



Quanten-Start-ups made in Germany

Navigation in Spannungsfeldern einer Deep-Technology

Hrsg.: Oliver Riedel, Christian Tutschku, Marco Roth

Quanten-Start-ups made in Germany

Navigation in Spannungsfeldern einer Deep-Technology

Dimitri Evcenko
Dr. Anne-Sophie Tombeil

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

Fraunhofer Heilbronn Forschungs- und Innovationszentren HNFIZ
Forschungs- und Innovationszentrum für Anwendungsorientierte Quanten-KI

Hrsg.: Oliver Riedel, Christian Tutschku, Marco Roth

Juni 2026

Fraunhofer Heilbronn Forschungs- und Innovationszentren HNFIZ

Seit 2025 erweitert die Fraunhofer-Gesellschaft ihr Leistungsportfolio in Heilbronn: In neun Fraunhofer Heilbronn Forschungs- und Innovationszentren (kurz: Fraunhofer HNFIZ) bündeln die acht Institute Fraunhofer IAO, ISI, IPA, SIT, IAIS, IRB, IAF und IIS ihr Fachwissen und adressieren zentrale Zukunftsthemen. Die Schwerpunkte der Forschungsthemen umfassen dabei kognitive Dienstleistungssysteme, Future Skills, Innovation und Foresight, hybride Künstliche Intelligenz, Transformation und Governance, KI-basierte Robotik, Cybersicherheit, anwendungsorientierte Quanten-KI sowie Chip AI. Das Forschungs- und Innovationsportfolio deckt verschiedene Reifegrade ab und ist gezielt auf die aktuellen Anforderungen von Wirtschaft und Gesellschaft ausgerichtet. Von Heilbronn aus sollen die erarbeiteten Lösungen europaweit und darüber hinaus Anwendung finden, um sowohl die Region als auch Deutschland nachhaltig zu stärken.

www.hnfiz.fraunhofer.de

Management-Summary

Die Studie analysiert qualitativ-empirisch basierend auf zehn leitfadengestützten Interviews die aktuelle Situation und Handlungslogiken deutscher Quantentechnologie-Start-ups („Q-Start-ups“) in einem noch nicht etablierten, hochdynamischen Deep-Tech-Markt. Im Fokus stehen Herausforderungen und Strategien, mit denen diese jungen Unternehmen zugleich technologische Entwicklung, Produktbildung und Marktstrukturierung in einem Umfeld hoher Unsicherheit gestalten. Die Quintessenzen im Überblick:

Quanten-Start-ups bewegen sich in einem Geflecht struktureller Spannungsfelder

Diese reichen von der Balance zwischen langfristiger technologischer Vision und unsicherem Return on Investment über die Einbindung in internationale Ökosysteme bis hin zum Umgang mit noch nicht realisierten Quantenvorteilen und prägen zentrale Handlungsstrategien. Dabei strebt das unternehmerische Handeln nicht nach der Auflösung dieser Spannungsfelder, sondern danach, diese aktiv zu gestalten und produktiv zu nutzen.

Die Logik von Wertschöpfung verschiebt sich

Da belastbare Produkte und nachweisbare ökonomische Quantenvorteile bislang häufig fehlen, entsteht Wert zunächst durch vorbereitende, vermittelnde und integrative Leistungen. Dazu gehören die Übersetzung technologischer Potenziale in industrielle Problemstellungen, die Entwicklung von Demonstratoren und Prototypen sowie die Begleitung von Unternehmen bei der Einordnung und Integration quantentechnologischer Ansätze. Produktisierung erfolgt prozessual, oft iterativ und Marktteilnahme gelingt auch vor der eigentlichen Realisierung eines quantenspezifischen Mehrwerts.

Eine Schlüsselrolle kommt der Kommunikation zu

Erwartungsmanagement, Multi-Roadmapping und die Übersetzungsleistung zwischen Forschung, Industrie und Kapitalmarkt werden zu eigenständigen unternehmerischen Kernkompetenzen. Mit diesen gelingt es Vertrauen zu schaffen, unterschiedliche Zeithorizonte zu koordinieren und Anschlussfähigkeit in einem Umfeld, in dem technologische, wirtschaftliche und politische Logiken eng miteinander verflochten sind, zu ermöglichen.

Die Messgröße für unternehmerischen Erfolg verlagert sich

An die Stelle klar quantifizierbarer ökonomischer Effekte tritt die nachvollziehbare Geschwindigkeit von Lernprozessen. Die gezielte Spezialisierung auf Anwendungsdomänen erlaubt es den Start-ups, industriebezogene Problemstellungen systematisch zu erschließen, Wissen aufzubauen und ihre technologischen Ansätze iterativ weiterzuentwickeln. Die daraus resultierende Entwicklungsdynamik fungiert als zentrale Orientierungsgröße für Investoren und Partner.

Kooperation hat hohe strukturelle Bedeutung

Die Entwicklung quantentechnologischer Lösungen ist ohne die Einbettung in hochgradig spezialisierte und international vernetzte Ökosysteme nicht möglich. Start-ups sind auf den Zugang zu Infrastruktur, Wissen und Ressourcen angewiesen und müssen diese Abhängigkeiten mit dem Schutz eigener Innovationsbeiträge ausbalancieren. Wettbewerb tritt in dieser frühen Phase gegenüber kooperativer Marktgestaltung und kollektiver Weiterentwicklung zunächst zurück.

In der Gesamtschau werden Quanten-Start-ups als doppelte Akteure sichtbar

Sie gestalten aktiv die Entstehung eines neuen Marktes und agieren zugleich als Anbieter, die unter unsicheren Bedingungen innovative Geschäftsmodelle entwickeln und implementieren. Wettbewerbsvorteile entstehen nicht allein aus technologischen Durchbrüchen, sondern aus der Fähigkeit, technologische Entwicklung, Marktanforderungen und Ökosystemdynamiken in kohärenter Weise zu verbinden. Quanten-Start-ups fungieren bereits heute als Architekten eines zukünftigen Marktes, in dem Wertschöpfung ebenso stark durch Integration, Übersetzung und Koordination geprägt sein wird wie durch technologische Innovation.

Management-Summary

This study provides a qualitative and empirical analysis of the current landscape and action logics of German quantum technology start-ups (“Q-start-ups”) within a nascent and highly dynamic deep-tech market, based on ten in depth interviews. It examines how these young companies navigate the simultaneous challenges of technological development, productization, and market formation under conditions of significant uncertainty.

Quantum start-ups operate within a set of structural tensions

These include the need to balance long-term technological ambition with uncertain returns on investment, to position themselves within international ecosystems, and to navigate the absence of clearly demonstrated quantum advantages. Rather than resolving these tensions, entrepreneurial action is directed towards actively managing and leveraging them as part of strategic positioning.

The logic of value creation is evolving

In the absence of mature products and demonstrable economic quantum advantages, value is initially generated through preparatory, intermediary, and integrative activities. These include translating technological potential into industrial use cases, developing demonstrators and prototypes, and supporting firms in evaluating and integrating quantum approaches. Productization is inherently iterative, and early market participation often precedes the realization of distinct quantum-specific value.

Communication emerges as a core capability

Expectation management, multi-roadmapping, and the translation between research, industry, and capital markets become critical competencies. These capabilities enable start-ups to build trust, align differing time horizons, and create interfaces across a landscape where technological, economic, and policy logics are closely intertwined.

Performance metrics are shifting

Clearly quantifiable economic outcomes are increasingly complemented by the observable pace of learning and capability development. Strategic specialization in application domains allows start-ups to systematically explore industry-relevant problem spaces, build expertise, and iteratively refine their technological approaches. This development trajectory becomes a key signal for investors and partners.

Cooperation is structurally indispensable

The development of quantum solutions depends on integration into highly specialized and globally connected ecosystems. Start-ups rely on access to infrastructure, knowledge, and resources, while simultaneously managing dependencies and safeguarding their own innovation contributions. At this stage, collaborative market shaping and collective advancement take precedence over direct competition.

Overall, quantum start-ups act as dual agents

They actively contribute to the formation of a new market while simultaneously operating as providers developing and deploying innovative business models under uncertainty. Competitive advantage stems not only from technological breakthroughs, but from the ability to coherently integrate technological progress, market requirements, and ecosystem dynamics. Even at this early stage, quantum start-ups can be seen as architects of a future market in which value creation will depend as much on integration, translation, and coordination as on technological innovation.

Inhalt

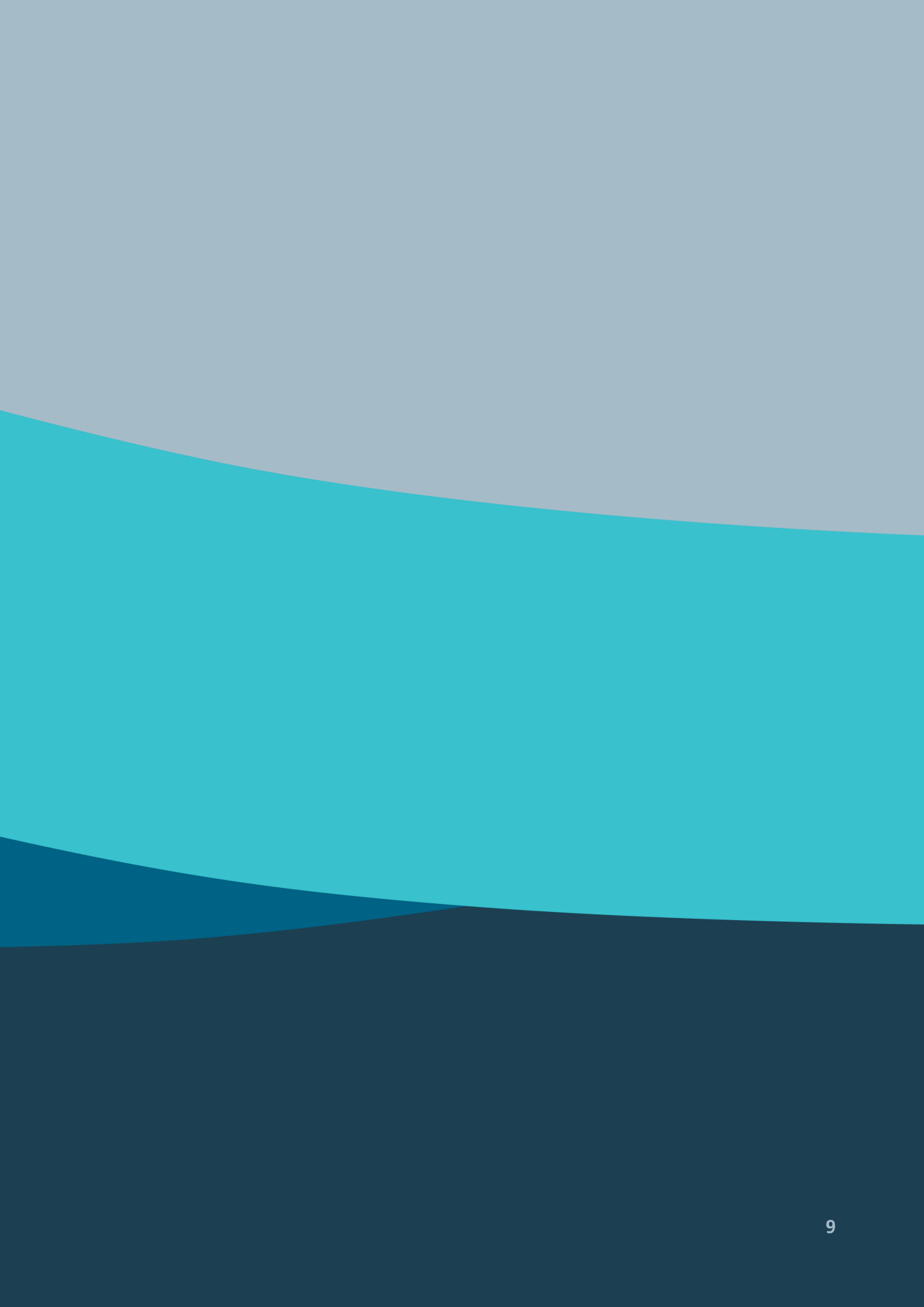
1 Kontext und Motivation	8
2 Methodik	10
3 Die Spannungsfelder im Überblick	12
4 Empirische Befunde und Interpretation	16
Spannungsfeld 1: Langfristige Vision vs. Unklarer ROI-Zeitpunkt	17
Spannungsfeld 2: Ökosystemintegration vs. Start-up-Innovation	25
Spannungsfeld 3: Globale Vernetzung vs. Technologische Souveränität	34
Spannungsfeld 4: Disruption vs. Integration	38
Spannungsfeld 5: Forschungs-Push vs. Industrie-Pull	43
Spannungsfeld 6: Erwartete Quantenvorteile vs. Praktische Realisierung	47
5 Quanten-Start-ups made in Germany: Marktgestalter und Lösungsanbieter	52
Interviewpartner	72
Literaturverzeichnis	75

1 Kontext und Motivation

Quantentechnologie gilt als Deep-Technology oder Deep-Tech¹ mit hoher technologischer Offenheit und langen Entwicklungshorizonten. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie (Mai 2025–März 2026) ist ein Quantentechnologie-Markt in vielen Bereichen noch nicht stabilisiert. Quanten-basierte Anwendungen im Sinne kommerzieller, Mehrwert stiftender Produkte oder Services sind technologisch noch wenig ausgereift, die Nachfrage ist instabil und die Konturen eines etablierten Marktes fehlen weitgehend. Zugleich entstehen neue Gründungen, die die technologische Entwicklungen vorantreiben, erste Produkte andeuten und sich in unsicheren Wettbewerbs- und Kooperationskonstellationen positionieren. Sichtbar sind frühe Marktbildungsprozesse, experimentelle Kooperationsformen sowie eine enge Verschränkung von Forschung, unternehmerischem Handeln und institutioneller Förderung.

Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Studie Quantentechnologie-Start-ups, nachfolgend als Quanten-Start-ups (Q-Start-ups) bezeichnet, als Akteure in diesem **»noch-nicht-Markt«** der emergenten Deep-Tech-Innovationen. Fokussiert wird ein Befund, der in der Marktbildungs- und Geschäftsmodell-Forschung bislang noch wenig adressiert wird: Q-Start-ups entstehen, existieren und agieren, obwohl ein ausgereifter Markt für Quantentechnologien noch nicht vorhanden ist. Dies macht die Frage interessant: Was tun diese jungen Unternehmen konkret, um in einem noch-nicht-Markt gleichzeitig Technologie zu entwickeln, Produkte zu formen, Marktstrukturen mit hervorzubringen und sich mit und gegenüber anderen Akteuren zu positionieren?

¹ Unter Deep-Tech wird in dieser Studie, analog (Cabanès 2026), eine Technologie verstanden, die auf Basis wissenschaftlicher Durchbrüche ein hohes transformatives Potenzial in verschiedenen Domänen besitzt, von langen Entwicklungszyklen gekennzeichnet ist und mit einer hohen technologischen und Markt-bezogenen Unsicherheit einhergeht. (Cabanès 2026)



2 Methodik

Die Studie ist in der anwendungsorientierten Forschung verortet² und ist von einer doppelten Motivation geleitet. Erstens zielt sie darauf ab, empirisch zu rekonstruieren, wie Q-Start-ups unter Bedingungen radikaler Unsicherheit handeln, ob, und wenn ja welche, Muster von Praktiken sich abzeichnen, die Handlungsfähigkeit in der Marktgestaltung ermöglichen. Zweitens werden die empirischen Befunde zu Orientierungswissen verdichtet, das sowohl für die strategische Weiterentwicklung des entstehenden Q-Hubs Heilbronn als auch für Gründungsinteressierte und Gründende, Förderpolitik, Investoren und etablierte Unternehmen nutzbar ist. Damit verbindet die Untersuchung ein interpretatives Erkenntnisinteresse mit einem praxisnahen Anspruch, um Gestaltungsspielräume und Wertbeiträge in frühen Deep-Tech-Marktphasen sichtbar zu machen.

In der theoretischen Einordnung verknüpft die Arbeit zwei im Gegenstandsbereich eng miteinander verwobene Perspektiven: Marktentstehung und Geschäftsmodellentwicklung. Ergänzend werden Aspekte der Ökosystemforschung einbezogen.

Im Anschluss an Forschungen zur Marktentstehung werden Märkte nicht als gegebene Struktur verstanden, sondern als prozesshafte, ko-evolutionäre Konfiguration von Akteuren, Technologien und Institutionen betrachtet. Es wird angenommen, dass sich technische Definitionen und Technologie-Roadmaps, Zukunftsbilder und Geschäftsmodelloptionen sowie mehr oder weniger institutionalisierte Regeln und Governance-Mechanismen wechselseitig beein-

flussen und über längere Zeit zu einer Marktbildung führen.

Zudem werden Anknüpfungspunkte zur Geschäftsmodellforschung, insbesondere zu Prozessen der Geschäftsmodellinnovation, genutzt. Herausgearbeitet wird, wie sich Q-spezifische Besonderheiten, wie beispielsweise lange Entwicklungszeiten, hohe Unsicherheit über Zeiten und Formen eines Quantenvorteils, starke Abhängigkeit von Ökosystemen, Infrastrukturen und Förderung auf Entwicklung und Implementierung von Geschäftsmodellen auswirken.

In beiden genannten Perspektiven spielt die Begrifflichkeit des bzw. der Ökosysteme, fachlich, lokal, national, transnational eine Rolle. Q-Start-ups werden als Akteure verstanden, die sich in Ökosystemen verschiedener Granularität bewegen. Die Tatsache, dass Kooperationen strukturell notwendig sind und sich die Integration in fachliche und lokale Ökosysteme, die globale Vernetzung aber auch der Aspekt technologischer Souveränität verschränken bzw. überlagern und gleichzeitig bedient werden müssen, wird berücksichtigt.

Der spezifische Beitrag der Studie liegt darin, diese Perspektiven auf das ausgeprägt wissenschaftsnaher Deep-Tech-Feld der Quantentechnologien zu beziehen und empirisch zu erkunden, wie Marktbildung auch ohne stabile Produkte oder nachweisbare technologische bzw. wirtschaftliche Vorteile erfolgt.

² Diese Studie ist entstanden im Rahmen der Aktivitäten des Fraunhofer Forschungs- und Innovationszentrums Anwendungsorientierte Quanten-KI. Sie ist durch die Frage motiviert, wie Q-Start-ups heute agieren und wie sie auf ihrem Weg zu Produkt und Markt in einem entstehenden lokal/regionalen Q-Hub unterstützt werden können.

Im Mittelpunkt stehen die Fragen:

1

Inwieweit prägen definierte Spannungsfelder das Handeln von Q-Start-ups in einem noch nicht etablierten Markt unter hoher Unsicherheit? Welche Herausforderungen werden benannt, welche Handlungsstrategien lassen sich erkennen?

2

Wie wirkt sich das Handeln in Spannungsfeldern auf die Entwicklung und Implementierung von Geschäftsmodellinnovationen aus und welche Q-Spezifika beeinflussen diesen Prozess?

Methodisch entwickelt die Untersuchung einen feldnahen Zugang über sechs Spannungsfelder, die aus einer Literaturrecherche und eigenen Erfahrungen in anwendungsorientierten Q-Projekten abgeleitet und in Hypothesen gefasst wurden. Diese Spannungsfelder dienen als heuristische Struktur, um zentrale Dynamiken und Zielkonflikte in einem entstehenden Deep-Tech-Markt zu erfassen. Sie bilden den Ausgangspunkt für halbstandardisierte, leitfadengestützte Interviews mit Gründern und Geschäftsführern von Q-Start-ups. Dieser Spannungsfeld-Ansatz strukturiert sowohl die Datenerhebung als auch die anschließende qualitative Inhaltsanalyse. Ergänzend fließen Erfahrungen aus der anwendungsorientierten Forschung im Q-Bereich ein und tragen zu einem theoretisch aufmerksamen und feldnahen Zugang bei.

Die empirische Datenerhebung erfolgte durch vertiefende, ca. zweistündige Online-Interviews mit Gründern sowie Geschäftsführern von Q-Start-ups. Die Auswahl der Interviewpartner erfolgte durch Anfrage und Antwortbereitschaft bei der im Sommer

2025 recherchierten Grundgesamtheit nationaler Q-Start-ups³. Die Interviews wurden aufgezeichnet, vollständig transkribiert und mittels qualitativer Inhaltsanalyse ausgewertet. Der erste Analyseschritt erfolgte Software-gestützt⁴. Die Transkripte wurden von zwei Forschenden unabhängig voneinander codiert, die Ergebnisse abgeglichen und konsolidiert. Ergänzend zur Doppelcodierung wurde ein mehrstufiges Analyseraster entwickelt. Für jedes Spannungsfeld wurden zentrale empirische Kernaussagen im Originalwortlaut identifiziert, zu verdichteten Quintessenzen zusammengeführt und anschließend von zwei Forschenden unabhängig interpretiert.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in je einem Kapitel pro Spannungsfeld in einer klaren Trennung zwischen empirischen Befunden und analytischer Interpretation dieser Befunde. In jedem Kapitel werden die jeweiligen empirischen Befunde, sortiert in benannte Herausforderungen und die berichteten Praktiken im Umgang mit diesen Herausforderungen, nachfolgend als Handlungsstrategien bezeichnet, dargestellt. Auf dieser Grundlage wird jeweils eine analytische Interpretation vorgestellt.

Diese einzelnen Ergebnisse pro Spannungsfeld werden ergänzt durch eine die Spannungsfelder übergreifende Zusammenführung. Dabei werden aus dem Material empirisch rekonstruierbare Handlungsschwerpunkte herausgearbeitet, ohne normative Handlungsempfehlungen im engeren Sinne zu formulieren. Zudem werden Ansatzpunkte für konzeptionelle Modellbildungen abgeleitet. Auf diese Weise bietet die Studie Orientierungswissen, zeigt Gestaltungsoptionen auf und kann als Beitrag dienen für weiterführende Forschung, strategische Entscheidungen und politische Einordnung in Deep-Tech-Kontexten.

³ Es wurden insgesamt zehn Interviews geführt. Ausgehend von einer Grundgesamtheit von ca. 20 Q-Start-ups in Deutschland in der Interviewphase Mai 2025-März 2026 wurden damit ca. 50% der nationalen Q-Start-ups erreicht. Gesprächspartner waren Gründer oder eingesetzte Geschäftsführer.

⁴ Für die qualitative Datenanalyse wurde MAXQDA verwendet.

3 Die Spannungsfelder im Überblick

Die folgende Übersicht fasst den Spannungsfeldansatz zusammen, der für diese Studie entwickelt wurde. Gezeigt werden die sechs Hypothesen sowie die dazugehörigen sechs Pol-Paare. Jedem Spannungsfeld ist zudem eine typische Handlungsarena aus der Gründerpraxis zugeordnet.

Der Ansatz erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Er bleibt für die Zwecke dieser Studie bewusst auf einem hohen Abstraktionsniveau. Ziel ist es, das Feld so zu strukturieren, dass konkrete Praktiken von Q-Start-ups fassbar werden. Praktiken die im Alltag von den Start-ups zwischen Technologieentwicklung, Finanzierung, Partnerschaften, Alleinstellung und Erwartungsmanagement entstehen, bevor schematische Geschäftsmodell- oder Strategietypologie greifen. In diesem Sinne versteht sich der Spannungsfeldansatz als praxisnaher, explorativer Zugang, der heterogene, teilweise eklektische Handlungsweisen systematisiert und damit produktive Anknüpfungspunkte sowohl für die Entwicklung von Inkubations- und Unterstützungsangeboten als auch für vertiefende, stärker theoriebildende Forschung zu Quantentechnologien und Deep-Tech-Märkten anbietet.



