

# JUNGE

## wissenschaft

JungforscherInnen publizieren  
online | **peer reviewed** | original

Verlag:  
Physikalisch-  
Technische  
Bundesanstalt



Technik

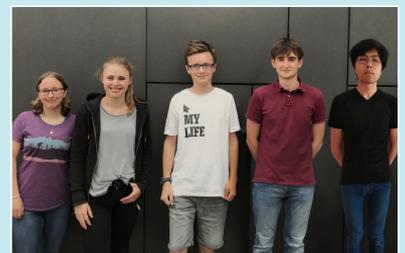
## Mit Ultraschall auf Abstand

Entwicklung und Test eines Mess-Systems  
zur Analyse des Abstandsverhaltens in  
Menschenansammlungen

*In den Jahren 2020/2021 zählte das Mindestabstandsgebot (1,5 m) zu den wichtigsten Hygienemaßnahmen bei der Eindämmung des Covid19-Infektionsgeschehens. Ein auf Basis von Ultraschall-Sensoren entwickeltes Mess-System analysiert das Abstandsverhalten in Menschenansammlungen und unterstützt damit bei der Planung und Durchführung von Events. Die Leistungsfähigkeit dieses Systems wird untersucht und vorgestellt.*



### DIE JUNGFORSCHER



**Hannah Schmedding (2003),  
Lisa Brinkmann (2004),  
Tu Duong Dang (2002),  
Paul Kallis (2003),  
Kevin Stricker (2003)**

Gymnasium Oberursel,  
MINT-Schul-Labor der  
Hochschule Darmstadt

**Eingang der Arbeit:**

6.5.2021

**Arbeit angenommen:**

17.5.2021



# Mit Ultraschall auf Abstand

Entwicklung und Test eines Mess-Systems zur Analyse des Abstandsverhaltens in Menschenansammlungen

## 1. Einleitung

Seit Anfang des Jahres 2020 beherrscht die Covid19-Pandemie das welt- und deutschlandweite Leben [1]. Nach der ersten Infektionswelle im Frühjahr 2020 (von März bis Mai) und der zweiten Welle im Herbst und Winter (von Oktober 2020 bis Februar 2021) erlebte Deutschland von März bis Mai 2021 die dritte Infektionswelle, in der insbesondere neue Covid19-Virusvarianten auftraten und abgewehrt werden mussten. Gleichzeitig nahm die welt- und deutschlandweite Impfkampagne seit Anfang 2021 an Fahrt auf.

Solange noch keine ausreichende Durchimpfung und die damit verbundene Herdenimmunität vorliegt, muss die Bevölkerung sich durch eine Reihe spezieller Hygiene-Maßnahmen und

-Regeln vor der Ansteckung und Ausbreitung des Covid19-Virus schützen. Für den Alltag sind dazu die sogenannten A.H.A.(L.)-Gebote etabliert worden [2]. Neben dem Gebot des Masketragens und einer ausreichenden Lüftung in Gebäuden ist die Einhaltung eines Mindestabstands von 1,5 m zu anderen Personen in der Öffentlichkeit von entscheidender Bedeutung. Der medizinisch-wissenschaftliche Grund hierfür liegt darin, dass virusbelastete Aerosole, die beim Atmen, Sprechen, Niesen und/oder Husten den Mund-Nasen-Raum verlassen, erst in einem Abstand von ca. 1,5 m größtenteils zu Boden gesunken sind und damit nicht mehr in den Mund und die Nase des Gegenübers gelangen können [3].

Obwohl die A.H.A.(L.)-Regeln einen guten Schutz vor der Infektion und der Übertragung des Virus bieten, hat sich in der alltäglichen Umsetzung herausgestellt, dass die dauerhafte und sorgfältige Einhaltung dieser Maßnahmen in der Öffentlichkeit sehr schwierig ist, insbesondere wenn Menschen bei Veranstaltungen zusammentreffen und während dieser Events vom Einhalten der Hygieneregeln abgelenkt werden. Neben der Gastronomie- und Beherbergungsbranche stellt dies insbesondere Event-Dienstleister (Theater, Konzert, Sportveranstaltungen, öffentliche Feste und Feiern, Märkte etc.) vor große Herausforderungen. Während der ersten Welle mussten nahezu alle Veranstaltungen abgesagt werden. In den Sommermonaten 2020 sind von den Event-Organisatoren in Zusammenarbeit mit den lokalen Gesundheitsbehörden Konzepte zu den Hygiene-Maßnahmen entwickelt worden, die die Durchführung von Veranstaltungen unter Auflagen wieder ermöglichen sollen. Dabei obliegen die konsequente Durchführung und strikte Einhaltung dieser Hygiene-Auflagen dem Veranstalter. Behördlich werden Veranstaltungen nur dann genehmigt, wenn das vom Veranstalter vorgelegte Hygiene-Konzept überzeugt und umsetzbar ist.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf das Gebot zur Einhaltung des Mindestabstands (1,5 m). Für Veranstaltungen, bei denen das Publikum bzw. die Gäste sitzen, kann man dies sehr gut durch die Anordnung der Sitzplätze (mit entsprechenden Abständen) steuern, sodass im Wesentlichen nur die Phasen des Eintretens, der Pausen und des Verlassens des Veranstaltungsgeländes überwacht werden müssen. Weitaus schwieriger sind die Beurteilung und Steuerung von Menschenansammlungen, bei denen es keine festen Sitzplätze gibt. Hier bewegen sich die Personen relativ frei auf dem Veranstaltungsgelände, unterhalten sich miteinander oder halten sich verstärkt an Attraktionspunkten wie Verkaufsständen, Informationstafeln oder Animations-

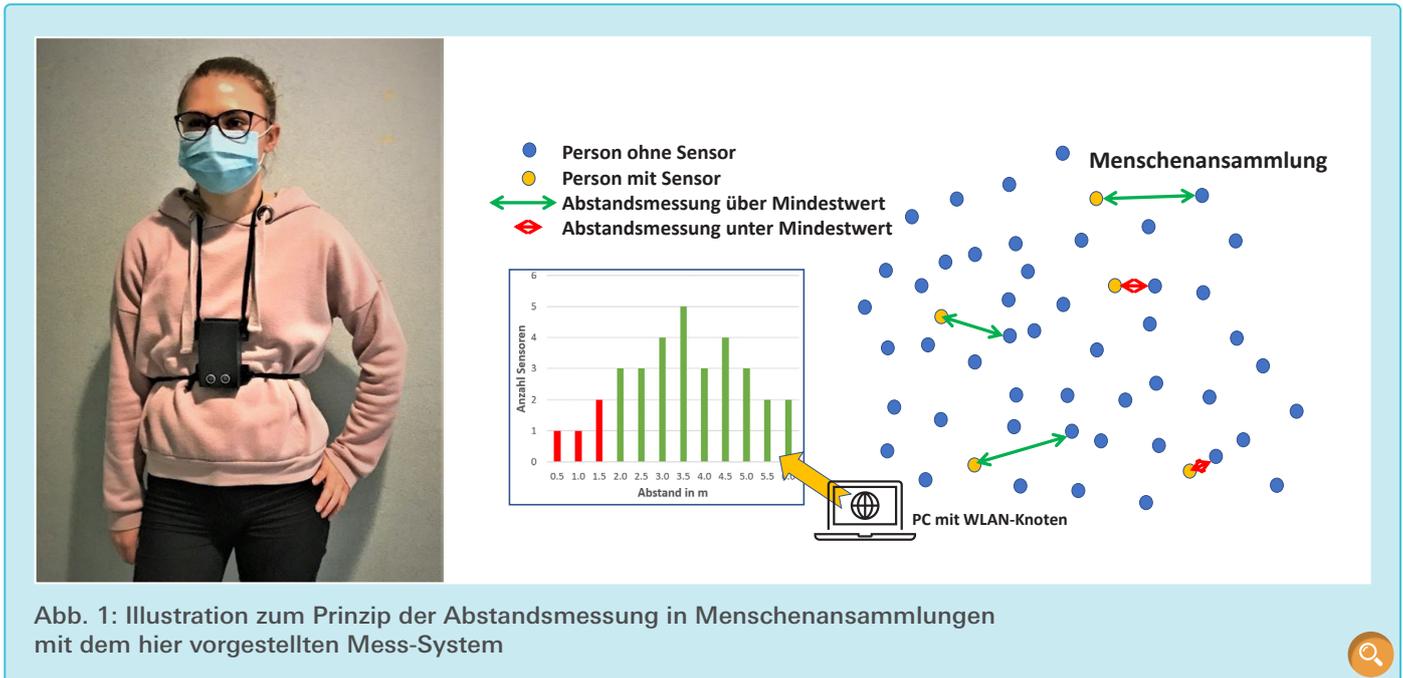


Abb. 1: Illustration zum Prinzip der Abstandsmessung in Menschenansammlungen mit dem hier vorgestellten Mess-System

gerätschaften auf. Dabei wird häufig das Abstandsgebot vergessen und dessen Einhaltung vernachlässigt. Diese Situationen und dieses Verhalten muss der Event-Veranstalter bei der Planung der Veranstaltung berücksichtigen und während des Events rechtzeitig erkennen, um eventuell gegensteuern zu können.

