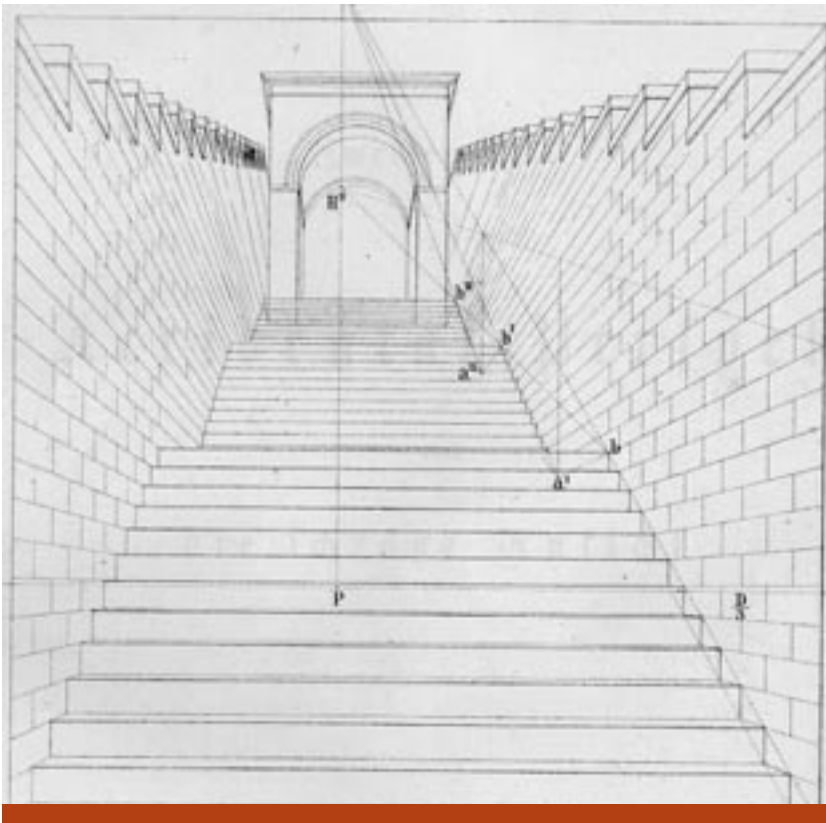


Kultur und Technik in Engführung

Visuelle Analogien und Mustererkennung am Beispiel der Balmerformel



In den allermeisten biographischen Portraits Balmers sowie in der Standardliteratur zur Geschichte der Quantentheorie und in den Lehrbüchern der Physik wurde und wird die nach Johann Jakob Balmer (1825–1898) benannte Formel für die Wellenlängen der Serienlinien des Wasserstoffspektrums bis heute als glücklicher Erfolg einer algebraisch-pythagoräischen Suchstrategie gewertet, wie sie auch den (erfolglos gebliebenen) Versuchen einer Auffindung von Obertonverhältnissen im Spektrum durch diverse Physiker zugrunde gelegen hatte. Der vom Unterricht im Basler Mädchengymnasium

etwas gelangweilte Mathematik- und Physiklehrer Balmer, so die Legende, habe eben nichts besseres zu tun gehabt, als alle möglichen Fitformeln für die Abhängigkeit der Wellenlänge λ von ganzzahligen Laufparametern n und m durchzuprobieren, bis er – angeblich ganz zufällig – auf die „richtige“ Formel gestoßen sei. Demgegenüber wird im folgenden gezeigt, dass Balmers Heuristik **de facto** sehr viel stärker von gewagten visuellen Analogien bestimmt war, die von seiner idiosynkratischen Art des Gestaltsehens von Mustern als perspektivischen Verkürzungen geprägt war.

1. Balmers Hintergrund

Diese spezifische Visualität kam nicht von ungefähr, sondern wurden durch familiäre Prägung und eine für Physiker ungewöhnliche polytechnische Ausbildung stimuliert. Um Balmer zu verstehen – und das gilt übrigens auch ganz allgemein für eine historiographisch stimmige Annäherung an Figuren der Vergangenheit, müssen wir uns unserem Akteur ganzheitlich nähern, ohne zu frühe Abschneidung von vermeintlich privatem oder nebensächlichem. Der 1825 in Lausen (Baselland) als ältester Sohn eines Richters geborene Johann Jakob Balmer hatte seit früher Kindheit Zeichenunterricht von seiner talentierten Mutter erhalten und blieb zeitlebens ein begeisterter Zeichner. Er besuchte die Bezirksschule Liestal und das Pädagogikum in Basel, wo er insbesondere durch den Mathematiklehrer Joseph Eckert geprägt wurde und seine Matura mit Auszeichnung bestand. 1844/45 nahm er ein Studium der Architektur und Mathematik am Karlsruher Polytechnikum auf, das er dann an der Berliner Bauakademie weiterführte, nicht etwa an der Friedrich-Wilhelm-Universität, wie vielfach fälschlich angenommen wurde. In seinem Nachlaß, der in der Basler Universitätsbibliothek liegt, finden sich u.a. Collegienhefte aus seiner Studienzeit, darunter die Mitschrift einer Vorlesung über den „Bildungsgang eines Architekten“, über „bürgerliche Baukunst“ und fein ausgeführte Bleistiftzeichnungen grundlegender architektonischer Bauelemente.¹

Leider sind die Matrikel der Bauakademie als einer der beiden Vorläuferinstitutionen der heutigen Technischen Universität Berlin erst ab 1868 (und nur lückenhaft) erhalten, aber aus zeitgenössischen curricula lassen sich die Lehrinhalte, mit denen der junge Balmer vertraut gemacht wurde, recht gut rekonstruieren: Neben Physik (insb. Statik fester Körper, Hydro- und Aerodynamik), Chemie, Mineralogie, Analysis, Geometrie und Trigonometrie, die von Professoren des Gewerbeinstituts gelehrt wurden, erhielten die angehenden Baumeister und Bau-Inspektoren Unterweisungen in Baukonstruktionslehre und Architekturzeichnen, geometrischer Schattenkonstruktion und Perspektive, Landschaftszeichnen, Ornamentzeichnen und in Architekturgeschichte.

Ende 1848 reichte Balmer eine Dissertation über Cycloide an der Universität Basel ein, mit der er am 3. Oktober 1849 (ohne mündliche Prüfung) promoviert wurde. 1859 reichte er ebenda eine Habilitationsschrift über die Rekonstruktion eines antiken Tempels anhand biblischer Quellen ein. Als Privatdozent bot er dann bis 1890 gelegentlich Lehrveranstaltungen über deskriptive Geometrie, architekturhistorische, kristallographische oder mathematische Themen an der Basler Universität an. Laut Personalkarte für Dozenten der Universität Basel erfolgte seine Habilitation im Sommer 1859 mit Lehrfach: Darstellende Geometrie. 1890 schied er aus gesundheitlichen Gründen aus dem Lehrkörper der Universität aus. Seinen Lebensunterhalt verdiente Balmer jedoch als Lehrer an einem Basler Mädchengymnasium. Wie Schulprogramme der Töchterschule Buergin zeigen, unterrichtete er Schönschreiben, perspektivisches Zeichnen, Geometrie und Arithmetik.

