

# Studiengangsdokumentation Masterstudiengang Quantum Science & Technology

Teil A

Fakultät für Physik, Technische Universität München

und

Fakultät für Physik, Ludwig-Maximilians-Universität München

## Allgemeines:

- Organisatorische Zuordnung: Fakultät für Physik
- Bezeichnung: Quantum Science and Technology
- Abschluss: Master of Science (M.Sc.)
- Regelstudienzeit und Credits: 4 Fachsemester und 120 Credit Points (CP)
- Studienform: Vollzeit
- Zulassung: Eignungsverfahren (EV)
- Starttermin: Wintersemester (WiSe) 2020/2021
- Sprache: Englisch
- Ergänzende Angaben: Joint Degree mit der  
Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU)
- Studiengangsverantwortliche: Prof. Dr. Alexander Holleitner und  
Prof. Dr. Christian Back
- Ansprechperson bei Rückfragen zu diesem Dokument:  
Prof. Dr. Alexander Holleitner  
E-Mailadresse: holleitner@wsi.tum.de  
Telefonnummer: +49 (0)89 289 11575
- Stand vom: 16.10.2019

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Studiengangsziele .....</b>	<b>4</b>
1.1	Zweck des Studiengangs .....	4
1.2	Strategische Bedeutung des Studiengangs .....	5
<b>2</b>	<b>Qualifikationsprofil .....</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Zielgruppen .....</b>	<b>10</b>
3.1	Adressatenkreis .....	10
3.2	Vorkenntnisse .....	10
3.3	Zielzahlen .....	11
<b>4</b>	<b>Bedarfsanalyse .....</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Wettbewerbsanalyse .....</b>	<b>14</b>
5.1	Externe Wettbewerbsanalyse .....	14
5.2	Interne Wettbewerbsanalyse.....	15
<b>6</b>	<b>Aufbau des Studiengangs.....</b>	<b>17</b>
<b>7</b>	<b>Organisatorische Anbindung und Zuständigkeiten .....</b>	<b>21</b>
<b>8</b>	<b>Entwicklungen im Studiengang .....</b>	<b>23</b>

# 1 Studiengangsziele

## 1.1 Zweck des Studiengangs

Die **Quantenwissenschaften und -technologien** sind ein breit gefächertes Wissenschaftsgebiet mit hohem Technologiepotenzial, in welchem die fundamentalen Prinzipien der Quantenmechanik dazu verwendet werden, neue Verfahren und qualitative Weiterentwicklungen in den Gebieten Informations- und Kommunikationstechnologie, Sensorik und Präzisionsmetrologie zu erzielen. Es umfasst Themenfelder wie Quantencomputing und -simulation, Quantenkommunikation und -kryptografie, Quantenmetrologie und -sensorik sowie im weiteren Sinne Quantenmaterialien.

Unter dem Begriff „**Quantentechnologien**“ werden solche Technologien zusammengefasst, die auf der gezielten Nutzung von Quanteneffekten beruhen. Beispiele aus dem Alltag sind hierfür die Halbleiter- und Supraleitertechnologie, die Magnetresonanztomografie oder der Laser. In diesen **Quantentechnologien der ersten Generation (Quantum<sup>1.0</sup>)** werden allerdings zentrale Quantenphänomene wie die Superposition und Verschränkung von Quantenzuständen nicht ausgenutzt. In den vergangenen Jahren gab es diesbezüglich grundlegende Entwicklungen. Es ist gelungen, Quantenzustände gezielt zu präparieren, dirigierend zu beeinflussen und zu kontrollieren, so dass heute die Quantenphänomene Superposition und Verschränkung gezielt eingesetzt werden können. Die daraus resultierenden **Quantentechnologien der zweiten Generation (Quantum<sup>2.0</sup>)** eröffnen vollkommen neue, sehr breite Anwendungsfelder. Sie reichen vom Quantencomputing und der Quantensimulation, über die Quantenkommunikation und die -sensorik bis hin zur Präzisionsmetrologie. Mit Quantencomputern und Quantensimulatoren können bisher nicht lösbare Probleme der Vielteilchenphysik oder komplexe Optimierungsprobleme erfolgreich bearbeitet werden. Dadurch werden große Fortschritte nicht nur bei der Entwicklung von neuartigen Quantenmaterialien, Makromolekülen und sogar Medikamenten, sondern auch bei komplexen Fragestellungen im Bereich der Logistik, der Finanzmärkte, der Mustererkennung oder des Maschinlernens erwartet. Die Quantentechnologien der zweiten Generation werden ferner die Entwicklung von abhörsicheren Kommunikationsverfahren sowie von extrem leistungsfähigen, quantenbasierten Sensoren und Metrologieverfahren erlauben. Letztere sind von großer Bedeutung für die Grundlagenforschung, aber auch für Anwendungsfelder wie die Medizintechnik.

Die Quantenwissenschaften und -Technologien in ihrer modern ausgelegten Form (Quantum<sup>2.0</sup>), gehen klar über die Begrifflichkeit, den thematischen Umfang und die Anwendungsfelder der bisherigen „Quantenphysik“ (Quantum<sup>1.0</sup>) hinaus. Der gemeinsame Studiengang **Quantum Science & Technology (QST)** der Fakultät für Physik der TUM und der Fakultät für Physik der LMU, soll entsprechend Studierende ausbilden, welche anhand aktueller Forschungs- und Entwicklungsergebnisse aus den Naturwissenschaften (beispielsweise Physik, Chemie), der Mathematik und den Ingenieurwissenschaften (beispielsweise Informatik, Elektrotechnik) Quantenphänomene – insbesondere Superposition und Verschränkung – für die Entwicklung von Sensoren, Algorithmen und Computern direkt anzuwenden wissen.

Der Studiengang **QST** geht über die klassischen Studiengänge der Physik und Chemie hinaus, da die Studierenden beispielsweise in der Signal- und Informationsverarbeitung, der Kontrolltheorie, der klassischen und quantenbasierten Kommunikation- und Informationstheorie sowie in den mess- und materialtechnischen Grundlagen der Quantentechnologien der zweiten Generation ausgebildet werden. Gleichzeitig ist er im Gegensatz zu den klassischen Studiengängen der

Elektrotechnik und Informatik stark naturwissenschaftlich ausgelegt. Der Studiengang wird mit dem Fokus auf den beiden Fokussierungsrichtungen *Experimental Quantum Science & Technology* und *Theoretical Quantum Science & Technology* eingeführt und steht nach dem Mentorengespräch auch der individuellen Schwerpunktsetzung offen. Darüber hinaus ist geplant, den Studiengang zukünftig auf den Bereich **Quantum Engineering** zu erweitern. Im Mittelpunkt stehen hier unter anderem die automatisierte Herstellung von skalierbaren Quantenschaltkreisen und hybriden Quantensystemen sowie die Systemintegration.

Die **Quantenwissenschaften und -technologien** leisten einen wertvollen Beitrag zur allgemeinen Weiterentwicklung unserer modernen Industrie- und Wissensgesellschaft. Sowohl national als auch international wird diesem Forschungsfeld eine hohe Bedeutung und ein großes Wachstumspotenzial beigemessen. Dies wird bereits heute durch eine hohe Zahl von internationalen Patentanmeldungen und den Aufbau umfangreicher Forschungsinfrastruktur belegt.<sup>1</sup> Zum anderen werden Weiterentwicklungen und neue Forschungsergebnisse, gerade vor dem Hintergrund weltweit operierender Informationstechnologiefirmen, immer wichtiger, um die Wahrung sicheren Handel zu ermöglichen und die Privatsphäre der Menschen zu schützen.

