



Grundlagen der Quantentechnologien in Physik und Ingenieurwissenschaften

Prof. J. Eschner, Experimentalphysik

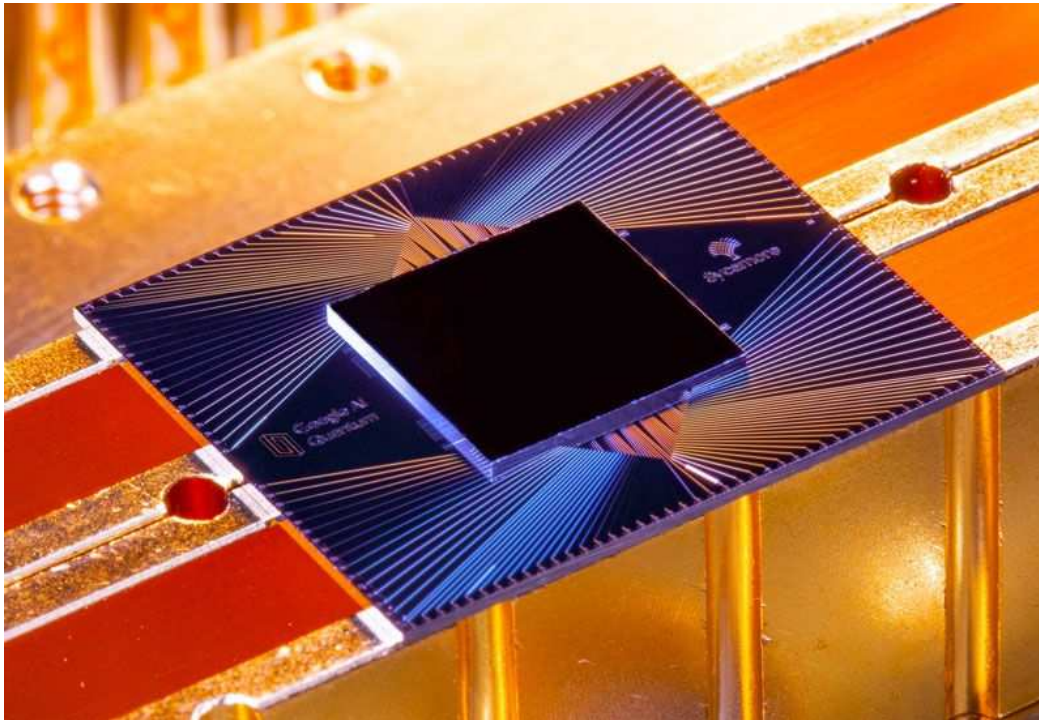
2020



Fachrichtung Physik
Fachrichtung Systems Engineering
Universität des Saarlandes



"Quantum supremacy using a programmable superconducting processor"
F. Arute et al., Nature **574**, 505–510 (2019)



Google's 53-qubit "Sycamore" quantum chip.
(nature.com)



Cryostat of Google's quantum computer.
(Google)

Quantentechnologien 1. Generation

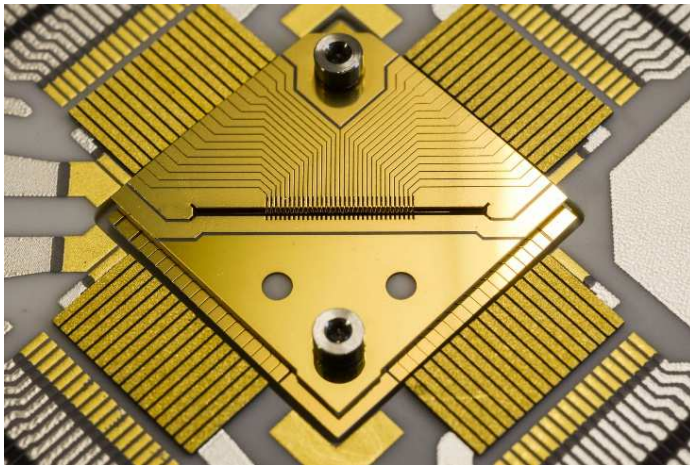
- Anwendung von Quanteneffekten: Supraleitung, Materiewellen, Lichtpartikel (Photonen), Interferenz, GMR-/TMR-Sensorik, Tunneln
- Beispiele: MRT (Magnetresonanz-Tomographie), SQUID (Magnetfeldmessung), LIDAR, Festplatten, Handys

Quantentechnologien 2. Generation

- Anwendung von Quanteneffekten: Verschränkung, Quantenmessung
- Beispielanwendungen: Quantencomputer, Kryptographie, Sensorik, Quanten-Simulatoren, Metrologie

