

Wissenschaftliche Hausarbeit  
im Rahmen der Ersten Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien  
im Fach Chemie  
eingereicht der Hessischen Lehrkräfteakademie  
– Prüfungsstelle Marburg –

**ENTWICKLUNG NEUER 3-D-MODELLE ZUR EINFÜHRUNG  
DES MESOMERIE-KONZEPTS FÜR DEN INKLUSIVEN OBERSTUFENUNTERRICHT  
MIT BLINDEN UND SEHBEHINDERTEN SCHÜLERINNEN UND SCHÜLERN**

Verfasser:  
Philipp Konrad Lindenstruth

Gutachter:  
Dr. Michael Schween

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	II
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Sachanalyse Mesomerie .....</b>	<b>4</b>
2.1 <i>Die Elektronenstruktur der Atome .....</i>	4
2.2 <i>Bindungstheorie .....</i>	5
2.3 <i>Mesomerie .....</i>	8
<b>3. Fachdidaktische Analyse .....</b>	<b>15</b>
3.1 <i>Kerncurriculum und Kompetenzorientierung .....</i>	15
3.2 <i>Modelle im Chemieunterricht .....</i>	16
3.3 <i>Mesomerie in den Unterrichtsinhalten .....</i>	17
3.4 <i>Im Unterricht eingesetzte Mesomeriemodelle .....</i>	18
3.5 <i>Basiskonzepte .....</i>	23
3.6 <i>Bildungsstandards .....</i>	24
<b>4. Inklusiver Unterricht .....</b>	<b>27</b>
4.1 <i>Inklusion .....</i>	27
4.2 <i>Gestaltung des Unterrichts für blinde und sehbehinderte Schüler .....</i>	28
4.3 <i>Unterricht im Fach Chemie mit blinden und sehbehinderten Schülern .....</i>	29
<b>5. Schlussfolgerungen für den Aufbau eines Mesomeriemodells .....</b>	<b>34</b>
<b>6. Die Modelle – Konzeption, Aufbau, Funktion und Diskussion .....</b>	<b>36</b>
6.1 <i>Konzeption der Modelle .....</i>	36
6.2 <i>Aufbau der Modelle .....</i>	37
6.3 <i>Funktion der Modelle .....</i>	42
6.4 <i>Diskussion der Modelle .....</i>	47
<b>7. Modellgestützte Einführung des Mesomerie-Konzepts .....</b>	<b>52</b>
<b>8. Einsatz der Modelle .....</b>	<b>64</b>
<b>9. Fazit .....</b>	<b>66</b>
<b>10. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>68</b>
<b>Danksagung .....</b>	<b>71</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>72</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: <i>Mesomere Grenzformeln des Benzols und Darstellung mit angedeutetem delokalisierten <math>\pi</math>-Elektronensystem</i> .....	2
Abbildung 2: <i>Grenzflächendarstellungen des 1s- und der 2p-Orbitale</i> .....	5
Abbildung 3: <i>Kombination von p-Orbitalen zu Molekülorbitalen. a) <math>\sigma</math>-Bindung, b) <math>\pi</math>-Bindung</i> .....	6
Abbildung 4: <i>Gedanklicher „Prozess“ der Bindungsbildung im Ethen-Molekül</i> .....	7
Abbildung 5: <i>Strukturformeln des Benzols</i> .....	8
Abbildung 6: <i>Strukturformel des Benzols</i> .....	9
Abbildung 7: <i>p-Orbitale des Benzols</i> .....	9
Abbildung 8: <i>Ein Molekülorbital des Benzols</i> .....	9
Abbildung 9: <i>Hydrierungsenergien von Cyclohexen, Cyclohexadien und Benzol</i> .....	10
Abbildung 10: <i>Benachbarte p-Orbitale verschiedener Alkene mit Grenzformeln</i> .....	11
Abbildung 11: <i>Mesomere Grenzformeln des Triphenylmethyl-Kations</i> .....	12
Abbildung 12: <i>Mesomere Grenzformeln des Propionat-Ions</i> .....	12
Abbildung 13: <i>Grenzformeln der <math>\sigma</math>-Komplexe bei der Zweitsubstitution von Brom an Phenol</i> .....	13
Abbildung 14: <i>Vergleich Lehrplan und Kerncurriculum</i> .....	15
Abbildung 15: <i>Mesomere Grenzformeln des Propionat-Ions</i> .....	18
Abbildung 16: <i>Regeln zum Erstellen von Grenzformeln</i> .....	19
Abbildung 17: <i>Kombinationen der p-Orbitale des Benzols</i> .....	21
Abbildung 18: <i>Energetisch am tiefsten liegendes MO des <math>\pi</math>-Systems von Benzol</i> .....	22
Abbildung 19: <i>Bildungsstandards für den Chemieunterricht</i> .....	25
Abbildung 20: <i>Darstellung von Benzol in der Chemieschrift</i> .....	29
Abbildung 21: <i>Taktile Darstellung verschiedener organischer Moleküle</i> .....	30
Abbildung 22: <i>Mit Hilfe des Magnetlegekastens erstellte Darstellung eines</i>	

<i>Benzol-Moleküls</i> .....	32
Abbildung 23: <i>Von links nach rechts: Halogen (<math>d = 25 \text{ mm}</math>),     <i>Kohlenstoff (<math>d = 20 \text{ mm}</math>), Wasserstoff (<math>d = 10 \text{ mm}</math>)</i> .....</i>	37
Abbildung 24: <i>Kugel mit eingesetztem Anker</i> .....	38
Abbildung 25: <i>Tetraedrisches und planares Kohlenstoff-Atom</i> .....	39
Abbildung 26: <i><math>\sigma</math>-Bindung</i> .....	39
Abbildung 27: <i><math>\pi</math>-Bindung ohne und mit Schrumpfschlauch</i> .....	40
Abbildung 28: <i>Aufgebautes Benzol-Modell</i> .....	41
Abbildung 29: <i><math>\sigma</math>- und <math>\pi</math>-Bindung</i> .....	42
Abbildung 30: <i>Vorgang des Klappens von Bindungen am Beispiel des Benzyl-Kations</i> ..	43
Abbildung 31: <i>Falsche Struktur mit fünfbindigem Kohlenstoff-Atom</i> .....	44
Abbildung 32: <i>Chlortriphenylmethan mit tetraedrischem Kohlenstoff-Atom</i> .....	46
Abbildung 33: <i>Triphenylmethyl-Kation mit vollständig planarer Struktur</i> .....	46
Abbildung 34: <i>Umhybridisierung des Sauerstoff-Atoms am Methoxy-Substituenten     <i>durch Elektronenverschiebung in einer mesomeren Grenzformel des     Methoxybenzols während einer Zweitsubstitution</i></i> .....	50
Abbildung 35: <i>Die zwei möglichen mesomere Grenzstrukturen des Benzols</i> .....	53
Abbildung 36: <i>Die zwei möglichen mesomere Grenzstrukturen des     <i>1,2-Dichlorbenzols</i></i> .....	54
Abbildung 37: <i>Den gesamten Benzolring umfassendes Molekülorbital</i> .....	56
Abbildung 38: <i>Mesomere Grenzformeln des Allyl-Kations</i> .....	58
Abbildung 39: <i>Modell des Propens</i> .....	58
Abbildung 40: <i>Mesomere Grenzformeln des Benzyl-Kations</i> .....	59
Abbildung 41: <i>Eine der möglichen zehn Grenzformeln des Triphenylmethyl-Kations</i> ...	60
Abbildung 42: <i>Eine der sieben mesomeren Grenzformeln des     <i>Diphenylmethyl-Kations</i></i> .....	61
Abbildung 43: <i>4,4',4''-Trimethoxytriphenylmethylchlorid</i> .....	61

Abbildung 44: *Zwei Grenzformeln des 4,4',4''-Trimethoxytriphenylmethyl-Kations  
mit Elektronensextett beziehungsweise vollständigem  
Elektronenoktett ..... 62*

Abbildung 45: *Arbeiten mit den Mesomeriemodellen im Rahmen des Workshops ..... 64*

## 1. Einleitung

1825 extrahierte der englische Physiker Michael Faraday aus dem Londoner Stadtgas einen aromatisch riechenden, öligen Stoff, welchen er als Kohlenwasserstoff mit der Zusammensetzung  $(\text{CH})_6$  erkannte.<sup>[1]</sup> 1838 benannte Justus Liebig diesen Stoff *Benzol*, dessen Summenformel als  $\text{C}_6\text{H}_6$  ermittelt werden konnte. Die Summenformel lässt auf ein Alken oder ein Alkin schließen, Benzol ist jedoch im Vergleich zu Alkenen und Alkinen sehr reaktionsträge und unterscheidet sich im chemischen Verhalten deutlich von den zu dieser Zeit bekannten Kohlenwasserstoffen mit Mehrfachbindungen. Die Strukturformel des Moleküls blieb über längere Zeit Gegenstand kontroverser Diskussionen.<sup>[1]</sup> August Kekulé fand 1865 eine Strukturformel des Benzols, die sich später als formal richtig erweisen sollte. Er postulierte einen Ring aus sechs miteinander verknüpften Kohlenstoff-Atomen mit alternierenden Doppelbindungen, die ihre Position durch „Klappen“ verändern konnten.<sup>[1,2]</sup> Auf Grund der zu Alkenen und Alkinen unterschiedlichen chemischen Eigenschaften wurden Benzol und dessen Derivate einer neuen Stoffgruppe zugeordnet, den Aromaten.<sup>[3]</sup>

Erich Hückel stellte fest, dass sich Stoffe, die aromatische Eigenschaften aufwiesen, durch ein cyclisches planares System mit vollständig durchkonjugierten Doppel- und Einfachbindungen und der Anzahl von  $4n+2$   $\pi$ -Elektronen auszeichnen.<sup>[4]</sup> Die Erklärung der besonderen Eigenschaften der Aromaten gelang jedoch erstmals durch das in den 1930er Jahren<sup>[5]</sup> von Linus Pauling formulierte „Resonanz-Konzept“.<sup>[5]</sup> Pauling ging dabei von einem über das gesamte Molekül delokalisierten  $\pi$ -Elektronensystem aus, das sich durch die Überlappung der p-Orbitale der Kohlenstoff-Atome ergibt.<sup>[5]</sup> Diese Deutung geht mit einer Absenkung der Energie des Systems einher und sorgt so für die besondere Stabilität aromatischer Verbindungen.<sup>[4]</sup> Das Phänomen delocalisierter  $\pi$ -Elektronen wird als *Mesomerie* bezeichnet.<sup>[5]</sup> Eine Darstellung der delokalisierten  $\pi$ -Elektronensysteme in Lewis-Schreibweise ist jedoch nicht möglich, daher wird für eine Beschreibung dieser Systeme auf sogenannte *mesomere Grenzformeln* zurückgegriffen, die das delokalisierte  $\pi$ -Elektronensystem durch die möglichen Grenzfälle lokalisierter Elektronen beschreiben (Abb. 1).<sup>[4]</sup> Durch die Anwendung des Mesomerie-Konzepts lassen sich Vorhersagen über Reaktionsabläufe mesomerer Verbindungen und die Stabilität der Produkte treffen.

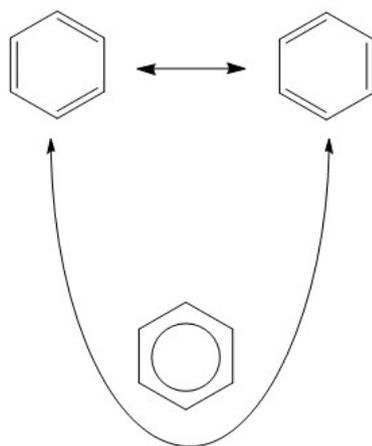


Abbildung 1: Mesomere Grenzformeln des Benzols und Darstellung mit angedeutetem delokalisiertem  $\pi$ -Elektronensystem.

Die Wichtigkeit des mesomeren Konzepts für das Verständnis der chemischen Welt drückt sich auch in dessen Verankerung im Kerncurriculum der gymnasialen Oberstufe des Landes Hessen für das Fach Chemie aus.<sup>[6]</sup> Im Unterricht findet die Betrachtung mesomerer Systeme fast ausschließlich über mesomere Grenzformeln statt.<sup>[6]</sup> Im inklusiven Unterricht mit blinden und sehbehinderten Schülern<sup>1</sup> ist deren Verwendung jedoch problematisch, da die herkömmlichen, von blinden und sehbehinderten Schülern erfahrbaren Darstellungen – wie beispielsweise in taktilen Druckverfahren erstellte Formeln in der Chemieschrift<sup>[7,8]</sup> – durch ihre Komplexität zu Verständnisproblemen führen können.<sup>[7,9,10,11]</sup> Daher sollen im Rahmen dieser Arbeit Modelle entwickelt werden, die eine von blinden und sehbehinderten Schülern gut erfahrbare Erklärung des Mesomerie-Konzepts ermöglichen.

Um die Anforderungen an die zu entwickelnden Modelle herauszuarbeiten, soll eine Analyse der Mesomerie in drei Schritten erfolgen. Dazu wird das Thema im ersten Schritt fachlich im Hinblick auf die zum Verständnis des Mesomerie-Konzepts notwendigen Inhalte diskutiert. Im zweiten Schritt werden die durch die Kompetenzorientierung und das Kerncurriculum gestellten fachlichen und pädagogischen Anforderungen thematisiert, während im dritten Schritt die Anforderungen an die Modelle im Bezug auf deren Einsatz im inklusiven Unterricht mit blinden und sehbehinderten Schülern analysiert werden sollen. Auf der Basis der herausgearbeiteten Anforderungen sollen die Modelle konzipiert und deren Aufbau und Funktion beschrieben werden. Es folgt eine kritische Diskussion der Modelle im Hinblick auf die vermittelbaren Inhalte und deren Anwendbarkeit im Unterricht mit blinden und sehbehinderten Schülern.

<sup>1</sup> In dieser Arbeit wird die Form „Schüler“ als neutrale Form sowohl für Schülerinnen als auch für Schüler verwendet. Dies ist der besseren Lesbarkeit geschuldet und soll Frauen in keiner Weise ausschließen.

Abschließend soll eine modellgestützte Einführung in das Mesomerie-Konzept erstellt und Erkenntnisse des erfolgten Einsatzes der Modelle besprochen werden.

## 2. Sachanalyse Mesomerie

### 2.1 Die Elektronenstruktur der Atome

Ernest Rutherford wies 1911 in einem Streuexperiment nach, dass Atome aus einem positiv geladenen Kern und einer negativ geladenen Hülle bestehen. Im Atomkern befinden sich demnach Protonen und Neutronen, während sich die Elektronen in der Hülle aufhalten. Niels Bohr entdeckte 1913 anhand von Emissionsspektren, dass sich die Elektronen nicht willkürlich in der Atomhülle verteilen, sondern sich auf durch den Abstand zum Kern definierten Bahnen bewegen, den sogenannten Schalen. Die Entdeckung der Quantenmechanik, der Welleneigenschaften von Elektronen sowie der Heisenbergschen Unschärferelation deckten Unzulänglichkeiten des Bohrschen Atommodells auf und führten zu dessen Weiterentwicklung.<sup>[12]</sup> Nach der Heisenbergschen Unschärferelation lassen sich keine zutreffenden Aussagen über Impuls und gleichzeitigem Aufenthaltsort eines Elektrons machen, was gegen eine genau definierte Umlaufbahn der Elektronen um den Kern, wie sie von Niels Bohr vorhergesagt wurde, sprach.<sup>[13]</sup> Mithilfe der Beschreibung des Elektrons als Welle und dessen Wellenfunktion können jedoch Aufenthaltswahrscheinlichkeiten von Elektronen für verschiedene quantenmechanische Zustände eines Elektrons errechnet werden. Die für die jeweiligen Zustände errechneten Aufenthaltswahrscheinlichkeiten werden Atomorbitale genannt und beinhalten Aussagen über einen definierten Energiezustand sowie die Ladungsverteilung. Die verschiedenen Orbitale lassen sich durch die Quantenzahlen und ihre Form sowie die Ausrichtung im Raum voneinander unterscheiden (Abb. 2).<sup>[12]</sup>

Jedes Orbital kann nach dem Pauli-Prinzip maximal zwei Elektronen aufnehmen, die dann jedoch einen voneinander verschiedenen Elektronenspin besitzen müssen.<sup>[12]</sup>

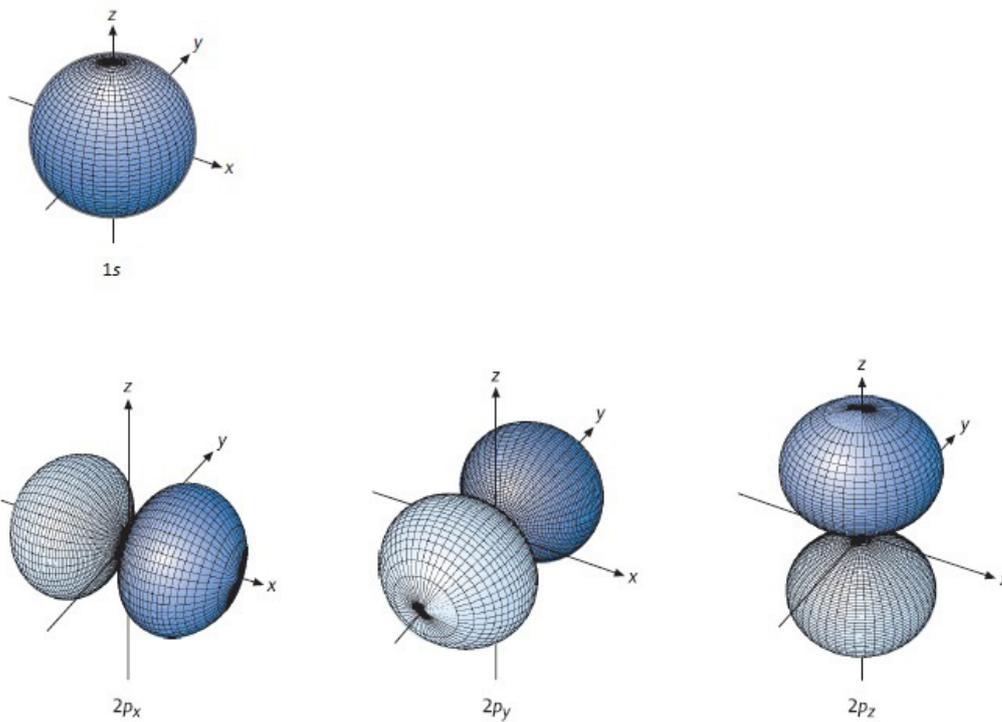


Abbildung 2: Grenzflächendarstellungen des 1s- und der 2p-Orbitale.<sup>[12]</sup>

## 2.2 Bindungstheorie

Für die Beschreibung kovalenter Bindungen lassen sich zwei Theorien anwenden, die auf Orbitale zurückgreifen. Die Valenzstrukturtheorie,<sup>[12]</sup> kurz: VB-Theorie, geht davon aus, dass bei einer chemischen Reaktion von den Reaktionspartnern Elektronen zur Ausbildung einer kovalenten Bindung bereitgestellt werden. Dabei überlappen die Atomorbitale, in denen sich die späteren Bindungselektronen befinden und erzeugen so zwei neue Orbitale, die sich zwischen beiden Bindungspartnern befinden. Dabei ist eines der Orbitale um einen bestimmten Betrag energetisch abgesenkt, während das andere um denselben Betrag angehoben ist. Beide Bindungselektronen befinden sich nach der Hundschen Regel im energetisch abgesenkten, dem sogenannten *bindenden* Molekülorbital. Das energetisch höher liegende, *antibindende* Molekülorbital bleibt dagegen unbesetzt, woraus eine Absenkung der Energie resultiert. Beide Bindungspartner „teilen“ sich die Bindungselektronen, sodass jedes Atom dadurch die elektronische Konfiguration des in der Periode folgenden Edelgases erhält. Dieses typische Reaktionsverhalten wird durch die Oktett-Regel beschrieben, die auch die maximale Anzahl kovalenter Bindungen pro Atom der Elemente der ersten Langperiode auf vier

limitiert, da der Edelgaszustand mit vier Bindungspartnern erfüllt wird.<sup>2[12]</sup> Es existieren zwei unterschiedliche Arten von Bindungen: Bindungen, deren Elektronendichte sich auf der Bindungsachse befindet und solche, deren Elektronendichte sich nicht auf der Bindungsachse befindet (Abb. 3). Erstere werden als  $\sigma$ -Bindung bezeichnet und sind auf Grund eines größeren Überlappungsintegrals energetisch günstiger als Bindungen, die nicht auf der Bindungsachse liegen. Diese werden als  $\pi$ -Bindungen bezeichnet und besitzen ein geringeres Überlappungsintegral, was sie energetisch etwas ungünstiger als  $\sigma$ -Bindungen macht.

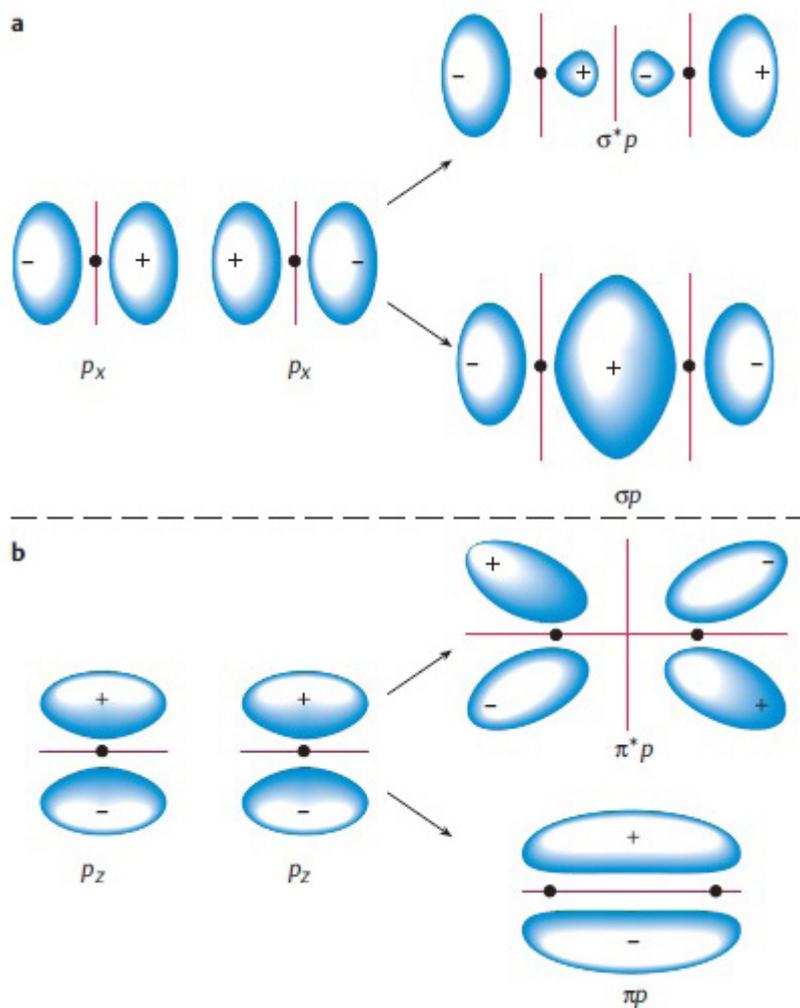


Abbildung 3: Kombination von p-Orbitalen zu Molekülorbitalen.  
a)  $\sigma$ -Bindung, b)  $\pi$ -Bindung.<sup>[12]</sup>

Im Allgemeinen gilt, dass Molekülorbitale, die durch Kombination der gleichen Atomorbitale erhalten wurden, gleichwertig sind. Um die vier gleichwertigen Bindungen in Kohlenstoff-Verbindungen wie Methan erklären zu können, werden die Atomorbitale

<sup>2</sup> Ausnahmen sind Oktett-Aufweitung durch Einbeziehung der d-Orbitale, die ab der vierten Periode möglich sind.



Moleküls zu Molekülorbitalen aus. Diese Molekülorbitale erstrecken sich dabei nicht nur über die entstandene Bindung, sondern über das gesamte Molekül. Dieses Verfahren ist im Vergleich zur VB-Theorie, die nur einen Teil des Moleküls betrachtet, deutlich aufwändiger und unübersichtlicher, liefert aber exaktere Ergebnisse. Die Benutzung der VB-Theorie bietet sich wegen der besseren Übersichtlichkeit zur Betrachtung einzelner Bindungen besonders in didaktischen Zusammenhängen an.

