



Mit Quantengattern spielen

Die App QuantumVR erlaubt es, spielerisch Quantengatter zu erkunden und kleine Quantenalgorithmen zu erstellen.

Franziska Greinert, Tobias Voß, Rainer Müller und Linus Krieg

Im Projekt QuantumVR entsteht ein VR-Spiel für den Einstieg in die gatterbasierte Quantenprogrammierung zum Einsatz bei Outreach-Events. Bei dem Spiel mit Escape-Room-Elementen in virtueller Realität (VR) gilt es, kurze Quantenalgorithmen durch Platzieren einfacher Quantengatter zu lösen und damit Tiere zu befreien – ganz ohne Vorkenntnisse in Quantenmechanik.

Die Quantentechnologie gilt als eine der künftigen Schlüsseltechnologien [1]. Die Entwicklung der entsprechenden Hardware wird auf nationaler und europäischer Ebene mit großen Förderprogrammen vorangetrieben. Um die neuen Technologien tatsächlich nutzen zu können, ist es aber essenziell, auch an die Ausbildung der benötigten Fachkräfte zu denken. Bereits heute ist ein gravierender Fachkräftemangel zu spüren, der sich über die kommenden Jahre voraussichtlich weiter verschärfen wird. Umso wichtiger ist es, das Thema Quantentechnologien in der Ausbildung voranzutreiben – und zwar nicht nur an den Universitäten, etwa durch neue Masterstudiengänge. Die motivierende Wirkung, die von der aktuellen Berichterstattung über die Entwicklung von Quantencomputern in den Medien ausgeht, kann helfen, um Schülerinnen und Schüler gezielt anzusprechen und mit dieser Thematik das Interesse für ein Physikstudium zu wecken. International wurde in den letzten Jahren bereits eine Reihe spielerischer Ansätze zu Quantentechnologien entwickelt [2].

Darüber hinaus muss es ein Anliegen der Wissenschaft sein, interessierten Menschen zu ermöglichen, die Grundzüge der Technologie und ihre Folgen zu verstehen,

einzuordnen und zu bewerten. Nur so ist es möglich, zu einer reflektierten gesellschaftlichen Debatte über das Zukunftspotenzial der Quantentechnologien zu gelangen. Dies eröffnet zudem die Möglichkeit, eventuellen Vorbehalten gegenüber dieser neuen Technologie zu begegnen. Das Projekt QuantumVR, das im Rahmen der BMBF-Initiative „Quantum aktiv“ gefördert wurde, setzt hier an und will einen spielerischen Zugang zu dieser Thematik bieten [3]. Ein Virtual-Reality-Spiel soll das Interesse an Quantentechnologien wecken und erste Einblicke in Quantenprogrammierung geben. Die spielende Person erstellt mit vorgegebenen Quantengattern einfache Quantenalgorithmen, um einen vorgegebenen Zielzustand zu erreichen.

Die Grundidee der Quantenprogrammierung

Den theoretischen Hintergrund der QuantumVR-App bildet die Manipulation von Qubits mithilfe von Quantengattern [4]. Qubits zeichnen sich dadurch aus, dass sie nicht nur die Zustände $|0\rangle$ und $|1\rangle$ einnehmen können, sondern auch alle Superpositionen daraus:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (1)$$

mit $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. Abstrakt lässt sich die Manipulation der Qubits durch Gatteroperationen beschreiben. Hierfür stehen unterschiedliche Quantengatter zur Verfügung. Drei der prominentesten und auch in der aktuellen Version der QuantumVR-App genutzten Quantengatter sind das X-, das Hadamard- und das CX-Gatter.

