

Es begann mit einem Tagtraum: zum 150-jährigen Jubiläum der Benzolformel

Alan J. Rocke*

Benzol · Kekulé, August · Wissenschaftsgeschichte

„Da saß ich und schrieb an meinem Lehrbuch; aber es ging nicht recht; mein Geist war bei anderen Dingen. Ich drehte den Stuhl nach dem Kamin und versank in Halbschlaf. Wieder gaukelten die Atome vor meinen Augen. Kleinere Gruppen hielten sich diesmal bescheiden im Hintergrund. Mein geistiges Auge, durch wiederholte Gesichte ähnlicher Art geschärft, unterschied jetzt größere Gebilde von manigfacher Gestaltung. Lange Reihen, vielfach dichter zusammengefügt; alles in Bewegung, schlangenartig sich windend und drehend. Und siehe, was war das? Eine der Schlangen erfasste den eigenen Schwanz und höhnisch wirbelte das Gebilde vor meinen Augen. Wie durch einen Blitzstrahl erwachte ich; auch diesmal verbrachte ich den Rest der Nacht um die Konsequenzen der Hypothese auszuarbeiten.“^[1]“

So beschrieb August Kekulé (1829–1896; Abbildung 1) die Umstände, unter denen er seine größte Eingebung hatte, was wiederum Arthur Koestler dazu veranlasste, von dem „vermutlich wichtigsten Traum der Geschichte seit Josefs Traum von den sieben fetten und den sieben mageren Kühen“ zu sprechen.^[2] Zum Zeitpunkt dieser spätabendlichen Träumerei – sie fand wahrscheinlich im Frühjahr 1862 statt, wenn sie wirklich so wie beschrieben verlief^[3] – war Kekulé Professor der Chemie an der französischsprachigen Universität Gent. Im Januar 1865 enthüllte er diese molekulare Vision des Benzols, ohne dabei irgendwelche persönlichen Einzelheiten zu erwähnen. Der Beitrag wurde bei einer Sitzung der *Société Chimique de Paris* vorgestellt und dann in deren *Bulletin* veröffentlicht (Abbildung 2).^[4]

Kekulés Theorie, dass Benzol strukturell identisch mit Cyclohexatrien ist, wurde rasch von den meisten deutschen Chemikern akzeptiert, wenigstens als wertvolle heuristische Konvention. Der resultierende Schub seines Bekanntheitsgrades führte schon zwei Jahre später zu einem Ruf an die Universität Bonn, wo er den Rest seiner wissenschaftlichen Laufbahn verbrachte. Seine Berühmtheit war wohlverdient, denn ein genaues Verstehen der aromatischen Verbindungen sollte alsbald tiefgreifende Konsequenzen für die akademische und die industrielle Chemie haben. Kekulés älterer Zeitgenosse August Wilhelm von Hofmann, der Gründer der

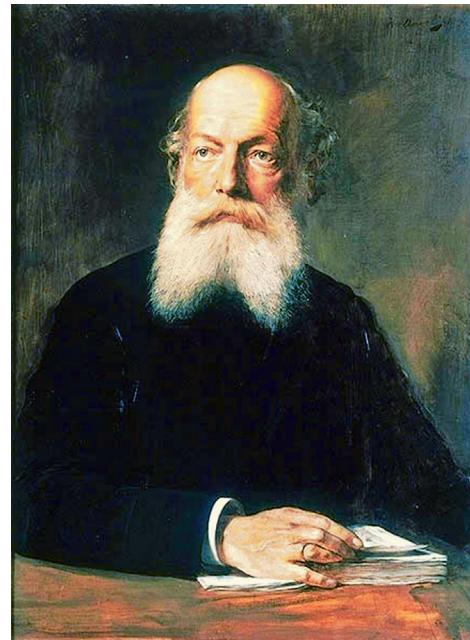


Abbildung 1. August Kekulé (1829–1896).

Deutschen Chemischen Gesellschaft, vormaliger Präsident der Chemical Society of London und in vielerlei Hinsicht der Superstar der deutschen Chemie im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts, bekannte später wehmütig zu einem Freund: „Alle meine Entdeckungen gäbe ich hin gegen den einen Gedanken Kekulés.“^[5]

Kekulé berichtete über seine Eingebung auf dem sogenannten „Benzolfest“, einer aufwändigen Feier in Berlin, mit der der 25. Jahrestag der Veröffentlichung seiner ersten Publikation über die Benzolstruktur gedacht wurde.^[6] Heute, 150 Jahre nach der ersten Veröffentlichung, können wir Hofmanns Gefühl für die historische Bedeutung von Kekulés großartiger Idee nur zustimmen und erneut diesen Markstein in der Entwicklung der Chemie feiern.