Spannungsfeld 1



Hypothese

»Q-Start-ups bewegen sich in einem Spannungsfeld zwischen langfristiger Vision und schwer prognostizierbarem Return on Investment (ROI). Aufgrund einer doppelten Asymmetrie zwischen Gründenden und Investoren – im technischen Verständnis und im Interessen- und Zeithorizont – sind die Start-ups gezwungen, ihre langfristigen Entwicklungsstrategien so zu kommunizieren, dass diese trotz unsicherer wirtschaftlicher Verwertbarkeit für Kapitalgeber nachvollziehbar und investitionswürdig erscheinen.«

HANDLUNGSARENA

Technologische
Ambition

Finanzierung &
Investorenbeziehung

Renditeerwartung

Spannungsfeld 2



Hypothese

»Q-Start-ups müssen sich innerhalb eines komplexen und stark vernetzten Ökosystems strategisch positionieren. Kooperationen mit spezialisierten Partnern eröffnen Zugang zu essenziellen Ressourcen und Technologien, können jedoch zugleich die Innovationsfreiheit begrenzen. Der Erfolg hängt davon ab, wie gut es den Start-ups gelingt, die Vorteile der Ökosystemeinbettung mit dem Schutz und Ausbau eigener Alleinstellungsmerkmale zu verbinden.«

HANDLUNGSARENA

Kooperation

Strategische
Positionierung

Alleinstellungsmerkmal &
Geistiges Eigentum

Spannungsfeld 3



Hypothese

»Q-Start-ups sind auf internationale Kooperationen angewiesen, um Zugang zu Schlüsselressourcen und Q-Infrastrukturen zu erhalten. Gleichzeitig müssen sie Strategien entwickeln, um Abhängigkeiten zu begrenzen und ihre Position im Spannungsfeld zwischen globaler Zusammenarbeit und regionaler Souveränität zu behaupten.«

HANDLUNGSARENA

Globales Sourcing

Standortpolitik & geopolitische Abhängigkeiten

Regionale Interessen & Souveränität

Spannungsfeld 4



Hypothese

»Q-Start-ups bewegen sich in einem Spannungsfeld zwischen der Entwicklung disruptiver Anwendungen und den gegenwärtigen Erfordernissen technischer, organisatorischer und kompetenzbezogener Integration. Erfolgsversprechend sind Strategien, die das langfristige Disruptionspotenzial mit kurzfristig realisierbaren, hybriden Nutzungsszenarien verbinden.«

HANDLUNGSARENA

Radikale Durchbrüche & Business Transformation

Technische & organisatorische Einführung

Anschlussfähigkeit an Realitäten

Spannungsfeld 5



Hypothese

»Q-Start-ups agieren in einem Spannungsfeld zwischen einem starken Forschungs-Push und einem noch schwachen Industrie-Pull. Während wissenschaftliche Entwicklungen den technologischen Fortschritt vorantreiben, bleibt die wirtschaftliche Nachfrage oft unklar. Die Start-ups müssen daher Wege finden, ihre forschungsgetriebenen Ansätze so zu übersetzen, dass sie für potenzielle Anwender konkrete, marktorientierte Nutzenversprechen enthalten.«

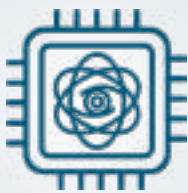
HANDLUNGARENA

Erkenntnis

Innovationslogik &
Nachfrageentwicklung

Erträge

Spannungsfeld 6



Hypothese

»Q-Start-ups agieren in einem Spannungsfeld zwischen hohen Erwartungen an Quantenvorteile und deren derzeit noch begrenzter praktischer Realisierung. Ihr Erfolg hängt maßgeblich davon ab, wie sie das Erwartungsmanagement zwischen Investoren, Anwendern und Forschungsgemeinschaft gestalten und dabei eine Balance zwischen Zukunftsvisionen und gegenwärtigen technologischen Möglichkeiten finden.«

HANDLUNGARENA

Vision

Erwartungsmanagement
im Innovationssystem

Grenzen

4 Empirische Befunde und Interpretation

Spannungsfeld 1: Langfristige Vision vs. Unklarer ROI-Zeitpunkt

Hypothese

»Q-Start-ups bewegen sich in einem Spannungsfeld zwischen langfristiger Vision und schwer prognostizierbarem Return on Investment (ROI). Aufgrund einer doppelten Asymmetrie zwischen Gründenden und Investoren – im technischen Verständnis und im Interessen- und Zeithorizont – sind die Start-ups gezwungen, ihre langfristigen Entwicklungsstrategien so zu kommunizieren, dass diese trotz unsicherer wirtschaftlicher Verwertbarkeit für Kapitalgeber nachvollziehbar und investitionswürdig erscheinen.«

Beschreibung des Feldes aus den Interviews: Mit Entwicklungsarbeit zum Mehrwert

Q-Start-ups operieren im Deep-Tech-Bereich. Ein wesentlicher Unterschied zwischen Gründung im Deep-Tech- und im High-Tech-Bereich besteht darin, dass im Deep-Tech-Markt die für Produktisierung und Kommerzialisierung nötige Technologiereife noch geschaffen werden muss. Die Entwicklung der Technologiereife bildet bei Deep-Tech-Unternehmen den Fokus der Aktivitäten. Der Anteil an Wissenschaftlichkeit ist hoch. Damit ist, wie bei allen wissenschaftlichen Aktivitäten, die Möglichkeit des Scheiterns real, wodurch das Risiko für Investoren vergleichsweise hoch ist.

Erst wenn eine gewisse notwendige Technologiereife erreicht ist, kann auch ein ROI-Zeitpunkt bestimmt werden. Da der Zeitpunkt der Erreichung der Technologiereife nicht verlässlich angegeben werden kann, bleibt auch letzterer im Ungefähren. Der dem Kunden bzw. Investoren versprochene Mehrwert bleibt oft nur theoretisch, wodurch deren Akquise erschwert wird.

Auf sich ändernde Rahmenbedingungen, wie beispielsweise neue Hardware-Modalitäten oder Industrieanforderungen, können Q-Software-Start-ups grundsätzlich agiler reagieren als Q-Hardware-Start-ups⁵. Q-Software-Start-ups sagen aus, dass sie ihre Softwareprodukte zum einen so entwerfen bzw. anpassen können, dass sie auf unterschiedlichen Q-Hardware-Modalitäten ausgeführt werden können. Zum anderen sind die Softwareprodukte leichter anpassbar an spezielle Industrieanforderungen von individuellen Kunden. Damit verglichen, können Q-Hardware-Start-ups weniger flexibel agieren. Sie sind meist Ausgründungen aus Universitäten oder Forschungseinrichtungen, haben langjährig Expertenwissen und Erfahrungen mit einer bestimmten Hardware-Modalität aufgebaut und verfügen über oder haben Zugang zu spezialisierten Infrastrukturen. Damit sind sie eng an die jeweilige Hardware-Modalität gebunden, sowohl was ihre Fachkenntnis als auch bereits getätigte Investitionen betrifft. Der fallbezogene, schnelle Wechsel von beispielsweise auf supraleitenden Qubits basierenden Systemen hin zu auf Ionenfallen basierenden Systemen ist weder kurzfristig noch einfach möglich. Auch die Integration konkreter Industrieanforderungen in das Hard-

⁵ Unter Q-Software-Start-ups werden hier Start-ups verstanden, deren Fokus im Wesentlichen auf der Entwicklung intangibler Güter im Q-Bereich liegen (z. B. Algorithmen, Entwicklungswerkzeuge, Anwendungen, etc.). Im Gegensatz dazu fokussieren sich Q-Hardware-Start-ups auf die Entwicklung tangibler Güter im Q-Bereich (z. B. Prozessoren, Kontrollelektronik, Computer).

ware-Produkt ist deutlich herausfordernder als bei Q-Software-Start-ups. Q-Hardware auf spezialisierte Bedarfe anzupassen, greift tief in die damit verbundenen technologischen Prozesse ein. Aufgrund bislang weitgehend fehlender Standardisierung von Prozessen ist deren Anpassung an individuelle Anforderungen mit hohem Aufwand und entsprechenden Kosten verbunden.

Wenn Kapitalinvestoren sich für ein Q-Hardware-Start-up interessieren, verfügen sie in der Regel über ein grundlegendes Verständnis der spezifischen Hardware-Modalität, auf die das Start-up setzt, einschließlich ihrer Potenziale und Risiken. Leistungsvergleiche mit anderen Modalitäten, beispielsweise im Hinblick auf die Anzahl der erreichten Qubit-Anzahl, spielen kaum eine Rolle. Im Vordergrund steht für die Beurteilung der Potenziale eines Start-ups vielmehr, mit welcher Geschwindigkeit sich die Technologieentwicklung in der jeweiligen Modalität in der Vergangenheit vollzogen hat. Dieser Vergleich fällt vielen Investoren, trotz grundlegender Kenntnisse im Feld, fachlich jedoch schwer.

Bei Q-Software-Start-ups richtet sich der Blick der Investoren weniger auf die technologische Weiterentwicklung an sich. Wichtiger ist hier plausibel darzustellen, welchen zusätzlichen Nutzen die Lösung in industrienahen Anwendungsfällen stiftet. Zur Einordnung dieses Mehrwerts werden häufig Leistungsvergleiche mit etablierten Technologien wie Künstliche Intelligenz (KI) oder Machine Learning (ML) herangezogen.

Jeder Investor verfolgt eigene Prioritäten und Motive, wenn er in ein Q-Start-up investiert. Dennoch zeigen die Daten dieser Studie keinen Fall, in dem ein Start-up seine Gesamtstrategie aufgrund kurzfristiger Erwartungen im Kontext einer Finanzierungsrunde grundlegend anpassen musste. Stattdessen werden die jeweiligen Prioritäten eines Investors in der Planung und Umsetzung der Entwicklungsstrategie nach Möglichkeit berücksichtigt. Legt ein Investor

besonderes Gewicht auf einen spezifischen Aspekt, etwa die Verbesserung der Gate Fidelity, werden die damit verbundenen Arbeiten vom Start-up zeitlich entsprechend priorisiert.

Herausforderungen und Handlungsstrategien: Technologischer Reifegrad in Entwicklung, Markt im Aufbau und komplizierte Förderlandschaft

Herausforderung: Technologiereife, Markt in Entstehung und Finanzierung

Aus Sicht der Start-ups besteht in Deutschland ein Mangel an privaten Kapitalgebern, die auf Deep-Tech spezialisiert sind und mit den damit verbundenen Besonderheiten umgehen können: schwer absehbarer ROI-Zeitpunkt, ausgeprägter Forschungsfokus, hohe fachliche Komplexität, erhöhtes Risiko eines Misserfolgs und langen Entwicklungszyklen bis zur Technologie- und damit Marktreife.

“

Auf Seiten von Kapitalgebern und Unternehmen braucht es mehr Mut zur Innovation, einschließlich der Bereitschaft, das Scheitern von Plänen in Kauf zu nehmen, um echten Fortschritt zu ermöglichen.

- Dr. Marcel Quennet

”

Bei Q-Hardware-Start-ups kommt der kapitalintensive Aufbau und Betrieb von Produktionsinfrastruktur

und Laboren hinzu. Für alle Q-Start-ups gilt zudem, dass sie ihre Technologieentwicklung häufig durch öffentlich geförderte Projekte finanzieren. Bei einem Finanzierungsmix aus öffentlichen und privatwirtschaftlichen Mitteln müssen sich Deep-Tech-Investoren auf die damit verbundenen Rahmenbedingungen einstellen, wie beispielsweise der Pflicht zur (Teil-)Veröffentlichung von geistigem Eigentum.

Zwar existiert im nationalen und europäischen Raum eine Handvoll Deep-Tech-Investoren. Wenn diese jedoch bereits ein Deep-Tech-Start-up im Portfolio haben, erweist es sich häufig als schwierig, sie von einem weiteren Deep-Tech-Engagement zu überzeugen.

Handlungsstrategie: Arbeiten mit Roadmaps

Um den Herausforderungen einer geringen technologischen Reife, des im Entstehen befindlichen Marktes und anspruchsvoller Finanzierungsbedingungen zu begegnen, setzen die Start-ups Roadmaps als zentrales Instrument ein. Roadmaps erleichtern die Kommunikation mit Investoren und potenziellen Kunden und tragen zugleich dazu bei, die langfristige Vision im Unternehmen selbst zu verankern. Häufig werden mehrere Versionen entwickelt, jeweils zugeschnitten auf die adressierte Zielgruppe: Investoren, Anwender oder die interne Belegschaft. Roadmaps skizzieren die längerfristige Zielperspektive und machen die geplanten Schritte sichtbar. Sie vermitteln fundiert, welchen Mehrwert die angestrebte Lösung bieten soll und warum ein darauf ausgerichtetes Geschäftsmodell als tragfähig angesehen wird. Die langfristige Strategie zur Forschung und Entwicklung (F&E), Produktisierung und Kommerzialisierung der Kernleistung wird dabei sowohl anhand eigener Meilensteine als auch in Relation zur allgemeinen Entwicklung der Quantentechnologien dargestellt. Q-Software-Start-ups können so etwa transparent machen, welche Fortschritte bei der Verfügbarkeit einer bestimmten

Anzahl an Qubits für ihre Lösungsansätze erforderlich sind.

Die Kommunikation mit Kapitalinvestoren wie auch mit (potenziellen) Anwendern wird durch den Einsatz solcher Roadmaps transparenter und besser nachvollziehbar. Dies gilt prospektiv, wenn es um »die Wette auf Erfolg« geht. Es gilt auch retrospektiv, und zwar sowohl wenn Meilensteine verfehlt wurden und eine neue Erfolgsperspektive begründet werden muss, als auch wenn rückblickend nachweisbar wird, dass und in welchem Tempo in der Vergangenheit Fortschritte erreicht wurden. Teilweise werden in die jeweiligen Roadmaps konkrete Anwendungsfälle eingeordnet, um eine gemeinsame Gesprächsgrundlage mit Industriekunden zu schaffen. Dadurch wird ersichtlich, welche Anwendungsfälle aus Sicht des Start-ups bei welcher Technologiereife adressierbar sein werden.

“

Wenn wir über Deep-Tech reden, reden wir über sehr langfristige Projekte. Dafür braucht es Vertrauen: in den Prozess, ins Team, ins Produkt. Und wir merken: Es hilft enorm, dass wir als Eqcited mit einem Management-Team an Bord sind, beim Einwerben von Fördergeldern und im Dialog mit privaten Investoren. Genau dort braucht es diese Übersetzungsarbeit.

- Jan Kegelberg

”

Darüber hinaus enthalten die Roadmaps in vielen Fällen auch nichttechnische Meilensteine, die für die Skalierung des Start-ups relevant sind. Dazu gehören beispielsweise der Aufbau eines Vertriebsteams oder die Etablierung von Produktionskapazitäten. Ergän-

zend vermitteln sie, wie das Start-up bis zur Technologiereife Umsätze generieren will, etwa indem das Leistungsangebot zunächst auch Beratungsleistungen oder KI-basierte Lösungen umfasst.

Handlungsstrategie: Ein breites Leistungsangebot realisieren

Um die Technologieentwicklung als Kernleistung von Q-Start-ups voranzutreiben und zugleich ihre Attraktivität für Investoren durch erste Umsätze zu erhöhen, setzen viele auf ein breites Leistungsportfolio. Während die technologische Weiterentwicklung häufig im Rahmen öffentlich geförderter Projekte erfolgt, werden industrienaher Anwendungsfälle, trotz noch begrenzter Technologiereife, gemeinsam mit Kunden so weit konzipiert und umgesetzt, wie es der aktuelle Stand der Technik zulässt. Dabei entstehen Minimum Viable Products (MVP), die die Grundkonzeption der Q-Lösung zunächst mit einer geringen Anzahl an Qubits realisieren und später, bei Verfügbarkeit stärkerer Hardware, relativ einfach skaliert und angepasst werden können. Diese Lösungskonzepte werden teilweise in die Roadmaps eingebettet, um zu verdeutlichen, zu welchem Zeitpunkt mit welcher Leistungsfähigkeit zu rechnen ist. Insgesamt streben die Start-ups den frühen Aufbau von langfristigen Kooperationen mit Industriekunden an. Diese werden nur durch eine kontinuierliche, transparente und verständliche Kommunikation über die aktuelle und absehbare Leistungsfähigkeit von Q-Lösungen tragfähig.

Industriekunden müssen zunächst häufig mit den Grundlagen und Potenzialen von Quantentechnologien vertraut gemacht werden. Start-ups übernehmen diese Wissens- und Vermittlungsarbeit teils selbst, indem sie Beratungs- und Schulungsangebote in ihr Leistungsportfolio integrieren. Bei der Entwicklung ihrer Lösungen, oftmals spezialisierte technologische Nischenprodukte, greifen sie zudem auf etablierte Technologien wie KI und ML zurück. Diese

dienen einerseits als technischer Anknüpfungspunkt, andererseits als Referenzrahmen für Leistungsvergleiche. Denn eine neuartige Q-Lösung kann ihren Mehrwert nur dann entfalten, wenn sie gegenüber bestehenden Technologien einen erkennbaren Vorteil bietet. Dieses Vorgehen knüpft an das Interesse von Industrieunternehmen an, sich auf die Nutzung von Quantentechnologie vorzubereiten und »quantum ready« zu werden. Zugleich ermöglicht es den Start-ups, spezifische Industrieanforderungen frühzeitig zu identifizieren und in den Entwicklungs- und Produktisierungsprozess einfließen zu lassen.

“

Q-Lösungen müssen konsequent Ende-zu-Ende gedacht werden: von der Technologie über das Produkt bis hin zur Kommerzialisierung. In Deutschland liegt der Fokus dabei noch zu häufig nur auf der Technologie und zu selten auf dem fertigen Produkt.

- Dr. Marcel Quennet

”

Herausforderung: Komplizierte Förderlandschaft

Die mit der Nutzung öffentlicher Fördermittel verbundenen Auflagen und Bedingungen schränken eine agile Arbeitsweise der Q-Start-ups häufig ein. So müssen die Inhalte öffentlich geförderter Projekte oft mehrere Jahre vor Projektabschluss festgelegt werden. Abweichungen aufgrund von nicht vorhersehbaren technologischen Entwicklungen sind jeweils gesondert zu begründen. Änderungen sind genehmigungspflichtig, aufwändig, zeitintensiv und mit Unsicherheiten verbunden. Dadurch besteht das Risiko, dass Projektergebnisse zum Zeitpunkt des Ab-

schlusses und der Veröffentlichung technologisch bereits überholt sind. Für Investoren, zahlende Kunden, aber auch für die Entwickler selbst ist das wenig attraktiv.

Zugleich sehen die Start-ups die forschungsintensive Arbeit an der Technologiereife einerseits und die möglichst frühzeitige Produktisierung und Kommerzialisierung andererseits nur durch eine Kombination aus öffentlichen Fördergeldern und privatem Kapital als realisierbar an. Nur dieser Finanzierungsmix erlaubt es, die Ressourcen zu mobilisieren, die für marktnahe Aktivitäten, wie beispielsweise Marketing, benötigt aber nicht von öffentlichen Mitteln abgedeckt werden. Damit einher geht die Notwendigkeit, Ziele miteinander zu versöhnen, die sich langfristig ergänzen, kurzfristig aber teilweise entgegenstehen: Während öffentliche Förderprogramme den Schwerpunkt auf Technologieentwicklung und Veröffentlichung der Ergebnisse (Open Source) legen, fokussieren Kapitalinvestoren die Skalierung und Kommerzialisierung des Geschäftsmodells sowie den Schutz des geistigen Eigentums der Start-ups (Closed Source).

Öffentliche Programme unterstützen vorrangig die Demonstration der Leistungsfähigkeit von Quantentechnologie (»Technologiedenke«) und deutlich weniger die Überführung in marktreife Produkte, sodass für den Aufbau skalierungsrelevanter Strukturen oftmals keine Fördermittel bereitstehen. Von dieser Orientierung auf (Hardware-) Technologie profitieren Q-Hardware-Start-ups stärker als ihre Software-Pendants, da sich Aufgaben im Bereich der Forschung und Entwicklung sowie Investitionen eindeutig abgrenzen lassen. Kapitalgeber hingegen haben zwar ein ausgeprägtes Interesse an der Kommerzialisierung (»Produktdenke«), können die dafür notwendige Erhöhung der Technologiereife aber nicht eigenständig finanzieren, weil das verfügbare Wagniskapital in Europa, im Vergleich etwa zu den USA, weniger umfangreich ist bzw. seltener in entsprechend risikoreiche Vorhaben fließt. In der Konsequenz verlagern zahlreiche Start-ups nach Erreichen

zentraler technologischer Meilensteine ihren Standort ins Ausland, um den für Skalierung und Produktentwicklung erforderlichen »Kapitalsprung« dort zu vollziehen, wo er realistischer erscheint.

“

Hauptsächlich arbeiten wir daran, die Technologie so weit zu entwickeln, dass damit wirklich Probleme gelöst werden und sich der Markt öffnet.

- Dr. Johannes Lang

”

Handlungsstrategie: Managementkompetenzen in der Geschäftsführung ausbauen

Um das für die Technologieentwicklung und -kommerzialisierung benötigte Kapitalvolumen hierzulande aufbringen zu können, ist die gezielte Kombination von öffentlichen Fördermitteln mit privatem Investitionskapital hilfreich und findet in gewissem Maße bereits statt. Während die öffentliche Förderung zur Technologieentwicklung beiträgt, schafft privates Kapital Freiheitsgrade für Kommerzialisierung und Skalierung, wie beispielsweise den Aufbau einer Vertriebsstruktur.

Die Zusammenstellung von Akteurskonstellationen in öffentlich-privaten Mischfinanzierungen ist eine diffizile Aufgabe. Die einzelnen Akteure – Start-ups, Fördergeber und Kapitalinvestoren – verfolgen unterschiedliche Ziele: Umsetzung der langfristigen Entwicklungsstrategie, Technologieentwicklung, Kommerzialisierung und ROI. Um den Anforderungen im Hinblick auf die Identifikation geeigneter Partner sowie der Stakeholder-Kommunikation gerecht zu werden, setzen die Start-ups, mehr oder weniger ausge-

prägt, auf dedizierte Management-Rollen, die in der Geschäftsführung angesiedelt sind. So kümmert sich beispielsweise ein CFO (Chief Financial Officer) um die Identifizierung von passenden Förderprogrammen und geeigneten Kapitalinvestoren, während sich ein CIPO (Chief Intellectual Property Officer) der rechtlichen Sicherung des geistigen Eigentums des Start-ups widmet. Auch die Etablierung eines mit Managementenerfahrung ausgestatteten (Co-) CEO (Chief Executive Officer), der die Ausarbeitung der Start-up-Strategie sowie die Kommunikation mit den verschiedenen Stakeholdern übernimmt, findet statt. Diese Rollen werden teilweise von außen mit professioneller Managementkompetenz besetzt. Damit wird der Situation Rechnung getragen, dass viele Start-ups Ausgründungen aus Universitäten oder anderen Forschungsorganisationen sind und die Gründer einen stark wissenschaftlichen und weniger betriebswirtschaftlich geprägten Hintergrund aufweisen. Durch die Verteilung der Management-Aufgaben an dedizierte Rollen können sich Gründer vermehrt auf die eigentliche Technologieentwicklung konzentrieren. In anderen Fällen sind es die ausgründenden Forschenden selbst, die Geschäftsführungsaufgaben übernehmen und sich das Wissen dazu »on the job« erarbeiten.

Zusammenfassung und Interpretation: Kommunikation und Beziehungspflege im Spannungsfeld von technologischer Vision und Kapitalinteressen

Die empirischen Ergebnisse stützen die Hypothese zum ersten Spannungsfeld dieser Studie. Q-Start-ups bewegen sich zwischen langfristiger technologischer Ambition seitens der Gründer und schwer prognostizierbaren Renditeerwartungen, die den privaten Kapitalgebern kommuniziert werden müssen.

Wissensasymmetrien im technischen Verständnis bestehen, fallen aber, insbesondere wenn es um Q-Hardware geht, weniger ausgeprägt aus, als bei der Komplexität der Technologie erwartbar wäre. Deutlich ausgeprägter sind asymmetrische Interessen- und Zeithorizonte zwischen Gründenden, privaten Investoren und öffentlichen Geldgebern; der Faktor Zeit bis zu einem aus Investorensicht vertretbaren ROI erweist sich als zentrale Konfliktlinie.

Im Interesse von Gründern und privaten Investoren liegt es, den Wert des Unternehmens, der maßgeblich durch das geistige Eigentum bestimmt ist, zu sichern und möglichst weitgehend vor externem Zugriff zu bewahren. Öffentliche Fördergeber haben hingegen das Interesse, die mit staatlichen Mitteln finanzierten Ergebnisse möglichst breit zugänglich zu machen. Obwohl alle drei Akteure darauf abzielen, eine bestimmten Technologiereife zu erreichen, die die Grundlage für einen Q-Markt bildet, setzen sie unterschiedliche Schwerpunkte. Öffentliche Geldgeber fokussieren vor allem auf die Technologieentwicklung. Private Investoren haben die anschließende Produktisierung, Kommerzialisierung und Skalierung im Blick. Gründer stehen, so zeigt diese Studie, häufig dazwischen und können die Brücke bilden zwischen Verwirklichung einer technologischen Ambition und Bildung eines Marktes. Sie entwickeln ihre Stärke, wenn es gelingt, das Denken in Technologie mit dem Denken in Produkten zusammenzubringen. Die Analyse von Spannungsfeld 1 zeigt, dass die Start-ups ihre technologische Langfristspektive mit den renditeorientierten Erwartungen privater Kapitalgeber in Einklang bringen müssen. Die beobachtete doppelte Asymmetrie, im technischen Verständnis sowie im Interessen- und Zeithorizont, prägt dabei die Art und Weise, wie Start-ups ihre Entwicklungsstrategien kommunizieren und Beziehungen zu Investoren gestalten.

Aus den empirischen Daten lassen sich drei miteinander verbundene Handlungsschwerpunkte ableiten.

Multi-Roadmapping als strategische Kernpraxis etablieren

Die Start-ups erhöhen ihre Handlungsfähigkeit im Spannungsfeld von Vision und Kapitalinteressen, wenn es ihnen gelingt, die unterschiedlichen Logiken der verschiedenen Anspruchsgruppen zu adressieren: Dazu gehören ein internes Team, Investoren, Kunden sowie externe Ökosystempartner und -begleiter. Als Praxis bietet sich eine mehrschichtige Technologiekommunikation mittels Multi-Roadmapping an:

- **Interne Visions-Roadmap:** langfristige wissenschaftlich-technische F&E-Pfade.
- **Investoren-Roadmap:** finanzierungsrelevante Meilensteine, Plausibilisierung von Entwicklungsfortschritt und ROI-Pfad.
- **Kunden-Roadmap:** kurz- und mittelfristig nutzbare Anwendungsszenarien, Demonstratoren und Service-Elemente.
- **Externe Ökosystem-Roadmaps:** Orientierung an Hardware-Entwicklungszyklen und Roadmaps anderer F&E-Akteure sowie dem politischen Raum.