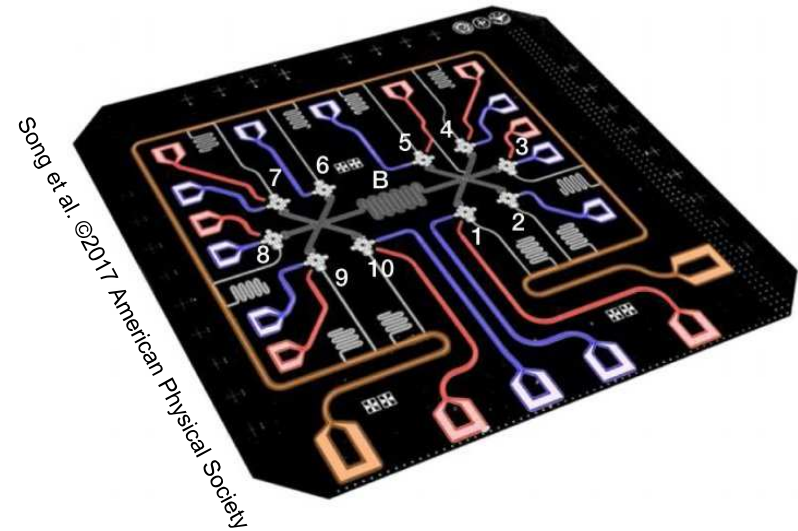
Quantencomputing

Ionenfallen-Quantencomputer



<https://www.quantenbit.physik.uni-mainz.de/quantum-computer/>

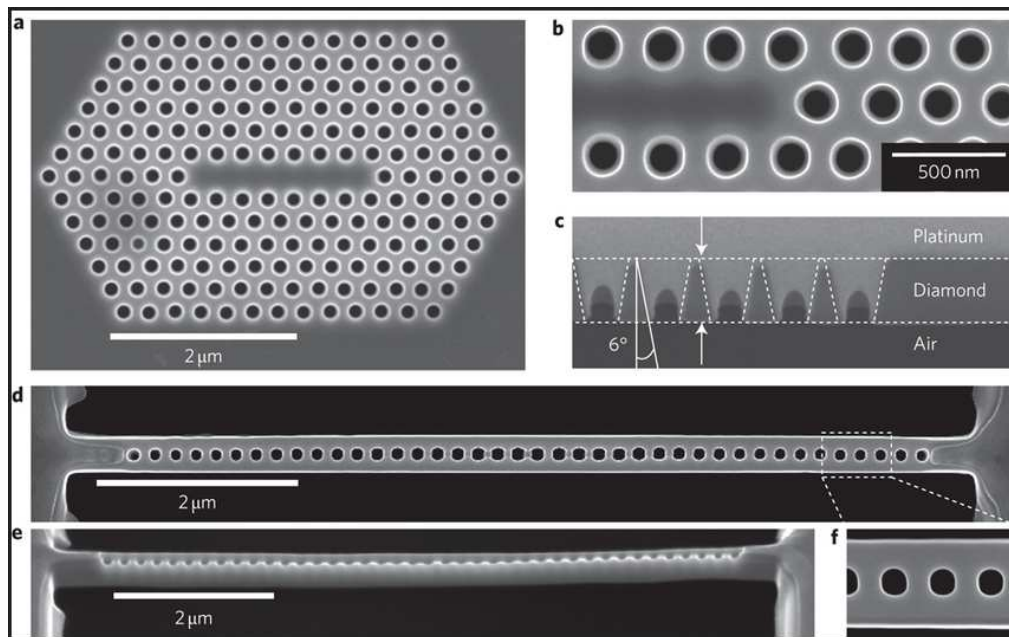
Quantencomputer-Chip mit 10 verschränkten Quantenbits



An der UdS: **Prof. F. Wilhelm-Mauch, Physik**
Prof. M. Möller, Systems Engineering

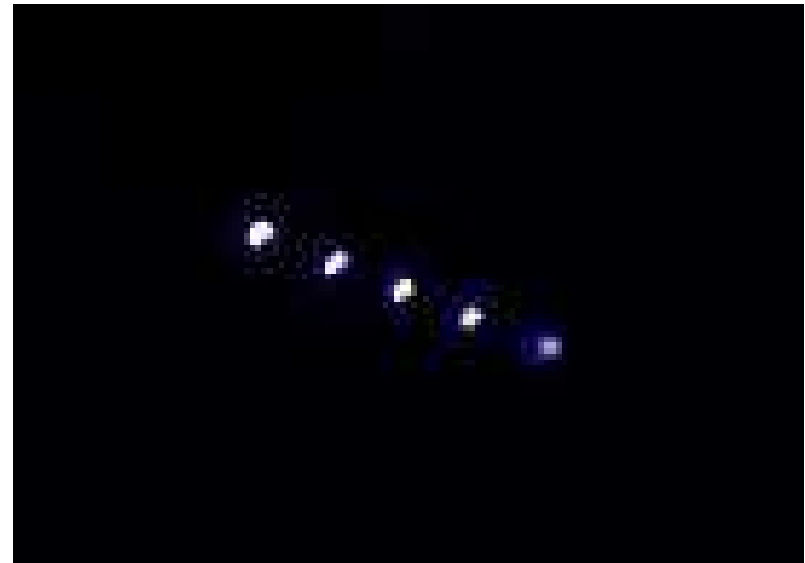
Quantenkommunikation

Mikrostrukturierte Kristalle kontrollieren die Photonen



Nature Nanotechnology 7, 69-74 (2011)

