

Johann Jakob Balmer im Chemieunterricht heute

Klemens Koch^{§,*}

[§]Balmer Prize 2024

Abstract: The background and fundamentals of Johann Jakob Balmer's work on the spectral lines of hydrogen are presented. His interdisciplinary approach, scientific methodology, and current experiments on emission, absorption and diffraction can still contribute to fundamental concepts in chemistry education.

Keywords: Balmerformel · Chemieunterricht · Spektrallinien · Wasserstoff · Wissenschaftsmethodik



Klemens Koch hat in Lausanne und Zürich Chemie studiert und unterrichtet am Gymnasium Biel-Seeland vor allem in zweisprachigen Klassen (deutsch-französisch). Er bildet an der Pädagogischen Hochschule Bern Chemielehrpersonen aus, ist Präsident des Vereins Schweizerischer Naturwissenschaftslehrpersonen (VSN) und interessiert sich für das Verständnis der Chemie durch kleine und schöne Experimente. Er wurde

2024 mit dem Balmerpreis der Schweizerischen Chemischen Gesellschaft (SCS) und dem Manfred-und-Wolfgang-Flad-Preis der Fachgruppe Chemieunterricht der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) ausgezeichnet.

1. Zwischen den Fächern und mitten in der Welt: Johann Jakob Balmer

Johann Jakob Balmer war ein Mathematiker, der ein Rätsel der Physik löste und so mithalf, der Chemie ein theoretisches Fundament zu schaffen (Fig. 1). Das ist bemerkenswert und kann uns für den (Chemie-) Unterricht inspirieren. Er hat selber als Lehrer für Rechnen, Schreiben und Zeichnen an der Unteren Töchterschule in Basel und als Dozent an der Universität Basel für spezielle Gebiete der Mathematik, z. B. für Darstellende Geometrie, gewirkt. Die Töchterschule gab als erste Schule in Basel Mädchen den Zugang zu höherer Bildung, führte allerdings erst 1899, ein Jahr nach seinem Tod, auch zur Maturität.^[1]

1.1 Die Persönlichkeit Johann Jakob Balmer

Johann Jakob Balmer wurde am 1. Mai 1825 in Lausen, Basel-land, als ältester Sohn der Familie Ballmer-Rolle geboren und erhielt von seiner talentierten Mutter schon früh Zeichenunterricht, was sein Denken und ästhetisches Empfinden geprägt hat. Nach der Volksschule in Lausen, der Bezirksschule Liestal und des Pädagogiums (heute Gymnasium am Münsterplatz) in Basel studierte er Mathematik und Architektur in Basel, Karlsruhe und Berlin, wo er auch auf Schelling (Philosophie) und Diesterweg (Pädagogik) traf. Vom 20. Lebensjahr an schrieb er seinen Namen nur noch mit einem «J». Balmer setzte sich in der Basler Politik und mit Publikationen für die verschiedensten Anliegen ein, unter anderem für sozialen Wohnungsbau, Wohlfahrt, Bildung und Kirchliches. Im Unterricht war er bis zu seinem Todesjahr, 1898, tätig.^[2,3]



Fig. 1. Johann Jakob Balmer (1825–1898) wurde vor 200 Jahren geboren, war Lehrer, prägte die Politik und Stadtentwicklung Basels mit, hat mit der Balmerformel einen für die Quantenmechanik grundlegenden Zusammenhang gefunden und sich noch für viel mehr interessiert. Johann Jakob Balmer 1825-1898: Wikimedia Reproduction of a public domain painting <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Balmer.jpeg>.

1.2 Proportionen im Beruf und ästhetisches Empfinden

Durch das Zeichnen, das Geigenspiel, die Architektur und die Mathematik beschäftigte sich Balmer immer wieder mit Verhältnissen zwischen Zahlen. Seine Habilitationsschrift mit dem seltsam anmutenden Titel 'Des Propheten Ezechiel Gesicht vom Tempel' beschäftigte sich mit Angaben zur perspektivischen Darstellung eines Tempels, welche einem Bibeltext entnommen wurden und enthielt auch eine geistliche Interpretation (Fig. 2).