Der Hintergrund

In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts hatten die Chemiker noch nicht erkannt, dass es eine besondere Verbindungsklasse gibt, die wir heute aromatische Verbindungen

[*] A. J. Rocke
Case Western Reserve University, Dept. of History
10900 Euclid Avenue, Cleveland, 44106-7107 (USA)
E-Mail: ajr@case.edu

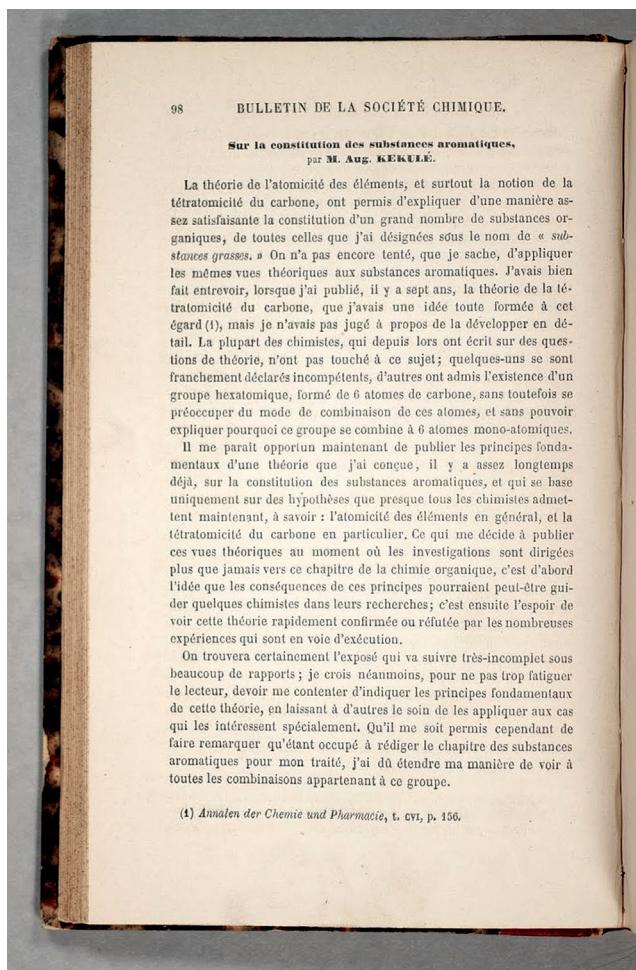


Abbildung 2. Die erste Seite des 1865 erschienenen Artikels.^[4]

nennen, was zum Teil daran lag, dass nur wenige Substanzen bekannt waren, die zur Benzolfamilie zählen. Das am frühesten bekannte Mitglied dieser Familie, Benzoësäure, war schon lange als Komponente des wohlriechenden („aromatischen“) Handelsprodukts Benzoeharz erkannt worden, nach dem die Säure benannt ist. Im Jahre 1825 hatte Michael Faraday aus komprimiertem Leuchtgas einen Kohlenwasserstoff isoliert, der später Benzol oder Benzen genannt werden sollte. Langsam wuchs die Liste der von Benzol und Benzoësäure abgeleiteten Verbindungen und 1855 führte Hofmann das Wort „aromatisch“ ein, um damit die chemischen –

Alan J. Rocke ist Bourne Professor of History and Distinguished University Professor an der Case Western Reserve University in Cleveland, Ohio, USA. Er hat sich auf die Geschichte der europäischen Chemie im 19. Jahrhundert spezialisiert und bisher fünf historische Monographien und rund 50 Zeitschriftenbeiträge veröffentlicht. Bei seinem jüngsten Buch *From the Molecular World* (Springer, 2012) handelt es sich um eine kommentierte Übersetzung von Hermann Kopp's Werk *Aus der Molecular-Welt* (Winter, 1882) ins Englische.

statt der olfaktorischen – Eigenschaften dieser Substanzen zu beschreiben.^[7]

Im Jahre 1858 entwickelten Kekulé und Archibald Couper unabhängig voneinander die Grundzüge der sogenannten Strukturtheorie, und ein internationaler Wettbewerb setzte ein, um die molekularen Strukturen bekannter organischer Verbindungen zu ermitteln.^[8–10] Dieses war im 19. Jahrhundert keine leichte Aufgabe, denn die Chemiker mussten sich ausschließlich auf makroskopische, nass-chemisch gewonne- ne Daten beziehen. Maschinen, mit deren Hilfe ein genauer Zugang zu Moleküldaten ermittelt werden konnte, gab es nicht. Vorschläge über die Struktur einfacher aliphatischer Verbindungen begannen regelmäßig in der chemischen Lite- ratur zu erscheinen, aber komplexere Verbindungen entzogen sich zunächst jeglicher Charakterisierung.