Einzelne Atome senden und empfangen einzelne Lichtteilchen

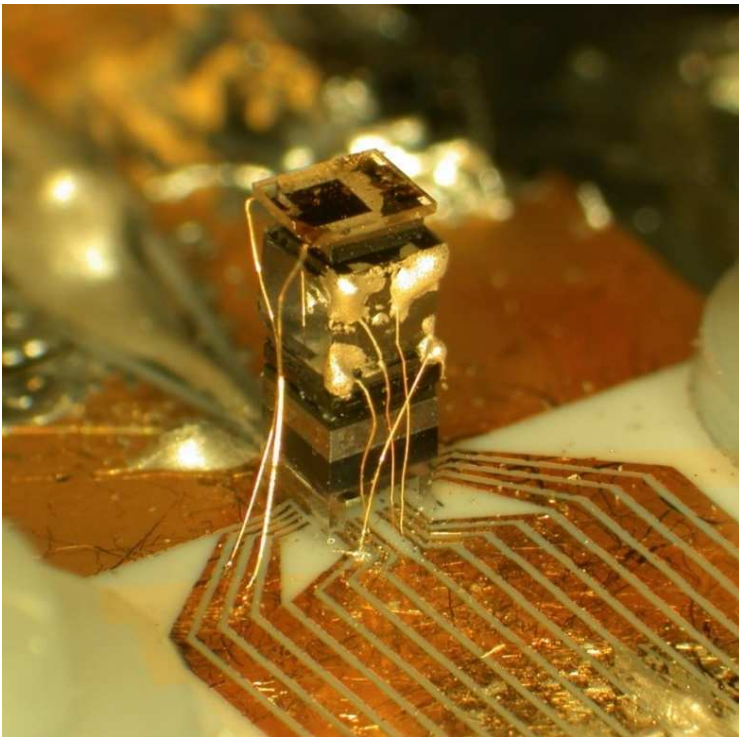


J. Eschner

An der UdS: **Prof. C. Becher, Physik**
Prof. J. Eschner, Physik

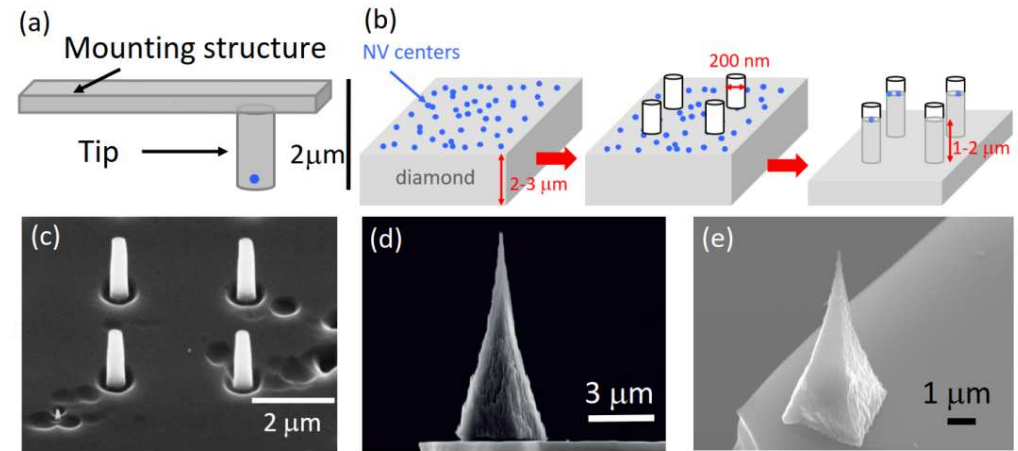
Quantensensorik

Chip-scale atomic clock



<http://www.nist.gov>

Atomkraft-Mikroskop mit Quantenlicht

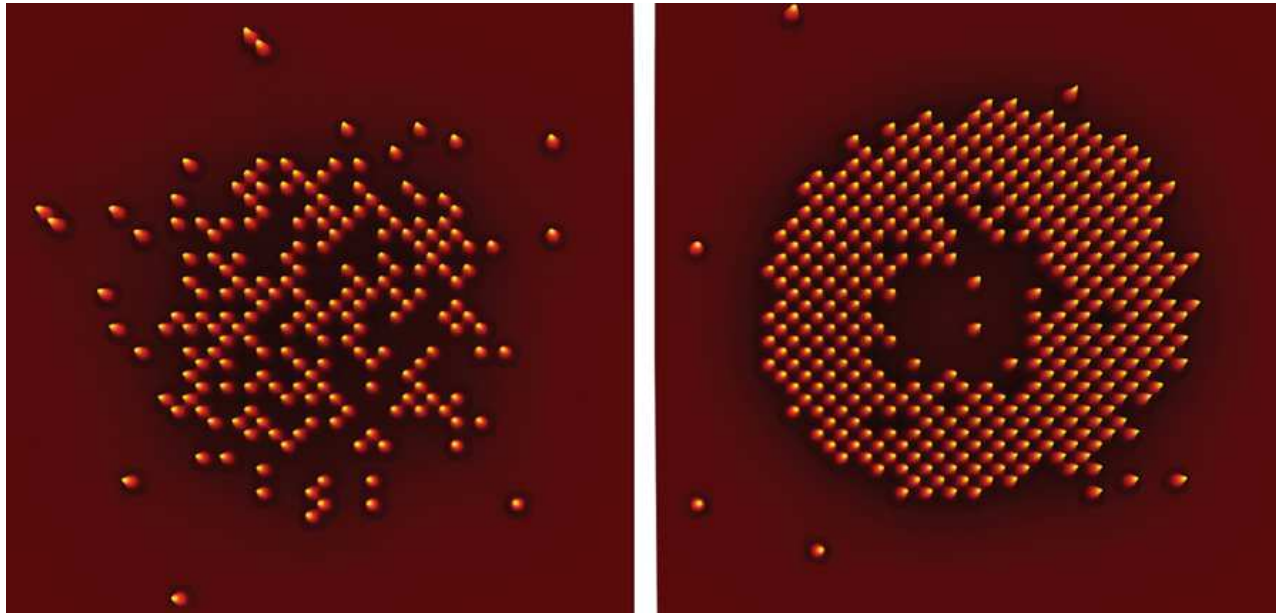


An der UdS: **Prof. A. Schütze, Systems Engineering**
Dr. E. Neu-Ruffing, Physik
Prof. U. Hartmann, Physik

Quantensimulation

Simulation von Quantenmaterialien
mit einzelnen Atomen in einer Lichtfalle

Nature Physics **14**, 1159–1161 (2018)



An der UdS: **Prof. G. Morigi, Physik**

Die Sichtweise des Physikers:

- Verständnis & Kontrolle von Quantensystemen
- Messungen an den fundamentalen = quantenphysikalischen Grenzen von Empfindlichkeit und Auflösung
- Verständnis und Nutzung des quantenmechanischen Zufalls
- Brücke von der Mikro-/Nano- in die Makro-Welt

Die Sichtweise des Ingenieurs:

- Design und Fabrikation von kontrollierbaren Quantensystemen
- Erweiterung und Anwendung klassischer Technologien (Elektronik, Hochfrequenztechnik, Mess- und Regelungstechnik, etc.) auf Quantensysteme
- Sensoren und Messsysteme mit integrierten Quantenstandards
- Integrierte Systeme zur Anregung, Kontrolle und zum Auslesen von Quantenzuständen

Studienmotivation:

- Faszination der **Quantenwelt** und der **Technologie**
- Das Studium kombiniert
 - den ingenieurwissenschaftlichen Ansatz (Problemlösungs-orientiert)
 - den naturwissenschaftlichen Ansatz (Erkenntnis-orientiert)

Alleinstellung:

- Anwendungsorientierte Wissenschaft
- Ausrichtung auf das Zukunftsfeld **Quantentechnologie**
- Hochattraktives Berufsbild in der High-Tech-Industrie

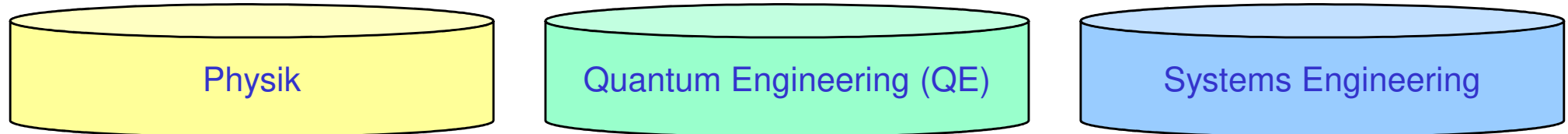
Der Studiengang QE: Das Konzept

Dr. rer. nat.