Die Suche nach den richtigen Proportionen ist nicht nur in seiner Formel, welche die Spektrallinien des Wasserstoffs beschreibt, dargelegt, sondern auch in seiner politischen Arbeit. Er setzte sich für eine ästhetische Gestaltung der 'oberen Rheinbrücke' in Basel ein, heute nach mehreren Um- und Erweiterungsbauten heisst sie Wettsteinbrücke. Es ging um den Höhenunterschied zwischen den beiden Ufern. Mit dem Kunsthistoriker Jakob Burckhardt entstand eine Auseinandersetzung über eine 'waagrechte' oder 'schiefe' Brücke, welche schliesslich zugunsten Balmers Position einer Brücke mit Gefälle entschieden wurde. Er vertrat seine Position in einer sechsteiligen Studie mit technischen Argumenten aber auch Abschnitten wie 'III. Die ästhetischen Rücksich-

*Correspondence: Prof. Dr. K. Koch. klemens.koch@phbern.ch

Institut Sekundarstufe 2, Fachdidaktik Chemie, Fabrikstrasse 8, Pädagogische Hochschule Bern, CH-3012 Bern

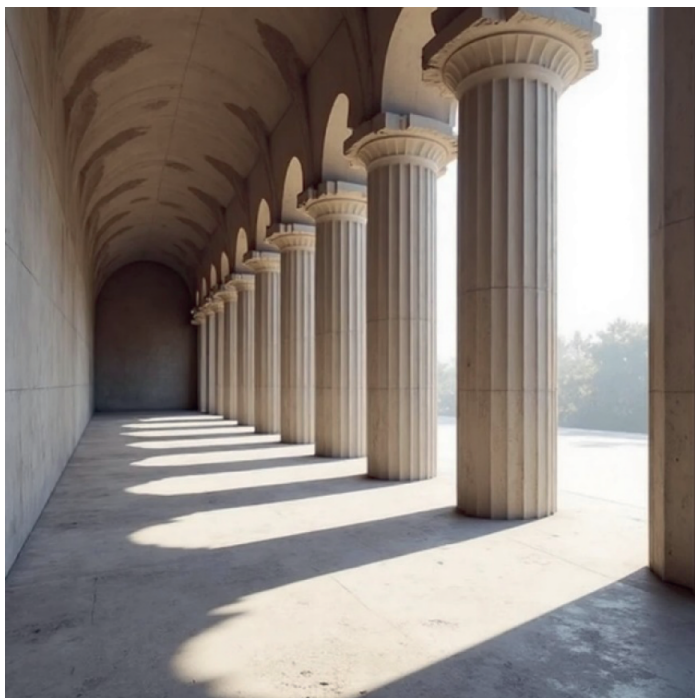


Fig. 2. Säulenreihe mit Schattenwurf (KI-generiert). Balmer hat im Rahmen seiner Vorlesungen für Darstellende Geometrie eine Anleitung für das perspektivische Zeichnen publiziert. Vom Autor mit KI generiertes Bild einer Reihe von Säulen mit Schattenwurf <https://raphael.app/de>.

ten, ‘V. Die perspektivischen Wirkungen’ und ‘VI. Monumentale und landschaftliche Schönheit’. Der lithographierte Brückenplan Balmers in der Universitätsbibliothek zeigt beispielsweise, wie die Bogenlängen gegen das niedrigere Kleinbasler Ufer hin aus ästhetischen Gründen um je ca. 1,80 m abnehmen.

Auch wegen ihrer Proportionen setzte sich Balmer 1882 für den vollständigen Erhalt der Barfüsserkirche ein, als der Grosse Rat ausgerechnet seiner Arbeitgeberin, der Töcherschule, nach Abriss der Kirche neue Gebäude auf dem Areal zur Verfügung stellen wollte. In der Abstimmung obsiegte der Erhalt der Kirche knapp mit 53:50; die neue Töcherschule konnte dann schon 1884 auf dem Kohlenberg errichtet werden und wir können uns jetzt noch an beiden Bauwerken erfreuen (Fig. 3).^[2]



Fig. 3. Barfüsserplatz und Barfüsserkirche in der Kindheit von J. J. Balmer um circa 1835. Das Gemälde von Andreas Geist befindet sich im Historischen Museum Basel, welches heute die Kirche nutzt. Barfüsserplatz um 1835, Andreas Geist, Wikimedia Reproduction of a public domain painting, Historisches Museum Basel, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Barf%C3%BCsserplatz_1835.jpg?uselang=de#Lizenz.