## 1.2 Strategische Bedeutung des Studiengangs

Der geplante Studiengang QST hat besondere Relevanz für die Profilbildung der beiden Münchner Universitäten TUM und LMU in einem hochaktuellen, interdisziplinären Forschungsfeld. Er bietet eine ideale Basis, um die im Bereich QST bereits geschaffenen Strukturen (vor allem der seit Januar 2019 eingerichtete DFG Exzellenzcluster „Münchner Zentrum für Quanten-Wissenschaften und -Technologien“ (MCQST) der beiden Universitäten TUM und LMU und das neue Forschungsinstitut „Zentrum für QuantumEngineering“ (ZQE) der TUM am Campus Garching) mit studentischer Aktivität zu beleben. Er ist ferner von zentraler Bedeutung für den Profildbereich „Quantum Science & Engineering“ der TUMagenda 2030 und das allgemeine Ziel von TUM und LMU, den interdisziplinären Forschungsschwerpunkt QST im Raum München langfristig zu verankern und auf international höchstem Niveau zu betreiben. Weiterhin entspricht der Studiengang dem Leitbild der TUM, welche sich als Dienerin der Innovationsgesellschaft sieht, daher greift er Aspekte der Schwerpunkte des Leitbilds auf, diese sind: Energie und Rohstoffe, Umwelt und Klima, Information und Kommunikation, Mobilität und Infrastruktur.

Im Schulterschluss der beiden Universitäten TUM und LMU ist das gesamte **Spektrum der Quantenwissenschaften und -Technologien** in verschiedenen Disziplinen vertreten. Das Ziel des Studiengangs ist es, dieses Potenzial kohärent darzustellen, zu komplementieren und die verschiedenen Facetten in einem **abgestimmten Portfolio** abzubilden und zu koordinieren. Der Studiengang zielt auf die forschungsnahe Ausbildung von Studierenden an der Schnittstelle zwischen Naturwissenschaften (Physik, Chemie), Mathematik und Ingenieurwissenschaften (Elektrotechnik, Informatik) ab. Die Beteiligung ausgewiesener Münchner Forschungsinstitute wie die des Walther-Meißner-Instituts (WMI) der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik (MPQ), des Walter Schottky Instituts (WSI) mit dem Zentrum für

---

<sup>1</sup> „Quantum Devices“, Technology Quartely - The Economist, www. economist.com, März 2017. Abgerufen am 01.04.2019

Nanotechnologie und Nanomaterialien (ZNN) und des zukünftigen Zentrums für QuantenEngineering (ZQE) der TUM, stellt sicher, dass das Themengebiet QST in großer Breite kompetent abgedeckt wird und damit den Studierenden eine breite Ausbildung in einem hochaktuellen Forschungsfeld ermöglicht wird.

International haben mehrere führende Universitäten, vor allem solche, die ein starkes Forschungsportfolio im natur- und ingenieurwissenschaftlichen Bereich haben, die Bedeutung des Themenbereichs **QST** erkannt und es auch in der Lehre verankert. Dies trifft beispielsweise auf so renommierte, forschungsstarke und interdisziplinär ausgerichtete Universitäten wie die ETH Zürich, das University College London, die TU Delft und die Tohoku University zu. Auch ist das Themengebiet QST in hochrangigen wissenschaftlichen Zeitschriften (z.B. *Science*, *Nature* und *Physical Review Letters*) prominent abgebildet.

Das Lehrangebot der Fakultät für Physik an der TUM besteht zurzeit aus einem grundständigen Bachelorstudiengang sowie den Kern-Masterstudiengängen „Biophysik“, „Kern-, Teilchen- und Astrophysik“, „Kondensierte Materie“ und „Applied and Engineering Physics“. Des Weiteren gibt es seit kurzem den interdisziplinären Masterstudiengang „Biomedical Engineering and Medical Physics“ an der Schnittstelle von Physik, Medizin und der Munich School of BioEngineering sowie den Masterstudiengang „Matter to Life“ zwischen der Physik und der Max-Planck-Gesellschaft. An der LMU gibt es neben den beiden Bachelorstudiengängen Physik und Physik plus Meteorologie die Masterstudiengänge Physik, Astrophysik und Meteorologie. Der gemeinsame Elite-Masterstudiengang „Theoretical and Mathematical Physics“ der LMU und TUM, wird von der Fakultät für Physik der LMU organisiert. Der Studiengang **QST** ergänzt als interdisziplinärer Studiengang im natur- und ingenieurwissenschaftlichen Bereich das Lehrportfolio beider Fakultäten für Physik der TUM und LMU und wird von der Fakultät für Physik der TUM organisiert. Des Weiteren bereitet der geplante Studiengang QST in idealer Weise auf die existierenden Graduiertenprogramme der TUM und LMU vor, oder auch beispielsweise auf die Doktorandenschule des Max Planck Instituts - die International Max Planck Research School für Quantum Science and Technology (IMPRS-QST) -, oder dem Doktorandenkolleg des Elitenetzwerk Bayerns, Exploring Quantum Matter (ExQM).

Darüber hinaus ergab die Evaluierung der Fakultät für Physik der TUM im Jahr 2017 die ganz klare Empfehlung, den Forschungsbereich **QST** auch im Bereich der Lehre auszubauen und an der TUM interdisziplinär zu verankern. Dieses in der Forschung bereits sehr stark bearbeitete Themenfeld hat in den letzten Jahren nachweislich immer mehr Studierende fakultätsübergreifend in Spezialvorlesungen gelockt, die bereits heute zu diesem Zeitpunkt bereits angeboten werden. Dies zeugt von einer sehr großen Nachfrage nach dieser Spezialisierung. Insbesondere war die Zahl der internationalen Studierenden in diesem Bereich sehr hoch.

Aufgrund seiner multidisziplinären Struktur ist der Studiengang **QST** thematisch und inhaltlich mit mehreren Fakultäten verbunden, diese sind Physik, Chemie, Mathematik und Elektrotechnik und Informationstechnik der TUM sowie Physik, Chemie und Mathematik, Informatik und Statistik der LMU.

## 2 Qualifikationsprofil

Das Qualifikationsprofil entspricht den Anforderungen des Qualifikationsrahmens für Deutsche Hochschulabschlüsse (Hochschulqualifikationsrahmen - HQR) gemäß Beschluss vom 16.02.2017 der Hochschulrektorenkonferenz und Kultusministerkonferenz. Gemäß dem HQR kann das Qualifikationsprofil für den Masterstudiengang **Quantum Science & Technology (QST)** anhand der Anforderungen (1) *Wissen und Verstehen*, (2) *Einsatz, Anwendung und Erzeugung von Wissen*, (3) *Kommunikation und Kooperation* und (4) *Wissenschaftliches Selbstverständnis/Professionalität* definiert werden. In dem folgenden Kapitel sind die einzelnen Aspekte benannt. Die formalen Aspekte gemäß HQR (Zugangsvoraussetzungen, Dauer, Abschlussmöglichkeiten) sind in den Kapiteln 3 und 6 sowie in den entsprechenden Fachprüfungs- und Studienordnungen ausgeführt.

### Wissensverbreiterung

Nach Abschluss des Masterstudiums sind die Absolventinnen und Absolventen in der Lage, über die interdisziplinären Grenzen hinweg erfolgreich Fragestellungen auf dem Gebiet der **QST** zu beantworten und zu erklären. Sie sind in der Lage, Aufwand und Ablauf von Fragestellungen dieses Fachgebiets nach dem aktuellen Stand der Forschung zu bewerten. Sie sind ferner in der Lage Besonderheiten, Grenzen, Terminologien und Lehrmeinungen in den Spezialgebieten des Quantencomputings und -simulation, der Quantenkommunikation, der quantenbasierten Messtechnik und der Quanteninformationstheorie sowie gemäß den selbstgewählten Modulen zu definieren und zu interpretieren. Absolventinnen und Absolventen mit der Fokussierungsrichtung *Experimental Quantum Science & Technology* sind in der Lage, quantenbasierte Messverfahren und grundlegende Quantensysteme in verschiedenen Plattformen (beispielsweise Qubits in atomaren, halbleiter- oder supraleiter-basierten Systemen), zu verstehen und weiterzuentwickeln. Absolventinnen und Absolventen mit der Fokussierungsrichtung *Theoretical Quantum Science & Technology* sind in der Lage, Konzepte der Quanteninformationstheorie und der Quantenkryptographie zu verstehen und weiterzuentwickeln.