### 2.3 Mesomerie

Das Phänomen der Mesomerie wurde im Zuge der Erforschung des Benzols entdeckt und beschreibt die Delokalisation von Bindungselektronen.<sup>[4,5]</sup> Das 1825 von Michael Faraday im Londoner Stadtgas entdeckte Benzol unterschied sich durch seine Reaktionsträgheit sowie durch seine Reaktionsprodukte von anderen zu dieser Zeit bekannten Kohlenwasserstoffen mit Mehrfachbindungen.<sup>[1,4]</sup> In der 1865 von August Kekulé vorgeschlagenen Strukturformel wird Benzol als ein cyclischer Kohlenwasserstoff mit einem Grundgerüst von sechs Kohlenstoff-Atomen dargestellt, die mit drei alternierenden Doppelbindungen verbunden sind.<sup>[2]</sup> Durch unterschiedliche Anordnung der  $\pi$ -Bindungen im Molekül lassen sich zwei verschiedene Strukturformeln für Benzol erstellen (Abb. 5).

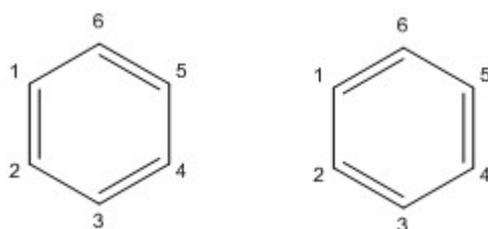


Abbildung 5: Strukturformeln des Benzols.

Die theoretische Betrachtung der Bromierung des Benzols sowie eine Betrachtung des erhaltenen 1,2-Dibrombenzols<sup>[4]</sup> legten nahe, dass sich beide Strukturen schnell ineinander umwandeln mussten.<sup>[1]</sup> Kekulé ging dabei noch von zwei Isomeren des Benzols aus, während Linus Pauling in den 1930ern eine intramolekulare Umlagerung der  $\pi$ -Bindungen postulierte.<sup>[5]</sup> Diese Umlagerung findet nach Pauling ohne eine Veränderung der Molekülstruktur statt. Danach lässt sich die Struktur des Moleküls nur durch die gleichzeitige Betrachtung beider Formeln beschreiben (Abb. 6).

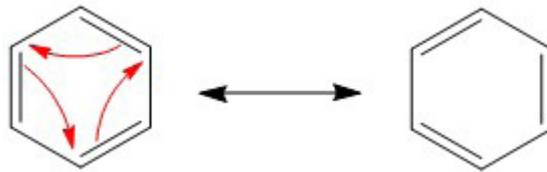


Abbildung 6: Strukturformel des Benzols.

Die Betrachtung der Orbitale des Benzols zeigt, dass jedes Kohlenstoff-Atom  $sp^2$ -hybridisiert ist und ein  $p_z$ -Orbital besitzt, in dem sich ein Elektron befindet (Abb. 7).<sup>[4]</sup>

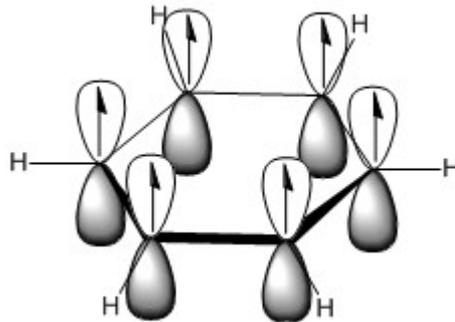


Abbildung 7:  $p$ -Orbitale des Benzols.

Der VB-Theorie zufolge entstehen durch Überlappung aller sechs  $p_z$ -Orbitale des Benzols sechs neue Molekülorbitale, die sich nun über den gesamten Ring erstrecken (Abb. 8).<sup>[12]</sup> Drei dieser Molekülorbitale besitzen bindenden Charakter und liegen energetisch unterhalb der  $p_z$ -Orbitale, während die restlichen drei Molekülorbitale energetisch über den  $p_z$ -Orbitalen liegen und antibindenden Charakter aufweisen.<sup>[4]</sup>

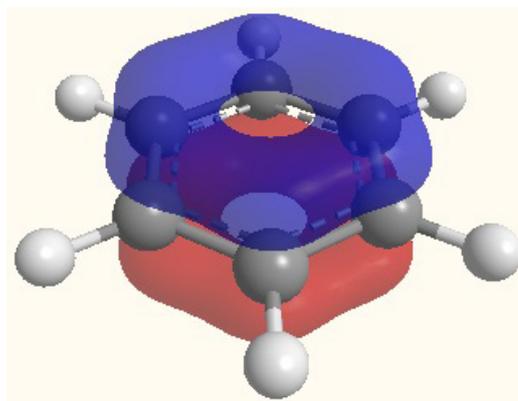


Abbildung 8: Ein Molekülorbital des Benzols.

Die sechs  $\pi$ -Elektronen befinden sich nach der Hundschen Regel<sup>[12]</sup> in den drei bindenden Molekülorbitalen. Da die  $\pi$ -Elektronen sich nicht mehr nur zwischen zwei Atomen aufhalten, sondern über das gesamte Ringsystem verteilt sind, lassen sich

keine lokalisierten  $\pi$ -Bindungen mehr nachweisen, diese Bindungen sind daher delokalisiert.<sup>[4,13]</sup> Dies erklärt auch die zwischen der Länge von Einfachbindung und Doppelbindung liegende einheitliche C-C-Bindungslänge von 139 pm im Benzol.<sup>[12]</sup> Die Verteilung der  $\pi$ -Elektronen über das gesamte Molekül und das Entstehen einer in sich geschlossenen stehenden Welle<sup>[13]</sup> sorgen für eine beträchtliche Absenkung der Energie des Systems und entsprechen der besonderen Stabilität des Benzols. Dies lässt sich einerseits an der im Vergleich zu lokalisierten  $\pi$ -Bindungen geringeren Reaktivität nachweisen<sup>[4]</sup> – dieses Phänomen wird als Mesomerie bezeichnet. Andererseits zeigt sich die Absenkung der Energie des Systems auch bei der Hydrierung von Cyclohexen, Cyclohexadien und Benzol (Abb. 9).<sup>[14]</sup>

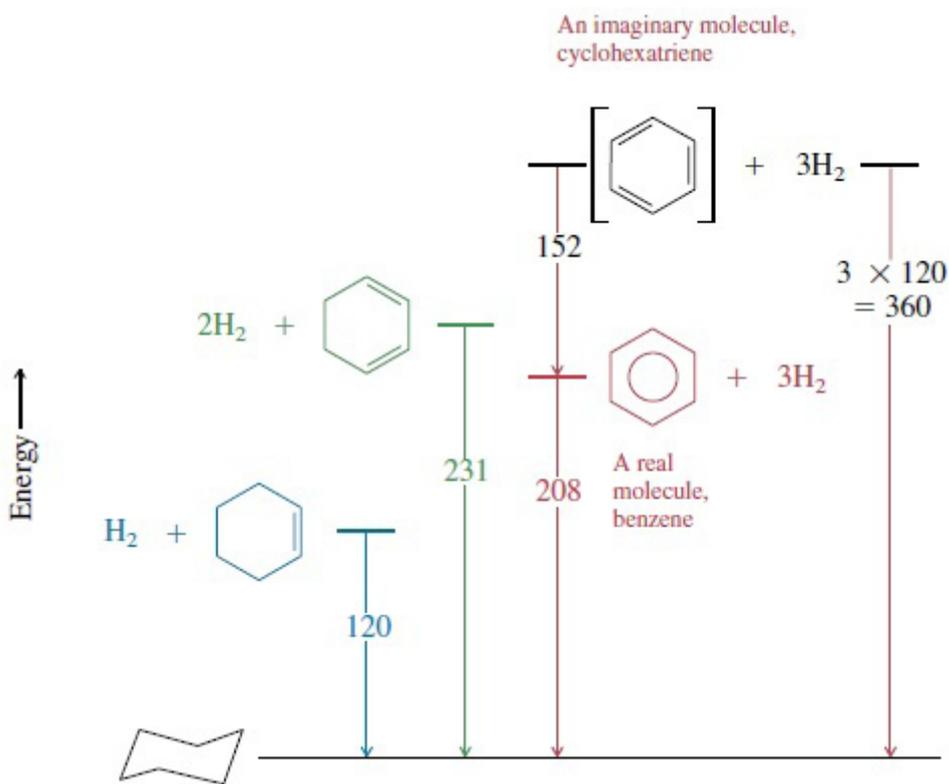


Abbildung 9: Hydrierungsenergien von Cyclohexen, Cyclohexadien und Benzol.<sup>[13]</sup>

Die Delokalisation von  $\pi$ -Elektronen über das gesamte Ringsystem lässt sich jedoch nur schwer in Lewisformeln darstellen. Daher werden Grenzformeln formuliert, die die möglichen Grenzfälle lokalisierter  $\pi$ -Bindungen darstellen.<sup>[4]</sup> Durch die Darstellung von Grenzformeln lässt sich die Größe des delokalisierten Systems abschätzen und das delokalisierte System, das zwischen den Grenzformeln liegt, im Ansatz erkennen. Systeme delocalisierter  $\pi$ -Elektronen existieren nicht nur im Benzol, sondern auch in zahlreichen weiteren Molekülen. Voraussetzung für ein delokalisiertes  $\pi$ -Elektronen-

system ist das Vorhandensein von mindestens drei benachbarten p-Orbitalen, welche durch Überlappung über mehrere Atome verteilte Molekülorbitale ausbilden können. Ein delokalisiertes System wird umso größer, je mehr p-Orbitale benachbart sind und miteinander überlappen können (Abb. 10).

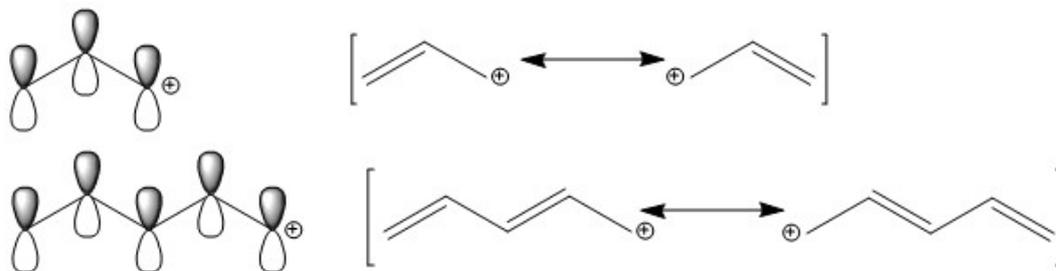


Abbildung 10: Benachbarte p-Orbitale verschiedener Alkene mit Grenzformeln.

Befinden sich die p-Orbitale in einer Ringstruktur, so verbessert sich die Überlappung der einzelnen Orbitale und es können sich sozusagen geschlossene Molekülorbitale ausbilden. Dieser Effekt wird als Aromatizität bezeichnet,<sup>[3]</sup> wenn dieses System cyclisch und planar ist sowie ein vollständig konjugiertes Elektronensystem mit  $4n+2$   $\pi$ -Elektronen aufweist.<sup>[12,4]</sup> Neben Molekülen mit *einem* aromatischem Ring – wie zum Beispiel Toluol – existieren auch noch Verbindungen mit *mehreren* Phenyl-Gruppen, wie beispielsweise das Chlordiphenylmethan und das Chlortriphenylmethan. Durch die Abspaltung des Chlorids unter Einsatz der Lewis-Säure Aluminium(III)chlorid entsteht an dem zentralen Kohlenstoff-Atom ein  $sp^2$ -hybridisiertes Zentrum, das nun über das leere  $p_z$ -Orbital mit in das mesomere System eingebunden ist. Dadurch kann sich das mesomere System über mehrere Kerne erstrecken, was in einer ausgeprägten Resonanzstabilisierung resultiert (Abb. 11).

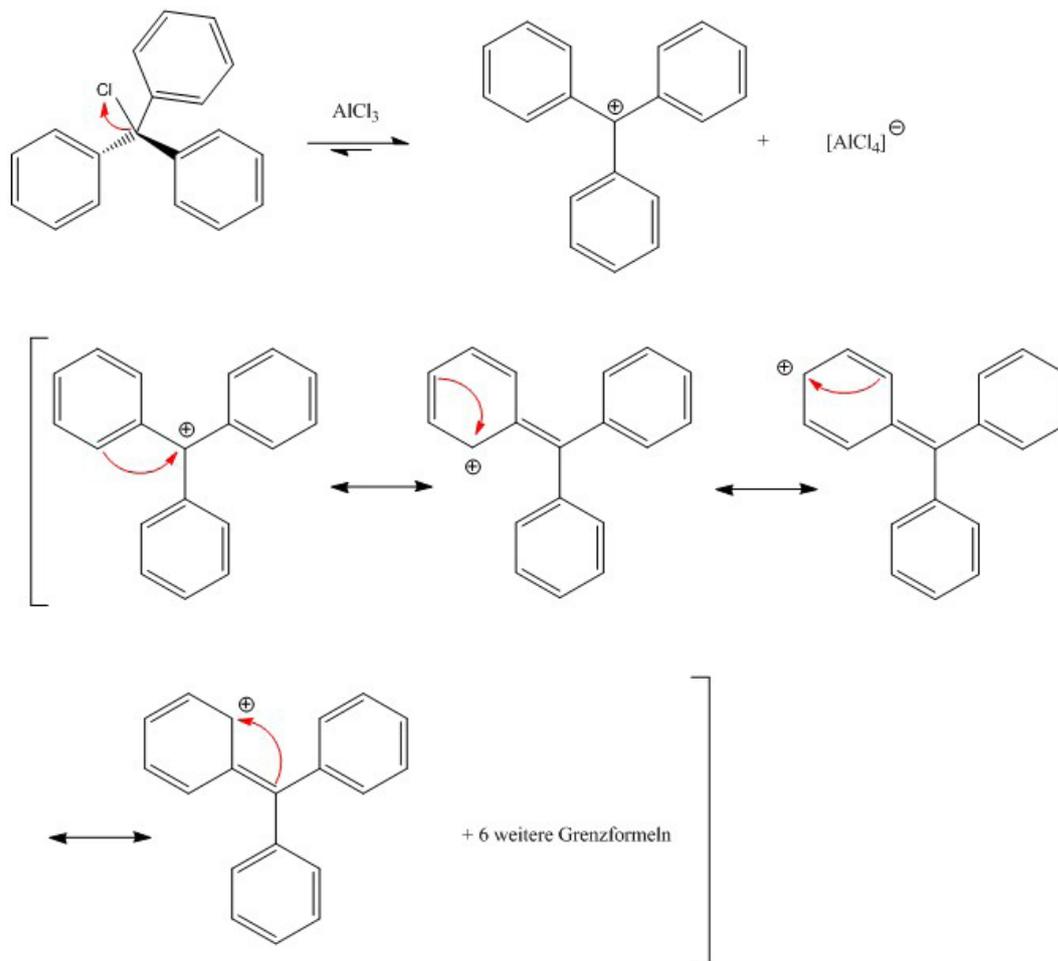


Abbildung 11: Mesomere Grenzformeln des Triphenylmethyl-Kations.

Mesomerie tritt jedoch nicht nur bei Benzol und dessen Derivaten sowie bei konjugierten Alkenen auf, sondern ist bei weitaus mehr organischen und anorganischen Molekülen und Zwischenprodukten zu finden. Dabei beschränken sich delokalisierte Bindungssysteme nicht nur auf ungeladene reine Kohlenstoff-Verbindungen. Häufig sind auch Heteroatome wie Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel Teil mesomerer Systeme, wobei zumeist voll besetzte Orbitale, die die freien Elektronenpaare tragen, in das mesomere System mit einbezogen werden. Mesomerie tritt dabei auch häufig bei Ionen auf. Mesomere Systeme sind in sehr vielen organischen Molekülen zu finden. Solche Verbindungen sind zum Beispiel Carbonsäuren (Abb. 12), Azofarbstoffe, die Basenpaare der DNA, viele Naturstoffe wie Vitamine und Enzyme sowie etliche Medikamente.<sup>[4]</sup>

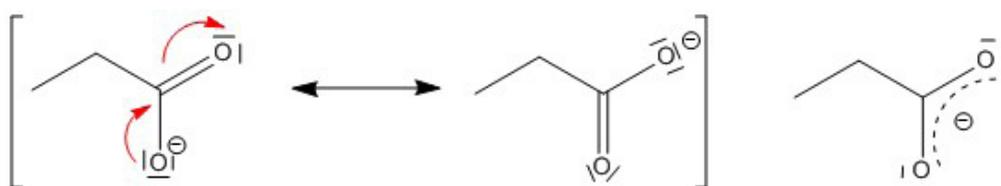


Abbildung 12: Mesomere Grenzformeln des Propionat-Ions.

Das Mesomerie-Konzept erklärt dabei in entscheidendem Maße die Eigenschaften der Stoffe und deren Reaktionen.<sup>[4]</sup> So lassen sich durch die Betrachtung mesomerer Systeme Aussagen über die relative Elektronendichte in einem Molekül treffen. Dies kann zur Einschätzung reaktiver Zentren und möglicher Reaktionsabläufe, beispielsweise bei aromatischen Zweitsubstitutionen, verwendet werden. Hier lassen sich durch die Betrachtung des nach dem elektrophilen Angriff entstandenen  $\sigma$ -Komplexes Aussagen über die Qualität der möglichen Positionen für eine Substitution treffen. So lässt sich zum Beispiel bei der Zweitsubstitution von Brom an Phenol durch Betrachtung der entstehenden Grenzformeln herleiten, dass eine Substitution in *ortho*- beziehungsweise *para*-Position dadurch begünstigt ist, dass die entstehende positive Ladung über ein größeres mesomeres System delokalisiert ist (Abb. 13). Dadurch wird ein energetisch niedrigerer Übergangszustand erreicht, der eine Substitution in *ortho*- beziehungsweise *para*-Position begünstigt. Die Selektivität wird hier vor allem durch mesomere Effekte bestimmt und lässt sich ausschließlich über deren Betrachtung verstehen.

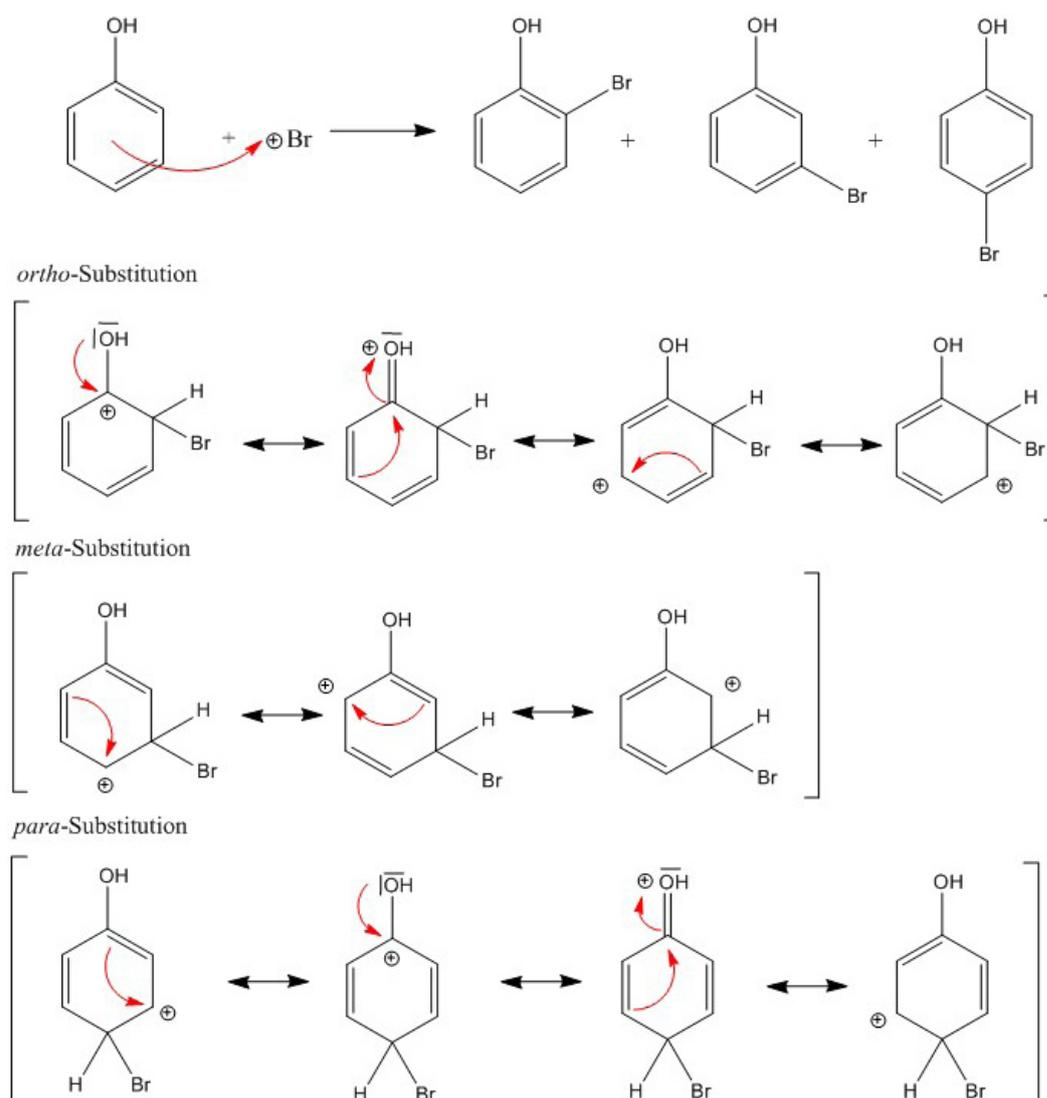


Abbildung 13: Grenzformeln der  $\sigma$ -Komplexe bei der Zweitsubstitution von Brom an Phenol.

Das Konzept der Mesomerie hilft so vor allem bei der Planung der Synthese komplexer organischer Moleküle wie beispielsweise Wirkstoffen. Ebenso lässt sich die Reaktivität eines Moleküls durch das Konzept der Mesomerie einschätzen. Darüber hinaus gibt die Mesomerie Auskunft über die Stabilität eines Stoffes, die unter anderem mit der Größe des mesomeren Systems zusammenhängt.<sup>3</sup> Ebenso sind mesomere Systeme für die Farblichkeit organischer Verbindungen verantwortlich, die durch Anregung von Elektronen in großen delokalisierten Systemen entsteht.<sup>[4,12]</sup> Durch Abschätzen der Größe dieser Systeme lassen sich auch Aussagen über die Farbe der Stoffe treffen.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass Mesomerie viele Eigenschaften organischer und anorganischer Verbindungen erklärt, indem sie die Abschätzung Elektronendichte im Molekül erlaubt.<sup>[15]</sup> Die Kenntnis des mesomeren Konzeptes ermöglicht daher die Einschätzung dieser Eigenschaften und Schlussfolgerungen auf Reaktionswege und Reaktionsabläufe. Ein erklärtes Ziel der organischen Chemie ist es, aus der Struktur eines Moleküls dessen Reaktionen vorherzusagen.<sup>[4,16]</sup> Das Konzept der Mesomerie ermöglicht mit seinen Aussagen diese Fragen zu beantworten und fördert so ein tiefergehendes Verständnis der organischen Chemie. Deshalb stellt es ein wichtiges Schlüsselkonzept der organischen Chemie dar.