Der führende Wissenschaftler während der Periode der frühen organischen Strukturchemie war Kekulé selbst. Er entwickelte Strukturideen nicht nur in seinen Zeitschriftenartikeln, sondern auch auf den Seiten seines Lehrbuchs, des- sen ersten beiden Bände hintereinander in Form von sechs „Lieferungen“, die zwischen 1859 und 1866 erschienen,^[11] publiziert wurden. Seine Arbeit aus dem Jahre 1858 über die Strukturtheorie und der erste Band seines Lehrbuchs (1859–1861) beschäftigten sich fast ausschließlich mit aliphatischen Verbindungen, wenngleich er vage Bemerkungen über „kohlenstoffreiche“, einschließlich aromatische Substanzen machte. Offensichtlich dachte er dabei an Strukturen, die Kohlenstoff-Kohlenstoff-Mehrfachbindungen enthielten. Er wollte erste Hinweise über diese Substanzen treffen, war aber noch nicht bereit, sich grundsätzlich mit aromatischen Strukturen zu befassen.

Andere waren nicht so zurückhaltend. In einer Arbeit, in der Couper seine Strukturtheorie ankündigte, schlug er eine mögliche Struktur für Salicylsäure vor, die darauf beruhte, dass Benzol selbst ein geradkettiges Diallen war (1,2,4,5-Hexatetraen).^[9] 1861 erwähnte ein damals noch unbekannter Wiener Schullehrer mit dem Namen Joseph Loschmidt die Diallen-Hypothese, ohne sie jedoch zu bevorzugen. Statt- dessen, so schrieb er, „könnte man fast versucht sein“, sich Benzol als planares Arrangement vorzustellen, als eine Struktur, die wir heute als vier miteinander verschmolzene Cyclopropanringe bezeichnen würden. Er führte jedoch weiter aus, dass bislang zu wenig Aromatenchemie bekannt sei, um sich zwischen *jeglicher* Struktur für das Benzol ent- scheiden zu können. Entsprechend benutzte er danach einen großen Kreis, um den noch nicht charakterisierten, hexavalenten Benzolkern zu symbolisieren.^[12]

Aromatenstudien vor dem Cyclohexatrien

Das Problem jener Zeit war nicht, zu einem Vorschlag zu einer *möglichen* Struktur des Benzols zu gelangen. Wenn man nämlich annahm, dass Kohlenstoff vier- und Wasserstoff einwertig war, konnte man leicht mehr als 200 Isomere eines Moleküls zeichnen, dessen empirische Formel C_6H_6 war.^[13] Wie Loschmidt richtigerweise betonte, lag die wirkliche Herausforderung darin, eine einzige Struktur vorzuschlagen, die sich durch die bis dato vorliegenden empirischen Daten

verteidigen ließ. Weder Couper noch Loschmidt lieferten eine derartige Verteidigung, was durchaus verständlich war, da bis dahin viel zu wenig über aromatische Verbindungen bekannt war, um überzeugend für eine Einzigestruktur-Hypothese zu argumentieren.

Der Weg war nicht einfach, aber der Fortschritt erfolgte rasch.^[10,14] In den Jahren 1861 und 1862 glaubten die Chemiker zwischen zwei Benzolisomeren unterscheiden zu können, zwischen zwei Isomeren des Toluols und zwei, ja sogar drei der Benzoesäure. Weiterhin glaubte man an die Existenz eines „niedrigeren“, aus fünf Kohlenstoffatomen bestehenden Homologen des Benzols. Für einige wenige zweifach substituierten Benzolderivate – z.B. Nitrophenol oder Hydrobenzoësäure – konnte man zeigen, dass jeweils zwei Isomere existierten. Vor dem Hintergrund all dieser „Fakten“ hatte eine Cyclohexatrien-Hypothese keine Überlebenschance, ja, wäre niemals vorgeschlagen worden.

Bereits 1863 und 1864 zeigten die Forschungen mehrerer Chemiker, dass die obigen Beobachtungen Irrtümer waren. Gleichzeitig wurden weitere Isomere disubstituierter Benzole entdeckt. Bis 1864 wurde es für diejenigen Forscher klar, die sich diesen Problemen ernsthaft widmeten, dass für jedes disubstituierte Benzolderivat drei Isomere gefunden werden mussten; wohingegen jedes monosubstituierte Derivat – und auch Benzol selbst – nur in einer isomeren Form auftreten konnte. Zusätzlich war bis zu diesem Zeitpunkt bekannt geworden, dass jedes aromatische Molekül mindestens sechs Kohlenstoffatome enthalten musste.