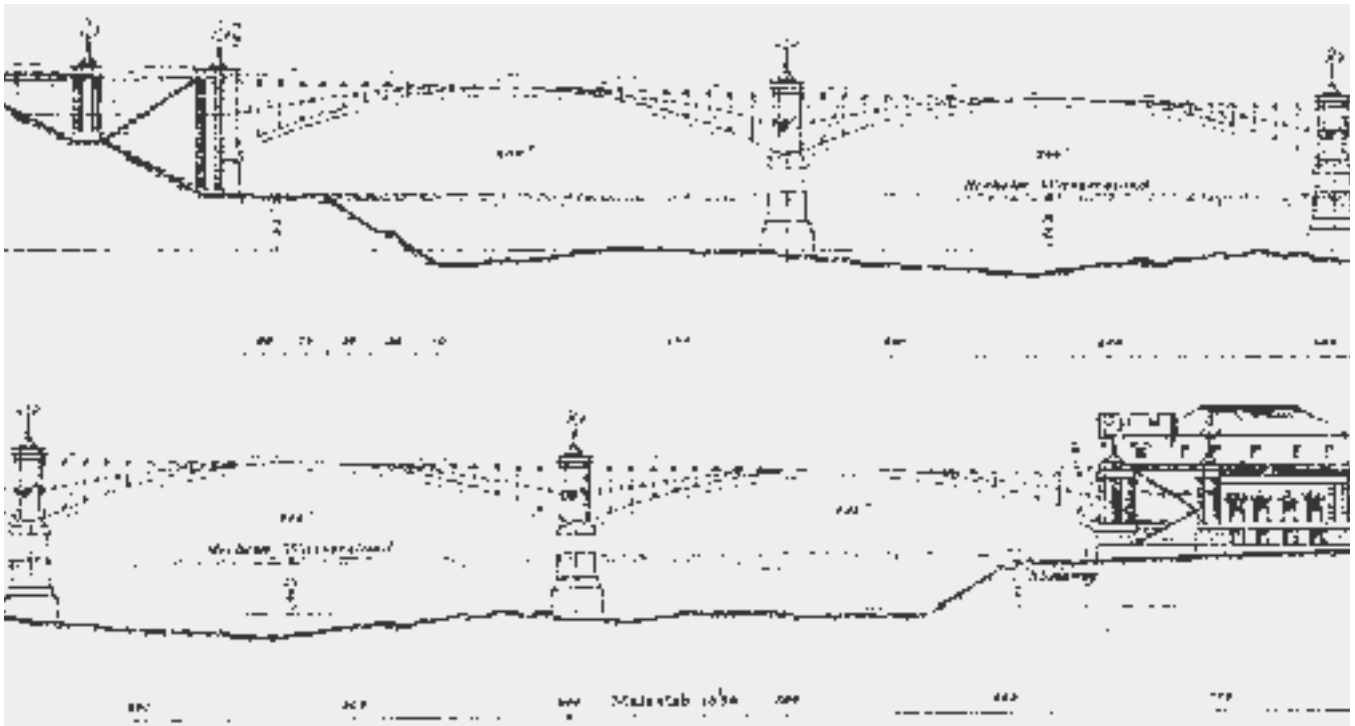
Architektur beschäftigte ihn auch nach seinem Studium weiterhin: z. B. legte er 1876 einen Entwurf für eine obere Rheinbrücke Basels vor, die an dieser Stelle wegen des starken Höhenunterschiedes beider Ufer bislang nicht gebaut worden war, dann aber tatsächlich bald errichtet wurde und nach mehreren Umbauten heute Wettstein-Brücke heißt (01).

Einige Jahre später rettete er Basels mittelalterliche Barfüßler-Kirche in der Altstadt vor der Zerstörung, in dem er auf den historischen Wert und die „vollkommenen Proportionen“ dieses damals stark heruntergekommenen Gebäudes hinwies. Ferner entwarf er auch sein eigenes bis heute weitgehend im Originalzustand erhaltenes Wohnhaus in Klein-Basel am rechtsseiti-

ABSTRACT

Spätestens seit den provozierenden Thesen von Charles Percy Snow (1959) zum Vorhandensein zweier grundverschiedener Wissenskulturen, den Natur- und Technikwissenschaften einerseits sowie den Geisteswissenschaften und der Literatur andererseits, wird immer wieder beklagt, dass beide einander nicht ausreichend verstünden und all zu oft unverbunden nebeneinander her statt konstruktiv miteinander arbeiten. Auch an einer Universität wie der in Stuttgart, wo beide Bereiche räumlich weit getrennt voneinander in zwei verschiedenen Arealen untergebracht sind, hat ein derartiger Verdacht zumindest eine gewisse Anfangsplausibilität. Die nähere Betrachtung der Wissenschaftspraxis hingegen führt immer wieder auf intrikate Formen der Wechselwirkung zwischen den verschiedenen Wissenskulturen. In diesem Beitrag soll jener Nexus zwischen Architektur, Technik, Kunstgeschichte und Buchdruck, Mathematik und Physik an einem interessanten biographischen Beispiel dargestellt werden. Die Kontextualisierung einer gewagten visuellen Analogie, welche dem Basler Mathematiklehrer Johann Jakob Balmer als heuristische Leitlinie zur Auffindung der Balmerformel gedient hat, wird uns nicht nur die herausragende Rolle von anschaulichem Denken in der stark visuell geprägten Kultur der Spektroskopie kurz vor 1900 vor Augen führen, sondern auch zeigen, wie verblüffend eng für Balmer seine Ausbildung in Architektur, sein lebenslang starkes Interesse an Kunstgeschichte und perspektivischem Zeichnen und andere kulturelle Aktivitäten mit seinem mathematisch-physikalischen Beitrag zur Entschlüsselung der Struktur des Wasserstoffspektrums zusammenhängen.

¹ Basel, Öffentliche Bibliothek (im folgenden abgekürzt BÖB), Nachlass 133, Mappen Nr. 19–20)



01

Oben: Ausschnitte aus Balmers architektonischem Entwurf von Basels oberer Rheinbrücke. Lithographierte Beilage zu einer Lokalzeitung mit Balmers Artikel: „Basels obere Rheinbrücke“ (aus BÖB, *Techn. Conv.* 28, no. 5, Orig.maßstab 1:1000).

