
Inhaltsverzeichnis

Der Quantensprung vom Labor zur Anwendung	13
1 Quantenlösungen – jenseits der »klassischen« Grenzen	13
2 Von der ersten zur zweiten Quantenrevolution	14
3 Technologische und wirtschaftliche Perspektiven	16
Einschätzungen und Perspektiven zum Stand der Entwicklung .	19
1 Wege zu einer neuen Schlüsseltechnologie	19
1.1 Motivation und Inspiration	19
1.2 Innovation und Quantenökosysteme	20
1.3 Bewertung des Status quo und Ausrichtung zukünftiger Entwicklungen	23
2 Aktuelle technologische Herausforderungen	26
2.1 Integration und Hochskalierung	26
2.2 Quanteninfrastrukturen	30
3 Aktuelle strategische Herausforderungen	34
4 Tribut und Perspektiven	38
 Quantensensorik	 43
Möglichkeiten der Sensorik in einer neuen Welt	45
Stickstoff-Fehlstellen-Zentren: Quantensensor für Magnetfelder	49
1 Einleitung	49
2 Quantenmagnetometrie mit NV-Zentren	50
2.1 Vorteile	55
2.2 Limitierende Faktoren	56
2.3 Überwindung von Begrenzungen mit dem Weitfeld-Magnetometer	58
2.4 Das Instrument	59
3 Entwicklung spezifischer Diamanten für das Weitfeld-Magnetometer	62
3.1 Diamantsubstrate, homoepitaktisches Wachstum und stickstoffdotierte δ-Schichten	62

4 Anwendungen	66
4.1 Messung von magnetischen Nanopartikeln	67
4.2 Materialwissenschaft – Stahllegierungen	71
5 Schlussfolgerungen und Ausblick	74
6 Danksagungen	75
7 Literaturverzeichnis	76
Durchflussmessung auf Basis der Quantenmagnetometrie	79
1 Quantenmagnetometrie mit optisch gepumpten Magnetometern	80
2 Das Konzept der Durchflussmessung auf der Grundlage der Quantenmagnetometrie	82
3 Der Mehrwert für die Durchflussmessung	87
4 Literaturverzeichnis	91
Laserschwellen-Magnetometrie	93
1 Die Idee: Verbesserung der Sensitivität durch das Auslesen mittels eines Lasers	93
2 Messung der stimulierten Emission von NV-Zentren	99
3 Magnetfeldabhängige Lichtverstärkung mit starken Signalen und Rekordwerten beim Kontrast	102
4 Literaturverzeichnis	106
Materialprüfung mit optisch gepumpten Magnetometern	109
1 Allgemeine Einführung	110
2 Magnetische Messung von Materialdefekten	110
3 Optisch gepumpte Quantenmagnetometer	112
4 Magnetische Antwort von Ermüdungsprozessen	115
5 Messung magnetischer Ermüdungssignale	117
6 Schlussfolgerungen und Ausblick	123
7 Literaturverzeichnis	124
Fraunhofer CAP	127
1 Fraunhofer CAP und die britische Perspektive	127
2 Kaltatomsensor-Technologien	129
2.1 Einführung in die Atominterferometrie	129
2.2 Einführung in die Laseranforderungen für Quantensensoren	131
2.3 Entwicklung von Trapezverstärkern	134
3 SPAD für zeitaufgelöste Fernspektroskopie	135
3.1 Fernerkundung von Wasserstoff	135

3.2 Ergebnisse der Fernerkundung von Wasserstoff	138
4 Photonische Integration für Quantensoristik	139
4.1 Integrierte Quellen für Quantenlicht	140
4.2 Mikrooptische Integration für Rastermagnetometer	143
5 Schlussfolgerungen und Ausblick	146
6 Literaturverzeichnis	146
Quantenbildgebung	151
Quantenbildgebung	153
Literaturverzeichnis	159
Quantenholografie mit nicht detektiertem Licht	161
1 Von der klassischen zur Quantenholografie	162
2 Nichtlineares Interferometer für die bildgebende Darstellung	163
3 Phasenverschiebungs-Holografie	166
4 Quantenholografie mit nicht detektiertem Licht	167
5 Rauschunempfindlichkeit	169
6 Literaturverzeichnis	172
Quanten-Ghost-Imaging mit asynchroner Detektion	175
1 Einleitung	175
2 Quanten-Ghost-Imaging (QGI)	177
3 Ergebnisse	182
4 Bildrekonstruktion	183
5 Relevante Quantenvorteile	185
5.1 Gleichmäßige Energieverteilung: entspannte Sicherheitsgrenzwerte	185
5.2 Inkohärente Quelle: verbesserte Bildqualität	186
5.3 Inhärente Zufälligkeit: Nicht-Detektierbarkeit und besserer Schutz	186
6 Schlussfolgerungen und Ausblick	187
7 Literaturverzeichnis	188
Quanten-Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie	191
1 Einleitung	191
2 Das Quanten-Fourier-Transform-Spektrometer	194
2.1 Korrelierte Photonenquelle	194
2.2 Nichtlineares Interferometer	195
2.3 Spektralanalyse	198