Kekulé interessierte sich für derartige Details sehr; zum Teil, weil die Zeit gekommen war, sich mit den aromatischen Verbindungen in seinem Lehrbuch zu befassen. Zum Teil aber ganz sicher auch, weil Aromaten in der sich entwickelnden Steinkohlenteer-Industrie von steigender wirtschaftlicher Bedeutung waren. Wenn wir seinen späteren Erinnerungen trauen dürfen, fand sein Benzoltagtraum im Jahre 1862 statt, als die gesamte Situation noch sehr verwirrend war; dass er kaum Fortschritte machte, überrascht wenig. Als er schließlich einen ersten Entwurf seiner Theorie schrieb, erwähnte er, „dass dieser nahezu ein Jahr geschrieben in meinen Papieren lag“, bis er endlich dazu kam, ihn Anfang 1865 zu veröffentlichen.^[1] Dieses legt nahe, dass der Entwurf in der ersten Hälfte des Jahres 1864 verfasst wurde. Zu diesem Zeitpunkt konnte man damit beginnen, überzeugendes empirisches Material zusammenzustellen, das für eine Cyclohexatrien-Hypothese sprach.

Der persönliche Weg zur Entdeckung

Anfang 1862, in Gent an seinem Kamin sitzend, überarbeitet und tagträumend, war es mehr als verständlich, dass Kekulés „Geist bei anderen Dingen war“ – seine Hochzeit stand nämlich bevor. Stephanie Kekulé starb bei der Geburt ihres ersten Kindes, die im Mai 1863 stattfand. Kekulé erschütterte diese Tragödie zutiefst und für mehr als ein Jahr konnte er kaum zur Arbeit zurückfinden. Die Veröffentlichung einer Arbeit von Bernhard Tollens und Rudolf Fittig im August 1864 über isomere Beziehungen aromatischer Verbindungen^[15] veranlasste ihn jedoch, sich endlich wieder

aufzuraffen. Konkurrenten waren ihm offenkundig hart auf den Fersen und es bestand die Gefahr, dass er überrundet wurde. Er stellte zwei tüchtige Privatassistenten ein, Carl Glaser und Wilhelm Körner, und bereitete ein umfassendes Forschungsprogramm vor.

Aber noch immer konnte er sich nicht konzentrieren. Die ersten neun Tage des Jahres 1865 sahen ihn in Paris, „um mich wenigstens einigermaßen aus meiner Lethargie aufzurütteln“, wie er seinem guten Freund und früheren Mitarbeiter Adolf Baeyer mitteilte. Während seines Aufenthaltes besuchte er einen anderen guten Freund den „Mitstrukturalisten“ Adolphe Wurtz, Professor der Chemie an der Ecole de Médecine.^[16] Ich vermute, dass er mit Wurtz seine neue Theorie diskutierte und Wurtz bat, sie anlässlich der nächsten Sitzung der Société Chimique am 27. Januar zu präsentieren. Wurtz erfüllte ihm diesen Wunsch.

Zurück in Gent, zwei Wochen bevor der Beitrag vorgestellt wurde, schrieb er an Baeyer. Kekulé war niedergeschlagen: Er konnte keine neuen experimentellen Resultate aus eigener Forschung vorweisen, nichts war aus der Arbeitsgruppe gekommen, ja, neue Ergebnisse deuteten sich nicht einmal am Horizont an und er hatte keine einzige Zeile für sein Lehrbuch verfasst. „Hauptsache ist, ich bin so versimpelt, dass ich es zu keinen soliden Arbeiten bringen konnte.“ Aber seit seiner Rückkehr aus Paris, so schrieb er, fühlte er sich doch ein wenig besser: „... ich werde selbst die verzweifelsten Anstrengungen machen um nicht wieder zu versinken. In diesen klaren Intermezzos habe ich viel geträumt und bisweilen auch Theorie gemacht; aber ich leide an chemischer Verstopfung und bin zu faul etwas zu schreiben. Indessen!!! Indessen werde ich doch demnächst einigen theoretischen Schwamm loslegen... Mein Plan ist ... der Société Chimique einen Schwindel über die Constitution sämtlicher aromatischer Verbindungen einzuschicken. Ich greife der Veröffentlichung nicht vor, damit der Reiz der Neuheit nicht verlorengeht. Erwarten Sie indessen nicht zu viel, das Gute ist nicht neu und das Neue nicht gut.“^[16]

Diese erste kurze französische Arbeit über die Benzoltheorie^[4,10,14] ist auf mehrere Weise überraschend. Zum einen verwendete Kekulé weiterhin seine kuriosen „Wurstformeln“ (Abbildung 3), die er sechs Jahre zuvor in der ersten Lief-



Abbildung 3. Die 1865 verwendeten „Wurstformeln“ mit offenen und geschlossenen Ketten (aus Lit. [4]).

rung seines Lehrbuchs eingeführt hatte. In diesen Formeln sind seine wurstförmigen Kohlenstoffatome viermal länger als das Symbol für Wasserstoff, denn hier ist die Länge proportional zur Wertigkeit. Da diese Formeln im wesentlich linear waren, musste er Pfeile benutzen, um anzusehen wo die Enden der „offenen“ Kohlenstoffkette des Benzolmoleküls so miteinander verbunden werden sollen, dass eine Art Ring oder „geschlossene“ Kette entsteht. Drei Doppelbindungen in der Kette – dort wo die Kohlenstoffwürste weiter zusam-

mengeschoben waren – generieren dann Cyclohexatrien. Diesen Ring nannte er „chaîne principale“, aber „chaînes latérales“ konnten auch angefügt werden, um auf diesem Wege alle damals bekannten aromatischen Verbindungen zu generieren.