Die Praxis des Multi-Roadmapping ist geeignet, Kohärenz in der Technologiekommunikation unter Bedingungen hoher Unsicherheit zu erhöhen. Unterschiedliche Zeithorizonte können verknüpft und Entwicklungspfade nachvollziehbar dargestellt werden, ohne das jeweilige Profil zu verwässern. Asymmetrien zwischen Wissen und Interessen werden abgebaut. Die Empirie zeigt, dass kontinuierlicher Wissenstransfer und die rückblickende Einordnung erreichten Fortschritts zentrale Elemente dieser Praxis sind und zu realistischeren Erwartungen auf allen Seiten beitragen. Beziehungspflege wird über Roadmaps nicht als episodische, sondern als fortlaufende Kommunikationsleistung sichtbar.

Produktisierung von Zwischenschritten nutzen

Die Start-ups können technologische Teilfortschritte frühzeitig in Produkte oder Dienstleistungen überführen. MVPs, Beratungsangebote und KI/ML-basierte Lösungen erhöhen kurzfristig die Marktfähigkeit. Diese Form der schrittweisen Produktisierung unterstützt die Sichtbarkeit und Glaubwürdigkeit technologischer Entwicklungspfade. Sie wirkt sich günstig auf Investoren-Beziehungen aus und trägt dazu bei, die langfristige Realisierung der technologischen Vision abzusichern. Frühe Umsätze und Kundenbindung werden möglich. Für Investoren wird die Einschätzung von Marktpotenzialen erleichtert. Kompetenz- und Strukturaufbau in den indirekten Bereichen eines Start-ups können parallel zur Technologieentwicklung gestaltet werden. Auch Hardware-Start-ups können durch vorbereitende Softwaremodule, Beratungsleistungen oder Demonstratoren Anschlussfähigkeit schaffen, ohne die langfristige Vision zu verändern. Die empirischen Daten zeigen, dass solche Zwischenschritte nicht nur die kurzfristige Marktfähigkeit erhöhen, sondern auch zur Weiterentwicklung der langfristigen technologischen Zielsetzung beitragen können.

Ambidextrie organisatorisch umsetzen und Finanzierungsmix sichern

Die gleichzeitige Orientierung an wissenschaftlicher Grundlagenarbeit und Marktaufbau stellt eine strukturelle Anforderung an die Start-ups dar. Die beiden Aspekte sollten nicht als gegensätzliche, sondern als miteinander verbundene Prozesse behandelt werden. Organisatorisch kann dies durch den parallelen Aufbau von Teams und geeigneten Arbeitsmodi für Forschungsaktivitäten und für kundennahe Aktivitäten der Produktisierung und Kommerzialisierung gelöst werden. Das oben beschriebene Multi-Roadmapping schafft eine Grundlage für Priorisierung von Aktivitäten und für damit verbundene flexible Re-Allokation von Ressourcen zwischen F&E und Kundenorientierung.

Zum internen »beidhändigen« Aufbau (Ambidextrie) kommt die Nutzung externer Unterstützungsstrukturen. Der Aufbau strategischer Partnerschaften, beispielsweise durch Beteiligung an öffentlichen Konsortien oder bilaterale Kooperation mit akademischen und/oder industriellen Akteuren, ermöglichen Zugang zu Wissen und Infrastruktur sowie das Teilen von Risiken. Mischfinanzierungen aus öffentlicher Förderung und privaten Investitionen verschiedener Spezialisierungsgrade erweitern Handlungsspielräume. Eine besondere Herausforderung liegt darin, Förderbedingungen und Investorenlogiken, die teilweise schwer vereinbart sind, zusammenzubringen. Dies ist dennoch ein wichtiger Weg, um F&E-Aktivitäten und marktnahe Angebote gleichzeitig zu ermöglichen und unternehmerische Deep-Tech-Kompetenz umfassend aufzubauen. Insbe-

sondere im Übergang von Technologieentwicklung zu Skalierung bestehen bis heute strukturelle Lücken, die strategische Standort- und Finanzierungsentscheidungen von Q-Start-ups beeinflussen können.

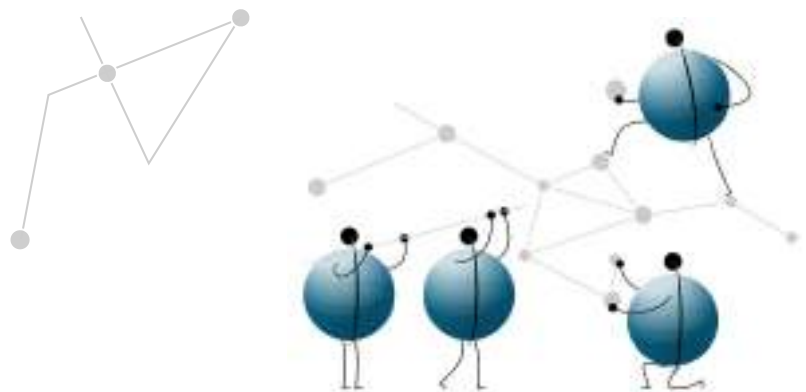
“

Durch Ungewissheit, wann dieser Markt skaliert, entwickeln wir die Technologie von Anfang an bewusst marktagnostisch.

- Rasmus Bankwitz

”

Zusammengefasst verdeutlichen die empirischen Befunde, dass Q-Start-ups in diesem Spannungsfeld vor allem durch eine adressatengerechte Technologiekommunikation, die produktive Nutzung von Zwischenschritten und den Aufbau »beidhändiger« Organisations- und Finanzierungsarrangements navigieren. Mehrschichtiges Multi-Roadmapping, die parallele Weiterentwicklung technologischer und marktnaher Aktivitäten sowie die bewusst kooperierende Positionierung im Ökosystem tragen dazu bei, zwischen technologischer Vision und Kapitalinteressen handlungsfähig zu bleiben.



Spannungsfeld 2: Ökosystemintegration vs. Start-up-Innovation

Hypothese

»Q-Start-ups müssen sich innerhalb eines komplexen und stark vernetzten Ökosystems strategisch positionieren. Kooperationen mit spezialisierten Partnern eröffnen Zugang zu essenziellen Ressourcen und Technologien, können jedoch zugleich die Innovationsfreiheit begrenzen. Der Erfolg hängt davon ab, wie gut es den Start-ups gelingt, die Vorteile der Ökosystemeinbettung mit dem Schutz und Ausbau eigener Alleinstellungsmerkmale zu verbinden.«

Beschreibung des Feldes aus den Interviews: Hohe Kooperationsbereitschaft in operativen und strategischen Ökosystemen

Die Entwicklung von Q-Lösungen ist durch hohe technologische Komplexität geprägt und ein Markt, auf dem Unternehmen florieren können, befindet sich noch im Aufbau. Strukturierende Konzepte wie Q-Software-Stacks zeigen, dass funktionsfähige Lösungen als handelbare Produkte das Zusammenspiel von spezialisierten Komponenten und verschiedenem Fachwissen über mehrere Ebenen hinweg erfordern. Einzelne Start-ups werden aufgrund begrenzter Ressourcen und eines hohen Spezialisierungsgrads keine Lösungen entwickeln, mit denen ein »vertikaler Durchstich« von der Problemstellung in einem Anwendungsfall bis zur Q-Lösung gelingt. Kooperation, Integration und Positionierung innerhalb des Q-Ökosystems werden damit, gerade für Start-ups, aber auch für anderen Akteure in diesem Deep-Tech-Bereich, zu einer strukturellen Notwendigkeit. Gleichzeitig gilt für jeden Akteur am Markt, Chancen auf die Entwicklung und Platzierung von Alleinstellungsmerkmalen zu wahren, die eine Unternehmensgründung tragen können.

Die Kooperationsbereitschaft der befragten Start-ups ist hoch, die Kooperationspraxis stark ausgeprägt. Kooperationen erfolgen sowohl national als auch international. Die Q-Start-ups verfolgen das Ziel, jeweils in ihrem Kerngebiet, die beste Q-Teillösung als ihr Alleinstellungsmerkmal zu entwickeln. Dafür sind sie auf Zugang zu anderen Teillösungen oder Komponenten angewiesen, die aus ihrer Sicht teilweise nur im Ausland verfügbar sind. Diese Form der Abhängigkeit trägt wesentlich zur Kooperationsbereitschaft, in Form von Entwicklungspartnerschaften aber auch als Zuliefer-/Abnehmerbeziehung, aller interviewten Q-Start-ups bei.

Hinzu kommt die Überzeugung, dass die Weiterentwicklung der Technologie nur kollektiv gelingen kann, da zentrale Fortschritte an den Schnittstellen zwischen verschiedenen beteiligten Fachdisziplinen entstehen. Um die jeweils mehr oder weniger begrenzten, immer aber spezialisierten Ressourcen effektiv einzusetzen, ist ein interdisziplinärer Ansatz notwendig. Insbesondere die enge Abstimmung zwischen Q-Soft- und Q-Hardware zu einem Software-Hardware-Co-Design wird als wünschenswert angesehen. Dies setzt eine frühzeitige und rechtsverbindliche Klärung der Eigentumsrechte an ge-

meinsam geschaffenen Ergebnissen im Sinne geistigen Eigentums voraus. Bestehende Kooperationen zwischen Q-Software- und -Hardware-Start-ups sind bislang oftmals projektbezogen und damit temporär. Dies verdeutlicht die strukturelle Herausforderung, partnerschaftliche Zusammenarbeit mit dem Schutz eigener Innovationsbeiträge zu verbinden.

“

*Wenn wir erwarten, dass im Quantencomputing alle alles können, von Anwendung über Software bis Hardware, wird das nicht funktionieren. Wir bleiben in unseren Disziplinen, in unseren Bubbles. Entscheidend ist mehr Austausch dazwischen: gemeinsame Sprachen und klare Interfaces. Schon in der klassischen Welt kann man erfolgreiche Software entwickeln, ohne Elektrotechnik studiert zu haben, obwohl alles auf elektrotechnischen Prinzipien basiert. Genauso muss heute nicht jeder Quantenphysiker*in werden. Wir brauchen mehr Austausch als früher, aber nicht im Sinne von: alle müssen alles können.*

- Prof. Dr. Robert Wille

”

Momentan existieren mehrere Q-Hardware-Modalitäten parallel nebeneinander. Ob sich eine davon als grundlegend technologisch überlegen durchsetzt und welche dies sein wird, ist noch unklar. Dies prägt insbesondere die strategische Positionierung der Hardware-Start-ups im Ökosystem, die sich früh auf eine Modalität festlegen und diese Festlegung nur begrenzt oder unter hohem Aufwand revidieren können. Da die Hardware-Entwicklung erhebliche

Investitionen erfordert und bindet, ist eine erfolgte Festlegung nur begrenzt oder aufwändig revidierbar. Die Abhängigkeit von Kooperationen wird dadurch erhöht, dass beispielsweise der Zugang zu kritischen Komponenten und zu Wissen gesichert werden muss. Gleichzeitig wächst der Druck, eigene Entwicklungsansätze, Intellectual Property (IP) und damit das (potenzielle) Alleinstellungsmerkmal als Wettbewerbsvorteil konsequent zu schützen. Q-Software-Start-ups können hier flexibel agieren, da sie ihr Kernprodukt an unterschiedliche Hardware-Modalitäten anpassen und gerade aus der Hardwareagnostik ein Geschäftsmodell entwickeln können. Das technologische Risiko ist reduziert und Kooperationen können leichter eingegangen werden, ohne die Substanz des Alleinstellungsmerkmals zu gefährden.

Bei der Kooperation in Q-Ökosystemen differenzieren die Start-ups zwischen operativen und strategischen Ökosystemen. Das operative Ökosystem umfasst Partner und Ressourcen, die für die Entwicklung und Realisierung einer Q-Lösung notwendig sind. Das operative Ökosystem ist international geprägt und umfasst auch nicht der Europäischen Union (EU) zugehörige Akteure. Das strategische Q-Ökosystem ist relevant für die politische Sichtbarkeit auf regionaler, nationaler oder europäischer Ebene. Es dient vordergründig der Einwerbung von öffentlichen Fördermitteln. Viele Q-Start-ups sind bereits gut in strategische Q-Ökosysteme eingebunden. Das ist meistens auf ihre Entstehung als Ausgründungen aus Universitäten oder Forschungseinrichtungen zurückzuführen, wodurch nach wie vor gute Beziehungen zu der sie umgebenden Forschungslandschaft, insbesondere auf regionaler Ebene, vorhanden sind. Die Auswahl der Partner in operativen Q-Ökosystemen erfolgt primär auf Basis der Leistungsfähigkeit der von ihnen angebotenen Ressourcen. Bei der Entscheidung, welchem operativen Ökosystem sich ein Q-Start-ups anschließt, spielt auch die Finanzkraft der dort präsenten Akteure eine wichtige Rolle, da sie als ein Indikator für die langfristige Stabilität des Ökosystems angesehen wird. Zudem wird die Sichtbarkeit vor

finanzkräftigen Akteuren als eine Möglichkeit gesehen, die Chancen auf einen erfolgreichen Exit zu erhöhen.

Trotz des grundsätzlichen Spannungsfeldes zwischen notwendiger Zusammenarbeit und dem Schutz eigener Alleinstellungsmerkmale, sehen die Start-ups derzeit keine rechtlichen Hindernisse, die Kooperationen im Ökosystem einschränken würden. Es wird jedoch erwartet, dass die sich beschleunigende Entwicklung im Q-Bereich und die damit einhergehende wachsende Zahl technischer Schutzrechte, die Wahrscheinlichkeit von Konflikten erhöht. Im Extremfall kann dies die Nutzung bestimmter Komponenten oder Teillösungen blockieren. Das berührt direkt die Frage, wie sich Q-Start-ups zugleich offen für Kooperation halten und ihre Innovationsbasis absichern können.

“

Wenn wir jetzt anfangen, alle Konkurrenten rauszukegeln, stirbt das Ökosystem. Alleine kriegt das momentan keiner hin.

- Prof. Dr. Robert Wille

”

Zurzeit schützen die Hardware-Start-ups ihr geistiges Eigentum überwiegend über Patente. Werden Komponenten anderer Unternehmen verbaut, entstehen bislang keine rechtlichen Probleme, da meist standardisierte Bauteile verwendet werden. Für die Software-Start-ups stellt sich die Lage differenzierter dar: Software ist in Europa nur dann patentfähig, wenn sie einen technischen Beitrag leistet; reine algorithmische oder mathematische Verfahren sind bislang nicht schützbar. In der Praxis setzen die Start-ups daher vor allem auf geschlossene Bereitstellungsformen, um ihr geistiges Eigentum zu schützen: Sie

bieten ihre Lösungen überwiegend als Cloud-Dienste an, wodurch der Quellcode auf ihren Servern verbleibt.

Grundsätzlich wird IP in Kooperationen vor allem über Non Disclosure Agreements (NDA) und vertragliche Regelungen geschützt. Da das IP eines Q-Start-ups den zentralen Unternehmenswert darstellt, wird dessen Absicherung auch von Investorensseite forciert. Im Falle des Scheiterns eines Start-ups, könnte das IP noch kommerzialisierbar sein.

Herausforderungen und Handlungsstrategien. Pragmatischer Umgang mit komplexen Exportkontrollbestimmungen und fehlenden Standards

Herausforderung: Komplexe Exportkontrollbestimmungen

Quantentechnologie gilt als Dual-Use-Gut und deutsche Q-Start-ups müssen neben den nationalen Regelungen auch die Dual-Use-Regeln und Exportkontrollbestimmungen der EU berücksichtigen. Wenn einzelne EU-Mitgliedstaaten zusätzliche nationale Kontrollen gerade für Quantentechnologien eingeführt haben, kann dies je nach Konstellation ebenfalls relevant werden, insbesondere wenn Komponenten aus oder Kunden in diesen Ländern benötigt bzw. adressiert werden. Wenn Start-ups auf Q-Software, -Komponenten oder -Rechenressourcen von Unternehmen zurückgreifen, die nicht in der EU ansässig sind, müssen sie zusätzlich zu den oben genannten Regelungen auch die Exportkontrollbestimmungen der entsprechenden außereuropäischen Länder berücksichtigen. Es entsteht ein komplexes Regelungsgefüge, das fundierten Sachverstand in der Aushandlung von kooperativen Arrangements erfordert. Die Start-ups müssen über qualifiziertes Personal verfügen oder entsprechende Leistungen, wie beispielsweise rechtliche Beratung, einkaufen. Beides erzeugt zusätzliche Aufwände an Zeit und Kosten. Diese sind im Rahmen der häufig noch dominierenden öffentlichen Förderung oft nicht oder nur schwer darstellbar.

Handlungsstrategie: Diversifizierung und Vertiefung bestehender Kooperationen

Um die Komplexität bei der Bearbeitung der zu berücksichtigenden Exportkontrollregelungen zu reduzieren, konzentrieren sich die befragten Q-Start-ups, soweit möglich, auf Kooperationen im europäischen

Raum und/oder vertiefen bestehende Partnerschaften. Dadurch müssen sie im Wesentlichen nur die europäischen Regelungen berücksichtigen beziehungsweise können auf bereits rechtlich geprüfte und bewährte Strukturen aufsetzen. Dies reduziert den administrativen Aufwand, verhindert, dass technologisch zentrale Fachkräfte, häufig die Gründenden selbst, längere Zeit aus der Entwicklungsarbeit herausgenommen werden müssen und reduziert den Bedarf, zusätzliches Personal in diesen indirekten Bereichen aufzubauen. Der stärkere Fokus auf europäische Kooperationen trägt zugleich zur angestrebten technologischen Souveränität im Bereich Quantentechnologie bei. Nach Einschätzung der befragten Start-ups lässt sich bereits heute der gesamte Q-Software-Stack vollständig mit europäischen Unternehmen realisieren.

Herausforderung: Fehlende Standards zur Integration mit anderen Q-Lösungen

Fehlende Standards verlangsamen die Integration in operative Q-Ökosysteme und damit die Technologieentwicklung insgesamt. Dabei lassen sich zwei Ebenen unterscheiden: Erstens die Integration bzw. Verknüpfung von zwei Q-Teillösungen untereinander sowie zweitens die Einbettung einer Q-Lösung in Anwendungsumgebungen in Unternehmen oder Hochleistungsrechenzentren. Diese Herausforderung betrifft insbesondere Q-Software-Startups. Hardware-Anbieter können oft auf Komponenten zurückgreifen, die bereits etablierte Schnittstellen oder Standards verwenden. Fehlende Standards führen jedoch zu proprietären Schnittstellen. Deren Entwicklung gehört für die interviewten Start-ups zwar zum üblichen Leistungsumfang, bindet jedoch erhebliche Ressourcen. Diese fehlen dann für die Integration in weitere Ökosysteme, Anwendungsumgebungen sowie für die eigentliche Technologieentwicklung.

Handlungsstrategie: Nutzung von de-facto-Standards

Um die größtmögliche Interoperabilität mit anderen Q-Lösungen zu erreichen, setzen die Start-ups häufig auf de-facto-Standards wie »Qiskit«. Solche Standards werden üblicherweise von finanzstarken Akteuren unter einer Open-Source-Lizenz veröffentlicht und bilden in der Regel den Nukleus großer und sichtbarer Q-Ökosystemen im Quantencomputing. Durch die Nutzung dieser de-facto-Standards können Start-ups Entwicklungsressourcen effektiv einsetzen und gleichzeitig eine hohe Kompatibilität zu anderen Q-Lösungen erreichen. Bei der Integration in Anwendungsumgebungen müssen jedoch weiterhin proprietäre Lösungen erstellt werden, da hier keine Standards existieren und die IT-Systemlandschaften der Industrieunternehmen sehr individuell sind.

Handlungsstrategie: Fokus auf Toy Examples und Minimal Viable Products

Bei der Entwicklung ihrer Lösungen verfolgen die befragten Start-ups einen pragmatischen Ansatz. Statt sofort eine vollständig ausgereifte Lösung umzusetzen, erstellen sie mit einem »Toy Example« zunächst einen vertikalen Durchstich durch den gesamten Q-Software-Stack. Die Toy Examples sind stark vereinfachte Repräsentationen des realen Problems und dienen dazu, das grundsätzliche Lösungskonzept sichtbar zu machen. Mit ihnen lässt sich zeigen, erklären und verstehen, wie eine Q-Lösung funktionieren könnte und wo die technischen Anforderungen liegen. Erweisen sich die Ergebnisse eines Toy Examples als vielversprechend, können sie zu einem MVP weiterentwickelt werden. Dabei werden sogenannte 80-Prozent-Lösungen als funktionsfähige Prototypen realisiert. Diese werden in kurzen Iterationszyklen mit Kunden getestet und weiterentwickelt. Der Hintergrund für dieses Vorgehen liegt in der hohen Komplexität der Schnittstellenentwicklung. Sie erfordert Fachwissen aus Physik, Informatik, Softwareent-

wicklung und den jeweiligen domänenspezifischen Bereichen, in denen eine Q-Lösung zum Einsatz kommen soll. Nach Einschätzung der Start-ups wird keine dieser Disziplinen die jeweils andere vollständig verstehen und kein Team jedes notwendige Fachwissen abdecken können. Durch das MVP-orientierte Arbeiten mit Toy Examples und 80-Prozent-Lösungen wird dennoch eine kontinuierliche Ausrichtung auf relevante industrielle Anwendungen vorangetrieben.

Zusammenfassung und Interpretation: Balance von Integration und Differenzierung in vielschichtigen Ökosystemen

Die empirischen Ergebnisse stützen die Hypothese zum zweiten Spannungsfeld dieser Studie. Q-Start-ups sind auf Kooperationen angewiesen und zeigen eine hohe Kooperationsbereitschaft. Sie suchen aktiv national, europäisch und global Partnerschaften und positionieren sich sowohl in operativen als auch in strategischen Q-Ökosystemen. Dies sichert technologische Entwicklung, Interoperabilität und Marktzugang. Gleichzeitig schützen sie ihre eigenen (potenziellen) Alleinstellungsmerkmale und versuchen, den hohen administrativen und rechtlichen Anforderungen im Hinblick auf Exportkontrolle und IP-Schutz gerecht zu werden: teilweise durch geographische Kooperationsentscheidungen, teilweise durch Aufbau eigenen Personals oder Zukauf von Expertise. Aus den qualitativen Interviews lassen sich vier miteinander verbundene Handlungsschwerpunkte ableiten, die eine Balance in diesem Spannungsfeld strukturieren.

Ökosystemintegration strategisch priorisieren und Selektivität entwickeln

Die empirischen Ergebnisse zeigen, dass Kooperationen strukturell notwendig sind, um Interoperabilität, Technologieentwicklung und Marktzugang zu ermöglichen. Gleichzeitig erzeugen de-facto-Standards, unterschiedliche Hardware-Modalitäten und globale Dynamiken Abhängigkeiten, die die Innovationsfreiheit begrenzen können. Für Start-ups bedeutet dies, operative Ökosysteme bewusst danach auszuwählen,

- welche Interoperabilität sie ermöglichen,
- welches Risiko an Pfadabhängigkeit entsteht,
- welche Ressourcen und Lernmöglichkeiten realistisch zugänglich sind und

- wie finanzstark die Akteure eines Ökosystems sind.

Selektive Ökosystemintegration wird zu einer Kernkompetenz: Partnerschaften werden dort eingegangen, wo sie nicht in das Alleinstellungsmerkmal eingreifen und wo vertragliche Regelungen offenen Austausch ermöglichen. Zugleich erhöht die Einbettung in größere, finanzstarke Ökosysteme Überlebens- und Exit-Chancen.

IP-Schutz als dynamische strategische Entscheidung verstehen

Der Schutz des jeweiligen Alleinstellungsmerkmals ist für alle Q-Start-ups zentral und wird mit zunehmender technologischer Reife komplexer. Mit steigender Technologiereife nimmt der Aufwand für IP-Sicherung zu, gleichzeitig bleibt ein gewisses Maß an Offenheit in bestimmten Kontexten innovationsfördernd. Hier bietet sich ein gestuftes Vorgehen zum IP-Schutz an, das es ermöglicht, zwischen Ökosystembeiträgen und strategischer Differenzierung abzuwägen. Klare Abgrenzung und bewusste Entscheidungen darüber, was geteilt, was geöffnet und was proprietär gehalten wird, stärken die Handlungsfähigkeit von Q-Start-ups. Ein gestuftes Vorgehen umfasst:

- frühzeitige Sicherung eigenständiger Komponenten,
- Nutzung von Verträgen (NDA, Kooperationsverträge, Lizenzmodelle),
- Vermeidung unnötiger Offenlegungen und
- schrittweise Prüfung, was geteilt werden kann, ohne das Differenzierungspotenzial zu verlieren.

Regulatorische Anforderungen professionalisieren und Ressourcen schützen

Exportkontrolle, Dual-Use-Regeln und Compliance erzeugen wachsenden administrativen Aufwand.

Die empirischen Befunde zeigen, dass Q-Start-ups häufig technologisch zentrale Personen mit diesen Aufgaben betrauen müssen, was den Entwicklungsfortschritt des technologischen Kernangebots verzögert. Ein ressourcenschonender Umgang schützt Entwicklungszeit und mindert Risiken späterer Integrationshemmnisse oder Beeinträchtigungen des Alleinstellungsmerkmals. Er umfasst:

- frühzeitigen Kompetenzaufbau oder gezielten Kompetenzzukauf,
- Nutzung europäischer Kooperationen zur Reduktion regulatorischer Komplexität,
- Integration regulatorischer Fragen in Kooperations- und Lieferantenentscheidungen,
- stabile administrative Prozesse, die technisches Personal entlasten.