Die folgenden technischen Hilfsmittel stehen derzeit zur Messung und Dokumentation des Abstandsverhaltens in Menschenansammlungen zur Verfügung:

- **Corona-Warn-App:** Seit Juni 2020 können Smartphone-Besitzer die sogenannte Corona-Warn-App installieren und zum Registrieren von Kontakten mit anderen Usern in der Öffentlichkeit nutzen [4]. Seit 2021 wird diese Software u.a. durch die **Luca-App** zur Kontaktverfolgung ergänzt [5].
- **Restart-19-Studie:** Im Rahmen des Restart-19-Forschungsprojekts [6] der Universität Halle (Saale) wurde im August 2020 ein Konzert des Sängers Tim Bendzko mit ausgewähltem Publikum durchgeführt. Dabei wurde ein sogenanntes „Contact Tracer“-System verwen-

det, bei dem alle Teilnehmenden kleine Sender trugen, die die Kontakte und Annäherungen der Teilnehmer untereinander maßen und aufzeichneten. Diese Daten wurden im Anschluss ausgewertet [7]. Seit Herbst 2020 wurden weitere Test-Veranstaltungen mit ähnlichen Systemen durchgeführt und bewertet.

- **Corona Abstandswarner:** Die Firma ESGMobility [8] aus Fulda hat ebenfalls auf Bluetooth-Basis einen mobilen Sensor (zum Umhängen) entwickelt, der die Abstände zu benachbarten Geräten ermittelt und bei Unterschreitung des Mindestabstands ein Alarmsignal ausgibt.
- **Luftüberwachung durch Drohnen:** Sicherheitsbehörden können bei der Begleitung von Veranstaltungen auch auf die Luftüberwachung durch Drohnen zurückgreifen. Die von der Drohne erzeugten Bilder müssten (automatisiert) mithilfe von Bildverarbeitungswerkzeugen im Hinblick auf die Einhaltung des Mindestabstands analysiert werden.

geeignet ist. Beim Eintritt werden mobile Sensoreinheiten an einige Besucher verteilt mit der Bitte, diese während der Veranstaltung vor der Brust zu tragen. In dieser Zeit misst die Sensoreinheit über den eingebauten Ultraschall-Sensor kontinuierlich den Abstand zwischen dem Sensorträger und den weiteren Personen, welche sich vor ihm befinden. Die Werte von allen aktiven mobilen Sensoreinheiten werden kontinuierlich per Funk an einen zentralen Empfänger-PC gesendet, der die Daten aufzeichnet, auswertet und zeitnah dem Veranstalter in geeigneter Form vorstellt. Auf diese Weise können die Verantwortlichen das Abstandsverhalten der Besucher prüfen und ggf. Maßnahmen zur Verbesserung starten (z. B. Lautsprecherdurchsagen, Einlassbeschränkungen, temporäres Schließen von Attraktionspunkten ...). Der große Vorteil dieses Systems liegt darin, dass die Ultraschall-Sensoreinheit den Abstand auch zu Personen misst, die selbst keinen Sensor tragen. Auf diese Weise ist es ausreichend, nur an eine Stichprobe der Teilnehmenden Sensoreinheiten auszugeben.

Abb. 1 illustriert das hier vorgestellte Mess-System, welches für die Veranstalter von Indoor- und Outdoor-Events

## 2. Vorgehensweise, Materialien und Methoden

Nach einigen technischen Vorbemerkungen zur Definition der Mindestabstands-Regel wird die entwickelte mobile Sensoreinheit (Hard- und Software) in Verbindung mit den Programmen zur Auswertung und Visualisierung der Daten vorgestellt. Des Weiteren wird der Funktionsumfang des Software-Tools zur Simulation des Abstandsverhaltens in Menschenansammlungen aufgezeigt.

### 2.1 Zur Definition der Mindestabstand-Regel

Die Hygiene-Abstandsregel für Menschenansammlungen besagt, dass der Mindestabstand zwischen Personen 1,5 m nicht unterschreiten soll. [Abb. 2](#) illustriert dieses Gebot für eine typische Menschenansammlung. In diesem Beispiel gibt es einen rechteckigen Versammlungsbereich der Größe  $25\text{ m} \cdot 15\text{ m} = 375\text{ m}^2$ . In diesem Gebiet versammeln sich 56 Personen. Nach der Abstandsregel beanspruchen diese Teilnehmenden einen kreisförmigen Bereich mit Radius 1,5 m um sich herum, in dem sich keine andere Person aufhalten darf. Dies ist in diesem Beispiel für 28 Teilnehmende (mit grünem Abstandskreis) erfüllt und für die anderen 28 Personen nicht (mit rotem Abstandskreis).

Man kann die mögliche Teilnehmerzahl  $N_{\text{max}}$ , die maximal in diesen Versammlungsbereich unter Einhaltung der Abstandsregel „passen“ würden, wie folgt abschätzen: Wenn jede dieser Personen einen Kreis vom Radius  $1,5\text{ m} / 2 = 0,75\text{ m}$  beansprucht und diese Kreise sich nicht überlappen würden, käme man auf eine „belegte“ Fläche von  $N_{\text{max}} \cdot \pi \cdot (0,75\text{ m})^2 \approx N_{\text{max}} \cdot 1,8\text{ m}^2$ . D. h. in dem Bereich könnten sich ca.  $N_{\text{max}} = 375\text{ m}^2 / 1,8\text{ m}^2 \approx 200$  Personen aufhalten, welche sich aber sehr diszipliniert an die Abstandsregeln halten müssten. Diese Abschätzung ist sehr grob, da Effekte am Rand und in den so-

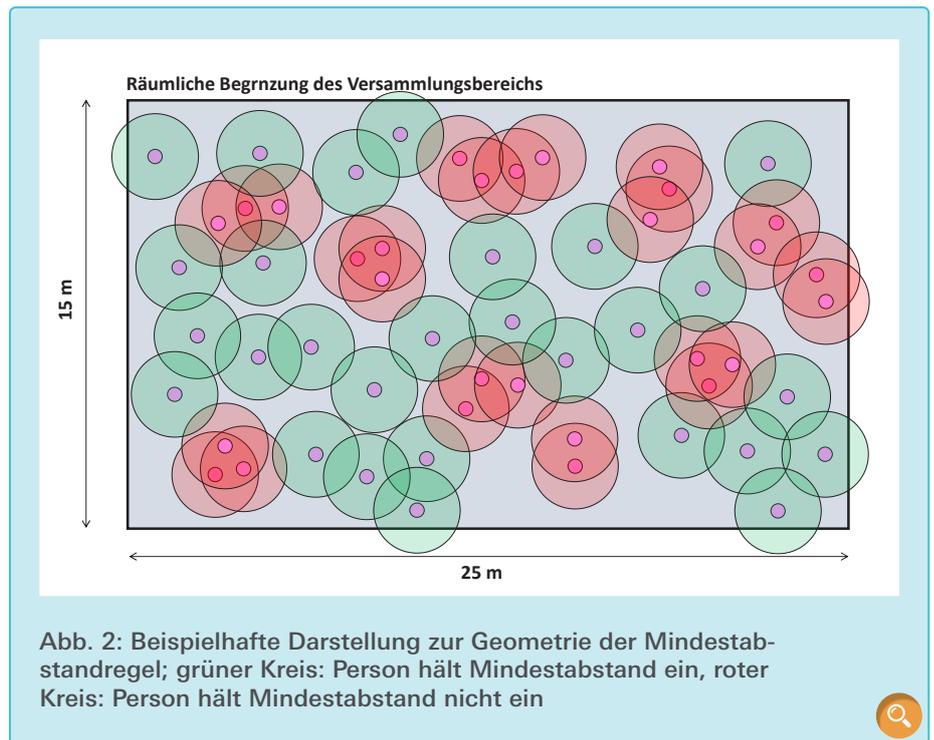


Abb. 2: Beispielhafte Darstellung zur Geometrie der Mindestabstandsregel; grüner Kreis: Person hält Mindestabstand ein, roter Kreis: Person hält Mindestabstand nicht ein

genannten „Kreiszipfeln“ nicht berücksichtigt werden. Des Weiteren gäbe es in diesem Szenario keine Verkehrsflächen (Fluchtwege etc.), sodass sich die Teilnehmenden auf dem Veranstaltungsgelände kaum bewegen könnten. Aber in den meisten Fällen werden auch bei deutlich weniger Personen (als in diesem extremen Beispiel) die Abstandsregeln nicht vollkommen eingehalten, da nicht ständig deren Einhaltung beachtet wird. Dies gilt insbesondere, wenn mehrere Personen sich kennen und sich unterhalten, oder wenn es Attraktionspunkte wie Informationstafeln, Verkaufsstände etc. gibt.

Es ergibt sich bei dieser mathematisch-geometrischen Betrachtung zum Abstandsgebot die Frage, ob diese zur eigentlichen medizinischen Absicht passt: Eine Infektion soll dadurch vermieden werden, dass sich der Mund-Nasen-Bereich des Gegenübers nicht in der eigenen, aus Mund oder Nase ausgestoßenen Aerosolwolke befindet. [Abb. 3](#) illustriert diese Situation.