Unten: Holzschnitt der im Bau befindlichen Brücke (1877) mit Klein-Basel im Hintergrund, aus Theodor Gsell-Fels: *Die Schweiz. Mit Holzschnitten nach Bildern & Zeichnungen* von A. Anker, A. Bachelin, J. Balmer ... München & Berlin: Bruckmann, 1876/77, Bd. 2, S. 390.



02

Portraitphotographie Balmers (BÖB, *Nachlass* 133, Nr. ~14,19).

gen Ufer des Rheins, verschiedene Kirchengebäude sowie preisgünstige, aber optimal durchdachte Arbeiterwohnungen, von denen etliche dann tatsächlich auch im Bachletten-Quartier und auf der Breite realisiert wurden. Eine Preisschrift von 1859 über die optimale Planung „guter und gesunder“ Wohnungen, ein gedruckter Vortrag über „Wohnungsübelstände“, gehalten vor der Generalversammlung des Basler Bauvereins am 14. September 1878 sowie eine den Arbeiterfamilien gewidmete Gesundheitsbroschüre zeugen von Balmers außerordentlichem sozialem Engagement. So war Balmer etwa jahrelang Mitglied im Grossen Rat der Stadt Basel, gehörte der Kirchensynode und dem Kirchenvorstand an, und war als Inspector der Mädchensekundarschule sowie als Armenpfleger tätig.

Auch durch sein Familienumfeld hatte Balmer intensive Verbindung zu visuellen Kulturen: einer seiner Brüder, Josef Balmer (1828–1918), war ein Historienmaler, ein anderer, Fritz, ein talentierter Zeichner. Balmers jüngster Sohn Wilhelm (1865–1922) wurde Zeichenlehrer, und einer seiner Enkel, Karl Dick, wurde Kunstmaler, während zwei andere Musiker wurden. Einer seiner Schwiegersöhne, Wilhelm Knapp, war Bildhauer, und auch heute noch ist das von ihm selbst entworfene Wohnhaus in der Alemannengasse im

Besitz eines Bildhauers (Lorenz Balmer und dessen Familie). Die Schwester der Frau Balmers, die Grenzacher Pfarrerstochter Pauline Rinck, war mit dem Basler Verleger Ferdinand Riehm verheiratet, der religiöse Traktate und kunsthandwerkliche Bücher veröffentlichte, zeitweise unter dem Verlagsnamen BALMER & RIEHM, und die Schwester des besten Freundes von Balmer, Pfarrer Oeri, war mit dem berühmten Basler Kunsthistoriker Jacob Burckhardt (1818–1897) verheiratet. Und in einem Nachruf in der Allgemeinen Schweizer Zeitung von 1898 heißt es: „Dr. Balmer war daneben auch ein trefflicher Kunstkenner. Es war eine Lust, ihm zuzuhören, wenn er z. B. ein Böcklinsches Bild bis in seine tiefsten Empfindungen analysierte.“ Balmers Lebenswelt war also intrikat verzahnt mit etlichen visuellen Kulturen von der Architektur über das Druckhandwerk bis zur Kunstgeschichte.

2. Balmer der Perspektive-Zeichenlehrer

Als Nebenprodukt seines Hauptberufes als Mathematik- und Zeichen-Lehrer in den niedrigeren Klassen der Basler Bürgerschule publizierte Balmer 1887 ein Buch über perspektivisches Zeichnen, aus dem z. B. auch die folgende Abbildung (03) einer Freitreppe stammt.

Nimmt es Wunder, dass der Zeichenlehrer Balmer auch ein Phänomen wie die merkwürdig regelmäßig abnehmenden Abstände markanter Spektrallinien mit diesen perspektivischen Studien in Zusammenhang brachte? Der Mittelteil dieser Treppe, um 90 Grad gedreht, hat Ähnlichkeit mit dem Muster einer sich in den Relativabständen aufeinanderfolgender Linien stets verkürzenden Linienabfolge wie sie bereits Ende der 1870er Jahre im Spektrum des Sterns α Lyrae beobachtet worden war (04).

Der Amateur-Astronom William Huggins (1824–1910) hatte eine aus 12 Linien bestehende Abfolge von Spektrallinien im Spektrum von α Lyrae auf seine Gelatine-Trockenplatte bannen können, deren Regelmäßigkeit ihm bereits aufgefallen war. Doch drang er nicht zur gesetzmäßigen Beschreibung vor – zu diesem Zeitpunkt war man ja noch nicht einmal sicher, ob alle diese Linien wirklich einem Element zuzuordnen waren.

Vor Balmer hatten alle überhaupt an weitergehenden Deutungen Interessierten das Spektrum mit der Brille der Physiker betrachtet. Und Physiker waren (anders als Balmer, der ja nicht Physik, sondern Architektur und Mathematik studiert hatte) mit einer Analogie der Optik zur Akustik erzogen worden und hatten darum in diesen eigenartigen Serienspektren immer Obertonreihen zu erkennen geglaubt. Man sieht das bereits in der graphischen Abtragung der Daten von Huggins 1879 im Frequenz-proportionalen Plot der Oberton-Sucher, mit dem Grundton (d. h. der größten Wellenlänge) ganz links. Der Ire George Johnstone Stoney (1826–1911) hatte bereits 1871 aus den ersten vier schon von Anders Jonas Ångström 1866 aufgelisteten Wellenlängen λ der Wasserstofflinien H_α , H_β , H_γ und H_δ herauszulesen geglaubt, dass drei davon (nach Umrechnung in Vakuumwellenlängen) der 20., 27. und 32. Oberton eines selbst nicht wahrnehmbaren Grundtons von $131277,14 \text{ \AA}$ seien:

Doch so gut die numerische Übereinstimmung dieser drei Wellenlängen war: Stoneys Berechnung hatte mehrere Haken. Wieso paßte die Linie $H_\gamma = 4340 \text{ \AA}$ nicht ins Bild, und vor allem: wieso sollten gerade die 20., 27. und 32. Obertöne eines hypothetischen Grundtons, der seinerseits weit im unsichtbaren Infraroten läge, in der Natur realisiert sein? Auch wenn Stoney auf beide Fragen keine befriedigende Antwort zu geben wußte, erfreute sich die von ihm initiierte Suche nach solchen Obertonverhältnissen in den 1870er Jahren einiger Beliebtheit. Erst Arthur Schusters 1880 wahrscheinlichkeitstheoretisch geführter Nachweis, dass alle diese ver-



03

Balmers Zeichnung einer perspektivisch verkürzten Treppe. Durch die Absätze ist der Konvergenzpunkt der Linien auf der Höhe des Fluchtpunktes H_1 nicht ganz so leicht zu erkennen. Aus J.J. Balmer: *Die freie Perspektive: Einfache und leichte Einführung in das perspektivische Zeichnen fuer Künstler und Kunstfreunde, Kunst- und Gewerbeschüler, sowie zum Selbstunterricht*, Braunschweig: Vieweg, 1887, Tafel IX.



