

acatech

HORIZONTE

Quantentechnologien



Warum sind Quanten wichtig?

Grundlagen für das Verständnis
der Quantentechnologien

Quantentechnologien der ersten und
zweiten Generation

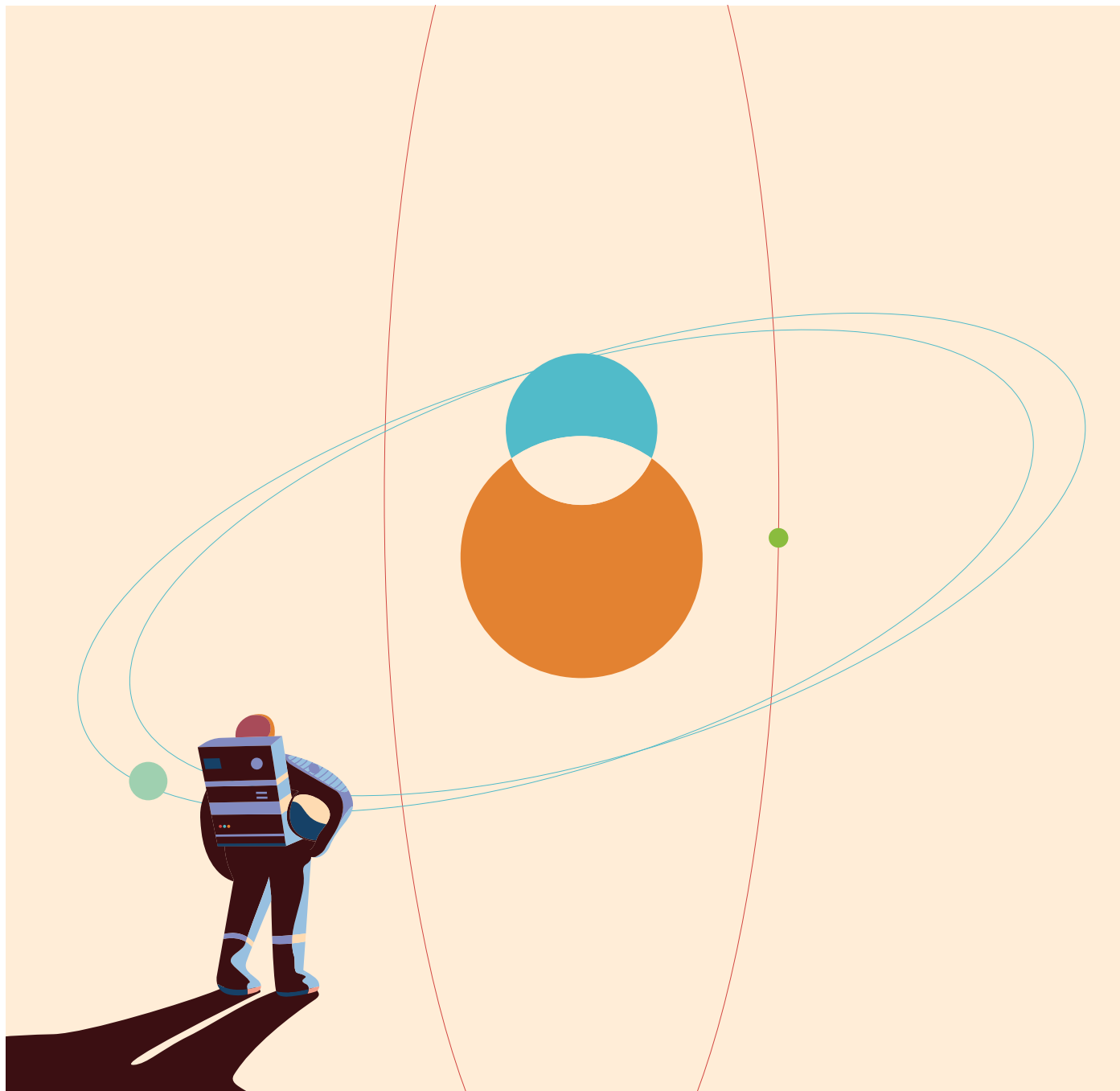
Gestaltungsspielräume und
Erwartungsmanagement