Unterschiedliche Ökosystemebenen unterscheiden und gezielt bearbeiten

Die empirischen Daten zeigen eine klare Differenzierung zwischen operativen (technische Integration) und strategischen (politische Sichtbarkeit und Förderung) Ökosystemen. Ein passendes Erwartungsmanagement erleichtert die Navigation in jedem der Felder und stärkt Zugang zu Ressourcen, Expertise und Förderstrukturen. Handlungsschwerpunkte umfassen:

- operative Ökosysteme nach technischer Leistungsfähigkeit, Interoperabilität und Finanzkraft zu wählen,
- strategische Ökosysteme zur Sichtbarkeit, Förderung und Zugang zu Infrastruktur zu nutzen,
- Erwartungsmanagement bewusst zu betreiben,
- Aktivitäten auf Mikro-, Meso- und Makroebene zwar zu trennen, jedoch insgesamt zu orchestrieren.

In der Gesamtschau zeigen die Ergebnisse der qualitativen Erhebung, dass Handlungsfähigkeit im Span-

nungsfeld »Ökosystemintegration vs. Start-up-Innovation« vor allem dort entsteht, wo Start-ups ihre Kooperationsentscheidungen bewusst strukturieren und zugleich Schutz- und Verwaltungsaufgaben ordnen. Selektive Ökosystemeinbettung, ein abgestuftes IP-Management, ein früher Umgang mit regulatorischen Anforderungen sowie die Unterscheidung zwischen operativen und strategischen Ökosystemen bilden dabei die zentralen Ansatzpunkte. Sie helfen den Start-ups, die Vorteile der Vernetzung zu nutzen, ohne die eigene Innovationsbasis zu schwächen. Daraus lässt sich, in Verbindung mit den Ergebnissen aus Spannungsfeld 3, ein Drei-Ebenen Modell der Ökosystem-Integration ableiten.

Ökosystemintegration als eine Aufgabe auf drei Ebenen

Die empirischen Befunde zeigen, dass Q-Start-ups nicht nur als einzelne Unternehmen agieren, sondern sich selbst auch als Teil von Konstellationen beschreiben, die unter dem Sammelbegriff »Ökosystem« gefasst werden. Der Begriff wird von den befragten Start-ups dabei in erklärender Funktion genutzt, als mentales Bild oder Analogie, um komplexe Verflechtungen zwischen Technologien, Akteuren und Institutionen einzuordnen⁶. Vor diesem Hintergrund schlägt die vorliegende Studie vor, von Ökosystemintegration als mehrstufiger, empirisch beobachtbarer Aufgabe zu sprechen.

Aus den Ergebnissen von Spannungsfeld 2 sowie 3 wird deutlich, dass die Start-ups gleichzeitig auf verschiedenen Ebenen mit unterschiedlichen Akteuren verschiedener Q-Ökosysteme agieren. Dabei sind Kooperation, technische Integration und Positionierung in Ökosystemen für Q-Start-ups eine strukturelle Notwendigkeit, um Interoperabilität, Technologieentwicklung und Marktzugang zu gewährleisten und die Marktbildung zu befördern. Das im Folgenden vorgestellte Drei-Ebenen-Modell der Q-Ökosysteme dient dazu, den breit verwendeten Ökosystembegriff

⁶ Harrison (2025)

4 Empirische Befunde und Interpretation

für den Deep-Tech-Kontext zu präzisieren und zu operationalisieren. Es macht sichtbar, wie sich operative Entscheidungen zur Kooperation, Positionierung und IP-Sicherung mit strategischen Fragen von Politikgestaltung, Förderlogiken und technologischer Souveränität auf Mikro-, Meso- und Makroebene verschränken.

Auf der **Mikroebene** stehen einzelne Organisationen und die darin handelnden Personen im Vordergrund. Dazu zählen beispielsweise Q-Start-ups, Forschungsorganisationen, Venture-Capital-Geber, Intermediäre⁷ aber auch die darin organisierten Fach- und Führungskräfte. Auf dieser Ebene dominieren stark formalisierte Steuerungsmechanismen wie Hierarchien, Verträge, Organisationsstrukturen, Prozesse, Regeln und Arbeitspraktiken. Diese setzen den Handlungsrahmen für zentrale unternehmerische Ziele: funktionierende Geschäftsmodelle, gesicherte Wettbewerbsfähigkeit und Angebote zu Erhalt und Ausbau der Employability von Beschäftigten.

In diesem Rahmen bewegt sich die in mehreren Spannungsfeldern aufgezeigte Ambidextrie der Start-ups – zwischen wissenschaftsnaher Technologieentwicklung und marktnahem Handeln, zwischen Forschungs-Push und ersten Produktisierungen. Sie manifestiert sich in konkreten Organisationsentscheidungen, wenn es beispielsweise um die Fokussierung auf ein Q-Ökosystem, eine Hardware-Modalität oder den Umgang mit IP geht. Der Outcome dieser Ebene liegt in tragfähigen Geschäftsmodellen, organisationaler Wettbewerbsfähigkeit und der Sicherung sowie Weiterentwicklung individueller Beschäftigungs- und Handlungschancen.

Die **Mesoebene** umfasst Initiativen, Netzwerke, Communities, Cluster und Programme, die die überorganisationale Zusammenarbeit im Q-Bereich organisieren. Charakteristisch für diese Ebene ist die Mannigfaltigkeit der Themen, um die die verschiedenen Vernetzungsaktivitäten organisiert sind. Sie reichen von technologisch orientierten Communities

	Akteure	Steuerungsmechanismen	Motivationen	Outcome
Makroebene	Politik Land Bund EU Global	stark formalisiert Hierarchie Verträge Struktur Regeln Prozesse	Steuerung Incentivierung Regulierung	Materielle Politiken (policies) in Politikfeldern z.B.: Forschung Wirtschaft Industrie
Mesoebene	Politik, Forschung, Wirtschaft Initiativen Netzwerke Communities Ökosysteme	nicht formalisiert Orchestrierung statt Steuerung Freiwilligkeit	Fachlichkeit Sichtbarkeit	Wissensgewinn Anschlussfähigkeit Einfluss
Mikroebene	Einzelne Organisationen Unternehmen Forschungsorganisationen Venture Capital Intermediäre Fachkräfte	stark formalisiert Hierarchie Verträge Strukturen Regeln Prozesse Arbeitspraktiken	Ziel der Organisation Ziele des Individuums	Geschäftsmodelle Wettbewerbsfähigkeit Employability

Tabelle 1: Drei-Ebenen-Modell der Ökosystemintegration von Q-Start-ups⁸

⁷ Für eine Übersicht zu Intermediären und ihren Rollen in missionsgetriebenen Ökosystemen siehe Morisson und Pattinson (2025).

⁸ Quelle: Eigene Darstellung

wie »Qiskit« oder »DLR QI« über geographisch orientierte Netzwerke wie beispielsweise »QuantumBW«, »Munich Quantum Valley« oder das Deutsche Quanten-Ökosystem der bitkom bis hin zu thematischen Verbünden und F&E-Konsortien, um nur einige Ausprägungen zu nennen.

Durch die große Bandbreite der thematischen Fokuspunkte werden innerhalb der Mesoebene sowohl operative Aktivitäten forciert, wie beispielsweise Wissenstransfer und Training, Technologieentwicklung oder Nutzung geteilter Infrastrukturen, als auch strategische Aktivitäten bearbeitet, wie Standortprofilierung, Agenda-Setting oder die gemeinsame Ausarbeitung von Roadmaps.

Typisch für diese Ebene sind lose Kopplungen, Zugehörigkeit zu mehreren Ökosystemen, anlassgetriebene Formate und eine hohe Heterogenität der beteiligten Akteure. Die Steuerung erfolgt hier weniger über formale Hierarchie als über Orchestrierung: Häufig fungieren einzelne Organisationen als informelle Orchestratoren, obwohl Finanzierungsgrundlagen, Mandate und Zuständigkeiten nur begrenzt geklärt sind. Das Engagement in solchen Netzwerken basiert auf Freiwilligkeit und ist vorwiegend getrieben durch Interesse an fachlichem Austausch und Zusammenarbeit sowie politischer Sichtbarkeit. Alle drei Elemente sind zentrale Ressourcen, um Anschlussfähigkeit herzustellen und gemeinsam kollaborative Formate, Schnittstellen und Praktiken der Zusammenarbeit auszuhandeln und zu etablieren. Der Outcome dieser Ebene entfaltet seinen Wert überwiegend auf operativer Ebene und besteht in Wissensgewinn, Sichtbarkeit, Zugang zu Ressourcen und Legitimität. Die Akteure können durch ihr Engagement ihre Position im Feld schärfen und neue Kooperations- und Wertschöpfungspfade ausloten. Zugleich zeigen sich gerade auf dieser Ebene offene Fragen zu Governance, zur Ausbalancierung von Freiwilligkeit und Verbindlichkeit oder zum Umgang mit unterschiedlichen Interessen sowie mit Macht- und Ressourcenungleichgewichten.

Auf der **Makroebene** rücken der Einfluss von und auf materielle Politiken (Policies) und regulative Rahmenbedingungen in den Vordergrund. Dies reicht von den lokalen und regionalen Ebenen über Bund und EU bis hin zu globalen Arenen. Fachpolitiken, meist in den Politikfeldern Forschung, Wirtschaft und Industrie, setzen Anreize und definieren Förder- und Regulierungslogiken, die den Handlungsspielraum von Q-Start-ups strukturieren. Der Outcome dieser Ebene liegt, ähnlich wie auf der Meso-Ebene, in Wissensgewinn, Anschlussfähigkeit, Sichtbarkeit und Einfluss. Allerdings geht es hier um strategische Fragen höherer Ordnung: Es wird bestimmt oder zumindest beeinflusst, welche Pfade technologischer Entwicklung politisch gewollt, gefördert oder eingeschränkt werden.

Die im nächsten Abschnitt, Spannungsfeld 3, analysierten Dynamiken internationaler Abhängigkeiten, Standortpolitik und technologischer Souveränität knüpfen an diese Makroebene an und zeigen, wie sich Q-Ökosystemintegration über nationale und europäische Grenzen hinaus spannt.

In der Zusammenschau verdeutlicht das Drei-Ebenen-Modell, dass Ökosystemintegration nicht nur eine Frage einzelner Kooperationsentscheidungen ist, sondern eine mehrschichtige Orchestrierungsleistung. Es bietet einen konzeptionellen Rahmen, in dem sich die in den Spannungsfeldern rekonstruierten Handlungslogiken der Start-ups verorten und zusammendenken lassen. Im Abschlusskapitel werden alle sechs Spannungsfelder im Drei-Ebenen-Modell verortet.

Spannungsfeld 3: Globale Vernetzung vs. Technologische Souveränität



Hypothese

»Q-Start-ups sind auf internationale Kooperationen angewiesen, um Zugang zu Schlüsselressourcen und Q-Infrastrukturen zu erhalten. Gleichzeitig müssen sie Strategien entwickeln, um Abhängigkeiten zu begrenzen und ihre Position im Spannungsfeld zwischen globaler Zusammenarbeit und regionaler Souveränität zu behaupten.«

Beschreibung des Feldes aus den Interviews: Strukturelle Abhängigkeit von außereuropäischen Q-Infrastrukturen

Spannungsfeld 3 eröffnet eine ergänzend übergeordnete Perspektive auf die in Spannungsfeld 2 untersuchte Thematik der Q-Ökosystemintegration. So existieren zum Zeitpunkt dieser Untersuchung fruchtbare internationale Kooperationen zwischen den Q-Start-ups sowie europäischen und global agierenden Q-Unternehmen. Das Risiko, dass die Verwendung bestimmter Q-Ressourcen, wie Rechenkapazitäten, Plattformen, Soft- oder Hardware, eingeschränkt werden könnte, wird von den Start-ups gesehen und in Kauf genommen.

Bei Kooperationen mit global agierenden, häufig großen und finanzstarken Q-Unternehmen erleben die befragten Start-ups ein starkes Machtgefälle zu ihren Ungunsten. Dies gilt beispielsweise bei Verhandlungen über den Zugriff auf Q-Rechenressourcen oder -Plattformen. Zugleich berichten die Befragten über ein steigendes Interesse dieser großen Unternehmen sowohl am domänenspezifischen Wissen der Q-Start-ups als auch an deren Industrie-

kontakten für die praxisorientierte Entwicklung ihrer Q-Lösungen. Da leistungäquivalente Alternativen zu den globalen Akteuren aus Europa derzeit fehlen, bleibt den Q-Start-ups oftmals keine andere Wahl, als globale Kooperationen mit deutlich stärkeren Partnern einzugehen. Die daraus entstehende Abhängigkeit wird von den Befragten als zunehmend kritisch eingeschätzt, da politische Spannungen zu einer Einschränkung beim Zugang zu den Q-Ressourcen führen können.

Obwohl in Europa konkurrenzfähige Q-Hardware- und -Software-Lösungen verfügbar sind, ist ein Ersatz außereuropäischer Q-Rechenressourcen und -Plattformen durch europäische Alternativen angesichts des zurzeit als unzureichend wahrgenommenen Investitionsvolumens kurzfristig nicht realistisch. Aus Sicht der Start-ups könnte diese Abhängigkeit mittelfristig jedoch politisches Engagement der nationalen und europäischen Ebene verstärken und den weiteren Ausbau entsprechender Förderungen und Rahmenbedingungen begünstigen.

Herausforderung und Handlungsstrategie: Europäische Wertschöpfungsnetzwerke im Kontext geopolitischer Dynamiken

Herausforderung: Risiken durch internationale Abhängigkeiten

Grundsätzlich können die für den Betrieb einer Q-Lösung erforderlichen Ressourcen, mit Ausnahme einiger Rohstoffe, innerhalb der europäischen Union bereitgestellt werden. Die Zahl entsprechender Anbieter ist jedoch überschaubar und die Leistungsfähigkeit ihrer Q-Lösungen ist nicht in allen Bereichen mit der außereuropäischen Q-Unternehmen vergleichbar. Durch diese internationalen Abhängigkeiten entstehen Risiken: Geopolitische oder regulatorische Einschränkungen können den Zugang zu benötigten Q-Ressourcen begrenzen, verkomplizieren oder verteuern. In solchen Fällen wäre die Realisierung einer Q-Lösung für einzelne Start-ups möglicherweise nicht mehr möglich und der technologische Abstand zur Konkurrenz würde sich weiter vergrößern.

Handlungsstrategie: Aufbau europäischer Wertschöpfungsnetzwerke

Die befragten Q-Start-ups zeigen eine hohe Motivation, zum Aufbau europäischer technologischer Souveränität im Q-Bereich beizutragen. Dafür setzen sie verstärkt auf Vernetzung und Kooperation mit anderen europäischen Q-Start-ups. Sowohl eine Erweiterung und Stabilisierung des eigenen Wertschöpfungsnetzwerkes als auch europäische Diversifikation sollen auf diese Weise erreicht werden. Aus Sicht der Start-ups verbessert dieser europäische Fokus auch ihre Position gegenüber nationalen und europäischen Fördergebern, da eine Förderung ihres Start-ups als Beitrag zur europäischen Q-Souveränität gesehen werden kann. Ein weiterer Grund für die hohe Motivation liegt in der Wahrnehmung, dass im

KI-Bereich frühe Versäumnisse zu starken Abhängigkeiten von außereuropäischen und global agierenden KI-Unternehmen geführt haben, eine Entwicklung, die im Q-Bereich fachlich-wissenschaftlich noch vermeidbar wäre und vermieden werden sollte.

“

Wir fahren gut mit maximaler Transparenz. Wir glauben an die Technologie, sagen aber offen, was geht und was nicht, auch wenn das ernüchternd ist. Ehrlichkeit statt Versprechen. Unser Ziel ist klar: das Ökosystem voranbringen.

- Prof. Dr. Robert Wille

”

Zusammenfassung und Interpretation: Strategische Optionen zwischen globaler Vernetzung und Souveränitätsansprüchen

Die empirischen Ergebnisse bestätigen die Aussagen der Hypothese zum dritten Spannungsfeld. Dabei knüpft Spannungsfeld 3 an zentrale Muster aus Spannungsfeld 2 an, erweitert diese jedoch um eine internationale und geopolitische Dimension. Während Spannungsfeld 2 die operative und strategische Einbettung in technische Ökosysteme adressiert, fokussiert Spannungsfeld 3 Fragen technologischer Souveränität, globaler Abhängigkeiten und standortpolitischer Rahmungen. Die analytische Trennung beider Felder ist sinnvoll, empirisch jedoch durchlässig. Beide betreffen Kooperationsentscheidungen, unterscheiden sich jedoch im räumlichen und institutionellen Maßstab: von Mikro- und Mesoebenen technischer hin zu Meso- und Makroebenen internationaler Kooperations- und Regulierungsräume.

Die Interviews zeigen, dass Q-Start-ups Ressourcen, Komponenten und Expertise weiterhin global beziehen und ihre international/außereuropäische Vernetzung damit unmittelbar fortsetzen. Gleichzeitig arbeiten sie daran, regionale, nationale und fachliche Partnerschaften zu stärken. Diese globale Ausrichtung ist eine Fortsetzung bzw. Ergänzung der in Spannungsfeld 2 beschriebenen Einbettung in strategische und operative Q-Ökosysteme. Da wesentliche Komponenten mit der benötigten Leistungsfähigkeit einer Q-Lösung (noch) nicht innerhalb der nationalen oder europäischen Grenzen bereitgestellt werden können, sind außereuropäische Kooperationen für Q-Start-ups (noch) unverzichtbar. Während in Spannungsfeld 2 im dort vorgestellten Drei-Ebenen-Modell der Q-Ökosysteme vor allem die Handlungsarena der strategischen Positionierung an der Schnittstelle von der Mikro- zur Mesoebene adressiert wurde, wird in Spannungsfeld 3 die Schnittstelle der Meso- zur Makroebene mit der Handlungsarena Standortpolitik und geopolitische Abhängigkeiten in den Vordergrund gerückt.

Trotz der weniger konkreten Aussagen der Befragten lassen sich Muster erkennen, aus denen zwei miteinander verbundene Handlungsschwerpunkte hervorgehen.

Internationale Kooperationen sichern und europäische Kooperationsstrukturen als Baustein technologischer Souveränität stärken

Die Interviews zeigen, dass Q-Start-ups weiterhin auf globale Partnerschaften angewiesen sind, um Zugang zu Infrastruktur, Komponenten und Expertise zu erhalten. Mit zunehmender Technologiereife steigt jedoch das Risiko von Single-Source-Abhängigkeiten und technischen Lock-ins. Deshalb gewinnen Kooperationen innerhalb der EU als stabilere und strategisch vorteilhaftere Verbünde an Bedeutung. Ein gezielter Ausbau solcher vertrauensvoller »Premium-Kooperationen« erhöht nicht nur die technologische Robustheit, sondern bildet zugleich einen Baustein technologischer Souveränität: durch die systematische Reduktion kritischer Abhängigkeiten, die Entwicklung europäischer Alternativen und die Einbettung dieser Leitlinie in die eigene Roadmap.

Regulatorische Kompetenz professionalisieren und geopolitische Risiken vorausschauend managen

Mit zunehmender Technologiereife rücken regulatorische Vorgaben und geopolitische Einflüsse stärker in das operative und strategische Handeln der Start-ups. Ein professioneller Umgang mit Exportkontrolle, Dual-Use-Fragen und IP-Schutz bildet dabei die Grundlage. Ergänzend gewinnt ein systematisches geopolitisches Risikomanagement an Bedeutung: regelmäßige Risiko-Screenings, Szenarienplanung und der Aufbau spezifischer »Geo-Compliance-Kompetenzen« helfen Start-ups, internationale Kooperationen resilient zu gestalten und technologiepolitische Disruptionen frühzeitig zu erkennen. So lassen sich

internationale Handlungsspielräume sichern, ohne die eigene technologische Position zu gefährden.

Insgesamt zeigen die Befunde zu Spannungsfeld 3, dass Q-Start-ups auch hier auf Ambidextrie setzen (s. Spannungsfeld 1). Sie sichern ihre Handlungsfähigkeit zwischen globaler Vernetzung und europäischen Souveränitätsansprüchen dadurch, dass sie internationale Kooperationen bewusst aufrechterhalten und globale Ressourcen nutzen, während sie zugleich europäische Wertschöpfungsnetzwerke systematisch ausbauen und regulatorische wie geopolitische Risiken aktiv angehen. Es zeigt sich in der Praxis der Q-Start-ups keine einfache Entweder-oder-Entscheidung zwischen Offenheit und Autarkie, sondern eine doppelte Ausrichtung, in der globale Einbettung und der Aufbau mittelfristig tragfähiger europäischer Optionen parallel verfolgt werden.



Spannungsfeld 4: Disruption vs. Integration

Hypothese

»Q-Start-ups bewegen sich in einem Spannungsfeld zwischen der Entwicklung disruptiver Anwendungen und den gegenwärtigen Erfordernissen technischer, organisatorischer und kompetenzbezogener Integration. Erfolgsversprechend sind Strategien, die das langfristige Disruptionspotenzial mit kurzfristig realisierbaren, hybriden Nutzungsszenarien verbinden.«

Beschreibung des Feldes aus den Interviews: Ad-hoc-Integrationen statt systematischer Disruptionsgestaltung

Quantentechnologie gilt in den Domänen Simulation, Optimierung und Kryptographie als Technologie mit substanziellem disruptivem Potenzial. Angenommen wird dabei nicht ein universeller Ersatz klassischer Rechensysteme, sondern die Fähigkeit von Q-Lösungen, bestimmte, hochkomplexe Problemklassen qualitativ anders und effizienter (z. B. im Hinblick auf Zeit, Rechenleistung, Stromverbrauch) zu lösen, als klassische Computer.

Zwar erinnert die gegenwärtige Phase in ihrer Offenheit an frühe Entwicklungsstadien klassischer Computer, doch verlaufen Diffusionsprozesse fundamental anders. Klassische Rechensysteme sind über Jahrzehnte hinweg in immer weitere Anwendungsfelder vorgedrungen und zu einer umfassenden digitalen Infrastruktur geworden. Auf dieser Basis haben sich neue Arbeits- und Organisationsweisen herausgebildet und verändern sich weiter. Ein vergleichbar universelles Einsatzspektrum für Quantencomputer erscheint hingegen gegenwärtig technisch nicht absehbar.

Daraus ergibt sich ein grundlegender Schritt, der beide Pole des Spannungsfeldes verbindet. Damit disruptive Anwendungen entstehen können, müssen Q-Start-ups und potenzielle Anwender ein wechselseitiges Verständnis für Problemlösung und Problemverständnis bzw. Problemformulierung sowie deren vorteilstiftende Kompatibilität entwickeln. Start-ups müssen industrielle Problemstellungen nachvollziehen und deren Struktur auf Q-Lösungen abbilden. Anwender wiederum müssen ihre fachlichen Herausforderungen präzisieren und die Möglichkeiten, Grenzen und Voraussetzungen quantischer Verfahren so weit verstehen, dass die Integration in bestehende technische und organisatorische Abläufe gelingen kann. Die Integration oder Nutzung im Einzelfall folgt zurzeit weitgehend etablierten Nutzungsmustern aus dem High-Performance-Computing (HPC) und Q-Ressourcen werden analog zu anderen Rechenressourcen eingebunden. Aufgaben werden an entsprechende Rechenzentren übertragen, dort den entsprechenden Ressourcen zugewiesen, ausgeführt und die Ergebnisse anschließend an die Nutzer zurückgespielt. Es entstehen hybride Nutzungsszenarien, in denen quantische und klassische Computersysteme eng zusammenwirken. Nach Einschätzung der Start-ups bestehen derzeit keine grundlegenden technischen oder organisatorischen Hemmnisse, die

diese Formen des Zusammenwirkens behindern würden. Dieses Zusammenspiel verdeutlicht, dass Disruption und Integration keine Gegensätze sind: radikal neue Lösungen entfalten nur dann Wirkung, wenn sie zugleich anschlussfähig in hybride quantisch-klassische IT-Systemlandschaften überführt werden können.

Herausforderung und Handlungsstrategie: Mit QaaS-Geschäftsmodellen die Integrationsaufwände reduzieren

Herausforderung: Fehlende technische Standards zur Integration in IT-Systemlandschaften

Aktuell existieren keine Vorgehensmodelle, die die Integration von Q-Lösungen in bestehende IT-Systemlandschaften beschreiben. Gleichzeitig fehlen Standards in Hinblick auf die Definition der für den Datenaustausch zwischen quantischen und klassischen Computersystemen notwendigen Schnittstellen und Verarbeitungsschritte. Dies betrifft auch Standards, die die Anforderungen an die Q-Hardware (z. B. Verfügbarkeit oder Wartbarkeit) sowie ihre Umgebung (z. B. Klimatisierung oder Erschütterungen) definieren. Das führt dazu, dass die Integration von Q-Lösungen in bestehende IT-Systemlandschaften ad-hoc und ohne methodische Basis durchgeführt wird. Zwar nehmen die Q-Start-ups diese Aufgabe als trivial wahr. Dennoch müssen sich die Start-ups stets von Neuem an die anwendungsfallspezifischen Gegebenheiten anpassen, wodurch Ressourcen gebunden werden, die nicht für die Technologieentwicklung zur Verfügung stehen.