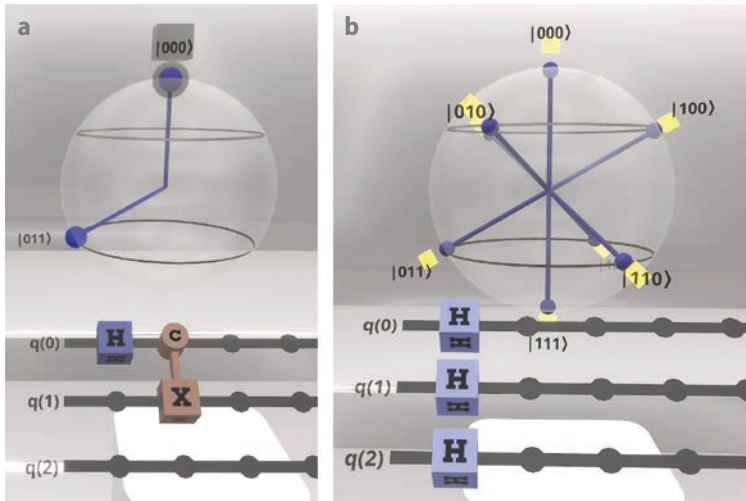


Abb. 1 Auf der Q-Sphere lässt sich der gemeinsame Zustand mehrerer Qubits visualisieren, beispielsweise ein verschränkter Zustand mit dem zugehörigen Quantenalgorithmus (a) und die gleichmäßige Überlagerung aller Basiszustände (b).

Das **X-Gatter** (mathematisch dargestellt durch die Pauli-Matrix σ_x) vertauscht die beiden Basiszustände des Qubits $|0\rangle$ und $|1\rangle$. Es ist das Quanten-Äquivalent zum klassischen NOT-Gatter. Angewandt auf den Ausgangszustand aus (1) ergibt sich

$$|\psi_{\text{out}}\rangle = X|\psi\rangle = \alpha|1\rangle + \beta|0\rangle.$$

Während sich das X-Gatter für die Basiszustände $|0\rangle$ und $|1\rangle$ noch gut klassisch erfassen lässt, ist das Hadamard-Gatter (**H-Gatter**) ein typisches Quantengatter: Wirkt ein Hadamard-Gatter auf einen der Basiszustände $|0\rangle$ und $|1\rangle$, erzeugt es einen Überlagerungszustand:

$$H|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \text{ bzw. } H|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle).$$

Das Controlled-X-Gatter (CX-Gatter) ist ein Zwei-Qubit-Gatter. Je nach Zustand des Kontroll-Qubits wirkt auf das zweite Qubit ein X-Gatter – oder nicht. Mit $CX_{(0,1)}$ wird das CX-Gatter bezeichnet, bei dem $q(0)$ das Kontroll-Qubit ist und $q(1)$ das Ziel-Qubit, die Notation ist $CX_{(\text{Kontroll, Ziel})}$. Befindet sich das Kontroll-Qubit im Zustand $|1\rangle$, wirkt am anderen Qubit ein X-Gatter, so ergibt sich für den Zustand $|q(1), q(0)\rangle = |01\rangle$ zum Beispiel:

$$CX_{(0,1)}|01\rangle = |11\rangle.$$

Ist das Kontroll-Qubit im Zustand $|0\rangle$, bleibt das andere Qubit unverändert. So ergibt sich für den Zustand $|10\rangle$ bei gleichem Kontroll- und Ziel-Qubit:

$$CX_{(0,1)}|10\rangle = |10\rangle.$$

Wirkt das CX-Gatter auf einen Zustand, bei dem sich das Kontroll-Qubit in einem Überlagerungszustand befindet, lassen sich die beiden Qubits verschränken. Sind die beiden Qubits im Ausgangszustand $|00\rangle$ und wird ein H-Gatter auf das nullte Qubit angewandt, ergibt sich der Zustand

$$H_0|00\rangle = |0\rangle \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |01\rangle).$$

Ein CX-Gatter mit dem nullten Qubit als Kontroll- und dem ersten Qubit als Ziel-Qubit macht daraus

$$CX_{(0,1)}H_0|00\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle).$$

Dieser Zustand ist einer der vier Bell-Zustände, die maximal verschränkt sind.