Mit der vorliegenden Publikationsreihe untersucht acatech bedeutende Technikfelder, die sich klar am Horizont abzeichnen, deren Auswirkungen aber noch geklärt werden müssen. Diese Technikfelder werden in acatech HORIZONTE fundiert und anschaulich aufbereitet. In diesen Prozess fließen der aktuelle Stand der internationalen Forschung, Entwicklung und Anwendung sowie die Wertschöpfungspotenziale der Technologien ein. Darüber hinaus nehmen die acatech HORIZONTE ethische, politische und gesellschaftliche Fragen sowie denkbare Entwicklungen und Gestaltungsoptionen in den Blick. Mit den acatech HORIZONTEN möchte die Akademie die Diskussion über neue Technologien anregen, politische Gestaltungsräume aufzeigen und Handlungsoptionen formulieren – und so einen Beitrag für eine vorausschauende Innovationspolitik leisten.

acatech **HORIZONTE**

Quantentechnologien





Inhalt

	Zwölf Botschaften	4
1	Warum sind Quanten wichtig?	6
	1.1 Quanten, ihre außergewöhnlichen Eigenschaften und Potenziale	8
	1.2 Eine kurze Geschichte der Quantenphysik	8
2	Grundlagen für das Verständnis der Quantentechnologien	12
	2.1 Wo wirken Quanten?	14
	2.2 Wie wirken Quanten?	14
	2.3 Ist das Quant Teilchen oder Welle?	16
	2.4 Quanteneffekte	20
3	Was sind Quantentechnologien der ersten und der zweiten Generation, und welche Potenziale haben sie für Wirtschaft und Gesellschaft?	26
	3.1 Quantentechnologien der ersten Generation und ihre Merkmale	28
	3.2 Quantentechnologien der zweiten Generation	30
	3.2.1 Quantencomputing und Quantensimulation	30
	3.2.2 Quantenkommunikation und Quantenkryptografie	40
	3.2.3 Quantenmetrologie, Quantensensorik und quantenbasierte Bildgebung	44
4	Gestaltungsspielräume und Erwartungsmanagement	52
	4.1 Unabhängigkeit in der Quantenkommunikation und Quantenkryptografie	54
	4.2 Deutschland als Vorreiter: Quantenmetrologie, Quantensensorik und quantenbasierte Bildgebung	54
	4.3 Von der Forschung zum Transfer am Beispiel des Quantencomputers	54
	4.4 Die „Quantessenz“	56
	Literaturverzeichnis	58
	Interviewpartnerinnen und Interviewpartner	60
	Mitwirkende	62

1

Warum sind Quanten wichtig?

Über Quantentechnologien wird derzeit viel berichtet. Vor allem die Schlagzeilen über einen Durchbruch bei Quantencomputern haben für Aufsehen gesorgt. Dabei erleichtern uns Quanten und ihre Eigenschaften schon lange das Leben: Ohne sie gäbe es heute beispielsweise kein schnelles Internet und keinen Laser.

Einzelne Quanten lassen sich mit bloßen Sinnen nicht wahrnehmen. Was sind sie also überhaupt? Dieses erste Kapitel führt ein in die spannende Welt des Allerkleinsten, wo nichts so ist, wie wir es kennen.

Zudem werfen wir einen Blick zurück in die Geschichte: Europäische Physiker spielten bei der Entdeckung der Quanten und ihrer außergewöhnlichen Eigenschaften eine maßgebliche Rolle. Anhand ihrer nobelpreiswürdigen Experimente und Entdeckungen lässt sich die Entwicklung der Quantenphysik nachvollziehen.



1.1 Quanten, ihre außergewöhnlichen Eigenschaften und Potenziale

Quantenphysik ist selbst für Fachleute schwer in Worte zu fassen. Einzelne Quanten kann man mit bloßen Sinnen erst einmal nicht wahrnehmen. Vielmehr wirken sie in der Welt des Allerkleinsten, der Welt der Atome, dem Nanokosmos. Quanten sind so etwas wie die kleinsten Einheiten, in denen uns die Welt entgegentritt. So ist zum Beispiel ein Lichtquant die kleinste Lichtmenge, die ein Atom aussenden kann. Unseren in der Welt des Großen geformten Sinnen bleibt diese Welt jedoch verschlossen.

