



Die Chlor-Knallgas-Reaktion – einfach und sicher aktiviert durch Laserpointer

Tom Wagner* und Alfred Flint*^[a]

Stichworte: Chlor-Knallgas · Laserpointer · Volumenkonstanz

1. Einleitung

Die Chlor-Knallgas-Reaktion ist inzwischen seit mehr als 200 Jahren bekannt. Sie übt nach wie vor eine große Faszination sowohl auf Experimentatoren als auch Zuschauer aus, da die beiden gasförmigen Stoffe Chlor und Wasserstoff durch Licht initiiert sehr heftig miteinander reagieren. In einem bemerkenswerten Artikel hat Obendrauf [1] sowohl die lange Geschichte mit vielen unterschiedlichen interessanten Variationen als auch die damit verbundenen Probleme bezüglich der zuverlässigen Zündung des Gasgemisches und der Sicherheit beleuchtet. Schließlich schlägt er eine Variante vor, in der Chlor und Wasserstoff in der nach ihm benannten „Low-Cost-Gasentwicklungsapparatur“ hergestellt, in einer Plastikspritze gemischt und dann mit einem Elektronenblitz mit der Leitzahl 20 gezündet werden. Durch vor den Blitz gehaltene rot bzw. blau bemalte Folien gelingt es nach ihm sogar zu zeigen, dass das zur Aktivierung dienende Licht eine bestimmte Mindestenergie und damit eine nicht zu überschreitende Wellenlänge haben muss. Allerdings muss das Blitzgerät immer unmittelbar an die Spritze gehalten werden, damit trotz der Absorption durch den Spritzenmantel noch genug energiereiches Licht in das Innere der Spritze gelangt. Neue Entwicklungen sowohl in der Medizintechnik als auch bei den Laserpointern ermöglichen heute nun eine noch einfachere, sicherere und zuverlässigere Durchführung dieses immer noch faszinierenden Versuchs.

2. Eine neue experimentelle Variante

Für die Herstellung der gasförmigen Stoffe Chlor und Wasserstoff empfehlen wir im Wesentlichen auch die von Obendrauf vorgeschlagene Vorgehensweise mit einer dem „Low-Cost-Gasentwickler“ ähnlichen Apparatur. Inzwischen sind allerdings auch für diese einfachen Apparaturen aus Teilen der Medizintechnik sogar „Drei-Wege-Hähne“ (DWH) erhältlich (z. B. [2]). Damit ist ein „möglichst zügiger Wechsel“ der Spritzen nicht mehr erforderlich, um möglichst „keine toxikologisch relevanten Mengen an Chlor freizusetzen“ (nach [1, S. 13]). Für die Zündung eignet sich hervorragend ein mittlerweile für unter 10,- € erhältlicher blauer Laserpointer (z. B. [3]). Eine Zündung mit einem solchen Laserpointer funktioniert nicht nur zuverlässig, sie erhöht auch beträchtlich die Sicherheit, da man den Laserpointer nicht mehr unmittelbar an die Spritze halten muss, sondern das Gemisch aus einer Entfernung von bis zu zehn Metern zünden kann. Falls man auch

auf die notwendige Energie des Lichts und damit auf die maximale Wellenlänge eingehen möchte, kann man zusätzlich noch einen roten und einen grünen Laserpointer einsetzen, mit denen die Zündung nicht gelingt. Ein entsprechendes Dreier-Set an Laserpointern erhält man schon für unter 30,- € (z. B. [4]). Der Versuch kann dann in Anlehnung an Obendrauf wie folgt vorbereitet und durchgeführt werden.

Versuch 1: Die Chlor-Knallgas-Reaktion aktiviert mit Laserpointern

Geräte: 2 Reagenzgläser (16×160 mm) mit passenden Stopfen, 9 Kanülen (1,2×40 mm), 3 Drei-Wege-Hähne (DWH), 2 2-mL-Spritzen, 4 10-mL-Spritzen mit Luer-Lock und passenden Stopfen, 2 30-mL-Spritzen mit Luer-Lock, 3 Kombi-Stopfen, 2 Spatel, 2 kleine Trichter, Pinzette, 2 Stative, 3 Klemmen, 3 Muffen, blauer Laserpointer (Wellenlänge: 405 nm), auf Wunsch auch roter Laserpointer (Wellenlänge: 650 nm) und grüner Laserpointer (Wellenlänge: 532 nm)