### Wissensvertiefung

Das Wissen und Verstehen der Absolventinnen und Absolventen des Masterstudiums **QST** bilden die Grundlage für die Entwicklung und/oder Anwendung eigenständiger Ideen. Dies umfasst sowohl anwendungs-, als auch forschungs-orientierte Themen insbesondere in experimentellen und theoretischen Aspekten von **QST**. Beispiele hierfür ist die Implementierung von quantenbasierten Messverfahren und Algorithmen in zukünftigen Informationstechnologien. Die Absolventinnen und Absolventen verfügen über ein breites, detailliertes und kritisches Verständnis auf dem neuesten Stand des Wissens in **QST**. Sie können diese Kenntnisse an Fach- und Nichtfachleute weitergeben sowie schriftlich niederlegen.

### Wissensverständnis

Absolventinnen und Absolventen wägen die fachliche erkenntnistheoretisch begründete Richtigkeit unter Einbezug wissenschaftlicher und methodischer Überlegungen gegeneinander ab und können unter Zuhilfenahme dieser Abwägungen praxisrelevante und wissenschaftliche Probleme der **QST** lösen. Die Absolventinnen und Absolventen haben die Fähigkeit, aktuelle Themen und

Publikationen auf diesem Gebiet zu verstehen und gegebenenfalls auf experimentelle Weise nachzuvollziehen.

### **Nutzung und Transfer**

Die Absolventinnen und Absolventen können Wissen und Verstehen sowie ihre Fähigkeiten zur Problemlösung auch in neuen und unvertrauten Situationen auch auf der Grundlage begrenzter Informationen anwenden, die in einem breiteren oder multidisziplinären Zusammenhang mit **QST** stehen. Sie treffen wissenschaftlich fundierte Entscheidungen und reflektieren kritisch mögliche Folgen. Zudem können Sie sich selbstständig neues Wissen und Können aneignen. Sie besitzen die Fähigkeit, vorhandenes Fachwissen weitgehend selbstgesteuert und autonom systematisch zu erweitern, Prozesse in ihrer Gesamtheit zu erkennen und sie fundiert kritisch zu hinterfragen, ihre Risiken zu bewerten sowie dabei insbesondere Qualitätsanforderungen und ethische Anforderungen zu berücksichtigen.

### **Wissenschaftliche Innovation**

Die Absolventinnen und Absolventen sind in der Lage, ihre praktischen Fähigkeiten kontinuierlich weiterzuentwickeln und sind somit befähigt, eigene Projekte selbständig, professionell und gezielt voranzutreiben, aufkommende Probleme zu lösen und Projekte somit effizient umzusetzen. So entwerfen sie Forschungsfragen zu **QST** und wählen entsprechende Forschungsmethoden aus und begründen ihre Auswahl. Zudem erläutern sie die Forschungsergebnisse und interpretieren diese kritisch.

### **Kommunikation und Kooperation**

Die Absolventinnen und Absolventen des Masterstudiums **QST** tauschen sich sach- und fachbezogen mit Vertreterinnen und Vertretern unterschiedlicher akademischer und nicht akademischer Handlungsfelder über alternative, theoretisch begründbare Problemlösungen aus.

So haben sie die Fähigkeit, ihre erlangten Kenntnisse in Präsentationen und auf Tagungen vorzustellen und in Publikationen der internationalen Fachwelt auf dem Themengebiet **QST** bekannt zu geben und zu reflektieren. Sie binden Beteiligte unter der Berücksichtigung der jeweiligen Gruppensituation zielorientiert in Aufgabenstellungen ein und erkennen Konfliktpotentiale in der Zusammenarbeit mit Anderen und reflektieren diese vor dem Hintergrund situationsübergreifender Bedingungen. Sie gewährleisten durch konstruktives, konzeptionelles Handeln die Durchführung von situationsadäquaten Lösungsprozessen.

### **Wissenschaftliches Selbstverständnis bzw. Professionalität**

Durch die fakultäts- und universitätsübergreifende Struktur (sowie den internationalen Charakter) des Studiums entwickeln die Absolventinnen und Absolventen des Masterstudiengangs **Quantum Science & Technology** ein berufliches Selbstbild, das sich an Zielen und Standards professionellen Handelns sowohl in der Wissenschaft als auch den Berufsfeldern außerhalb der Wissenschaft orientiert. Sie begründen das eigene berufliche Handeln mit theoretischem und methodischem Wissen und reflektieren es hinsichtlich alternativer Entwürfe. Sie schätzen die eigenen Fähigkeiten ein, nutzen sachbezogene Gestaltungs- und Entscheidungsfreiheiten autonom und entwickeln diese unter Anleitung weiter. Sie erkennen situations-adäquat und situations-übergreifend Rahmenbedingungen beruflichen Handelns und reflektieren Entscheidungen verantwortungsethisch. Sie reflektieren kritisch ihr berufliches Handeln in Bezug auf gesellschaftliche Erwartungen und Folgen und entwickeln ihr berufliches Handeln weiter.



Ein wichtiges Ziel des Studiengangs ist es, den Studierenden Fähigkeiten und Grundlagen zu vermitteln, die es Ihnen erlauben, über die interdisziplinären Grenzen zwischen Physik, Chemie, Mathematik, Elektrotechnik und Informatik hinweg Forschungs- oder Industrieprojekte erfolgreich durchführen zu können. Neben dem notwendigen Hintergrundwissen und praktischen Knowhow erlangen die Absolventinnen und Absolventen die geeigneten Selbst- und Sozialkompetenzen, welche notwendig sind um im akademischen oder industriellen Umfeld der Quantenwissenschaften und -technologien erfolgreich zu sein.

## 3 Zielgruppen

### 3.1 Adressatenkreis

Der Masterstudiengang **Quantum Science & Technology (QST)** richtet sich an hervorragende Hochschulabsolventinnen und -absolventen in- oder ausländischer wissenschaftlicher Hochschulen mit Bachelor of Science oder gleichwertigem Abschluss in den Studiengängen Physik, Chemie, Elektro- und Informationstechnik, Informatik, sowie Mathematik oder vergleichbaren Studiengängen, welche ein besonderes Interesse an den physikalischen Grundlagen von Quantenphänomenen und deren gezielte Anwendung in der Informations- und Kommunikationstechnologie, der Sensorik, der Präzisionsmetrologie oder der Entwicklung von Quantenmaterialien haben.

### 3.2 Vorkenntnisse

Grundvoraussetzung für den Studiengang **QST** ist ein Bachelorabschluss (B. Sc. oder gleichwertiger Abschluss) mit mindestens 180 Credit Points (beziehungsweise mit sechs Semestern). Weitere Grundvoraussetzung für den Studienerfolg und das Erreichen des angestrebten Studienabschlusses sind grundlegende Fachkenntnisse in der Quantenmechanik, weshalb die Studierenden nachweisen müssen, dass sie diesbezüglich über eine ausreichende Qualifikation, wie beispielsweise durch den Besuch des Moduls PH0007 (oder vergleichbar), verfügen. Des Weiteren werden Fachkenntnisse der Naturwissenschaften (Physik, Chemie), der Ingenieurwissenschaften (Elektrotechnik) sowie der Mathematik und Informatik erwartet, wie sie in artverwandten Studiengängen an in- und ausländischen Universitäten und Hochschulen angeboten werden. In diesen Fächern werden fundierte Grund- und Methodenkompetenzen erwartet und im Eingangsverfahren abgeprüft. Gefordert sind Fähigkeiten zu wissenschaftlicher bzw. grundlagen- und methodenorientierter interdisziplinärer Arbeitsweise, eine ingenieur- oder naturwissenschaftliche Neigung, die Fähigkeit zum Denken mit Raumbezug sowie eine gute sprachliche Ausdrucksfähigkeit.

