Andreas Wünschmann
Relativitätstheorie und Quantenphysik

Neuauflage
für den Physikunterricht

Sonderdruck Mai 2020
für Schüler mit Leistungskurs Physik,
Studenten und Physiklehrer.

Dieses Buch enthält als Sammelband die beiden Schriften **E=mc²** und **Der Weg zur Quantenmechanik**, erweitert durch die Themen Zwillingsparadoxon, GPS und Höhepunkt der griechischen Mathematik.

256 Seiten, 97 Abb., 30 Skizzen,
Format: 20 x 27 cm
ISBN 978-3-00-064229-6



Mit einem Vorwort des Nobelpreisträgers für Physik Klaus von Klitzing

„Kenne kein besseres Werk in deutscher Sprache, das geeignet ist, die beiden großen Theorien des 20. Jahrhunderts Schülern/-innen zu vermitteln. Es ist leicht verständlich und didaktisch hervorragend gestaltet. Es sollte in allen Gymnasien als Standardwerk benutzt werden.“

**Prof. Dr. Hans-Ulrich Keller,
Astronomie Universität Stuttgart**

„Ich bin einfach begeistert von diesem Buch und möchte mich sehr bedanken dafür, dass Sie uns diesen Einblick in das Thema ermöglicht haben.“

**Christina Wiegner, Schülerin der Klasse 12,
Helmholtz-Gymnasium Karlsruhe**

„Ihre Art und Weise zu schreiben hat mir sehr gut gefallen und so las sich das Buch sehr leicht. Ich bin Ihnen sehr dankbar, dass Sie sich die Mühe gegeben haben, ein Physikbuch so anschaulich und verständlich zu schreiben!“

Rebekka Lange, Schülerin

„Es lässt sich sehr gut mit dieser Schrift arbeiten, ob im Unterricht oder für eine Arbeit.“

**Kendra-Sophie Kollmer,
Markgräfin-Wilhelmine-Gymnasium in Bayreuth**

„Mein Physiklehrer hat mir Ihr Buch im Rahmen meiner Projektarbeit im Fach Physik empfohlen. Jedesmal, wenn ich dieses Buch aufschlage, bin ich gefangen und muss weiterlesen.“

Muhamet Alija, Studentin TU Dortmund

„Und immer wieder ist zu sagen: Ihre Hinführung zum Verstehen der Quantenphysik ist einfach wunderbar.“

**Heinz Durner, OStD i.R.,
Mathematik- und Physiklehrer des Lise-Meitner-Gymnasiums Unterhaching**

„Ich hatte mir vorgenommen, Ihnen einmal mitzuteilen, wie sehr Ihr schönes Buch meinem Unterricht zugute kommt.“

Dr. Andreas Poll, Christophorusschule Königswinter

„Nicht nur ich, sondern auch unsere Schüler sind sehr von diesem Buch angetan.“

Dr. Winfrid Gade, Fördegymnasium Flensburg

„Besser kann man die Inhalte auf Gymnasialniveau nicht vermitteln.“

StD Franz Steinleitner, Gymnasium Untergriesbach

Einzelexemplar: € 28,80 zzgl. Versand

Bestellungen bitte an:

Studien-Verlag Wünschmann

Am Kahlenbergring 38
67292 Kirchheimbolanden
Tel.: 06352/1883
E-mail: sv-wuenschmann@t-online.de
www.sv-wuenschmann.de

Die universale Bedeutung der Gleichung $E = mc^2$ 5

- Niemand kann Energie erzeugen oder vernichten: Wir können Energie nur umwandeln
- Das Rätsel der Sonnenenergie
- 1905 veröffentlichte Einstein seine berühmte Gleichung $E = mc^2$
- Eindrucksvolle Bestätigung der Einstein-Gleichung: Die direkte Umwandlung von Strahlung in Materie und umgekehrt
- Nach der Gleichung $E = mc^2$ wird die Sonne in jeder Sekunde um vier Millionen Tonnen leichter