In diesem Modell werden alle fünf Personen nicht nur durch ihre jeweilige Position auf dem Veranstaltungsgelände beschrieben, sondern auch durch

ihre Blickrichtung (Pfeil-Richtung). Am Beispiel der Person 1 (violett) ist mit dem dunkel-orangen Dreieck derjenige Bereich angedeutet, in welche sich die Aerosolwolke von Person 1 ausbreitet. Person 2 blickt Person 1 an und richtet damit auch Mund und Nase auf die Aerosolwolke, sodass hier der Mindestabstand von 1,5 m eine große Bedeutung besitzt. Person 3 und 4 befinden sich zwar innerhalb des 1,5 m Abstandskreises (hellorange) von Person 1, jedoch nicht im Bereich der Aerosolwolke. Des Weiteren schauen Person 3 und 4 nicht in die Richtung von Person 1, sodass ihre Aerosolwolken Person 1 ebenfalls nicht „treffen“. Obwohl Person 3 und 4 das 1,5 m Abstandsgebot zu Person 1 nicht einhalten, stellt sich die Frage, wie hoch in dieser speziellen Situation das Infektionsrisiko ist. Neben diesem medizinischen Aspekt ergibt sich auch die praktische Frage, ob Person 1, 3 und 4 in dieser Situation überhaupt registrieren, dass sie die Abstandsregel verletzen, da die drei sich nicht ansehen und ihr Gegenüber daher vielleicht gar nicht bemerken. In diesem Kontext stellen die Personen 1 und 5 ein weiteres „Szenario“ dar. Person 5 befindet sich zwar im Bereich der Aerosolwolke von Person 1, schaut

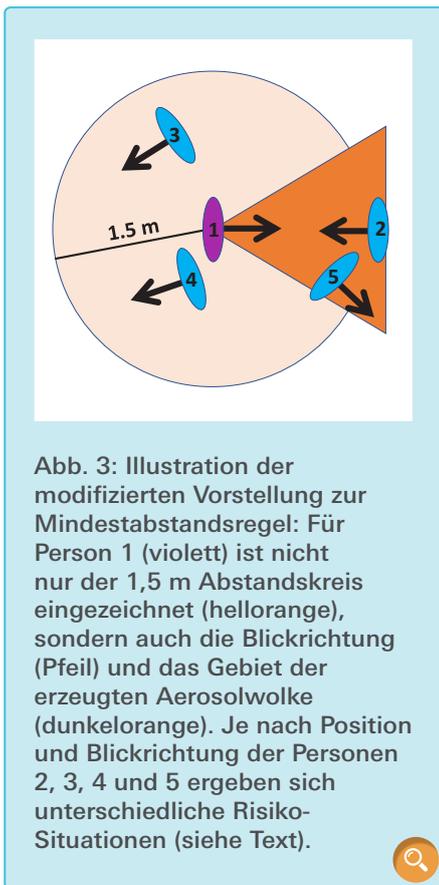


Abb. 3: Illustration der modifizierten Vorstellung zur Mindestabstandsregel: Für Person 1 (violett) ist nicht nur der 1,5 m Abstandskreis eingezeichnet (hellorange), sondern auch die Blickrichtung (Pfeil) und das Gebiet der erzeugten Aerosolwolke (dunkelorange). Je nach Position und Blickrichtung der Personen 2, 3, 4 und 5 ergeben sich unterschiedliche Risiko-Situationen (siehe Text).

aber in die entgegengesetzte Richtung, sodass ihr Rücken und Hinterkopf die Aerosole gegenüber dem Mund-Nasen-Bereich zu einem gewissen Teil abschirmen. Daher ergibt sich auch hier die Frage nach dem Infektionsrisiko in dieser Situation.

Betrachtet man die in der Einleitung beschriebenen bislang verwendeten Sensorsysteme zur Abstandsmessung in Menschenansammlungen, so sind diese Messmethoden isotrop, d. h. unabhängig von der Richtung und Orientierung des Sensorträgers. Diese „klassischen“ Verfahren werden daher im Beispiel aus [Abb. 3](#) registrieren, dass die Personen 3, 4 und 5 den Mindestabstand zu Person 1 nicht einhalten und Person 2 sich gerade an der Abstandsgrenze zu Person 1 befindet. Der hier verwendete Ultraschall-Sensor misst jedoch den Abstand nur in Blickrichtung von Person 1, genauer gesagt zu Personen, die sich innerhalb eines Kegels mit Öffnungswinkel von ca.  $\pm 15^\circ$  befinden. Dieser Winkel liegt ungefähr im Bereich des Ausstoßwinkels

der Aerosolwolke von ca.  $\pm 20^\circ$  (bei  $40 \text{ Part./cm}^3$  im Abstand von ca. 3 m) [\[9\]](#). Wenn also Person 1 in [Abb. 3](#) eine Sensoreinheit vor der Brust trägt, kann diese den Abstand zu den Personen 2 und 5 registrieren, jedoch werden die Personen 3 und 4 nicht detektiert.

Die in dieser Arbeit verwendeten Abstandssensoren messen und registrieren hauptsächlich den Abstand in Blickrichtung des Trägers. In diesen Winkelbereich stößt der Träger in der Regel die Aerosolwolke aus. Dies ist bei der Auswertung und Interpretation der gesammelten Messergebnisse aller Sensoreinheiten zu berücksichtigen.

## 2.2 Entwicklung der Sensoreinheit

Die wesentliche Aufgabe der mobilen Ultraschall-Abstandssensor-Einheit besteht darin, kontinuierlich den Abstand zum Vordermann/zur Vorderfrau zu messen. Als Sensor dient hierzu der kompakte Ultraschallsensor HC-SR04, welcher nur in eine Richtung (entlang der Sensorachse) in einem Winkelbereich von ca.  $\pm 15^\circ$  misst und Abstände im Bereich von 3 bis 400 cm detektieren kann [\[10\]](#). Damit die Abstände (nur) in Blickrichtung (bzw. in die Richtung, in

die der Oberkörper gewendet ist) gemessen werden, müssen die Testpersonen die Sensoreinheit vor der Brust tragen.

Der HC-SR04-Sensor ist an einen Mikro-Controller (Arduino Nano) mit integrierter RF-Sende-Empfänger-Einheit angeschlossen. Als mobile Stromquelle dient eine 9V-Blockbatterie, welche den Arduino Nano und den Sensor mit elektrischer Energie versorgt.

Der Controller erhält vom Ultraschallsensor kontinuierlich die aktuellen Abstandswerte und sendet diese über die RF-Einheit an eine zentrale Empfänger-Einheit, welche die Daten (von allen aktiven mobilen Sensoreinheiten) an eine PC-Software weiterleitet. Diese werden dort gespeichert, ausgewertet und die Ergebnisse der Abstandsanalyse dem Veranstalter in aufbereiteter Form instantan zur Verfügung gestellt, damit dieser ggf. Maßnahmen ergreifen kann.

Alternativ zur Funkübertragung ist es auch möglich, die mobilen Sensoreinheiten mit einer SD-Karte auszustatten und auf diese Weise als Datenlogger zu verwenden. In diesem Fall entfällt die RF-Datenübertragung zur Empfänger-Einheit. Die Auswertung der Daten erfolgt im Nachhinein.



Abb. 4: Design-Variante des Sensorgehäuses und Einbau der Elektronik

Damit man die mobile Sensoreinheit vor der Brust tragen kann, wird die entwickelte Elektronik (Ultraschall-Sensor mit Arduino und 9V-Blockbatterie) in ein Gehäuse eingefügt. Eine Designvariante dieser Hülle, welche mittels 3D-Druck hergestellt wird, zeigt [Abb. 4](#). Öffnungen im Gehäuse führen den Ultraschall-Sensor und vier Signal-LEDs hinaus. Über die abnehmbare Frontklappe ergibt sich ein Wartungszugriff, beispielsweise für den Batteriewechsel. Mithilfe von verstellbaren Brust- und Halsgurten kann der Träger die Sensoreinheit optimal und rutschfest vor der Brust in Höhe des Brustbeins fixieren.

Eine zu Beginn der Entwicklung der Ultraschall-Sensoreinheiten befürchtete Problematik, nämlich die gegenseitige Beeinflussung der Ultraschall-Sensoren untereinander, stellt sich in der Praxis jedoch als nicht relevant heraus: Wenn die abgestrahlten Ultraschall-Signale der Sensoren (beispielsweise von zwei sich gegenüberstehenden Teilnehmenden) vom Mikrofon des jeweils anderen Sensors registriert werden, könnte es hierdurch zu Falschmessungen kommen. Dieser Fall ist allerdings sehr unwahrscheinlich, da die Sensoren in unseren Sensoreinheiten nur jede Sekunde (nicht-synchronisiert) eine Messung durchführen. Der Ultraschallsensor sendet nur einmal pro Sekunde einen Ultraschall-Puls aus und wartet danach „nur“ in einem Zeitfenster von ca. 25 ms (entspricht dem maximalen Abstand von 400 cm) auf ein Echo. Alle auf den jeweiligen Sensor einfallenden Ultraschall-Pulse außerhalb dieses Zeitfensters werden nicht registriert. Die Wahrscheinlichkeit für eine entsprechende Falschmessung liegt also unter 2,5 % (25 ms/1.000 ms).