Die Bewerberinnen und Bewerber müssen ein Eignungsverfahren absolvieren, bei dem die fachliche Qualifikation, die Note, die Motivation für den Masterstudiengang **QST** sowie spezifische Qualifikationen der Bewerberinnen und Bewerber berücksichtigt werden. Insbesondere müssen Bewerberinnen und Bewerber Vorkenntnisse in den Grundlagen der Quantenmechanik mitbringen. Darüber hinaus sollten sie idealerweise ausreichende fachliche Qualifikation aus mehreren Bereichen vorweisen können:

- Grundlagen der Experimentalphysik (Mechanik sowie Elektrodynamik),
- Grundkurs Mathematik (Grundlagen der Linearen Algebra sowie Analysis 1, 2 und 3),
- Einem Qualifizierungsbereich Theorie mit drei aus den folgenden fünf anrechenbaren Bereichen: Grundlagen der Theoretischen Physik - Mechanik, Grundlagen der Theoretischen Physik - Elektrodynamik, Grundlagen der Theoretischen Physik - Thermodynamik und Statistik, sowie Numerik und/oder der Diskreten Strukturen,
- Einem Qualifizierungsbereich experimentelle Naturwissenschaften mit drei aus den folgenden fünf anrechenbaren Bereichen: Einführung in die Physik der kondensierten

Materie, Einführung in Kern-, Teilchen- und Astrophysik, Einführung in die Molekülphysik, und/oder der Chemie-Einführung in die organische Chemie sowie der Chemie-Einführung in die anorganische Chemie.

Die rechtlichen Informationen zum Eignungsverfahren sind in der Fachprüfungs- und Studienordnung beschrieben. Aufgrund der starken Forschungsausrichtung sind gute Englischkenntnisse notwendig, um sich im internationalen Wettbewerb sowie im Labor- und Publikationsalltag bewähren zu können. Der Studiengang wird in Englisch durchgeführt, wofür Englischkenntnisse vorausgesetzt werden. Von Bewerbenden, deren Ausbildungssprache (Bachelor, oder gleichwertig) nicht Englisch ist, ist ein Nachweis über die Englischkenntnisse durch einen anerkannten Sprachtest wie den „Test of English as a Foreign Language“ (TOEFL) (mindestens 88 Punkte), das „International English Language Testing System“ (IELTS) (mindestens 6,5 Punkte) oder die „Cambridge Main Suite of English Examinations“ zu erbringen. Wenn in dem Bachelor, oder gleichwertigen vorherigen Studium Prüfungsmodule im Umfang von 10 Credits erbracht wurden, so können hiermit ebenfalls adäquate Kenntnisse der englischen Sprache nachgewiesen werden.

### 3.3 Zielzahlen

Im Masterstudiengang **QST** werden zu Beginn etwa 50 Studienanfänger und Studienanfängerinnen erwartet. Im weiteren Verlauf werden maximal 100 Studierende pro Kohorte angestrebt, um einen signifikanten Beitrag zum Bedarf auf dem Arbeitsmarkt zu leisten und um eine exzellente Lehre garantieren zu können. Limitierende Faktoren, welche die Anzahl der Studienanfängerinnen begrenzen, sind die Personalressourcen, welche zur Betreuung von praktischen Arbeiten eingesetzt werden können, die Anzahl und Größe der zur Verfügung stehenden Hörsäle und Seminarräume sowie die vorhandenen Instrumente, Geräte und Rechnerarbeitsplätze für die Module des Masterstudiengangs **QST**.

## 4 Bedarfsanalyse

**Quantum Science & Technology (QST)** ist ein bereits fest etabliertes und stark wachsendes Forschungsfeld mit großem Anwendungspotenzial für die Industrie. So heißt es in der Fachinformation des Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) bezüglich Quantentechnologien: „Aktuell werden in Deutschland Investitionen in einem Umfang von ca. 100 bis 150 Mio. Euro im Jahr für Laborausstattung im Bereich der Quantentechnologien getätigt. In den letzten Jahren entstand in Deutschland überwiegend aus der universitären Grundlagenforschung heraus bereits eine Anzahl kleiner und mittlerer Unternehmen, die in diesem speziellen, meist auf hochspezialisierte Kleinserien ausgerichteten, internationalen Markt erfolgreich tätig sind.“<sup>1</sup> Im Münchner Raum zählen Firmen wie Toptica, Menlo Systems, QUBIG und Attocube Wittenstein zu diesen High-Tech-Firmen. Die aktuelle Herausforderung besteht darin, die Quantensysteme aus den Laboren der Forschungsinstitute in den industriellen Markt überzuführen. Große Firmen wie Volkswagen, Google, Microsoft, Huawei, Siemens, BASF, Bosch, Zeiss und viele andere bauen derzeit Abteilungen auf, die sich mit der Anwendung von Quantentechnologien befassen. Aufgrund der am Standort München vorhandenen hohen Kompetenz im Bereich QST wählen viele Firmen für diese Abteilungen den Großraum München aus.

*„Deutschland und die EU besitzen für die Entwicklung von Quantentechnologien eine gute Ausgangsbasis. Europa ist weltweit führend in der Quantenphysik – mit rund 50 % aller wissenschaftlichen Publikationen und fast 40 % der Forscher in diesem Bereich. Deutschland selbst verfügt über eine starke Expertise in der Quantenphysik und damit über gute Voraussetzungen, um auch die Entwicklung von Quantentechnologien der zweiten Generation frühzeitig in Anwendungen nutzbar zu machen und ihre Entwicklung international mitzugestalten.“<sup>2</sup>*

Ein aktuelles Beispiel eines Quantensystems, das zur Anwendung überführt wird, ist die sogenannte Opticlock.<sup>3</sup> Die geplante Uhr basiert auf einem einzelnen, in einer Ionenfalle gefangenen und mit Lasern gekühlten Ytterbium-Ion. Für eine mobile Anwendung dieser dauerbetriebsfesten kompakten optischen Einzel-Ionen Uhr müssen die optoelektronischen Schaltkreise mit der notwendigen Güte und Finesse miniaturisiert werden (unter Beteiligung der Firmen Toptica und QUBIG). Am Walther-Meißner-Institut wird zurzeit das weltweit erste Quanten-LAN zur Vernetzung supraleitender Quantenprozessoren in einem Konsortium mit mehreren Industriepartnern aufgebaut und am Max Planck Institut für Quantenoptik werden Quantensimulatoren der nächsten Generation im Rahmen des EU Quantum Flagship mit Beteiligung von Industriepartnern entwickelt.

Um die Aus- und Weiterbildung Studierender unterschiedlicher Fachrichtungen mit Interesse an QST zu fördern, wird in einem Positionspapier der deutschen Industrie<sup>4</sup> vorgeschlagen, „interdisziplinäre Quantentechnologie-Studiengänge an deutschen Universitäten und Hochschulen

---

<sup>2</sup> „Quantum Devices“, Technology Quartely - The Economist, [www.economist.com](http://www.economist.com), März 2017. Abgerufen am 01.04.2019

<sup>3</sup> <https://www.opticlock.de/info/> Abgerufen am 01.04.2019

<sup>4</sup> [https://www.photonikforschung.de/media/quantentechnologien/pdf/Quantentechnologie\\_bf.pdf](https://www.photonikforschung.de/media/quantentechnologien/pdf/Quantentechnologie_bf.pdf) Abgerufen am 01.04.2019

(FH), die sowohl physikalische, ingenieurtechnische als auch informationstechnische Aspekte umfassen“, einzurichten.