2. Die Arbeit über die ‘Spectrallinien des Wasserstoffs’

Balmer pflegte zeitlebens Kontakt zu Wissenschaftlern in ganz Europa und erfuhr so auch um 1862 herum von den Messungen des schwedischen Physikers Ångström und von anderen an den Spectrallinien des Wasserstoffs. Wenn hier von Emissionslinien die Rede ist, sind die Absorptionslinien bei gleichen Wellenlängen mitgemeint, die bei der Umkehrung der Emission, also bei der Absorption auftreten. Das wichtigste Beispiel dafür sind die Fraunhofer-Linien im Sonnenspektrum. Sie entstehen, wenn ein Teil des Sonnenlichts in der Sonnenatmosphäre absorbiert wird.



Fig. 4 Spectrallinien des Wasserstoffs von links nach rechts bei 4101, 4340, 4860 und 6562 Ångström. Die Entdeckung erfolgte von rechts nach links nach abnehmender Intensität. Spectrallinien des Wasserstoffs von Jan Homann, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Visible_spectrum_of_hydrogen.jpg.

Balmer hatte also die vier Masszahlen, $N_1 = 6562$, $N_2 = 4860$, $N_3 = 4340$ und $N_4 = 4101$ und das Ziel, eine Gesetzmässigkeit dahinter und damit eine ursächliche Erklärung und allenfalls eine Extrapolation zu weiteren Zahlen hin zu finden (Fig. 4).

Ihm war bewusst, dass es mit Wellenerscheinungen zu tun hatte, dass aber allenfalls eher Frequenzen als Wellenlängen zu betrachten wären, wie in der Musik mit den regelmässigen Frequenzverhältnissen zwischen Ober- und Grundtönen. Andere vor ihm hatten es schon mit den Frequenzen und einer Oberton-ähnlichen Folge versucht, aber Balmer kam vom Zeichnen und dachte an die, sich mit dem Abstand verkürzenden Längen von Gegenständen und wählte deshalb die Wellenlängen,^[3] um bald darauf einige einfache Verhältnisse festzustellen:^[4]

$$\frac{N_1 - 1}{N_2} = \frac{6561}{4860} = \frac{27}{20} \text{ nach kürzen mit } 243 (= 3^5) \quad (1)$$

$$\frac{N_1 - 2}{N_4 - 1} = \frac{6560}{4100} = \frac{8}{5} \text{ nach kürzen mit } 820 (8 = 2^3) \quad (2)$$

$$\frac{N_2 + 4}{N_4 + 3} = \frac{4864}{4104} = \frac{32}{27} \text{ nach kürzen mit } 152 (27 = 3^3, 32 = 2^5, 2^3 \text{ in } 152) \quad (3)$$

Mit vielen gerichteten Versuchen dieser Art entdeckte Balmer die Bedeutung von Verhältnissen der Art $\frac{m^2}{m^2 - 4}$ mit natürlichen Zahlen als Variablen m , und damit ‘seine’ Formel. Die Überlegungen publizierte er 1885 in den Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft zu Basel.^[5] Hier ist die Formel so, wie sie auch auf seinem Grabstein verewigt ist:

$$\lambda = B \frac{m^2}{m^2 - 4} \quad (4)$$

mit der Konstante $B = 3645.6$ Ångström und der Variable m , welche mit den vier Zahlen $m = 3, 4, 5$ und 6 die gesuchten vier Wellenlängen oben ergab (Fig. 5).