„Wir müssen akzeptieren, dass es eine Realität außerhalb unserer Vorstellung gibt.“*

In der Welt der Quanten erweisen sich viele Gesetze der klassischen Physik, die beschreiben, wie sich alltägliche Dinge verhalten, als nicht mehr gültig. Schauen wir uns Quanten und ihre „verrückten“ Eigenschaften an, dann ist plötzlich vieles anders, als wir es zu kennen glauben: Ein einzelnes Quant legt – vereinfacht ausgedrückt – seinen Aufenthaltsort erst fest, wenn man es beobachtet. Es gibt sogar einen nahezu romantischen Aspekt: Zwei Quanten können miteinander „verschränkt“ sein, selbst wenn sie über Tausende von Kilometern voneinander getrennt sind. Sogar Einstein kam das seinerzeit ungläublich vor: Er nannte das eine „spukhafte Fernwirkung“.¹

„Bei Quanten versuchen wir die Sprache, in der wir uns bekannte Dinge beschreiben, auf Dinge zu übertragen, die wir nicht beobachten können. Vergleiche mit der uns bekannten Welt hinken dadurch häufig. Mathematisch sind Quanten und ihre Eigenschaften allerdings relativ leicht beschreibbar.“

Einerseits erscheinen uns die Quanten und ihre Welt unbegreiflich. Andererseits ist die Quantenphysik die beste und präziseste physikalische Theorie, die wir haben, um das Universum bis hinab in den Nanokosmos zu beschreiben. Dieses Spannungsfeld macht die Beschäftigung mit dem Thema so faszinierend.

* Einige ausgewählte Kerngedanken der für diese HORIZONTE Ausgabe befragten Expertinnen und Experten (siehe S. 60) sind im Text als anonymisierte Zitate aufgeführt.

Viele Fachleute sehen in der Quantenphysik großes Potenzial für technologischen Fortschritt. Zahlreiche ihrer Anwendungen haben schon jetzt unsere Wirtschaft und unser Leben stark verändert: Vom Laser über das Internet bis hin zur Atomuhr oder zum Globalen Positionsbestimmungssystem (GPS) oder seinem europäischen Äquivalent Galileo (GNSS) – diese Technologien wären ohne die Erkenntnisse aus der Quantenphysik nicht möglich. Dreißig Prozent des US-amerikanischen Bruttonationaleinkommens basieren schätzungsweise auf Erfindungen, die aus Erkenntnissen in der Quantenphysik hervorgegangen sind.² Vor Kurzem ist es erstmals gelungen, mit einzelnen Quanten zu „arbeiten“. Man kann sich vorstellen, dass dies aufgrund ihrer außergewöhnlichen Eigenschaften keine einfache Sache ist. Sollte es aber klappen, Quanten zu „bändigen“, werden wir in den kommenden Jahren und Jahrzehnten womöglich Quantencomputer, Quantenkryptografie und Quantensensoren erleben, die unser Leben weiter verändern und verbessern können.

1.2 Eine kurze Geschichte der Quantenphysik

Den Grundstein für diese Technologien legten vor über hundert Jahren Theoretiker wie Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr, Werner Heisenberg und Erwin Schrödinger sowie eine Reihe von Experimentalphysikern wie Ernest Rutherford, Otto Lummer, Ernst Pringsheim und Wilhelm Wien. Sie stellten mit ihrer Forschung ihr eigenes Weltbild auf den Kopf: Bis dahin war die Forschungsgemeinschaft der Physikerinnen und Physiker davon ausgegangen, dass sie mit den bisherigen physikalischen Erkenntnissen das Universum verstehen und die Welt um uns herum in Gänze beschreiben könne.

Im mikroskopischen Bereich beobachtete man jedoch Anfang des 20. Jahrhunderts einige Phänomene, die sich nicht allein durch klassische Physik erklären ließen. Das bereitete Physikerinnen und Physikern weltweit Kopfzerbrechen. Eine andere Erklärung musste her: Hier setzt die – damals revolutionäre – Quantenphysik an. Das nachfolgende Schaubild zeigt einige ihrer frühen Meilensteine auf. In Kapitel 3.1 werden auch spätere Meilensteine dargestellt.



Eine kurze Geschichte der Quantenphysik

480 v.Chr.



Die Philosophen im antiken Griechenland fragen sich, aus welchen Teilchen unser Universum besteht. Der Philosoph Demokrit bezeichnete damals das „Atomos“ (Atom) als das kleinste unteilbare Teilchen.



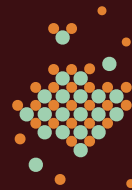
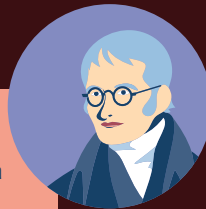
1802

Thomas Young zeigt erstmals in seinem berühmten Doppelspaltexperiment, dass sich Licht wie eine Welle verhält.