04

meintlich ganzzahligen Obertonverhältnisse mit zufälligen Zahlenverhältnissen zwischen den Wellenlängen erklärbar sind, wie sie bei beliebiger Wahl von Grundton und Obertonzahl allzu leicht gefunden werden können, führte zu einem Abklingen dieser Euphorie, ohne dass eine alternative Deutung in Sicht war.

Huggins Darstellung von zwölf Spektrallinien im Spektrum von α Lyrae. Aus William Huggins: „On photographic spectra of stars“, *Nature* 21 [1879], S. 269–270.

Huggins über twelve „very strong lines“, not only in „remarkable agreement“ in appearance, but also in their relative distances which decreased between any two adjacent lines with increasing refrangibility. „The group possesses a distinctly symmetrical character. The suggestion presents itself whether these lines are not intimately connected with each other, and present the spectrum of one substance.“

Vgl. auch William McGucken: *Nineteenth-Century Spectroscopy. Development of the Understanding of Spectra*, Baltimore: Johns Hopkins Univ. Press 1969, S. 118f. sowie Klaus Hentschel: *Mapping the Spectrum. Techniques of*

Visual Representation in Research and Teaching, Oxford Univ. Press 2002, S. 344ff. über Huggins' Daten und Stoneys Interpretation.

Wasserstoff-Linie (Fraunhofers Bez.)	Ångströms Wellenlängen λ	Stoneys Berechnung (umgerechnet in \AA)
H_α (= C)	6563,93	$(1/20) \times 131277,14 = 6563,86$
H_β (= F)	4862,11	$(1/27) \times 131277,14 = 4862,12$
H_δ (= h)	4102,37	$(1/32) \times 131277,14 = 4102,41$

3. Balmers Gestaltswitch

Balmer war der erste, der Spektren eben nicht als eine Obertonreihe ansah, die einer Fourier-Analyse bedurfte, sondern sie mit den Augen des darstellenden Geometers betrachtete. Während die Physiker seiner Zeit stets die Analogie zur Akustik in das Datenmaterial hineintrugen und

nen Infrarot auszugehen, schrieb Balmer Stoneys Numerik um und deutete alle ihm bis dato bekannten Wasserstofflinien als gebrochenzahlige Vielfache einer fundamentalen Länge von 3645,6 Å. Darauf könnte er gekommen sein, indem er die Stoneyschen Verhältniszahlen 1/20, 1/27 und 1/32 mit 36 als einer Art gemeinsamem Nenner multiplizierte:

Wasserstoff-Linie	Wellenlänge (Å in Luft)	Balmers Berechnung	$\lambda_B - \lambda_{\text{Å}}$
H $_{\alpha}$	6562,1	(36/20) x 3645,6 = 6562,08	0,02
H $_{\beta}$	4860,7	(36/27) x 3645,6 = 4860,8	0,1
H $_{\gamma}$	4340,1	(25/21) x 3645,6 = 4340	0,1
H $_{\delta}$	4101,2	(36/32) x 3645,6 = 4101,3	0,1

nach einer *niedrigsten Grundfrequenz* ν_0 mit Obertönen $n \cdot \nu_0$ suchten, erschien Balmer nichts natürlicher als eine asymptotische Konvergenz hin zur *kürzesten Wellenlänge* λ_0 , analog den perspektivischen Verkürzungen z. B. von Treppenstufen bei steigendem Abstand vom Betrachter (vgl. nochmals das Zentrum von (03)). In Übertragung von Ludwik Flecks Konzept eines „Denkzwangs“, der mit jedem Denkstil verbunden ist, könnte man hier geradezu von einem „Seh- oder Gestaltzwang“ reden: Balmer wird sich der ihm aufdrängenden Analogie jener sich verkürzenden Abstände zwischen den Serienlinien einerseits und den sich verkürzenden Abständen zwischen Treppenstufen, Bahnschwellen o. ä. kaum erwehrt haben können.

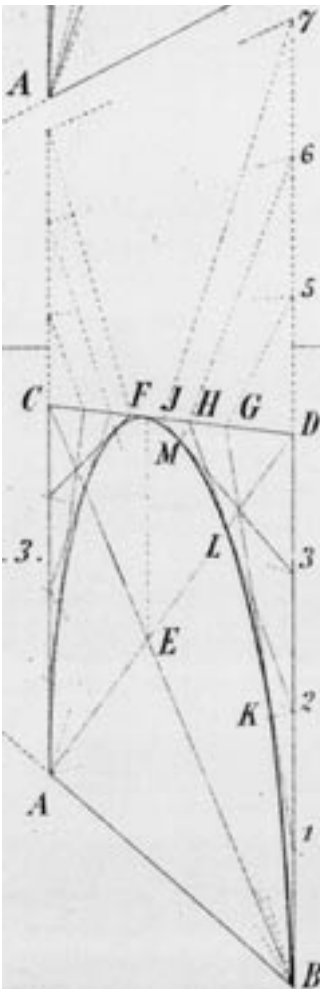
Wenn es sich um etwas zu *Längenverkürzungen* analoges handelt, dann sollte – so muß Balmer weitergeschlossen haben – eine (Wellen-) *Längen* zugrundeliegende Darstellungsform benutzt werden, also ein „normales Spektrum“, und *nicht*, wie von den Oberton-besessenen Physikern bislang präferiert, eine *Frequenz*-proportionale Darstellung. Beide sind zwar physikalisch vollkommen äquivalent, aber eben nicht heuristisch. Balmer war durch seinen kulturell andersgearteten Erwartungshorizont befähigt, ein Muster zu erkennen, das eine ganze Generation von Forschern vor ihm *so nicht* gesehen hatte und wegen der ihr antrainierten optisch-akustischen Analogie wohl auch nicht hatte sehen *können*. Anstatt also wie Stoney von einer Grundfrequenz hoffnungslos jenseits aller damaliger Beobachtungsmöglichkeiten im fer-