### **Nachfrage der Absolventinnen und Absolventen auf dem Arbeitsmarkt**

Der **Bedarf an Fachkräften im Bereich der Quantentechnologien** im süddeutschen Raum, aber auch auf internationaler Ebene zeigt sich konkret an den Positionen der Alumni des Walter Schottky Instituts in den Jahren 2009-2019: Von typischerweise 30 Alumni pro Jahr sind aus den aktuellen Jahrgängen in der Wissenschaft acht als Professoren und aktuell vier als PostDocs an internationalen Forschungseinrichtungen weiterhin im Bereich der Quanten- und Nanophysik tätig. Die meisten Personen haben eine Anstellung in der High-Tech Industrie, überwiegend im süddeutschen Raum, gefunden. Die Positionen reichen von Entwicklern (beispielsweise bei Texas Instruments, Intel, Microsoft, Infineon, Siemens, Osram, TDK, Toptica, Attocube Wittenstein, Menlo, Voith, Bosch BMW group) über Patentanwälte und -prüfer bis zu Beratern (beispielsweise bei McKinsey, BCG, Accenture) und Projekt-Verantwortliche in Start-ups. Ähnliches trifft für die Alumni des Walther-Meißner-Instituts und des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik und der LMU zu. Diese Beispiele zeigen den enormen Bedarf an exzellent ausgebildeten Kräften mit Expertenwissen im Bereich der Quantenwissenschaften und deren übergreifenden Schnittstellentechnologien von der Halbleiter- bis hin zur Photonik und Laserphysik, aber auch in benachbarten Disziplinen, die ebenfalls vom Knowhow der Bewerber profitieren.

Nach erfolgreichem Abschluss des Masterstudiums **QST** ist es den Absolventinnen und Absolventen möglich, einen nahtlosen Übergang in die Promotion auf allen Forschungsgebieten der Quantenwissenschaften und -technologien zu realisieren. Im Bereich der Forschung ist der Masterabschluss für ein Promotionsvorhaben unerlässlich. Eine wissenschaftliche Laufbahn könnte ebenfalls für einige Absolventinnen und Absolventen ein aussichtsreicher Karriereweg sein, insbesondere angesichts der weltweit stark ansteigenden Forschungsaktivitäten in diesem Bereich.

Typische Einsatzfelder für die Absolventen dieses Masterstudienganges sind in der experimentellen Forschungstätigkeit, in der Planung und Dokumentation von Forschungsprojekten sowie in angrenzenden Tätigkeitsfeldern, beispielsweise im Patentwesen, der Entwicklung, der Projektplanung oder auch in Behörden.

Die Absolventinnen und Absolventen des geplanten Studienganges werden ausgebildet, in forschenden interdisziplinären Teams an Universitäten und in der High-Tech Industrie tätig zu werden. Die Gründung oder Mitwirkung an Start-ups, die in der High-Tech-Branche oft direkt aus Universitäten heraus gegründet werden, ist eine weitere Karrieremöglichkeit. Die strategische Verbindung zum Beispiel zur UnternehmerTUM bietet hier eine besonders günstige Synergie-Konstellation.

## 5 Wettbewerbsanalyse

### 5.1 Externe Wettbewerbsanalyse

**Quantum Science & Technology** ist weltweit ein stark nachgefragtes Thema. Internationale Spitzenuniversitäten wie zum Beispiel die ETH Zürich bieten einen Masterstudiengang *Master of Science Quantum Engineering* am *Department of Information Technology and Electrical Engineering* unter starker Einbindung des Physik-Departments an. Im Jahr 2019 starten am University College London und an der Australian National University neue Masterstudiengänge *Quantum Technologies*. An der Tohoku University existiert an der School of Engineering ein *Department of Quantum Science and Energy Engineering* mit Bachelor- und Masterstudiengang. Die Universität Strasbourg bietet eine neue internationale Graduiertenschule *Quantum Science and Nanomaterials* an. *Quantum Physics* ist eine Spezialisierung des Master of Science Programms in Physik an der Universität Kopenhagen. An der TU Delft kann in Rahmen des Master of Science Applied Physics die Spezialisierung *Physics for Quantum Devices and Quantum Computing* gewählt werden. Die führenden US Universitäten bieten einen starken Fokus auf Quantum Science and Technologies. In Boston wurde zum Beispiel das *Center for Integrated Quantum Materials* mit Beteiligung der Harvard University, der Howard University und des MIT gegründet. Deutschlandweit existieren bisher einige wenige Initiativen. Lediglich an der Technischen Universität Kaiserslautern wird ein internationaler Masterstudiengang *Master of Science in Advanced Quantum Physics* angeboten.

Der Standort München mit zwei forschungsstarken Universitäten in den Gebieten der Quantenphysik und der Quanteninformationstechnologie, die in den Fakultäten Physik, Chemie, Informatik und Mathematik und Elektrotechnik und Informationstechnik vertreten sind, sowie mit thematisch entsprechend ausgerichteten Max-Planck-Instituten ist prädestiniert, eine Vorreiterrolle innerhalb Deutschlands und Europas zu übernehmen. Verstärkt wird dieser Eindruck noch durch die erfolgreichen Initiativen des Exzellenzclusters (MCQST), des Munich Quantum Center (MQC) und des Zentrum für QuantumEngineering (ZQE). Die Abbildung der äußerst erfolgreichen Forschungsaktivitäten in einen interdisziplinären Masterstudiengang ist zeitgemäß und verspricht, begabte Studierende aus dem nationalen und internationalen Bereich anzuwerben. Eine Analyse der verschiedenen internationalen und nationalen Studiengänge ist im Teil B angeführt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in Deutschland bisher kein interdisziplinärer Masterstudiengang *Quantum Science & Technology* insbesondere mit Einbindung der Ingenieurwissenschaften, der Mathematik und der Informatik existiert. Der an der TU Kaiserslautern eingerichtete internationale Studiengang *Advanced Quantum Physics* ist zwar strukturell ähnlich (vier Semester, 120 Creditpoints, englischsprachig, jedoch nur drei Monaten Masterarbeit), er ist aber fachlich sehr auf den Studiengang Physik fokussiert. Er ist ausschließlich an der Fakultät für Physik verortet und behandelt hauptsächlich traditionelle Themen zu Quantum<sup>1,0</sup>. Lediglich in Wahlfächern können die Studierenden Module aus den Fakultäten Mathematik, Informatik und Elektrotechnik wählen (insgesamt 8 CPs).

Der Studiengang *Quantum Science & Technology* an der TUM und LMU wird dazu beitragen, ein für Bewerberinnen und Bewerber attraktives und auf aktuelle Themen fokussiertes Studium anzubieten und damit die Vorreiterrolle im nationalen Vergleich einzunehmen.

## 5.2 Interne Wettbewerbsanalyse

An der Technischen Universität München und der Ludwig-Maximilians-Universität finden sich keine vergleichbaren Masterstudiengänge. Bachelorabsolventen, die das Thema **QST** im Master verfolgen möchten, können an der TUM und LMU bislang auf kein derartig interdisziplinäres Programm zurückgreifen.