Der andere kuriose Aspekt dieser ersten Arbeit ist ihre Zögerlichkeit. Er schlug fraglos vor, dass Benzol, betrachtet man es unter strukturellen Gesichtspunkten, als das, was wir heute Cyclohexatrien nennen, bezeichnet werden sollte. Und sein Strukturvorschlag beruhte auf bekannten empirischen Daten. Jedoch implizierte er bloß (und schrieb niemals explizit), dass Benzol ein *symmetrisches* Molekül sein sollte. Niemals behauptete oder implizierte er hier, dass die geschlossene Kette eine hexagonale Anordnung bildete. Gemäß seiner Theorie, so schrieb er, sollte es nur ein Isomer des Benzols und nur ein Isomer der monosubstituierten Benzole geben, aber „wahrscheinlich“ jeweils drei Isomere im Falle der di-, tri- oder tetrasubstituierten Benzolderivate. All diese Vorschläge stimmen mit der Theorie überein – heute unterscheiden wir zwischen *ortho*-, *meta*- und *para*-Isomeren. Er überließ es aber seinen Lesern herauszufinden, warum das so ist. Zu dieser Zeit war das Wissen über die Aromaten bereits umfangreich genug, um all diese Äußerungen zu rechtfertigen. Aber Kekulé war überraschend zurückhaltend, genau das zu tun.

Sein Zögern verschwand jedoch schnell. Nach nur zwei Monaten war Kekulés Begeisterung für seine Arbeit endlich wieder da, und zwar in nachdrücklichstem Maße. Schon am 16. März schrieb er an Baeyer: „Im hiesigem Laboratorium herrscht dermalen große Thätigkeit & ich hoffe es soll zu etwas kommen. Wir haben die aromatische Seite von A an in Angriff genommen.“^[17] Und dann am 10. April in einem erneuten Bericht an Baeyer: „Nun wieder zu meinen Arbeiten! ... Alles ist natürlich aromatisch. Thatsachen als Beweise oder Widerlegung meiner aromatischen Theorie von neulich ... Angefangen ist noch viel, die Pläne haben kein Ende, da die aromatische Theorie eine unerschöpfliche Fundgrube ist. Wenn jetzt 'deutsche Jünglinge' Dissertationsarbeiten nötig haben, so finden sie hier Thematik genug.“^[18]

Zu Beginn des Jahres 1866 veröffentlichte Kekulé eine ausführliche und meisterhafte Arbeit auf Deutsch über seine Benzol-Theorie, der die Zaghaftheit seiner französischen Mitteilung völlig fehlte und präsentierte viel zusätzliches empirisches Material.^[19] Später im Jahr publizierte er die letzte Lieferung des zweiten Bandes seines Lehrbuchs. Diese Fortsetzung entsprach einer substanzialen Monographie und war ausschließlich der neuen aromatischen Chemie gewidmet.^[20]

Die Reaktion der Kollegen war nahezu durchgehend positiv. Unter denen, die die Theorie sofort annahmen, waren Adolphe Wurtz, Adolf Baeyer, Emil Erlenmeyer, Friedrich Beilstein, Lothar Meyer, Carl Graebe, Edward Frankland, Alexander Crum Brown und Alexander Williamson. Der einzige prominente deutsche Kollege, der die Theorie einschränkungslos verwarf, war Hermann Kolbe, dessen bittere polemische Schriften aus den 1860er und 1870er Jahren ihn zunehmend von seinen Kollegen isolierten.

Auseinandersetzungen in neuerer Zeit

In neuerer Zeit haben einige Wissenschaftler Zweifel an der Originalität von Kekulés Benzol-Theorie geäußert. So wurde darauf hingewiesen, dass Ringstrukturen auch gelegentlich vor 1865 auftauchten: Zwei unterschiedliche Ringverbindungen hat Couper im Jahre 1858 vorgeschlagen und Loschmidt stellte Vermutungen über Cyclopropan im Jahre 1861 an. Oben habe ich bereits erwähnt, dass Loschmidt einen großen Kreis verwendete, ähnlich einem „x“ in der Algebra, um die seinerzeit unbekannte Konstitution des aromatischen Kerns anzudeuten – kann dieses Symbol wirklich als Ringstruktur interpretiert werden? Schließlich wurde darauf hingewiesen, dass Auguste Laurent im Jahre 1854 ein hexagonales Symbol für das Benzoylchlorid-Molekül veröffentlichte.^[21] Es ist bekannt, dass Kekulé diese Arbeiten vor dem angeblichen Datum seines sogenannten „Traums“ kannte.^[12b, 22]