Zustände mit mehreren Qubits lassen sich mit einer Q-Sphere visualisieren [5]. Diese von IBM entwickelte Darstellung kommt insbesondere in der frei verfügbaren, grafischen Programmieroberfläche „IBM Quantum Composer“ zum Einsatz. Ähnlich wie bei der Bloch-Kugel werden Zustände durch Vektoren auf der Kugeloberfläche visualisiert (**Abb. 1**). Während die Bloch-Kugel den Zustand eines einzelnen Qubits illustriert, lässt sich mittels Q-Sphere der gemeinsame Zustand mehrerer Qubits und damit ein verschränkter Zustand visualisieren. Mehrere Vektoren, die auf die beteiligten Basiszustände weisen, stellen hierbei Überlagerungen dar. Die Anteile in diesen Basiszuständen sind als Wahrscheinlichkeiten über die Größe der Vektorköpfe gezeigt. Die Farbe der Vektoren markiert Phasenverschiebungen. **Abb. 1** zeigt zwei Q-Sphere-Darstellungen aus QuantumVR: für den verschränkten Zustand $CX_{(0,1)}H_0|000\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|000\rangle + |011\rangle)$ und für den Zustand dreier Qubits, die jeweils durch ein H-Gatter überlagert wurden. Sie befinden sich im Zustand

$$\begin{aligned} H_2H_1H_0|000\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \\ &= \frac{1}{2^{3/2}}(|000\rangle + |001\rangle + |010\rangle + |011\rangle + |100\rangle + |101\rangle \\ &\quad + |110\rangle + |111\rangle). \end{aligned}$$

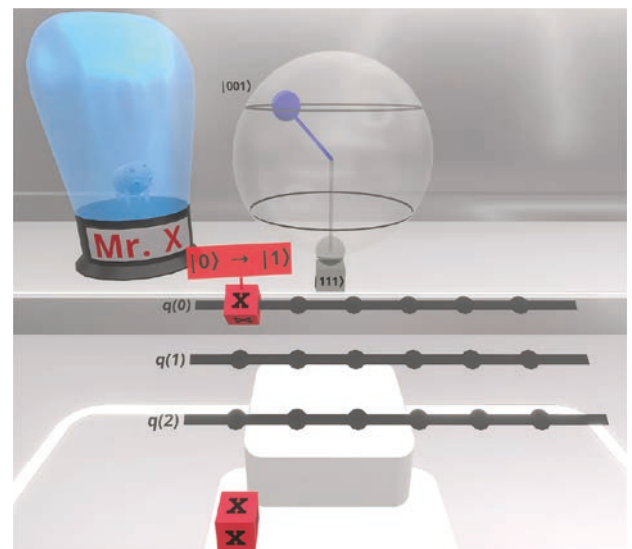


Abb. 2 Im ersten Level gilt es, die drei im Vordergrund gezeigten Qubit-Linien für $q(0)$, $q(1)$ und $q(2)$ zu bestücken. Im nullten Qubit ist bereits ein X-Gatter eingesetzt. Die Q-Sphere zeigt den aktuellen Zustand $|001\rangle$ in Blau und den Zielzustand $|111\rangle$ in Grau. Um den Zielzustand zu erreichen, gilt es, weitere X-Gatter in Form roter Würfel in die anderen beiden Qubit-Linien einzusetzen.

QuantumVR-App

Die QuantumVR-App setzt bei den grundlegenden Quantengattern an. Per Drag-and-Drop gilt es, Quantengatter passend zu platzieren, um einen vorgegebenen Zielzustand auf der Q-Sphere zu erreichen. Ziel des Spiels ist es, verschiedene im Labor gefangene Tiere zu befreien. Ist der passende Quantenalgorithmus gelegt, wird ein Tier befreit oder mit Futter versorgt. Hierbei kommt die virtuelle Realität zum Einsatz, sodass die Quantengatter in Form von Würfeln wortwörtlich zum Anfassen sind.

Der Spaß am Spiel steht im Fokus, dennoch gibt es viel zu lernen: Die einzelnen Level bauen sukzessive aufeinander auf, enthalten tiefergehende Inhalte wie verschränkte Zustände und erlauben es, die Wirkungsweise der Quantengatter zu erlernen und zu verstehen. Das Spiel beginnt in einem Tutorial-Raum, der die Escape-Room-Story zusammenfasst. Das Manipulieren von Qubits erfolgt in drei weiteren Räumen in jeweils drei Levels. Jeder Raum ist einem Quantengatter gewidmet. Der Schwierigkeitsgrad steigt an, weil die Gatter komplexer werden und spätere Levels auch die vorherigen Gatter einbeziehen.