Bemerkenswert ist einerseits, wie exakt die Messresultate von Ångström und anderen waren, aber andererseits auch, wie Balmer gekonnt durch kleine Anpassungen der Zahlen einfache ganzzahlige Verhältnisse herstellen konnte und in den Verhältnissen die Bedeutung von Quadratzahlen sah.

Balmers Formel rief geradezu danach, Werte für $m = 1, 2, 7, 8, \dots$ zu berechnen, die danach auch gemessen worden sind. Auch die Idee, die 4 im Nenner durch eine laufende und zu quadrierende



Fig. 5 Grabstein von Johann Jakob Balmer und seiner Familie mit 'seiner' Formel auf dem Friedhof Wolfgottesacker, Basel. Grabstein von Johann Jakob Balmer EinDao – Eigenes Werk, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=63831921>

Variable zu ersetzen, kam ihm und er stellte bereits Tabellen auf, welche Wellenlängen bei weiteren Linien zu erwarten wären.^[3,5] Diese Spektrallinien wurden später von Paschen, Lyman, Brackett und Pfund entdeckt.

Aus heutiger Sicht kann die Frage gestellt werden, wie der Einsatz von künstlicher Intelligenz die Suche hätte beschleunigen können.

Folgende Aufgabe 'Finde eine Formel mit den vier Lösungen 4101, 4340, 4860 und 6562' wurde dazu ChatGPT 2 gestellt und führte nicht überraschend zu einer Polynomfunktion:

$f(x) = a \cdot (x-6526) \cdot (x-4860) \cdot (x-4340) \cdot (x-4101)$ oder (mit GPT-4o mini ausmultipliziert ($a=1$):

$f(x) = x^4 - 19863 x^3 + 146122042 x^2 - 470140569600 x + 564157303296000$. Ihre Nullstellen führen zu den vier Zahlen.

Die Lösungen von Polynomfunktionen waren zu Balmers Zeiten bereits bekannt, aber sie erfüllen die gestellten Ziele nicht. Vor allem verbindet es die vier Zahlen nicht mit einer «unabhängigen» Variable, welche einen Hinweis auf ihre Herkunft geben könnte. Und die Gleichung hat sicher auch nicht die Ästhetik von Balmers Resultat.

Balmer versuchte sich, ausgehend von seiner Formel, auch an Aussagen über den Aufbau von Atomen, aber noch ohne genaue Vorstellungen von elektrischer Ladung, Elektronen und Atom-Energieniveaus konnte er nicht weit kommen. Es waren noch viele Schritte und die Leistungen von Rutherford und Bohr nötig, um damit zu einem tragfähigen Atommodell zu kommen, aber Bohr hat in einem Interview mit Leon Rosenfeld auf die direkte Verbindung zu Balmer hingewiesen: "As soon as I saw Balmer's formula, the whole thing was immediately clear to me".^[6,7]

Balmer selber schrieb 1897 über seine Entdeckung:

"the final impression, which our mind involuntarily receives in contemplating these fundamental relations is that of a wonderful mechanism of nature, the functions of which are performed with never-failing certainty, though the mind can follow them only with difficulty and with a humiliating sense of the incompleteness of its perception".^[3]

3. Spektren und das Lernen daran im Chemieunterricht

So faszinierend und bildungswürdig die abstrahierenden Entdeckungsschritte Balmers sind, so wichtig ist auch, im Chemieunterricht konkrete experimentelle Erfahrungen zu machen. Mit der Weiterentwicklung der gymnasialen Maturität im Rahmenlehrplan 2024 wurde Wissenschaftspropädeutik als eine der sieben transversalen Kompetenzen bestimmt. Dazu gehören im Chemieunterricht selber durchgeführte Experimente und Schlussfolgerungen daraus, wie sie hier skizziert werden:

Experiment 1: Spektrallinien von Elementen

a. Mit einer Natriumdampflampe kann ein sehr einfaches Spektrum mit einer dominanten Spektrallinie bei ca. 589 nm im gelben Bereich beobachtet werden.

b. Die Edelgase emittieren in einem Hochspannung-Hochfrequenzfeld (Gas Tube Power Supply der Firma Tech22, CA, USA: 5 kV, 31 kHz) die elementtypischen Spektren (Fig. 6).