Auch die von Stoney nicht interpretierbare Linie H $_{\gamma}$ paßte in dieses Schema, und (wie die letzte Spalte der vorstehenden Tabelle zeigt) die Differenz der Ångströmschen Originalwerte (nicht wie bei Stoney umgerechnet in Vakuumwellenlängen!) zu dem aus diesem algebraischen Ansatz folgenden Werten betrug nirgends mehr als 0,1 Å, d.h. weniger als 1/40000 der Wellenlänge, damals noch innerhalb der Fehlergrenzen für diese vor 1880 erfolgte experimentelle Bestimmung². Die Abfolge der vier gebrochenzahligen Faktoren schien zunächst unverständlich, zeigte aber nach Kürzung um gemeinsame Faktoren und Erweiterung des zweiten und vierten Koeffizienten um 4/4 ein algebraisierbares Muster: 9/5, 16/12, 25/21 und 36/32 bzw. verallgemeinert (1):

$$m^2 / (m^2 - 4), \text{ wobei } m = 3, 4, 5 \text{ und } 6.$$

Spätestens an diesem Punkt brach Balmer die numerisch-algebraische Suchstrategie ab und ging vollends zu einer geometrischen Rekonzeptualisierung des Problems über. Jetzt kam immer stärker der Geometer und Perspektive-Zeichenlehrer in ihm durch. Weiteres Nachdenken über perspektivische Verkürzungen wie in (03) zeigten ihm, weshalb diese erste spontane Analogiebildung noch nicht zum Ziel führte, denn unabhängig von der gewählten Neigung der Treppe konvergiert die Abfolge der verschiedenen Treppenstufenkanten zu langsam im Vergleich mit den Beobachtungen an Wasserstoffspektren (04). Dennoch stecken in dieser ersten simplen Analogiebildung bereits entscheidende heuristische Weichenstel-

² Erst mit den 1882 entwickelten Rowlandschen Konkavgittern erfolgte ein Sprung in der maximal erreichbaren Messgenauigkeit auf $\pm 0,01$ Å: siehe dazu Klaus Hentschel: „The discovery of the redshift of solar Fraunhofer lines by Rowland and Jewell in Baltimore around 1890“, *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 23,2 [1993], S. 219–277.



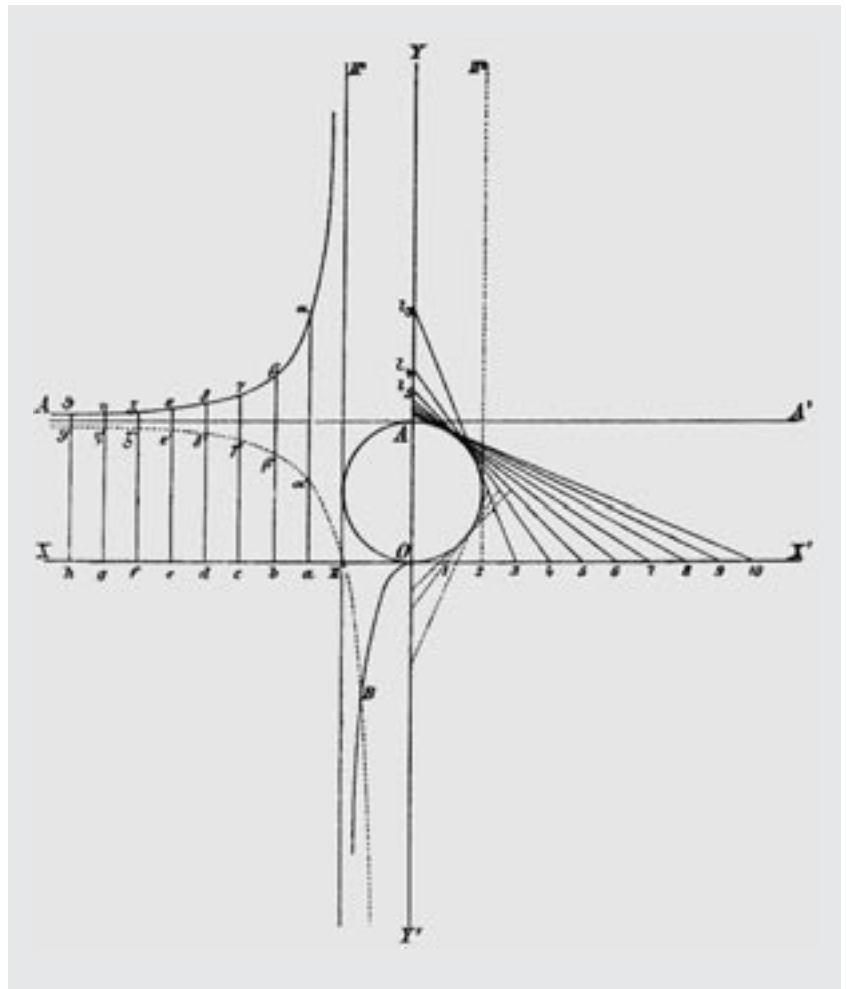
05

Balmers Tangentenmethode zur Konstruktion perspektivisch verkürzter Halbkreise AMKB. ACDB ist das einschreibende verkürzte Rechteck. Aus Balmer (1884) Tafel III,3

lungen, die Balmer bei seiner weiteren Suche geleitet haben, denn er mußte nur eine gekrümmte Oberfläche des perspektivisch verkürzten Körpers annehmen, um raschere Konvergenz zu bekommen.

4. Die zielführende visuelle Analogie

Eine besser konvergierende perspektivische Verkürzung fand Balmer bei Betrachten der scheinbaren Breite von runden Säulen, beginnend bei sehr geringen, dann in gleichmäßigen Intervallen größerwerdenden Abständen. Pate stand ihm dabei ein Aufsatz über Kreisperspektive, den Balmer just 1884 im Schulprogramm seiner Töchterschule Buergin publiziert hatte. Dieser Aufsatz enthält ausführliche Kommentare und Anweisungen zur geometrischen



06

Konstruktion perspektivisch verkürzter Kreise, wie sie der Pariser Architekt Jean Thomas Thibault (1757–1826) angegeben hatte und wie sie in der Architektur eben insbesondere bei Säulen ständig vorkamen.³ Thibaults Methode basierte auf der Idee, den zu konstruierenden Kreis in ein Quadrat eingeschrieben zu denken. Durch gezielte Aufsuchung pythagoräischer Dreiecke, deren Seitenlängen die Verhältnisse 3:4:5 haben, konstruiert Thibault jeweils einen weiteren Punkt des verkürzten Kreises. In seiner Schrift von 1884 entwickelte Balmer eine Alternative zu diesem korrekten, aber etwas mühsamen Verfahren: die sogenannte Tangentenmethode, mit der im Prinzip eine beliebig große Zahl von Tangenten an den verkürzten Kreis AMKB konstruiert werden können. Die vertikale Tangente an den Kreis durch B wird in vier gleiche Teile (B–1, 1–2, 2–3, und 3–D) geteilt und um drei weitere gleichlange Einheiten nach oben hin verlängert. Die Punkte 4, 5 und 7 werden durch gerade Linien mit dem Punkt A verbunden, wo-

Balmers geometrische Deutung der Serienlinien; aus J. J. Balmer: „A new formula for the wave-lengths of spectral lines“, *Astrophysical Journal* 5 [1897], S. 199–209 und Tafel VIII.