Zunächst befinden sich die Spielenden an einem Kontrollpanel, auf dem drei Qubits einzeln über horizontale Qubit-Linien zu adressieren sind (Abb. 2). Zu Beginn des Spiels geht es darum, den Kater Mr. X zu befreien. Dieser hat, wie auch das Zebra Miss Hadamard und der Hund CC, eine doppelte Funktion: Einerseits motiviert das Befreien der Tiere zum Lösen des Levels. Andererseits bilden die Tiere Lern- bzw. Eselsbrücken für die verwendeten Gatter, mit denen sie verknüpft sind. So wurden die Tiere bewusst aufgrund der Charaktereigenschaften oder ihres Äußeren mit den einzelnen Quantengattern verknüpft.

Der Kater Mr. X steht stellvertretend für das X-Gatter, da er immer das Gegenteil dessen tut, was von ihm erwartet wird – so wie das X-Gatter die Zustände $|0\rangle$ und $|1\rangle$ stets in ihr „Gegenteil“ umwandelt. Für das Hadamard-Gatter bzw. den Überlagerungszustand, den ein H-Gatter erzeugt, steht das Zebra Miss Hadamard (Abb. 3). Aus der Ferne betrachtet ist das Fell des Zebras weder wirklich weiß noch wirklich schwarz. Einzelne Haare sind jedoch klar einer der Farben zuzuordnen („Messung“). Vor der Messung lassen sich nur Wahrscheinlichkeiten angeben, mit denen für das einzelne Haar die Farben Weiß und Schwarz zu erwarten sind. Der Hund CC – Controlled Cat – ist dem CX-Gatter zugeordnet (Abb. 4). Nur auf Kommando, also wenn am Kontroll-Qubit der Zustand $|1\rangle$ vorliegt, wird der Hund aktiv wie der Kater Mr. X bzw. der X-Anteil wirkt nur dann auf das Ziel-Qubit. Ohne Kommando – bei einer $|0\rangle$ am Kontroll-Qubit – bewirkt das Gatter keine Veränderung.

Sollte ein Level ungelöst bleiben, kann die spielende Person es überspringen und das Labor verlassen – allerdings nicht mit allen Tieren. Die letzte Tür führt aus dem Labor hinaus in die farbenfrohe Natur. Der Außenbereich bildet einen starken Kontrast zu den tristen, grauen Laborräumen und verstärkt so das Erfolgserlebnis bei Lösung des Spiels. Auch der Vergleich der eingesperrten Tiere mit den befreiten Tieren (Abb. auf Seite 25) verdeutlicht den Kontrast.

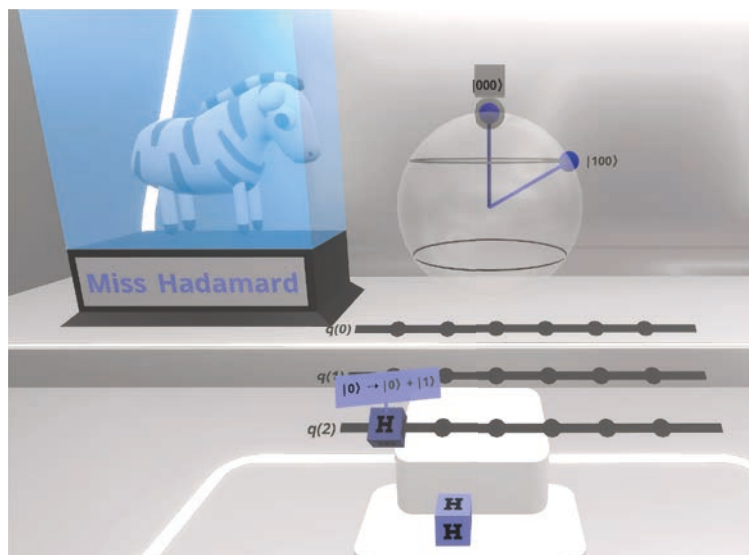


Abb. 3 In Level 4 wird das H-Gatter eingeführt. Die Beschriftung $|0\rangle \rightarrow |0\rangle + |1\rangle$ zeigt, wie das H-Gatter auf ein Qubit im Anfangszustand $|0\rangle$ wirkt. Eine solche Beschriftung existiert auch in den anderen Levels, in denen Gatter eingeführt werden, und lässt sich durch Schütteln der Gatter im Verlauf des Spiels erneut anzeigen.