Fig. 6. Spektralfarben der Edelgase Xenon, Krypton, Argon, Neon, und Helium. Sie sind in Glasampullen eingeschlossen und liegen auf zwei horizontal verlaufenden Drähten, welche das Hochspannung-Hochfrequenzfeld erzeugen. Foto des Autors.

Experiment 2: LED-Emission und Energie des Lichts verschiedener Farben

LED enthalten nicht einzelne Atome wie Edelgase, sondern Atomkristalle. Das führt zu breiten Emissionsbanden im Vergleich zu den schmalen Spektrallinien in Gasen.^[8] Die LED können direkt auf eine 3V-Lithium/Mangandioxid-Zelle gesetzt werden, der Innenwiderstand der Zelle genügt als Vorwiderstand, der sonst zum Betreiben von LED vorgeschaltet werden müsste. Es können auch mehrere LED aufgesetzt werden, wobei die bzgl. Energie bzw. Spannung anspruchsvollste, die blaue LED, nicht brennt, wenn z. B. eine rote in Betrieb ist und die Arbeitsspannung der Zelle senkt.

Die Farbe der LED kann mit dem Gehalt an Elementen der Hauptgruppe V gesteuert werden, d. h. mit N, P und As. Die unterschiedlichen Farben können in Funktion der Ionisierungsenergien der Atome dieser Elemente gedeutet werden, sind dabei doch innere photoelektrische Effekte beteiligt (Fig. 7).

Die Energieunterschiede können nicht nur bei der Erzeugung beobachtet werden, sondern auch bei der Wirkung: Die Energie des blauen Lichtes reicht, einen phosphoreszierenden Farbstoff zum Leuchten zu bringen oder andere Prozesse (Belichtung einer Cyanotypie, photochemische radikalische Bromierung von Alkanen etc.) in Gang zu bringen, das Licht der anderen Farben nicht.

Die immer höhere Spannung, welche zum Leuchten der LED in der Reihe Infrarot-Rot-Orange-Gelb-Grün-Blau-Ultraviolett führt, kann mit einer variablen Spannungsquelle unter Verwendung geeigneter Vorwiderstände gezeigt werden (Fig. 8).

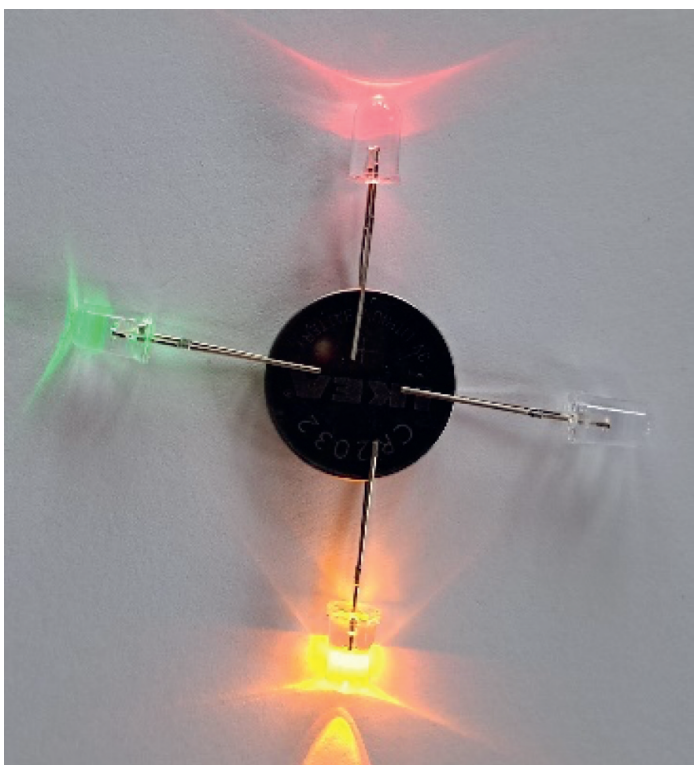


Fig. 7. Vier LED auf einer Knopfzelle, drei brennen bei der zur Verfügung stehenden Spannung, für die vierte, die blaue, reicht die Spannung nicht mehr. Foto des Autors.