---

3 Ausnahmen hiervon sind Antiaromaten, in denen das mesomere System für Instabilität sorgt.<sup>[12]</sup>

### 3. Fachdidaktische Analyse

#### 3.1 Kerncurriculum und Kompetenzorientierung

Das Kerncurriculum für die gymnasiale Oberstufe im Fach Chemie ersetzt ab dem Schuljahr 2016/17 Schritt für Schritt die alten Lehrpläne für den Chemieunterricht in der Oberstufe. Der größte Unterschied zu den alten Lehrplänen besteht in der Abkehr von einer wissensorientierten Input-Steuerung hin zu einer das Können in den Mittelpunkt setzenden Output-Orientierung (Abb. 14). Dies lässt sich vor allem an den formulierten Bildungsstandards und der Kompetenzorientierung des Kerncurriculums erkennen. Kompetenzen sind Könnenserwartungen, die Schüler bis zu einem bestimmten Zeitpunkt im Bildungsgang erfüllt haben sollen. Eine Kompetenz stellt demnach eine erlernte Fähigkeit dar, die zum Bewältigen von Aufgaben angewendet wird. Es handelt sich demnach um angewandetes Wissen.<sup>[17]</sup>

#### Altes vs. neues Unterrichtsskript:

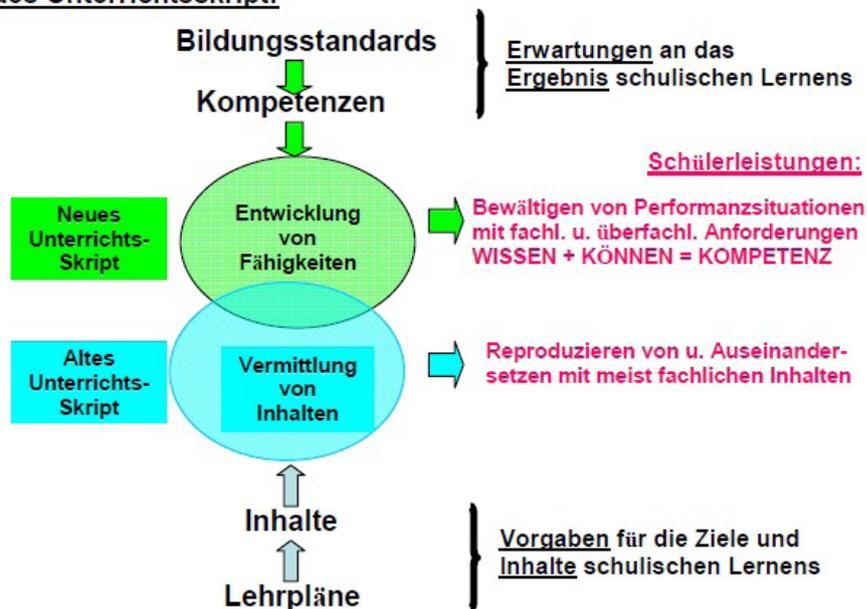


Abbildung 14: Vergleich Lehrplan und Kerncurriculum.<sup>[17]</sup>

Die mit der Einführung des Kerncurriculums verbundenen Ziele der naturwissenschaftlichen Bildung werden dabei wie folgt beschrieben:

Naturwissenschaftliche Bildung gehört zu den konstitutiven Bestandteilen unserer Kul-

tur und umfasst grundlegende und spezifische Denkstrukturen und Sichtweisen, die eine differenzierte Betrachtung der natürlichen und technischen Umwelt in ihrer Beziehung zum Menschen ermöglicht. Sie befähigt die Lernenden, ihre Umwelt in einer naturwissenschaftlichen Perspektive zu erschließen und in ihr reflektiert zu handeln. Naturwissenschaftliche Bildung ist daher eine Voraussetzung für die aktive Teilhabe an gesellschaftlicher Kommunikation und Meinungsbildung.<sup>[6]</sup>

(Kerncurriculum gymnasiale Oberstufe des Landes Hessen für das Fach Chemie, Wiesbaden 2016, 10.)

Der naturwissenschaftlichen Bildung wird hier eine wichtige Stellung in der schulischen Bildung eingeräumt, wobei neben der Förderung der aktiven Teilhabe an gesellschaftlicher Kommunikation und Meinungsbildung auch die Grundlagen für Lernsituationen im späteren Studium oder dem Beruf geschaffen werden sollen.<sup>[6]</sup>

### ***3.2 Modelle im Chemieunterricht***

Das Fach Chemie befasst sich mit den Eigenschaften und den Reaktionen kleinster Teilchen, den Atomen und Molekülen. Diese können auf Grund ihrer geringen Größe nur indirekt durch bestimmte Messverfahren wie NMR-Spektroskopie oder durch messbare Folgen einer Reaktion – wie eine Veränderung der Leitfähigkeit von Reaktionslösungen – betrachtet werden. Zur Beschreibung von Atomen, Molekülen und deren Reaktionen ist die Chemie daher auf Modelle angewiesen, die die beobachtbaren und messbaren Effekte hinreichend gut beschreiben können und so einen Blick auf den möglichen Charakter der Teilchen erlauben. Das Verstehen und damit auch die Lehre in der Chemie sind daher vor allem modellgestützt.

Der naturwissenschaftliche Unterricht soll die Schüler unter anderem dazu befähigen, Modellvorstellungen zu entwickeln und durch deren Anwendung die belebte und unbelebte Natur zu verstehen und zu beschreiben.<sup>[6]</sup> Modellgestütztes Denken und Arbeiten steht daher im Mittelpunkt des Chemieunterrichts, da es die Werkzeuge zur Erschließung und der Erklärung der chemischen Welt liefert.<sup>[18]</sup> Weiterhin erlauben es Modelle, die komplexe chemische Welt zu vereinfachen und so verständlicher zu machen, indem sie Phänomene durch eine Abbildung auf Bekanntes und leichter Verständliches erklären.<sup>[18]</sup> So kann Unbekanntes durch bereits vorhandenes Wissen ausgedrückt werden. Dies trifft auch auf das Mesomerie-Modell zu, das eine Abbildung quantentheoretischer Beziehungen auf einfacher verständliche Bindungstheorien ist.<sup>[18]</sup> Dennoch liefern Modelle keine exakte Abbildung der Wirklichkeit, sondern dienen

lediglich zur besseren Erklärung derselben.<sup>[18]</sup> Gerade dieser Sachverhalt muss im schulischen Kontext herausgestellt werden, damit Modelle richtig verstanden, aufgestellt und angewendet werden können.

### ***3.3 Mesomerie in den Unterrichtsinhalten***

Das Thema Mesomerie ist ein Bestandteil der im Kerncurriculum vorgesehenen Unterrichtsinhalte. Da Mesomerie vor allem im Bereich der organischen Chemie auftritt und ein komplexes Thema darstellt, wird es erst in der Qualifikationsphase behandelt. Dennoch werden die Vorkenntnisse zur Behandlung der Mesomerie, vor allem die Bindungstheorie betreffend, in der Einführungsphase im Themenfeld E3 „Einführung in die organische Chemie“ generiert.<sup>[6]</sup> Hier wird das Wissen um die chemische Bindung aus der Sekundarstufe I erneut thematisiert und anschließend erweitert. Weiterhin folgt eine Einführung in das Zeichnen von Lewis-Strukturen am Beispiel von Alkanen, Alkenen und Alkoholen sowie dem Aufstellen von Reaktionsmechanismen.<sup>[6]</sup> In der Qualifikationsphase werden die Inhalte zur organischen Chemie aus der Einführungsphase wiederholt und vertieft. Im Leistungskurs sind in der Q1.1 eine weitere Betrachtung von C-C-Mehrfachbindungen und im Zuge dessen auch eine Einführung in ein vereinfachtes Orbitalmodell vorgesehen. Hier erfolgt eine Einführung in die Orbitaltheorie, und es werden  $\sigma$ - und  $\pi$ -Bindungen thematisiert sowie die Hybridisierung von Kohlenstoff-Atomen besprochen. Darüber hinaus werden die Eigenschaften und Bindungsverhältnisse von Benzol und die elektrophile Substitution am Aromaten auf der Basis des vereinfachten Orbitalmodells besprochen und das Mesomeriemodell eingeführt.<sup>[6]</sup> In der Q1.3 wird das Mesomeriemodell am Beispiel von Carbonsäuren im Grundkurs unter Benutzung von Lewis-Formeln eingeführt, das Orbitalmodell wird im Grundkurs jedoch nicht verwendet. Mesomerie stellt sich an diesem Punkt als eine Delokalisierung der Elektronen durch das „Klappen“ von Elektronenpaaren dar. Dieses einfache Mesomeriemodell beruht vollständig auf Wissen aus der Sekundarstufe I, der Einführungsphase sowie der Qualifikationsphase. Ihm zu Grunde liegen die Bindungstheorie, die Oktett-Regel sowie das Aufstellen von Strukturformeln in der Lewis-Schreibweise. Durch den Rückgriff auf bereits bekanntes Wissen sind die Inhalte leichter verständlich und anwendbar.<sup>[19]</sup> Im Leistungskurs werden die Bindungsverhältnisse der Carboxyl-Gruppe und das delokalisierte  $\pi$ -System des Carboxylat-Ions

zusätzlich mit dem vereinfachten Orbitalmodell beschrieben. Das Themenfeld Q2.5 befasst sich erneut mit Aromaten. Hier werden auf der Basis des Mesomeriemodells die Eigenschaften und Bindungsverhältnisse des Benzols besprochen sowie Substitutionsreaktionen am Aromaten am Beispiel der Halogenierung thematisiert. Im Leistungskurs werden zusätzlich die Nitrierung und die Zweitsubstitution behandelt. Dabei werden vor allem die mesomeren Effekte und deren Einfluss auf den Ort der Zweitsubstitution thematisiert.<sup>[6]</sup> Dieses Themenfeld ist allerdings nicht verbindlich, sondern kann per Erlass zusätzlich zu den verbindlichen Themenfeldern festgelegt werden.<sup>[6]</sup> Mesomerie wird desweiteren im Wahlpflichtthemengebiet Q4.1 bei der Behandlung der Farbstoffe angesprochen. Hierbei werden delokalisierte  $\pi$ -Elektronensysteme betrachtet und deren Einfluss auf die Farbigkeit organischer Verbindungen diskutiert. Im Leistungskurs wird dabei auch auf die Betrachtung der Orbitale eingegangen.<sup>[6]</sup>

### 3.4 Im Unterricht eingesetzte Mesomeriemodelle

Wie zu sehen ist, wird das Konzept Mesomerie durch die vom Kerncurriculum vorgegebenen Themenfelder im Chemieunterricht behandelt. Dabei wird vor allem ein auf Lewis-Formeln basierendes Mesomeriemodell angewendet, welches das mesomere System durch die Darstellung von Grenzformeln beschreibt. Als Grundlage dieser Grenzformeln dient eine der möglichen Lewis-Formeln des Moleküls. Die einzelnen Grenzformeln werden nun durch die Verschiebung von  $\pi$ -Elektronenpaaren erhalten. Die Grenzformeln werden dabei mit einem Mesomeriepfeil (= Doppelspitzenpfeil) verbunden und stehen in eckigen Klammern, während die formalen Elektronenverschiebungen durch gebogene Pfeile angezeigt werden (Abb. 15).<sup>[20]</sup>

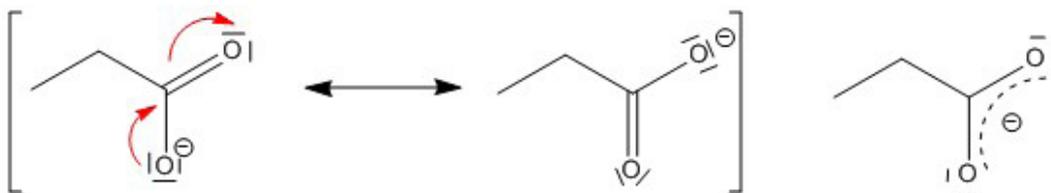


Abbildung 15: Mesomere Grenzformeln des Propionat-Ions.

Weiterhin müssen beim „Klappen“ von Elektronen gewisse Regeln beachtet werden (Abb. 16). Einerseits darf die Oktett-Regel für Atome der ersten und zweiten Periode

nicht überschritten werden, was in einer maximalen Vierbindigkeit resultiert – Wasserstoff ausgenommen. Hierbei sind *all*-Oktett-Strukturen,<sup>[21]</sup> in denen alle Atome ein Elektronenoktett aufweisen, als energetisch günstiger zu bewerten als Elektronensextette. Andererseits dürfen durch die Verschiebung der Elektronenpaare keine Einfachbindungen gebrochen und dadurch die Molekülstruktur grundlegend verändert werden.<sup>[20]</sup> Für das Erstellen der Grenzformeln dürfen daher nur die  $\pi$ -Elektronen der Doppelbindungen oder freie Elektronenpaare von Heteroatomen verwendet werden. Darüber hinaus sollten die gebildeten Grenzformeln eine möglichst geringe Ladungstrennung aufweisen. Grenzformeln mit größerer Ladungstrennung sind im Vergleich zu solchen mit geringerer Ladungstrennung energetisch ungünstiger, wenn gleiche elektronische Zustände im Bezug auf Elektronenoktette und -sextette vorliegen.<sup>[20]</sup>

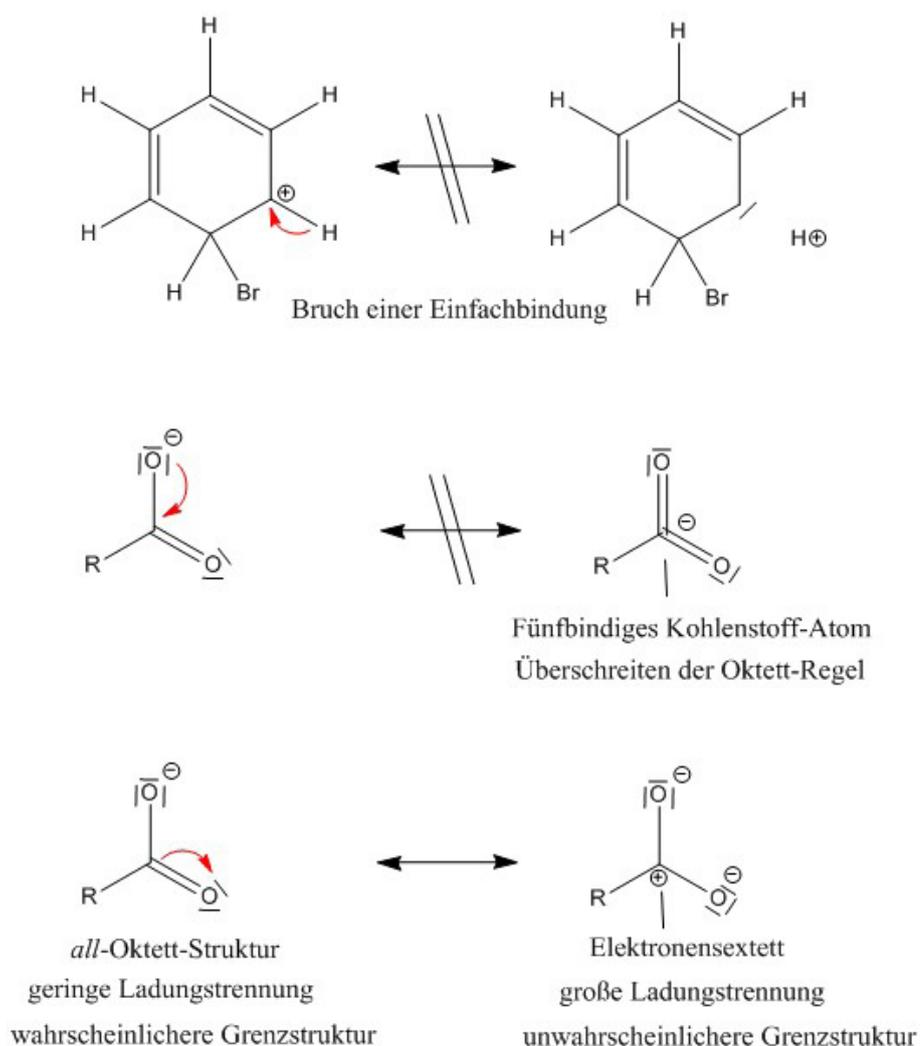


Abbildung 16: Regeln zum Erstellen von Grenzformeln.

Die einzelnen Grenzformeln stellen dabei keine real existierenden Strukturen dar, sondern beschreiben einen Teil des delokalisierten Elektronensystems.<sup>[20]</sup> Je energetisch niedriger und damit wahrscheinlicher eine Grenzformel ist, desto mehr trägt sie zur Beschreibung des mesomeren Systems bei.<sup>[20]</sup> Die Größe des Systems sowie dessen reaktive Zentren lassen sich aus den einzelnen Grenzformeln abschätzen, wobei im Bezug auf die reaktiven Zentren immer die Grenzformeln der Zwischenstufe des mesomeren Systems in der Reaktion betrachtet werden müssen.<sup>[20]</sup>

Dieses Modell eignet sich gut zur Betrachtung mesomerer Systeme, da es auf bekannten Modellen der chemischen Bindung beruht und somit leicht verständlich und anwendbar ist. Die Betrachtung der Grenzformeln liefert einfach zu erkennende Ansatzpunkte für eine Bewertung mesomerer Systeme und ermöglicht so eine gute Beschreibung der Eigenschaften des betrachteten Systems. Leichte Verständlichkeit und Anwendbarkeit prädestinieren dieses Mesomeriemodell als „Arbeitsmodell“ im schulischen und universitären Bereich. Die Schwächen dieses Modells liegen vor allem darin, dass das mesomere System in seiner Gesamtheit nicht darstellbar ist. Dieses Modell erfordert von den Anwendern die Erschließung der Gesamtheit durch Betrachtung einzelner Teile, wofür ein abstraktes Vorstellungsvermögen vorausgesetzt wird. Dies kann mitunter zu Schwierigkeiten beim Verständnis des Konzepts der Mesomerie führen, da sich der grundsätzliche Charakter mesomerer Systeme nicht sofort aus den Grenzformeln erkennen lässt. Der leichten Anwendbarkeit steht in diesem Modell also ein komplexeres, tieferes Verständnis der Mesomerie gegenüber.

Das Kerncurriculum sieht für den Leistungskurs im Fach Chemie auch die Behandlung der Orbitaltheorie im Verbund mit Mesomerie vor. Daher wird im Leistungskurs neben dem auf Lewis-Formeln basierenden Mesomeriemodell auch ein orbitaltheoretisches Modell eingesetzt, welches zusätzliche Einsichten ermöglicht. In diesem Modell stehen statt der Grenzformeln die sich aus der Kombination der Atomorbitale ergebenden Molekülorbitale im Fokus. Dabei werden zuerst die durch Hybridisierung entstehenden Atomorbitale betrachtet. Alle Atomorbitale, die durch Überlappung  $\sigma$ -Bindungen ausbilden, werden zur Reduktion der Komplexität und der besseren Übersichtlichkeit weiter in der Lewis-Schreibweise dargestellt. Im Fokus der Betrachtung stehen die p-Orbitale, da diese durch Überlappung die Molekülorbitale bilden, in denen sich die delokalisierten Elektronen befinden.<sup>[12]</sup> In einer ersten Darstellungsmöglichkeit werden nur die möglichen Kombinationen der p-Orbitale sowie deren Energiegehalt betrachtet (Abb. 17). Über die bei der Kombination entstehenden Knoten-

flächen kann der Energiegehalt der einzelnen Kombinationsmöglichkeiten abgeschätzt werden und durch die Besetzung der Orbitale nach der Hundschen Regel und dem Pauli-Prinzip (Abb. 17) die energetische Absenkung delokaliserter Elektronensysteme und damit deren Reaktionsträgheit im Vergleich zu isolierten Doppelbindungen erklärt werden.

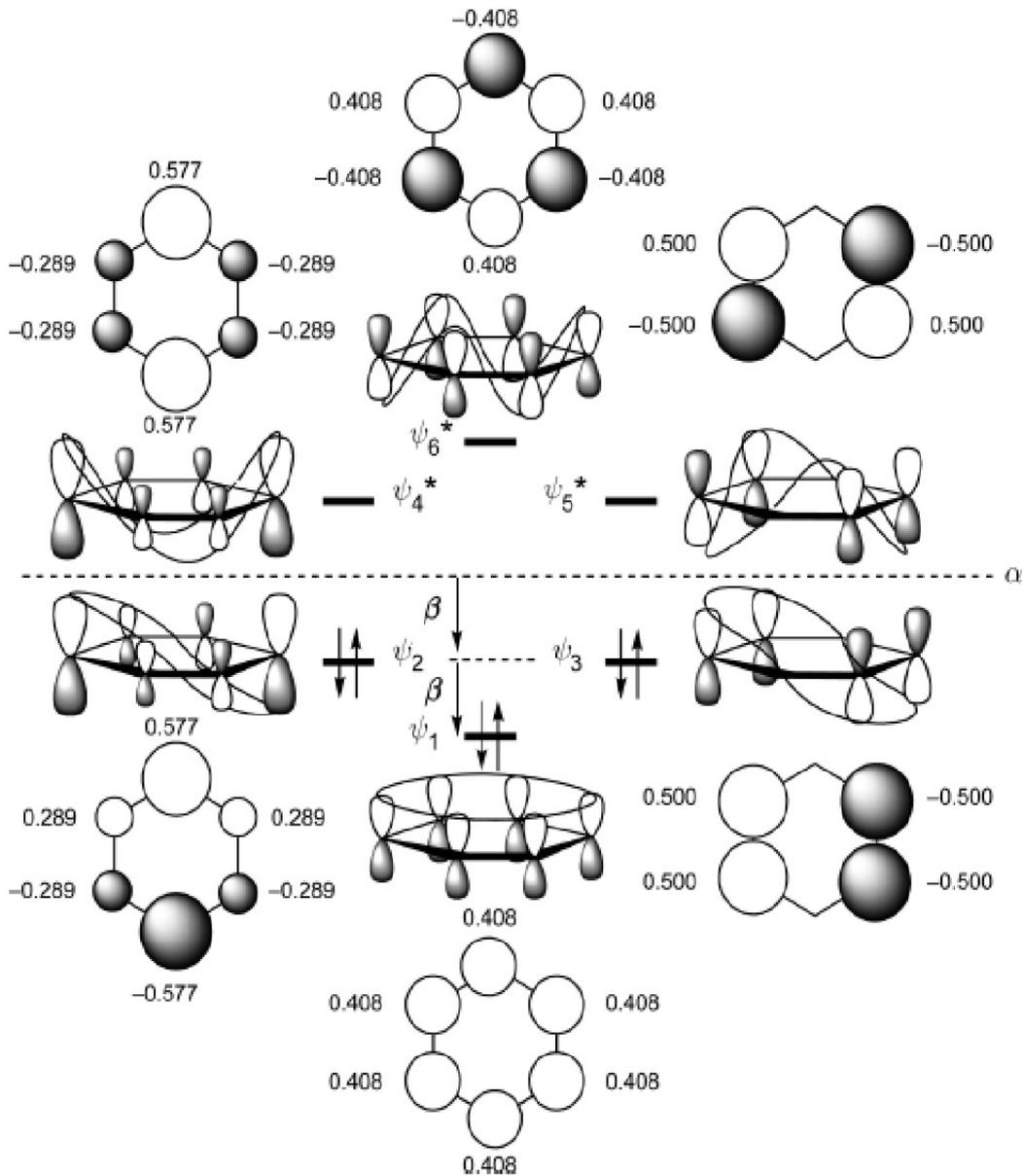


Abbildung 17: Kombinationen der p-Orbitale des Benzols.<sup>[22]</sup>

In einer weiteren, auf das Benzol bezogenen Darstellung werden die durch Kombination gebildeten Molekülorbitale betrachtet, wobei sich hier aus Gründen der Anschaulichkeit zumeist auf das energetisch am tiefsten liegende Molekülorbital beschränkt wird (Abb. 18). Diese Darstellung ermöglicht eine Vorstellung von Molekülorbitalen

als über einen großen Bereich des Moleküls verteilte Elektronendichte und damit von delokalisierten Elektronen. Vorhersagen zu möglichen Reaktionszentren erlaubt sie jedoch nicht.

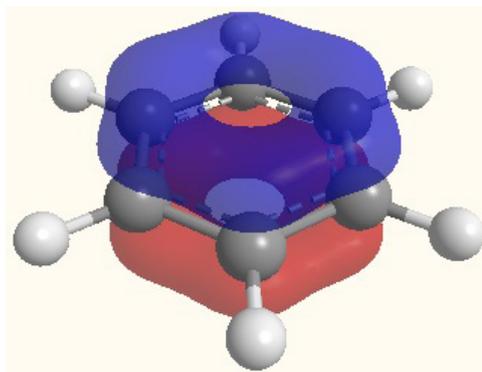


Abbildung 18: Energetisch am tiefsten liegendes MO des  $\pi$ -Systems von Benzol.