Man muss jedoch bei der Bewertung dieser Vorschläge die folgenden Umstände berücksichtigen. Laurent bezeichnete sein Bild des Benzoylchlorids als „polyèdre complet“, nicht als einen Ring miteinander verknüpfter Atome. Als Teil seiner kristallographischen Molekültheorie, und der Valenzlehre vorausgehend, kann man dieses Bild wohl kaum als hexagonale Molekülstruktur im Sinne der Nach-1860er Jahre interpretieren.^[23]

Die beiden Ringverbindungen Coupers enthielten beide Heteroatome und keiner der Ringe war aromatisch. Und was besonders wichtig war: Keiner dieser beiden Autoren hat je versucht, seine Vorschläge empirisch zu rechtfertigen. Kekulés Theorie war nicht nur der erste Vorschlag mit einer Cyclohexatrien-Struktur, sie war auch der erste Versuch, mit dem jemand robuste empirische Argumente präsentierte, mit denen *überhaupt* eine spezifische Struktur für das Benzolmolekül postuliert werden konnte.^[10, 14]

Dennoch haben die Kritiker nicht ganz Unrecht: Einige dieser frühen Beiträge könnten sehr wohl bei Kekulé einen bewussten oder auch unbewussten Eindruck hinterlassen haben. Es ist durchaus vorstellbar, dass entsprechende psychologische Umstände – wie in seiner Geschichte der spät-abendlichen Träumerei nach intensiver Beschäftigung mit dem Problem – bei Kekulé den Eindruck eines mentalen Bildes einer cyclischen Molekülstruktur für das Benzol hinterlassen hat.

Aber gab es diese Umstände jemals? Als er seine Geschichten erzählte, berichtete er die Wahrheit, so wie er sie erinnerte? Dieses ist ebenfalls in jüngster Zeit angezweifelt worden. Kekulés autobiographische Reminiszenzen (einschließlich der Geschichte seines früheren „Traums“ über die erste Konzeption der Strukturtheorie während er in London im Jahre 1855 mit dem Bus durch die Stadt fuhr), wurden erst sehr lange nach den tatsächlichen Ereignissen festgehalten. Einige haben bezweifelt, dass wissenschaftliche Inspirationen überhaupt auf derartige Weise entstehen können. Einige haben argumentiert, dass Kekulé lediglich Legenden erfand, um sein Publikum zu amüsieren. Ein Wissenschaftler hat Kekulé sogar als „Betrüger“ und „Schummler“ bezeichnet, dem es nur darum ging, Rivalen wie Couper oder Loschmidt die Priorität der Entdeckung zu entreißen.^[24]

Ich selber neige dazu, Kekulés Ehrlichkeit zu trauen – und zwar aus vielen Gründen.^[10] Bis zum Jahre 1890 hat niemand, inklusive Couper und Loschmidt, jemals versucht, Kekulé die Priorität für die Benzol-Theorie abspenstig zu machen. Warum sollte er falsche Geschichten erfinden, mit der Intention, seine Priorität gegenüber Rivalen aufrechtzuerhalten, wenn es gar keine Rivalen gab? Dazu kommt, dass es viele Wissenschaftler gibt, die die Erfahrung ähnlicher plötzlicher Inspirationen gemacht haben wie Kekulé. Und in seiner Rede auf dem „Benzolfest“ weist Kekulé nachdrücklich darauf hin, dass es mehr erfordert als bloß „Träumen“, wenn man in der Wissenschaft Erfolg haben will. Weiterhin gibt es Hinweise darauf, dass seine Zuhörer ihn ernst nahmen und diese Geschichten als wichtige Elemente des wissenschaftlichen Erkenntnisprozesses akzeptierten. Und zuallerletzt: Kekulés Benehmen während der gesamten Jubiläumsfeier war durch und durch nachdenklich und ernst, nicht unbeschwert. Hier redete ein zerbrechlicher alter Mann, der feierlich, quasi für die Ewigkeit sprach. Dieses war sicher keine passende Gelegenheit, um erfundene Geschichten über das eigene Leben zum Besten zu geben.