Chemikalien: konz. Salzsäure (GHS05, GHS07), Kaliumpermanganat (GHS03, GHS05, GHS07, GHS09), Kupfersulfat (GHS05, GHS09), Zink-Granalien (GHS02, GHS09), Glaswolle, Aktivkohle

Entsorgung: Anorganische Abfälle, Schwermetallsalzlösungen

Vorbereitung:

a) Herstellung der Adsorptionsröhrchen

Der Stempel einer 10-mL-Spritze wird entfernt und mit einer Pinzette wird etwas Glaswolle in jene hineingeschoben. Dabei ist darauf zu achten, dass die Glaswolle nicht zu stark verdichtet wird. Die Spritze wird nun mit Aktivkohle bis zur 10-mL-Marke aufgefüllt, mit etwas Glaswolle isoliert und mit einem Stopfen verschlossen. Abschließend durchbohrt man den Stopfen mit einer Kanüle. Auf diese Weise verfährt man auch mit den verbleibenden drei 10-mL-Spritzen. Zwei dieser Röhrchen werden als Adsorptionsröhrchen genutzt und bei den nun folgenden Schritten b) und c) benötigt. Die beiden anderen Röhrchen werden nach Obendrauf [1, S. 13] als Reduktionsröhrchen eingesetzt und dienen dazu, Chlor, Wasserstoff oder Chlorwasserstoff unschädlich zu machen.

b) Darstellung von Chlor (nach [5])

In ein Reagenzglas wird 2–3 cm hoch Kaliumpermanganat gegeben. Dann verschließt man das Reagenzglas mit einem Stopfen, durch den zwei Kanülen gebohrt wurden. Auf eine Kanüle wird ein DWH gedreht und an dessen seitlichem Ansatz ein Adsorptionsröhrchen befestigt. Der obere Ansatz bleibt noch frei. Den DWH stellt man so ein, dass eine Verbindung zwischen Reagenzglas und dem oberen, freien Ansatz besteht, nicht aber zum Adsorptionsröhrchen. Das Reagenzglas wird nun am Stativ eingespannt. Mit der 2-mL-Spritze nimmt man 2 mL der konzentrierten Salzsäure auf und steckt sie dann auf die zweite Kanüle (siehe Abb. 1, linke Seite, bis auf die 30-mL-Spritze).

[a] T. Wagner, Prof. Dr. A. Flint
Universität Rostock
Institut für Chemie
Didaktik der Chemie
18051 Rostock

* E-Mail: alfred.flint@uni-rostock.de
tom.wagner@uni-rostock.de

c) Darstellung von Wasserstoff (nach [5])

In ein Reagenzglas werden zehn Zink-Granalien und eine Spatelspitze Kupfersulfat gegeben. Dann verschließt man das Reagenzglas mit einem Stopfen, durch den zwei Kanülen gebohrt wurden. Auf eine Kanüle wird ein DWH gedreht und an dessen seitlichem Ansatz ein Adsorptionsröhrchen befestigt. Auf den anderen Ansatz dreht man eine 30-mL-Spritze. Den DWH stellt man so ein, dass eine Verbindung zwischen Reagenzglas und der 30-mL-Spritze besteht, nicht aber zum Adsorptionsröhrchen. Das Reagenzglas wird nun am Stativ eingespannt. Mit der 2-mL-Spritze nimmt man 2 mL der konzentrierten Salzsäure auf und steckt sie dann auf die zweite Kanüle (siehe Abb. 1, rechte Seite).

d) Verdrängung der Luft aus den Gasentwicklern

Durch langsames Hinzutropfen der Salzsäure zum Zink/Kupfersulfat wird Wasserstoff entwickelt. Nachdem 30 mL Gas aufgenommen wurden, dreht man den DWH so, dass eine Verbindung zwischen Reagenzglas und Adsorptionsröhrchen entsteht. Dann nimmt man die 30-mL-Spritze ab. Nun setzt man das Wasserstoff-Reduktionsröhrchen auf die Spritze und drückt das aufgefangene Gas hindurch. Anschließend wird die 30-mL-Spritze auf den DWH zur Chlorgasherstellung gedreht und durch langsames Hinzutropfen der Salzsäure zum Kaliumpermanganat Chlorgas entwickelt. Nachdem man 30 mL Gas aufgenommen hat, stellt man den DWH wieder so um, dass eine Verbindung zwischen dem Reagenzglas und dem Adsorptionsröhrchen besteht, nimmt die mit Chlorgas gefüllte 30-mL-Spritze ab und drückt das Gas durch das Chlor-Reduktionsröhrchen.