Weitere Probleme ergeben sich dadurch, dass zuerst das diesem Modell zu Grunde liegende Orbitalmodell verstanden und angewendet werden können muss, um eine orbitaltheoretische Diskussion der Mesomerie zu ermöglichen. Auf Grund des höheren Anforderungsniveaus, das dieses Modell an die Schüler stellt, ist eine Behandlung dieses Modells vor allem aus Zeitgründen nur im Leistungskurs möglich, was den Einsatz auf Leistungskurse beschränkt. Darüber hinaus ist auch das Erstellen von Darstellungen der Atom- und Molekülorbitale zeitaufwändiger und die Aussagekraft, die dieses Modell im Vergleich zu den Grenzformeln über Reaktionsabläufe und den Energiegehalt der Moleküle besitzt, geringer. Die Behandlung der Mesomerie in der Schule beruht daher vordergründig auf dem auf Grenzformeln basierenden Mesomeriemodell, das orbitaltheoretische Mesomeriemodell dient vor allem als zusätzliche Möglichkeit zur Erklärung der Mesomerie.

Thematisch werden die Mesomeriemodelle bei der Behandlung der Carbonsäuren sowie des Benzols und dessen Derivaten verwendet. Es handelt sich daher vor allem um mesomeriestabilisierte Ionen und einfache aromatische Systeme, wobei vor allem im Leistungskurs ein Fokus auf letzteren liegt. Darüber hinaus werden sie jedoch auch beim Wahlthema der Farbstoffe benötigt, um die zur Absorption bestimmter Wellenlängen benötigten delokalisierten Elektronensysteme zu beschreiben.

### 3.5 Basiskonzepte

Neben den Themenfeldern definiert das Kerncurriculum für das Fach Chemie Basiskonzepte, die *themenverbindende, übergeordnete Regeln, Prinzipien und Erklärungsmuster* darstellen und deren Zweck es ist, *vielfältige fachliche Sachverhalte sinnvoll einordnen und vernetzen zu können*.<sup>[6]</sup> Sie stehen für eine heuristische Herangehensweise an Problemstellungen in der Chemie und fördern ein besseres Verstehen durch die Möglichkeit der Übertragung der Inhalte auf ähnliche Problemstellungen.<sup>[16]</sup> Im schulischen Kontext sollen sie nicht einzeln, sondern im Verbund mit den Themenfeldern erarbeitet werden. Die Basiskonzepte sind das Stoff-Teilchen-Konzept, das Struktur-Eigenschafts-Konzept, das Donator-Akzeptor-Konzept, das Energiekonzept und das Gleichgewichtskonzept.<sup>[6]</sup> Diese „Grundzusammenhänge der Chemie“<sup>[16]</sup> finden sich auch in Teilen im Konzept der Mesomerie wieder, mit dessen Modellvorstellungen sich diese Arbeit befasst. Zentral bei der Behandlung der Mesomerie ist das Struktur-Eigenschafts-Prinzip. Dieses Basiskonzept beschreibt die aus den atomaren Strukturen resultierenden Eigenschaften und Reaktionen auf Grund der Annahme, dass gleiche Strukturmerkmale gleiche Eigenschaften hervorrufen.<sup>[6]</sup> Hierunter fallen vor allem intermolekulare Kräfte, die sich aus der Molekülstruktur ergeben, wie zum Beispiel die Verschiebung von Elektronendichte durch Hyperkonjugation und deren Einfluss auf Reaktionsabläufe. Die Beschreibung der Strukturen erfolgt dabei auf Grund fehlender Möglichkeiten einer direkten Beobachtung, die durch die geringe Größe und die Heisenbergsche Unschärferelation auftreten, ausschließlich modellgestützt.<sup>[18]</sup> Das Konzept der Mesomerie ist primär an die Molekülstruktur geknüpft, da es an strukturelle Besonderheiten in Molekülen gebunden ist. Das wichtige Strukturmerkmal besteht im Vorhandensein von „aneinandergereihten“ p-Orbitalen in einer planaren Umgebung, die durch Überlappung ein delokalisiertes Elektronensystem bilden. Durch das Erkennen dieses Strukturmerkmals bei neuen Molekülen lässt sich auf Mesomerie schließen. Das Konzept der Mesomerie beruht daher vor allem auf dem Struktur-Eigenschafts-Konzept und fördert durch die Behandlung im Unterricht das Verstehen dieses Konzeptes.

Doch auch die weiteren Basiskonzepte finden sich in Teilen beim Konzept der Mesomerie wieder und können hier vor allem bei der Vorhersage von Reaktionsabläufen verwendet werden. So erlaubt die Anwendung des Donator-Akzeptor-Konzeptes eine Beschreibung der Elektronenübergänge bei Reaktionen mit mesomeren Systemen, die

zum Beispiel bei der bereits angesprochenen Halogenierung als Elektronendonatoren auftreten.<sup>[4]</sup> Über das Energiekonzept lassen sich Vorhersagen über die Reaktionswege sowie den Energiegehalt von Edukten und Produkten, zum Beispiel bei Zweitsubstitutionen an Aromaten erstellen, während sich das Gleichgewichtskonzept mit der Lage von Gleichgewichten befasst, wie sie unter anderem bei der Reaktion von Carbonsäuren zu mesomeriestabilisierten Carbanionen auftreten.<sup>[6]</sup> Diese Basiskonzepte erlauben zusammen mit dem Struktur-Eigenschafts-Basiskonzept eine Einschätzung möglicher Reaktionsverläufe durch eine Charakterisierung der Reaktionspartner sowie eine vor allem energetische Beschreibung der Reaktionsprodukte. Hierdurch lassen sich Reaktionsabläufe für mesomere Systeme auf Grund der Informationen aus der Anwendung der Basiskonzepte erschließen und erklären. Viele der in den Basiskonzepten formulierten Prinzipien können also bei der Behandlung des Konzepts Mesomerie im Unterricht thematisiert werden.

### ***3.6 Bildungsstandards***

Neben den Basiskonzepten werden im Kerncurriculum noch Bildungsstandards formuliert, welche die bis zum Abschluss der Oberstufe zu erreichenden fachlichen Kompetenzen beschreiben (Abb. 19).<sup>[6]</sup> Diese Kompetenzen stehen im direkten Zusammenhang mit den zu behandelnden Themenfeldern, indem sich beide gegenseitig bedingen. Die Bildungsstandards sind dabei nach unterschiedlichen Anforderungsniveaus aufgebaut und ermöglichen so die Bildung einer differenzierten Herangehensweise an thematische Komplexe. Dabei bereiten sie vor allem auf die Arbeit mit Konzepten und Modellen vor.

Auch die im Kerncurriculum formulierten Bildungsstandards spiegeln den häufigen Gebrauch von Modellen und den Einsatz von Konzepten im Unterricht wider, wie sie bei der Behandlung der Mesomerie verwendet werden.

Kompetenzbereiche	Teilbereiche	
Erarbeitung und Anwendung fachlicher Kenntnisse	F1	fachliche Kenntnisse konzeptbezogen darstellen, strukturieren und vernetzen
	F2	naturwissenschaftliche Definitionen, Regeln, Gesetzmäßigkeiten und Theorien erarbeiten und anwenden
Erkenntnisgewinnung und Fachmethoden	E1	naturwissenschaftliche Untersuchungen planen, durchführen, auswerten und Ergebnisse interpretieren
	E2	naturwissenschaftliche Modelle erarbeiten und in ihren Gültigkeitsbereichen anwenden
	E3	den Prozess naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung reflektieren und die Naturwissenschaften als wissenschaftliche Disziplin charakterisieren
Kommunikation in naturwissenschaftlichen Zusammenhängen	K1	Informationen zu naturwissenschaftlichen Zusammenhängen erschließen
	K2	naturwissenschaftsbezogene Sachverhalte dokumentieren und präsentieren
	K3	fachlich kommunizieren und argumentieren
Bewertung und Reflexion	B1	fachbezogene Sachverhalte in naturwissenschaftlichen Zusammenhängen sachgerecht beurteilen und bewerten
	B2	naturwissenschaftsbezogene Sachverhalte unter Berücksichtigung persönlicher, gesellschaftlicher und ethischer Aspekte reflektieren

Abbildung 19: Bildungsstandards für den Chemieunterricht.<sup>[6]</sup>

So ist explizit der Einsatz von Modellen zur Beschreibung chemischer Sachverhalte unter dem Kompetenzbereich *Erkenntnisgewinnung und Fachmethoden* (E) aufgeführt. Unter dem Kompetenzniveau E2 werden die Erarbeitung wissenschaftlicher Modelle und deren Anwendung genannt, während unter E3 die Erweiterung und Anpassung von Modellen thematisiert werden.<sup>[6]</sup> Ebenso sind unter dem Kompetenzbereich *Erarbeitung und Anwendung fachlicher Kenntnisse* (F) die Erarbeitung und die Anwendung der Basiskonzepte, vor allem im Bezug auf das Struktur-Eigenschafts-Konzept unter F2 angeführt.<sup>[6]</sup> Unter den Kompetenzbereichen *Kommunikation in naturwissenschaftlichen Zusammenhängen* (K) und *Bewertung und Reflexion* (B) werden die fachliche Argumentation (K3) und die Anwendung verschiedener Darstellungsformen von Stoffen, Molekülen, Reaktionsgleichungen und Reaktionsmechanismen gefordert (K2). Unter dem Kompetenzniveau B1 finden sich die Bewertung des Verlaufes chemischer Reaktionen wieder.

Eine Durchführung des Themas Mesomerie im Unterricht ermöglicht die Behand-

lung des Struktur-Eigenschafts-Basiskonzeptes sowie in Teilen der restlichen genannten Basiskonzepte. Darüber hinaus erfüllt eine vollständige Behandlung des Themas die höchsten Kompetenzniveaus in den Bereichen *Erkenntnisgewinnung und Fachmethoden* (E), *Erarbeitung und Anwendung fachlicher Kenntnisse* (F) und *Kommunikation in naturwissenschaftlichen Zusammenhängen* (K) sowie das Niveau B1 des Bereiches *Bewertung und Reflexion* (B). Das höchste Niveau B2 lässt sich hier durch die Diskussion mit anschließender Bewertung der Anwendung der gebildeten Stoffe mit mesomeren Systemen erreichen, vor allem wenn in diesem Rahmen auf deren vielfältigen Einsatz in der Technik hingewiesen wird. Dabei können einerseits die Cancerogenität und die Giftigkeit verschiedener Benzolderivate behandelt werden, andererseits aber auch auf deren Verwendung bei der Herstellung von Medikamenten verwiesen werden.<sup>[4]</sup> Dies ist auch im Hinblick auf die Verknüpfung der einzelnen Themen miteinander sinnvoll.

Die Behandlung des Themas Mesomerie im Chemieunterricht bietet viele Vorteile. Einerseits ermöglicht es eine Anwendung vieler Basiskonzepte wie des Struktur-Eigenschafts-Konzepts, andererseits können durch die Bearbeitung des Themas viele Bildungsstandards im höchsten Anforderungsniveau erreicht und damit die fachlichen Kompetenzen der Schüler erweitert werden. Das Thema Mesomerie stützt sich dabei vor allem auf den Einsatz von Modellen, die hier besonders gut besprochen und angewendet werden können, da der Charakter eines Modells in diesem Falle sehr gut erkannt und diskutiert werden kann.<sup>4</sup> Darüber hinaus ermöglicht der Einsatz des auf Grenzformeln basierenden Modells ein auf Vorwissen aufbauendes Arbeiten mit mesomeren Systemen und fördert so das Verständnis der Chemie der Schüler.

---

<sup>4</sup> Siehe hier vor allem die Beschreibung eines Teilchens durch mehrere Grenzformeln und die Analogie zur Beschreibung eines Einhorns.<sup>[12]</sup>

## 4. Inklusiver Unterricht

### 4.1 Inklusion

Durch die Ratifizierung der UN-Konvention über die Rechte von Menschen mit Behinderungen (UN-BRK) im Jahre 2009 wird das Recht von Menschen mit Behinderungen auf Bildung anerkannt und der Aufbau eines inklusiven Bildungssystems, dessen Ziel der freie Zugang aller Menschen zu Bildung ist, gewährleistet.<sup>[23,24,25]</sup> Da das segregative deutsche Bildungssystem als eine Diskriminierung vor allem von Kindern mit Behinderungen angesehen wird,<sup>[26]</sup> soll durch die Einführung eines inklusiven Schulsystems eine Umgebung geschaffen werden, in der alle Menschen die gleichen Bildungschancen erhalten.<sup>[27]</sup> Dies schließt neben Menschen mit geistigen und/oder körperlichen Behinderungen auch Menschen mit Lernstörungen und hochbegabte Menschen mit ein, die nun die Möglichkeit erhalten sollen, gemeinsam unterrichtet zu werden. Die vorhandene Diversität soll dabei nicht als Problemfaktor, sondern als Chance für die Bildung angesehen und genutzt werden.<sup>[26]</sup> Inklusion fordert daher nicht die Eingliederung benachteiligter Menschen in das bestehende Schulsystem, sondern die Schaffung eines Schulsystems, welches allen Schülern gleiche Bildungschancen ermöglicht.<sup>[23]</sup> Dies erfordert eine Umstrukturierung des vorhandenen Bildungssystems.<sup>[27]</sup> In erster Linie bedeutet dies, barrierefreies Lernen zu ermöglichen, indem der Unterricht an die Bedürfnisse der Schüler angepasst wird und so Lernbarrieren abgebaut werden. Neben der Schaffung geeigneter Lernsituationen, von denen alle Schüler profitieren können, erfordert ein inklusives Schulsystem auch die Bereitstellung von geeigneten Lernmaterialien, die den Anforderungen aller Schüler gerecht werden und ein chancengleiches Lernen ermöglichen.<sup>[23]</sup> Dennoch beschränkt sich Inklusion nicht nur auf den Unterricht und das Unterrichtsgeschehen, sondern muss sich über die Schule hinweg als moralische Auffassung der Gesellschaft ausbreiten.<sup>[28]</sup> Die Inklusion steht daher für das Ziel, allen Menschen die gleichen Chancen im Leben zu ermöglichen.

## 4.2 Gestaltung des Unterrichts für blinde und sehbehinderte Schüler

Als sehgeschädigt gelten in Deutschland Personen, deren Sehschärfe und Gesichtsfeld in einem bestimmten Maße eingeschränkt sind. Es existieren drei Gruppen, die je nach Größe der Einschränkung als *sehbehindert*, *stark sehbehindert* oder *blind* bezeichnet werden.<sup>[9]</sup> Die Einschränkungen betreffen jedoch nicht nur Gesichtsfeld und Sehschärfe, sondern auch Farbwahrnehmung, Kontrastsehen und Stereosehen.<sup>[9]</sup> Eine Sehbehinderung kann daher von Fall zu Fall äußerst unterschiedliche Einschränkungen mit sich bringen, pädagogische Interventionen müssen daher stets an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden.

Blinde und sehbehinderte Schüler stellen eine besondere Randgruppe im inklusiven Unterricht dar, da sie auf Grund ihrer visuellen Einschränkung besondere Anforderungen an eine barrierefreie Teilnahme am Unterricht stellen.<sup>[7]</sup> Dies bezieht sich einerseits auf Unterrichtsziele und -inhalte sowie Unterrichtsmethoden, andererseits aber auch auf Unterrichtsmedien, die im Fokus dieser Arbeit stehen.<sup>[9]</sup> Das mediale Unterrichtsgeschehen läuft vor allem auf einer visuellen Ebene ab<sup>[7]</sup>: Schulbücher, Arbeitsblätter, Bilder, Karten, Tafel, Smartboards und vergleichbare eingesetzte Medien sind nur visuell einsetzbar. Eine Teilnahme am Unterricht wird daher für blinde und sehbehinderte Schüler deutlich erschwert oder gar verhindert. Im Zuge inklusiven Unterrichts muss daher dafür gesorgt werden, eine Partizipation blinder und sehbehinderter Schüler durch einen Abbau dieser Barrieren zu ermöglichen. Im Bezug auf das Lesen lässt sich dies durch den Einsatz von in Braille-Schrift verfassten Texten und Schulbüchern realisieren.<sup>[7]</sup> Diese Schrift ist taktil erfahrbar und kann von blinden und sehbehinderten Schülern gelesen werden. Probleme bereiten jedoch Abbildungen, da sie in speziellen Druckmethoden angefertigt werden müssen und je nach Größe und Komplexität nur schwer zu erfassen sind. Schulbücher mit vielen Abbildungen und Textkästen stellen also schon vom Aufbau her erheblich größere Anforderungen an blinde und sehbehinderte Schüler.<sup>[7]</sup> Für sehbehinderte Schüler mit einem gewissen Sehrest können auch stark vergrößerte Texte in Schwarzschrift verwendet werden, doch auch hier treten Probleme bei Abbildungen auf, die durch zu starke Vergrößerung unscharf und damit für sehbehinderte Schüler unleserlich werden.<sup>[7]</sup> Als technisches Hilfsmittel empfiehlt sich der Einsatz von Laptops mit Braille-Zeile. Diese ermöglichen eine bessere und auf die Bedürfnisse des jeweiligen Schülers angepasste Vergrößerung, sowie ein Lesen von Texten in der Braille-Schrift. Darüber hinaus können Tafelanschriften mit Hilfe einer

Tafelbildkamera oder der Verwendung von interaktiven Smartboards besser verfolgt werden.<sup>[7]</sup> Für blinde Schüler müssen Abbildungen dennoch speziell angefertigt werden, da sie nicht über die Braille-Zeile darstellbar sind.<sup>[7]</sup> Das Design der Unterrichtsmaterialien muss für eine erfolgreiche Inklusion blinder und sehbehinderter Schüler auf deren Ansprüche ausgerichtet sein und sollte sich an einem „Universal Design“<sup>[9]</sup> orientieren, das eine Verwendung von Unterrichtsmaterialien sowohl durch blinde und sehbehinderte Schüler als auch durch nicht beeinträchtigte Schüler ermöglicht.

#### ***4.3 Unterricht im Fach Chemie mit blinden und sehbehinderten Schülern***

Das Fach Chemie stützt sich auf eine Vielfalt an Darstellungsformen, mit denen die Inhalte und Konzepte repräsentiert und vermittelt werden können. Diese sind vor allem für das Teilgebiet der organischen Chemie elementar<sup>[10,11]</sup> und können als die „Sprache der Chemie“ beschrieben werden.<sup>[16]</sup> Sie verwenden eigene Symbole und Formeln und dienen vor allem der Beschreibung und Interpretation im Experiment erhaltener Ergebnisse sowie der Einführung von Theorien. Für das Verständnis der Chemie sind sie deswegen unerlässlich, daher ist eine Transformation dieser Darstellungen in für blinde und sehbehinderte Schüler lesbare Versionen notwendig.<sup>[10]</sup> Es existiert eine von der Braille-Schrift ausgehende Chemieschrift (Abb. 20), mit der es möglich ist, Berechnungen, Moleküle und Reaktionsgleichungen in einer von blinden und sehbehinderten Schülern erfahrbaren Art darzustellen.<sup>[8]</sup>

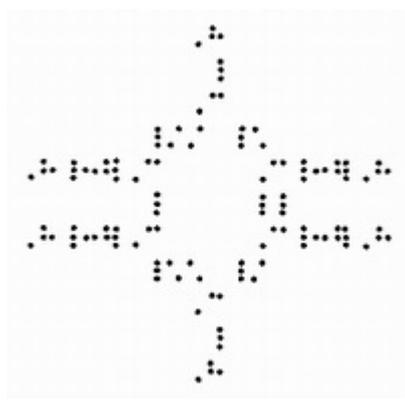


Abbildung 20: Darstellung von Benzol in der Chemieschrift.<sup>[8]</sup>

Allerdings lassen sich exakte Darstellungen von Reaktionsgleichungen mit Elektronenübertragungen nicht hinreichend gut abbilden, weswegen hierfür taktile Abbildungen benötigt werden (Abb. 21).<sup>[11]</sup> Diese ermöglichen die Darstellung von Molekülen und Reaktionsmechanismen, die den Zeichnungen auf Papier sehr ähnlich sind. So lassen sich auch einzelne Reaktionspfeile sowie Elektronenübertragungen abbilden. Sie ermöglichen darüber hinaus eine bessere Vorstellung der Moleküle und dadurch auch ein besseres Verstehen der Inhalte.<sup>[10]</sup>

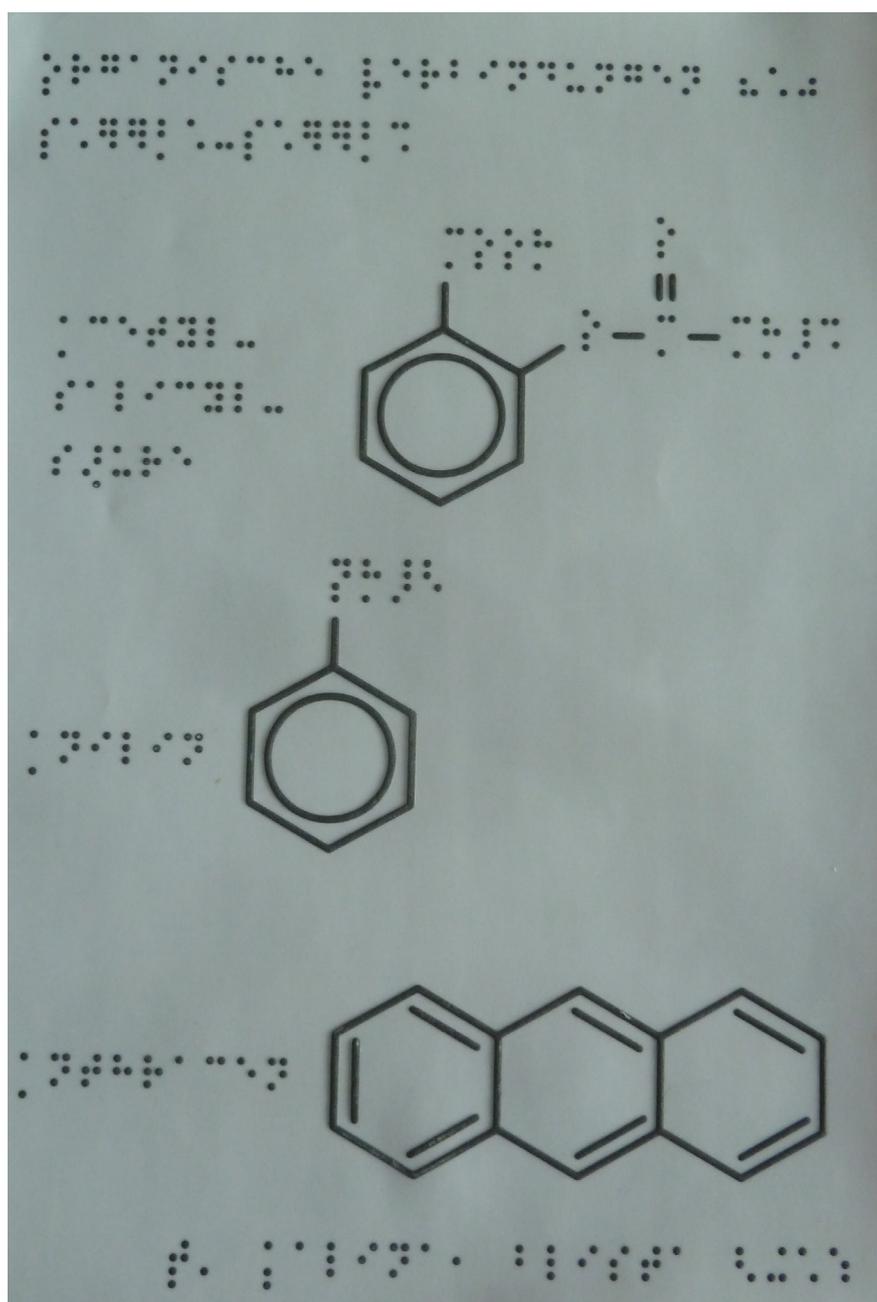


Abbildung 21: Taktile Darstellung verschiedener organischer Moleküle.