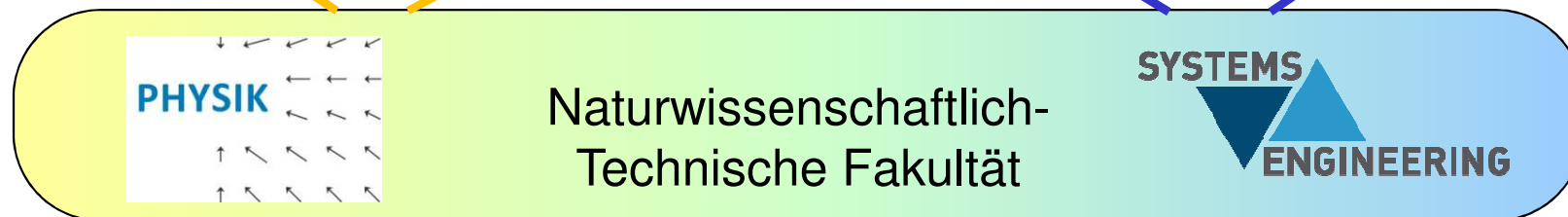
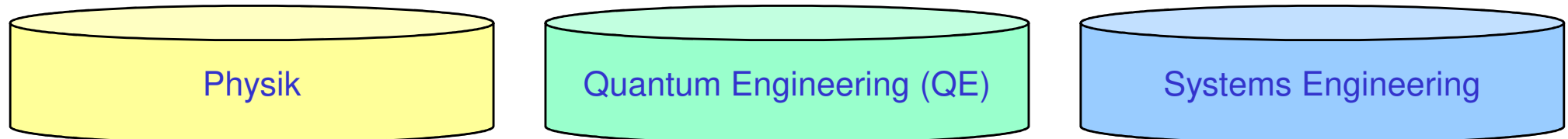
Promotion

Dr.-Ing.

Master (Regelstudienzeit 4 Semester): Ziel des Universitätsstudiums, Befähigung zur Promotion



Bachelor (Regelstudienzeit 6 Semester): erster Abschluss & Drehscheibe im Studium



Bachelor of Science (BSc)

- sechs Semester Regelstudiendauer
- Kombination Physik und Systems Engineering mit Fokus Elektronik
- stark strukturierte Grundlagenausbildung in Theorie und Praxis
- zusätzlich: Studium Generale (z.B. Sprachen, BWL, Patentrecht) oder Tutortätigkeit
- Abschluss: Bachelorarbeit (Projektarbeit im Labor), Dauer ca. 3 Monate

→ **Detaillierter Studienplan mit Pflicht- und Wahlbereichen im Anhang !**

Master of Science (MSc, *wird 2020 eingerichtet*)

- vier Semester Regelstudiendauer
- gestaltbar für individuelle Vertiefung und Schwerpunktsetzung
- Pflichtbereich ca. 1/3 inkl. Laborpraktika
- Wahlpflicht ca. 1/4, (auch Soft Skills, Patentrecht, Teamprojekte ...)
- Abschluss: Laborprojekt und Masterarbeit (Projektarbeit im Labor), Dauer ca. 9 Monate

→ **Nach dem BSc auch Wechsel zu MSc Physik oder Systems Engineering möglich.**



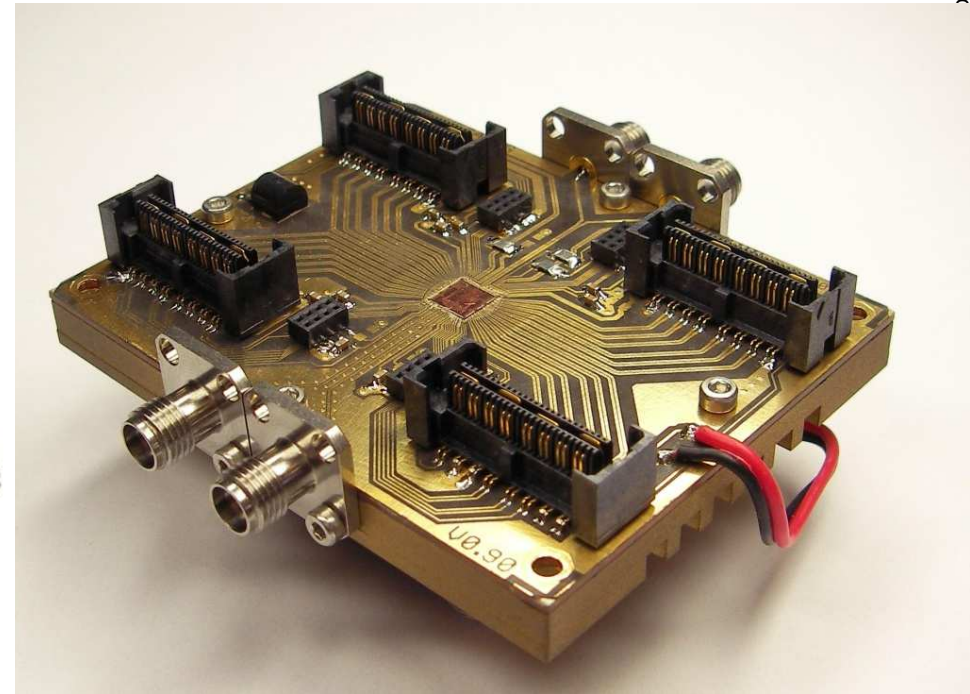
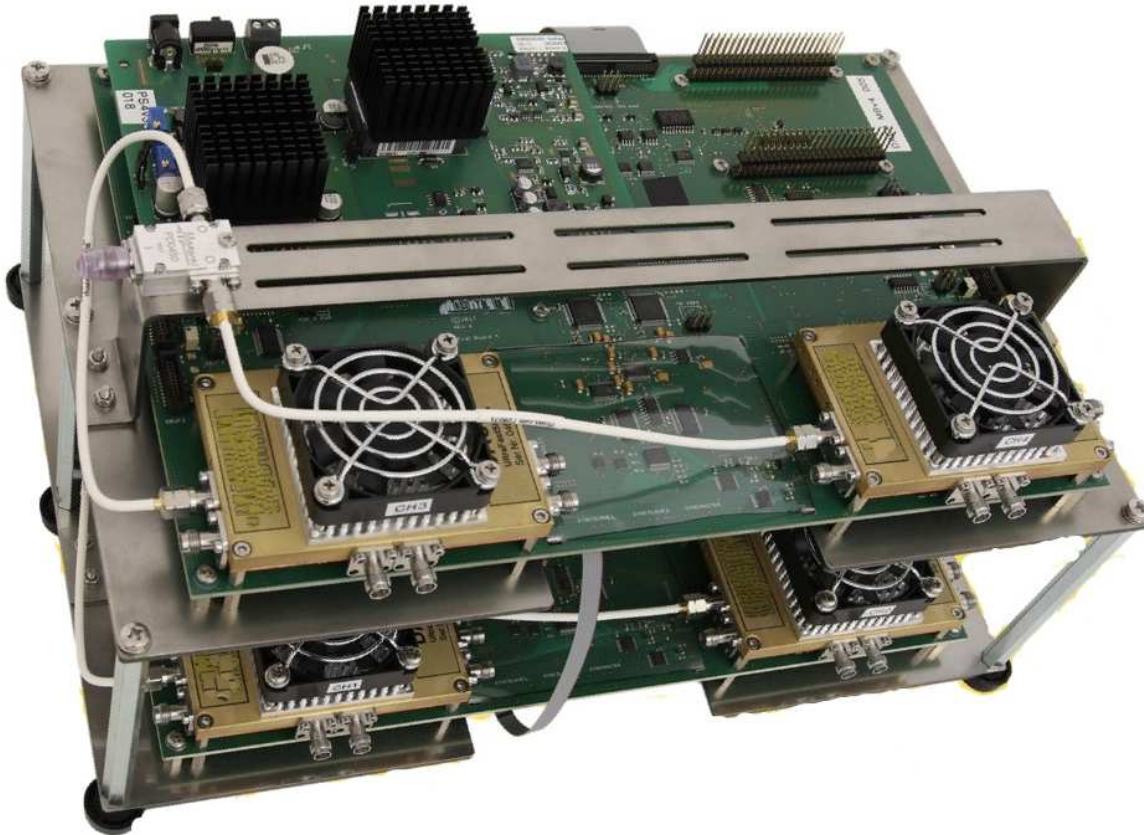
High-Tech-Industrie