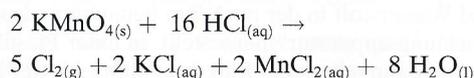
e) Herstellen des Chlor-Knallgas-Gemisches

Die 30-mL-Spritze wird wieder auf den DWH zur Chlorgasentwicklung gedreht. Diesen stellt man nun so ein, dass das Reagenzglas mit der 30-mL-Spritze verbunden ist. Man tropft langsam etwas Salzsäure zum Kaliumpermanganat und fängt 5 mL Chlor auf. Dann dreht man den DWH wieder so, dass eine Verbindung zwischen Reagenzglas und Adsorptionsröhrchen besteht und die zur 30-mL-Spritze unterbrochen ist. Letztere wird abgedreht und am oberen Anschluss des DWH zur Wasserstoffherstellung angebracht. Durch langsames Hinzutropfen der Salzsäure zum Zink/Kupfersulfat werden 5 mL Wasserstoff entwickelt und aufgefangen, sodass in der Spritze ein Chlor-Wasserstoff-Gemisch im stöchiometrischen Verhältnis entsteht. Der DWH wird wieder so gedreht, dass eine Verbindung zum Adsorptionsröhrchen besteht und die zur 30-mL-Spritze unterbrochen wird. Dann nimmt man letztere ab und verschließt sie mit einem Kombi-Stopfen.

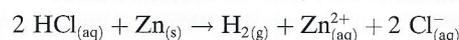
Durchführung: Die mit Chlor-Wasserstoff-Gemisch gefüllte Spritze wird senkrecht, mit dem Stempel nach oben, in ein Stativ eingespannt und dieses auf den Fußboden gestellt. Es ist darauf zu achten, dass der nach oben schießende Stempel nicht auf eine Lampe oder einen anderen, leicht zerstörbaren Gegenstand treffen kann. Bei Verwendung aller drei Laserpointer wird nun zunächst mit dem roten und dann dem grünen versucht, das Gemisch zu zünden. Als letztes setzt man den blauen Laserpointer ein. Mit diesem kann das Gemisch nun aus einer Entfernung von bis zu 10 m durch Beleuchten des Spritzenkörpers gezündet werden. Sollte das Gemisch wider Erwarten nicht zünden, haben sich die beiden Gase schon umgesetzt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Chlor durch Licht in einen aktiven Zustand versetzt wird, sodass später, sogar im Dunkeln, eine langsame Reaktion einsetzt [1, S. 15].

Beobachtungen: Sowohl mit dem roten als auch dem grünen Laserpointer gelingt die Zündung des Gemisches nicht. In dem Moment, in dem der blaue Laserstrahl den Spritzenkörper trifft, knallt es laut und der Stempel fliegt explosionsartig nach oben. Die Spritze fühlt sich warm an und eine weiße Trübung ist im Spritzenkörper zu erkennen.

Deutung: Chlor wird durch die Reaktion von Kaliumpermanganat mit Salzsäure hergestellt.



Wasserstoff wird ebenfalls durch eine Redoxreaktion erzeugt. Zink und Salzsäure setzen sich dabei nach folgender Reaktion um:



Aufgrund der hohen Überspannung von Wasserstoff an Zink scheidet sich dieser nur langsam und mit starker Verzögerung ab. Aus diesem Grund wird zu Beginn Kupfersulfat hinzugegeben. Dieses löst sich und es bilden sich hydratisierte Cu^{2+} -Ionen in der Lösung. Da Kupfer auch bei den vorliegenden Konzentrationen noch ein positiveres Redox-Potential als Zink hat, scheidet sich elementares Kupfer an der Oberfläche des Zinks ab und es gehen Zn^{2+} -Ionen in Lösung. Die Überspannung von Wasserstoff an Kupfer ist viel geringer als an Zink, weshalb die Bildung von Wasserstoff nun viel schneller einsetzt. Kupfer nimmt an der Gasbildung damit nur die Rolle des Elektronenüberträgers ein: Es reagieren immer noch Zink und Salzsäure miteinander.