Handlungsstrategie: Reine QaaS-Geschäftsmodelle

Um die Integrationsaufwände zu reduzieren, stellen die Q-Start-ups ihre Q-Lösungen überwiegend als SaaS-Lösungen (Software as a Service) bereit. Zwar gibt es auch Fälle, bei denen beispielsweise Q-Systeme physisch bei Industriekunden oder auch in HPC-Zentren integriert worden sind. Diese bilden jedoch die Ausnahme. Verglichen mit On-Premise-Lösungen ist die Integrationstiefe bei SaaS-Lösungen niedriger, da die Anbindung der Kundensysteme lediglich an die von den Q-Start-ups selbst definierten Schnittstellen erfolgen muss. Diese Schnittstellen werden in der Regel nicht kundenspezifisch angepasst. Die Start-ups unterstützen jedoch bei der Einbindung der Q-Lösungen und entwickeln bei Bedarf proprietäre Schnittstellen, um die Anschlussfähigkeit ihrer Lösung an bestehende IT-Systemlandschaften sicherzustellen. Aus Sicht der Start-ups gehört diese Integrationsunterstützung zum Kern ihres Wertversprechens und Leistungsangebots. Durch dieses Vorgehen machen sie sich zudem unabhängiger von den infrastrukturellen Bedingungen beim Endnutzer. Dies ist insbesondere relevant, weil die Integration von Q-Hardware vor Ort aufgrund der technologischen Empfindlichkeit, etwa gegenüber äußeren Störeinflüssen oder komplexen Umgebungsanforderungen, als besonders aufwändig und anspruchsvoll gilt.

Zusammenfassung und Interpretation: Integration als Vorleistung für Disruption

Die empirischen Ergebnisse zeigen, dass die Hypothese grundsätzlich auf Resonanz stößt: Start-ups bewegen sich zwischen einem langfristigen Disruptionspotenzial und vielfältigen Integrationsanforderungen. In den Gesprächen dominiert ein deutlich technisch geprägtes Verständnis von Integration. Sie wird vor allem als technische Anschlussfähigkeit und als Voraussetzung für erste hybride Nutzungsszenarien verstanden, deutlich weniger jedoch als Teil eines erweiterten organisatorischen oder strategischen Transformationsprozesses. Entsprechend wird Disruption nur selten im Sinne veränderter Wertschöpfung, Rollenmodelle oder Geschäftslogiken auf der Anwenderseite künftiger Kunden von Q-Lösungen thematisiert. Gleichwohl lassen sich aus den qualitativen Daten Hinweise ableiten, die über ein rein technisches Verständnis hinausweisen und die strukturellen Voraussetzungen künftiger Transformationsprozesse erkennen lassen. Das Spannungsfeld zeigt sich also weniger als ein unmittelbarer Zielkonflikt, sondern als ein ungleichgewichtiger Entwicklungsprozess, in dem der Integrationspol aktuell deutlich stärker ausgeprägt ist als der Disruptionspol. Aus den empirischen Befunden lassen sich vier miteinander verbundene Handlungsschwerpunkte ableiten.

Technische Integration als strategische Voraussetzung für Disruption gestalten

Die Integration technischer und organisatorischer Schnittstellen bestimmt derzeit die Handlungslogik der befragten Start-ups stärker als das langfristige Disruptionspotenzial und die Antwort auf die Frage »Was kann ich damit besser tun?«. Integration sollte bewusst als strategische Vorleistung für zukünftige Durchbrüche verstanden werden. Dazu gehören technische Aspekte wie klare Schnittstellenkonzepte, modulare Architekturen aber auch ein

strukturierter Prozess zur Übersetzung industrieller Problemstellungen in quantenbasierte Lösungsansätze.

Disruption als organisatorische und geschäftsmodellbezogene Frage stärker adressieren

Gegenüber dem technischen Verständnis von Integration, sind wirtschaftliche oder geschäftsmodellbezogene Auswirkungen bzw. Chancen quantischer Disruption noch unterbelichtet. Um Geschäftspotenziale voll auszuschöpfen, müssen Q-Start-ups wie auch Anwender verstehen, wie Quantentechnologien bestehende Prozesse, Rollenmodelle, Wertschöpfungsketten und Geschäftsmodelle transformieren könnte. Dies erfordert eine ausgeprägte Übersetzungsleistung zwischen technischer Möglichkeit und betriebswirtschaftlicher Relevanz.

Geschäftsmodellpotenziale rund um Integration, Use-Case-Übersetzung und Betrieb erschließen

Da On-Premise-Varianten von Q-Lösungen voraussichtlich selten bleiben und SaaS-Modelle dominieren, entstehen neue techniknahe Geschäftsmodelloptionen rund um:

- Beratungs- und Use-Case-Übersetzung (Business/Data Understanding),
- technische Integrationsservices für heterogene IT-Systemlandschaften und
- Betreibende und vermittelnde Modelle (z. B. Reselling, Nutzerverträge).

Diese Felder sind bislang wenig entwickelt, könnten aber wichtige Beiträge zu früher Monetarisierung und Risikoreduktion sowie zur Marktbildung leisten.

Gleichzeitig zeigen die Interviews, dass Rollen und Verantwortlichkeiten bei der Integration noch nicht klar ausgebildet sind. Zwischen einer erwarteten Bringschuld der Q-Anbieter und einer Holschuld der Endnutzer, eigene Kompetenzen aufzubauen, bestehen unterschiedliche Vorstellungen. Diese prägen die Ausgestaltung solcher Geschäftsmodelle unmittelbar.

Vor diesem Hintergrund gewinnen die Definition von Integrationsrollen und der Aufbau entsprechender Kompetenzen bei Q-Anbietern, Systemhäusern, Weiterbildungsanbietern oder internen Teams an Bedeutung. Dies gilt insbesondere, wenn das Thema Integration aus dem Technikbereich heraus auf Management- und Governance-Ebenen ausgeweitet wird. Relevante Kompetenzbereiche umfassen:

- das Verständnis von Möglichkeiten und Begrenzungen quantischer Verfahren (ohne die Verfahren selbst erlernen zu müssen),
- daten- und modellierungsbezogene Fähigkeiten und
- rechtliche sowie Governance-Expertise (z. B. Datenzugang, Haftungsfragen).

Die Entwicklung solcher Geschäftsmodelle durch unterschiedliche Akteure, auch solche jenseits der unmittelbaren Technologieentwicklung, trägt zur Ausdifferenzierung des Q-Ökosystems bei und stärkt dessen Fähigkeit, künftige Marktstrukturen aufzubauen. Insgesamt entsteht damit ein Ökosystem, das technische Angebote, Integrationsleistungen und Weiterbildung bündelt und so die Grundlage für tragfähige Marktstrukturen bildet.

“

Quantencomputer zu bauen ist wahnsinnig komplex. Wer das wirklich macht, baut eigentlich fünf Start-ups gleichzeitig auf.

- Dr. Thomas Luschmann

”

Standardisierung und Hardware-Software-Co-Design vorantreiben

Obwohl in den Interviews häufig gesagt wurde, dass fehlende Standards aktuell kein Hindernis darstellen, deuten die Analysen auf gegenteilige strukturelle Effekte hin:

- Die geringe Standardisierung zwingt Start-ups Integrationsarbeit zu übernehmen.
- Die Anschlussfähigkeit für Systemintegratoren und Endnutzer bleibt reduziert.
- Der Aufbau skalierbarer Geschäftsmodelle wird erschwert.

Prioritär ist daher die Entwicklung von Frameworks, Schnittstellen oder de-facto-Standards, die Interoperabilität und Wiederverwendbarkeit ermöglichen. Dies erfordert Partnerschaften zwischen Hardware-, Software- und Anwendungsebene. Hardware-Software-Co-Design sollte als ökosystemische Kernaufgabe verstanden und förderpolitisch stärker unterstützt werden.

4 Empirische Befunde und Interpretation

Zusammengefasst legen die empirischen Befunde nahe, dass technisch verstandene Integration gegenwärtig den zentralen Bezugsrahmen bildet. Disruptive Wirkungen in der Welt der künftigen Anwender bleiben noch vorwiegend perspektivisch. Die allmähliche Verbindung beider Pole schafft die Grundlage für weitergehende technologische und organisatorische Entwicklungen und kann zu einer robusten Marktbildung beitragen.

“

Es gibt einen großen Bedarf nach Standards, gerade im Software-Bereich.

- Prof. Dr. Robert Wille

”

Spannungsfeld 5: Forschungs-Push vs. Industrie-Pull

Hypothese

»Q-Start-ups agieren in einem Spannungsfeld zwischen einem starken Forschungs-Push und einem noch schwachen Industrie-Pull. Während wissenschaftliche Entwicklungen den technologischen Fortschritt vorantreiben, bleibt die wirtschaftliche Nachfrage oft unklar. Die Start-ups müssen daher Wege finden, ihre forschungsgetriebenen Ansätze so zu übersetzen, dass sie für potenzielle Anwender konkrete, marktorientierte Nutzenversprechen enthalten.«

Beschreibung des Feldes aus den Interviews: Vermittlung zwischen wissenschaftlichem Fortschritt und industrieller Anwendbarkeit

Damit die Technologie die für die kommerzielle Nutzung notwendige Reife erreichen kann, ist universitäre Grundlagenforschung unverzichtbar. Diese ist überwiegend öffentlich gefördert und zielt primär auf technologische Erkenntnisgewinne ab. Die Lösung konkreter industrierelevanter Probleme steht bislang noch wenig im Vordergrund. Dadurch entsteht eine gewisse Distanz zwischen wissenschaftlichen Fortschritten auf der einen Seite und industriell verwertbaren, Mehrwert stiftenden Anwendungen auf der anderen Seite. Q-Start-ups versuchen diese Distanz mit ihren Produkten und Dienstleistungen zu überbrücken. Damit übernehmen sie – ergänzend zu ihrer unternehmerischen Rolle – in gewissem Maß auch eine vermittelnde Funktion beim Technologietransfer zwischen Forschung und industrieller Anwendung.

Das Tagesgeschäft der Start-ups ist auch nach der Gründung weiterhin stark von wissenschaftlichen Tätigkeiten geprägt. Dabei treffen zwei unterschied-

liche Anforderungen aufeinander: Zum einen geht es um den Transfer von Ergebnissen aus der Grundlagenforschung in Q-Lösungen. Deren technologische Weiterentwicklung ist von der hohen Dynamik im gesamten F&E-Feld geprägt. Start-ups müssen neue wissenschaftliche Erkenntnisse kennen, in ihre bestehenden Lösungen integrieren und sich selbst am wissenschaftlichen Diskurs, etwa durch Publikationen oder Positionspapiere, beteiligen. Gleichzeitig sind sie als Unternehmen gefordert, die Produktisierung und Kommerzialisierung ihrer komplexen technischen Lösungen voranzutreiben. Die empirischen Befunde zeigen, dass die forschungsbezogenen Aktivitäten, also der Forschungs-Push, den Innovationsprozess maßgeblich bestimmen.

Der Industrie-Pull hingegen, verstanden als konkrete Nachfrage der Industrie, ist deutlich schwächer ausgeprägt. Für die Identifikation von industrierelevanten Problemen sind die Start-ups auf den Austausch mit Unternehmen angewiesen. Die relevanten Ansprechpersonen sitzen überwiegend in Forschungs- oder Innovationsabteilungen, in denen neue Technologien im Hinblick auf ihre mehrwertstiftende Anwendung im Unternehmen bewertet werden. Diese Bewertung erfolgt in der Regel technologieoffen und lösungs-

neutral. Gesucht wird die beste Lösung für ein Problem.

Der Forschungs-Push innerhalb der Unternehmen wird maßgeblich von diesen Akteuren getragen. Allerdings führt der unklare ROI-Zeitpunkt sowie der schwer abschätzbare Mehrwert der quantentechnologischen Anwendungen oft zu Zurückhaltung auf Unternehmensseite. Potenzielle Anwender agieren in diesem Kontext zumeist risikoaverser als Forschungsorganisationen oder Start-ups, zumal die Wissenslücke bzw. Transferlücke zwischen Forschung und Anwendung im Q-Bereich noch recht groß ist. Entsprechend bleibt der Industrie-Pull, verstanden als konkrete und belastbare Nachfrage aus der Industrie, bislang deutlich schwächer ausgeprägt.

“

Die Entscheidung wird nicht danach getroffen, ob etwas auf Quantencomputing basiert, sondern ob es ein konkretes Problem löst. Nicht weil Quantencomputing für den Use Case ungeeignet wäre, sondern oft, weil es gar nicht notwendig ist. Wir wissen schon aus dem klassischen Computing: Unternehmen interessieren Anwendungen, Software und der entstehende wirtschaftliche Mehrwert, nicht Chips oder Hardware.

- Michael Lachner

”

Herausforderung und Handlungsstrategie: Problemlösungskompetenz als Türöffner für industrie-relevante Q-Anwendungsfälle

Herausforderung: Identifikation industrierelevanter Q-Anwendungsfälle

Die öffentlich geförderte Q-Forschung ist primär auf die Technologieentwicklung ausgerichtet. Der Schritt zur Marktfähigkeit und die Identifikation von industrierelevanten Q-Anwendungsfällen wird überwiegend von den Start-ups geleistet und unterstützt von privatem Wagniskapital. Der bislang begrenzte Austausch zwischen Start-ups und Industrie erschwert es den Start-ups, ihre Q-Lösungen frühzeitig an industriellen Bedarfen auszurichten und verstetigt somit die Unklarheit über ihren konkreten Mehrwert.

Handlungsstrategie: Problemlösungskompetenz als Türöffner

Um trotz der bislang beobachtbaren Zurückhaltung seitens der Industrie einen Zugang zu relevanten Anwendungsfällen zu erhalten, setzen die Start-ups auf ihre allgemeine Problemlösungskompetenz. Sie bieten an, gemeinsam mit interessierten Unternehmen konkrete Problemstellungen auf Basis definierter Anforderungen systematisch zu erfassen und anschließend technologieoffen zu bearbeiten. Ziel ist es, zunächst die jeweils beste Lösung zu identifizieren, unabhängig davon, ob diese auf quantentechnologischen oder etablierten Ansätzen beruht. So basieren erste Lösungen zunächst oft auf etablierten Technologien wie KI oder ML, die häufig Teil des Leistungsangebots eines Q-Start-ups sind (s. Spannungsfeld 1). Eignet sich eine Problemstellung für den Q-Einsatz, wird diese anschließend als Q-Anwendungsfall formuliert und beispielsweise als Toy Example realisiert oder simuliert (s. Spannungsfeld 2). Zudem werden Anwendungsfälle in die Roadmaps des Start-

ups so integriert, dass ersichtlich wird, mit welchem technologischen Reifegrad welche Lösungsqualität erreichbar ist.

Die mit der Übersetzung des Problems in einen Q-Anwendungsfall verbundenen Arbeiten, wie das Aufsetzen des Workflows oder die Definition der Datenflüsse, sind dabei bewusst so angelegt, dass sie auf künftige leistungsfähigere Q-Hardware adaptierbar bleiben. Auf diese Weise gewinnen Start-ups, die sich als Partner in der Problemdefinition und -analyse erweisen, vertiefte Einblicke in die jeweiligen Domänen und Bedarfe von Unternehmen. So wird es ihnen ermöglicht, ihre quantentechnologischen Lösungen sowie ein begleitendes Leistungsportfolio schrittweise an den Bedarf der Industrie ausrichten. Dazu gehört auch ein entsprechender Kompetenzaufbau beim eigenen Personal.

Zusammenfassung und Interpretation: Mit etablierten Technologien zum Q-Anwendungsfall

Die empirischen Befunde bestätigen Hypothese fünf. Sie verorten Q-Start-ups in einem Spannungsfeld, das durch einen starken, öffentlich getragenen Forschungs-Push und einen bislang schwach ausgeprägten Industrie-Pull geprägt ist. Diese Konstellation weist zentrale Charakteristika eines entstehenden Marktes (»nascent market«) auf, in dem Angebot und Nachfrage noch nicht koordiniert sind, technologische Reife und Marktnutzen schwer abschätzbar bleiben und wirtschaftliche Wertschöpfung überwiegend antizipiert wird. Vor diesem Hintergrund lassen sich drei zentrale Handlungsschwerpunkte herausarbeiten.

Arbeitsteilung zwischen Forschung und Anwendung bewusst gestalten

Die Ergebnisse zeigen eine ausgeprägte funktionale Arbeitsteilung zwischen öffentlich geförderter Forschung und anwendungsnaher Entwicklung. Während Grundlagenforschung den technologischen Fortschritt treibt, übernehmen Q-Start-ups die Übersetzung in potenziell industrielle Nutzungskontexte. Damit agieren sie als vermittelnde Akteure zwischen wissenschaftlicher Dynamik und zukünftiger Anwendung, obwohl ein stabiler Industrie-Pull noch nicht besteht.

Für die Start-ups ergibt sich daraus die strategische Notwendigkeit, diese Brückenfunktion aktiv zu gestalten und gegenüber Industrie, Fördergebern und Investoren klar zu kommunizieren. Die strukturierte Vorbereitung zukünftiger Anwendungsfähigkeit wird zum relevanten Leistungsbeitrag, von dem nicht nur Start-ups und deren Kunden, sondern auch die Forschung durch Erkenntnisse aus Anwendungserfahrungen profitieren können. Diese Brückenfunktion ist charakteristisch für ein frühes Marktstadium und bildet eine zentrale strategische Rolle der Start-ups.

Produktisierung über Technologie hinausdenken

Aufgrund des schwachen Industrie-Pulls, kann Produktisierung nicht primär und nicht alleine als Verkauf marktreifer Q-Lösungen verstanden werden. Vielmehr erweitern Q-Start-ups ihr Leistungsportfolio um wissensbasierte und dienstleistungsorientierte Angebote wie Problemanalyse, Anwendungsfall-identifikation, Simulation oder Roadmapping.

Diese Form der Produktisierung adressiert nicht nur technologische, sondern auch kognitive und organisationale Barrieren auf Unternehmensseite. Wissenstransfer, Übersetzungsleistungen und Erklärbarkeit werden damit selbst zu vermarktbaren Leistungen,

die zwischen partnerschaftlicher Zusammenarbeit und kundenbezogener Beauftragung angesiedelt sind. Produktisierung erfolgt somit schrittweise und prozessual, und nicht ausschließlich entlang eines technologischen Endprodukts.

Industrie-Pull über Kompetenz- und Vertrauensaufbau entwickeln

Ein stärkerer Industrie-Pull kann von Q-Start-ups durch wiederholte, technologieoffene Interaktionen mit Unternehmen vorbereitet und, in begrenztem Umfang, mitgestaltet werden. Gemeinsame Problemanalysen, transparente Kommunikation technologischer Potenziale und Grenzen sowie die Einbindung technischer Verantwortlicher in den Unternehmen schaffen Anschlussfähigkeit. Unter den gegenwärtigen Bedingungen ist es hilfreich, Industrie-Pull nicht als unmittelbare Nachfrage zu verstehen, sondern als Ergebnis eines längerfristigen Koordinationsprozesses zwischen Technologiereife und industrieller Anschlussfähigkeit. Wissenstransferformate, Kompetenzentwicklung auf verschiedenen Niveaus und Aufbau von Vertrauen sind zentrale Elemente, die auch zu vermarktbareren Beiträgen werden können.

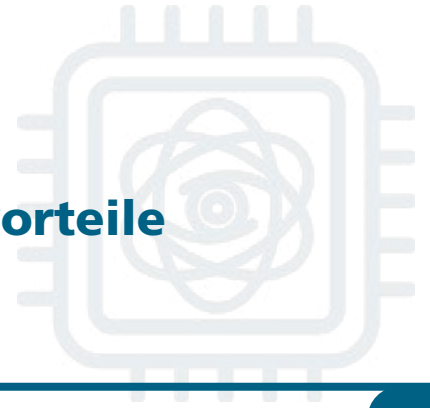
Spannungsfeld 5 zeigt zusammenfassend, dass Q-Start-ups derzeit weniger in einem nachfragegetriebenen Markt agieren als in einem forschungsdominierten Koordinationsraum. Die gegenwärtige Dynamik ist dominant durch forschungsgetriebene Entwicklungslogiken geprägt, die Schaffung von Nachfrage tritt demgegenüber zurück. Deutlich wird die vermittelnde Rolle von Start-ups zwischen wissenschaftlichem Fortschritt und potenzieller industrieller Anwendung in einem entstehenden Markt. Produktisierung, Wissenstransfer und Koordination von Erwartungen übernehmen in diesem frühen Marktstadium eine vorbereitende Funktion und bilden zentrale Voraussetzungen für eine spätere Verstärkung des Industrie-Pulls.

“

Und wir als Hardware-Hersteller müssen dann sehen, dass wir irgendwann einen leistungsfähigen Quantencomputer hinstellen und der muss halt mehr können als alles, was da draußen existiert. Das ist die große Wette.

- Jan Kegelberg

”



Spannungsfeld 6: Erwartete Quantenvorteile vs. Praktische Realisierung

Hypothese

»Q-Start-ups agieren in einem Spannungsfeld zwischen hohen Erwartungen an Quantenvorteile und deren derzeit noch begrenzter praktischer Realisierung. Ihr Erfolg hängt maßgeblich davon ab, wie sie das Erwartungsmanagement zwischen Investoren, Anwendern und Forschungsgemeinschaft gestalten und dabei eine Balance zwischen Zukunftsvisionen und gegenwärtigen technologischen Möglichkeiten finden.«

Beschreibung des Feldes aus den Interviews: Realisierbarer Quantenvorteil als Zentrum der Kommunikation

Die Überführung quantentechnologischer Visionen und forschungsbasierter Potenziale in marktfähige Produkte, Leistungsangebote und Geschäftsmodelle stellt den zentralen Auftrag und Geschäftszweck der Q-Start-ups dar. Anders als akademische Akteure müssen sie den erwarteten Quantenvorteil nicht nur technologisch antizipieren, sondern eigenständig operationalisieren, kommerzialisieren und gegenüber potenziellen Kunden kommunizieren. Diesem Anspruch steht jedoch die bislang unzureichende Technologiereife entgegen (s. Spannungsfeld 1). Wie aus den empirischen Daten hervorgeht, definieren Start-ups den Quantenvorteil als jeden messbaren Leistungsvorteil, den eine Q-Lösung gegenüber einer Lösung auf Basis klassischer Computersysteme bietet. Ein Quantenvorteil gilt beispielsweise dann als realisiert, wenn ein Problem schneller, energiesparender oder präziser gelöst werden kann. Erst wenn solche Vorteile in konkrete Mehrwerte für die Industrie übersetzbar sind und in wirksame, meist monetäre Vorteile umgewandelt werden können (oder dies zu-

mindest hoch wahrscheinlich und experimentierbar bzw. pilotierbar ist), eröffnet sich die Grundlage für Zahlungsbereitschaft und damit für wirtschaftliche Tragfähigkeit.

Zwar betrifft die fehlende Möglichkeit, einen Quantenvorteil realisieren zu können, alle Q-Start-ups in vergleichbarer Art und Weise. Die empirischen Befunde zeigen jedoch, dass sie diesen Sachverhalt kommunikativ unterschiedlich adressieren.

Q-Start-ups konkurrieren um die Aufmerksamkeit von Fördergebern, Investoren und industriellen Anwendern. In diesem Wettbewerb erhalten oftmals die Akteure eine Förderung, Kapital oder Aufträge, die einen besonders vielversprechenden Entwicklungsstand und/oder eine überzeugende Zukunftsperspektive ihrer Q-Lösung kommunizieren können. Vor diesem Hintergrund nehmen einige Start-ups in der Q-Community einen impliziten Anreiz wahr, den eigenen technologischen Reifegrad sowie die antizipierte Leistungsfähigkeit ihrer Q-Lösung optimistisch darzustellen. Eine realistischere oder zurückhaltendere Einschätzung des Technologiestands und der Entwicklungsgeschwindigkeit drohen demgegenüber in der öffentlichen Wahrnehmung unterzugehen.

Das Erzählen von Erfolgsgeschichten und die betont optimistische Kommunikation werden von den Start-ups als notwendiges »Spiel« in einem kompetitiven Umfeld beschrieben, in dem sie um Aufmerksamkeit, Ressourcen und Legitimität konkurrieren. Zugleich verorten sie sich in einem Markt, der sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium befindet und in dem vorwettbewerbliche Kooperationsformen eine zentrale Rolle spielen. Vor diesem Hintergrund erfüllen optimistische Narrative nicht nur eine wettbewerbliche Funktion, sondern tragen auch zur kollektiven Erwartungsbildung und Stabilisierung des entstehenden Marktes bei.

“

Es ein Glaubensspiel: Glaube ich an die Technologie, an das Team, oder nur an eines von beidem? Wissen tut das niemand. Man minimiert Risiko über Datenpunkte und Studien, aber am Ende kommen die zusammen, die spüren, dass es gemeinsam funktionieren kann.

- Jan Kegelberg

”

Herausforderung und Handlungsstrategie: Mit Transparenz und Fokus zum Quantenvorteil

Herausforderung: Unrealistische Erwartungen an die Quantentechnologie

Eine stark optimistische Darstellung der Q-Leistungsfähigkeit kann zu einer unrealistischen Erwartungs-

haltung aufseiten von Fördergebern, Investoren und industriellen Anwendern führen. Dadurch entsteht eine Diskrepanz zwischen der erwarteten und der tatsächlich realisierbaren Leistungsfähigkeit von Q-Lösungen. Diese Diskrepanz muss kommunikativ aufgezeigt und ausgeglichen werden. Aus den empirischen Daten wird deutlich, dass damit ein erheblicher Rechtfertigungsdruck für Start-ups verbunden sein kann. Dies gilt insbesondere dann, wenn die eigene Q-Lösung in der offiziellen Darstellung leistungsschwächer wirkt als eine Konkurrenzlösung. Werden solche Diskrepanzen nicht ausgeglichen, kann es dazu führen, dass enttäuschte Erwartungen, insbesondere aufseiten der Investoren und der industriellen Anwender, einem weiteren Q-Engagement im Weg stehen werden.