Problematisch sind bei diesem System jedoch größere und komplexere Strukturen, wie zum Beispiel mesomere Grenzformeln, da sie für blinde und sehbehinderte Schüler unübersichtlich werden können, vor allem wenn sie viele Informationen enthalten.<sup>[8,11]</sup> Dreidimensionale Zeichnungen, wie sie vor allem bei der Betrachtung von sterischer Anordnung im Raum verwendet werden, lassen sich ebenfalls nicht in der Chemieschrift darstellen.<sup>[8]</sup> Sie müssen daher auch als taktile Zeichnung angefertigt werden und stellen darüber hinaus erhöhte Anforderungen an das dreidimensionale Vorstellungsvermögen blinder und sehbehinderter Schüler.<sup>[10]</sup> Die Chemieschrift und taktile Zeichnungen erlauben eine in großen Teilen zu konventionellen Darstellungen äquivalente Bearbeitung von Aufgaben. Dennoch können komplexere Darstellungen eine Herausforderung für blinde und sehbehinderte Schüler darstellen, die sich in einer längeren Bearbeitungszeit bis hin zu einem nicht möglichen Verständnis auswirken können.<sup>[10,11]</sup> Diese Probleme können mitunter so schwerwiegend sein, dass eine erfolgreiche Teilnahme am Chemieunterricht für blinde und sehbehinderte Schüler nicht mehr möglich ist. Komplexere Abbildungen stellen auch für sehende Schüler mitunter ein Problem dar.<sup>[11]</sup>

Eine Möglichkeit diese Problemfaktoren zu verringern, besteht in dem Einsatz von Kugel-Stab-Modellen aus Molekülbaukästen. Diese ermöglichen die Transformation von zweidimensionalen Lewis-Strukturen in eine dreidimensionale Darstellung und werden auch im Unterricht mit nicht beeinträchtigten Schülern eingesetzt, um ein besseres Verständnis von Molekülstrukturen zu erreichen. Mit den Kugel-Stab-Modellen lassen sich besonders gut Molekülstrukturen erfassen, wobei die verschiedenen Atome meist durch farbige Codierungen voneinander unterschieden werden können. Daneben existieren bei einigen Baukästen auch teilweise unterschiedliche Größen der Atome. Für blinde und sehbehinderte Schüler stellt die farbige Codierung jedoch ein Problem dar, da Farben kaum oder gar nicht erkannt werden können und eine Unterscheidung der Atome durch die Größe nicht immer möglich ist. Darüber hinaus ist das Erstellen komplexer Moleküle deutlich zeitaufwändiger als die Anfertigung einer zweidimensionalen Zeichnung, weswegen im Unterricht aus Zeitgründen nicht immer auf den Molekülbaukasten zurückgegriffen werden kann. Obwohl die mit Molekülbaukästen erstellten Kugel-Stab-Modelle gerade im Hinblick auf die Erfassung von Molekülstrukturen gute Hilfsmittel sind,<sup>[10]</sup> können zusätzliche Informationen wie Teilladungen, Ladungen und die Elektronenstruktur der Atome nicht dargestellt werden. Auch Elektronenbewegungen, wie sie zur Beschreibung mesomerer Systeme

benötigt werden, lassen sich nicht mit den Kugel-Stab-Modellen darstellen, weswegen hierfür wiederum auf die zweidimensionale Abbildung zurückgegriffen werden muss. Zur Beschreibung mesomerer Systeme lassen sich nur die einzelnen Grenzstrukturen erstellen, was jedoch viel Zeit benötigt.

Neben dem Einsatz von Kugel-Stab-Modellen können auch Magnetlegetafeln (Abb. 22) eingesetzt werden, die Molekülzeichnungen in der Lewis-Schreibweise auf ein von blinden und sehbehinderten Schülern erfahrbares Medium transferieren.<sup>[11]5</sup> Diese bestehen aus Magneten in verschiedenen Formen und Größen mit unterschiedlichen Oberflächen, die die verschiedenen Elemente darstellen. Darüber hinaus existieren Magnetstäbe, die Elektronenpaare darstellen und sowohl als Bindungselektronen als auch als freie Elektronenpaare eingesetzt werden können. Mit den Magneten lassen sich sämtliche Moleküle sowie deren Elektronenstruktur, polare Bindungen, Teilladungen, Ladungen und Elektronenbewegungen in einer von blinden und sehbehinderten Schülern erfahrbaren Form darstellen. Allerdings ist auch hier der Aufbau komplexerer Moleküle beziehungsweise vollständiger Reaktionsmechanismen zeitaufwändiger als die Anfertigung einer Zeichnung, und es kann wie schon bei den Kugel-Stab-Modellen zu Problemen bei der Übersicht kommen.<sup>[11]</sup>

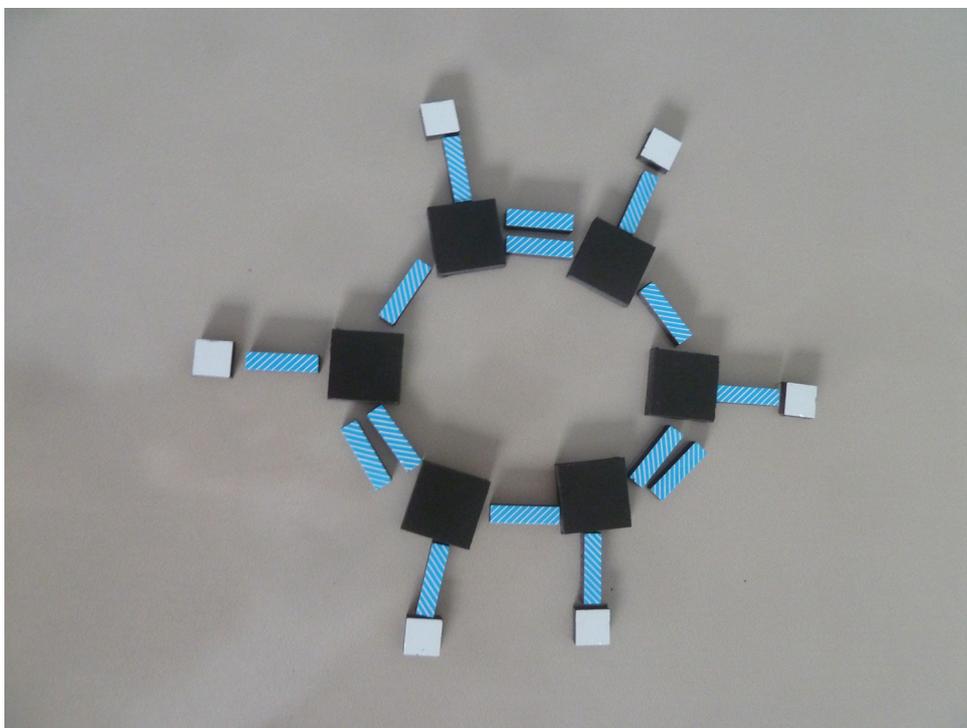


Abbildung 22: Mit Hilfe des Magnetlegekastens erstellte Darstellung eines Benzol-Moleküls.

5 [11] bezieht sich hier auf Filztafeln, diese funktionieren jedoch in der gleichen Weise wie die an der Blista verwendeten Magnetlegetafeln.

Der Vorteil gegenüber den Kugel-Stab-Modellen besteht vor allem in der geringeren Zeit, in der Strukturen aufgebaut werden können, und in deren höherem Aussagegehalt über Elektronenverteilungen. Allerdings sind die Anforderung an ein dreidimensionales Denken im Vergleich zu Kugel-Stab-Modellen erhöht. Darüber hinaus gestaltet sich die Bewegung von Elektronenpaaren bei der Erstellung mesomerer Grenzformeln mitunter als etwas schwierig, da die Zielorte der Elektronen von blinden und sehbehinderten Schülern nicht immer sicher bestimmt werden können und durch eine falsche Bewegung der Elektronen Unübersichtlichkeit entstehen kann.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass bereits eine große Vielfalt an einsetzbaren Lernmaterialien für den Chemieunterricht mit blinden und sehbehinderten Schülern existiert. Es besteht jedoch eine Lücke im Bezug auf komplizierte Inhalte der organischen Chemie, wie zum Beispiel die Vermittlung des Mesomerie-Konzepts. Die Theorie der Mesomerie wird vor allem durch den Einsatz zweidimensionaler Grenzformeln besprochen, die von blinden und sehbehinderten Schülern nur schwer erfahrbar sind und dadurch deren Teilnahme am Chemieunterricht in der Oberstufe behindert und die Teilnahme am Zentralabitur unmöglich gemacht. Daher sollen im Rahmen dieser Arbeit Mesomeriemodelle entwickelt werden, die von blinden und sehbehinderten Schülern erfahrbar sind und ihnen dadurch eine möglichst uneingeschränkte Teilnahme am Chemieunterricht in der Oberstufe ermöglichen.

## 5. Schlussfolgerungen für den Aufbau eines Mesomeriemodells

Im Mittelpunkt der blinden- und sehbehindertenspezifischen Didaktik steht unter anderem die Schaffung angemessener Unterrichtsmedien.<sup>[9]</sup> Dies betrifft einerseits die schulischen Anforderungen an die Ermöglichung geeigneter Lernsituationen mit guter Verständlichkeit, andererseits jedoch auch die Erfahrbarkeit des Modells durch blinde und sehbehinderte Schüler. Die Anforderungen an ein im inklusiven Unterricht mit blinden und sehbehinderten Schülern einsetzbares Mesomeriemodell sind daher äußerst vielfältig.

Der Einsatz taktiler Modelle ermöglicht ein besseres Verständnis der vermittelten Inhalte durch eine bessere Visualisierung. Dies trifft vor allem dann zu, wenn die Modelle dreidimensional aufgebaut sind und von den Schülern manipuliert werden können.<sup>[10]</sup> Hierdurch wird den Schülern ermöglicht, Verbindungen zwischen den zweidimensionalen schriftlichen und taktilen Darstellungen sowie den dreidimensionalen Strukturen der betrachteten Moleküle herzustellen und durch deren Verknüpfung eine bessere Vorstellung der Inhalte zu erlangen.<sup>[10]</sup> Dies trifft nicht nur auf blinde und sehbehinderte Schüler zu, sondern auch auf nicht beeinträchtigte Schüler.<sup>[10]</sup> Auf Grund der so erreichbaren besseren Verständlichkeit sollen die Modelle dreidimensional aufgebaut werden. Hierbei bietet sich eine Anlehnung an Kugel-Stab-Modelle aus Modellbaukästen an, da diese bereits im Chemieunterricht eingesetzt werden und deren Darstellung von Inhalten als bekannt vorausgesetzt werden kann. Weiter lassen sich die unterschiedlichen Atome durch die verschiedene Größe der sie symbolisierenden Kugeln gut von blinden und sehbehinderten Schülern ertasten. Dies ermöglicht ein intuitives Verstehen der Modelle und erleichtert dadurch deren Benutzung.

Verständnisprobleme bereiten blinden und sehbehinderten Schülern vor allem sehr detailreiche Modelle, deren Ziel es ist, möglichst viele Sachverhalte darzustellen. Diese Vielfalt führt meist zu Verwirrung, die ein Verstehen der Inhalte verhindern kann.<sup>[7,10,11]</sup> Das Mesomeriemodell sollte daher auf die Vermittlung möglichst weniger Sachverhalte reduziert werden. Zum Verständnis mesomerer Systeme ist vor allem die Kenntnis der Elektronenstruktur der betrachteten Systeme wichtig. Diese lässt sich für Sehende gut verständlich durch den Einsatz mesomerer Grenzformeln in Lewis-Schreibweise beschreiben. Da die Lewis-Schreibweise bereits aus dem vorhergehenden Unterricht bekannt ist,<sup>[6]</sup> basiert die Darstellung auf bereits bekanntem Wissen, was für eine intuitive Anwendbarkeit der Modelle sorgt. Darüber hinaus erlaubt die Betrachtung von

Grenzformeln wichtige Schlussfolgerungen im Bezug auf die Eigenschaften mesomerer Systeme.<sup>[4]</sup> Die Abbildung mesomerer Grenzformeln auf der Basis der Lewis-Schreibweise soll daher die Grundlage des Modells sein. Das Ziel der Modelle besteht darin, Lewis-Formeln „vom Blatt in den Raum“ zu konvertieren. Damit verbunden ist die Anforderung an ein einfaches Erstellen der Grenzformeln ohne zeitlich anspruchsvolle Umbauprozesse. Dies lässt sich durch bewegliche  $\pi$ -Bindungen erreichen, über deren Verschiebung im Molekül die einzelnen Grenzformeln erstellt werden können. Im Zuge der bereits angesprochenen Reduktion der vermittelten Inhalte bietet sich ein bis auf die  $\pi$ -Bindungen starres Grundmodell an, das eine Fokussierung auf die Elektronenbewegung zulässt. Das Grundmodell kann sich daher an den starren Kugel-Stab-Modellen orientieren, um so einerseits auf bekanntes Wissen zurückzugreifen und andererseits den Fokus primär auf die beweglichen Elektronenpaare zu richten.

Fachlich sollen sich die Modelle vor allem auf die Darstellung des Benzols und dessen Derivate beziehen, da das Thema Mesomerie im Schulkontext vor allem an diesen behandelt wird.<sup>[6]</sup> Im Vergleich zu Carbonsäuren, die im Kerncurriculum ebenfalls im Hinblick auf mesomere Systeme vorgesehen sind, ermöglicht die Behandlung des Benzols und der Benzolderivate eine Betrachtung größerer mesomerer Systeme und deren Einfluss auf den Ablauf von Reaktionen. Die Betrachtung der Mesomerie anhand von Benzol und dessen Derivaten ist deshalb aussagekräftiger als die Betrachtung von Carbonsäuren. Die Modelle sollen sich daher auf die Darstellung von Benzol und dessen Derivaten beschränken.

Die Modelle werden auf Grund der herausgestellten Anforderungen als starre, dreidimensionale Kugel-Stab-Modelle mit manipulierbaren  $\pi$ -Bindungen konzipiert, die ein Erstellen mesomerer Grenzformeln in kurzer Zeit erlauben. Durch ihren Aufbau sollen sie von blinden und sehbehinderten Schülern erfahrbar sein und das Konzept der Mesomerie basierend auf Benzol und dessen Derivaten repräsentieren.

## 6. Die Modelle – Konzeption, Aufbau, Funktion und Diskussion

### 6.1 Konzeption der Modelle

Die Modelle sollen als dreidimensionale starre Modelle mit bewegbaren  $\pi$ -Bindungen aufgebaut sein. Ziel der Modelle ist es, die Delokalisation von  $\pi$ -Bindungen durch die Darstellung von Grenzformeln zu erklären. Um eine Verwirrung blinder und sehbehinderter Schüler durch eine Vielzahl vermittelter Inhalte zu verhindern,<sup>[10,11]</sup> werden die Modelle auf die Darstellung der  $\pi$ -Elektronenverschiebung reduziert. Sie ermöglichen darüber hinaus eine direkte Konversion von zweidimensionalen Lewis-Formeln in eine dreidimensionale Form.

Der starre Grundkörper aus Atomen und  $\sigma$ -Bindungen lässt sich durch einen an den Kugel-Stab-Modellen orientierten Aufbau realisieren. Die Atome sollen ebenso wie bei den Kugel-Stab-Modellen durch Kugeln und die Bindungselektronen durch Stäbe symbolisiert werden. Dabei soll der Grundkörper aus Atomen und  $\sigma$ -Bindungen fest miteinander verbunden sein und nur eine Bewegung der  $\pi$ -Elektronen zulassen. Die Schwierigkeit in der Konzeption besteht darin, eine vollständige Bewegung der  $\pi$ -Elektronen zu ermöglichen, ohne dass diese an einer Stelle fest mit dem Grundkörper des Modells verbunden sind. Die hier präferierte Lösung dieses Problems besteht im Einsatz von magnetischen Stäben als  $\pi$ -Bindungen. Diese bestehen aus einem Stahlstab, an dessen Enden je ein kurzer Magnet sitzt. Durch kurze Stahlstäbe in den Atomkugeln, die als Anker für die Magneten dienen, können die  $\pi$ -Bindungen durch die magnetische Anziehung zwischen den Atomen haften bleiben, aber auch wieder gelöst werden. Anker besitzen nur Atome, die  $sp^2$ -hybridisiert sind und über leere oder halb-besetzte p-Orbitale verfügen. Eine Bewegung der  $\pi$ -Bindungen ist deshalb nur zwischen nebeneinander liegenden Atomen mit Anker möglich, eine Bewegung über Atome ohne Anker ist dagegen jedoch nicht möglich. Um die Modelle taktil erfahrbar zu machen, werden voneinander unterscheidbare Kugeln und Bindungen eingesetzt. Dies ermöglicht eine Benutzung der Modelle von blinden und sehbehinderten Schülern.

## 6.2 Aufbau der Modelle

Wie bereits beschrieben, sind die Modelle an den Aufbau der Kugel-Stab-Modelle angelehnt. Die Atome werden im Mesomeriemodell ebenfalls durch Kugeln symbolisiert, die zur besseren Unterscheidung eine unterschiedliche Größen besitzen. Die Kugeln werden durch Stäbe, welche die Bindungselektronen darstellen, miteinander verbunden. Dafür besitzen die Kugeln Bohrungen, in die die Stäbe gesteckt werden. Als Werkstoff für die Kugeln wird Holz gewählt, da Holzkugeln sowohl ohne als auch mit Bohrung preisgünstig und gut erhältlich sind (zum Beispiel unter: <http://www.csb-center.de/Holzkugeln-durchbohrt-0-6-80-mm-Holz-Kugeln-Perlen>) und sich leicht bearbeiten lassen. Dies ermöglicht eine einfache Herstellung der Modelle und einen schnellen und kostengünstigen Ersatz beim Verlust eines Teils des Modells. Möglich sind auch Kugeln aus Plastik, die hier jedoch wegen einer schlechteren Verfügbarkeit ausgeschlossen wurden. Es existieren drei verschiedene Kugelgrößen, die Wasserstoff-Atome, Kohlenstoff-Atome und Halogen-Atome symbolisieren (Abb. 23). Für Wasserstoff-Atome werden durchbohrte Holzkugeln des Durchmessers 10 mm verwendet. Die Bohrung besitzt einen Durchmesser von 3 mm. Für Halogen-Atome werden hingegen nicht-durchbohrte Kugeln des Durchmessers 25 mm verwendet. An diesen Kugeln wird eine 10 mm tiefe und 3 mm durchmessende Bohrung angebracht. Diese Bohrungen können leicht mit einer Standbohrmaschine durchgeführt werden und erfordern kein spezielles handwerkliches Können. Für Kohlenstoff-Atome werden Kugeln mit einem Durchmesser von 20 mm verwendet, die bereits mit 4 mm Durchmesser durchbohrt sind. Aus diesen Kugeln werden zwei verschiedene Arten von Kohlenstoff-Atomen hergestellt: planar substituierte Kohlenstoff-Atome und tetraedrisch substituierte Kohlenstoff-Atome (Abb. 25).



Abbildung 23: Von links nach rechts: Halogen ( $d = 25$  mm), Kohlenstoff ( $d = 20$  mm), Wasserstoff ( $d = 10$  mm).

Für „planare“ Kohlenstoff-Atome werden jeweils drei Bohrungen des Durchmessers 3 mm im Winkelabstand von  $120^\circ$  ausgeführt. Diese Bohrungen müssen auf den Mittelpunkt der Kugel ausgerichtet sein und in einer Ebene im rechten Winkel zur vorhandenen Bohrung der Kugel liegen. Die Tiefe der Bohrungen beträgt 10 mm. Zur Anfertigung dieser Bohrungen werden spezielle Werkzeuge benötigt, die eine exakte Platzierung erlauben. Dies ist für die Passgenauigkeit und damit die Funktion der Modelle essentiell. Sämtliche Bohrungen für Kohlenstoff-Atome wurden deshalb von der Feinmechanischen Werkstatt des Fachbereichs Chemie der Philipps-Universität Marburg durchgeführt. Hierfür wurde eine spezielle Standbohrmaschine eingesetzt, die eine Einstellung des gewünschten Abstandes der Bohrungen zueinander ermöglicht. In die Bohrung des Durchmessers 4 mm wird ein 25 mm langer Stahlstab des Durchmessers 4 mm gesteckt (Abb. 24). Dieser stellt den „Anker“ für die  $\pi$ -Bindungen dar und ist deshalb aus magnetischem Stahl gefertigt.



Abbildung 24: Kugel mit eingesetztem Anker.

Für „tetraedrische“ Kohlenstoff-Atome werden drei Bohrungen im Winkel von  $109,5^\circ$  zueinander und zu der bereits vorhandenen Bohrung gebohrt. Sie besitzen einen Durchmesser von 3 mm. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, ungebohrte Kugeln zu verwenden und alle vier Bohrungen in besagtem Abstand zu setzen. Dieser Ansatz wurde jedoch nicht verfolgt, da eine Orientierung an der schon vorhandenen Bohrung leichter durchführbar war. Ebenso werden für tetraedrische Kohlenstoff-Atome keine Anker verwendet. An der Stelle des Ankers existiert stattdessen eine vierte  $\sigma$ -Bindung.

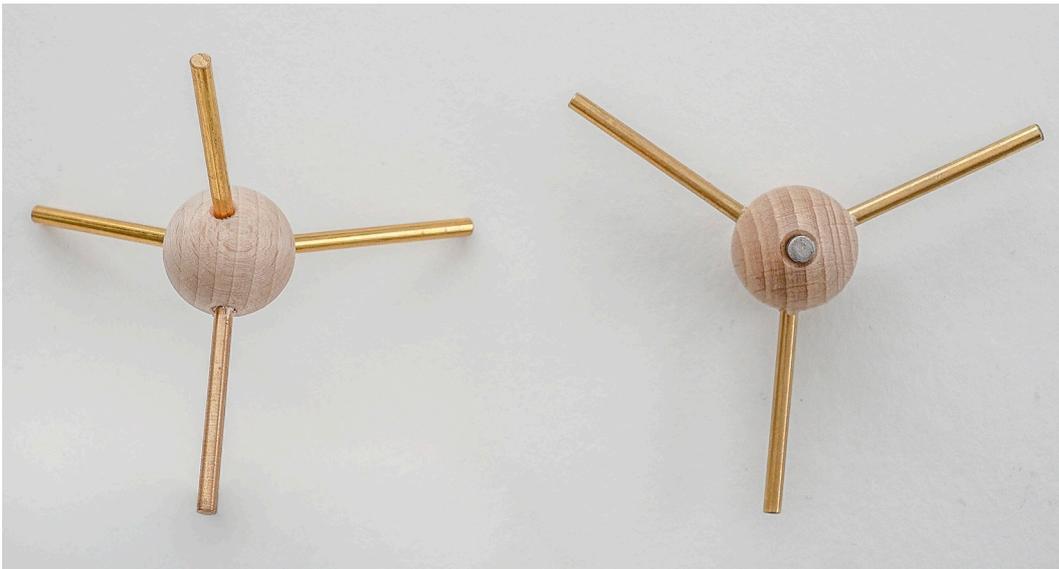


Abbildung 25: Tetraedrisches und planares Kohlenstoff-Atom.

Die  $\sigma$ -Bindungen werden durch 40 mm lange Messingstäbe mit 3 mm Durchmesser dargestellt (Abb. 26). Die verwendeten Metallstäbe sind in den verwendeten Größen im Baumarkt erhältlich. Die vierte  $\sigma$ -Bindung bei tetraedrischen Kohlenstoff-Atomen wird erstellt, indem ein 4 mm dicker und 52 mm langer Messingstab über 32 mm auf 3 mm Dicke abgedreht wird. Das 4 mm dicke Ende wird vollständig in die größere Bohrung gesetzt. Dadurch ragen alle Stäbe in gleicher Länge aus der Kugel. Messing wurde hier als Material gewählt, da es einerseits leicht zu bearbeiten ist, sich farblich von den  $\pi$ -Bindungen unterscheidet und vor allem amagnetisch ist. Die amagnetischen Eigenschaften sind vor allem für die Funktion der Modelle wichtig, da die magnetischen  $\pi$ -Bindungen so nur an den Ankern haften können und nicht auch von den  $\sigma$ -Bindungen angezogen werden. Dies ermöglicht eindeutige Positionen der  $\pi$ -Bindungen, die sich so nur zwischen planaren Kohlenstoff-Atomen aufhalten können. Auf den Einsatz von Edelstahl wurde hier wegen des hohen Preises und der schwierigeren Bearbeitbarkeit verzichtet.



Abbildung 26:  $\sigma$ -Bindung.