Der Masterstudiengang **QST** wird als gemeinsamer Studiengang der TUM und LMU eingeführt. Damit wird das Themenfeld, das bereits in vielen Facetten in mehreren Fakultäten und Institutionen gelehrt wird, in einem kohärent koordinierten Masterstudiengang angeboten. Der Studiengang **QST** vervollständigt das Angebot der TUM und LMU durch einen interdisziplinären, synergistischen Studiengang aus den Natur- und Ingenieurwissenschaften. Die Ausrichtung des geplanten Studiengangs liegt thematisch an der Schnittstelle zwischen Forschung aus Naturwissenschaften (beispielsweise Physik, Chemie), Mathematik und den Ingenieurwissenschaften (beispielsweise Informatik, Elektro- und Informationstechnik). Das Alleinstellungsmerkmal des Studiengangs **QST** ist diese interdisziplinäre Schnittmenge mit dem Fokus auf der Untersuchung von quantentechnologischen Phänomenen und Wirkmechanismen und deren gezielter Anwendung in der Technik.

Ähnliche Studiengänge sind:

- Physics (Master), Fakultät für Physik der LMU,
- Applied and Engineering Physics (AEP), Fakultät für Physik der TUM,
- Kondensierte Materie (KM), Fakultät für Physik der TUM,
- Theoretical and Mathematical Physics (TMP), gemeinsam an beiden Fakultäten für Physik.

Der Studiengang QST bietet erstmals ein kohärentes Curriculum zu den unter Quantum<sup>2.0</sup> zusammengefassten neuen Themengebieten an. Darüber hinaus soll der interdisziplinäre Studiengang QST zwischen den Natur- und Ingenieurwissenschaften sowohl an der TUM als auch an der LMU gleichberechtigt studiert werden können.

Die Fokussierung auf Quantum<sup>2.0</sup>-Themen ist das Alleinstellungsmerkmal des Studiengangs QST. Zum Beispiel führt das Pflichtmodul „**QST Theory: Applied Quantum Mechanics**“ ausgehend von quantenmechanischen Grundlagenkonzepten, wie beispielsweise Erzeuger, Vernichter, Fock-Zustand, gequetschter Zustand und „dressed state“, in quantentechnologische Theoriekonzepte ein und vertieft diese. Beispielhaft sind das der Strahlteiler-Operator, die „input/output“ Theorie, das „no-cloning theorem“, die Shor-/Grover-Algorithmen, das Bell-Theorem, die Quantenkommunikation, die Quantenkontroll-Theorie sowie „Entanglement“ und „Entanglement-Measures“. Kompetenzen in diesem Bereich sind essenziell, um Quantum<sup>2.0</sup>-Schaltkreise und -prozesse verstehen und entwerfen zu können. Sie sind in keinem der bisherigen, oben genannten Studiengänge kohärent dargestellt und auf Technik-Fragestellungen angewendet.

So geht der Studiengang **QST** über den klassischen „Physics (Master)“ der Fakultät für Physik an der LMU hinaus, da die Studierenden beispielsweise in der Signal- und Informationsverarbeitung, der Kontrolltheorie, der klassischen und quantenbasierten Kommunikation- und Informationstheorie sowie in den mess- und materialtechnischen Grundlagen der Quantentechnologien der zweiten Generation ausgebildet werden.

Dasselbe gilt vergleichend für den Studiengang „Applied and Engineering Physics“ (AEP) an der Fakultät für Physik der TUM, der auf alle Aspekte der sogenannten technischen Physik fokussiert. Er vermittelt Einblicke in die angewandte Festkörperphysik, die Nanowissenschaften, die Energiewissenschaften, die Physik der weichen Materie, die angewandte Plasmaphysik sowie die entsprechenden experimentellen Methoden und Techniken. Der Studiengang „Kondensierte Materie“ (KM) fokussiert auf alle Bereiche der theoretischen und experimentellen Festkörperphysik. So grenzt sich der Studiengang **QST** von AEP und KM klar ab, indem dessen Schwerpunkt auf Quantenwissenschaften und auf die Interdisziplinarität mit den Fakultäten für Chemie, Elektrotechnik, Mathematik und Informatik ausgelegt ist.

Der Studiengang „Theoretical and Mathematical Physics“ (TMP) wird gemeinsam von beiden Fakultäten für Physik der TUM und LMU angeboten. Er ist allerdings ein sogenannter Elite-Studiengang mit rein theoretischen Inhalten und besitzt keinerlei experimentelle oder gar ingenieurwissenschaftliche Aspekte.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass es weder an der TUM noch an der LMU einen vergleichbaren Masterstudiengang gibt und somit keine Wettbewerbssituation mit anderen Masterstudiengängen besteht. Lediglich über den Umweg des Masterstudiengangs Applied and Engineering Physics (AEP) an der TUM und des Masters (Physics) an der LMU können bisher einzelne Aspekte zum Thema **QST** in Wahlmodulen belegt werden. In der Konsequenz bleiben den Studierenden entweder in den theoretischen Aspekten der Quanteninformation oder in der quantenmechanischen Beschreibung der Materialien und Messprinzipien Wissens- und Knowhow-Lücken, die sie meist in den ersten Jahren der Doktorarbeit aufholen müssen. Ingenieure haben beispielsweise üblicherweise Nachholbedarf hinsichtlich der Grundlagen zur quantenmechanischen Beschreibung unserer Natur sowie der naturwissenschaftlichen Grundlagen, der experimentellen Ansätze und der anspruchsvollen Datenanalyse. Dagegen haben Physiker und Chemiker Nachholbedarf in der technologischen Umsetzung, Einbettung und Optimierung von Quantenschaltkreisen und -prozessen. Mit einem speziell zugeschnittenen Studiengang in **QST** können die verschiedenen Forschungsrichtungen dieses multi- und interdisziplinären Feldes bereits im Studium beleuchtet und die Studierenden besser auf ihre Tätigkeit in Forschung und Industrie vorbereitet werden.



## 6 Aufbau des Studiengangs

Der Studiengang **Quantum Science & Technology (QST)** ist auf vier Semester mit 120 Credit Points angelegt. Der Studienbeginn wird gemäß der Fachprüfungs- und Studienordnung (FPSO, Paragraph 35) für diesen Studiengang an der TUM im Wintersemester empfohlen.

Der Studienverlauf lässt sich in zwei Teile gliedern, einmal die ersten beiden Semester – hier als Studienphase benannt – und die Semester drei und vier, welche die Forschungsphase darstellen, siehe **Abbildung 1**. Die Studienphase unterteilt sich wiederum in Pflicht- und Wahlmodule und legt die Grundlagen für die darauf aufbauende einjährige Forschungsphase, die in einem Fachgebiet bzw. an einer Professur durchgeführt wird. Die Forschungsphase besteht aus einem Masterseminar sowie einem Masterpraktikum und schließt mit der Master's Thesis ab.

	Semester	Module			Credits/ Anzahl Prüfungen
Studienphase	1.	QST Theory: Quantum Information (TUM/LMU)  (Pflicht) Klausur 10 CP	QST Experiment: Quantum Hardware (TUM/LMU)  (Pflicht) Klausur 10 CP	Wahlmodulkatalog Experimental Quantum Science & Technology oder Theoretical Quantum Science & Technology  (Wahl) diverse 10 CP	30/3
	2.	Advanced Practical Training  (Pflicht) Laborleistung 6 CP	Allgemeinbildende Fächer  (Wahl) diverse 4 CP	Wahlmodulkatalog Experimental Quantum Science & Technology oder Theoretical Quantum Science & Technology  (Wahl) diverse 20 CP	30/5
Forschungsphase	3.	Master's Seminar  (Pflicht) Präsentation 15 CP		Master's Work Experience  (Pflicht) Bericht 15 CP	30/2
	4.	Master's Thesis 30 CP			30/1

Legende:  
 hellgrau = Pflichtmodule der Semester 1 und 2  
 dunkelgrau = Allgemeinbildende Fächer  
 hellblau = Wahlmodulkatalog der Fokussierungsrichtungen  
 dunkelblau = Forschungsjahr (Masterseminar, Masterpraktikum und Master's Thesis)

**Abbildung 1 Studienplan mit dem grundlegenden Aufbau des Studiengangs.**

Im ersten Semester können die Studierenden neben den Pflichtmodulen *QST Theory: Quantum Information* (10 Credit Points) und *QST Experiment: Quantum Hardware* (10 Credit Points) Module in einem Umfang von insgesamt 10 Credit Points aus einem Wahlmodulkatalog selbst wählen. Das zweite Semester sieht das Pflichtmodul *Advanced Practical Training* (sechs Credit Points) und vier Credit Points aus dem allgemeinbildenden Wahlkatalog sowie weitere 20 Credit Points aus dem Wahlmodulbereich vor.