Themen der einzelnen Levels sind etwa die Selbstinvertiertheit der Quantengatter oder Superpositionen von Zuständen, aber auch tiefergehende Inhalte wie verschränkte Zustände. Das Spiel bleibt bewusst deskriptiv und verzichtet zurzeit auf theoretische Erklärungen. Neben dem Erzeugen von Motivation zielt das Outreach-Spiel darauf ab, ein Gefühl für die Wirkungsweise der Quantengatter bzw. Quantenalgorithmien bei der Zielgruppe zu vermitteln: Jugendlichen ohne Vorerfahrung in der Quantenprogrammierung.

Bereits bei ersten Tests mit einem Prototypen zeigte sich deutlich, dass Erfahrung mit Spielekonsolen für das Zurechtkommen in der virtuellen Umgebung vorteilhaft ist, während Vorwissen zur Quantenphysik keinen merklichen Unterschied brachte. Auch können Zweiertteams das Spiel erfolgreich absolvieren: Während eine Person in VR gespielt hat, hat die andere den Spielverlauf am Bildschirm beobachtet und bei auftretenden Schwierigkeiten beraten.

Bei den bisherigen Erprobungen ist QuantumVR auf großes Interesse gestoßen. Die Befragung von Spielenden bestätigte, dass sie viel Spaß am Spiel hatten. Durch eingebaute Hilfestellungen können sie ohne inhaltlich geschulte Betreuung eigenständig spielen. Besonders positiv nahmen sie neben den Zustandsvisualisierungen die Tiere auf. Das Spiel dauert durchschnittlich ca. 20 Minuten.

Die anvisierten Anwendungen der App finden sich bei Outreach-Aktivitäten und Hochschulinformationstagen. Aktiv genutzt wurde die QuantumVR-App etwa bei der Ideenexpo in Hannover.

Ausblick

Durch die modulare Gestaltung lässt sich die QuantumVR-App leicht an andere Zielgruppen anpassen. Potenzielle Anwendungen finden sich in (Schul-)Workshops, in der universitären Lehre oder bei interessierten Einzelpersonen. Hierfür gibt es zusätzliche Level und weitere Quantengat-