3 Schlussfolgerungen und Ausblick	203
4 Literaturverzeichnis	203
Quantenbildgebung mit nicht-detektierten Photonen	
im mittleren Infrarotbereich	205
1 Quantenbildgebung in nichtlinearen Interferometern	205
1.1 Parametrische Fluoreszenz. Quellen für korrelierte Photonenpaare	206
1.2 Bildgebung mit nicht-detektierten Photonen in nichtlinearen Interferometern	207
1.3 Stand der Technik bei der MIR-Quantenbildgebung	209
2 MIR-Quantenbildgebung mit Kristallen mit großer Apertur in einer Langpass-Interferometer-Konfiguration	210
2.1 Überlegungen zum Aufbau	210
2.2 Aufbau und Ergebnisse	212
2.3 Schlussfolgerungen und Ausblick	215
3 Literaturverzeichnis	215
Terahertz-Spektroskopie mit sichtbaren Photonen	217
1 Einleitung	218
2 Erzeugung von korrelierten Terahertz-Photonenpaaren im sichtbaren Bereich	220
3 Terahertz-Spektroskopie mit sichtbarem Licht	224
4 Quanteninspirierte Terahertz-Spektroskopie mit gepulsten Quellen	228
5 Schlussfolgerungen und Ausblick	230
6 Literaturverzeichnis	231
Quantenkommunikation	235
Quantenkommunikation: sichere Kommunikation durch Quantenschlüsselaustausch	237
Quantenkommunikationssysteme und -protokolle	239
1 Motivation	239
2 Quantenkommunikationssysteme für optische Netze	241
2.1 Massiv gebündelte Quantenkanäle	241
2.2 Gleichzeitige Übertragung von Quanten- und klassischen Kanälen	244
2.3 Eine Echtzeit-QKD-Versuchsplattform für quantensichere Telekom-Infrastrukturen	246

3 Fazit und Ausblick	251
4 Literaturverzeichnis	251
Satellitengestützte Kommunikation auf Basis von Quantenverschränkung am Fraunhofer IOF	253
1 Kommunikation im Weltall auf Basis von Quantenverschränkung	253
2 Grundsätzliche Überlegungen zu QKD-Links	255
3 Hochperformante Quellen für verschränkte Photonen	258
4 Fazit und Ausblick	262
5 Literaturverzeichnis	262
Photonische Komponenten für Quantentechnologien	265
1 Einleitung	265
2 Aktive Komponenten für die Integration	266
2.1 Einzelphotonen-Lawinendioden	267
2.2 InP-basierte photonische integrierte Schaltkreise	270
3 Hybride Integration	271
3.1 PolyBoard-Plattform	273
3.2 Mikrooptische Bank	277
4 Fazit und Ausblick	280
5 Literaturverzeichnis	280
Modulare Nanoelektronik für die Quantenkommunikation ...	283
1 Motivation	284
2 Modulare Elektronikplattform	286
2.1 Chiplet-Technologie	286
2.2 Digitale Signalprozessoren	289
2.3 Analog-Digital-Wandler	290
2.4 Digital-Analog-Wandler	291
2.5 Zeit-Digital-Wandler	292
2.6 Weiterentwicklung der Chiplet-Toolbox	293
3 QKD-Testumgebung für die Schaltungsentwicklung	294
4 Fazit und Ausblick	296
5 Literaturverzeichnis	297
Rauscharme Quantenfrequenzkonverter für den Quanteninternet-Demonstrator	299
1 Quanteninternet	300
1.1 Quantennetzwerke	301
1.2 Das Quantum Internet Demonstrator Project am QuTech ..	304