Wer war Albert Einstein? 11

- Schule und Studium
- Als Hilfsgutachter in Bern veröffentlichte Einstein 1905 seine drei epochemachenden Arbeiten
- Höhepunkt in Einsteins Schaffen: Die allgemeine Relativitätstheorie
- Das Dritte Reich schlägt zu
- Der Brief an Roosevelt
- Grundsätzliche Ideen und Prinzipien spielten bei Einstein eine große Rolle
- Einstein im Gespräch

Vom magischen zum naturwissenschaftlichen Weltbild 22

- Magie und Zauberei bestimmten die Welt des archaischen Menschen
- Wissenschaftliches Denken beginnt mit der Trennung von Außenwelt und Innenwelt
- Ursache und Wirkung
- Achtung vor den Tatsachen
- Wechselspiel Theorie-Experiment
- Präzision der Sprache
- Physik als geistige Gemeinschaftsleistung
- Was heißt Fortschritt in der theoretischen Physik ?
- Einordnung der speziellen Relativitätstheorie in das Theoriengebäude der Physik

Beispiele zur Veranschaulichung 28

- Das Ergebnis des Michelson-Morley-Experimentes
- Das Einsteinsche Additionsgesetz der Geschwindigkeiten
- Zunahme der Masse eines Teilchens mit wachsender Geschwindigkeit
- Die Äquivalenz von Masse und Energie
- Lichtquanten unterliegen der Gravitation
- Elektronen kommen in Beschleunigern wegen ihrer winzigen Masse schnell in den relativistischen Bereich
- Ein Beispiel aus der modernen Physik: Schnell fliegende Teilchen zerfallen langsamer als ruhende
- Die Lorentzkontraktion
- Einstein hat ein Invarianzgesetz gefunden

Die Lorentz-Transformation 41

- Ortsabhängigkeit des Uhrenstandes. Relativität der Gleichzeitigkeit
- Die relativistische Zeitdehnung
- Die Lorentz-Kontraktion
- Das Einsteinsche Additionsgesetz der Geschwindigkeiten
- Die Gleichwertigkeit der beiden Bezugssysteme S und S'

Relativistischer Doppler-Effekt und Expansion des Universums 46

- Der relativistische Doppler-Effekt
- Das Hubble-Gesetz
- Fazit

Albert Einstein: Motive des Forschens 53

Rechenbeispiele 56

- Relativistische Massenzunahme
- Herleitung der Formel $m = m_0 / \sqrt{1-\beta^2}$
- Äquivalenz von Masse und Energie
- Lorentzkontraktion
- Relativistische Zeitdehnung
- Relativistischer Dopplereffekt
- Relativistischer Impuls
- Erhaltungssätze und Materialisation von Strahlung
- Geladene Teilchen im homogenen Magnetfeld
- Die Entdeckung des Antiprotons p^-

Das Michelson-Morley-Experiment 71

Die spezielle Relativitätstheorie ist im Kern eine Invarianztheorie 74

- Invarianz der quadratischen Form $x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$
- Invarianz der quadratischen Form $p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - \frac{E^2}{c^2}$
- Invarianz der quadratischen Form $j_x^2 + j_y^2 + j_z^2 - c^2 \varrho^2$
- Fazit
- Invarianz und Myonen-Experiment
- Die Lorentz-Invarianz der elektrischen Ladung Q

Relativistische Mechanik 82

- Wie geht die relativistische Mechanik aus der Newtonschen hervor?
- Einsteins Modifikation der Newtonschen Grundgleichung
- Im Bereich hoher Geschwindigkeit geht nach Einstein die Beschleunigung gegen Null
- $E_{kin.}$ nach Newton und Einstein
- Kein Körper kann nach Einstein Lichtgeschwindigkeit erreichen