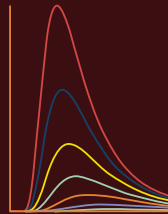


1808

John Dalton stellt die Hypothese auf, dass jeder elementare Stoff, also zum Beispiel Wasserstoff oder Sauerstoff, nicht in beliebig kleine Teile geteilt werden kann. Irgendwann müsste man zu einem kleinsten Teilchen kommen. Diese kleinsten unteilbaren Teilchen nannte er nach griechischem Vorbild „Atome“. Wasserstoff besteht also aus Wasserstoffatomen, die alle gleich sind. Ein Wassermolekül besteht zum Beispiel aus zwei Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom.



1896



Wilhelm Wien leitet die nach ihm benannte Wiensche Strahlungsformel her, die die Wärmestrahlung von schwarzen Körpern beschreibt.



1899

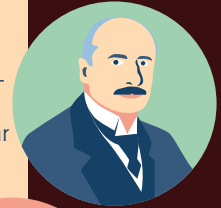


Max Planck will grundlegend verstehen, wie schwarze Körper Licht emittieren. Bei seinen Arbeiten stößt er auf ein neues physikalisches Gesetz: Energie wird in „Päckchen“ abgegeben! Diese Energiepäckchen nennt er Quanten. Sie sind die kleinstmögliche Menge an Energie, die ein Objekt, zum Beispiel eine Glühbirne, abgeben kann. Damit legt er den Grundstein für die Quantenphysik.



1900

Ernst Pringsheim und Otto Lummer führen sorgfältige Messungen an schwarzen Körpern durch. Die Forschungsergebnisse von Wien, Lummer und Pringsheim dienen ein Jahr später Max Planck als Ausgangspunkt für seine Forschungsvorhaben.



Ernest Rutherford zeigt, dass ein Atom aus einem positiv geladenen Kern besteht, der von negativ geladenen Elektronen umgeben wird.



1905

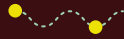


Albert Einstein baut auf den Erkenntnissen von Young und Planck auf: Er definiert erstmals das „Quantum des Lichts“, also die kleinstmögliche Menge an Lichtenergie, und nennt es „Photon“. Einstein stellt die Hypothese auf, dass sich Licht sowohl wie ein Teilchen als auch wie eine Welle verhält. Diese Erkenntnis ist revolutionär: Bisher dachte man, es sei entweder Teilchen oder Welle.

1912

Niels Bohr verfeinert Rutherfords Atommodell und beschreibt, dass sich die Elektronen auf Bahnen um den Atomkern bewegen, so wie die Planeten um die Sonne kreisen. Er nimmt an, dass Elektronen auf ihren Bahnen jedoch nicht auf Dauer „festsitzen“, sondern von einer auf die andere „springen“ können, wenn ein Quant mit der richtigen Menge an Energie im Spiel ist. Er nennt den Springvorgang des Elektrons entsprechend einen „Quantensprung“.

1913

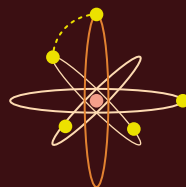


Louis de Broglie beschreibt in seiner Doktorarbeit, dass sich nicht nur Photonen wie Wellen und Teilchen verhalten können, sondern auch Materie, wie zum Beispiel Elektronen.



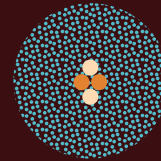
1924

Erwin Schrödinger baut auf de Broglies Erkenntnissen auf und postuliert seine berühmte „Schrödingergleichung“. Mit dieser Gleichung lassen sich zum Beispiel die diskreten Energiewerte in einem Atom berechnen.



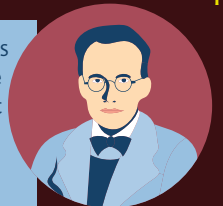
Werner Heisenberg ermittelt die Unschärferelation. Sie besagt, dass nur entweder die exakte Geschwindigkeit oder der exakte Ort eines Teilchens gemessen werden kann, aber nicht beides gleichzeitig – egal wie gut das Messgerät ist. Eben weil Teilchen in der Quantenwelt auch Wellencharakter besitzen, sind sie nicht so scharf definiert wie große Objekte in unserer beobachtbaren Welt. Das widerspricht einer Annahme aus der klassischen Physik, wonach sich prinzipiell alles exakt bestimmen lässt.

1926



1927

Auf der fünften Solvay-Konferenz in Brüssel diskutieren die weltweit hochrangigsten Fachleute aus Physik und Chemie die neuen Erkenntnisse über Elektronen und Photonen. Neben den bereits genannten Planck, Einstein, Bohr, de Broglie, Schrödinger und Heisenberg sind auch Max Born, Paul Dirac und Wolfgang Pauli anwesend, die wichtige mathematische Grundlagen für die Quantenphysik legten. Von den 29 Wissenschaftlern, die an dieser Konferenz teilnehmen, werden im Laufe der Zeit insgesamt 17 zu Nobelpreisträgern. Ihre Erkenntnisse und die darauf aufbauende Forschung führen zu dem, was heute häufig als die „erste Quantenrevolution“ bezeichnet wird.