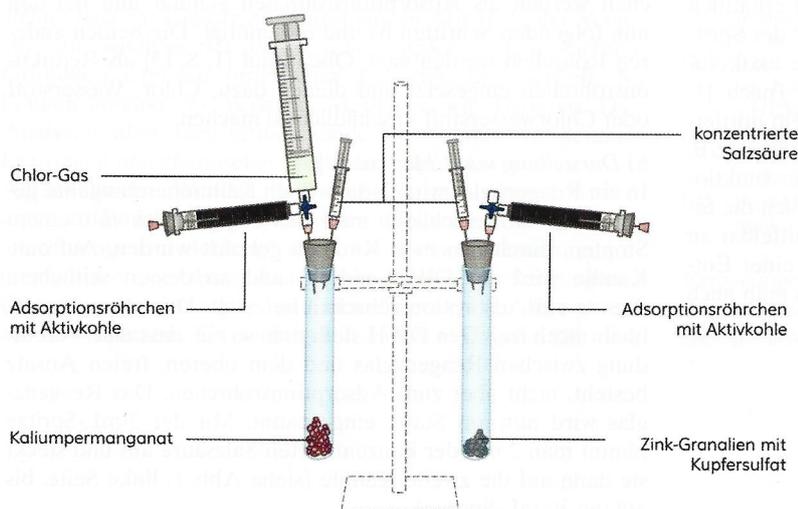
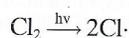


Abb. 1: Die Apparatur zur Herstellung von Chlor und Wasserstoff

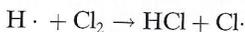
Chlor und Wasserstoff bilden ein metastabiles System, dessen kinetische Hemmung durch die Zufuhr der notwendigen Aktivierungsenergie überwunden werden kann. Die Zündung kann prinzipiell durch Wärme, aber auch durch Licht erfolgen. Trifft nun Licht mit der erforderlichen Mindestenergie auf ein Chlormolekül, so kann die kovalente Bindung zwischen den Chlor-Atomen gespalten werden. Als Folge entstehen zwei reaktive Chlor-Radikale.

Kettenstart:



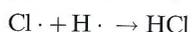
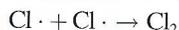
Diese können mit Wasserstoff-Molekülen reagieren, wobei Chlorwasserstoff-Moleküle und Wasserstoff-Radikale entstehen. Letztere reagieren mit Chlor-Molekülen, wobei wieder Chlorwasserstoff und Chlor-Radikale gebildet werden.

Kettenfortpflanzung:



Ein Kettenabbruch findet statt, wenn Radikale miteinander reagieren.

Kettenabbruch:



Der feine, weiße Nebel ist dadurch zu erklären, dass das gebildete Chlorwasserstoff-Gas mit vorhandener Luftfeuchtigkeit zu feinsten Tröpfchen Salzsäure reagiert.

In der Sekundarstufe I kann bei der Verwendung aller drei Laser darauf eingegangen werden, dass blaues Licht energiereicher ist als rotes oder grünes. Es ist eine bestimmte Mindestenergie des Lichts erforderlich, um die Reaktion zu starten. Diese liefert nur das blaue, nicht aber das rote oder das grüne Licht.

In der gymnasialen Oberstufe kann die Energetik der Reaktion auf die folgende Weise auch näher betrachtet werden:

Um die Chloratome des Moleküls voneinander zu trennen, muss die molare Dissoziationsenthalpie $\Delta_D H_m$ von 243 kJ/mol aufgewendet werden [6]. Aus dieser kann die Energie berechnet werden, die notwendig ist, um ein Chlormolekül zu spalten.

$$\Delta_D H_m = \frac{\Delta_D H_m}{N_A} = \frac{243 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}{6,0223 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}} = 4,0345 \cdot 10^{-22} \text{ kJ} = 4,0345 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Stellt man nun das Planck-Einstein-Gesetz nach der Frequenz um, so lässt sich mit Hilfe dieser die notwendige Wellenlänge des Lichtes zur homolytischen Spaltung der kovalenten Bindung des Chlormoleküls berechnen.

$$E = h\nu \Rightarrow \nu = \frac{h}{E}$$

$$\nu = \frac{h}{E} = \frac{4,0345 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}} = 6,088 \cdot 10^{14} \frac{1}{\text{s}}$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{c}{\nu}$$

$$\lambda = \frac{2,988 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{6,088 \cdot 10^{14} \frac{1}{\text{s}}} = 4,9244 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 492,44 \text{ nm}$$

Aus der Rechnung folgt, dass die Wellenlänge des zu aktivierenden Lichts 492,44 nm nicht überschreiten darf. Der blaue Laserpointer liegt mit einer Wellenlänge von 405 nm deutlich unter dieser Grenze. Die Wellenlängen des roten und des grünen Laser liegen dagegen darüber und besitzen damit nicht die notwendige Mindestenergie, um die Reaktion zu aktivieren.