### 2.3 Entwicklung der Software zur Vernetzung und Auswertung

Um die gesammelten Daten auszuwerten, werden sie von jeder Sensoreinheit über WiFi an eine Empfangsstation

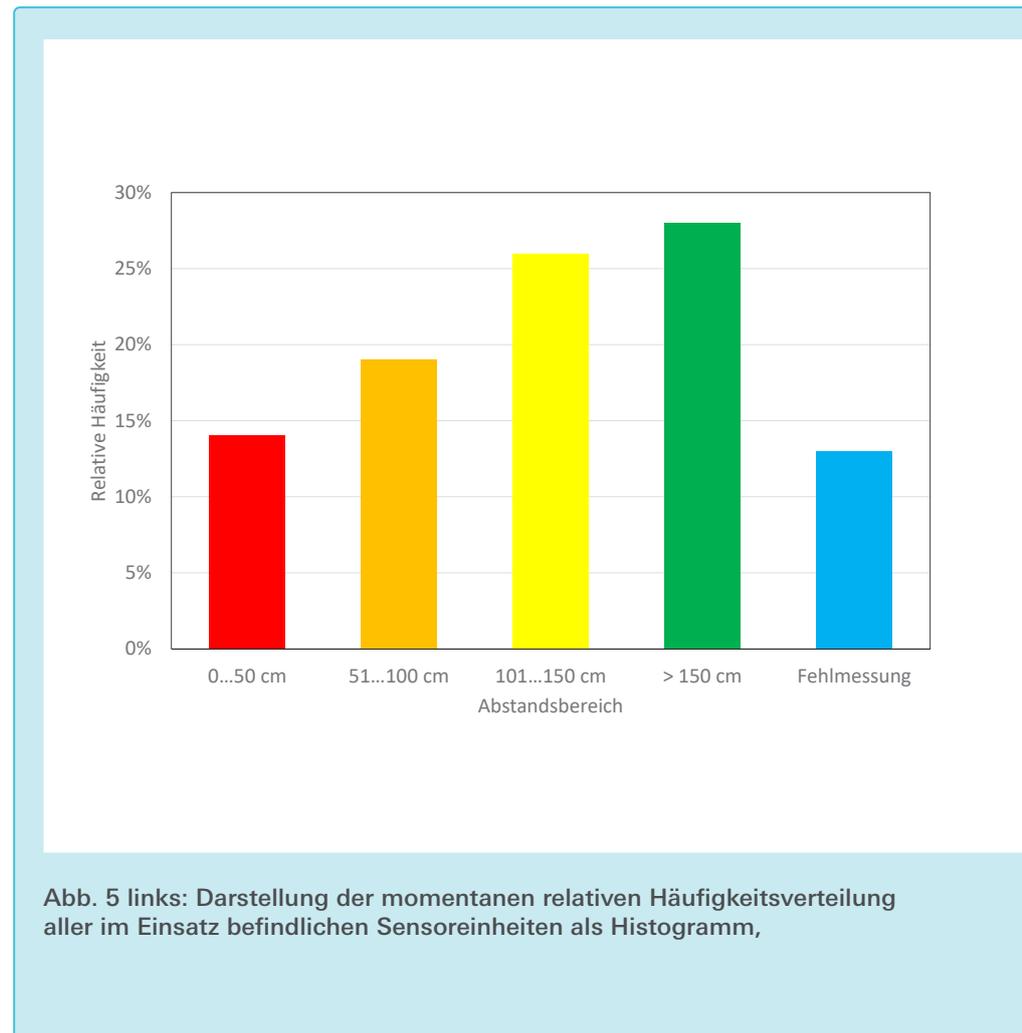


Abb. 5 links: Darstellung der momentanen relativen Häufigkeitsverteilung aller im Einsatz befindlichen Sensoreinheiten als Histogramm,

on gesendet. Der Empfänger ist hierbei ein weiterer Mikrocontroller. Er fasst die Daten zusammen und überträgt sie über den USB/COM-Port an einen Computer. Dort werden die Messwerte von einem Python-Programm interpretiert, sortiert und in regelmäßigen Zeitabständen in einer Datei gespeichert. Mithilfe einer Microsoft Excel Anwendung können die Messwerte in Echtzeit ausgelesen und dynamisch visualisiert werden.

Die Messwerte werden als relative Häufigkeiten in Histogrammform oder als gestapelte Säulendiagramme dargestellt. Sie können sowohl für alle Sensoreinheiten zusammen ([Abb. 5 links](#)) als auch für jede einzelne Sensoreinheit getrennt ([Abb. 5 rechts](#)) angezeigt werden. Zusätzlich kann der zeitliche Verlauf für einzelne oder alle Sensoren verfolgt werden ([Abb. 5 rechts unten](#)).

### 2.4 Vorstellung des Simulationstools

Zur Analyse des Abstandsverhaltens in Menschenansammlungen wurde ein Simulationstool mit Microsoft Excel erstellt. Die hier betrachtete quadratische Veranstaltungsfläche wird durch eine Tabelle aus  $20 \times 20$  Zellen dargestellt. Jede Zelle stellt dabei eine  $0,5 \times 0,5$  m<sup>2</sup> große Einheit dar ([Abb. 6 und 7](#)).

Personen, die sich jeweils in einer dieser Zellen befinden, werden durch die Rosa-Färbung der Zelle und einen Zahlenwert dargestellt. Diese Werte zwischen 1 und 8 beschreiben die Ausrichtung der Person. Dabei gilt die Kodierung aus [Abb. 6a](#). In die jeweilige Blickrichtung ist auch der (Ultraschall-) Sensor ausgerichtet, wobei dieser nicht nur Personen detektieren kann, die „exakt“ in dieser Richtung stehen, sondern dieser soll jeweils ein  $45^\circ$ -Blickfeld ( $\pm 22,5^\circ$ ) abde-



Abb. 5 rechts: Visualisierung der momentanen relativen Häufigkeitsverteilung jeder im Einsatz befindlichen Sensoreinheit als gestapeltes Säulendiagramm. Unterschieden werden in beiden Fällen die Kategorien: Abstand 0...50 cm (rot), Abstand 51...100 cm (orange), Abstand 101...150 cm (gelb) Abstand > 150 cm (grün), Fehlerrichtung (blau, Erklärung im Text)

cken können (Abb. 6b). Dieser Winkelbereich in der Simulation ist größer als der in Abschnitt 2.1 beschriebene. Dies ist der Tatsache der größeren Winkel-Diskretisierung in der Simulation von nur 8 Richtungen geschuldet, welche in der Folge jeweils einen Winkelbereich von  $360^\circ/8 = 45^\circ$  abdecken sollen.

Als Basis-Analyse ermittelt das Simulationstool die Abstände zwischen den Personen untereinander, wobei benachbarte Felder einen Abstand von „1 Feld“ haben, was einem Abstand von 0,5 m entspricht. Abb. 7 zeigt hierzu ein Beispiel.

Die Ergebnisse werden ebenfalls grafisch in Form von Histogrammen dargestellt. Im linken Säulendiagramm in Abb. 7 wird dazu die „klassische“ Abstandsmethode angewendet, welche im 360°-Umfeld nach dem kürzesten Abstand zur nächsten Person sucht (siehe Abschnitt 2.1). Dabei geben die auf

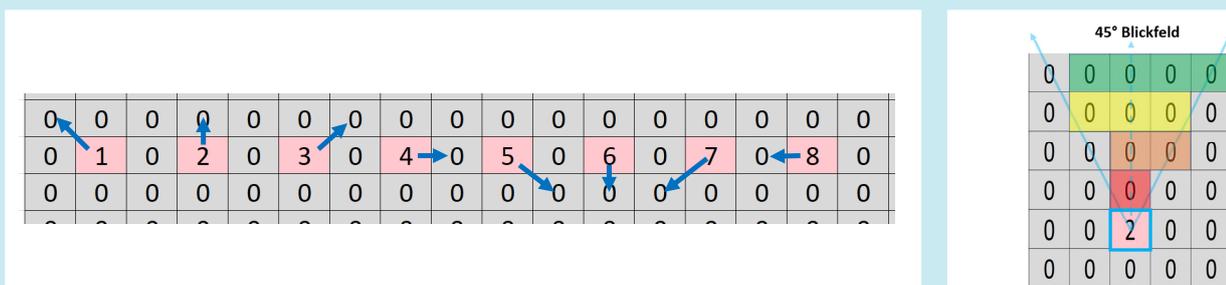


Abb. 6: (a) Kodierung der Blickrichtung der jeweiligen Person (rosa Zellen) durch die Zahlen 1 bis 8. Graue Felder mit einer „0“ sind unbesetzt, (b) Beispieldarstellung für das 45°-Blickfeld der richtungsabhängigen Sensor-Detektion von Abständen.



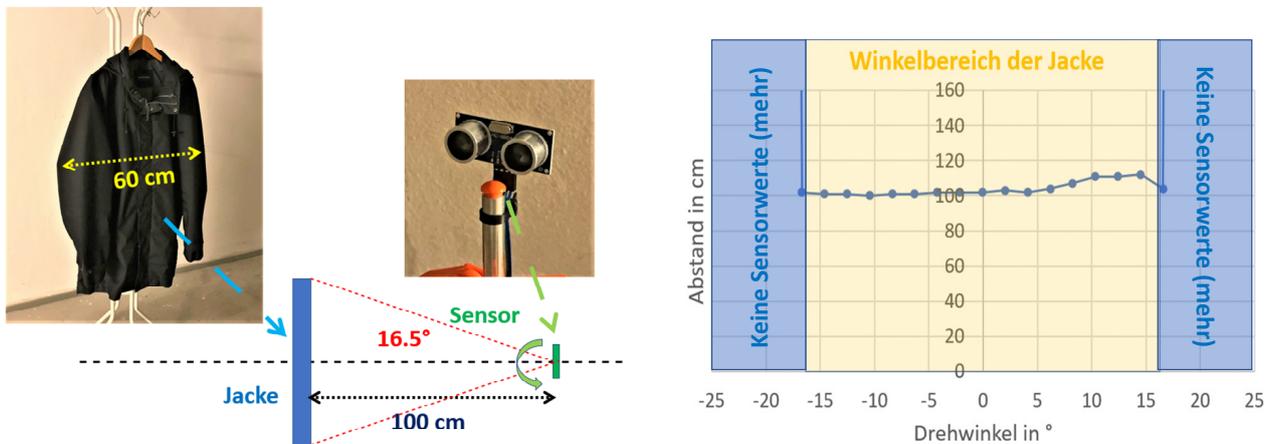


Abb. 8: Laborversuch zur Abstandsmessung an einer ruhenden, glatten Regenjacke. Die Messunsicherheit pro Messpunkt beträgt +/- 2 cm.

können Personen zwischen anderen „eingeklemmt sein“ oder der von Person A beseitigte „1 Feld“-Abstand wird „indirekt“ von Person B wieder erzeugt.