Der Compton-Effekt 88

Bilddokumentation 91

- Gleichheit von schwerer und träger Masse
- Äquivalenzprinzip der ART
- 1919: Die offizielle Verkündigung der britischen Expeditionsergebnisse durch die Royal Society machte Einstein weltberühmt
- 1922 erhielt Einstein den Nobelpreis für Physik

SRT, ART und GPS 105

- Zeittafel
- Einstein und Newton im Vergleich
- Das Zwillingsparadoxon
- Ruhenergien einiger Elementarteilchen und leichter Kerne
- Äquivalenzprinzip und gravitative Rotverschiebung
- Im Gravitationsfeld gehen die Uhren langsamer
- Zusammenspiel von SRT und ART
- Nur mit Einstein funktioniert das GPS

Personenregister 115

Verwendete Literatur 116

Physikalische Konstanten und Maßeinheiten 117

I Ähnlichkeit zwischen Lichtstrahl-weg und Teilchenbahn 4
- Geradlinige Ausbreitung des Lichtstrahles entspricht dem Trägheitsgesetz der Mechanik
- Das Brechungsgesetz
- Weitere Ähnlichkeit
- Ergebnis
- Die Frage Schrödingers

II Der Dualismus beim Licht: Welle - Teilchen 9
- Die Quantennatur des Lichtes
- Der lichtelektrische Effekt
- Der Compton-Effekt
- Zusammenfassung

III Der Dualismus bei der Materie: Teilchen - Welle 16
- Die Versuche von Davisson und Germer (1927)
- Beispiel für die Wellenlänge von Elektronen
- Ergebnis

IV Der Weg zur (eindimensionalen, zeitunabhängigen) Schrödinger - Gleichung 19
- Gleichförmige Kreisbewegung und harmonische Schwingung
- Entstehung von Wellen
- Mathematische Beschreibung der Wellenbewegung
- Die zeitunabhängige Wellengleichung
- Die berühmte zeitunabhängige Schrödinger-Gleichung
- Zusammenfassung
- Die Interpretation der ψ-Funktion

V Wer war Erwin Schrödinger? 27

VI Der unendlich hohe Potentialtopf 30
- Energiewerte und Aufenthaltswahrscheinlichkeit nach der klassischen Mechanik
- Energiewerte und Aufenthaltswahrscheinlichkeit nach der alten Bohr'schen Theorie
- Energiewerte und Aufenthaltswahrscheinlichkeit nach der Quantenmechanik (1926)
- Einige Eigenschaften der Eigenfunktionen
- Heisenberg'sche Unschärfebeziehung
- Im Grenzfall großer Quantenzahlen n geht die quantenmechanische Beschreibung in die klassische über

VII Der quantenmechanische Tunneleffekt 39
- Klassisch
- Quantenmechanisch
- Der Tunneleffekt

VIII Die Heisenberg'schen Unbestimmtheitsrelationen 43
- Wellenphysik + de Broglie - Beziehung ergibt Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation $\Delta p \cdot \Delta x \approx h$
- Beugung von Elektronen am Spalt
- Heisenberg'sche Unschärferelation und Größe der Atome
- Jede Messung im Bereich der Mikrophysik verursacht eine prinzipielle Störung
- In der Mikrophysik ist daher grundsätzlich eine Bahn des Elektrons um den Atomkern nicht beobachtbar
- Zusammenfassung

IX Der harmonische Oszillator im Grundzustand nach Schrödinger 48
- Nach der klassischen Mechanik
- Quantenmechanische Behandlung des harmonischen Oszillators im Grundzustand (= niedrigster Energiezustand)
- Klassische und quantenmechanische Wahrscheinlichkeitsdichte für den niedrigsten Energiezustand $E_0 = \frac{\hbar \cdot \omega}{2}$
- Das quantenmechanische Phänomen der Nullpunktsenergie