Handlungsstrategie: Transparente Leistungskommunikation

Übereinstimmend berichten die interviewten Start-ups, dass sie auf eine transparente, optimistische, aber auch realistische Kommunikation der Leistungsfähigkeit ihrer jeweiligen Q-Lösung setzen. Potenzielle Nachteile einer gegenüber stärker auf Aufmerksamkeit ausgerichteten Kommunikationsform werden bewusst in Kauf genommen. Ziel ist es, vertrauensvolle Beziehungen zu Kunden und Partnern aufzubauen, in deren Rahmen die jeweiligen Erwartungen an die Leistungsfähigkeit der Quantentechnologie möglichst deckungsgleich sind. Diese Erwartungskongruenz wird von den Start-ups als zentrales Element für langfristige Kunden- oder Kooperationsbeziehungen verstanden, auf die in Zukunft, wenn eine gewisse Technologiereife erreicht worden ist, aufgebaut werden kann. Ein solches Vertrauensverhältnis erleichtert zudem die gemeinsame Entwicklung von Lösungen, die (zunächst) auf klassischen Computersystemen basieren. Gleichzeitig zeigt sich, dass Start-ups in ihrer Kommunikation um eine Balance ringen: Zwischen der realistischen Darstellung der eigenen Leistungsfähigkeit und der Anschluss-

fähigkeit an den dominierenden Kommunikationsstil anderer Q-Akteure.

Herausforderung: Noch nicht realisierter Quantenvorteil

Der empirische Befund macht deutlich, dass der noch nicht realisierte Quantenvorteil die wesentliche Herausforderung darstellt, mit der die gesamte Q-Community konfrontiert ist. Zwar nährt die Geschwindigkeit der Technologieentwicklung bei den Start-ups die Hoffnung auf einen Durchbruch, der in greifbarer Nähe ist. Hoffnung allein reicht jedoch nicht aus, um bereits heute mehrwertstiftende Lösungen zu schaffen, die Investoren und Industriekunden überzeugen und Umsätze generieren.

Handlungstrategie: Domänenfokus und kontinuierliche Weiterentwicklung

Um ihre jeweils spezialisierten und begrenzten Ressourcen zu bündeln und einen Durchbruch dadurch wahrscheinlicher zu machen, fokussieren sich die Start-ups auf klar abgegrenzte Domänen oder Nischen. Dabei werden, zumindest von Software-Start Ups, auch Lösungen auf Basis klassischer Computersysteme entwickelt und angeboten. Auf diese Weise vertiefen die Start-ups ihr Domänenwissen, arbeiten am oben erwähnten Vertrauen und können industrielle Anforderungen kontinuierlich in die Weiterentwicklung ihrer Q-Lösung integrieren. Dieser Ansatz wird als inkrementeller Weg verstanden, um sich unter Berücksichtigung der Anwendungsseite der Realisierung eines Quantenvorteils zu nähern.

“

Man ist prinzipiell von der Technologie überzeugt, bleibt aber in Hinblick auf die derzeitige Leistungsfähigkeit ehrlich und transparent. Das kann manchmal im Kontext von „Hypes“ ernüchternd wirken, ist langfristig aber nachhaltiger.

- Prof. Dr. Robert Wille

”

Zusammenfassung und Interpretation: Übereinstimmende Erwartungen und Domänenwissen als Erfolgsfaktoren für die praktische Realisierung der Quantenvorteile

Die empirischen Befunde bestätigen Hypothese 6. Q-Start-ups sehen sich einerseits mit hohen Erwartungen an kurzfristig realisierbare Quantenvorteile konfrontiert, gespeist durch Förderlogiken, Investitionsentscheidungen und industrielle Hoffnungen. Andererseits begrenzen der geringe technologische Reifegrad der Systeme sowie grundlegende wissenschaftlich-technische Unsicherheiten die tatsächliche Realisierbarkeit dieser Erwartungen erheblich. Dieses Spannungsfeld zwischen Vision und praktischer Umsetzung prägt das Handeln der Start-ups in besonderer Weise und strukturiert zentrale strategische Entscheidungen.

Aus der Analyse lassen sich drei miteinander verbundene Handlungsschwerpunkte identifizieren, über die Q-Start-ups dieses Spannungsfeld aktiv gestalten können.

Erwartungsmanagement als unternehmerische Kernkompetenz und marktbildende Funktion

Die Analyse zeigt, dass Erwartungsmanagement im Q-Kontext nicht lediglich als begleitende Kommunikationsaufgabe und Reaktion auf Ansprüche von Investoren und Industrie zu verstehen ist. Vielmehr bildet Kommunikation eine eigenständige unternehmerische Kompetenz und übernimmt unter anderem auch eine marktbildende Funktion. Da der betriebswirtschaftlich eindeutig nachweisbare Quantenvorteil noch nicht realisiert werden kann, wird die Legitimation von Quantentechnologien derzeit über die glaubhafte Strukturierung von Zukunftsfähigkeit, technologischer Entwicklungsdynamik und Anschlussfähigkeit an industrielle Problemstellungen hergestellt.

Start-ups agieren dabei in einem Umfeld, in dem Investoren, Industriepartner und andere Akteure grundsätzlich um die Risiken und langen Entwicklungszyklen Bescheid wissen. Instrumente wie Roadmaps tragen dazu bei, dieses implizite Risikoverständnis zu stabilisieren und Erwartungen zu strukturieren. Erwartungsmanagement dient damit weniger der Rechtfertigung und der kurzfristigen Absatzförderung als vielmehr der Synchronisation von Wissensständen und Zeithorizonten. Entscheidend ist dabei die Balance zwischen Hoffnung und Hype: zu optimistische Narrative gefährden langfristiges Vertrauen, zu zurückhaltende Kommunikation kann Anschlussfähigkeit im entstehenden Markt kosten.

Marktbeteiligung neu denken: Mehrwert aus Vorbereitung, Kooperation und »noch-nicht« erschließen

In der Marktentstehungsphase ist das handelbare Produkt häufig noch nicht die Q-Lösung mit gesichertem betriebswirtschaftlichem Mehrwert. Angeboten und verkauft wird die Vorbereitung auf spätere Wertrealisierung: Kompetenzaufbau, Vorbereitung technischer, organisationaler und rechtlicher Integration aber auch Experimentierfähigkeit und Antizipation künftiger Geschäftsmodelle auf dem Weg »from lab to fab«. Dadurch verschränken sich Verkauf, Kooperation und Förderung in hybriden Formen.

Das beobachtbare »Gleichgewicht des noch-nicht« bedeutet, dass kein Akteur den Quantenvorteil belastbar ausweisen kann. In dieser Phase der Technologieentwicklung und Marktentstehung kann dies sogar stabilisierend wirken, denn es entsteht ein gemeinsamer Entwicklungsraum, in dem vorwettbewerbliche Kooperation, Wissensaustausch und kollektive Erwartungsbildung möglich bleiben. Start-ups können sich hier strategisch positionieren. Statt sich frühzeitig über aggressive Leistungsversprechen zu differenzieren, können sie mit transparenter Kommunikation darüber, warum frühe Marktnähe sinnvoll ist, auch wenn der mehrwertstiftende Quan-

tenvorteil noch aussteht, zur Stabilisierung und Legitimation des entstehenden Marktes beitragen. Künftige Geschäftsmodelle liegen dabei nicht ausschließlich im Bereich Hardware oder Algorithmen, sondern auch in Übersetzungs- und Integrationsleistungen, wie z. B. der Identifikation geeigneter Problemklassen, der Klassifikation rechnerischer Ansätze sowie der Einbettung potenzieller Q-Lösungen in bestehende IT-Systemlandschaften. Hier entsteht eigenständige Wertschöpfung, die sowohl von Start-ups als auch von etablierten Akteuren adressiert werden kann.

Domänenspezialisierung als Brücke zwischen Vision, Industrieanforderungen und Lernkurven nutzen

Solange Quantenvorteile noch nicht belastbar realisiert werden können, entsteht Fortschritt für Q-Start-ups vor allem über Lernen an konkreten industriellen Problemstellungen. Eine Domänenspezialisierung ermöglicht es, diese Lernprozesse zu fokussieren. Der kontinuierliche Austausch mit Industriepartnern ist dabei zentral. Über gemeinsame Projekte, auch auf Basis klassischer Technologien, gewinnen Start-ups Domänenwissen, das direkt in die Weiterentwicklung ihrer Q-Lösungen einfließen kann. Industrieanforderungen werden verstanden, Entwicklungsentscheidungen können priorisiert und konkrete Bedarfe mit der eigenen langfristigen Vision abgeglichen und ggf. nachgeschärft werden.

Da der Quantenvorteil als messbare Referenzgröße noch nicht existiert, kann er kein Maßstab für Fortschritt sein. Eine geeignete Stellvertretergröße für Investoren und Industrie stellt die Geschwindigkeit der oben skizzierten Lern- und Entwicklungsfortschritte dar. Eine nachvollziehbare, hohe Entwicklungsdynamik stärkt die Zuversicht von Investoren, erhöht das Interesse der Industrie und erleichtert Kooperationen. Diese Rückkopplung unterstützt die weitere Vertiefung von Domänenwissen und kann perspektivisch in die Realisierung eines Quantenvorteils münden.

Spannungsfeld 6 zeigt, dass das Handeln von Q-Start-ups anstrebt, zwischen hohen Erwartungen an kurzfristig realisierbare Quantenvorteile und deren derzeit begrenzter praktischer Umsetzung zu vermitteln. Erwartungsmanagement, vorbereitende Marktteilnahme und domänenspezifische Lernprozesse werden dabei zu zentralen Formen von Wertschöpfung in einem Markt, in dem stabile Produkte und klar nachweisbare Vorteile erst noch entstehen.



5 Quanten-Start-ups made in Germany: Marktgestalter und Lösungsanbieter

Die empirische Analyse dieser Studie hat für Q-Start-ups ein Feld sichtbar gemacht, das durch hohe technologische Offenheit, instabile Marktstrukturen und eine enge Verschränkung von Forschung, unterneh-

merischem Handeln und institutioneller Förderung charakterisiert ist. Tabelle 2 zeigt die identifizierten Herausforderungen und Handlungsstrategien pro Spannungsfeld im Überblick.

	Herausforderung	Handlungsstrategien
Spannungsfeld 1: Langfristige Vision vs. Unklarer ROI-Zeitpunkt		
	Unzureichende Technologiereife	Arbeiten mit Roadmaps
		Breites Leistungsangebot
	Komplizierte Förderlandschaft	Managementkompetenzen in der Geschäftsführung
Spannungsfeld 2: Ökosystemintegration vs. Start-up-Innovation		
	Komplexe Exportkontrollbestimmungen	Diversifizierung und Vertiefung bestehender Kooperationen
	Fehlende Standards zur Integration mit anderen Q-Lösungen	Nutzung von de-facto-Standards
		Fokus auf Toy Examples und Minimal Viable Products
Spannungsfeld 3: Globale Vernetzung vs. Technologische Souveränität		
	Risiken durch internationale Abhängigkeiten	Aufbau europäischer Wertschöpfungsnetzwerke
Spannungsfeld 4: Disruption vs. Integration		
	Fehlende technische Standards zur Integration in IT-Systemlandschaften	Reine SaaS-Geschäftsmodelle
Spannungsfeld 5: Forschungs-Push vs. Industrie-Pull		
	Identifikation industrierelevanter Q-Anwendungsfälle	Problemlösungskompetenz als Türöffner
Spannungsfeld 6: Erwarteter Quantenvorteil vs. Praktische Realisierung		
	Unrealistische Erwartungen an die Quantentechnologie	Transparente Leistungskommunikation
	Nicht realisierter Quantenvorteil	Domänenfokus und kontinuierliche Weiterentwicklung

Tabelle 2: Spannungsfelder, Herausforderungen und Handlungsstrategien der Q-Start-ups

Spannungsfeld 1 ist vor allem dem Handeln auf Mikro-Level zuzuordnen. Im Zentrum stehen Entscheidungen zur Ausrichtung der eigenen Organisation und Belegschaft. Ambidextrie in der Verbindung von Forschungs- und Marktlogik ist hier der markante Schlüsselbegriff.

Spannungsfelder 2 und 3 sind analytisch trennbar, empirisch jedoch eng verwoben und auf Meso- und Makro-Level verortet. Start-ups suchen hier nach Formen selektiver Integration in operative und strategische Ökosysteme sowie in politische und geopolitische Rahmensetzungen.

Spannungsfeld 4 liegt überwiegend auf Mikro-Level. Start-ups entwickeln in Anbieter-, Auftraggeber- oder Zuliefererrollen Handlungsstrategien gegenüber anderen Organisationen derselben Ebene. Die Herausforderung besteht darin, technische Innovation und Integration in echte Geschäftsmodelltransformation auf Anwenderseite zu überführen.

Spannungsfelder 5 und 6 erstrecken sich mit ihren Herausforderungen über alle drei Ebenen. Während Spannungsfeld 5 stärker in praktischen Mikro-Entscheidungen verankert ist, adressiert Spannungsfeld 6 vor allem systemweites Erwartungsmanagement. Insgesamt zielen die Strategien darauf ab, in einem »noch-nicht-Markt« eine Brückenfunktion gegenüber Anwenderindustrien, Forschungspartnern, Fördergebern und Investoren zu übernehmen.

Auf dieser Grundlage lassen sich die Ergebnisse der interdisziplinär angelegten Analyse in zwei komplementäre Perspektiven auf Q-Start-ups in einem im Entstehen befindlichen Deep-Tech-Markt ordnen.

In der ersten Perspektive werden Q-Start-ups als Akteure der Marktbildung betrachtet. Im Fokus stehen die Handlungs-, Kommunikations- und Koordinationspraktiken, mit denen die Akteure unter Bedingungen hoher Unsicherheit technologische Entwicklung forcieren und zugleich Strukturen eines bislang

nicht stabilisierten Marktes hervorbringen. Die zuvor identifizierten Spannungsfelder werden hier zu einem konzeptionellen Modell der Marktentstehung im Q-Bereich verdichtet.

In der zweiten Perspektive werden Q-Start-ups stärker als Anbieter von Q-Lösungen in einem sich formierenden (und möglicherweise etablierenden) Markt betrachtet. Im Fokus steht, wie sich die in den Spannungsfeldern sichtbar gewordenen Herausforderungen auf die Gestaltung von Deep-Tech-Geschäftsmodellen, entlang bewährter Ansätze zur Entwicklung von Geschäftsmodellen, auswirken können, und welche quantenspezifischen Besonderheiten dabei sichtbar werden.

Perspektive 1: Q-Start-ups als Gestalter eines entstehenden Deep-Tech Marktes

Die Analyse der Aussagen zu den sechs Spannungsfeldern zeigt: Die Q-Start-ups sind weniger mit einzelnen Zielkonflikten konfrontiert, die isoliert lösbar sind. Vielmehr agieren sie in einem Geflecht struktureller Unsicherheit. Markante Elemente sind dabei die noch geringe technologische Reife, die zeitaufwändige Technologieentwicklung und eine schwach ausgeprägte Nachfrage bei gleichzeitig hohen Erwartungen aus Politik, Industrie und Kapitalmarkt. Handlungsfähigkeit entsteht bei den jungen Unternehmen durch die aktive Gestaltung der Spannungen. Es kann gezeigt werden, dass die Start-ups dafür Praktiken entwickeln, die zusammengeführt, als folgende Handlungsmuster formuliert werden.

1 Kommunikation, Übersetzung und Erwartungsmanagement als marktbildende Kernkompetenz

Über alle Spannungsfelder hinweg und in dreien¹⁰ besonders ausgeprägt, erweist sich Kommunikation als zentrale unternehmerische Leistung. Erwartungsmanagement, Roadmapping und die Übersetzungsarbeit zwischen Technologie, Anwendung und Investitionslogiken übernehmen so lange eine marktbildende Funktion, wie belastbare Produkte und Quantenvorteile fehlen.

Empirisch besonders stark gestützt ist ein Vorgehen, das auf transparente, konsistente und adressatenspezifische Kommunikation setzt. Auf diese Weise wird Vertrauen, Anschlussfähigkeit und Kooperationsbereitschaft bei den verschiedenen Akteuren im Feld erzeugt. Dabei ist neben fachlicher Kompetenz auch Fingerspitzengefühl gefragt. Zu optimistische, fast aggressive Narrative gefährden Glaubwürdigkeit

und den Aufbau langfristig tragfähiger Beziehungen für einen künftigen Markt. Wird die Kommunikation dagegen sehr zurückhaltend, fast defensiv gestaltet, werden die Sichtbarkeit des Unternehmens und damit der Zugang zu Ressourcen erschwert. Kommunikation, der es gelingt, die Balance zwischen fachlich fundierter Perspektive und Hype zu wahren, wird zu einer erfolgskritischen Kompetenz im entstehenden Markt.

2 Produktisierung vor dem Quantenvorteil neu denken: Vorbereitung, Integration und Lernen als Wertbeitrag

Produktisierung kann im aktuellen Marktstadium nicht primär als der Verkauf funktionsfähiger Q-Lösungen verstanden werden. Sie stellt sich in dieser Phase vielmehr als Bündel aus vorbereitenden, integrierenden und lernorientierten Leistungen dar¹¹. Legitimer Wert für Kunden zeigt sich beispielsweise in Form von Orientierung, Kompetenzaufbau oder Risikoreduktion beim Einsatz der Quantentechnologie. Wertschöpfung sowie erste Gewinne bzw. Gewinnoptionen bei Anbietern entstehen beispielsweise durch Problemanalyse, Use-Case-Übersetzung, Simulation, Integration, Schulung oder Roadmapping.

Solche Leistungen adressieren technische, organisationale und kognitive Barrieren auf Anwenderseite. Start-ups können Wissen, Produkte, Referenzen und Beziehungen und damit Vorsprung aufbauen, der sich zu einem späteren Zeitpunkt in höheren und stabileren Gewinnen niederschlagen kann. Eine frühere Marktbeteiligung wird möglich, auch ohne einen realisierten Quantenvorteil. Als besonders funktional für diese Phase vor dem eigentlichen Produkt zeigen sich hybride Finanzierungsmodelle, in denen vorwettbewerbliche Kooperationen, Förderungen und kommerzielle Beauftragungen zusammenspielen. Wertrealisierung kann zeitlich, logisch und betriebs-

¹⁰ Stark bestätigt durch die Ergebnisse aus Spannungsfeld 1 »Langfristige Vision vs. unklarer ROI-Zeitpunkt«, Spannungsfeld 5 »Forschungs-Push vs. Industrie-Pull«, Spannungsfeld 6 »Erwarteter Quantenvorteil vs. Praktische Realisierung«.

¹¹ Stark bestätigt durch die Ergebnisse aus Spannungsfeld 4 »Disruption vs. Integration«, Spannungsfeld 5 »Forschungs-Push vs. Industrie-Pull«, Spannungsfeld 6 »Erwarteter Quantenvorteil vs. Praktische Realisierung«.

wirtschaftlich vor dem Erreichen eines Quantenvorteil liegen, ohne die strategische Ausrichtung auf diesen aufzugeben.

3 Domänenspezialisierung als Steuerungsmechanismus für Lernen und Fortschritt

Die Spezialisierung auf ausgewählte Domänen, im Sinne von Problemfeldern bzw. Branchen potenzieller Kunden, erweist sich empirisch als zentraler Mechanismus, um Industrieforderungen zu verstehen, Lernen und Fortschritt gezielt voranzutreiben und Vorsprünge, manchmal auch durch Umwege, zu gewinnen¹². Gerade weil ein realisierbarer Quantenvorteil noch nicht möglich ist, werden Domänenlernen und dabei entstehendes Domänenwissen zur wertvollen Orientierungsgröße. Im Kontext technologischer Unsicherheit und langer Entwicklungszyklen nutzen Q-Start-ups das schrittweise Erschließen von Anwendungsdomänen gemeinsam mit ihren Kunden zur Priorisierung von Entscheidungen und zur iterativen Entwicklung im Rahmen ihrer jeweiligen Geschäftsstrategien.

Es zeichnet sich ab, dass Lern- und Integrationsfortschritte eines Q-Start-ups in einer Domäne glaubwürdige Indikatoren für die Entwicklungsgeschwindigkeit seiner Q-Lösung darstellen. Diese Entwicklungsgeschwindigkeit wird in der frühen Marktphase zur Stellvertretergröße für unternehmerischen Erfolg, da sie nachvollziehbare Fortschrittsnarrative ermöglicht. Auf diese Weise können das Vertrauen von Investoren gestärkt und Kooperationen mit weiteren Unternehmen erleichtert werden. Daraus können wiederum Rückkoppelungseffekte entstehen, die zur Entwicklung des gesamten Feldes beitragen.

4 Kooperation als strukturelle Notwendigkeit, Wettbewerb als spätere Phase

Q-Start-ups agieren in einem »noch-nicht-Markt«, in dem vorwettbewerbliche Kooperation strukturell unverzichtbar ist¹³. Strategische Offenheit, die selektive Positionierung in Ökosystemen auf verschiedenen Granularitätsniveaus, internationale Partnerschaften und europäische Netzwerke sind Voraussetzung für Zugang zu und Austausch von Ressourcen, Wissen und Infrastruktur. Dabei wird unternehmerischer Wettbewerb nicht negiert, sondern als zeitlich nachgelagert verstanden.

In der zum Zeitpunkt dieser Studie frühen Phase der Marktentwicklung dienen Kooperationen der Entwicklung und Stabilisierung des Feldes insgesamt, der Erwartungskoordination und einer gemeinsamen Legitimation der Quantentechnologien. Im europäischen Kontext wird dies verstärkt mit dem Ziel technologischer Souveränität verknüpft. Die Befunde stützen die Annahme eines (noch) kollektiven Entwicklungsraums mit Platz in vielen Nischen. Wettbewerb wird dann an Dominanz gewinnen, wenn Produkte, Standards und Wertschöpfungspfade deutlichere Konturen gewinnen.

¹² Stark bestätigt durch die Ergebnisse aus Spannungsfeld 5 »Forschungs-Push vs. Industrie-Pull«, Spannungsfeld 6 »Erwarteter Quantenvorteil vs. Praktische Realisierung«.

¹³ Stark bestätigt durch die Ergebnisse aus Spannungsfeld 2 »Ökosystemintegration vs. Start-up-Innovation«, Spannungsfeld 3 »Globale Vernetzung vs. Technologische Souveränität« und Spannungsfeld 6 »Erwarteter Quantenvorteil vs. Praktische Realisierung«.

5 Modell früher Wertrealisierung in emergenten Deep-Tech-Märkten

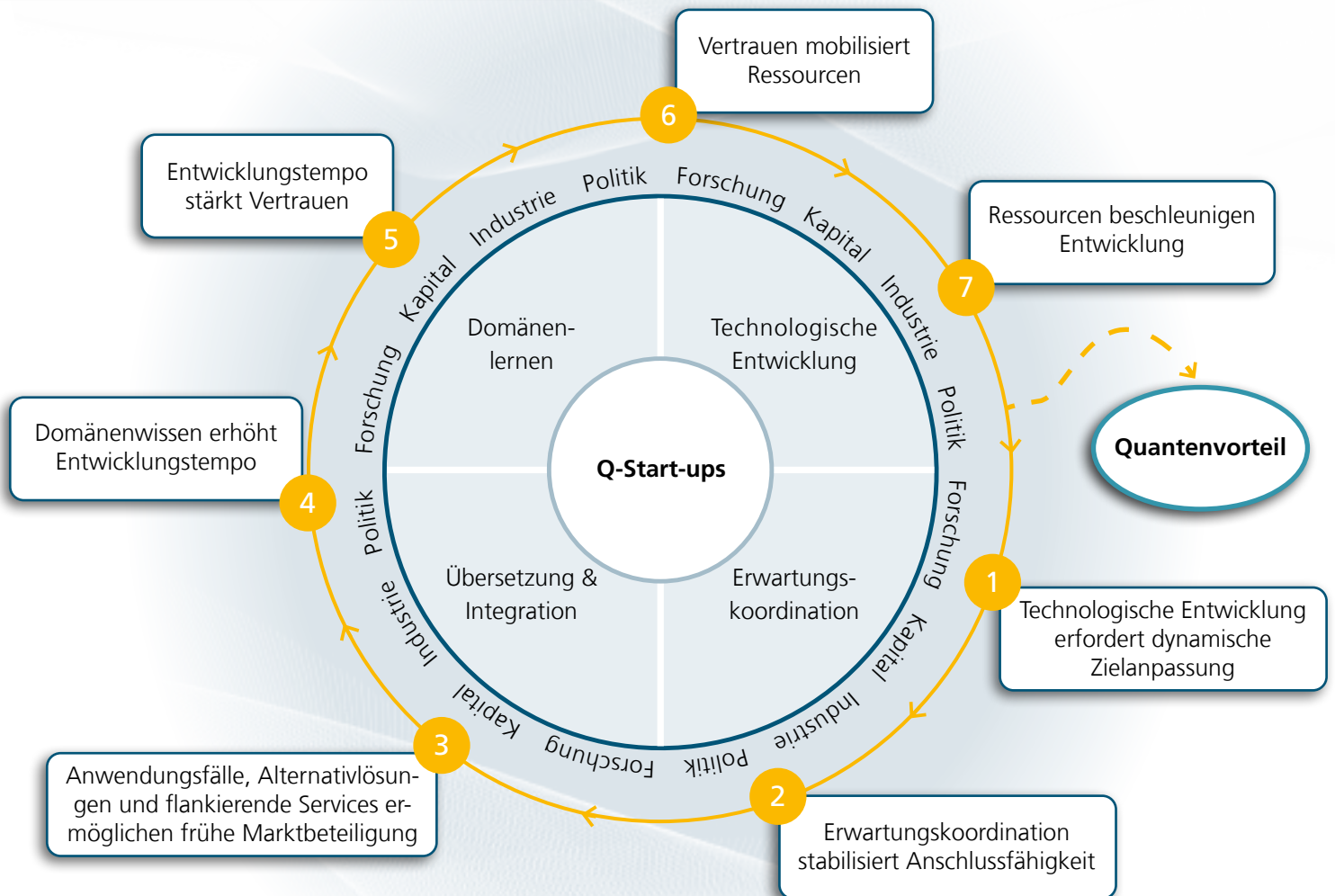


Abbildung 2: Modell früher Wertrealisierung in emergenten Deep-Tech Märkten¹⁴

Die Ergebnisse der ersten Perspektive lassen sich, wie in Abbildung 2 dargestellt, in einem Modell früher Wertrealisierung in emergenten Deep-Tech-Märkten darstellen.