- Forschung, Entwicklung und Fertigung z.B. in
Optik / Photonik / Laser
Elektronik / Mikroelektronik / Chipfertigung
Materialien / Sensoren / Nanotechnologie
Informatik / Datenverarbeitung

Forschungsinstitute und Universitäten

- Grundlagenforschung in Physik, Mathematik, Informatik
- Angewandte Forschung in Systems Engineering, Materialwissenschaften

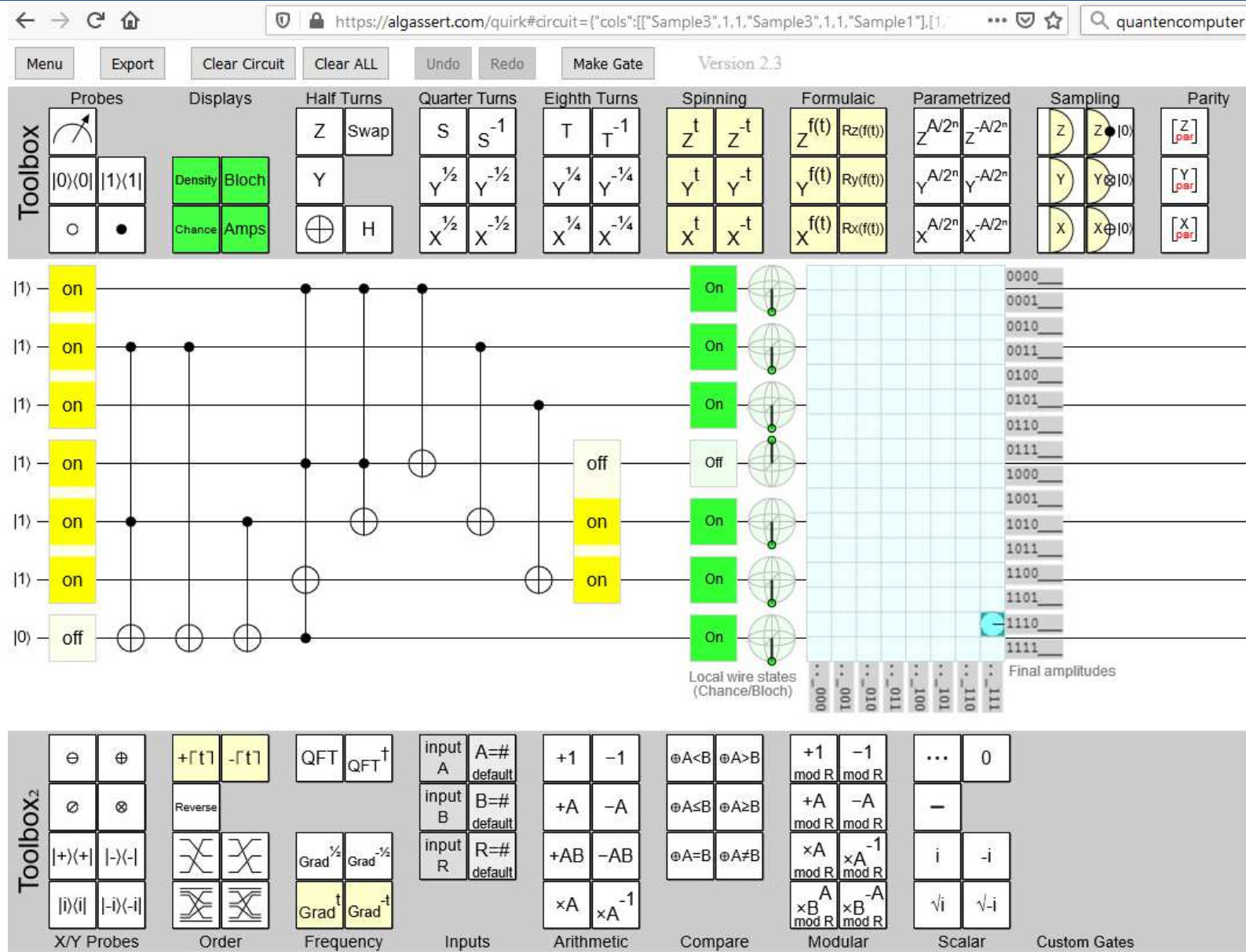




Vier der derzeit weltweit schnellsten, im Femtosekunden Bereich synchronisierten, Analog/Digital- und Digital/Analog-Wandler mit Abtast-Raten über jeweils 100 GS/s zum Anregen und Auslesen von Quanten-Signalen.

<https://www.idquantique.com/ran>

Programmieren für QT





Es gibt bereits erste Armbanduhren auf der Basis von Chip-Scale Atomic Clocks.

Zufallsgeneratoren auf der Basis von Quantenmessungen können für Nachrichtenverschlüsselung (und Internet-Casinos) verwendet werden.



- **Quantenphysik und Technologie**
aus der Sicht der Physiker und der Ingenieure
 - Naturwissenschaft und/oder Ingenieurwissenschaft:
Vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten und Perspektiven
für (z.B. noch unentschlossene) MINT-Interessierte
 - Lernen in kleinen Teams mit individueller Betreuung
 - Im Rahmen des Studiums
 - Im Rahmen internationaler Forschung (*)
- (*) Quantentechnologien sind nationaler und europäischer Forschungsschwerpunkt
- Hervorragende Jobaussichten in der High-Tech-Industrie

Weitere Infos im Web:

- www.uni-saarland.de oder www.physik.uni-saarland.de oder www.se.uni-saarland.de

Zentrale Studienberatung:

- **Campus Center**, Tel. 0681 302-7117
Email: mint-studienberatung@uni-saarland.de

Studienfachberatung:

- Physik: **Prof. Dr. Jürgen Eschner**
Gebäude E2 6, Zi. 3.02, Tel. 58016, 58017
Email: juergen.eschner@physik.uni-saarland.de
- Systems Engineering: **Prof. Dr. Andreas Schütze**
Gebäude A5 1, Zi. 2.33, Tel. 4663
Email: schuetze@LMT.uni-saarland.de

z.B.