- **Ausgang ausrichten:** alle Personen drehen sich zum Ausgang. Dabei wird der gesamte Simulationsraum in fünf Bereiche aufgeteilt. Wenn sich in diesen Bereichen Personen befinden, werden deren Ausrichtungen zum Ausgang hin „gedreht“.
- **Eingang:** Im Zugang zum Gelände erscheinen neue Personen. Das Ma-

kro erzeugt per Zufall ein oder zwei Personen im Zugangsbereich. Dabei wird die Blickrichtung ebenfalls zufällig gewählt, allerdings ohne die Richtungen 5, 6 und 7 (siehe [Abb. 6](#)), welche die Personen direkt wieder aus dem Veranstaltungsgelände „führen“ würden.

### 3. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden sowohl messtechnische Ergebnisse zur Auflösung und Genauigkeit der mobilen Sensoreinheit präsentiert als auch die Messdaten eines durchgeführten Feldversuchs

vorgelegt. Diese Ergebnisse werden mit berechneten Daten des Simulationstools verglichen sowie weitere Simulationsrechnungen vorgestellt.

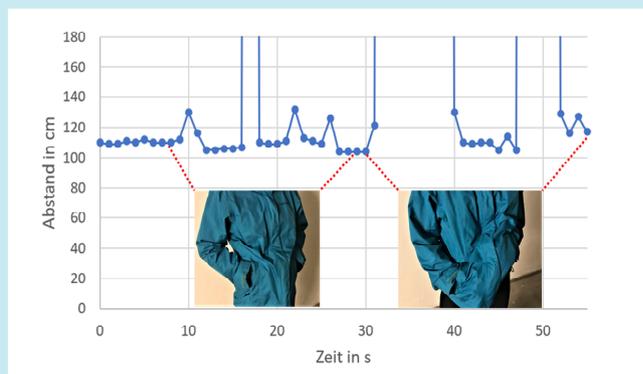
#### 3.1 Zur Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Abstandsmessung

Mit den im Folgenden beschriebenen Experimenten soll die Tauglichkeit des HC-SR04-Ultraschallsensors zur Bestimmung des Abstands zwischen Personen gezeigt werden.

In einem ersten Versuch wird der Sen-



a)



b)

Abb. 9: Laborversuche (a) zur Detektion des Abstands zu einer stehenden Person bei Drehung des Sensors und (b) zum Sensorverhalten bei faltiger Kleidung (ohne Sensordrehung). Die Messunsicherheit pro Messpunkt in (a) beträgt +/- 2 cm, in (b) wurden pro „Faltenwurf“ jeweils 10 Messpunkte im Abstand von einer Sekunde aufgenommen.

sor auf einem Stativ befestigt und der Abstand zu einer glatt herunterhängenden Regenjacke bestimmt. Dabei wird der Detektor zwischen den einzelnen Messungen um die vertikale Achse gedreht. Man erkennt im Diagramm aus [Abb. 8](#), dass der Sensor im Winkelbereich der Jacke sehr genau und zuverlässig den entsprechenden Abstand detektieren kann.

Trägt eine ruhig stehende Person diese Jacke ([Abb. 9a](#)), so kann der Sensor den Abstand ebenfalls sicher detektieren. Allerdings treten im Bereich der Ärmel erste Fehlmessungen auf, da hier die Kleidungsoberfläche nicht mehr senkrecht zum Detektor orientiert ist und daher reflektierte Ultraschall-Pulse nicht optimal zum Detektor zurückgeworfen werden. Stark faltenwerfende Kleidung ([Abb. 9b](#)) führt aus dem gleichen Grund zu Fehlmessungen.

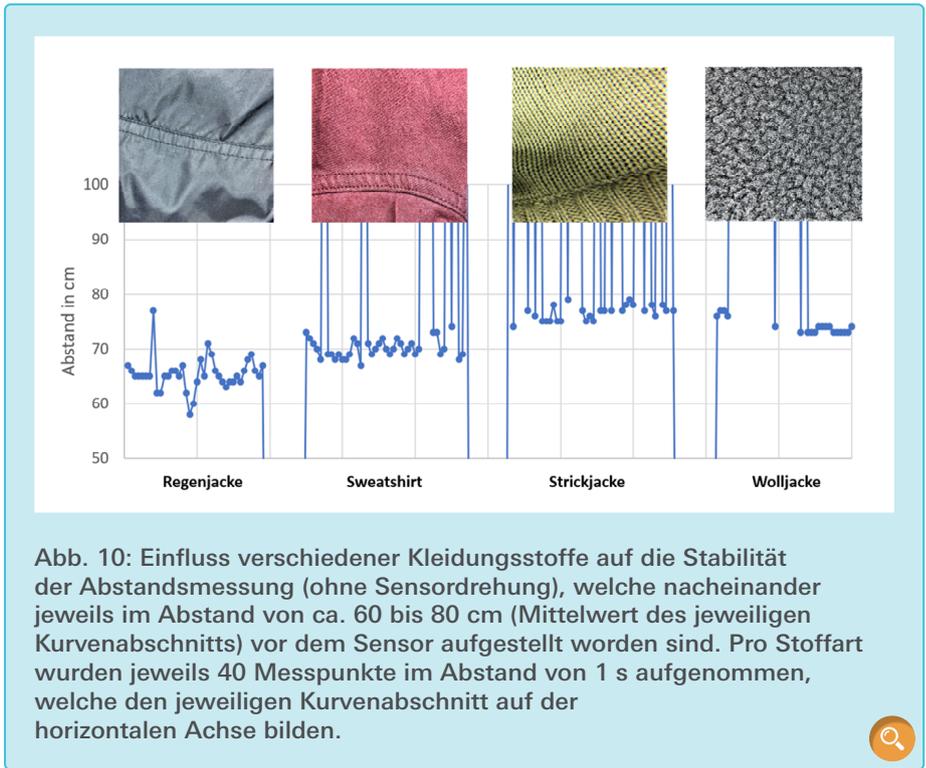
Grob gewebte Stoffe absorbieren einen Großteil des (Ultra-)Schalls, sodass es hier (selbst bei glatt liegenden Kleidungsstücken) zu Fehlmessungen kommt (siehe [Abb. 10](#)).

Fehlmessungen entstehen beim HC-SR04-/Ultraschallsensor dadurch, dass nach einem vom Sensor-Lautsprecher ausgesendeten Schallpuls kein oder nur ein zu schwaches Echo zum Mikrofon des Sensors zurückkommt. Wird dabei die maximale Echo-Wartezeit über-

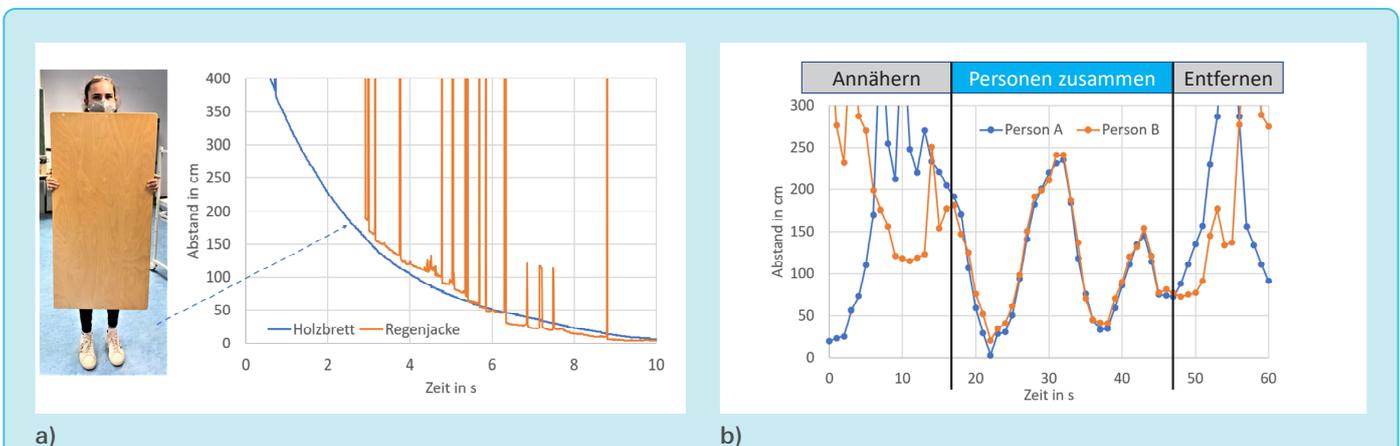
sritten, so gibt der Sensor einen Abstandswert außerhalb des spezifizierten Messbereichs (3 bis 400 cm) zurück. Die Mess-Software kann diesen Wert dadurch als Fehlmessung klassifizieren. Wenn der Sensor jedoch ein (Rest-) Echo erhält, kann daraus jeweils der korrekte Abstandswert mit einer Messunsicherheit von  $\pm 2$  cm bestimmt werden (Balken in [Abb. 10](#)).