Q-Start-ups, im Kern des Modells dargestellt, agieren in frühen Marktphasen als koordinierende und

vorbereitende Akteure in den vier Funktionsdimensionen:

- Technologische Entwicklung,
- Erwartungskoordination,
- Übersetzung & Integration sowie
- Domänenlernen.

¹⁴ Quelle: Eigene Darstellung

Auf diese Weise adressieren sie technologische Unsicherheit. Sie moderieren Erwartungshaltungen und Anschlussfähigkeit zwischen den weiteren beteiligten Akteursgruppen aus Forschung, Kapital, Industrie sowie Politik und balancieren diese aus. Das leistet einen erheblichen Wertbeitrag für den emergenten Markt. Anders als eine lineare Entwicklung in klassischen Märkten – von der Technologie zum Produkt zum Markt – zeigt sich hier eine ko-evolutionäre Entwicklung in einem engen Wirkzusammenhang der vier Dimensionen, die spiralförmig zu denken ist:

1. Der Status der technologischen Entwicklung erzeugt Unsicherheit.
2. Erwartungskoordination stabilisiert Anschlussfähigkeit des Neuen an Kontext der Akteure im Feld.
3. Übersetzungsleistungen und Integration ermöglichen eine frühe Marktbeteiligung auch ohne quantentechnologisches Produkt.
4. Domänenlernen trägt dazu bei, die Entwicklungsgeschwindigkeit zu erhöhen, plausibel und sichtbar zu machen.
5. Erhöhte Geschwindigkeit stärkt Vertrauen in die technologischen und unternehmerischen Perspektiven.
6. Vertrauen mobilisiert Ressourcen.
7. Ressourcen tragen dazu bei, die technologische Entwicklung voranzutreiben.

Der Quantenvorteil ist dann ein mögliches Resultat unternehmerischen Handelns in frühen Marktphasen und nicht der Startpunkt.

In der Gesamtschau zeigt diese erste Perspektive wie Q-Start-ups als Architekten ihres eigenen entstehenden Marktes agieren. Ein zentraler Ausblick liegt darin, dass künftiger Wert und Wertschöpfung im Q-Bereich nicht ausschließlich durch Hardware und Algorithmen entstehen wird. Ebenso wichtig sind Systemintegration, Governance von Kollaboration, Enablement und Neugestaltung von Geschäftsmodellen, auch auf Anwenderseite. Diese Aspekte verbleiben bislang gegenüber technologischen Ent-

wicklungen bei der Q-Hard und -Software im Hintergrund, obwohl sie als strategische Elemente gleichrangig zur Formierung von Wert und Wertschöpfung beitragen. Hier eröffnen sich sowohl für Forschung als auch für unternehmerisches Handeln Anschlussmöglichkeiten.

Perspektive 2: Q-Start-ups als Anbieter in einem entstehenden Deep-Tech-Markt

In der zusammenfassenden Analyse der empirischen Ergebnisse werden Interdependenzen zwischen den Spannungsfeldern sichtbar. Die Interdependenzen basieren auf den Herausforderungen, die in den ein-

zelnen Spannungsfeldern identifiziert worden sind. Dabei bleiben die Auswirkungen der Herausforderungen nicht auf ein Spannungsfeld begrenzt, sondern wirken sich auch auf andere Spannungsfelder aus, wodurch zwei Gruppen entstehen, die einen dezidierten Fokus aufweisen: **Entwicklung** und **Implementierung** eines Q-Geschäftsmodells. Tabelle 3 und Tabelle 4 fassen diese Gruppen zusammen.

Entwicklung eines Q-Geschäftsmodells		
Spannungsfeld	Pol 1	Pol 2
1	Technologische Ambitionen	Renditeerwartung
5	Erkenntnis	Erträge
6	Vision	Grenzen

Tabelle 3: Interdependenzen bei der Entwicklung eines Q-Geschäftsmodells

Implementierung eines Q-Geschäftsmodells		
Spannungsfeld	Pol 1	Pol 2
3	Globales Sourcing	Regionale Interessen & Souveränität
2	Kooperation	Alleinstellungsmerkmal & Geistiges Eigentum
4	Radikale Durchbrüche & Business Transformation	Anschlussfähigkeit an Realitäten

Tabelle 4: Interdependenzen bei der Implementierung eines Q-Geschäftsmodells

Interdependenzen bei der Entwicklung eines Q-Geschäftsmodells

In Abbildung 3 sind die Interdependenzen der Gruppe »Entwicklung eines Q-Geschäftsmodells« zu sehen. Die Auswirkungen der Herausforderungen auf die anderen Spannungsfelder werden nachfolgend je Spannungsfeld erläutert.

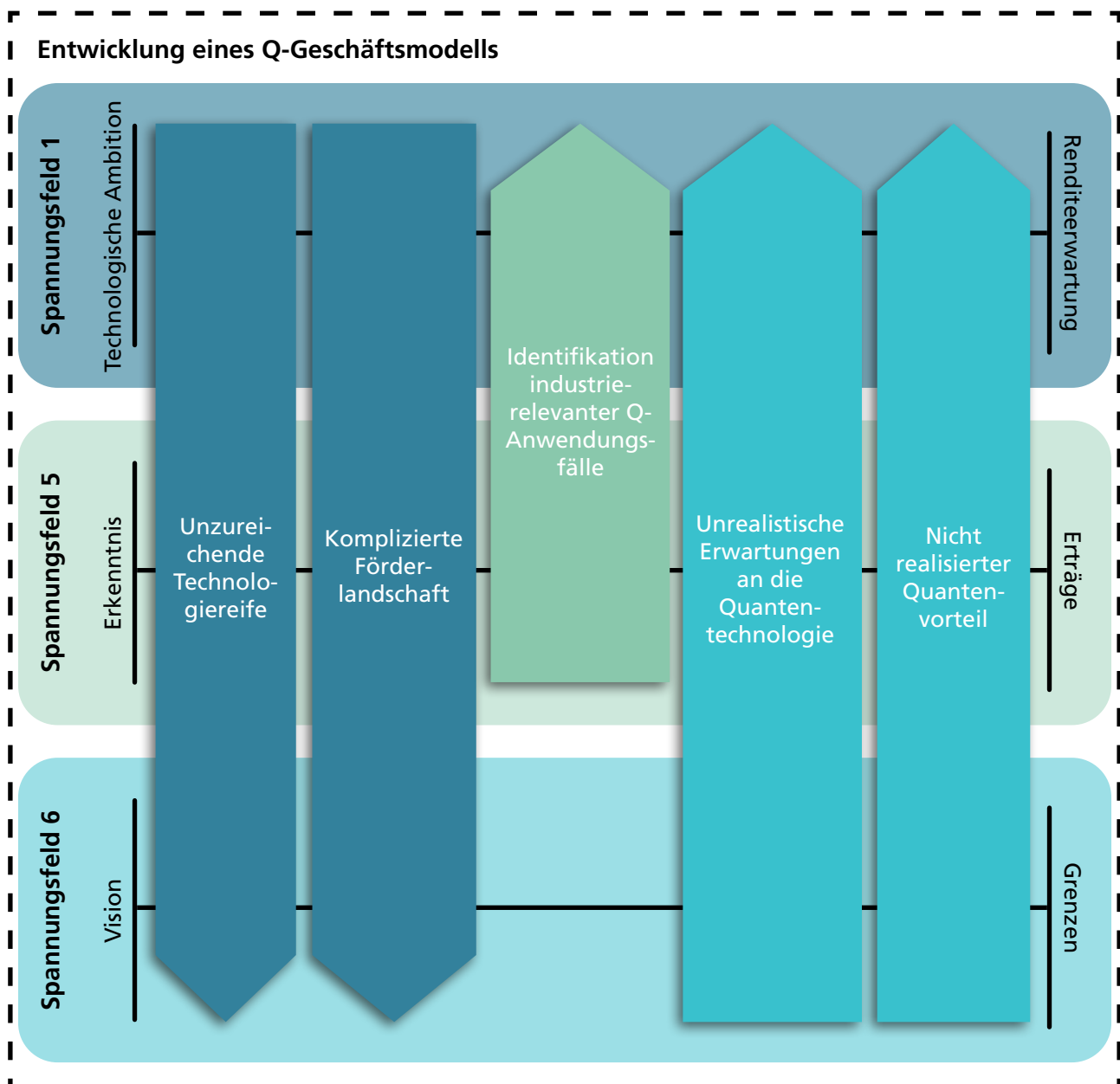


Abbildung 3: Interdependenzen bei der Entwicklung eines Q-Geschäftsmodells¹⁵

¹⁵ Quelle: Eigene Darstellung

Spannungsfeld 1: Langfristige Vision vs. Unklarer ROI-Zeitpunkt

Die Herausforderung »Unzureichende Technologiereife« motiviert die Start-ups dazu, die Technologiereife ihrer Produkte weiter voranzutreiben. Dies geschieht vor allem durch Forschungsaktivitäten, auch in den Start-ups selbst. Dadurch wird der Forschungs-Push in Form von wissenschaftlichen Ergebnissen verstärkt. Indirekt werden damit auch die Erwartungen an einen bevorstehenden Durchbruch bei der Realisierung von Quantenvorteilen gesteigert. Gleichzeitig bremst die Herausforderung »Komplizierte Förderlandschaft« den Forschungs-Push, wenn beispielsweise Kooperationen zwischen öffentlichem und privatem Kapital durch restriktive IP-Vorgaben begrenzt werden. Das erschwert die Überführung wissenschaftlicher Ergebnisse in marktfähige Produkte und ist der wichtigen Rolle der Start-ups für die Entwicklung der Technologie insgesamt nur bedingt zuträglich.

bzw. nicht kurz- oder mittelfristig realisiert werden kann. Dadurch wird die Nachfrage nach Q-Lösungen seitens der Industrie weiter geschwächt. Gleichzeitig erschwert dies die Finanzierung der Start-ups und damit das Erreichen ihrer langfristigen Vision.

Spannungsfeld 5: Forschungs-Push vs. Industrie-Pull

Die Herausforderung »Identifikation industrierelevanter Q-Anwendungsfälle« und die dort bislang beobachtbare Zurückhaltung seitens der Industrie in der Zusammenarbeit, wirkt sich dämpfend auf die Gewinnung von öffentlichem oder privatem Kapital aus. So bilden konkrete und industrierelevante Q-Anwendungsfälle für die Start-ups oft das maßgebliche Argument, um eine Marktrelevanz ihrer Lösung zu begründen und einen ROI-Zeitpunkt zu bestimmen.

Spannungsfeld 6: Erwarteter Quantenvorteil vs. Praktische Realisierung

Die beiden Herausforderungen »Unrealistische Erwartungen an die Quantentechnologie« in Kombination mit »Nicht realisierter Quantenvorteil« führen zu enttäuschten Erwartungen sowohl bei der Industrie als auch bei den Geldgebern, da der versprochene oder erhoffte Mehrwert einer Q-Lösung noch nicht

Interdependenzen bei der Implementierung eines Q-Geschäftsmodells

In Abbildung 4 sind die Interdependenzen der Gruppe »Implementierung eines Q-Geschäftsmodells« zu sehen. Die Auswirkungen der Herausforderungen auf die anderen Spannungsfelder werden nachfolgend je Spannungsfeld erläutert.

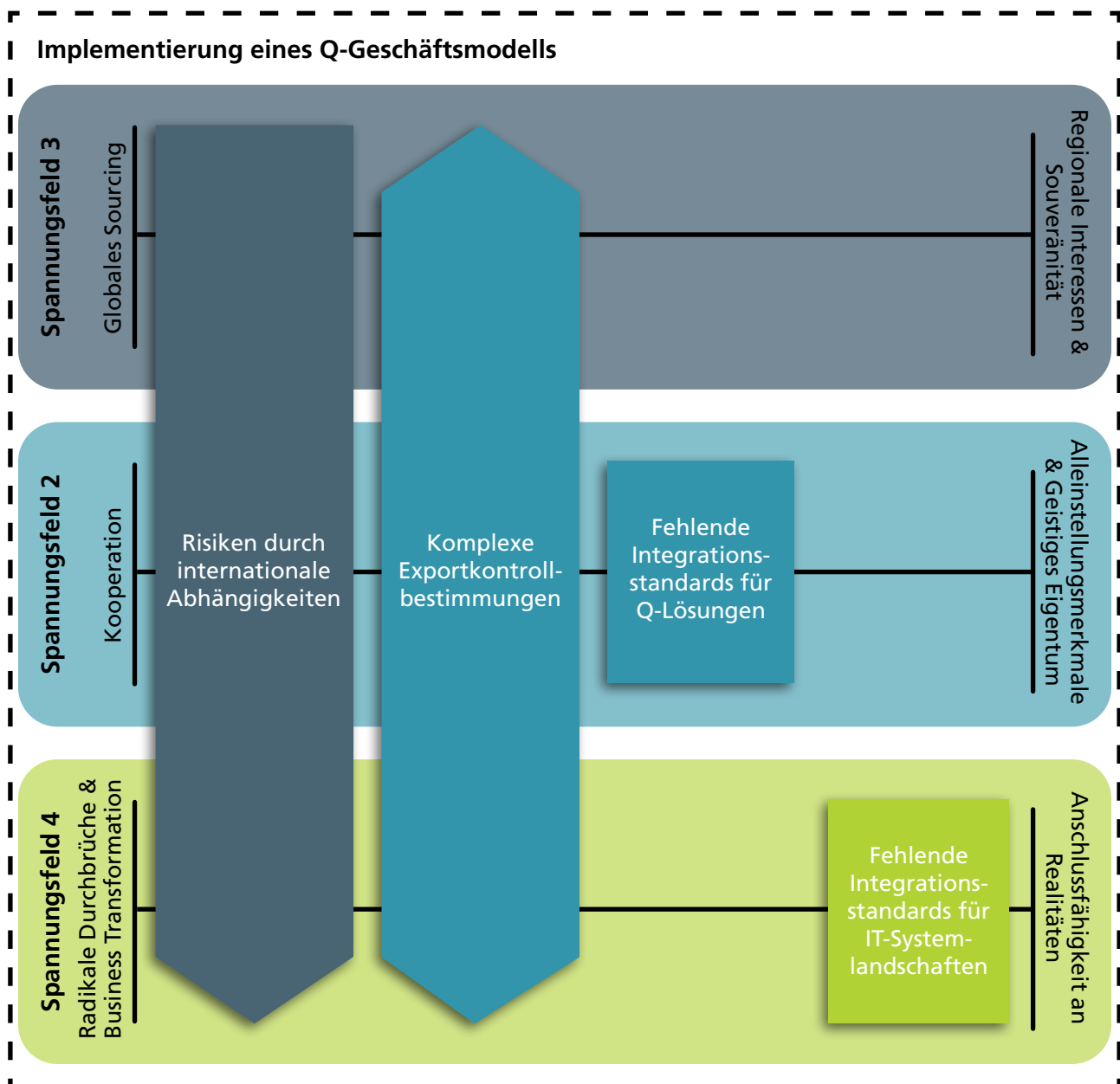


Abbildung 4: Interdependenzen bei der Implementierung eines Q-Geschäftsmodells¹⁶

¹⁶ Quelle: Eigene Darstellung

Spannungsfeld 2: Ökosystemintegration vs. Start-up-Innovation

Die Herausforderung »Risiken durch internationale Abhängigkeiten« muss sowohl bei der Integration in Q-Ökosysteme als auch bei der technischen Integration von Q-Lösungen in bestehende IT-Systemlandschaften beim Anwender berücksichtigt werden. Realisiert sich das Risiko, so können beispielsweise regulatorische Einschränkungen den Zugriff auf für die Implementierung einer Q-Lösung notwendigen de-facto-Standards wie »Qiskit« begrenzen, erschweren oder verteuern. Dadurch wird sowohl die technische Integration mit anderen Q-Lösungen im Q-Ökosystem als auch die beim Anwender erschwert oder verunmöglicht.

Spannungsfeld 3: Globale Vernetzung vs. Technologische Souveränität

Die Herausforderung »Komplexe Exportkontrollbestimmungen« wirkt sich bremsend auf die Vernetzung der international agierenden Q-Start-ups und die Integration von Q-Lösungen beim Anwender aus. Die Einstufung der Quantentechnologie als Dual-Use-Gut hat zur Folge, dass komplizierte und aufwendige Prüfprozesse durchlaufen werden, ehe eine Kooperation mit anderen Q-Start-ups realisiert oder eine Q-Lösung bei einem international tätigen Akteur integriert werden kann.

Auswirkungen auf den Prozess zur Entwicklung von Q-Geschäftsmodellen

Q-Geschäftsmodelle sind Geschäftsmodellinnovationen, da sie auf Basis einer neuartigen Technologie einen »noch-nicht-Markt« adressieren. Das Wertversprechen für Kunden hat ein hohes Disruptionspotenzial, welches die Wertschöpfung in ganzen Industrien möglicherweise grundlegend verändern könnte.

Im Folgenden wird aufgezeigt, wie sich die in dieser Studie fokussierten Spannungsfelder auf die Ent-

wicklung innovativer Geschäftsmodelle auswirken und welche Besonderheiten sich für Gründungen im Deep-Tech-Bereich am Beispiel der Quantentechnologie zeigen. Die Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle wird entlang des Prozesses von Wirtz¹⁷ durchgeführt, der in Abbildung 5 zu sehen ist. Der Prozess wird hier verwendet, da er von der Umfeldanalyse über Idee und Design bis zur Implementierung und Steuerung eines Geschäftsmodells einen ganzheitlichen Managementprozess anbietet. Damit wird ein Bezugsrahmen bereitgestellt, an dem gespiegelt werden kann, wie die sechs Spannungsfelder diesen bewährten Prozessablauf in der Praxis verschieben, unterbrechen oder um neue Schleifen ergänzen.

Prozess zur Entwicklung von Geschäftsmodellinnovationen nach Wirtz

In Abbildung 5 ist der Prozess zur Entwicklung von Geschäftsmodellinnovationen nach Wirtz abgebildet. Dieser setzt sich aus acht Schritten zusammen und wird nachfolgend kurz beschrieben.

Im ersten Schritt wird die initiale Situation analysiert. Hierzu zählt die Analyse bestehender Geschäftsmodelle und die Identifikation der Stärken und Schwächen sowie der Risiken und Potenziale des eigenen Produkt-Service-Portfolios. Hinzu kommt die Identifikation der Zielgruppe und ihrer Bedürfnisse sowie das Zusammentragen relevanter Markt- und Konkurrenzinformationen.

Im zweiten Schritt werden Ideen zu möglichen Geschäftsmodellen generiert. Dabei erfolgt eine grobe Marktanalyse im Hinblick auf die Identifikation von Innovationspotenzial. Dadurch kann das Unternehmen das zu entwickelnde Geschäftsmodell mitsamt seinem Wertversprechen und die Art und Weise seiner Erbringung grundlegend ausrichten und ein Grobkonzept erstellen.

Im dritten Schritt erfolgt eine detaillierte Marktanalyse, in der das Unternehmen den Markt und das

¹⁷ Wirtz (2020), S. 169-172

Marktumfeld im Hinblick auf Konkurrenzlösungen untersucht, um die Geschäftsmodellinnovation entsprechend auszurichten und das Potenzial dazu abschätzen zu können. Mögliche Ausrichtungen sind:

- Neues Geschäftsmodell in einem existierenden Markt
- Neues Geschäftsmodell in einem neuen Markt
- Aufbau eines neuen Marktes durch das Geschäftsmodell

Im vierten Schritt erfolgt die Prototyperstellung. Hier können verschiedene Prototypvarianten mitsamt der dafür benötigten Komponenten erstellt werden, um die verschiedenen Pfadabhängigkeiten der unterschiedlichen Lösungen bewerten und die für das Geschäftsmodell passende auswählen zu können. In diesem Zuge werden auch entsprechende Detailkonzepte zu den Prototypen erstellt.

Im fünften Schritt erfolgt die Entscheidung für eine Prototypvariante auf Basis der zuvor erstellten Detailkonzepte. Dabei wird für jedes Detailkonzept eine Profitabilitätsanalyse erstellt, um die beste Prototypvariante zu identifizieren. Daraufhin wird das Geschäftsmodellkonzept harmonisiert und finalisiert.

Im sechsten Schritt wird die Geschäftsmodellinnovation implementiert. Dabei werden das Geschäftsmodell und die relevanten Umweltbedingungen permanent miteinander verglichen, um notwendige Anpassungen durchführen zu können. Grundsätzlich ist die Implementierung des Geschäftsmodells projektbasiert, sodass die Projektorganisation einen Implementierungsplan, die Aufstellung eines Implementierungsteams und die Etablierung notwendiger Kommunikationsstrukturen umfasst. Der Schritt endet mit dem Implementierungsabschluss.

Im siebten Schritt erfolgt das Monitoring der Geschäftsmodellinnovation. Letztere wird als erfolgreich abgeschlossen erachtet, wenn sie sich auf dem

Markt etabliert hat. Hierfür muss sie in Hinblick auf die Implementierung und Erbringung des ursprünglich formulierten Wertversprechens sowie der Art und Weise seiner Erbringung überwacht werden. Die Überwachung erfolgt auf Basis von passenden Leistungsindikatoren.

Im letzten und achten Schritt wird das nachhaltige Wachstum der Geschäftsmodellinnovation durch Anpassungen sichergestellt, die aufgrund von Veränderungen im Markt- oder Unternehmensumfeld erfolgen müssen. Darüber hinaus muss das Geschäftsmodell vor Imitationen geschützt und der eigene Wettbewerbsvorteil langfristig sichergestellt werden. Abbildung 5 fasst den prototypischen Prozess zur Entwicklung von Geschäftsmodellinnovationen nach Wirtz zusammen.