Die Reaktion der beiden Gase ist stark exotherm, was aus der Erwärmung des Spritzenkörpers hervorgeht. Die molare Reaktionsenthalpie beträgt -184 kJ/mol .

Wie bereits von Obendrauf vorgeschlagen [1, S. 15], kann dieser Versuch auch dazu eingesetzt werden, die Volumenkonstanz der Reaktion zwischen Chlor und Wasserstoff zu zeigen. Unseren Untersuchungen zur Folge kann dabei durch eine leichte Variation der Anordnung auch darauf verzichtet werden, vorab einen Unterdruck zu erzeugen, um zu verhindern, dass der Stempel aus der Spritze fliegt.

Versuch 2: Volumenkonstanz bei der Reaktion von Chlor mit Wasserstoff

Kurzbeschreibung: Wie in Versuch 1 werden 5 mL Chlor und 5 mL Wasserstoff erzeugt und in einer 30-mL-Spritze vereinigt. Die mit dem Chlor-Wasserstoff-Gemisch gefüllte Spritze wird nun senkrecht, mit dem Stempel nach unten, in ein Stativ eingespannt. In einem Abstand von etwa 2 cm wird unter dem Stempel zur Abfederung ein Topfswamm platziert (siehe Abb. 2). Mit dem blauen Laserpointer kann das Gemisch nun aus einer Entfernung von bis zu 10 m durch Beleuchten des Spritzenkörpers gezündet werden.

In dem Moment, in dem der Laser den Spritzenkörper trifft, knallt es laut. Der Stempel der Spritze wird nach unten gedrückt, wobei die Wucht durch den Schwamm gemindert wird. Anschließend schnellt der Stempel wieder in die Spritze zurück und befindet sich in Ausgangsstellung.

Die ablaufende Reaktion entspricht dem in Versuch 1 beschriebenen Schema, wobei Chlor und Wasserstoff im Verhältnis 1:1 miteinander reagieren. Wie aus der Reaktionsgleichung abgelesen werden kann, werden bei der Reaktion aus zwei Gasteilchen (Wasserstoff, Chlor) zwei andere Gasteilchen (Chlorwasserstoff) gebildet. Damit liegen vor und nach

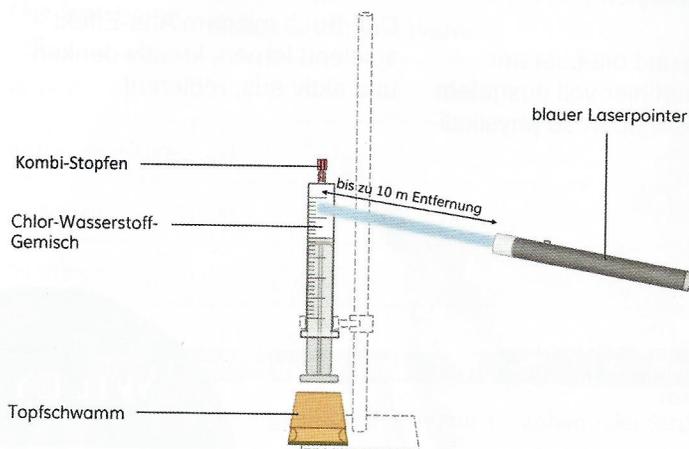


Abb. 2: Der Versuchsaufbau zur Demonstration der Volumenkonstanz

der Reaktion effektiv gleich viele Gasteilchen vor: das Volumen ändert sich nicht.

Diese Erkenntnis kann man im Übrigen auch gut zur Bestätigung der Feststellung verwenden, dass Wasserstoff und Chlor als bei Raumtemperatur gasförmige Elemente molekular und nicht atomar vorkommen. Anderenfalls müsste sich das Volumen halbieren, da aus zwei gasförmigen Teilchen jeweils ein neues entsteht.