³ Siehe J. T. Thibault *Application de la perspective linéaire aux arts du dessin*, Paris: Renouard 1827 (postume Ausgabe von Thibaults Schüler N. Chapuis), Kap. 6–7, und T. 21–7, sowie Balmer „Zur Perspektive des Kreises“, in *Schulprogramm der Töchterschule Buergin*, Basel, 1884, S. 1–11 und Tafel I–IV.

durch man die Schnittpunkte G , H und J mit der Linie CD erhält. Dann sind die Linien, die 1 mit $\frac{1}{4}$, 2 mit H und 3 mit J verbinden, alle tangential an den gesuchten Halbkreis, den sie in den Punkten K , L und M berühren.

Was dieses geschickte perspektivische Verfahren mit der Balmerschen Formel zu tun hat, sieht man am einfachsten anhand (06); Balmer selbst hat diese Abbildung 1897 in einem wenig bekannten englischen Aufsatz im *ASTROPHYSICAL JOURNAL* zur Erläuterung der geometrischen Bedeutung seiner Formel publiziert.

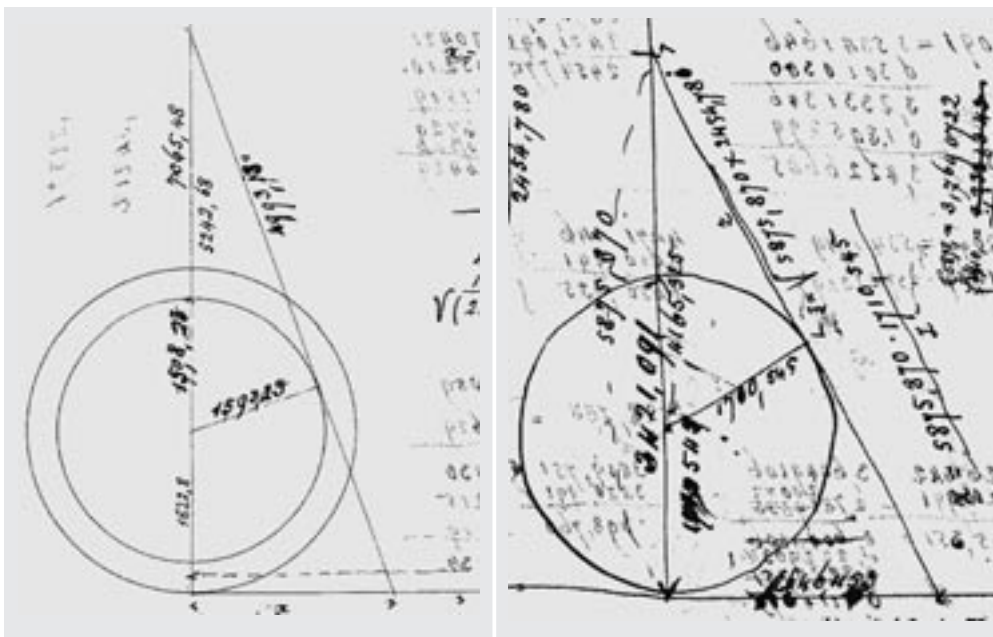
Wie breit erscheint eine Säule (mit Radius zweier Längeneinheiten) einem Beobachter, der sich entlang der X-Achse tangential zur Säule von ihr in Längeneinheitschritten wegbewegt? Wenn wir als Projektionsfläche die Ebene YY' wählen, hat diese Frage eine geometrisch einfach Ant-

X- und Y-Achse). Diese Abfolge scheinbarer Durchmesser der Säule auf der Projektionsebene YY' „entspricht“ in dieser Betrachtungsweise den kleiner werdenden Wellenlängen λ_i der Wasserstoffserie (die links nochmal abgetragen sind). Aus dieser Konstruktion wird sofort verständlich, wieso diese Abfolge nicht kleiner werden kann als der tatsächliche Durchmesser der Säule AO , der somit der Grenzwellenlänge λ_0 gleichkommt. Soweit die geometrische Idee; was noch folgt ist die numerische Prüfung und Setzung des Radius dieser Säule als $n = 2$ Längeneinheiten. Begänne man mit der einfachsten Annahme einer Längeneinheit, so würde am Ende nur jede zweite Wasserstofflinie erfaßt, deshalb war die Annahme von zwei Längeneinheiten heuristisch gesehen die dann nächstliegende. Zwei erst vom Autor dieses Beitrags 2002 veröffentlichte lose Blätter in einer

von Balmer selbst angelegten Sammlung seiner Unterlagen über die „Spektrallinien des Wasserstoffs“ zeigen die letzte Stufe dieser Anpassung seines mentalen Modells an die Numerik der Daten.

(07) links zeigt, wie Balmer noch mit der Zählung der Einheiten entlang der x-Achse sowie mit der genauen Platzierung der Projektionslinie bzw. dem Radius der Säule experimentiert: der größere der beiden hat bereits den Wert 1823,8, d. h. $\lambda_0/2 = 3645,6 \text{ \AA}/2$, während der Durchmesser des Kreises in (07) rechts auf 3421,091 Å angesetzt ist, mithin 24,5 Å kleiner als der 1885 von Balmer dann publizierte Wert von λ_0 .

Die in der endgültigen Fassung durch Zunahme des Beobachter-Abstands vom Punkt 0 in ganzzahligen Vielfachen m dieser Längeneinheit resultierende Streckenabfolge bildete nun im Rahmen der damaligen Meßgenauigkeit erstaunlich genau die Strecken- (= Wellenlängen-) Verhältnisse ab, die für die ersten Linien der Wasserstoffserie Balmer bis dato bekannt geworden waren. Aus elementarer Geometrie resultiert für das Verhältnis des scheinbaren Säulendurchmessers l_m zum Grenzwert des tatsächlichen Durchmessers l_∞ die bekannte Balmerformel (2):



Zwei Zeichnungen auf einem größeren losen Blatt aus dem Balmer-Nachlaß, BÖB, Mappe 12, ca. 1884.

wort: Die Abfolge der Strecken l_3, l_4, l_5 usw., die Balmer links in (06) nochmals abträgt. Betrachten wir einen Beobachter, der sich von einer Säule mit Durchmesser AO entlang der X-Achse wegbewegt, die zu dieser Säule tangential liegt. Dann wird die scheinbare Breite der Säule, gemessen durch die Strecke zwischen den Schnittpunkten der beiden tangentialen Geraden durch die Y-Achse, um so kleiner werden, je weiter sich der Beobachter wegbewegt hat. Es ergibt sich also eine kleiner werdende Abfolge von Intervallen l_3, l_4, l_5 (gemessen jeweils vom Schnittpunkt 0 der

$$\lambda_m/\lambda_\infty = m^2 / (m^2 - n^2), \text{ mit } n = 2 \text{ und } m \geq 3.$$

Im oberen linken Quadranten von (06) konstruierte Balmer dann noch aus den resultierenden Wellenlängen α, β, γ deren zur Frequenz ν proportionale Inverse α', β', γ' , die natürlich ansteigen, wenn erste fallen, da $\nu = c/\lambda$ Frequenz und Wellenlänge einander umgekehrt proportional sind. Der minimalen Wellenlänge λ_0 entspricht die Grenzfrequenz ν_∞ .