2 Quantenfrequenzkonversion	305
2.1 Leistungsanforderungen an einen QFC – jedes Photon zählt	305
2.2 Funktionsprinzip, Konstruktionsherausforderungen und Stand der Technik	306
2.3 NORA – ein rauschreduzierter Ansatz für QFC	307
2.4 Prototypenentwicklung und Erprobung von NORA QFC	309
3 Nächste Schritte	312
4 Literaturverzeichnis	313
Quantencomputing	317
Quantencomputing	319
Quantencomputing – von Materialien bis zur Anwendung	325
1 Siliziumcarbid – ein vielversprechendes Material für das Quantencomputing	326
2 SiC-Halbleitertechnologie und Simulation	329
3 Integration und Materialaspekte für das Quantencomputing	332
4 Quantencomputing für Simulation und Optimierung	336
5 Schlussfolgerungen und Ausblick	340
6 Literaturverzeichnis	341
Nutzung der Mikroelektronik für große Quantencomputing-Hardware	343
1 Einführung – Hardware für das Quantencomputing	344
1.1 Qubit-Plattformen – ein technologischer Überblick	345
2 Herausforderungen auf dem Weg zu nutzbaren Systemen	346
3 Konkretes Potenzial für Segmente des Quantencomputer-Stacks	348
3.1 Supraleitende Qubits	348
3.2 Spin-basierte Quantenpunkt-Qubits	351
3.3 Photonische Qubits	352
3.4 Neutrale Atome	354
3.5 2D- und 3D-Integration	355
3.6 Co-Integration mit CMOS-Logik	356
4 Schlussfolgerungen und Ausblick	357
5 Literaturverzeichnis	358
Fehlercharakterisierung, -minderung und -korrektur	361
1 Charakterisierung von Quantengatterfehlern	362
1.1 Von der Prozess- zur Gate-Set-Tomografie	362

1.2 Quantenprozesstomografie mit langen Sequenzen	366
1.3 Charakterisierung der Übersprecheffekte	368
2 Fehlerminderung	369
3 Quantenfehlerkorrektur	374
3.1 Klassische Fehlerkorrektur	375
3.2 3-Qubit-Bitflip-Code	376
3.3 Schwellenwerttheorem des fehlertoleranten Quantencomputings	377
4 Literaturverzeichnis	379
Quanten-HPC-Algorithmen und Workflows	381
1 Motivation: Quantencomputer als Beschleuniger von HPC-Systemen	381
2 Technologien und Ansätze	382
3 Hybride Simulation auf der Algorithmenebene	383
4 NISQ-Quantenanwendungen	385
5 Auf dem Weg zu hybriden HPC/Quanten-Workflows	388
6 Charakterisierung hybrider Workflows und Algorithmen	389
7 Wichtige Parameter für die Integration von QC in HPC-Systeme .	390
8 Schlussfolgerungen und Ausblick	392
9 Literaturverzeichnis	393
Quantum Machine Learning	395
1 Einleitung	395
2 Was ist Machine Learning?	396
3 Was ist Quantencomputing?	397
4 Was ist Quantum Machine Learning?	400
5 Gegenwärtige Einschränkungen für QML	405
6 Vorschläge für QML in der NISQ-Ära	409
7 Schlussfolgerungen und Ausblick	411
8 Literaturverzeichnis	412
Qompiler: Interoperabler und standardisierter	
Quanten-Software-Stack	415
1 Einleitung	416
2 Fortschritt über den Stand der Technik hinaus	417
3 Notwendigkeit eines standardisierten Software-Stacks	419
4 Qrisp: Höhere Quantenprogrammiersprache	422
5 Standardisierbare Schnittstelle	424
6 Nutzungsmöglichkeiten	426

7 Schlussfolgerungen und Ausblick	427
8 Literaturverzeichnis	428
Ansätze für die strukturierte Entwicklung, das Testen und den Betrieb quantenbasierter ICT-Systeme	429
1 Einleitung	430
2 Verwandte Arbeiten	430
3 Quantum DevOps	431
4 Überblick über Tools für Quantum DevOps	435
4.1 Tools für den DEV-Teilzyklus	435
4.2 Tools für den OPS-Teilzyklus	437
4.3 Allgemeine DevOps-Automatisierung	438
5 Benchmarking für Quantum DevOps	439
5.1 Transpilierung und Quantenschaltkreis-Optimierung	440
5.2 Simulationen unter geeigneten Rauschmodellen	441
5.3 Entscheidung über das QPU-Backend	442
5.4 Ausführung auf der QPU	443
6 Anwendungsfälle	444
6.1 Problem des Handlungsreisenden in Quantum DevOps	444
6.2 Variationelle quanvolutionale neuronale Netze mit verbesselter Bildkodierung für die Bildklassifizierung	447
7 Fazit und Ausblick	450
8 Literaturverzeichnis	451
Fraunhofer-Kompetenznetzwerk Quantencomputing	453
1 Fraunhofer-Kompetenznetzwerk Quantencomputing: Ziel und Struktur	453
2 Fraunhofer als Wegbereiter für Forschung und Industrie	455
3 Aktuelle Projekte mit dem IBM Quantum System One	457
4 Schlussfolgerungen und Ausblick	459
5 Literaturverzeichnis	460
Autorenverzeichnis	461