X Schrödinger-Gleichung und quantisierte Energieniveaus 52
- Graphische Konstruktion der Eigenfunktionen des Oszillators im tiefsten Energiezustand
- Ergebnis

XI Das H-Atom im Grundzustand nach Bohr und Schrödinger 55
- Der Bohrsche Radius $a_1 = 0{,}53$ Å
- Gesamtenergie des Elektrons auf der Bohrschen Bahn für $n = 1$: $E_1 = -13{,}6$ eV
- Das H-Atom im Grundzustand nach Schrödinger
- Das 1 s - Orbital $\psi_{100} = (\pi a_1^3)^{-1/2} e^{-r/a_1}$
- Quantenmechanische Deutung des Bohrschen Radius a_1
- Mathematische Hilfsmittel: Kettenregel, Produktintegration, partielle Ableitungen
- Kettenregel
- Produktintegration
- Partielle Ableitungen einer Funktion mehrerer Veränderlicher

XII Das Theoriengebäude der Physik 63
- Die vier großen abgeschlossenen Bereiche der Physik
- Was heißt Fortschritt in der theoretischen Physik?

XIII s- und p- Orbitale des H-Atoms 66
- Gesamtenergie des Elektrons beim H-Atom auf der n-ten Bahn nach Bohr
- Energieeigenwerte E_n und Eigenfunktionen $\psi_{n\ell m}$ beim H-Atom nach Schrödinger
- Die Bedeutung der Quantenzahlen n, ℓ, m
- Die s-Orbitale ψ_{100}, ψ_{200}, ψ_{300}
- Die 2p-Orbitale ψ_{21-1}, ψ_{210}, ψ_{211}

XIV Elektronenspin - Pauli-Verbot - Periodensystem 75
- Der Elektronenspin
- Das Pauli-Verbot
- Der Aufbau des Periodensystems der chemischen Elemente

XV Richtungsabhängigkeit der kovalenten Bindung 79
- s-s-Bindung, s-p-Bindung und p-p-Bindung sind verschieden stark
- Die p-Orbitale stehen senkrecht aufeinander
- Die Sonderstellung des Wassers in der Natur
- Die Bedeutung des Pauli-Verbotes für den Aufbau unserer Welt

XVI Das Fermi-Elektronengas 82
- Kein Beitrag zur spezifischen Wärme
- Energieverteilung des Elektronengases in Metallen bei $T = 0$ °K

XVII Die Kontroverse Einstein - Bohr 86
- „Der liebe Gott würfelt nicht"
- Das Photon im Kasten

XVIII Am Anfang der Quantenphysik stand Max Planck 93
- Persönliche Erinnerungen
- Plancks Entdeckung revolutionierte die Physik
- Plancks Unterredung mit Hitler im Jahr 1933
- Die Situation in der Physik vor 1900
- Hohlraumstrahlung und Plancksches Strahlungsgesetz

XIX Die Geburt der Atomhypothese und Wissenschaft im klassischen Griechenland 102
- Das goldene Zeitalter unter Perikles
- Anaxagoras (um 488 - 428 v. Chr.)
- Hippokrates (460 - 377 v. Chr.)
- Die Atomlehre von Leukipp und Demokrit
- Der Glaube an die Mathematisierbarkeit des Naturgeschehens am Beispiel Pythagoras – Balmer – Bohr
- Höhepunkt der griechischen Mathematik

XX Elementare Rechenbeispiele 112
- Fotoeffekt
- Spektren
- Klassisch oder relativistisch?
- Empfindlichkeit des menschlichen Auges
- Bohrsches Korrespondenzprinzip 1917
- Bohrscher Radius und Energieminimum
- Verfeinerung des Bohrschen Atommodells
- Experimenteller Nachweis der Kernmitbewegung
- Heisenbergsche Unschärferelation
- Der Dimensions – check

Personenregister 123

Literatur- und Bildnachweis 124

Physikalische Konstanten und Maßeinheiten 125