Fig. 8. LED an einer variablen Spannungsquelle eingestellt auf 1.75 V: Die Spannung reicht für das unsichtbare infrarote Licht und die rote LED, beim Erhöhen der Spannung beginnen die anderen der Reihe nach zu leuchten. Foto des Autors.

Die Energieunterschiede können auch verfolgt werden, wenn die LED Licht absorbieren und eine Photospannung aufbauen. Dieses Phänomen ist wenig bekannt und genutzt, die Quantenausbeute ist auch sehr gering. Werden Emitter- und Absorber-LED einander gegenübergestellt, kann der Schwellenwert für eine Photospannung bestimmt werden: Die Emission der roten LED erzeugt keine Photospannung in der blauen LED, umgekehrt funktioniert es gut. Das kann in einem einfachen Spektrometer-Modell aus LED und LEGO[®][8–11] verwendet werden, wo der Lichtstrahl durch Lösungen verschiedener Farben und Konzentrationen teilweise absorbiert und die Abnahme der Photospannung als Mass für die auftreffende Lichtintensität gemessen wird (Fig. 9).

Experiment 3: Beobachtung von Spektren

Wissenschaftsmethodisch interessant sind nicht nur die Entstehung von Spektren, sondern auch die Beobachtung und Messung, modelliert mit einem einfachen Spektrometer wie oben oder durch direkte Beobachtung. An den meisten Schulen stehen einfache Handspektroskope zur Verfügung, teilweise mit Wellenlängen-Skalen^[12] Das Prinzip lässt sich bereits mit Spektralfolien

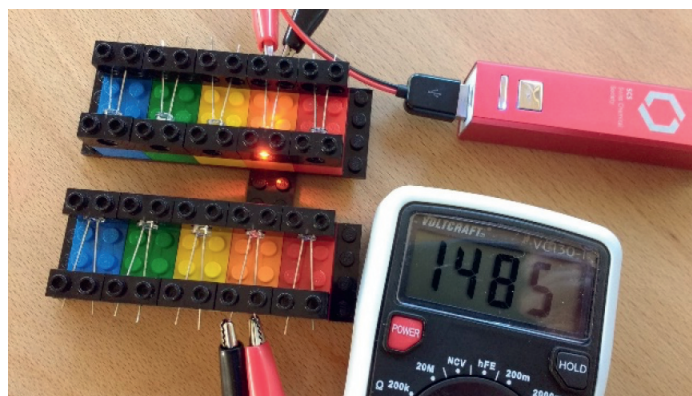


Fig. 9. Gegenübergestellte Emitter und Absorber-LED. Die orange leuchtende LED erzeugt in der gegenüberliegenden LED eine Photospannung von 1.485 V. Im Zwischenraum können Küvetten mit farbigen Lösungen analysiert werden. Foto des Autors.

oder damit versehenen ‘Rainbow Glasses’ oder ‘Diffraction Glasses’ zeigen.

Einfacher und besser nachvollziehbar ist die Beobachtung mit Organa-Textilien. Sie sind sehr fein aus Polyesterfäden gewoben und können als Beugungsgitter dienen. Das tetragonal symmetrische Beugungsbild kann mit dem orthogonalen Stoffgitter erklärt werden. Das erlaubt eine Analogie zur Röntgenkristallographie, wo aus den Symmetrieelementen des Beugungsbildes auf Strukturen, hier im Besonderen auf Winkel, geschlossen wird.