Andere Autoren, die Kekulés Ehrlichkeit trauten und an der Wahrheit der Geschichte nicht zweifelten, haben speulative Interpretationen zu seiner Vision des „schlangenartigen Gebildes“ gegeben, das „höhnisch vor seinen Augen wirbete“. Einige haben argumentiert, dass diese Figur an ein altes alchemistisches Symbol erinnert: die Ouroboros-Schlange, die ihren eigenen Schwanz verschlingt und so zu einem Symbol der Unsterblichkeit wird. Kekulés Traum ist auch psychoanalytisch, nach den Theorien von Freud und Jung, interpretiert worden.^[25] Ich selber glaube, dass viele dieser psychologischen Deutungen unwahrscheinlich, ja irreführend, sind. Wir müssen über diese geheimnisvollen Ursprünge der Inspirationen nicht mehr wissen als Kekulé selbst – was wenig genug ist!

Selbstverständlich wird man niemals mit Sicherheit wissen, ob Kekulé die Wahrheit über den Ursprung seiner Ideen über das Benzol sagte – nicht nur weil wir ein privates mentales Ereignis nicht dokumentieren können, sondern auch – selbst wenn wir die Ehrlichkeit seiner Erzählung im Vortrag akzeptieren – wir nicht sicher sein können, dass seine Erinnerung an das Ereignis korrekt ist. Wir können und sollten aber die Entwicklung der Theorie selbst feiern.

Zusammenfassung

Es war in der Tat eine schöne Theorie in ihrer ursprünglichen Version von 1865–1866. Aber Kekulé war sich wohl bewusst, dass sie nicht fehlerlos war. Cyclohexatrien besaß Doppelbindungen, die sich chemisch nicht so verhielten, wie die Doppelbindungen in den üblichen Olefinen. Überdies hätte man erwarten können, dass ansonsten identische *ortho*-Verbindungen ein klein wenig unterschiedliche Eigenschaften besitzen müssten, je nachdem, ob sich zwischen den benachbarten Substituenten eine Einfach- oder eine Doppelbindung des Benzolkerns befand. Im Jahre 1866 gab Kekulé seine Wurstformeln auf und begann Cyclohexatrienformeln in einer Art zu schreiben, die wir noch heute leicht als solche

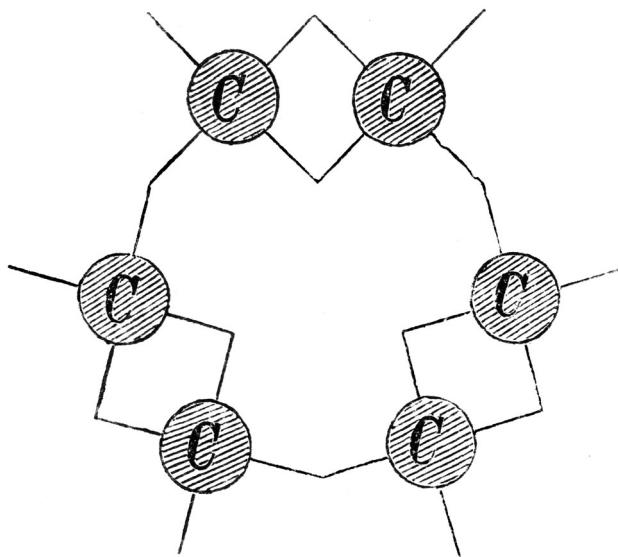


Abbildung 4. Kekulé 1866 verwendete Kugel- und Stab-Formel für Benzol (aus Lit. [26a]).

erkennen (Abbildung 4).^[26] Sechs Jahre später schlug er vor, dass die Einfach- und die Doppelbindungen im Ring rasch ihre Plätze tauschen und so die vollständige Symmetrie ergeben (Abbildung 5), die die empirische Chemie für die aromatischen Verbindungen zu fordern schien.^[27]

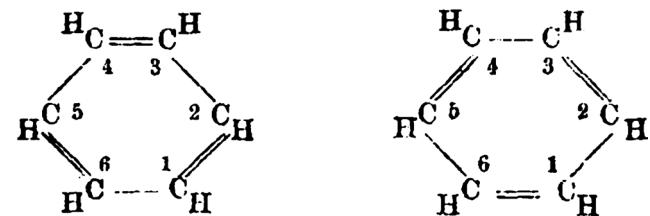


Abbildung 5. Kekulé 1872 verwendeten oszillierenden Einfach- und Doppelbindungen im Benzol (aus Lit. [27]).

Kekulé's Theorie war ein Hauptgrund dafür, weshalb die deutsche Chemie zu Ende des 19. Jahrhunderts so mächtig wurde. Viele Chemiker (besonders viele deutsche Chemiker) wandten sich der aromatischen Chemie zu, sodass zu Beginn des 20. Jahrhunderts die überwiegende Mehrzahl aller bekannten chemischen Verbindungen aromatisch war. Dazu kam, dass so viele wirtschaftlich interessante Verbindungen, besonders Farbstoffe und Pharmaka, aromatisch waren, wodurch Kekulé's Theorie zu einem Generalschlüssel für ertragreiche industrielle Forschung wurde. Kekulé's Theorie war eine der brillantesten Ideen des 19. Jahrhunderts, sowohl für die Weiterentwicklung der Wissenschaft als auch für technische Anwendungen.

