley	370
Stanford-Universität	370
Caltech.	371
Massachusetts-Institut für Technologie	371
Harvard-Universität	371
Universität Chicago	371
Universität Maryland	372
Universität Waterloo	372
Universität New South Wales, Sydney	373

Abbildungsverzeichnis 375**Stichwortverzeichnis 379**