4. Schlussfolgerungen

Johann Jakob Balmers Entdeckung der Formel für die Spektrallinien von Wasserstoff zeigt einen interessanten Entdeckungsgang der Wissenschaft im Verhältnis zwischen experimenteller Beobachtung, theoretischer Deutung und technischer Anwendung, weit umfassender und kreativer als es schematische Charakterisierungen der Wissenschaftsmethodik oft erzählen. Balmer geht beeindruckend interdisziplinär von Erfahrungen mit Proportionen im Zeichenunterricht aus, spielt Zahlenverhältnisse durch und sagt schliesslich neue Spektrallinien (und Serien) voraus. Das hat das nachgängige Finden vieler neuer experimenteller Daten und schliesslich die abstrakten Deutungen in den Atomtheorien von Rutherford und Bohr unterstützt. Zum Durchspielen von Zahlenverhältnissen kann gut mit KI experimentiert werden: ein willkommener Anlass an den Schulen über eine KI-unterstützte Pädagogik nachzudenken.^[13] Der Gedankenweg Balmers mit einfachen Experimenten zur Lichtentstehung, Beobachtung und Analyse gehört nach Möglichkeit zum gymnasialen Chemieunterricht.

Danksagung

Der Autor dankt der SCS für die Ausrichtung des Balmerpreises, die Möglichkeit für diesen Artikel und die damit verbundene Wertschätzung für den Chemieunterricht sowie der Pädagogischen Hochschule Bern und dem Gymnasiums Biel-Seeland und ihren Leitungen für das entwicklungsfreundige Umfeld.

Received: May 27, 2025

[1] S. Bentsch, ‘Anna Maria Preiswerk-Iselin (1758-1840) und die weibliche Bildung in Basel um 1800’, 2022, zuletzt geändert am 31.1.2024 <https://stadtdgeschichtebasel.ch/blog/anna-maria-preiswerk-iselin-1758-1840-und-die-weibliche-bildung-in-basel-um-1800> (Zugang am 17. Mai 2025)

[2] G. Stohler, ‘Johann Jakob Balmer, Wegbereiter der Atomphysik’, Basler Stadtbuch 1985, Christoph Merian Stiftung (https://www.baslerstadtbuch.ch/stadtbuch/1985/1985_1815.html).

[3] K. Hentschel, ‘Visuelle Analogien und Mustererkennung am Beispiel der Balmerformel’, Kultur und Technik, Universität Stuttgart, 2008, pp. 90–99.

- [4] A. Grieder, *Helvetica Physica Acta*, **1986**, 59, 303, <https://doi.org/10.5169/seals-115698>.
- [5] J. J. Balmer, 'Notiz über die Spectrallinien des Wasserstoffs', Aus den Verhandl. d. Naturforsch. Ges. zu Basel, Bd. 7, p.548, <https://doi.org/10.3931/e-rara-134837>.
- [6] J. L. Heilbron, 'Historical studies in the theory of atomic structure', Arno Press, **1966**, p. 265.
- [7] N. Bohr 'On the Constitution of Atoms and Molecules', Kopenhagen **1913**, Einleitung L. Rosenfelds, p. 857-875.
- [8] K. Koch, *CHEMKON* **2019**, 26, 267, <https://doi.org/10.1002/ckon.201900004>.
- [9] Ł. Tymecki, R. Koncki, *Analytica Chimica Acta* **2009**, 639, 73, <https://doi.org/10.1016/j.aca.2009.03.014>.
- [10] D. Anh Bui, P.C. Hauser, *Talanta* **2013**, 116, 1073, <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.08.007>.
- [11] J. Asheim, E. V. Kvittingen, L. Kvittingen, R. Verley, *J. Chem. Educ.* **2014**, 91, 1037, <https://doi.org/10.1021/ed400838n>.
- [12] Erhältlich im VSN-Shop: <https://www.vsn-shop.ch/produkte/spektrometer-mit-lego/> (Zugriff 21. Mai 2025)
- [13] M. Eyer, S. W. Spahn, 'KI-sensitive Pädagogik an Maturitätsschulen', *Gymnasium Helveticum*, 1/202, p. 15, auf www.vsg-sspes.ch.

License and Terms



This is an Open Access article under the terms of the Creative Commons Attribution License CC BY 4.0. The material may not be used for commercial purposes.

The license is subject to the CHIMIA terms and conditions: (<https://chimia.ch/chimia/about>).

The definitive version of this article is the electronic one that can be found at <https://doi.org/10.2533/chimia.2025.528>