5. Balmers visionäre Extrapolation

Weil die Formel (2) für die wenigen ihm zunächst bekannten Wasserstoff-Linien so ausgezeichnet funktionierte, erwog Balmer 1885 übrigens sogar schon, ob der Parameter n , (geometrisch interpretiert als der Radius der Säule) nicht eigentlich auch andere ganzzahlige Werte annehmen könne:⁴

„Von Wasserstofflinien, welche der Formel für $n = 3, 4$, etc. entsprächen, und welche man als Linien dritter, vierter Ordnung u.s.w. bezeichnen könnte, finden sich in den bis jetzt bekannt gewordenen Spektren keine vor; sie müssten sich etwa unter ganz neuen Temperatur- und Druckverhältnissen entwickeln, um wahrnehmbar zu werden.“

Die Tabelle in (08) aus seinem Nachlaß zeigt seine Vorausberechnung weiterer Spektrallinien für verschiedene Werte von n und m .

Das heißt: schon 1885 hatte Balmer gestützt auf sein geometrisch-perspektivisches Verfahren die Möglichkeit weiterer Spektralserien des Wasserstoffs ins Auge gefaßt (wie sie später dann von Paschen, Lyman und Brackett entdeckt wurden)! Nur mangels

The image shows a handwritten table titled 'Wasserstofflinien' (Hydrogen lines) with columns for different orders (I. Ordnung, II. Ordnung, III. Ordnung, IV. Ordnung, V. Ordnung, VI. Ordnung, VII. Ordnung, VIII. Ordnung). The rows list various spectral lines (H-alpha, H-beta, H-gamma, H-delta, H-epsilon, H-zeta, H-eta, H-theta, H-iota, H-kappa, H-lambda, H-mu, H-nu, H-xi, H-omicron, H-pi, H-rho, H-sigma, H-tau, H-ypsilon, H-phi, H-omega) and their corresponding wave lengths in Angstroms. The calculations are based on Balmer's formula. The table is filled with numerical values and some handwritten notes.

empirischer Daten in diesen damals noch unzugänglichen Wellenlängenbereichen stellte er diesen Gedanken zurück und konzentrierte sich auf die Variation von m bei Festhalten von $n = 2$, was auf eine theoretische Seriengrenze $\lambda_\infty = h$ im Ultravioletten führte: $\lambda_m = h m^2 / (m^2 - 4)$. Wie schon oben in (T.02) gezeigt, passte diese Formel für Werte von $m = 3$ bis 6 zu Ångströms (Luft-)Wellenlängen für H_α bis H_δ , wenn er für $h = 3,645,6 \text{ \AA}$ einsetzte. Für höhere Werte von m kam Balmer zu Wellenlängenvoraussagen λ_m , von denen der mit Balmer befreundete Basler Physi-

Balmers Vorausberechnung der Wellenlängen weiterer Spektrallinien des Wasserstoffs aus Formel (2) in verschiedenen Ordnungen (8 Spalten für die 1.–8. Ordnung), aus BÖB, Nachlass 133, Mappe 12

⁴ Siehe Balmer: „Notiz über die Spektrallinien des Wasserstoffs“, Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft Basel 1885, S. 548–560, 750–752; bzw. abgedruckt auch in den Annalen der Physik, 3. Serie. 25 (1886), S. 80–87, dort insb. S. 84.

ker Jacob Eduard Hagenbach-Bischoff (1833–1910) nach Rückfrage bestätigen konnte, dass ganz ähnliche Werte von Experimentatoren bereits gemessen worden waren.

Der Photochemiker Hermann Wilhelm Vogel (1834–1898) hatte ganz ähnliche Serien im ultravioletten Teil von Wasserstoffspektren nachgewiesen, die in Geissler-Röhren zum Leuchten gebracht worden waren. Um sicherzustellen, dass es sich hierbei wirklich nur um Wasserstoff handeln konnte, hatte er den Wasserstoff in der damals reinsten elektrolytisch erzeugten Form in die Röhren einfüllen lassen und sorgsam darauf geachtet, jedwede Kontamination mit anderen Materialien zu vermeiden. Der Vergleich mit Vogels Messwerten für die ersten vier neuen Linien ergab eine Übereinstimmung von $\pm 0,5 \text{ \AA}$, und keine der Linien wich mehr als 1 \AA von Balmers Tabellen ab; Huggins Sternspektren enthielten noch 6 weitere Linien, da Huggins mit einem Quarzprisma gearbeitet hatte und nicht mit einem im UV stark absorbierenden Flint-Glas-Prisma wie Vogel. Auch hierbei blieben die Abweichungen zwischen experimentellen Messungen und den „Voraussagen“ Balmers aufgrund der noch sehr spekulativen Formel (2) unterhalb von $3,9 \text{ \AA}$. Nachdem Huggins' sehr ungenaue Wellenlängenschätzungen 1886 durch Alfred Cornu präzisiert worden waren, verbesserte sich die quantitative Übereinstimmung der ersten 13 Balmerlinien mit seinen Voraussagen sogar noch auf eine Fehlerbreite unter $\pm 0,6 \text{ \AA}$. Durch weitere Messungen erhöhte sich die Zahl dieser „Balmerlinien“ im Wasserstoffspektrum bald auf über 30, bei weiter sinkender Diskrepanz zwischen Theorie und Experiment auf $\pm 0,02 \text{ \AA}$ und darunter.

Wohlgemerkt, ich behaupte nicht, dass durch diese visuelle Analogie das „Rätsel der Wasserstoffserie“ (wie Balmer es nannte) bereits physikalisch verstanden war; dazu bedurfte es bekanntlich eines Ernest Rutherford und eines Niels Bohr sowie noch dreier Jahrzehnte weiterer physikalischer Forschung. Aber es sollte klar geworden sein, welche große Bedeutung ein in der Phänomenologie behaftetes „anschauliches Denken“ in der Spektroskopie des 19. Jahrhunderts gehabt hat. Oder, wie Balmer 1897 formulierte: „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“.