Beide Pflichtmodule *QST Theory: Quantum Information* und *QST Experiment: Quantum Hardware* werden sowohl an der TUM als auch an der LMU wechselseitig angeboten. Mit ihnen erhalten die Studierenden, welche auf Grund der unterschiedlichen Fachrichtungen im Bachelor ein

unterschiedliches Vorwissen einbringen, eine Einführung und Fokussierung in die quantentechnologischen Themenbereiche des Studiengangs. Im Pflichtmodul *QST Experiment: Quantum Hardware* werden die Studierenden mit den verschiedenen Technologie-Plattformen für die Implementierung von Quantensystemen, wie beispielsweise Ionen, Atomen oder Photonen in Fallen oder Lichtgittern, supraleitenden Schaltkreisen und Quantenpunkten in Halbleitermaterialien, sowie mit hybriden Quantensystemen und quantenmechanischen Messprinzipien vertraut gemacht. Das Pflichtmodul *QST Theory: Quantum Information* erlaubt es den Studierenden, die Konzepte der Quanteninformationstheorie, des Quantencomputings und der Quanteninformationsverarbeitung zu verstehen, zu analysieren und weiter zu entwickeln, sowie neue Methoden zu erschließen.

Die Wahlmodule können den beiden thematischen Säulen *Experimental Quantum Science & Technology* und *Theoretical Quantum Science & Technology* zugeordnet werden. Sie vermitteln die vertiefenden Kompetenzen für einen Master of Science im Bereich der QST. Bei der Auswahl der Fokussierungsrichtung *Experimental Quantum Science & Technology* sind die Studierenden in der Lage, die Implementierung von Quanteninformationskonzepten in realen Quantensystemen und Schaltkreisen aus Atomen, Festkörpern und elektromagnetischer Strahlung zu verstehen, zu analysieren, Messmethoden weiterzuentwickeln, sowie die erfassten Daten zu interpretieren. Die Fokussierungsrichtung *Theoretical Quantum Science & Technology* erlaubt es den Studierenden, unterschiedliche theoretische Aspekte der Quantensimulation, -computing und -informationsübertragung und der Modellierung von Quantenmaterialien zu erschließen und weiterzuentwickeln. Die Wahlmodule lassen eine Individualisierung des Studienplans zu, wobei ein breites Spektrum an Methoden und Anwendungsfeldern für die Studierenden zugänglich gemacht wird. Der Wahlmodulkatalog ist in der FPSO offen formuliert und wird durch den Prüfungsausschuss ergänzt. Es besteht zudem die Möglichkeit, dass Studierende einen individuellen Studienplan belegen.

Zur Orientierung in diesem breiten Wahlangebot sind die Studierenden zur Teilnahme am Mentorensystem verpflichtet. Hierbei werden sie bereits zu Beginn des Studiums bei der Ausrichtung und Zusammenstellung des individuellen Studienplanes unterstützt. In Absprache mit den Mentorinnen und Mentoren ist es möglich, auch einen individuellen Studienschwerpunkt, abweichend von *Experimental Quantum Science & Technology* und *Theoretical Quantum Science & Technology*, zu setzen. Die Teilnahme am Mentorengespräch ist außerdem Voraussetzung für die Zulassung zur Master Thesis. Die große Breite bei der Auswahl der Wahlmodule garantiert den Studierenden eine hohe Flexibilität bei der Studienganggestaltung und fördert die Selbstständigkeit der Studierenden.

Im Rahmen des *Advanced Practical Trainings* führen die Studierenden in Teams (in der Regel drei Studierende) sechs Versuche aus dem Katalog des Fortgeschrittenenpraktikums gemeinsam durch. Jeder dieser anspruchsvollen Versuche umfasst dabei insbesondere die Vorbereitung mit Hilfe der Versuchsanleitung ergänzt durch Literaturrecherche mit einführender Besprechung mit dem Versuchsbetreuer, die Durchführung des Versuchs mit Anfertigung eines Protokolls, die Anfertigung einer schriftlichen Ausarbeitung der Versuchsergebnisse und eine Abschlussdiskussion der Ergebnisse mit dem Versuchsbetreuer. Die Teilnahme an diesem Modul ist verpflichtend, da die Studierenden durch diese, meist interdisziplinären, Versuche die Kompetenz entwickeln aktuelle Themen und Publikationen auf experimentelle Weise

nachzuvollziehen. Im Rahmen der Gruppenarbeit entwickeln die Studierenden zudem ein solidarisches und tolerantes Miteinander.

Die Studierenden haben die Möglichkeit aus dem weiten Bereich allgemeinbildender Fächer (Sprachenzentrum, Carl von Linde-Akademie, und vielen mehr) Wahlmodule im Umfang von vier Credit Points einzubringen. Die Fakultät für Physik hat die Erfahrung gemacht, dass der Umfang von vier Credit Points im Bereich der allgemeinbildenden Fächer ausreichend ist, um die Lernergebnisse zu erreichen, beispielsweise um eine Grundlage für Entscheidungskompetenz auf akademischem Niveau zu erhalten.

Im dritten und vierten Semester wird die individuelle Forschungsphase an einem Lehrstuhl beziehungsweise in einem Fachgebiet an der TUM oder der LMU erbracht. Es ist möglich diese auch am Walter Schottky Institut (WSI), Walther-Meißner-Institut (WMI), Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) oder einer anderen entsprechenden Einrichtung zu erbringen. Im dritten Semester werden im Rahmen des Masterseminars (15 Credit Points) die notwendigen theoretischen Grundlagen sowie der wissenschaftliche Hintergrund der Master's Thesis durch die Studierenden selbstständig erarbeitet, präsentiert und diskutiert. Zeitgleich erlernen die Studierenden im Masterpraktikum (15 Credit Points) die für die Master's Thesis notwendigen technischen und experimentellen Methoden, wie auch die konzeptionelle Herangehensweise im Forschungsalltag. Die Module *Masterseminar* und *Masterpraktikum* dienen der optimalen Vorbereitung auf die Master's Thesis. Die Master's Thesis wird regulär, inklusive dem dazugehörigen Masterkolloquium (30 Credit Points), im vierten Semester durchgeführt.

Die angebotenen Module erstrecken sich im Normalfall jeweils auf ein Semester. Dadurch werden große zeitliche Flexibilität und die Möglichkeit zur optimalen Individualisierung für die Studierenden sichergestellt. Die **Abbildung 2** und die **Abbildung 3** zeigen, zur Veranschaulichung eines typischen Studienverlaufs, exemplarisch einen schematischen Studienplan einmal mit einer Fokussierung auf *Experimental Quantum Science & Technology* und einmal mit einer Fokussierung auf *Theoretical Quantum Science & Technology*.