- [Prüfungsordnung](#)
- [Studienordnung](#)
- [Studienplan](#)
- [Modulhandbuch](#)
- [Richtlinien für das
Industriepraktikum](#)

Fachschaft Physik:

- fachschaft.stud.uni-saarland.de/physik

**Flyer unter
diesem Link**

https://www.uni-saarland.de/fileadmin/upload/fachrichtung/physik/Studium/Quantum_Engineering/Flyer_QE_UdS.pdf



Bachelor Quantum Engineering



[Quantentechnologien.de](https://www.quantentechnologien.de)

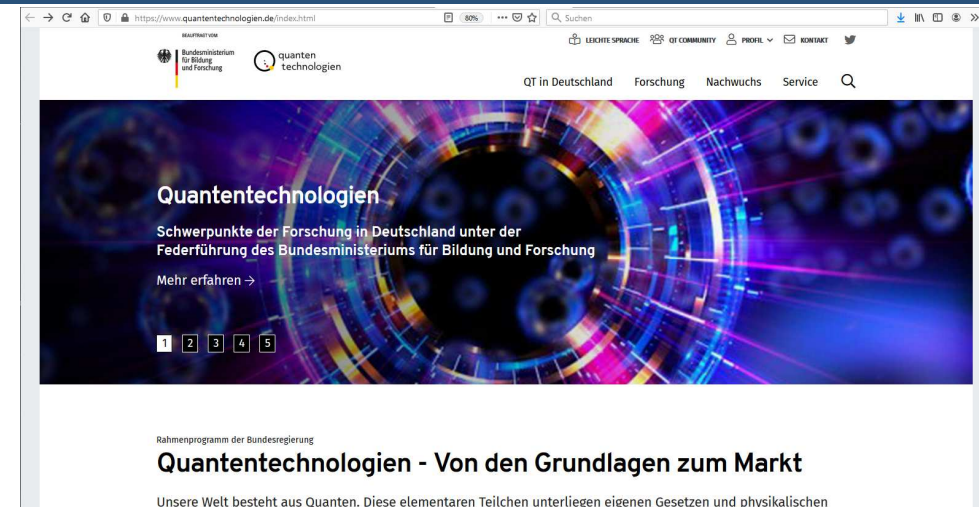


[Welches Studium passt zu mir?](https://www.uni-saarland.de/start.html)

www.uni-saarland.de/start.html

[Bachelor Quantum Engineering](https://www.uni-saarland.de/studium/angebot/bachelor/quantum-engineering.html)

[www.uni-saarland.de/studium/angebot/bachelor/
quantum-engineering.html](https://www.uni-saarland.de/studium/angebot/bachelor/quantum-engineering.html)



[Master Quantum Engineering](https://www.uni-saarland.de/studium/angebot/master/quantum-engineering.html)

[www.uni-saarland.de/studium/angebot/master/
quantum-engineering.html](https://www.uni-saarland.de/studium/angebot/master/quantum-engineering.html)



Bachelor Quantum Engineering

Detaillierter Studienplan mit Pflicht- und Wahlbereichen

Tabelle III: Experimentalphysikalische Grundlagen für Quantentechnologien – 33 Credit Points, davon mind. 19 CP benotet*

Modul	RS	Element	Zyklus	LV	SWS	CP	Note	Prüfungsart
Experimentalphysik I	1	Mechanik, Schwingungen und Wellen	WS	V/PÜ/Ü	6/2	10	B	Schriftl. od. mündl. /PVL
Experimentalphysik II	2	Elektromagnetismus	SS	V/Ü	4/2	8	B	Schriftl. od. mündl. /PVL
Experimentalphysik IIIa	3	Optik, Thermodynamik	WS	V/Ü	3/1	5	B	Schriftl. od. mündl. /PVL
Experimentalphysik IIIb	4	Quantenphysik, Atomphysik	SS	V/Ü	4/1	6	B	Schriftl. od. mündl. /PVL
Experimentalphysik IVa	5	Festkörperphysik I	WS	V/Ü	2/1	4	B	Schriftl. od. mündl. /PVL

Tabelle IV: Theoretische Physik – 16 Credit Points, davon mind. 8 CP benotet*

Modul	RS	Element	Zyklus	LV	SWS	CP	Note	Prüfungsart
Theoretische Physik II	3	Elektrodynamik	WS	V/Ü	4/2	8	B	Schriftl. od. mündl.
Theoretische Physik III	4	Quantenphysik	SS	V/Ü	4/2	8	B	Schriftl. od. mündl.

Tabelle V: Physikalische Wahlpflicht – benotet, mind. 5 Credit Points*

Modul	RS	Element	Zyklus	LV	SWS	CP	Note	Prüfungsart
Nanostrukturphysik I	5		WS	V/Ü	4/0	5	B	Schriftl. od. mündl.
Einführung in die Quanten- informationsverarbeitung	5		SS	V/Ü	3/1	5	B	Schriftl. od. mündl.

Tabelle VII: Ingenieurwissenschaftliche Grundlagen für Quantentechnologien – 43 Credit Points, davon mind. 25 CP benotet*

Modul	RS	Element	Zyklus	LV	SWS	CP	Note	Prüfungsart
Grundlagen der Elektrotechnik I	1		WS	V/Ü	2/1	5	B	Schriftl. od. mündl.
Grundlagen der Elektrotechnik II	2		SS	V/Ü	2/1	5	B	Schriftl. od. mündl.
Mikrotechnologie	1		WS	V/Ü	2/1	4	B	Schriftl. od. mündl.
Elektronik	3	Physikalische Grundlagen	WS	V/Ü	4	6	B	Schriftl. od. mündl.
Schaltungstechnik	4		SS	V/Ü	4	6	B	Schriftl. od. mündl.
Messtechnik und Sensorik	4		SS	V/Ü	2,5/1,5	6	B	Schriftl. od. mündl.
Theoretische Elektrotechnik 1	4		SS	V/Ü	2,5/2	6	B	Schriftl. od. mündl.
Theoretische Elektrotechnik 2	5		WS	V/Ü	2/2	5	B	Schriftl. od. mündl.