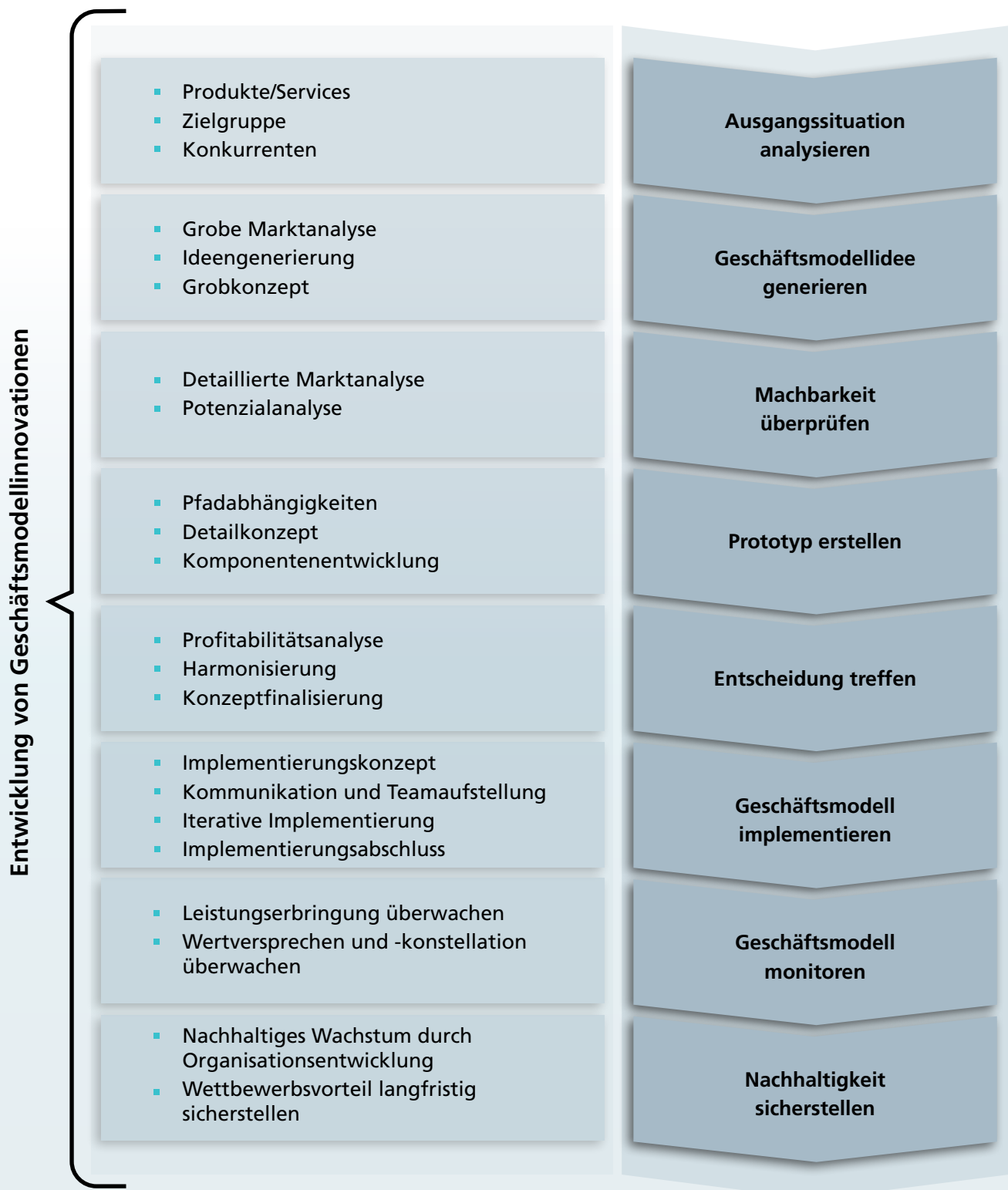


Abbildung 5: Prozess zur Entwicklung von Geschäftsmodellinnovationen¹⁸

¹⁸ Quelle: Wirtz (2020), S. 170

Besonderheiten bei der Entwicklung von Q-Geschäftsmodellinnovationen

Die empirischen Ergebnisse legen nahe, dass der in der Literatur häufig beschriebene, obige lineare Prozess bei der Entwicklung von Q-Geschäftsmodellen von den Start-ups nicht vollständig in dieser Form durchlaufen wird. Vielmehr weisen die Ergebnisse darauf hin, dass die Entwicklung der Q-Geschäfts-

modellinnovation in einem iterativen Vorgehen erfolgt. Weiter wurde deutlich, dass die Start-ups einzelne Prozessschritte unter dem Einfluss der oben dargestellten, miteinander in Beziehung stehenden Spannungsfeld-Pole gestalten. Diese Dynamik bildet eine Besonderheit bei der Entwicklung von Q-Geschäftsmodellen, die in Abbildung 6 dargestellt ist und nachfolgend beschrieben wird. Veränderungen

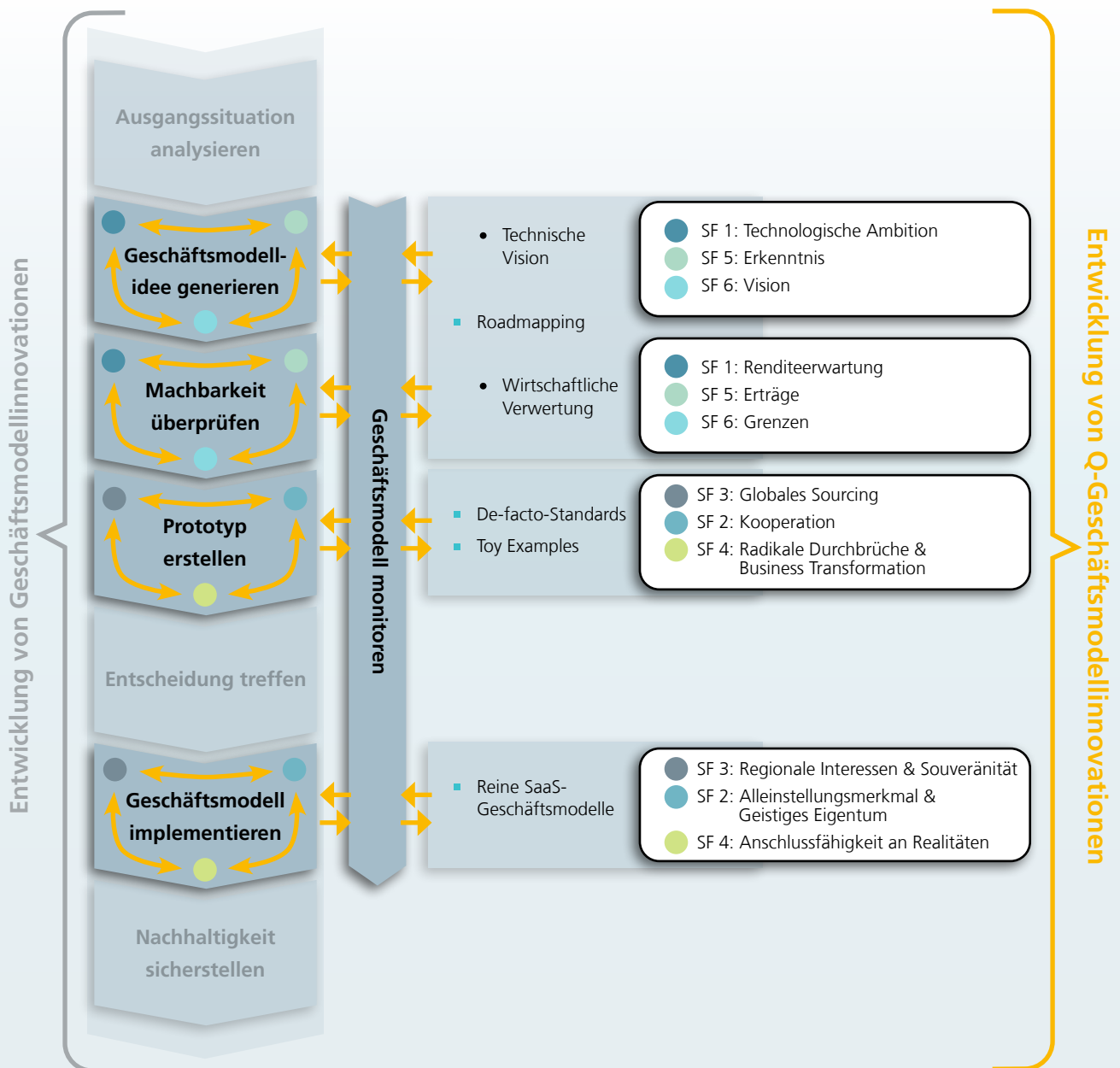


Abbildung 6: Besonderheiten bei der Entwicklung von Q-Geschäftsmodellinnovationen¹⁹

¹⁹ Quelle: In Anlehnung an Wirtz (2020), S. 170

für Prozessschritte, die nicht hervorgehoben sind, können aus den erhobenen Daten nicht benannt werden, da diese Aspekte im Erhebungsdesign nicht explizit adressiert wurden.

Geschäftsmodellidee generieren und Machbarkeit prüfen

Die Generierung der Geschäftsmodellidee erfolgt unter dem Einfluss der Pole »Nicht realisierter Quantenvorteil«, »Technologische Ambition«, »Erkenntnis« und »Vision«. Die Vision ist die Manifestierung eines wie auch immer beschaffenen Quantenvorteils, der mittels einer Q-Lösung geboten werden soll: Rechenzeit, Rechenpräzision oder erstmals lösbare Probleme. Sie ist die Übersetzung der technologischen Ambition und der Erkenntnisse von Start-up-Gründern und ihren Teams, die sich über mehrere Jahre oder Jahrzehnte mit der Lösung eines Q-Problems beschäftigt haben, in ein konkretes mehrwertstiftendes Produkt.

Die Verwirklichung der technologischen Ambition wird durch kontinuierliche Erkenntnisgenerierung als Forschungs-Push geschaffen. Die Aktivität des Roadmappings spielt bei der Entwicklung der Geschäftsmodellidee eine fundamentale Rolle. In der Funktion als Kommunikationsmittel gegenüber Kapitalgebern, fassen die Roadmaps die wesentliche Idee des Geschäftsmodells, die antizipierten Marktentwicklungen sowie das Grobkonzept zusammen. In Ihrer Übersichtsfunktion bieten sie eine zeitliche und auch rückblickend nachvollziehbare Strukturierung des Zusammenspiels von technologischer Ambition, verfolgter Vision und dem für ihre Realisierung erforderlichen und erreichten technologisch-wissenschaftlichen Fortschritt. Schließlich verbinden die Roadmaps die Vision mit konkreten Anwendungsfällen und sind damit das Bindeglied zwischen der Generierung der Geschäftsmodellidee und der Überprüfung ihrer Machbarkeit.

Während die Roadmapgestaltung im Prozessschritt der Generierung der Geschäftsmodellidee die wissenschaftlich-technisch geprägte Technologievision

adressiert, fokussiert sie im Prozessschritt der Machbarkeitsanalyse die pragmatisch-wirtschaftlich orientierte Technologierealität. Entsprechend steht dieser Prozessschritt unter dem Einfluss der Spannungsfeld-Pole »Renditeerwartung«, »Erträge« und »Grenzen« (s. Abbildung 3). Der Realisierung der technischen Vision werden Grenzen gesetzt durch die Technologiereife, die wiederum die umsetzbaren und industrierelevanten Q-Anwendungsfälle bestimmt. Auf Basis der realisierbaren Anwendungsfälle erfolgt die detaillierte Marktanalyse sowie die Analyse der Konkurrenzsituation. Sie bilden die Grundlage, um den Kapitalinvestoren eine Aussage über den ROI-Zeitpunkt der eigenen Q-Lösung geben zu können. Dabei dienen die Roadmaps als Dreh- und Angelpunkt, da sie die Kommunikationsgrundlage sowohl der technischen Vision als auch für ihre wirtschaftliche Verwertung und damit Erträge abbilden.

Die empirischen Hinweise lassen darauf schließen, dass die Entwicklung der Geschäftsmodellidee sowie die Analyse ihrer Machbarkeit in Q-Start-ups iterativ erfolgen und eng mit der Roadmapgestaltung verbunden sind. Den Beobachtungen zufolge wird zunächst eine technische Vision formuliert, deren Machbarkeit und wirtschaftliche Relevanz im Hinblick auf praxisnahe Anwendungsfälle reflexiv geprüft und angepasst wird. Wenn sich die Einschätzungen zu einem erwartbaren ROI-Zeitpunkt als zu vage erweisen, ist die Geschäftsmodellidee entsprechend zu überarbeiten. Entwicklung von Idee und Überprüfung der Machbarkeit setzen sich im besten Fall spiralförmig in Richtung einer zunehmend gefestigten Geschäftsmodellkonzeption im entstehenden Markt fort.

Prototyp erstellen

Ist die Überprüfung der Machbarkeit zu einem positiven Ergebnis gelangt, werden Prototypvarianten der Q-Lösung erstellt. Wie beim klassischen Vorgehen zur Generierung von Geschäftsmodellinnovationen, erstellen die Start-ups auch hier mittels Roadmaps verschiedene Detailkonzepte, auf deren Basis die verschiedenen Pfadabhängigkeiten und Prototypvarian-

ten sichtbar werden. Ist eine Variante gewählt, werden die eventuell noch benötigten Q-Komponenten mit dem Ziel entwickelt, den Mehrwert der prototypischen Q-Lösung mittels Toy Examples zu illustrieren.

Bei der Prototypentwicklung stehen Q-Start-ups unter besonderem Einfluss der Pole »Globales Sourcing«, »Kooperation« sowie »Radikale Durchbrüche & Business Transformation« (s. Abbildung 4). So sind sie auf »Globales Sourcing« angewiesen, da sie zum einen teilweise die für die Entwicklung benötigten Rohstoffe und Komponenten importieren müssen. Dies trifft insbesondere auf Prozessoren zu, die national oder innereuropäisch nicht in der benötigten Menge, zu dem benötigten Preis oder in der benötigten Qualität verfügbar sind. Gleichzeitig sind die Start-ups durch die Verwendung von de-facto-Standards wie »Qiskit« für die Software-Entwicklung auf internationale Unternehmen angewiesen. Hier existieren Abhängigkeiten, die von den Start-ups nicht vernachlässigt werden können und sie in der Vielfalt der Prototypvarianten begrenzen.

Mit der Nutzung der de-facto-Standards sind Pfadabhängigkeiten verbunden, die sich auf der Meso-Ebene des operativen Q-Ökosystems fortsetzen. Hier setzt die Kooperation mit Partnern die Kompatibilität zwischen den Q-Lösungen voraus, die meist durch die Nutzung derselben de-facto-Standards sichergestellt wird. Die Anzahl der möglichen Prototypvarianten und damit auch der Lösungsraum für radikale Umbrüche und Business Transformationen auf der Mikro-Ebene ist dadurch eingeschränkt. Hinzu kommt, dass Industrieunternehmen die Quantentechnologie zwar als potenziellen Business Game Changer wahrnehmen, sich in der praktischen Befassung aber zurückhaltend zeigen, insbesondere bei der Identifikation und Ausarbeitung konkreter Anwendungsfälle. Diese Zurückhaltung begrenzt die Verfügbarkeit von Pilotpartnern und realen Anwendungsszenarien und wirkt damit dämpfend auf die Bandbreite möglicher Prototypvarianten.

Geschäftsmodellidee implementieren

Hat die Profitabilitätsanalyse der umgesetzten Prototypvariante ergeben, dass die Q-Lösung wirtschaftlich tragfähig sein kann, wird diese im Rahmen des gewählten Geschäftsmodells beim Kunden implementiert. Hier stehen die Q-Start-ups in besonderer Weise unter dem Einfluss der Pole »Regionale Interessen & Souveränität«, »Alleinstellungsmerkmal & Geistiges Eigentum« sowie »Anschlussfähigkeit an Realitäten«.

Die bei der Erstellung der Prototypvarianten zum Tragen kommende Abhängigkeit von internationalen de-facto-Standards überträgt sich letzten Endes auch auf die Implementierung beim Kunden, da sich die Abhängigkeiten des Start-ups bei der Erstellung seiner Q-Lösung mittelbar auf die Kundenorganisation ausweiten. Solange jedoch keine europäischen Alternativlösungen verfügbar sind, lässt sich diese Abhängigkeit sowohl für das Start-up als auch für den Kunden nur begrenzt umgehen.

Die Sicherung des Alleinstellungsmerkmals stellt nach der Datenlage dieser Studie keine wesentliche Herausforderung für die Start-ups dar und kann auch bei der Implementierung des Geschäftsmodells gewahrt werden. Um die eigene IP gegenüber den Q-Partnern im Ökosystem zu schützen, greifen die Start-ups auf Patente zurück. Um die IP gegenüber dem Kunden zu schützen, bieten die Start-ups keine On-Premise-Lösungen, sondern SaaS-Lösungen an. Dadurch behalten sie die Hoheit über die Zugriffs- und Nutzungsschnittstellen zur Q-Lösung. Bei der Implementierung müssen sie jedoch kundenspezifische Anpassungen der Schnittstellen vornehmen, um die Realitäten bestehender IT-Systemlandschaften und -Prozesse zu berücksichtigen. Da hierfür bislang keine etablierten Standards in Form von Schnittstellen oder Datenmodellen existieren, fällt diese oft als trivial wahrgenommene, aber unvermeidliche Integrationsarbeit zusätzlich in den Aufgabenbereich der Start-ups und bindet entsprechende Ressourcen.

Geschäftsmodell monitoren

Entgegen dem Prozess von Wirtz, ist das Monitoring von Q-Geschäftsmodellen keine einmalige Aktivität, die nach deren Implementierung stattfindet, sondern eine kontinuierliche Aufgabe: Sie beginnt mit der Beobachtung des Umfelds und dazu zählen sowohl die Forschungs- als auch die Business-Perspektive sowie die Ausarbeitung einer Q-Geschäftsmodellidee und erstreckt sich über die Machbarkeitsüberprüfung und Prototyperstellung bis hin zur Implementierung des Geschäftsmodells. Zudem beschränkt sich das Monitoring nicht nur auf die Überwachung der Erbringung des Wertversprechens, sondern kann breiter gefasst werden. Je nach Prozessschritt werden beim Monitoring unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt.

Während der Generierung des Geschäftsmodells und der Überprüfung der Machbarkeit werden Roadmaps erstellt, die die technische Vision und die wirtschaftliche Verwertung abbilden. Die Schwerpunkte des Monitorings liegen hier auf der Markt- und Technologiebeobachtung. So können beispielsweise neue Marktakteure und technologische Fortschritte im Q-Bereich die Aktualisierung der eigenen Geschäftsmodellidee mitsamt der technischen Vision erforderlich machen, die die wirtschaftliche Verwertung beeinflussen.

Bei der Prototyperstellung liegt der Schwerpunkt des Monitorings, neben der technischen Realisierung, auf den Veränderungen der politischen Rahmenbedingungen, die die grundsätzliche Realisierung einer Q-Lösung ermöglichen. So geht aus den Interviews hervor, dass sich die Start-ups der geopolitischen Situation und deren möglichen Auswirkungen in der Zukunft durchaus bewusst sind. Die Entscheidung zur Nutzung von de-facto-Standards wie »Qiskit« oder von Lieferanten aus bestimmten Ländern erfolgt bewusst im Wissen um die dadurch entstehenden strategischen Abhängigkeiten. Als Konsequenz erstellen die meisten Start-ups Sourcing-Alternativen.

Der Schwerpunkt der Implementierung eines Geschäftsmodells bezieht sich auf die Erbringung des Leistungsversprechens, das mit der Q-Lösung gegeben wird. Die Besonderheit liegt darin, dass Q-Geschäftsmodelle aus Gründen des Schutzes des geistigen Eigentums als SaaS-Geschäftsmodelle angeboten werden. Weitere Erkenntnisse für diesen Prozessschritt können nicht abgeleitet werden, da das Monitoring von Geschäftsmodellen kein Bestandteil der Interviews war.

In der Gesamtschau zeigt diese zweite Perspektive, wie Q-Start-ups als Anbieter in einem entstehenden Deep-Tech-Markt bei der Entwicklung und Implementierung ihres Geschäftsmodells unter dem Einfluss verschiedener Gruppen von Spannungsfeldern stehen. Dabei wird deutlich, wie stark die einzelnen Aktivitäten bei der Entwicklung von Q-Geschäftsmodellinnovationen miteinander verwoben sind und dass mit jedem technologischen Fortschritt im Q-Bereich, der gesamte Prozess unter Berücksichtigung der technologischen Abhängigkeiten neu durchlaufen werden muss. Die starke Interdependenz zwischen den Prozessschritten auf der einen Seite und zwischen den Prozessschritten und bestimmten Gruppen von Spannungsfeldern auf der anderen Seite bietet einen Anknüpfungspunkt für weitere Forschung. Diese sollte sich auf die Entwicklung dezidierter Frameworks fokussieren, die die Abhängigkeitsmechanismen bei der Entwicklung von Deep-Tech-Geschäftsmodellen aus Start-up-Sicht herausstellt. Daraus könnten Best Practices sowohl für Start-ups als auch für Start-up-Inkubatoren abgeleitet werden.

Zusammengenommen eröffnen beide Perspektiven ein mehrdimensionales Orientierungswissen zu Q-Start-ups in frühen Marktphasen. Die Ergebnisse machen deutlich, dass Start-ups dabei eine doppelte Rolle einnehmen: Sie wirken als Gestalter eines entstehenden Marktes, indem sie zur Herausbildung von Marktstrukturen beitragen, ja diese erst ermöglichen. Zudem agieren sie innerhalb dieses Marktes als Anbieter, indem sie quantentechnologische Produkte und Leistungen kreieren, positionieren und vermarkten. Während die erste Perspektive die grundlegenden Dynamiken der Marktentstehung sichtbar macht, ermöglicht die zweite Perspektive eine strukturierte Einordnung der Besonderheiten bei der Entwicklung und Implementierung von Q-Geschäftsmodellen. Beide Perspektiven ergänzen sich und eröffnen unterschiedliche Zugänge zum Verständnis früher Marktphasen im Deep-Tech-Kontext. Sie liefern damit Ansatzpunkte für weiterführende Forschung sowie für strategische und politische Einordnungen.



“

Wie viele Jahre hat man an KI geforscht, neuronale Ansätze vorangetrieben, wenig Sichtbares erreicht. Und dann dieses Feuerwerk an Durchbrüchen: OpenAI, Perplexity, eine Idee nach der anderen, es zündet, es sprüht, Schlag auf Schlag, sodass man sagt „Wahnsinn“. Und ich glaube genau diesen Moment wird es im Quantencomputing auch geben.

- Jan Kegelberg

”



Interviewpartner

Strukturdaten – Interviewpartner 1	
Name	Munich Quantum Software Company GmbH
Standort	München
Gründungsjahr	2025
Geschäftsmodell	B2B
Gesprächspartner	Prof. Dr. Robert Wille
Funktion im Unternehmen	CEO und Co-Founder

Strukturdaten – Interviewpartner 2	
Name	HQS Quantum Simulations GmbH
Standort	Karlsruhe
Gründungsjahr	2017
Geschäftsmodell	B2B
Gesprächspartner	Dr. Michael Marthaler
Funktion im Unternehmen	CEO und Co-Founder

Strukturdaten – Interviewpartner 3	
Name	SaxonQ GmbH
Standort	Leipzig
Gründungsjahr	2021
Geschäftsmodell	B2C
Gesprächspartner	Prof. Dr. Marius Grundmann
Funktion im Unternehmen	Co-CEO und Co-Founder

Strukturdaten – Interviewpartner 4	
Name	QUDORA Technologies GmbH
Standort	Braunschweig
Gründungsjahr	2021
Geschäftsmodell	B2B
Gesprächspartner	Dr. Henning Hahn
Funktion im Unternehmen	COO und Co-Founder

Strukturdaten – Interviewpartner 5	
Name	EQCITED UG
Standort	Hamburg
Gründungsjahr	2025
Geschäftsmodell	B2B
Gesprächspartner	Jan Kegelberg
Funktion im Unternehmen	CEO

Strukturdaten – Interviewpartner 6	
Name	Diatope GmbH
Standort	Ulm
Gründungsjahr	2021
Geschäftsmodell	B2B
Gesprächspartner	Dr. Johannes Lang
Funktion im Unternehmen	CEO und Co-Founder

Strukturdaten – Interviewpartner 7	
Name	Quantistry GmbH
Standort	Berlin
Gründungsjahr	2019
Geschäftsmodell	B2B
Gesprächspartner	Dr. Marcel Quennet
Funktion im Unternehmen	CEO und Founder

Strukturdaten – Interviewpartner 8	
Name	Aqarios GmbH
Standort	München
Gründungsjahr	2021
Geschäftsmodell	B2B
Gesprächspartner	Michael Lachner
Funktion im Unternehmen	CEO und Co-Founder

Strukturdaten – Interviewpartner 9	
Name	Linq Photonics GmbH
Standort	Heidelberg
Gründungsjahr	2026
Geschäftsmodell	B2B
Gesprächspartner	Rasmus Bankwitz
Funktion im Unternehmen	CEO und Co-Founder

Strukturdaten – Interviewpartner 10	
Name	Peak Quantum GmbH
Standort	Garching bei München
Gründungsjahr	2024
Geschäftsmodell	B2B
Gesprächspartner	Dr. Thomas Luschmann
Funktion im Unternehmen	COO und Co-Founder

Literaturverzeichnis

Cabanes, Benjamin (2026): Understanding Deep Tech: Conceptual Foundations, Strategic Stakes, and Policy Implications. In: IEEE Eng. Manag. Rev., S. 1–37. DOI: 10.1109/EMR.2026.3658682.

Harrison, Richard (2025): “Close enough to speak; distant enough to learn?” A critique of the entrepreneurial ecosystem metaphor. In: The Journal of Technology Transfer 51, S. 11–33. DOI: 10.1007/s10961-025-10206-w.

Morisson, Arnault; Pattinson, Marc (2025): Innovation intermediaries in challenge-driven ecosystems. A Policy Brief from the Policy Learning Platform for a smarter Europe. Interreg Europe Policy Learning Platform. Lille.

Wirtz, Bernd W. (2020): Business Model Management. Cham: Springer International Publishing.

Impressum

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft
und Organisation IAO
Nobelstr. 12
70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-01
christian.tutschku@iao.fraunhofer.de
<https://www.digital.iao.fraunhofer.de/>

Fraunhofer Heilbronn Forschungs- und
Innovationszentren HNFIZ
Berliner Platz 12
76139 Heilbronn
Telefon 0711 970-5127
www.hnfiz.fraunhofer.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im
Internet über <http://dnb.de> abrufbar.

Interviewunterstützung: Julia Berner
Layout: Bianca Knülle

ISBN (Printausgabe): 978-3-8396-2209-4

DOI (kostenlose Open-Access-Version): <https://doi.org/10.24406/publica-9023>

Druck und Weiterverarbeitung: Fraunhofer-Druckerei, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung 4.0
International Lizenz: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de>

© Fraunhofer Verlag, 2026

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
verlag@fraunhofer.de
www.verlag.fraunhofer.de

als rechtlich nicht selbständige Einheit der

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung
der angewandten Forschung e.V.
Hansastraße 27 c
80686 München
www.fraunhofer.de

Die Quantentechnologie gilt als Deep-Technology mit einem hohen Disruptionspotenzial für viele Anwendungsdomänen. Kommerziell mehrwertstiftende Produkte oder Services sind aktuell jedoch technologisch schwach entwickelt. Die Nachfrage seitens der Industrie ist instabil und der Markt noch nicht etabliert.

Dennoch entstehen neue Quanten-Start-ups, die die Technologieentwicklung vorantreiben und sich in unsicheren Wettbewerbs- und Kooperationskonstellationen positionieren. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie diese jungen Unternehmen vorgehen, um gleichzeitig die Technologie zu entwickeln, Produkte zu formen, Marktstrukturen mit hervorzubringen und sich mit und gegenüber anderen Akteuren strategisch zu etablieren.

Diese Studie untersucht, welchen Herausforderungen nationale Quanten-Start-ups in definierten Spannungsfeldern gegenüberstehen und welche Handlungsstrategien sie entwickeln, um ihnen zu begegnen. Die empirischen Befunde werden zu Orientierungswissen u. a. für Gründende und Quanten-Hubs verdichtet. Außerdem werden theoretische Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsarbeiten in den Bereichen der Marktentstehung sowie der Geschäftsmodellentwicklung aufgezeigt.