6. Anschauliches Denken

Das Beispiel der Auffindung der Balmerformel des Wasserstoffspektrums ist kein Einzelfall. Auch Balmers Zeitgenosse Janne Rydberg (1854–1919), der analoge Serienformeln für die Serienspektren von Alkali- und Erdalkalimetallen fand, basierte auf visuell-geometrischen Suchstrategien (in seinem Fall der Aufzeichnung der Wellenlängenverhältnisse auf Millimeterpapier) mit nachfolgender geometrischer Suche nach Fitfunktionen. Wie ich andernorts ausführlicher gezeigt habe⁵, waren vor 1900 ganz allgemein diejenigen Forscher erfolgreicher, die sich bei dieser Mustersuche *graphischer* Methoden bedienten (darunter z. B. Balmer und Rydberg), während stark algebraisch-numerisch angelegte Suchstrategien (wie z. B. bei Heinrich Kayser und Carl Runge) kaum erfolgreich ausfielen. Dazu bieten sich auch Parallelen außerhalb des hier betrachteten Feldes der Spektroskopie an: Arthur Ian Miller hat in seinem Buch über *Imagery and Creativity in Science and Art* (1996) u. a. anhand von Bohr, Einstein, Heisenberg, Maxwell, Fermi, Salam und Weinberg gezeigt, dass alle diese Wissenschaftler „strongly prefer the visual mode of thought in their research“ (S. 281).

Was sich in diesen Arbeiten äußert, ist etwas, was wir in Rückgriff auf Rudolf Arnheims bahnbrechendes Buch von 1969 „anschauliches Denken“ nennen sollten. Denn außer dem diskursiven, von Worten, Sätzen und Argumenten getragenen Schließen, wie wir es normalerweise mit „Denken“ gleichsetzen, gibt es sehr wohl auch andere, nichtverbale Formen des Erschließens von Zusammenhängen und Findens von Neuem. Neben dieser einen Form anschaulichen Denkens, der **Mustersuche** in Serien- und Bandenspektren, die wir hier an einem Beispiel näher betrachtet haben, lassen sich mindestens folgende **Grundtypen** unterscheiden:

⁵ Siehe Klaus Hentschel: *Mapping the Spectrum. Techniques of Visual Representation in Research and Teaching*, Oxford Univ. Press 2002, insb. Kap. 8.

DER AUTOR

KLAUS HENTSCHEL

studierte in Hamburg Physik (mit einem Diplom in theoretischer Hochenergiephysik) und Philosophie (mit einem Magister zur Korrespondenz von Einstein und Schlick), wurde dann mit einer Studie zu Fehlinterpretationen der Relativitätstheorie Einsteins in Geschichte der Naturwissenschaften promoviert und habilitierte sich mit einer Monographie zum Wechselspiel von wissenschaftlichem Instrumentenbau, Experimentierpraxis und Theoriebildung in der Spektroskopie und Astrophysik. Seit 2006 leitet er die Abteilung für Geschichte der Naturwissenschaften und Technik der Universität Stuttgart. Im Sommersemester 2009 wird er eine Vorlesungsreihe über die Geschichte visueller Wissenschafts- und Technikkulturen mit Begleitseminar zur Geschichte der Photographie sowie ihrer wissenschaftlichen und technischen Anwendung anbieten.

Kontakt

Universität Stuttgart, Abteilung für Geschichte der Naturwissenschaften und Technik

Heilbronner Str. 7, 70174 Stuttgart

Tel. 0711| 685-82312, Fax 0711| 685-82767

E-Mail: klaus.hentschel@po.hi.uni-stuttgart.de, Internet: www.uni-stuttgart.de/hi/gnt/hentschel



- **visuelle Analogien** (Balmers Analogie des Wasserstoffspektrums zu perspektivischer Verkürzung sowie z.B. auch die in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts beliebte Suche nach Homologien zwischen Spektren; außerhalb der Spektroskopie u. a. William Harveys Deutung des Herzens als Pumpe, J.A. Roebblings Übertragung der Haltevorrichtungen von Schiffsmasten auf die Konstruktion von Hängebrücken wie etwa der Brooklyn Bridge von 1884, Edisons oder Sperrys Analogien zwischen verschiedenen technischen Apparaten, sowie Leonardos Strukturvergleiche von Wasserwirbeln und Haarzöpfen, Rückenmuskulatur und Schiffsmasten, Adern und Treppenaufgängen, etc.),
 - **räumliches Denken** (z. B. van't Hoff's Visualisierung der Valenzen eines Kohlenstoffatoms als Seitenkanten eines Tetraeders oder Kekulé's Traumbild eines Kohlenstoffrings),
 - analytische **Zerlegung** komplexer Sinneseindrücke in einfache, „gute“ Gestalten (Alexander Herschels Deutung der CO-Bande als zweier superponierter Serien sowie z. B. Leonardos Explosionszeichnungen),
 - kinematographische **Abfolge** (Feddersens Photographie von Funkenspektren mithilfe rotierender Spiegel, Muybridges Serienphotographien der Bewegungsabläufe von Tieren und Menschen oder Bjerknæs Diagramme zur Entwicklung von Wetterfronten),
 - **Ergänzen des Unvollständigen** (beim perspektivischen Sehen etwa das automatische Ergänzen teilweise verdeckter Teile, beim Ingenieurentwurf das Einsetzen fehlender Maschinenelemente, etc.),
 - **Typisierung** (z. B. Abgrenzung verschiedener spektraler Sternklassen oder chemisch charakteristischer Spektren), sowie
 - **Schematisierung** von Prozessen (prismatische Aufspaltung, Minkowski-Diagramme, Feynman-Diagramme oder Flußdiagramme der Informatiker).
- Viele dieser Visualisierungsstrategien (sowie etliche weitere, erst später auftretende) finden sich auch heute noch in der Arbeitspraxis von Naturwissenschaftlern und Technikern wieder. Wie das Beispiel Balmer uns gezeigt hat, steht ihr spezifischer Einsatz oft in engem Zusammenhang zu der Lebenswelt und der Ausbildung der Akteure. Schon darum ist es für die spätere historische Rekonstruktion der individuellen Ausprägung des Gestaltsehens wichtiger Akteure unabdinglich, nicht nur den wissenschaftlichen Teil eines Nachlasses aufzuheben, sondern auch vermeintlich nebensächliche Aktivitäten wie Hobbys (Photographie, Zeichnen, Modellbau ...) mit zu dokumentieren.⁶ Allgemeine Kultur einerseits und Naturwissenschaft und Technik andererseits sind eben doch viel enger miteinander verbunden als P.C. Snows Doktrin von den zwei oder drei Kulturen uns glauben machen läßt. •

Klaus Hentschel

⁶ Nähere Empfehlungen zur rechtzeitigen Sicherung von historisch wertvollem Quellenmaterial findet man in Klaus Hentschel: „Bitte nicht wegwerfen!“, *Physik-Journal* Märzheft 2008, S. 3.