Tabelle VIII: Ingenieurwissenschaftliche Wahlpflicht – benotet, mind. 6 Credit Points, mind. 2 Veranstaltungen

Modul	RS	Element	Zyklus	LV	SWS	CP	Note	Prüfungsart
Elektronik	5	Bauelemente	WS	V/Ü	2/1	3	B	Schriftl. od. mündl.
Elektronische Systeme	5		WS	V/Ü	1,5/0,5	3	B	Schriftl. od. mündl.
Mikroelektronik 1	5		WS	V/Ü	2/1	4	B	Schriftl. od. mündl.
Mikroelektronik 2	4		SS	V/Ü	2/1	4	B	Schriftl. od. mündl.
Aufbau- und Verbindungstechnik 1	5		WS	V/Ü	2/1	4	B	Schriftl. od. mündl.
Einführung in die Materialwissenschaft	5		WS	V/Ü	2/3	6	B	Schriftl. od. mündl. /PVL

Tabelle VI: Physikalische Praktika – mind. 11 Credit Points, unbenotet

Modul	RS	Element	Zyklus	LV	SWS	CP	Note	Prüfungsart
Grundpraktikum für Quantum Engineering (mind. 5 CP)	3	Phys. Grundpraktikum (GP Ia)	WS	P+S	1	2	U	Schriftl. od. mündl.
	4	Phys. Grundpraktikum (GP Ib)	SS	P+S	3	5	U	Schriftl. od. mündl.
Fortgeschrittenenpraktikum für Quantum Engineering I	6		SS	P	3	6	U	Schriftl. od. mündl.

Tabelle IX: Ingenieurwissenschaftliche Praktika – mind. 6 Credit Points

Modul	RS	Element	Zyklus	LV	SWS	CP	Note	Prüfungsart
Ingenieurwissenschaftliche Praktika	5	Praktikum Grundlagen der Elektrotechnik	WS	P	2	3	U	Schriftl. od. mündl.
	6	Praktikum Schaltungstechnik	SS	P	2	3	U	Schriftl. od. mündl.
	6	Ing.-wiss. Projektseminar	SS	PS	2-4	2-4	U	Schriftl. od. mündl.
	6	Mikroelektronik-Praktikum (FPGA-Programmierung)	SS	P	4	4	U	Schriftl. od. mündl.

Tabelle I: Mathematische Grundlagen – 25 Credit Points, davon mind. 16 CP benotet*

Modul	RS	Element	Zyklus	LV	SWS	CP	Note	Prüfungsart
Theoretische Physik Ia	1	Theoretische Physik Ia: Rechenmethoden der Mechanik	WS	V/Ü	3/2	7	B	Schriftl. od. mündl./PVL
Höhere Mathematik für Ingenieure 2	2		SS	V/Ü	4/2	9	B	Schriftl. od. mündl. /PVL
Höhere Mathematik für Ingenieure 3	3		WS	V/Ü	4/2	9	B	Schriftl. od. mündl. /PVL

Tabelle II: Allgemeine Grundlagen – 10 Credit Points, davon 5 CP benotet

Modul	RS	Element	Zyklus	LV	SWS	CP	Note	Prüfungsart
Ringvorlesung	1	Perspektiven des Quantum Engineering	WS	V	2	2	U	Schriftlich
Programmieren für Ingenieure	2	Programmieren für Ingenieure	SS	V/Ü	2/1	5	B	Schriftl. od. mündl. /PVL
P ³ : ProgrammierPraxisProjekt	5	Projekt Programmieren für Ingenieure	SS	P	2	3	U	Schriftl. od. mündl. /PVL

Tabelle X: Module der Kategorie Freie Wahlpflicht (es können max. 7 CP angerechnet werden)

	RS	Modul	Zyklus	LV	SW S	CP	Not e	Prüfungsart
Erweiterte Grundlagen	6	Stochastische Bewertungsmethoden in der Technik	SS	V/Ü	2/1	4	B	Schriftl. od. mündl.
	6	Effizientes Lernen/Wissenschaftliche Darstellung	WS	S	2	2	U	Schriftl. od. mündl.
	6	Allgemeine Chemie	WS	V/Ü	2/1	4	B	Schriftl. od. mündl. /PVL
Studium generale	6	z.B. Sprachkurse	WS/SS	Ü	1	3	U	Schriftl. od. mündl.
	6	z.B. BWL,	WS/SS	V	2	2	U	Schriftl. od. mündl.
		z.B. Unternehmensgründung	SS	V/Ü	2	2	U	Schriftl. od. mündl.
		z.B. Patent- und Innovationsmanagement	WS	V	2	3	U	Schriftl. od. mündl.
	6	Schlüsselkompetenzen gem. §9 der PO (max. 3 CP)	WS/SS	V/Ü		max. 3	U	Schriftl. od. mündl.
	6	Tutortätigkeit (max. 4 CP)	WS/SS	Ü	1-2	2-4	U	Schriftl. od. mündl.
Fachliche Erweiterung und Vertiefung	6	weitere Lehrveranstaltungen der Physik und Ingenieurwissenschaften	WS/SS	V			B	Schriftl. od. mündl.
	6	Seminare, Projektseminare und Praktika der Ingenieurwissenschaften	WS/SS	V			B	Schriftl. od. mündl.
	6	weitere Versuche im physikalischen Grund- oder Fortgeschrittenenpraktikum	WS/SS	P			U	Schriftl. od. mündl.
	6	Industriepraxis Elektro- und Informationstechnik	WS/SS	P		max. 6	U	Schriftl. und mündl.
Vom Prüfungsausschuss genehmigte Lehrveranstaltungen gemäß §6 Abs. 6								

Tabelle XI: Abschlussarbeit – 18 Credit Points

Modul	RS	Element	Zyklus	LV	SWS	CP	Note	Prüfungsart
Bachelor-Seminar	6		WS+SS	S		6	B	Schriftl. o. mündlich
Bachelor-Arbeit	6		WS+SS			12	B	Arbeit

Master Quantum Engineering

Detaillierter Studienplan mit Pflicht- und Wahlbereichen

Anhang A: Module und Modulelemente

Die Tabellen dieses Anhangs verwenden folgende Abkürzungen:

RS	Regelstudiensemester	LV	Lehrveranstaltungsart	P	Praktikum	B	benotet
CP	Workload in Credit Points	V	Vorlesung	PS	Projektseminar	U	unbenotet
SWS	Semesterwochenstunden	Ü	Übung	PVL	Prüfungsvorleistungen	W	wahlweise B o. U
WS	Wintersemester	PR	Projekt	SP	schriftliche Prüfung		
SS	Sommersemester	S	Seminar	MP	mündliche Prüfung		