3. Zusammenfassung

Durch den inzwischen möglichen Einsatz von Drei-Wege-Hähnen kann die von Obendrauf entwickelte Methode zur Darstellung von zum Beispiel Wasserstoff und Chlor im kleinen Maßstab noch unproblematischer eingesetzt werden. Eine auch nur kleine, unkontrollierte Freisetzung der Gase wird verhindert. Dank der Weiterentwicklung von Laserpointern und der Möglichkeit, diese inzwischen in verschiedenen Farben für vertretbar wenig Geld zu erwerben, wird die Zündung des Gasgemisches auch aus einer größeren Entfernung möglich. Die Lichtquelle muss nicht mehr direkt an den Spritzenkörper gehalten werden, was zur Erhöhung der Sicherheit dient. Falls man auch auf die Energie des verwendeten Lichts eingehen möchte, lässt sich das durch die verschiedenen farbigen Laser leicht realisieren. Die Frequenzen der Laser sind jeweils genau angegeben. Es ist nicht mehr erforderlich, Folien anzu-

färben und dann abzuschätzen, welche Wellenlänge und damit welche Energie das jeweilige Licht hat.

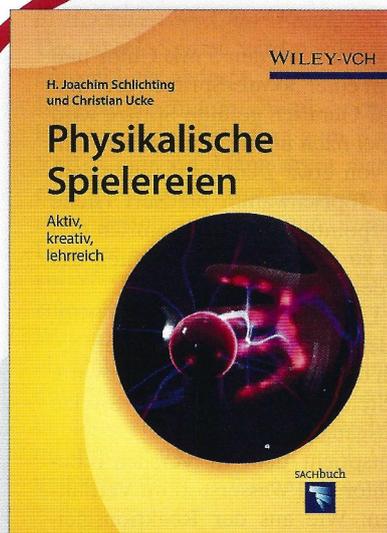
Literatur

- [1] Obendrauf, V. (2007). Chlorknallgas – verlässlich und sicher, Chem. Sch. (Salzbg.) 22/1, 3–17.
- [2] LowCost Educational Materials: Drei-Wege-Hahn für 0,79 €. <https://www.shop.lowcostexperiments.de/de/dreiwegehahn-luerlock-w-w-m> (letzter Aufruf am 8.05.2016).
- [3] CJA-Diffusion: Grüner Laserpointer für 9,99 €. <http://www.ebay.de/itm/gruenen-Laser-Pointer-Strahl-sichtbar-5-km-new-model-2016-LVSDE-/231355699019> (letzter Aufruf am 18.05.2016).
- [4] CJA-Diffusion: 3 Laserpointer, Grün, Rot, Blau/Violett für 25,99 €. http://www.ebay.de/itm/3-Laserpointer-Grun-Rot-Blau-Violett-sichtbaren-Strahl-1-mW-3LS-DE/231388795851?_trksid=p2047675.c100005.m1851&_trkparms=aid%3D222007%26algo%3DSIC.MBE%26ao%3D1%26asc%3D36829%26meid%3D7f6b39c583914805a758159fb2688b27%26pid%3D100005%26rk%3D3%26rkt%3D6%26mehot%3-Dag%26sd%3D231534789364 (letzter Aufruf am 18.05.2016).
- [5] Obendrauf, V. (1996). Experimente mit Gasen. ChiuZ 3 S. 118–125.
- [6] Riedel, E. (1999*). Anorganische Chemie. Walter de Gruyter, Berlin, New York, S. 299.

Eingegangen am 28. Februar 2017

Angenommen am 17. März 2017

Online veröffentlicht am 25. Oktober 2017



H. JOACHIM SCHLICHTING
UND CHRISTIAN UCKE

Physikalische Spielereien

Aktiv, kreativ, lehrreich

„Der Mensch ist nur da ganz Mensch, wo er spielt“: Dass dieses Motto von Friedrich Schiller auch und gerade im Zusammenhang mit der Physik gilt, zeigen Christian Ucke und H. Joachim Schlichting eindrucksvoll im Buch „Physikalische Spielereien“.

Der Forscherdrang und die Lust am Ausprobieren können hier voll ausgelebt werden und der Leser spürt so physikali-

sche Phänomene im Alltag auf. Die mehr als dreißig Kapitel, angereichert mit vielen tollen farbigen Abbildungen, verteilen sich auf die vier Bereiche Mechanik, Thermodynamik, Elektromagnetismus und Optik.

Das Buch mit dem Aha-Effekt – spielend lernen, kreativ denken und aktiv ausprobieren!

2016. 150 Seiten, ca. 250 Abbildungen, davon 250 in Farbe. Gebunden.
€ 29,90. ISBN: 978-3-527-33893-1

Visit www.wiley-vch.de

Wiley-VCH • Postfach 10 11 61, 69451 Weinheim
Tel. +49 (0) 62 01-60 64 00 • Fax +49 (0) 62 01-60 61 84
E-mail: service@wiley-vch.de

WILEY-VCH