Für die  $\pi$ -Bindungen wurden 29,9 mm lange Stahlstäbe des Durchmessers 3 mm verwendet. Stahl bietet den Vorteil einer guten Verfügbarkeit in den angegebenen Maßen und ist magnetisch. An die Enden des Stabs werden je ein 5 mm langer Neodym-Magnet mit dem Durchmesser 3 mm gesetzt. Die Magnete lassen sich über <https://www.magnet-shop.net/neodym/stabmagnet/stabmagnet-3.0-x-5.0-mm-n42-nickel-haelt-350-g> beziehen. Dabei ist darauf zu achten, dass die nach außen zeigenden Enden der Magnete bei allen  $\pi$ -Bindungen die gleiche Polung aufweisen. So kann verhindert werden, dass sich die Magnete gegenseitig anziehen, was das Klappen der Bindungen erheblich erleichtert. Die so aufgebauten  $\pi$ -Bindungen werden anschließend mit schwarzem Schrumpfschlauch aus dem Baumarkt verkleidet (Abb. 27). So wird einerseits verhindert, dass sich die Magnete von den Stahlstäben lösen können und andererseits eine von den  $\sigma$ -Bindungen optisch und taktil unterscheidbare Oberfläche geschaffen. Dies ermöglicht eine einfache Unterscheidung der verschiedenen Bindungen für sehbehinderte und nicht-beeinträchtigte Schüler und trägt so maßgeblich zum intuitiven Verständnis der Modelle bei.

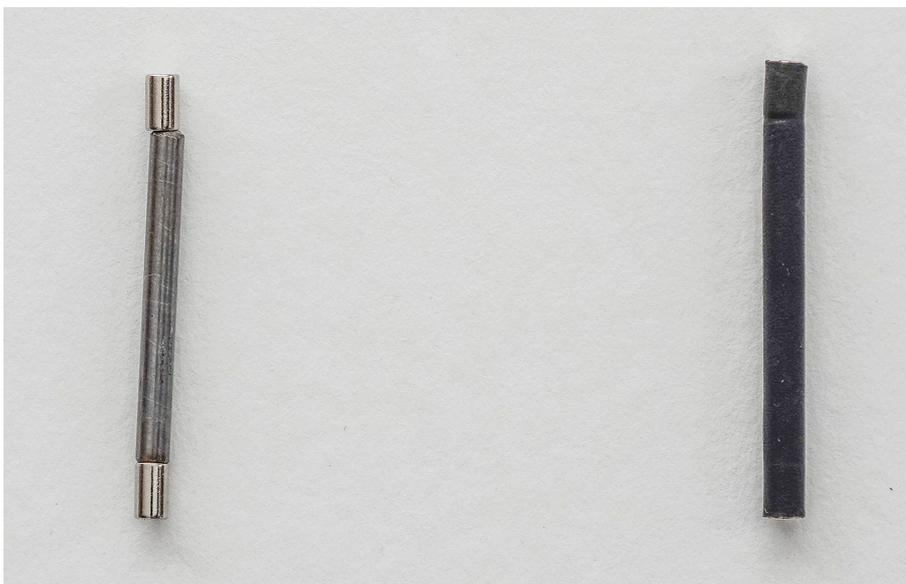


Abbildung 27:  $\pi$ -Bindung ohne und mit Schrumpfschlauch.

Kohlenstoff-Atome und  $\sigma$ -Bindungen lassen sich zu größeren Molekülen zusammenstecken. Dabei werden die Bindungsstäbe vollständig in die dafür vorgesehenen Löcher gesteckt. So lassen sich Ringsysteme und Ketten mit konjugierten  $\pi$ -Systemen erstellen. Durch den Einsatz von tetraedrischen Kohlenstoff-Atomen sind aber auch unterbrochene  $\pi$ -Systeme erstellbar. Die nicht mit Kohlenstoff-Atomen besetzten  $\sigma$ -Bindungen werden je nach Bedarf mit Wasserstoff-Atomen oder Halogen-Atomen

besetzt. Die  $\pi$ -Bindungen werden anschließend in den Grundkörper eingesetzt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Lücken zwischen der  $\pi$ -Bindung und den Ankern möglichst gering sind, sich die  $\pi$ -Bindungen aber noch leicht bewegen lassen. Dies kann durch ein geringfügiges Auseinanderziehen oder Zusammenschieben der Kugeln erreicht werden. Die Modelle lassen sich in dieser Ausführung noch unter gewissem Aufwand bewegen, sie können aber auch durch ein Festkleben der  $\sigma$ -Bindungen und Kugeln vollständig fixiert werden. Dies nimmt dann jedoch die Möglichkeit, die Modelle umzubauen und an den jeweiligen betrachteten Stoff anzugleichen. Die so fertiggestellten Modelle (Abb. 28) können nun eingesetzt werden.

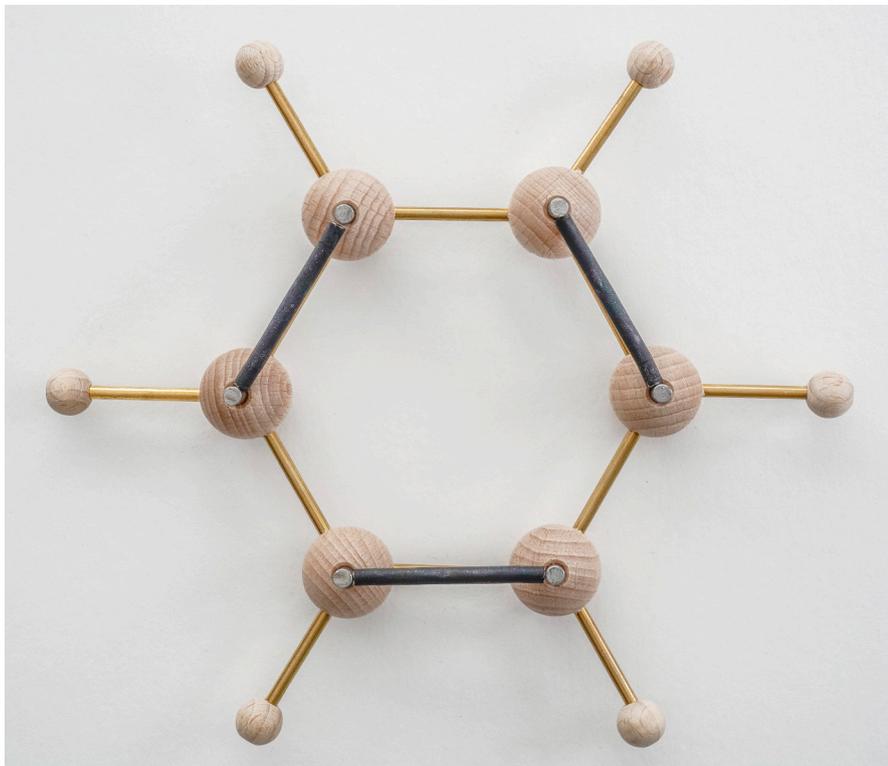
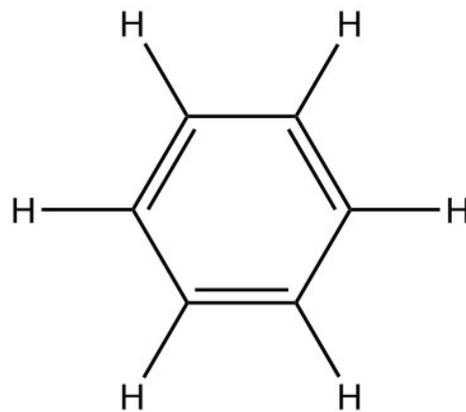


Abbildung 28: Aufgebautes Benzol-Modell.

### 6.3 Funktion der Modelle

Durch den Einsatz von taktil unterscheidbaren Bauteilen sind die Mesomeriemodelle von blinden und sehbehinderten Schülern erfahrbar. Die Manipulierbarkeit der Modelle beschränkt sich auf die Beweglichkeit der  $\pi$ -Bindungen. Diese lassen sich auf Grund der Oberfläche gut von den starren  $\sigma$ -Bindungen unterscheiden (Abb. 29).

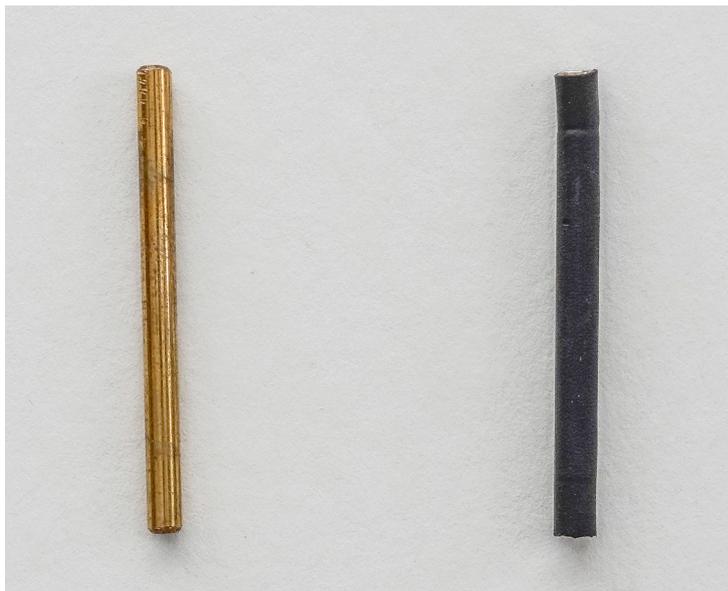


Abbildung 29:  $\sigma$ - und  $\pi$ -Bindung.

Durch den nicht-bewegbaren Grundkörper wird die Aufmerksamkeit der Schüler vollständig auf die  $\pi$ -Bindungen gelenkt. Diese sind durch magnetische Anziehungskräfte mit den Ankern der planaren Kohlenstoff-Atome verbunden. Sie lassen sich unter geringem Kraftaufwand von diesen lösen, indem mit einem Finger parallel zur Grundstruktur leichter Druck auf die  $\pi$ -Bindung ausgeübt wird. Dabei kann die Seite, an der die  $\pi$ -Bindung gelöst werden soll, durch Ausübung des Drucks an dieser Stelle bestimmt werden. Selbst bei einer Druckausübung in der Mitte der  $\pi$ -Bindung löst sich diese nur an einer, dann jedoch willkürlichen Seite. Um die  $\pi$ -Bindung vollständig von beiden Ankern zu lösen, muss diese fest angefasst und unter erhöhtem Kraftaufwand abgezogen werden. Ein solches vollständiges Lösen der  $\pi$ -Bindung kann daher nur vorsätzlich geschehen. Die an einer Seite gelöste  $\pi$ -Bindung lässt sich nun leicht um den runden Anker drehen. Wird das freie Ende der  $\pi$ -Bindung dabei in die Nähe eines weiteren Ankers bewegt, so verbindet sich dieses durch ein merkbares „Einrasten“ mit dem Anker. Ein wiederholtes Lösen ist nur unter erneutem Kraftaufwand möglich.

Das so durchgeführte Klappen entspricht dem in den Grenzformeln durch die Verwendung eines Pfeils angezeigten „Klappen“ von Bindungen. Elektronenbewegungen lassen sich daher leicht von der zweidimensionalen Darstellung auf das Modell übertragen und umgekehrt. Eine Bewegung der Bindungselektronen erfolgt im Vergleich zu den Lewis-Formeln jedoch real (Abb. 30), was ein besseres Verstehen dieses Prozesses sowohl bei sehenden als auch bei blinden und sehbehinderten Schülern ermöglichen kann.

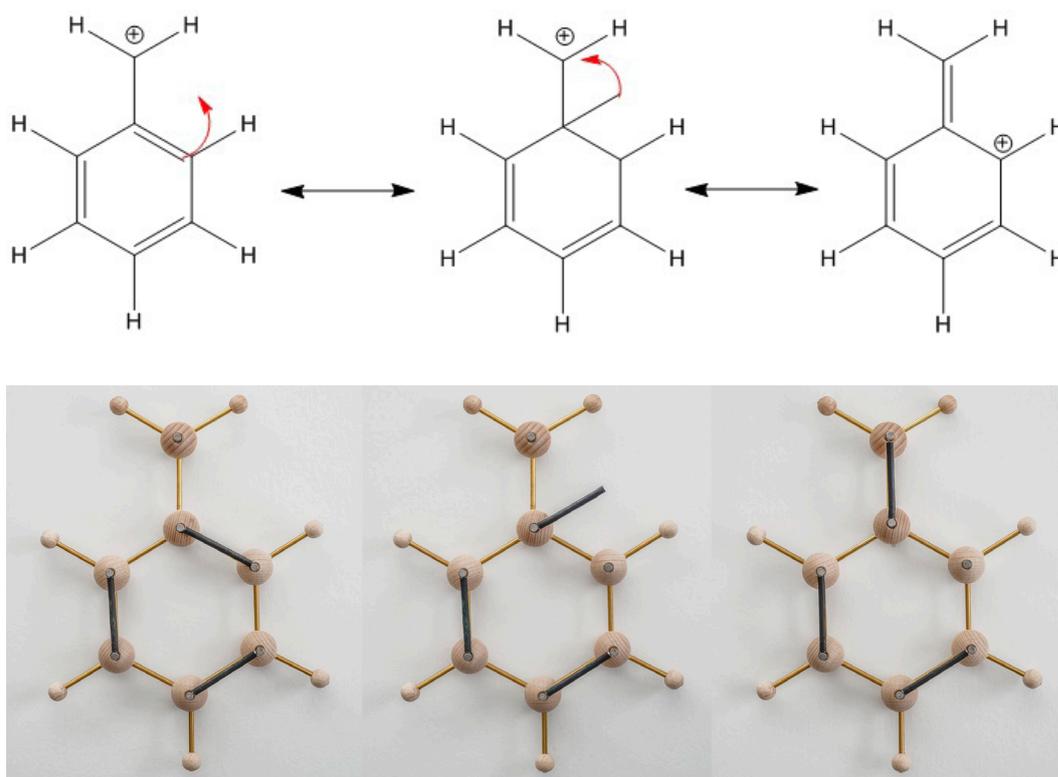


Abbildung 30: Vorgang des Klappens von Bindungen am Beispiel des Benzyl-Kations.

Da die Grundstruktur des Modells bis auf die Anker amagnetisch ist, können die  $\pi$ -Bindungen nicht mit dieser wechselwirken und so zu falschen Strukturen führen. Darüber hinaus wird ein gegenseitiges Anziehen der Magnete durch deren Ausrichtung und der daraus resultierenden gegenseitigen Abstoßung effektiv unterbunden. Es bleibt die Möglichkeit, dass die Magnete einer  $\pi$ -Bindung den Stahlkern der anderen  $\pi$ -Bindung anziehen. Dies geschieht auf Grund der räumlichen Situation jedoch nur, wenn zwei Bindungen gleichzeitig bewegt werden. Um dies zu vermeiden, sollte stets nur eine  $\pi$ -Bindung bewegt werden. Das Einrasten einer  $\pi$ -Bindung zwischen zwei Ankern ermöglicht daher einen fühlbaren Nachweis, dass sich die bewegten Elektro-

nen erneut zwischen zwei Atomen befinden und so eine  $\pi$ -Bindung darstellen. Dies verhindert darüber hinaus eine falsche Anordnung der Bindungen im Molekül sowie aus dem Molekül ragende Bindungen, da eine Bewegung von Elektronen immer mit dem Einrasten endet. Am Ende einer Elektronenbewegung muss immer die Kontrolle der Oktett-Regel der beteiligten Atome stehen, da es möglich ist, dass ein Kohlenstoff-Atom im Modell zwei  $\pi$ -Bindungen trägt (Abb. 31). Dies lässt sich leider nicht durch die gleiche Polung der Magneten unterbinden, da der Anker eine Abstoßung von Magneten mit gleicher Polung verhindert und so zulässt, dass zwei  $\pi$ -Bindungen an ihm haften können. Die Kontrolle der durch die Oktett-Regel für jedes Kohlenstoff-Atom vorgegebenen maximalen Vierbindigkeit kann daher falsche Strukturen aufzeigen.<sup>[20]</sup> Diese müssen dann durch weitere Elektronenbewegungen in eine korrekte Struktur umgewandelt werden.

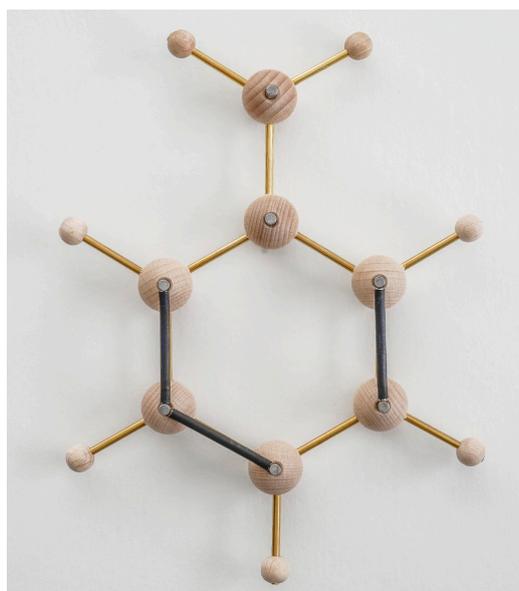
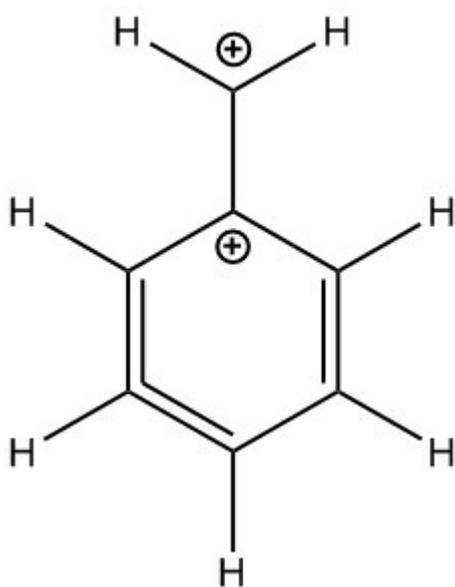


Abbildung 31: Falsche Struktur mit fünfbindigem Kohlenstoff-Atom.

Es ist jedoch auch möglich, durch bestimmte Klappvorgänge dreibindige Kohlenstoff-Atome entstehen zu lassen. Besitzt ein Kohlenstoff-Atom nur drei Bindungspartner, so trägt es eine positive Ladung. Dies ist im Modell immer dann der Fall, wenn ein Anker keine  $\pi$ -Bindung trägt. Um eine Ladung an einem Atom festzustellen, ist die Kontrolle der Anzahl der mit den Bindungspartnern geteilten Bindungselektronen von Nöten. Der Nachweis einer Ladung erfolgt dann durch einen Vergleich der Anzahl der dem Atom zugesprochenen Elektronen zu den vorhandenen Außenelektronen nach

dem Periodensystem der Elemente.<sup>[12]</sup>

Ein Bruch von  $\sigma$ -Bindungen, wie er in der Lewis-Schreibweise leicht durchführbar ist,<sup>[20]</sup> kann bei den Modellen wegen des starren Grundkörpers nicht durchgeführt werden. Daher entfällt bei den Modellen auch eine Kontrolle solcher Bindungsbrüche. Die unterschiedlichen Grenzformeln, die zur Beschreibung mesomerer Systeme eingesetzt werden, lassen sich mit dem Modell durch einfache Elektronenbewegungen erstellen. Dazu werden die  $\pi$ -Elektronenpaare eines mesomeren Systems nach dem beschriebenen Mechanismus einzeln bewegt. Durch jede Bewegung eines  $\pi$ -Elektronenpaares wird bei Einhaltung der Oktett-Regel eine Grenzformel des mesomeren Systems erhalten. Die einzelnen Grenzformeln müssen nun voneinander unterschieden werden, um doppelte Grenzformeln auszuschließen. Sämtliche Grenzformeln sind gefunden, wenn sich keine weiteren unbekanntes Grenzformeln mehr erstellen lassen. Dieser Prozess entspricht der auf Lewis-Formeln basierenden Erstellung von Grenzformeln.

Mit den verschiedenen Atomkugeln lassen sich zwei unterschiedliche Arten von Molekülen bauen, planare und nicht-planare Moleküle. Die planaren Moleküle zeichnen sich durch die  $sp^2$ -Hybridisierung sämtlicher Kohlenstoff-Atome aus, die die planare Molekülstruktur ermöglicht. Durch die  $sp^2$ -Hybridisierung existiert an jedem Kohlenstoff-Atom ein p-Orbital, über das die  $\pi$ -Elektronen delokalisiert werden können. Im Modell können die Anker als Platzhalter für ein p-Orbital angesehen werden. Auf das Modell bezogen bedeutet dies, dass die  $\pi$ -Bindungen über alle im Molekül enthaltenen Kohlenstoff-Atome geklappt werden können, da alle Anker parallel zueinander stehen. Werden nun an Stelle von planaren Kohlenstoff-Atomen tetraedrische Kohlenstoff-Atome in das Modell eingebaut, so können die  $\pi$ -Bindungen nicht mehr über alle Kohlenstoff-Atome des Moleküls geklappt werden, da deren Anker nicht mehr parallel zueinander stehen. Darüber hinaus sitzt am tetraedrischen Kohlenstoff-Atom anstelle eines Ankers eine weitere  $\sigma$ -Bindung, die ein Klappen einer  $\pi$ -Bindung hin zum Atom unterbindet. Bei Molekülen mit mehreren Phenylringen, wie dem Chlor-triphenylmethan (Abb. 32), können die  $\pi$ -Elektronen der einzelnen Phenylringe nicht miteinander in Wechselwirkung treten, da das zentrale Kohlenstoff-Atom eine Verbindung der  $\pi$ -Elektronensysteme der einzelnen Ringe durch dessen tetraedrische Struktur und das Fehlen eines Ankers verhindert.

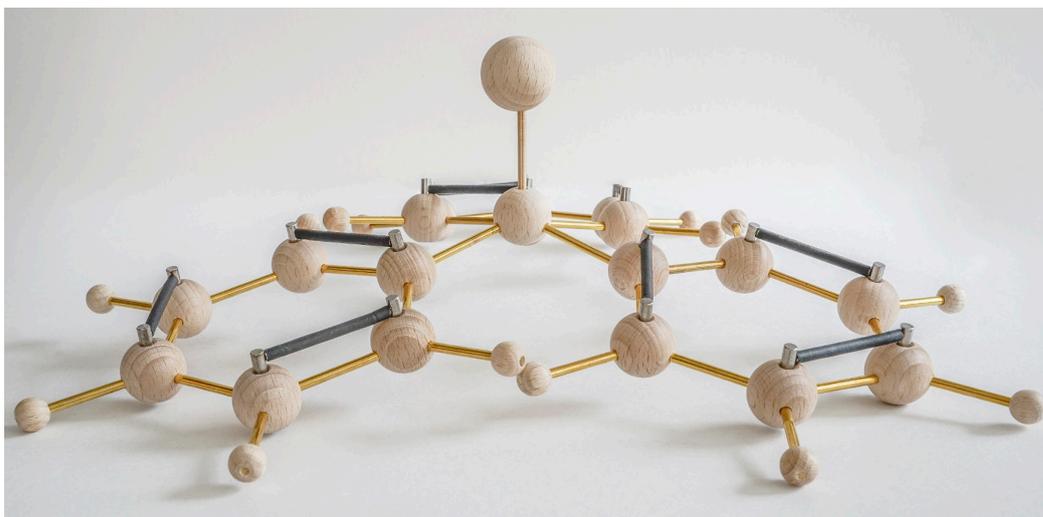


Abbildung 32: Chlortriphenylmethan mit tetraedrischem Kohlenstoff-Atom.