Tabelle 2: Module der Kategorie Kernbereich Systems Engineering (mind. 16 CP, mind. 3 Veranstaltungen)

Modul	RS	Zyklus	LV	SWS	CP	Note	Prüfung
Advanced Electronic Packaging	2	SS	V+Ü	3	4	B	SP/MP/PVL
Microelectronics 2	2	SS	V+Ü	3	4	B	SP
Digital Transmission, Signal Processing (Telecommunications I)	3	WS	V+Ü	6	9	B	SP/MP/PVL
Microsensors	3	WS	V+Ü	3	4	B	SP/MP/PVL
High Frequency Engineering	3	WS	V+Ü	3	4	B	SP/MP/PVL
Antenna Theory 1	3	WS	V+Ü	3	5	B	MP

Tabelle 3: Module der Kategorie Kernbereich Quantenphysik (mind. 16 CP)

Modul	RS	Zyklus	LV	SWS	CP	Note	Prüfung
Theoretische Physik IV für QE	1	WS	V+Ü	6	6 o. 8	B	SP/MP/PVL
Theoretical Physics V for QE	2	SS	V+Ü	6	4 o. 8	B	SP/MP
Solid State Physics II	2	SS	V+Ü	3	4	B	SP/MP
Physics of Atoms and Molecules	1	WS	V+Ü	3	4	B	SP/MP
Quantum and Modern Optics*	3	WS	V+Ü	4	5	B	MP
Physics of Nanostructures II a/b	2	WS/SS	V+S	4	5	B	MP

* = von diesen Modulen kann eine im Kernbereich, die anderen (siehe Tab. 4) ggf. in der fachspezifischen Wahlpflicht eingebracht werden

Tabelle 4: Module der Kategorie Fachspezifische Wahlpflicht (mind. 16 CP)

Modul	RS	Zyklus	LV	SWS	CP	Note	Prüfung
Multisensorsignalverarbeitung	2	SS	V+S	3	4	B	MP
Mikroelektronik 3	3	WS	V+Ü	3	4	B	MP
Mikroelektronik 4	2	SS	V+Ü	3	4	B	MP
Computational Electromagnetics 1	1	WS	V+Ü	3	4	B	SP+MP
Computational Electromagnetics 2	2	SS	V+Ü	3	4	B	MP
High Speed Electronics	2	SS	V+Ü	3	4	B	SP/MP/PVL
Zuverlässigkeit 1	3	WS	V+Ü	3	4	B	SP/MP
Nanomechanik	2	alle 2 Jahre	V+S	4	5	B	SP/MP
Quantentheorie des Lichts*	2	alle 2 Jahre	V+S	4	5	B	SP/MP
Teilchenfallen und Laserkühlung*	2	alle 2 Jahre	V+Ü	4	5	B	SP/MP
Computerphysik	2	alle 2 Jahre	V+Ü	4	5	B	SP/MP
Theoretische Physik für Quantentechnologien	2	alle 2 Jahre	V+Ü	4	5	B	SP/MP
Zusätzlich:							
- Weitere Module aus den Kernbereichen Quantenphysik und Systems Engineering							
- Vom Prüfungsausschuss genehmigte Informatikveranstaltungen							
- Vom Prüfungsausschuss genehmigte Module gemäß §6 Absatz 5							

* = von diesen Modulen kann eine im Kernbereich, die anderen (siehe auch Tab. 3) ggf. in der fachspezifischen Wahlpflicht eingebracht werden

Tabelle 5: Module der Kategorie Fachspezifische Seminare (max. 4 CP) und Praktika und Projektseminare (in Summe mind. 9, max. 12 CP)

Modul	RS	Zyklus	LV	SWS	CP	Note	Prüfung
Physics or System Engineering Seminars						B	
Physikalisches Fortgeschrittenenpraktikum IIa für QE	1	WS	P+S	4	7	B	MP
Physikalisches Fortgeschrittenenpraktikum IIb für QE	2	SS	P+S	2	4	B	MP
Praktikum Mikroelektronik (FPGA)**	3	WS	PS	4	4	B	SP/MP
Mikrocontroller-Projektseminar**	3	WS	PS	2	3	B	SP/MP
Team Project (small)	3	WS/SS	PS	3	3	B	SP/MP
Team Project (large)	3	WS/SS	PS	6	6	B	SP/MP

** = diese Module können nur eingebracht werden, wenn das Modul noch nicht im Bachelor-Studiengang eingebracht wurde

Tabelle 6: Allgemeine Wahlpflicht (max. 15 CP, davon mind. 6 CP benotet)

Modul	Modulelement	RS	Zyklus	LV	SWS	CP	Note	Prüfung
Höhere Mathematik IV (a+b)		2	SS	V+Ü	6	9	B	SP/MP/PVL
Kontinuumsmechanik		3	WS	V+Ü	3	4	B	SP/MP
Finite Elemente in der Mechanik		2	SS	V+Ü	3	4	B	SP/MP
Empirische und statistische Modellbildung		2	SS	V+Ü	3	4	B	SP/MP/PVL
Studium generale, z.B.	z.B. Patent- und Innovationsmanagement, Technologiemanagement, Projektmanagement*		WS/SS	V+Ü			U	SP/MP/PVL
	Lebende Sprache*		WS/SS	V+Ü			U	SP/MP/PVL
	z.B. Einführung in die BWL, Unternehmensgründung*		WS/SS	V+Ü			U	SP/MP/PVL
	Schlüsselkompetenzen gem. §9 der PO (max. 3 CP)					max. 3	U	SP/MP/PVL
Alle nicht belegten Module der Kategorien Kernbereich SE/Physik oder fachspezifische Wahlpflicht			WS/SS				B	SP/MP/PVL
Industrial Internship			WS/SS	P		max. 9	U	SP/MP/PVL
Tutortätigkeit			WS/SS	P		2 pro SWS, max. 4	U	SP/MP/PVL
Research Seminar			WS/SS	PR		9	U	SP/MP/PVL
Project Seminar			WS/SS	PS		6	B	SP/MP/PVL

*Konkrete Veranstaltungen nach Zustimmung durch den Prüfungsausschuss.

Tabelle 7: Laborprojekt und Master-Arbeit

Modul	Modulelement	RS	Zyklus	LV	SWS	CP	Note	Prüfung
Laboratory Project		3	WS/SS	PR		15	U	SP und MP
Master's Thesis		4	WS/SS	MA		30	B	SP und MP