HERAUSGEBER:

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

ADRESSEN STANDORTE**Geschäftsstelle**

Karolinenplatz 4

80333 München

T +49(0)89 / 520309-0

F +49(0)89 / 520309-900

Hauptstadtbüro

Pariser Platz 4a

10117 Berlin

T +49(0)30 / 2063096-0

F +49(0)30 / 2063096-11

Brüssel-Büro

Rue d'Egmont / Egmontstraat 13

B-1000 Brüssel

T +32(0)2 / 2 13 81-80

F +32(0)2 / 2 1381-89

horizonte@acatech.de

<https://www.acatech.de/horizonte>

Empfohlene Zitierweise:

acatech (Hrsg.): Quantentechnologien (acatech HORIZONTE),

München 2020

Redaktionelle Bearbeitung:

Karola Klatt

Lektorat:

Lektorat Berlin

Layout, Satz und Illustrationen:

Joseph & Sebastian – Grafikdesign, München

Druck:

Kern GmbH, Bexbach

Vorstand i. S. v. § 26 BGB:

Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath, Karl-Heinz Streibich,

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier, Prof. Dr. Reinhard F. Hüttl

(Amt ruht derzeit), Dr. Stefan Oschmann, Prof. Dr. Christoph

M. Schmidt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Manfred Rauhmeier,

Prof. Dr. Martina Schraudner

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

• 2020

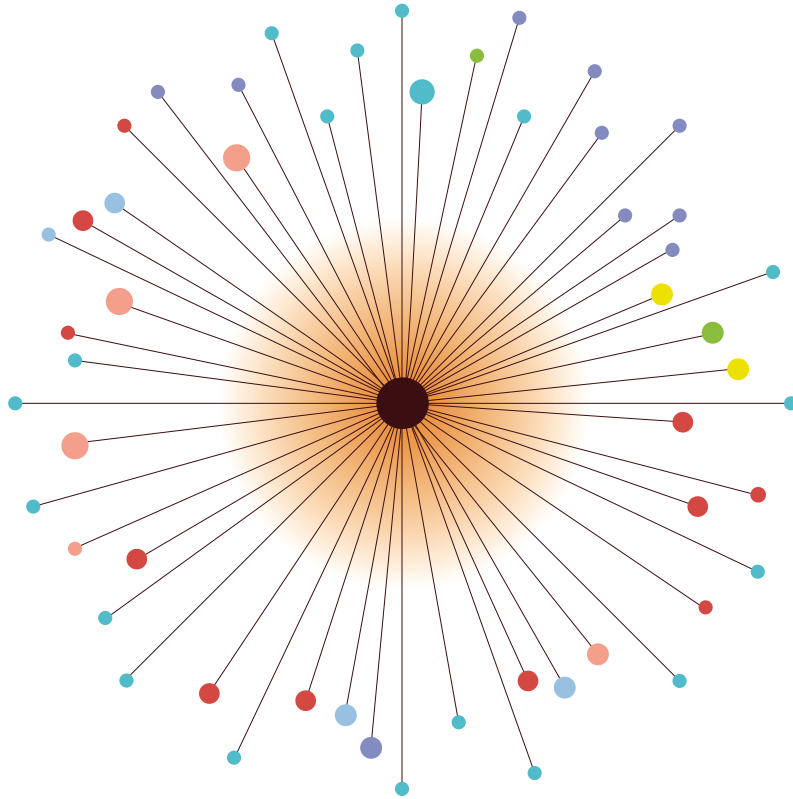
Mehr zu acatech HORIZONTE Quantentechnologien, inklusive der Grafiken, finden Sie auch unter:

<https://www.acatech.de/projekt/acatech-horizonte-quantentechnologien>



München 2020

acatech HORIZONTE ISSN 2625-9605



Über die zweite Generation der Quantentechnologien, zu denen auch der Quantencomputer gehört, kursieren viele Mythen. Auch deshalb, weil die Grundlagen dieser Technologie – die Quanten und deren Manipulation – ferner von unserer Alltagswelt kaum liegen könnten.

Was sind Quanten überhaupt? Was ist momentan technisch möglich? Was ist Hype, und wo liegen die Potenziale der Technologien? Auf diese und weitere Fragen möchte die vorliegende HORIZONTE-Ausgabe Antworten geben.