Eine Verbindung der  $\pi$ -Elektronensysteme der drei Phenylringe ist nur durch die Ablösung des Chlorids und die damit einhergehende Umhybridisierung des zentralen Kohlenstoff-Atoms in  $sp^2$  möglich (Abb. 33).<sup>[29]</sup> Dadurch erhält das zentrale Kohlenstoff-Atom eine planare Raumstruktur, aus der sich die parallele Anordnung aller p-Orbitale, respektive aller Anker ergibt. Nun können die  $\pi$ -Elektronensysteme aller Phenylringe miteinander in Wechselwirkung treten und das entstandene Carbenium-Ion deutlich stabilisieren.<sup>[29]</sup>

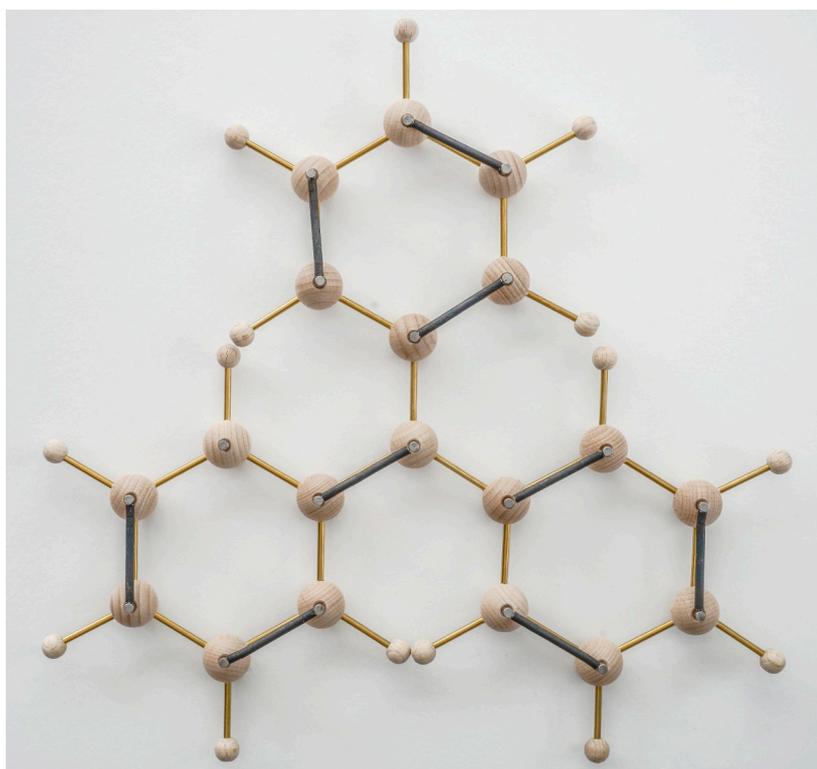


Abbildung 33: Triphenylmethyl-Kation mit vollständig planarer Struktur.

Eine solche Umhybridisierung eines Kohlenstoff-Atoms ist im Modell leider nur anhand eines Tausches des tetraedrischen Kohlenstoff-Atoms gegen ein planares Kohlenstoff-Atom möglich. Obwohl dieser Umbau Zeit in Anspruch nimmt und nicht intuitiv erfolgen kann, ermöglicht er ein Verstehen der Stabilität von Carbenium-Ionen mit Phenylsubstituenten. Diese können erst durch die Abspaltung einer Abgangsgruppe ein über das gesamte Molekül delokalisiertes  $\pi$ -Elektronensystem erreichen und so die Absenkung der Energie der entstehenden Carbenium-Ionen repräsentieren. Hierbei kann eine Vergrößerung des delokalisierten  $\pi$ -Systems als Faktor für gesteigerte Reaktivität des Eduktes und niedrigere Aktivität des Intermediats erkannt werden.<sup>[29]</sup> Neben dem Bestreben, ein möglichst großes delokalisiertes Elektronensystem zu generieren, lässt sich daher auch die Planarität als wichtige räumliche Eigenschaft mesomerer Systeme gut anhand der Modelle erkennen.

#### ***6.4 Diskussion der Modelle***

Die Intention der im Rahmen dieser Arbeit erstellten Modelle besteht darin, die sonst nur in visuell erfahrbaren zweidimensionalen Darstellungen behandelten mesomeren Systeme auch für blinde und sehbehinderte Schüler zugänglich zu machen. Dies ist nötig, da die herkömmlichen Darstellungsweisen mesomerer Systeme von blinden und sehbehinderten Schülern nur schlecht erfahren werden können oder diese äußerst komplex sind. Das Fehlen geeigneter Darstellungen kann zu Schwierigkeiten beim Verständnis der Mesomerie und des darauf aufbauenden Stoffes führen und so eine erfolgreiche Teilnahme am Chemieunterricht gefährden. Eine Benutzung der Modelle durch blinde und sehbehinderte Schüler ist vor allem an deren Ertastbarkeit gebunden. Diese wird durch den zuvor beschriebenen dreidimensionalen Aufbau der Modelle ermöglicht. Dadurch wird eine barrierefreie Teilnahme blinder und sehbehinderter Schüler am Chemieunterricht erreicht, wie sie im inklusiven Schulsystem gefordert wird.<sup>[25,7]</sup> Neben der Erfahrbarkeit durch blinde und sehbehinderte Schüler, die hier als wichtigste Errungenschaft der neuen Modelle anzusehen ist, ermöglichen die Modelle noch weitere Förderungen beim Verstehen mesomerer Systeme, die auf alle Schüler zutreffen.

Der Aufbau der Mesomeriemodelle als Abbildung von Lewis-Strukturen auf dreidimensionale Kugel-Stab-Modelle erlaubt die Nutzung der Vorteile beider Dar-

stellungsformen. Einerseits ermöglicht der dreidimensionale Aufbau eine bessere Übersichtlichkeit sowie die Betrachtung der Raumstrukturen von Molekülen, wie sie auch bei den Kugel-Stab-Modellen vorgenommen werden können. Andererseits erlaubt die Möglichkeit der Verschiebung von  $\pi$ -Elektronen ein zeitsparendes und übersichtliches Erstellen mesomerer Grenzformeln, wie es in der Lewis-Schreibweise möglich ist.

Kugel-Stab-Modelle sind bei der Betrachtung mesomerer Grenzformeln nachteilig, da jede einzelne Grenzformel neu aufgebaut werden muss. Dies stellt je nach Anzahl der zu erstellenden Grenzformeln einen zeitaufwändigen Prozess dar. Hierbei können sich vor allem für blinde und sehbehinderte Schüler Probleme ergeben, da diese die neuen Strukturen erst erkennen und mit den vorherigen vergleichen müssen. Das führt bei einer Vielzahl von zu vergleichenden Strukturen unweigerlich zu Unübersichtlichkeit und damit zu Verständnisproblemen. Darüber hinaus benötigen blinde und sehbehinderte Schüler für eine solche Betrachtung deutlich mehr Zeit als nicht-beeinträchtigte Schüler. Da die Mesomeriemodelle die Möglichkeit bieten, verschiedene mesomere Grenzformen eines Moleküls ohne einen zeitaufwändigen Umbau darzustellen, sind sie den Kugel-Stab-Modellen überlegen.

Der Einsatz von Lewis-Formeln zur Beschreibung mesomerer Grenzformeln kann auch im Unterricht mit blinden und sehbehinderten Schülern erfolgen, indem diese als taktile Druck oder in der Chemieschrift erstellt werden. Sie ermöglichen die Andeutung von Elektronenbewegungen durch Pfeile und sind im Vergleich zu Kugel-Stab-Modellen übersichtlicher aufgebaut. Dennoch können komplexere mesomere Systeme mit mehreren Grenzformeln ebenfalls Probleme bei der Übersichtlichkeit hervorrufen, da blinde und sehbehinderte Schüler wie bereits bei den Kugel-Stab-Modellen immer nur eine Struktur gleichzeitig ertasten können.<sup>[7]</sup> Darüber hinaus erlauben die Chemieschrift und der taktile Druck keine selbstständige Erstellung von Grenzformeln durch die Schüler, da diese in aufwändigen Verfahren hergestellt werden müssen.<sup>[11]</sup> Ebenso wird ein Nachvollziehen der Raumstrukturen der betrachteten Moleküle durch deren zweidimensionale Abbildung erschwert.<sup>[11]</sup>

Wie bereits beschrieben, können die erarbeiteten Mesomeriemodelle die Raumstruktur korrekt wiedergeben. Darüber hinaus können sie mesomere Systeme unter Verwendung von nur einer aufgebauten Grundstruktur beschreiben und verhindern so größere Probleme bei der Übersichtlichkeit, wie sie vor allem beim Einsatz der Kugel-Stab-Modelle und in abgeschwächter Form der Grenzformeln in Lewis-Schreibweise vorkommen. Die benötigten Grenzformeln lassen sich mit dem Mesomerie-

modell einfach selbstständig erstellen. Dies wird durch die Bewegung der Elektronen erreicht und erfordert daher keinen Umbau des Modells oder zusätzliche Aufbauten zur Darstellung. Hierin besteht ein großer Vorteil der neuen Mesomeriemodelle gegenüber dem taktilen Druck und der Chemieschrift. Weiter ermöglichen die Modelle eine visuell und taktil verfolgbare Bewegung der Elektronen durch das Klappen der  $\pi$ -Elektronenpaare. In der Lewis-Schreibweise kann dies nur durch Pfeile angedeutet werden. Die verfolgbare Elektronenbewegung hilft auch nicht-beeinträchtigten Schülern beim Nachvollziehen der mesomeren Grenzformeln, da der Prozess der Elektronenverschiebung erstmals „real“ erfahren werden kann. Darüber hinaus verhindert das Mesomeriemodell viele „falsche“ Elektronenbewegungen, indem es nur Bewegungen von  $\pi$ -Elektronen zulässt. So kann zum Beispiel eine Bewegung von  $\sigma$ -Bindungen mit einhergehendem Bindungsbruch im Mesomeriemodell ausgeschlossen werden, während dies in der Lewis-Schreibweise möglich ist. Eine solche Limitierung der Möglichkeiten übt korrekte Elektronenbewegungen ein und sorgt damit für eine intuitive Anwendbarkeit der Modelle. Zudem lenkt sie den Blick der Schüler auf die für mesomere Systeme wichtigen  $\pi$ -Elektronen. Dies wirkt sich wiederum erleichternd auf die Erstellung von mesomeren Grenzformeln in Lewis-Schreibweise aus. Desweiteren erleichtert sie blinden und sehbehinderten Schülern die Anwendung der Mesomeriemodelle durch die Verringerung von Fehlerquellen und die damit einhergehende Vereinfachung.

Eine Ausrichtung der Modelle an den Bedürfnissen blinder und sehbehinderter Schüler bringt zwar einige Einschränkungen bezüglich der vermittelbaren Inhalte und der Anwendung der Modelle mit sich, dies stellt im Bezug auf die ermöglichte bessere Einbindung blinder und sehbehinderter Schüler in den Chemieunterricht jedoch einen untergeordneten Faktor dar. Die Einschränkungen entstehen hauptsächlich durch die Reduktion der dargestellten Inhalte auf die Manipulation der  $\pi$ -Elektronen. Diese Reduktion ist nötig, um ein besseres Verstehen seitens blinder und sehbehinderter Schüler durch die erhöhte Übersichtlichkeit der Modelle zu ermöglichen. Darüber hinaus sorgt die starre Struktur des Grundkörpers dafür, dass die Modelle nur unter zeitlichem Aufwand umgebaut werden können. Sie schränkt damit eine Betrachtung verschiedener Strukturen in einem engen Zeitraum ein, wenn diese nicht zuvor aufgebaut wurden. Dies betrifft vor allem durch kurzfristige Schülerfragen notwendig gewordene Betrachtungen, die zum besseren Verständnis anhand der Modelle erklärt werden sollen. Daher ist es notwendig, beim Einsatz der Modelle an solche Problem-

fälle zu denken und besagte Molekülstrukturen möglichst schon zuvor zu erstellen. Dadurch sind die Modelle vorwiegend zur Betrachtung mesomerer Systeme geeignet und können die Kugel-Stab-Modelle nicht vollständig ersetzen. Diese Probleme treten vor allem im Bezug auf die Darstellbarkeit verschiedener mesomerer Systeme auf. Durch das für das „Klappen“ der Elektronen verwendete System von Magneten und Ankern sowie den starren Aufbau können nur Strukturen dargestellt werden, welche keiner durch die Verschiebung von Elektronen ausgelösten Umhybridisierung (Abb. 34) unterliegen. Diese lässt sich im Modell nur durch einen Tausch der verwendeten Kugeln darstellen und wird durch den damit verbundenen zeitaufwändigen Umbau unpraktikabel. Dies schränkt die Darstellung von funktionellen Gruppen mit positiven oder negativen mesomeren Effekten jedoch drastisch ein, da diese durch die Elektronenverschiebungen zwischen Bindungsorbitalen und freien Atomorbitalen an Heteroatomen entstehen und daher mit einer Umhybridisierung des betreffenden Atoms verbunden sind.

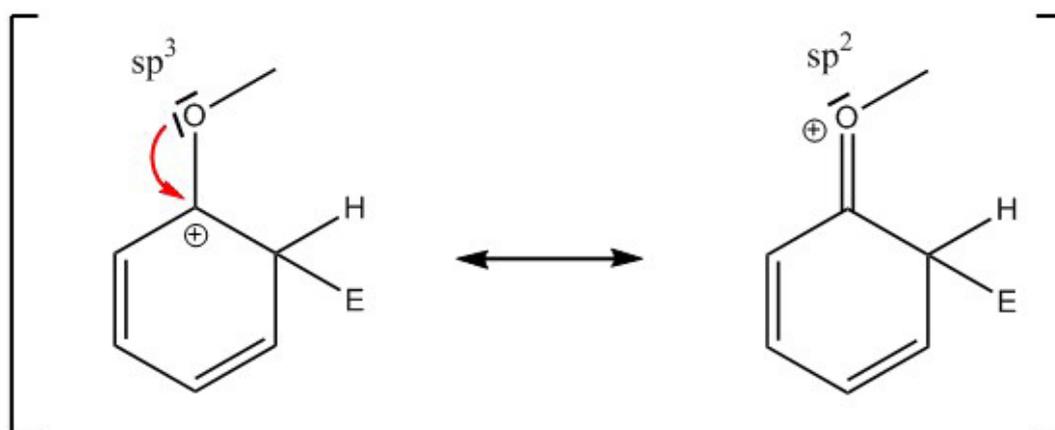


Abbildung 34: Umhybridisierung des Sauerstoff-Atoms am Methoxy-Substituenten durch Elektronenverschiebung in einer mesomeren Grenzformel des Methoxybenzols während einer Zweitsubstitution.

Dies betrifft einerseits die Anwendbarkeit der Modelle für die Betrachtung von Zweitsubstitutionen, welche in vielen Fällen durch mesomere Effekte gesteuert werden. Andererseits verhindert es auch eine Darstellung von über Heteroatome delokalisierten Systemen, wie den Carboxylaten. Daher lassen sich die Modelle nur zur Beschreibung von mesomeren Systemen verwenden, deren  $\pi$ -Elektronen über Kohlenstoff-Atome delokalisiert sind und die nicht von einer Umhybridisierung betroffen sind. Dennoch lässt sich das Konzept der Mesomerie über deren Betrachtung sinnvoll erschließen und

die zur Beschreibung solcher Systeme benötigten Kompetenzen daran erlernen. Das durch die Modelle erworbene Wissen und die vermittelten Konzepte lassen sich dann leichter auf zweidimensional dargestellte Grenzformeln übertragen. Dies erleichtert vor allem blinden und sehbehinderten Schülern die Arbeit mit mesomeren Grenzformeln und deren zweidimensionalen Darstellungen. Eine Betrachtung der Substituenteneinflüsse auf eine elektrophile Zweitsubstitution am Aromaten, lässt sich daher auch an taktilen Darstellungen oder der Chemieschrift durchführen.

Trotz der mit dem Aufbau verbundenen Einschränkungen eignen sich die Mesomeriemodelle sehr gut zum Einsatz im inklusiven Unterricht mit blinden und sehbehinderten Schülern. Hier können sie vor allem zur Einführung des Mesomerie-Konzepts eingesetzt werden, die eine spätere Betrachtung von herkömmlichen Mesomerie-Darstellungen für blinde und sehbehinderte Schüler erleichtern kann. Darüber hinaus stellen die Mesomeriemodelle auch für nicht-beeinträchtigte Schüler wertvolle Hilfsmittel für das Verstehen der Mesomerie dar.

## 7. Modellgestützte Einführung des Mesomerie-Konzepts

Die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Mesomeriemodelle sind für die Einführung des Mesomerie-Konzepts im inklusiven Unterricht mit blinden und sehbehinderten Schülern konzipiert. Daher soll an dieser Stelle eine mögliche Gestaltung der Einführung in das Mesomerie-Konzept vorgestellt werden. Das Ziel dieser Einheit soll die Vermittlung und die Anwendung des Mesomerie-Konzepts sein. Dies betrifft das Verständnis des Konzepts der Mesomerie sowie dessen Anwendung durch das modellgestützte Erstellen mesomerer Grenzformeln. Dazu soll sich im Rahmen eines experimentellen Nachweises des besprochenen Konzeptes auf den von C. Schmitt und M. Schween ausgearbeiteten Workshop zu mesomeriestabilisierten Carbenium-Ionen<sup>[29]</sup> bezogen werden.

Die hier besprochene Einführung ist in der Qualifikationsphase 2 im Rahmen des Themenfeldes Q 2.5 – Chemie der Aromaten angesiedelt.<sup>[6]</sup> Das Vorwissen der Schüler besteht an diesem Punkt aus dem Wissen über den Aufbau von Einfach- und Mehrfachbindungen, der homologen Reihe der Alkane und der Alkene sowie deren Eigenschaften und Reaktionen. Darüber hinaus existiert bereits Wissen über die Konstitutionsisomerie und auf Leistungskursniveau auch über ein vereinfachtes Orbitalmodell.<sup>[6]</sup> Im Rahmen eines Leistungskurses lässt sich diese Einführung auch am Schluss des Themenfeldes 1.1 in der Qualifikationsphase 1 durchführen, da an dieser Stelle im Leistungskurs erstmals Benzol und dessen mesomeres System besprochen werden.<sup>[6]</sup> Die hier vorgestellte Einführung bezieht sich explizit auf den Einsatz in Grundkursen, lässt sich durch zusätzliche Betrachtungen, wie den Orbitalen, jedoch leicht auf ein für Leistungskurse angemessenes Niveau bringen. Im Rahmen der Einführung soll der Kurs in Kleingruppen von zwei bis drei Schülern eingeteilt werden, um so Diskussionen über die Inhalte zu erleichtern. Darüber hinaus können nicht-beeinträchtigte Schüler ihren blinden und sehbehinderten Mitschülern bei Problemen Hilfestellungen geben. Die Einführung ist in mehrere logisch aufeinander folgende Schritte gegliedert, anhand derer ein modellgestütztes Verständnis mesomerer Systeme aufgebaut wird, welches anschließend auch experimentell erweitert wird.

### *a) Benzol und dessen „Isomere“ – Einführung in das Phänomen der Mesomerie*

Die Einführung beginnt mit dem Arbeitsauftrag, das Modell eines  $C_6H_6$ -Grundkörpers so mit  $\pi$ -Bindungen zu bestücken, dass für alle Atome die Oktett-Regel erfüllt wird.

Dazu werden die Atome des Grundkörpers zuvor durchnummeriert. Das neue Thema der Unterrichtsstunde sowie der Name der zu erstellenden Verbindung werden jedoch nicht erwähnt, um ein unvoreingenommenes Arbeiten zu ermöglichen. Dazu erhalten die Schüler einen Benzol-Grundkörper und drei  $\pi$ -Bindungen. Dieser Arbeitsauftrag soll einerseits einen ersten Kontakt mit den Modellen im Sinne einer schrittweisen Heranführung an die Darstellungsmöglichkeiten und Funktionen des Mesomeriemodells ermöglichen. Andererseits wird an dieser Stelle bereits die schon bekannte Oktett-Regel als Kontrollinstrument für korrekte Strukturen eingeführt. Das erwartete Ergebnis dieser Phase besteht in zwei „unterschiedlichen“ Strukturen, die die Schüler für das Benzol erstellt haben (Abb. 35). Sollte dies nicht eintreffen, so muss durch die Lehrkraft eine solche zweite Struktur bereitgehalten werden.

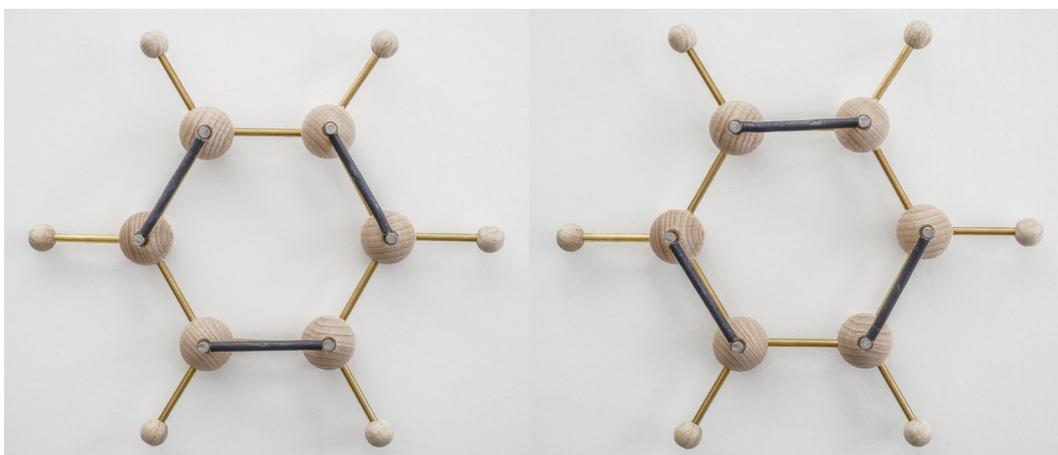


Abbildung 35: Die zwei möglichen mesomere Grenzstrukturen des Benzols.

Es folgt nun eine Beschreibung der hergestellten Moleküle. Dabei sollten die planare Raumstruktur und die abwechselnden Doppel- und Einfachbindungen erkannt und beschrieben werden. Für die abwechselnden Doppel- und Einfachbindungen wird der Begriff *konjugiert* eingeführt. Es muss weiterhin herausgestellt werden, dass nur diese Strukturen anhand der Oktett-Regel als korrekt eingestuft werden können, es also keine weiteren Möglichkeiten gibt, die  $\pi$ -Bindungen anzuordnen. In dieser Diskussion wird auch die unterschiedliche Position der einzelnen Doppelbindung thematisiert und in diesem Rahmen beide Verbindungen nach IUPAC benannt. Dies stellt einerseits eine Wiederholung der IUPAC-Nomenklatur dar und ermöglicht darüber hinaus eine leichte Unterscheidung beider Verbindungen in einer Diskussion. Es ergeben sich die Namen 1,3,5-Cyclohexatrien und 2,4,6-Cyclohexatrien. Nun folgt die Frage, ob beide

Moleküle Konstitutionsisomere sind. Diese Frage lässt sich jedoch nicht vollständig klären, da einerseits eine unterschiedliche Position der Doppelbindungen existiert, die Moleküle andererseits aber durch Drehen ineinander überführbar sind. Da sich diese Frage am Beispiel Benzol nicht beantworten lässt, muss nach Verbindungen gesucht werden, die dem Benzol ähnlich sind, jedoch nicht durch Drehen der Molekülstruktur ineinander überführt werden können.

*b) Benzol – „Isomerie oder nicht“?*

Nach einer Diskussion der Anforderungen an den Aufbau einer solchen Verbindung wird das 1,2-Dichlorbenzol als geeignete Verbindung für die Klärung der Frage verwendet. Die Schüler sollen nun beide Formen des 1,2-Dichlorbenzols mithilfe der Modelle aufbauen (Abb. 36).