Um dynamische Situationen zu studieren, werden in weiteren Experimenten Abstandsmessungen zu einer sich an-

nähernden Person kontinuierlich aufgezeichnet ([Abb. 11a](#)). Dabei trägt die Person in einem Vorversuch zunächst ein Holzbrett vor sich her, um die Reflexionsfläche für die Ultraschall-Pulse künstlich zu vergrößern. Als Resultat erhält man vom Sensor sehr zuverlässige Abstandswerte während der Annäherungsphase (blaue Kurve in [Abb. 11a](#)). Nähert sich die Person mit Regenjacke an, so entsteht zwar eine vergleichbare Kurve (orange), allerdings treten viele Fehlmessungen auf, bei denen der Sensor kein ausreichendes Ult-



**Abb. 10:** Einfluss verschiedener Kleidungsstoffe auf die Stabilität der Abstandsmessung (ohne Sensordrehung), welche nacheinander jeweils im Abstand von ca. 60 bis 80 cm (Mittelwert des jeweiligen Kurvenabschnitts) vor dem Sensor aufgestellt worden sind. Pro Stoffart wurden jeweils 40 Messpunkte im Abstand von 1 s aufgenommen, welche den jeweiligen Kurvenabschnitt auf der horizontalen Achse bilden.



**Abb. 11:** Laborversuche zur Abstandsmessung (a) an einer sich annähernden Person und (b) zwischen zwei sich im Bereich des Mindestabstands aufhaltenden Personen.

raschall-Echo detektieren kann.

In einem weiteren Experiment tragen zwei Personen jeweils eine Sensoreinheit und bewegen sich in einer Menschenmenge aufeinander zu (Abb. 11b). Während dieser Phase des „Annäherns“ registrieren beide Detektoren zunächst noch viele verschiedene Abstandssignale aus der Umgebung. Nach dieser Annäherung und dem bewussten „Zueinanderwenden“ und „Zusammenkommen“ beider Personen (ab  $t = 18$  s) sind die beiden registrierten Abstandskurven fast identisch und weisen in diesem Versuch nahezu keine Fehlmessung auf, u. a. weil beide Personen glatte Regenjacken mit guten Reflexionseigen-

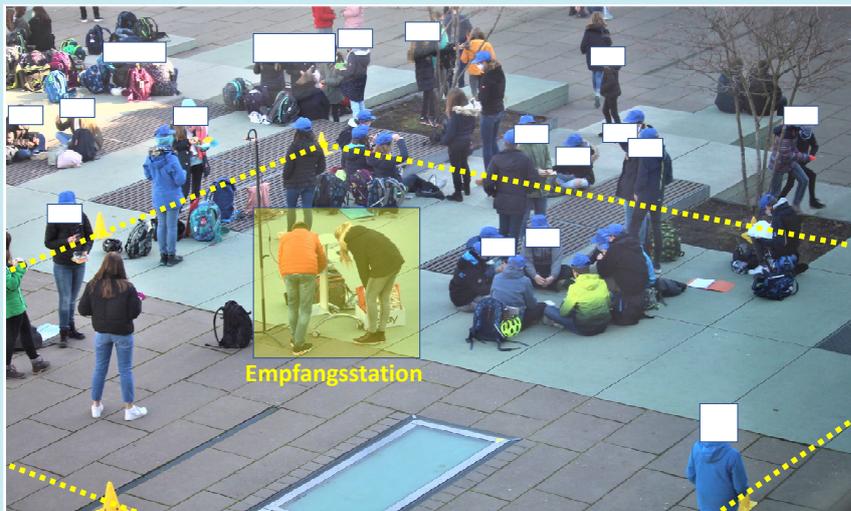
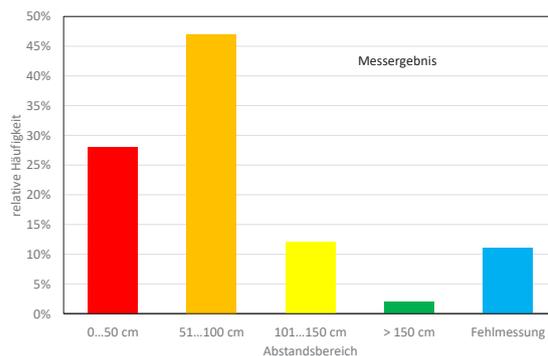
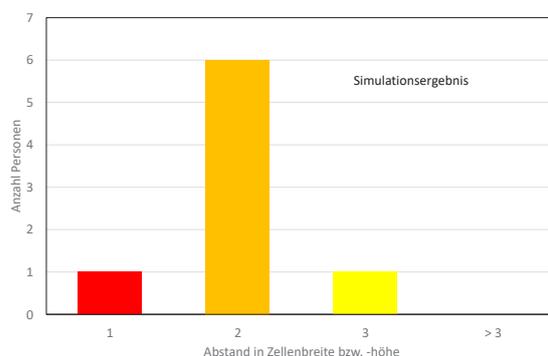


Abb. 12: Feldversuch auf dem Pausenhof des Gymnasiums Oberursel.



a)

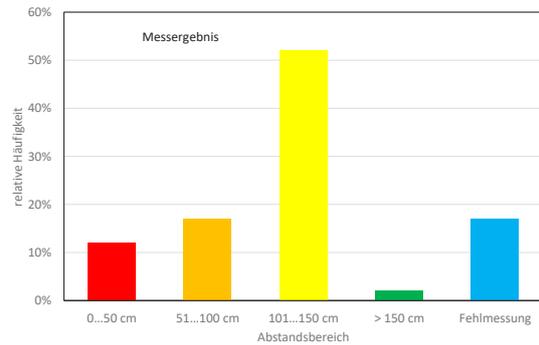
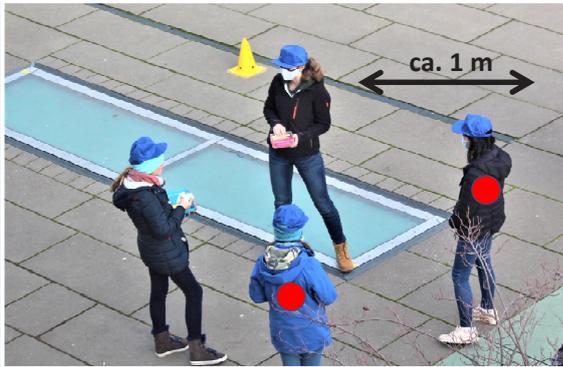
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	7	7	0	0	0
0	0	5	0	8	0	0	0
0	0	3	0	1	0	0	0
0	0	0	2	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0



b)

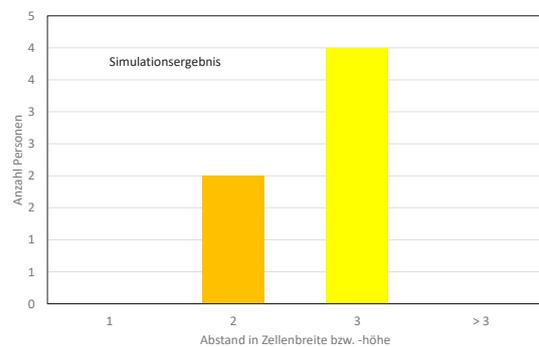
Abb. 13: Ergebnisse für eine Gruppe von sieben sitzenden, Karten spielenden Schülern, davon tragen drei eine Sensoreinheit (rote Punkte): (a) Messergebnisse der mobilen Sensoreinheiten. Das Messergebnis ist aus einem Zeitintervall von 3 Minuten ermittelt worden, in dem jede der drei Sensoreinheiten jeweils 180 Messwerte (1 Wert pro Sekunde) aufgezeichnet haben. Insgesamt ist die prozentuale Verteilung also aus 540 Messwerten erstellt worden. (b) Vergleichende Simulationsergebnisse, ausgewertet mit der richtungsabhängigen Abstandsbestimmung.





a)

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	6	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	4	0	0	8	0	0
0	0	0	0	2	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0



b)

Abb. 14: Ergebnisse für eine Gruppe von vier stehenden, sich unterhaltenden Schülerinnen, zwei davon tragen eine Sensoreinheit (rote Punkte): (a) Messergebnisse der mobilen Sensoreinheiten. Das Messergebnis ist aus einem Zeitintervall von 5 Minuten ermittelt worden, in dem beide Sensoreinheiten jeweils 300 Messwerte (1 Wert pro Sekunde) aufgezeichnet haben. Insgesamt ist die prozentuale Verteilung also aus 600 Messwerten erstellt worden. (b) Vergleichende Simulationsergebnisse, ausgewertet mit der richtungsabhängigen Abstandsbestimmung.

schaften tragen. Auch die von beiden Personen bewusst durchgeführte Variation des Abstands (ohne sich voneinander abzuwenden) kann von beiden Sensoren erfasst werden. Erst wenn die beiden Personen sich wieder voneinander abwenden und entfernen (ab  $t = 48$  s), unterscheiden die beiden Abstandskurven sich wieder und schwanken aufgrund der neuen Ausrichtung auf die Umgebung.