Das dritte und vierte Semester ist für jede Fokussierung gleich strukturiert und wird im Studienplan nicht explizit dargestellt. Im Teil B sind beispielhafte Stundenpläne der ersten beiden Semester für die beiden Fokussierungsrichtungen abgebildet, die Pflichtmodule sind miteinander so abgestimmt, dass ein Standortwechsel ermöglicht ist, beziehungsweise über eine digitale Übertragung an den jeweils anderen Standort die Teilnahme an der Lehrveranstaltung ermöglicht wird.

Den Studierenden steht die Möglichkeit eines Auslandsaufenthalts während des Studiums offen. Hierbei wird das zweite Semester für ein Auslandssemester empfohlen, denn dieses bietet sich auf Grund der vielen Wahlmöglichkeiten als Mobilitätsfenster an. Die Studierenden werden zudem ermutigt, bei einer der Tagungen der Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. (DPG) ein Poster zu präsentieren oder einen Vortrag zu halten. Dies fördert die Kommunikationsstärke der Studierenden und unterstützt ihre Fähigkeit, ihre erlangten Kenntnisse vorzustellen und der internationalen Fachwelt auf dem Themengebiet **QST** bekannt zu geben und zu reflektieren. Außerdem fördert die Tagungsteilnahme die Vernetzung mit anderen Wissenschaftlern.

Semester	Module				Credits/ Anzahl Prüfungen	
1.	QST Theory: Quantum Information (TUM/LMU)  (Pflicht) Klausur 10 CP		QST Experiment: Quantum Hardware (TUM/LMU)  (Pflicht) Klausur 10 CP	Ultracold Quantum Gases (PH-LMU)  (Wahl) Klausur 9 CP	29/3	
2.	Advanced Practical Training  (Pflicht) Laborleistung 6 CP	Writing Scientific Papers: English Writing for Physics  (Wahl) Präsentation 4 CP	Applied Superconductivity (PH-TUM)  (Wahl) Klausur 10 CP	Quantum Optoelectronics (PH-LMU)  (Wahl) Klausur 6 CP	Semiconductor Quantum Electronics (PH-TUM)  (Wahl) Klausur 5 CP	31/5

hellgrau = Pflichtmodule der Semester 1 und 2  
 dunkelgrau = Allgemeinbildende Fächer  
 hellblau = Wahlmodulkatalog der Fokussierungsrichtung Experimental Quantum Science & Technology

**Abbildung 2 Beispielhafter Studienplan der Studienphase mit der Fokussierungsrichtung Experimental Quantum Science & Technology.**

Semester	Module				Credits/ Anzahl Prüfungen	
1.	QST Theory: Quantum Information (TUM/LMU)  (Pflicht) Klausur 10 CP		QST Experiment: Quantum Hardware (TUM/LMU)  (Pflicht) Klausur 10 CP	Quantum Many Body Physics (PH-TUM)  (Wahl) Präsentation 10 CP	30/3	
2.	Advanced Practical Training  (Pflicht) Laborleistung 6 CP	Writing Scientific Papers: English Writing for Physics  (Wahl) Präsentation 4 CP	Tensor Networks (PH-LMU)  (Wahl) Bericht 9 CP	Representation of Compact Groups (M-TUM)  (Wahl) mündlich 6 CP	Simulation of Quantum Devices (EI-TUM)  (Wahl) mündlich 5 CP	30/5

hellgrau = Pflichtmodule der Semester 1 und 2  
 dunkelgrau = Allgemeinbildende Fächer  
 hellblau = Wahlmodulkatalog der Fokussierungsrichtung Theoretical Quantum Science & Technology

**Abbildung 3 Beispielhafter Studienplan der Studienphase mit der Fokussierungsrichtung Theoretical Quantum Science & Technology.**

## 7 Organisatorische Anbindung und Zuständigkeiten

Der Masterstudiengang **QST** wird von der **Fakultät für Physik der TUM** gemeinsam mit der **Fakultät für Physik der LMU** angeboten. Erstere ist für die Durchführung und Verwaltung des Studiengangs verantwortlich. Zusätzlich sind über Lehrimport die nachfolgenden Fakultäten in den Studiengang involviert:

- Fakultät für Elektro- und Informationstechnik (EI-TUM) der TUM,
- Fakultät für Chemie (CH-TUM) der TUM,
- Fakultät für Mathematik (MA-TUM) der TUM,
- Fakultät für Mathematik, Informatik und Statistik (M-LMU) der LMU,
- Fakultät für Chemie (CH-LMU) der LMU.

In den Studiengang sind Lehrbeauftragte eingebunden, welche spezifische Kompetenzen und Kenntnisse aus den im Raum München angesiedelten Forschungsinstituten und Behörden vermitteln.

Die folgenden Administrativen Tätigkeiten werden durchgeführt von:

- Allgemeine Studienberatung: Studierenden Service Zentrum (SSZ),  
Abteilung Studienberatung und Schulprogramme  
E-Mailadresse: studium@tum.de  
Telefonnummer: +49 (0)89 289 22245  
bietet Informationen und Beratung für:  
Studieninteressierte und Studierende  
(über Hotline/Service Desk)

- Fachstudienberatung: Fakultät für Physik  
NN

Studienbüro Quantum Science & Technology:

Fakultät für Physik der TUM  
Team Studienorganisation und -beratung  
Webseite: <https://www.ph.tum.de/studiendekan>  
E-Mailadresse: studium@ph.tum.de

- Beratung Auslandsaufenthalt/Internationalisierung:  
zentral: TUM International Center,  
internationalcenter@tum.de  
dezentral: Fachreferentin für Internationales,  
Dr. Maria Eckholt,  
E-Mailadresse: international@ph.tum.de
- Frauenbeauftragte: Prof. Elisa Resconi,  
E-Mailadresse: frauenbeauftragte@ph.tum.de
- Beratung barrierefreies Studium: zentral: SSZ, Servicestelle für behinderte und  
chronisch kranke Studierende und  
Studieninteressierte,

E-Mailadresse: Handicap@zv.tum.de  
Telefonnummer: +49 (0)89 289 22737  
dezentral: NN

- **Bewerbung und Immatrikulation:** SSZ, Abteilung Bewerbung und Immatrikulation  
E-Mailadresse: studium@tum.de  
Telefonnummer: +49 (0)89 289 22245  
Bewerbung, Immatrikulation,  
Student Card, Beurlaubung,  
Rückmeldung, Exmatrikulation
- **Eignungsverfahren:** zentral: SSZ, Abteilung Bewerbung und Immatrikulation  
dezentral: Eignungskommission des Studiengangs  
Mitglieder: NN
- **Beiträge und Stipendien:** SSZ, Abteilung Beiträge und Stipendien  
E-Mailadresse:  
beitragsmanagement@zv.tum.de  
Stipendien und Semesterbeiträge
- **Zentrale Prüfungsangelegenheiten:** SSZ, Abteilung Zentrale Prüfungsangelegenheiten, Campus Garching  
Abschlussdokumente, Prüfungsbescheide,  
Studienabschlussbescheinigungen
- **Dezentrale Prüfungsverwaltung:** Fakultät für Physik (TUM),  
NN
- **Prüfungsausschuss:** Prof. Dr. Alexander Holleitner (Vorsitzender)  
NN (Schriftführer/in)
- **Qualitätsmanagement Studium und Lehre:**  
zentral: Hochschulreferat Studium und Lehre,  
[www.lehren.tum.de/startseite/team-hrsl/](http://www.lehren.tum.de/startseite/team-hrsl/)  
dezentral:  
Studiendekan Prof. Reinhard Kienberger  
E-Mailadresse: studierendekan@ph.tum.de  
QM-Beauftragte/r: NN  
Organisation QM-Zirkel: NN  
Evaluationsbeauftragte/r: NN  
Koordination Modulmanagement: NN

## 8 Entwicklungen im Studiengang

Der Studiengang **Quantum Science & Technology** wird erstmalig eingerichtet.