Jahrzehnte nach 1865 schlugen Chemiker Ergänzungen oder Alternativen zu dieser Theorie vor, aber Kekulé's großartige Idee wurde nie ersetzt. Vor 80 Jahren gab die Anwendung der Quantentheorie auf das Benzolproblem diesem eine neue Bedeutung. Es spricht jedoch für die Schönheit und

Deutungskraft der Kekuléschen Vorstellungen, dass wir noch heute „Kekulé-Strukturen“ verwenden, 150 Jahre nachdem Kekulé kurzer Artikel veröffentlicht wurde.

Eingegangen am 7. August 2014

Online veröffentlicht am 24. September 2014

Übersetzt von Prof. Henning Hopf, Braunschweig

- [1] a) A. Kekulé, *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* **1890**, 23, 1305–1306; b) R. Anschütz, *August Kekulé*, Bd. 2, Chemie, Berlin, **1929**, S. 941–942. Band 1 dieses Werks enthält eine ausführliche Biographie Kekulés.
- [2] A. Koestler, *Act of Creation*, Hutchinson, London, **1964**, S. 170–171.
- [3] J. Gillis, *Acad. R. Belg. Cl. Sci. Mem.* **1966**, 37, 1–40.
- [4] A. Kekulé, *Bull. Soc. Chim. Fr.* **1865**, 3, 98–110.
- [5] J. Volhard, *August Wilhelm von Hofmann*, Friedländer, Berlin, **1902**, S. 166.
- [6] G. Schultz, *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* **1890**, 23, 1265–1312.
- [7] A. Hofmann, *Proc. R. Soc. London* **1855**, 8, 1–3.
- [8] A. Kekulé, *Ann. Chem.* **1858**, 106, 129–159.
- [9] a) A. Couper, *Philos. Mag.* **1858**, 16, 104–116; b) H. Hopf, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1970**, 9, 732; *Angew. Chem.* **1970**, 82, 703.
- [10] A. Rocke, *Image and Reality: Kekulé, Kopp, and the Scientific Imagination*, University of Chicago Press, Chicago, **2010**.
- [11] A. Kekulé, *Lehrbuch der organischen Chemie*, 2 Bde., Enke, Erlangen, **1861–1866**.
- [12] a) J. Loschmidt, *Chemische Studien I: A. Constitutions-Formeln der organischen Chemie in graphischer Darstellung*, Wien, **1861**; b) J. Wotiz, C. Noe in *Kekulé Riddle* (Hrsg.: J. Wotiz), Cache River, Clearwater, **1993**, S. 221–245; c) G. Schiemenz, *Sudhoffs Arch. Gesch. Med. Naturwiss.* **1994**, 78, 41–58; d) E. Heilbronner, K. Hafner, *Chem. Unserer Zeit* **1998**, 32, 34–42.
- [13] a) H. Hopf, Isomerisierungs- und Additionsreaktionen von acyclischen C_6H_6 -Isomeren, *Habilitationsschrift*, Karlsruhe, **1972**; b) H. Bock, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1989**, 28, 1627–1650; *Angew. Chem.* **1989**, 101, 1659–1682.
- [14] A. Rocke, *Ann. Sci.* **1985**, 42, 355–381.
- [15] B. Tollens, R. Fittig, *Ann. Chem.* **1864**, 131, 303–323.
- [16] Kekulé an Baeyer, 11.1.1865, Kekulé Nachlaß, Archiv des Deutschen Museums, München (von hier an: ADM).
- [17] Kekulé an Baeyer, 16.3.1865, ADM.
- [18] Kekulé an Baeyer, 10.4.1865, ADM.
- [19] A. Kekulé, *Ann. Chem.* **1866**, 137, 129–196.
- [20] A. Kekulé, *Lehrbuch der organischen Chemie*, Bd. 2, S. 493–744.
- [21] A. Laurent, *Méthode de chimie*, Mallet-Bachelier, Paris, **1854**, S. 408.
- [22] J. Wotiz, *Kekulé Riddle*, Clearwater, Cache River, **1993**.
- [23] J. Brooke in *Kekulé Riddle* (Hrsg.: J. Wotiz), Cache River, Clearwater, **1993**, S. 59–76.
- [24] Siehe Literaturzitate auf S. 310 in Lit. [10].
- [25] Siehe Literaturzitate auf S. 313 in Lit. [10].
- [26] a) A. Kekulé, *Lehrbuch der organischen Chemie*, **1866**, Bd. 2, S. 496; b) A. Kekulé, *Z. Chem.* **1867**, 10, 214–218.
- [27] A. Kekulé, *Ann. Chem.* **1872**, 162, 77–123.