Zusammenfassend kann auf Basis dieser Ergebnisse festgestellt werden, dass die mobile Ultraschall-Sensoreinheit die Abstandsmessung zwischen Personen ermöglicht und mit den verwendeten Komponenten durchführbar ist. Kritische Faktoren sind dabei der Einfluss der Kleidungsstoffart, die Stoffglätte und die Ausrichtung der Stoffoberfläche zum Sensor.

### 3.2 Feldversuche auf dem Pausenhof

In einem Feldversuch wird dieses Messsystem auf dem Schulhof des Gymnasiums Oberursel während einer großen Pause angewendet. Dabei wird ein ca.  $10 \times 10 \text{ m}^2$  großes Areal abgesteckt, allerdings ohne es abzusperren (siehe Abb. 12). In diesem Areal halten sich für den Test ausgewählte Schülerinnen und Schüler auf, an den blauen Kappen auf den Fotos in den Abb. 12 bis 15 erkennbar.

Die Hälfte der Teilnehmenden trägt eine mobile Sensoreinheit, deren Messdaten per Funk an eine Empfangsstation gesendet werden. Im Rahmen der Auswertung der Messdaten konnten die folgenden Ergebnisse und Erkenntnisse gewonnen werden:

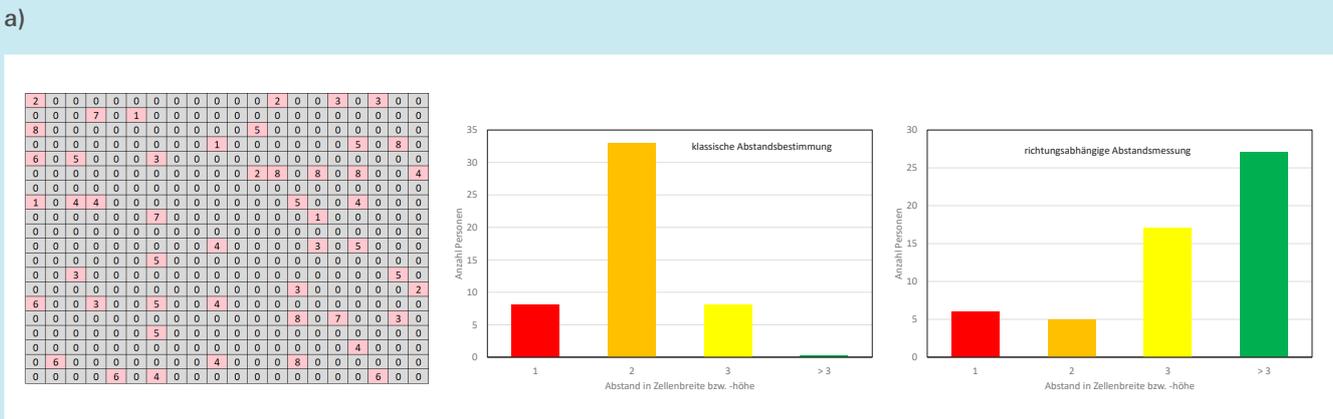
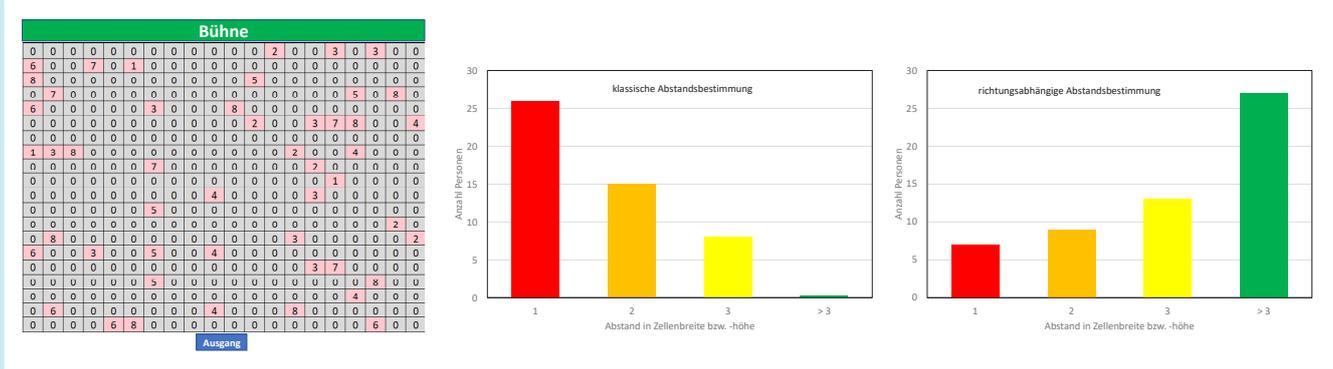
In einer Gruppe von sieben sitzenden, Karten spielenden Schülern tragen drei Teilnehmer eine Sensoreinheit. Abb. 13 zeigt dieses Szenario, die mit den mobilen Sensoreinheiten gemessene Abstandsverteilung und zum Vergleich entsprechende Simulationsergebnisse für die richtungsabhängige Abstandsverteilung (Abb. 13b und Anmerkungen in Abschnitt 2.4).

Man erkennt eine hohe Übereinstimmung zwischen den Messungen und der Simulation. Ins Kartenspiel vertieft beachten die Schüler den Mindestabstand nicht, erkennbar daran, dass der mittlere Abstand untereinander nur im Bereich 51 bis 100 cm liegt.

Bei diesem Ergebnis ist allerdings zu beachten, dass die Spielkarten, die die Schüler ebenfalls vor dem Körper halten,







b)

Abb. 17: (a) Nach dem Aufstehen nähern sich die Zuschauer in der Pause stark an, wenn sie nicht auf die Einhaltung des Mindestabstands achten; (b) Nach einer Lautsprecher-Durchsage verbessern die Teilnehmer ihren gegenseitigen Abstand.

teristischen“ Ergebnissen auf das Verhalten der gesamten Gruppe geschlossen werden.

Obwohl Kleidungsstoffe Ultraschall zu einem großen Teil absorbieren, reicht in den meisten Fällen das reflektierte Restecho aus, um eine sichere und zuverlässige Abstandsmessung zu erzielen. Erhält der Sensor jedoch kein Echo, so liegt eine Fehlmessung vor. Dies kann darin begründet sein, dass sich im Messbereich (3 bis 400 cm) keine Person und/oder kein Objekt befindet, oder dass das Echo aufgrund der Kleidungsstoff-Art oder der hohen Falzigkeit des Stoffs zu gering ist. Fehlmessungen erkennt das Mess-System (Werte größer 400 cm) und berücksichtigt diese Ergebnisse bei der statistischen Auswertung nicht.

Nicht unterschieden werden kann jedoch, ob der von der Sensoreinheit detektierte Abstand zu einer anderen Person oder zu einem Objekt/Hindernis gehört. Bezüglich dieser Problematik gibt es derzeit noch keinen Lösungsansatz. Findet die Veranstaltung jedoch auf freiem Gelände statt (beispielsweise Open Air Konzert oder Demonstration), so gibt es hier normalerweise weniger unbewegliche Objekte oder Hindernisse, sodass derartige Messungen eher selten vorkommen.

Blue Tooth basierte Contact Tracer Systeme [7] weisen diese Problematik nicht auf, da diese „nur“ die Abstände zwischen benachbarten Sensoreinheiten messen und somit keine Fehlmessungen von unbeweglichen Objekten erhalten. Dafür punktet die Abstandsmessung mit Ultraschall-Sensoren damit, dass nur eine Stichprobe der Teilnehmenden Sensoreinheiten zu tragen braucht.

Durch das Zusammenspiel der datensendenden Software-Codes in den mobilen Sensoreinheiten und dem datenempfangenden und auswertenden Programm auf dem Veranstalter-PC erhält das Organisationsteam nahezu zeitgleich die aktuelle Abstandsverteilung zwischen den Teilnehmenden. Im Rahmen eines Feldversuchs konnten mit diesem Mess-System verschiedene Situationen erfolgreich vermessen und analysiert werden. Dabei unterstützt auch das vorgestellte Simulationstool, mit dem die Abstandsverteilungen in den untersuchten Situationen numerisch analysiert und mit den Messungen verglichen werden. Der Algorithmus kann die Abstandsverteilung sowohl für isotrope als auch für richtungsabhängige Messmethoden berechnen.

Darüber hinaus lassen sich mit diesem Simulationstool auch weitere typische Szenarien simulieren und analysieren.



## Literaturverzeichnis

- [1] Übersicht zur Covid19-Pandemie beispielsweise auf <https://de.wikipedia.org>
- [2] Übersicht zu den A.H.A.-Regeln beispielsweise auf <https://de.wikipedia.org>
- [3] Justin Morgenstern, „COVID-19 is spread by aerosols: an evidence review“, <https://first10em.com/>
- [4] Übersicht zur Corona-Warn-App beispielsweise auf: <https://de.wikipedia.org>
- [5] Die Luca-App: <https://www.luca-app.de/>
- [6] Forschungsprojekt Restart-19 der Universität Halle (Saale): <https://restart19.de/>
- [7] Eine Übersicht zu Blue Tooth basierendem Contact Tracing findet sich unter: Douglas J. Leith, Stephen Farrell, „Coronavirus Contact Tracing: Evaluating The Potential Of Using Bluetooth Received Signal Strength For Proximity Detection“ [https://www.scss.tcd.ie/Doug.Leith/pubs/bluetooth\\_rssi\\_study.pdf](https://www.scss.tcd.ie/Doug.Leith/pubs/bluetooth_rssi_study.pdf)
- [8] Der Corona Abstandswarner von ESG Mobility: <https://esg-mobility.com/start>
- [9] Gorbunov, „B. Aerosol Particles Laden with Viruses That Cause COVID-19 Travel Over 30m Distance“ Preprints 2020, 2020040546 (doi: 10.20944/preprints202004.0546.v2).
- [10] HC-SR04 Datenblatt beispielsweise unter: <https://www.alldatasheet.com/>

# Publiziere auch Du hier!

Forschungsarbeiten von  
Schüler/Inne/n und Student/Inn/en

In der Jungen Wissenschaft werden Forschungsarbeiten von SchülerInnen, die selbstständig, z. B. in einer Schule oder einem Schülerforschungszentrum, durchgeführt wurden, veröffentlicht. Die Arbeiten können auf Deutsch oder Englisch geschrieben sein.