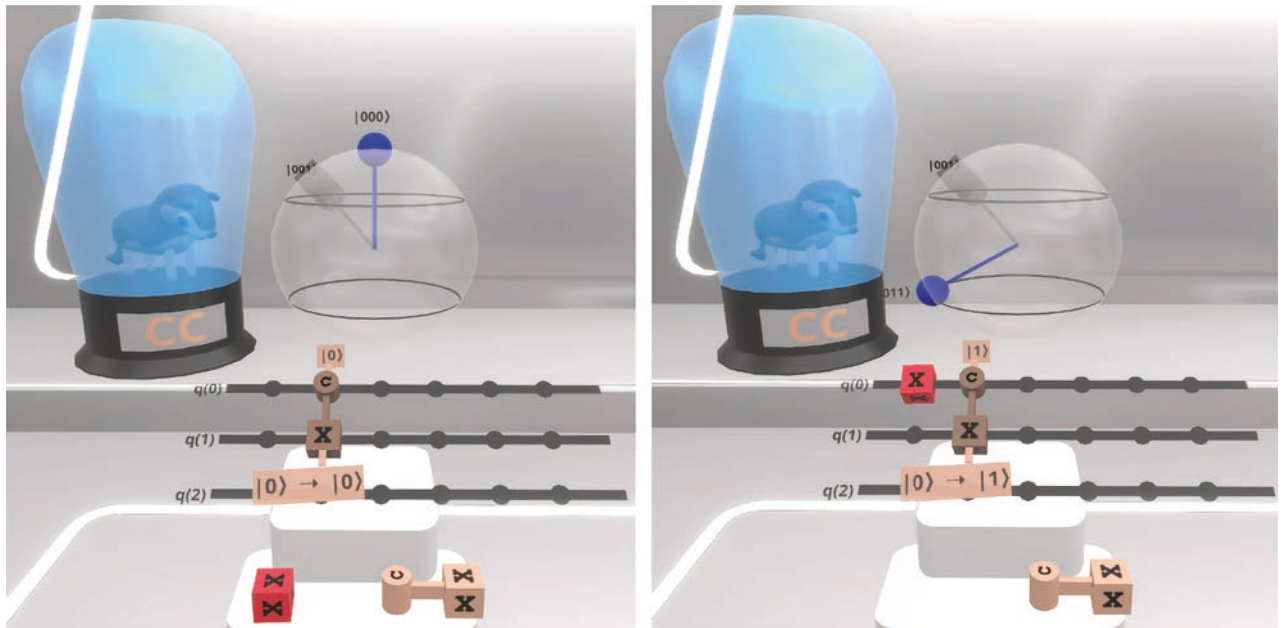


Abb. 4 Level 7 führt das CX-Gatter ein mit der Wirkungsweise ohne (links) und mit (rechts) X-Gatter am Kontroll-Qubit des CX-Gatters.

ter. Aktuell wird an der Entwicklung eines Mehrspielermodus gearbeitet, bei dem zwei Spielende gemeinsam Level mit komplexeren Algorithmen lösen. Dies erfordert eine verstärkte Kommunikation zwischen den Personen, welche ihre Überlegungen in Worte fassen müssen. Dies soll den Lerneffekt verstärken und dazu anregen, sich tiefergehend mit den Inhalten auseinanderzusetzen. Englisch als Sprachoption macht die App auch für Interessierte aus dem internationalen Umfeld anwendbar. Die Veröffentlichung der App ist über die Plattform Steam geplant und soll eine VR- sowie eine herkömmliche Desktopversion beinhalten. Aktuelle Informationen finden sich auf www.quantumfrontiers.de/de/sharing-science/quantumvr.

*

QuantumVR wurde/wird im Rahmen der Förderinitiative „Quantum aktiv“ aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, im Rahmen des DFG-Exzellenzclusters „QuantumFrontiers“ und durch die Projektförderung „Promoting Digital education through Global Interconnection“ der TU Braunschweig gefördert.

Literatur

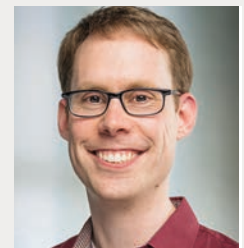
- [1] acatech HORIZONTE: Quantentechnologie, München (2020), acatech.de/publikation/acatech-horizonte-quantentechnologie
- [2] Z. C. Seskir et al., Opt. Eng. **61** (8), 081809 (2022)
- [3] Fördermaßnahme: Quantum aktiv, quantentechnologien.de/forschung/foerderung/quantum-aktiv.html
- [4] R. Müller und F. Greinert, Quantentechnologien für Ingenieure, de Gruyter, Berlin (2023)
- [5] IBM Quantum Composer: Visualizations, quantum-computing.ibm.com/composer/docs/iqux/visualizations

Die Autor:innen



Franziska Greinert (FV Didaktik der Physik und FV Quanteninformatik) promoviert seit 2019 an der TU Braunschweig. Sie ermittelt die Anforderungen an künftige Fachkräfte in den Quantentechnologien und Folgerungen für die Didaktik.

Tobias Voß (FV Halbleiterphysik) ist seit 2014 Professor am Institut für Halbleitertechnik der TU Braunschweig. Er forscht an Nanostrukturen mit verschiedenen Methoden der Laserspektroskopie und Elektronenmikroskopie.



Rainer Müller (FV Didaktik der Physik) ist seit 2002 Professor für Physikdidaktik an der TU Braunschweig. Ein Schwerpunkt seiner Forschung ist das Lehren und Lernen der Quantenphysik.

Linus Krieg (FV Halbleiterphysik) promovierte 2021 an der TU Braunschweig und engagiert sich seitdem für Outreach-Projekte im Bereich der Quantentechnologien.

Franziska Greinert, Prof. Dr. Rainer Müller, TU Braunschweig, Institut für Fachdidaktik der Naturwissenschaften, Bienroder Weg 82, 38106 Braunschweig;
Prof. Dr. Tobias Voß, Dr.-Ing. Linus Krieg, TU Braunschweig, Institut für Halbleitertechnik, Hans-Sommer-Straße 66, 38106 Braunschweig