## Wer kann einreichen?

SchülerInnen, AbiturientInnen und Studierende ohne Abschluss, die nicht älter als 23 Jahre sind.

## Was musst Du beim Einreichen beachten?

Lies die [Richtlinien für Beiträge](#). Sie enthalten Hinweise, wie Deine Arbeit aufgebaut sein soll, wie lang sie sein darf, wie die Bilder einzureichen sind und welche weiteren Informationen wir benötigen. Solltest Du Fragen haben, dann wende Dich gern schon vor dem Einreichen an die Chefredakteurin Sabine Walter.

Lade die [Erstveröffentlichungserklärung](#) herunter, drucke und fülle sie aus und unterschreibe sie.

Dann sende Deine Arbeit und die Erstveröffentlichungserklärung per Post an:

**Chefredaktion Junge Wissenschaft**  
Dr.-Ing. Sabine Walter  
Paul-Ducros-Straße 7  
30952 Ronnenberg  
Tel: 05109 / 561508  
Mail: [sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de](mailto:sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de)

## Wie geht es nach dem Einreichen weiter?

Die Chefredakteurin sucht einen geeigneten Fachgutachter, der die inhaltliche Richtigkeit der eingereichten Arbeit überprüft und eine Empfehlung ausspricht, ob sie veröffentlicht werden kann (Peer-Review-Verfahren). Das Gutachten wird den Euch, den AutorInnen zugeschickt und Du erhältst gegebenenfalls die Möglichkeit, Hinweise des Fachgutachters einzuarbeiten.

Die Erfahrung zeigt, dass Arbeiten, die z. B. im Rahmen eines Wettbewerbs wie **Jugend forscht** die Endrunde erreicht haben, die besten Chancen haben, dieses Peer-Review-Verfahren zu bestehen.

Schließlich kommt die Arbeit in die Redaktion, wird für das Layout vorbereitet und als Open-Access-Beitrag veröffentlicht.

## Was ist Dein Benefit?

Deine Forschungsarbeit ist nun in einer Gutachterzeitschrift (Peer-Review-Journal) veröffentlicht worden, d. h. Du kannst die Veröffentlichung in Deine wissenschaftliche Literaturliste aufnehmen. Deine Arbeit erhält als Open-Access-Veröffentlichung einen DOI (Data Object Identifier) und kann von entsprechenden Suchmaschinen (z. B. BASE) gefunden werden.

Die Junge Wissenschaft wird zusätzlich in wissenschaftlichen Datenbanken gelistet, d. h. Deine Arbeit kann von Experten gefunden und sogar zitiert werden. Die Junge Wissenschaft wird Dich durch den Gesamtprozess des Erstellens einer wissenschaftlichen Arbeit begleiten – als gute Vorbereitung auf das, was Du im Studium benötigst.



# Richtlinien für Beiträge

Für die meisten Autor/Inn/en ist dies die erste wissenschaftliche Veröffentlichung. Die Einhaltung der folgenden Richtlinien hilft allen – den Autor/innen/en und dem Redaktionsteam

Die Junge Wissenschaft veröffentlicht Originalbeiträge junger AutorInnen bis zum Alter von 23 Jahren.

- Die Beiträge können auf Deutsch oder Englisch verfasst sein und sollten nicht länger als 15 Seiten mit je 35 Zeilen sein. Hierbei sind Bilder, Grafiken und Tabellen mitgezählt. Anhänge werden nicht veröffentlicht. Deckblatt und Inhaltsverzeichnis zählen nicht mit.
- Formulieren Sie eine eingängige Überschrift, um bei der Leserschaft Interesse für Ihre Arbeit zu wecken, sowie eine wissenschaftliche Überschrift.
- Formulieren Sie eine kurze, leicht verständliche Zusammenfassung (maximal 400 Zeichen).
- Die Beiträge sollen in der üblichen Form gegliedert sein, d. h. Einleitung, Erläuterungen zur Durchführung der Arbeit sowie evtl. Überwindung von Schwierigkeiten, Ergebnisse, Schlussfolgerungen, Diskussion, Liste der zitierten Literatur. In der Einleitung sollte die Idee zu der Arbeit beschrieben und die Aufgabenstellung definiert werden. Außerdem sollte sie eine kurze Darstellung schon bekannter, ähnlicher Lösungsversuche enthalten (Stand der Literatur). Am Schluss des Beitrages kann ein Dank an Förderer der Arbeit, z. B. Lehrer und Sponsoren, mit vollständigem Namen angefügt werden. Für die Leser kann ein Glossar mit den wichtigsten Fachausdrücken hilfreich sein.
- Bitte reichen Sie alle Bilder, Grafiken und Tabellen nummeriert und zusätzlich als eigene Dateien ein. Bitte geben Sie bei nicht selbst erstellten Bildern, Tabellen, Zeichnungen, Grafiken etc. die genauen und korrekten Quellenangaben an (siehe auch [Erstveröffentlichungserklärung](#)). Senden Sie Ihre Bilder als Originaldateien oder mit einer Auflösung von mindestens 300 dpi bei einer Größe von 10 · 15 cm! Bei Grafiken, die mit Excel erstellt wurden, reichen Sie bitte ebenfalls die Originaldatei mit ein.
- Vermeiden Sie aufwendige und lange Zahlentabellen.
- Formelzeichen nach DIN, ggf. IUPAC oder IUPAP verwenden. Gleichungen sind stets als Größengleichungen zu schreiben.
- Die Literaturliste steht am Ende der Arbeit. Alle Stellen erhalten eine Nummer und werden in eckigen Klammern zitiert (Beispiel: Wie in [12] dargestellt ...). Fußnoten sieht das Layout nicht vor.
- Reichen Sie Ihren Beitrag sowohl in ausgedruckter Form als auch als PDF

ein. Für die weitere Bearbeitung und die Umsetzung in das Layout der Jungen Wissenschaft ist ein Word-Dokument mit möglichst wenig Formatierung erforderlich. (Sollte dies Schwierigkeiten bereiten, setzen Sie sich bitte mit uns in Verbindung, damit wir gemeinsam eine Lösung finden können.)

- Senden Sie mit dem Beitrag die [Erstveröffentlichungserklärung](#) ein. Diese beinhaltet im Wesentlichen, dass der Beitrag von dem/der angegebenen AutorIn stammt, keine Rechte Dritter verletzt werden und noch nicht an anderer Stelle veröffentlicht wurde (außer im Zusammenhang mit **Jugend forscht** oder einem vergleichbaren Wettbewerb). Ebenfalls ist zu versichern, dass alle von Ihnen verwendeten Bilder, Tabellen, Zeichnungen, Grafiken etc. von Ihnen veröffentlicht werden dürfen, also keine Rechte Dritter durch die Verwendung und Veröffentlichung verletzt werden. Entsprechendes [Formular](#) ist von der Homepage [www.junge-wissenschaft.ptb.de](http://www.junge-wissenschaft.ptb.de) herunterzuladen, auszudrucken, auszufüllen und dem gedruckten Beitrag unterschrieben beizulegen.
- Schließlich sind die genauen Anschriften der AutorInnen mit Telefonnummer und E-Mail-Adresse sowie Geburtsdaten und Fotografien (Auflösung 300 dpi bei einer Bildgröße von mindestens 10 · 15 cm) erforderlich.
- Neulingen im Publizieren werden als Vorbilder andere Publikationen, z. B. hier in der Jungen Wissenschaft, empfohlen.



# Impressum

[JUNGE]  
wissenschaft



## Junge Wissenschaft

c/o Physikalisch-Technische  
Bundesanstalt (PTB)  
[www.junge-wissenschaft.ptb.de](http://www.junge-wissenschaft.ptb.de)

## Redaktion

Dr. Sabine Walter, Chefredaktion  
Junge Wissenschaft  
Paul-Ducros-Str. 7  
30952 Ronnenberg  
E-Mail: [sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de](mailto:sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de)  
Tel.: 05109 / 561 508

## Verlag

Dr. Dr. Jens Simon,  
Pressesprecher der PTB  
Bundesallee 100  
38116 Braunschweig  
E-Mail: [jens.simon@ptb.de](mailto:jens.simon@ptb.de)  
Tel.: 0531 / 592 3006  
(Sekretariat der PTB-Pressestelle)

## Design & Satz

Sebastian Baumeister  
STILSICHER - Grafik & Werbung  
E-Mail: [baumeister@stilsicher.design](mailto:baumeister@stilsicher.design)  
Tel.: 05142 / 98 77 89