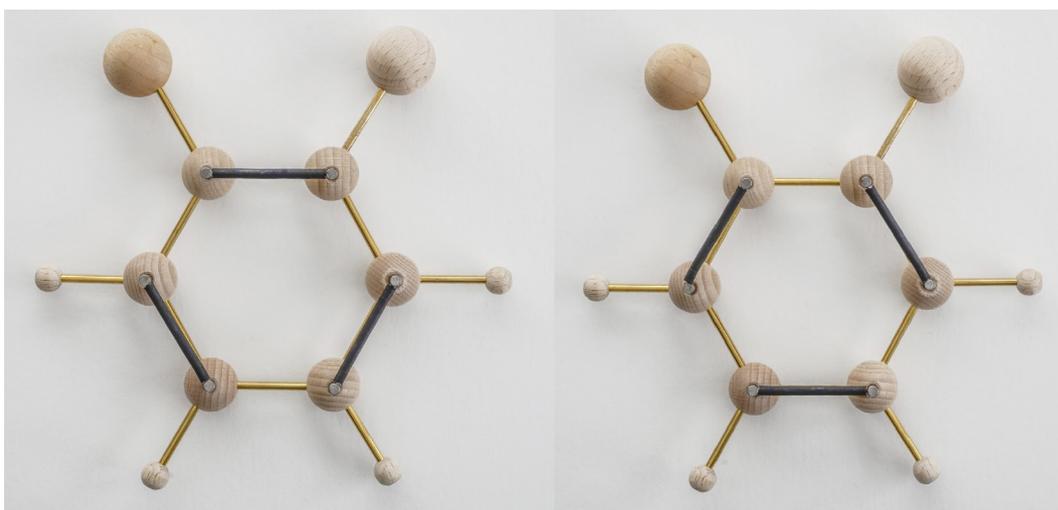


Abbildung 36: Die zwei möglichen mesomere Grenzstrukturen des 1,2-Dichlorbenzols.

Es stellt sich heraus, dass beide Formen nicht durch Drehen der Moleküle ineinander überführbar sind. Nach der erneuten Benennung beider Moleküle ergibt eine kurze Recherche in einer Datenbank wie der Sicherheitsdatenbank GESTIS,<sup>[30]</sup> dass mit dem 1,2-Dichlorbenzol nur eine der beiden Verbindungen existiert. Dies schließt daher ein Vorhandensein von Isomeren aus. Es stellt die Schüler vor das Problem der unterschiedlich angeordneten Doppelbindungen in den betrachteten Molekülen. Daher folgt eine erneute Beschreibung der dargestellten Verbindungen mit besonderem Blick auf die Doppelbindungen und deren Position sowie deren Unterschied in den Molekülen. Der Unterschied zwischen den einzelnen Molekülen soll hier als um ein Atom „weiter

gedrehte“ Doppelbindungen beschrieben werden. Daraus folgt die Idee, dass anstelle einer Drehung des gesamten Moleküls eine Drehung der Doppelbindungen erfolgen kann. Diese Drehung kann im Modell durch ein Klappen der Doppelbindungen durchgeführt werden. Eines der beiden erstellten Dichlorbenzol-Modelle wird nun so geklappt, dass es zu dem anderen deckungsgleich ist. Dieser Prozess wird nun von den Schülern anhand der Modelle beschrieben. Anschließend wird das Klappen von Doppelbindungen auch an den zuvor hergestellten Benzol-Molekülen durchgeführt. Da dies auch zu gleichen Strukturen führt, wird eine Drehung des Moleküls zugunsten einer Drehung der Doppelbindungen als Mechanismus ausgeschlossen. Hierdurch wird das Klappen von Doppelbindungen als legitime Manipulation an der Molekülstruktur eingeführt und der Prozess am Modell eingeübt.

### *c) Theoretische Einführung in das Thema der Mesomerie*

Dieser theoretische Block beginnt mit einer historischen Übersicht über den Stoff Benzol. Hierbei sollten anhand eines Lehrervortrags oder Arbeitsblättern die Entdeckung des Benzols und dessen Strukturformel sowie das Reaktionsverhalten des Benzols thematisiert werden. Benzol soll dabei im Vergleich zu Verbindungen mit isolierten Doppelbindungen als reaktionsträge charakterisiert werden. Es bietet sich ein Vergleich der Reaktion von Ethen mit Chlor an, die nach dem Mechanismus einer elektrophilen Addition abläuft, während Benzol mit Chlor nach dem Mechanismus einer elektrophilen Substitution reagiert. Daraus folgt, dass die Doppelbindungen im Benzol von der im Ethen verschieden sein müssen. Daher wird nun ein Rückblick auf die Einfachbindung zwischen den Kohlenstoff-Atomen im Ethan und die Doppelbindung zwischen den Kohlenstoff-Atomen im Ethen durchgeführt. Dies geschieht mit besonderem Fokus auf die verschiedenen Bindungslängen. Die C-C-Einfachbindung im Ethan besitzt eine Länge von 154 pm, während die C-C-Doppelbindung im Ethen 133 pm lang ist.<sup>[12]</sup> Im Anschluss wird das Benzol-Modell betrachtet. Da die Position der Bindungselektronen durch das Klappen verändert werden kann, werden die von den Schülern erwarteten Bindungslängen diskutiert. Das Ergebnis der Diskussion wird mit dem Wert aller C-C-Bindungen im Benzol verglichen, die sämtlich eine Länge von 139 pm besitzen.<sup>[12]</sup> Die Länge der C-C-Bindungen im Benzol liegt zwischen den Längen einer Einfachbindung und einer Doppelbindung, was sich durch die möglichen Positionen der Doppelbindungen im Benzol erklären lässt. Diese gleiche Länge aller Bindungen ist auch im Modell dargestellt und ermöglicht erst das

Klappen von Elektronenpaaren. Die einheitliche Bindungslänge lässt weiter vermuten, dass Benzol durch beide Strukturen gleichzeitig beschrieben werden muss. Nun wird die Möglichkeit der Beschreibung eines Moleküls durch mehrere, sich in der Anordnung der Doppelbindungen unterscheidende Strukturen als *Mesomerie* benannt. Es wird erläutert, dass sich die Elektronen der Doppelbindungen in mesomeren Systemen gleichmäßig über das gesamte Molekül verteilen und ein Klappen der Doppelbindungen tatsächlich nicht stattfindet. Diese Verteilung wird als Delokalisation der Elektronen beschrieben. Zur Veranschaulichung der Delokalisation kann an dieser Stelle ein Styropor-Modell des Benzols gezeigt werden, welches das über den gesamten Ring verteilte, vollständig gleichmäßige Molekülorbital des Benzols zeigt (Abb. 37).

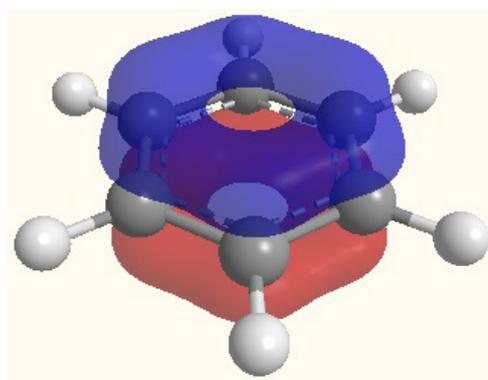


Abbildung 37: Den gesamten Benzolring umfassendes Molekülorbital.

Im Rahmen des Unterrichts in Leistungskursen kann an dieser Stelle die Betrachtung der Orbitale des Benzols erfolgen. Dabei sollte vor allem die Hybridisierung der Kohlenstoff-Atome und die daraus folgenden Raumstrukturen thematisiert werden. Anschließend sollten die einzelnen Atomorbitale betrachtet werden und darauf folgend der Blick auf die Molekülorbitale sowie die Elektronenbesetzung dieser gelenkt werden.

Da sich diese Verteilung der Elektronen über das gesamte Molekül in Lewis-Schreibweise nicht darstellen lässt, werden mehrere Formeln verwendet, welche das Molekül als Darstellung lokalisierter Doppelbindungen beschreiben. Diese Formeln werden als mesomere Grenzformeln bezeichnet. Es wird herausgestellt, dass ein mesomeres System durch dessen mesomere Grenzformeln dargestellt werden kann. Dabei wird jedoch darauf hingewiesen, dass die mesomeren Grenzformeln nur ein Hilfsmittel der Beschreibung sind und nicht real existieren. Die einzelnen Grenzformeln eines mesomeren Systems lassen sich durch das bereits zuvor durchgeführte Klappen der Doppelbindungen

erstellen. Dies wird nun noch einmal am Modell des Benzols durchgeführt und die dafür notwendigen Formalismen, wie die Beachtung der Oktett-Regel, besprochen. Nun erstellen die Schüler die mesomeren Grenzformeln des Benzols unter der Anwendung von Lewis-Formeln auf Papier. Blinde und sehbehinderte Schüler verwenden hierfür Magnetlegetafeln oder ähnliche Medien. Dieser Schritt ermöglicht eine Übertragung des an den Modellen generierten Könnens in die zweidimensionale Ebene und verknüpft die zweidimensionalen Darstellungen effektiv mit den dreidimensionalen Modelldarstellungen. So werden Lernhilfen geschaffen, die ein zweidimensionales Erstellen von mesomeren Grenzformeln erleichtern können. Hierbei wird auch noch auf die zusätzlichen Fehlerquellen der Darstellung von mesomeren Grenzformeln in Lewis-Schreibweise hingewiesen.

*d) Wann kann ein Molekül Bindungselektronen delokalisieren?*

Folgend werden die Eigenschaften diskutiert, die für die Delokalisation von Bindungselektronen notwendig sind. Dazu wird wieder das Modell des Benzols betrachtet. Dabei sollten die Planarität des Moleküls und dessen Konjugation genannt werden. Bei Leistungskursen oder fortgeschrittenen Grundkursen kann auch die Hybridisierung thematisiert werden und das Vorhandensein von p-Orbitalen als wichtiges Kriterium für mesomere Systeme herausgearbeitet werden. An dieser Stelle bietet sich die Einführung in die Aromatizität an. Hierbei sollten vor allem die Kriterien für Aromatizität besprochen und Benzol demnach als Aromat charakterisiert werden. Dabei sollte herausgestellt werden, dass die hohe Stabilität von Aromaten durch das Vorhandensein eines mesomeren Systems bedingt ist. Im Leistungskurs kann die Stabilität an dieser Stelle durch die Betrachtung der Energieniveaus und der Besetzung der Molekülorbitale aufgezeigt werden, während sie im Grundkurs auf die Delokalisation und damit die schlechtere Angreifbarkeit der Doppelbindungen zurückgeführt werden sollte.

*e) Mesomere Systeme an Carbenium-Ionen*

Im nächsten Schritt erhalten die Schüler ein Modell des Allyl-Kations (Abb. 38), welches sie beschreiben sollen.

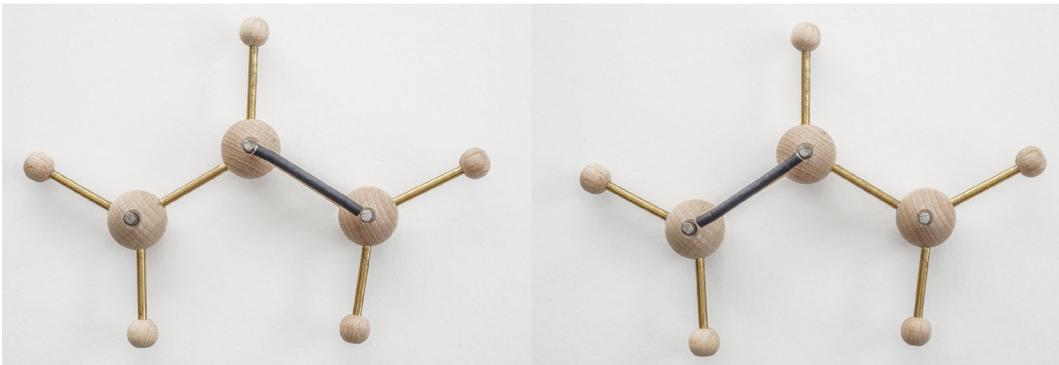


Abbildung 38: Mesomere Grenzformeln des Allyl-Kations.

Es stellt sich heraus, dass das Allyl-Kation planar aufgebaut ist und eine abwechselnde Einfach- und Doppelbindung besitzt. Die Doppelbindung lässt sich im Modell auch klappen, und so können zwei mesomere Grenzformeln erstellt werden. In der Diskussion wird herausgearbeitet, dass Carbenium-Ionen positiv geladene Kohlenstoff-Atome mit einem Elektronensextett enthalten. Diese Kohlenstoff-Atome sind planar und können daher in das mesomere System mit einbezogen werden. Im Vergleich dazu wird ein Modell von Propen betrachtet (Abb. 39), welches durch die tetraedrische Struktur des nicht über die Doppelbindung verfügenden Kohlenstoff-Atoms nicht in das mesomere System mit eingebunden werden kann.

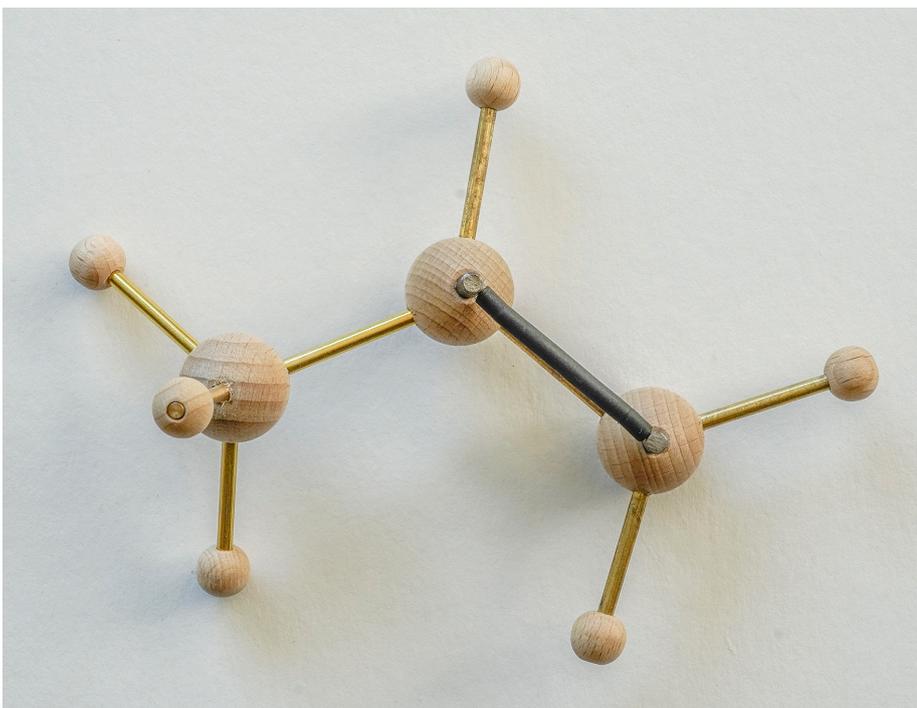


Abbildung 39: Modell des Propens.

Nun wird die Aufgabe gestellt, sämtliche mesomeren Grenzformeln des Benzyl-Kations (Abb. 40) mit dem Modell nachzubauen und anschließend in Lewis-Schreibweise festzuhalten.

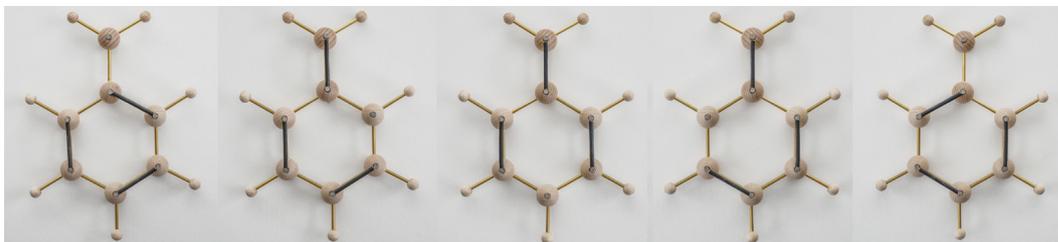


Abbildung 40: Mesomere Grenzformeln des Benzyl-Kations.

Das Elektronensextett der betrachteten Verbindungen wird nun im Bezug auf dessen energetischen Zustand diskutiert. Dabei wird herausgestellt, dass Elektronensextette an Kohlenstoff-Atomen ungünstig sind. Da das Elektronensextett durch das mesomere System jedoch ebenfalls über mehrere Kohlenstoff-Atome delokalisiert ist, sind diese Verbindungen stabiler als Verbindungen mit lokalisierten Elektronensextetten. Hierbei wird die Anzahl der möglichen mesomeren Grenzformeln als Merkmal für die Stabilität des Moleküls verdeutlicht. Dabei können auch sinnvolle und weniger sinnvolle Grenzformeln und deren Anteil an der Beschreibung des mesomeren Systems besprochen werden.

#### *f) Stabilität von Carbenium-Ionen und Workshop*

Um die Stabilität von Carbenium-Ionen auch experimentell nachzuweisen, bietet sich der bereits erwähnte Workshop von C. Schmitt und M. Schween an.<sup>[29]</sup> Dieser Workshop ermöglicht eine Verfolgung der Bildung verschiedener mesomeriestabilsierter Carbenium-Ionen durch Farbänderung und Messung der Leitfähigkeit und kann dadurch die Effekte der Stabilisierung dieser Carbenium-Ionen aufzeigen. Durch die Verwendung eines akustischen Leitfähigkeitsprüfers, dem Chemophon,<sup>[29]</sup> und einem Gerät zur Farberkennung ist er auch für blinde und sehbehinderte Schüler zugänglich. Da sich der Workshop nicht nur auf das Mesomerie-Konzept bezieht, sondern darüber hinaus noch andere Basiskonzepte miteinander verknüpft, um Zwischenstufen bei nucleophilen Substitutionen zu beschreiben, soll der Workshop an dieser Stelle nicht ausführlich diskutiert werden, da sich der hier vorgestellte Unterrichtsentwurf explizit auf die Einführung des Mesomerie-Konzepts und dessen Anwendung beschränkt. Eine

genaue Beschreibung des Workshops bietet [29].

Das erste Experiment des Workshops beginnt mit der Betrachtung des Chlortriphenylmethans. Dieses wird in Dichlormethan gelöst und anschließend mit der Lewis-Säure Aluminiumchlorid in einem auf  $-15^{\circ}\text{C}$  gekühlten Dreihalskolben vermischt. Dabei tritt augenblicklich eine grüngelbe Färbung der zuvor farblosen Flüssigkeit ein, die mit einem sofortigen starken Anstieg der Leitfähigkeit einhergeht. Da die Leitfähigkeit an das Vorhandensein von Ionen gekoppelt ist, lässt sich durch deren Ansteigen das Entstehen von Ionen vermuten.<sup>[29]</sup> Bei der Reaktion entsteht durch eine Lewis-Säure-Base-Reaktion ein negativ geladener Tetrachloroaluminat(III)-Komplex  $[\text{AlCl}_4]^-_{(\text{aq})}$  sowie ein positiv geladenes Triphenylmethyl-Kation. Der schnelle Anstieg der Leitfähigkeit lässt auf eine schnelle Reaktion und damit nach dem Bell-Evans-Poulanyi-Prinzip in Verbindung mit dem Hammond-Postulat auf eine energieärmere Struktur schließen.<sup>[29]</sup> Die Betrachtung des Triphenylmethyl-Kations (Abb. 41) ergibt ein durch zehn Grenzformeln beschreibbares mesomeres System. Diese Grenzformeln werden nun mit Hilfe des Mesomeriemodells von den Schülern erarbeitet.

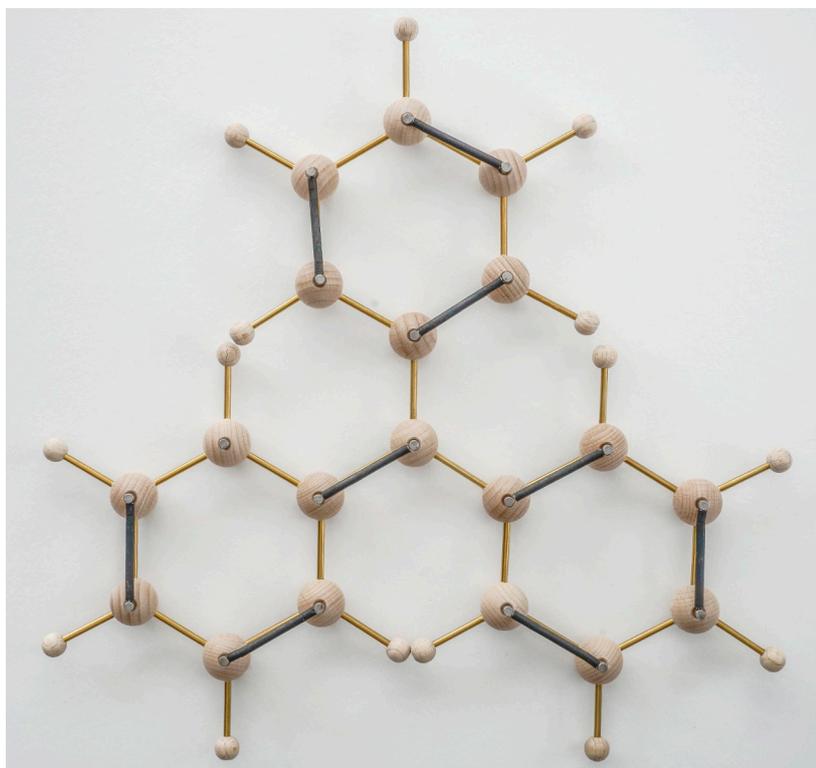


Abbildung 41: Eine der möglichen zehn Grenzformeln des Triphenylmethyl-Kations.

In einem Lehrer-Schüler-Gespräch wird nun die mögliche Reaktion des Chlortriphenylmethans unter identischen Bedingungen diskutiert. Dabei wird das entstehende

Carbenium-Ion (Abb. 42) ebenfalls mit dem Mesomeriemodell betrachtet und die sieben möglichen Grenzformeln erstellt.

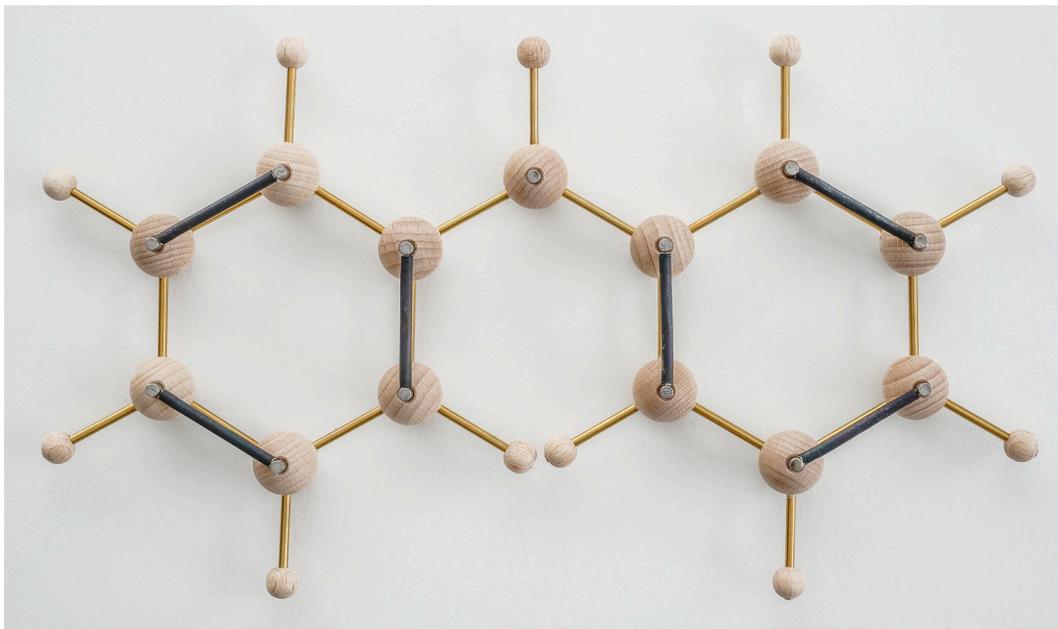


Abbildung 42: Eine der sieben mesomeren Grenzformeln des Diphenylmethyl-Kations.

Nun werden die erwarteten Ergebnisse diskutiert. Dabei sollte das Diphenylmethyl-Kation durch die geringere Anzahl an möglichen Grenzformeln als energetisch höher angesiedelt werden und daher gemäß des Bell-Evans-Poulanyi-Prinzips und des Hammond-Postulats eine langsamere Reaktion vorgeschlagen werden. Eine solche langsamere Reaktion lässt sich auch im anschließenden Experiment durch ein langsames Ansteigen der Leitfähigkeit und ein langsames Entstehen der roten Farbe nachweisen.<sup>[29]</sup> Der Vergleich des Diphenylmethyl-Kations und des Triphenylmethyl-Kations zeigt an dieser Stelle nochmals die Verbindung der Anzahl der möglichen mesomeren Grenzformeln mit der Stabilität des gebildeten Carbenium-Ions auf.

Der nächste Schritt des Workshops besteht in der Betrachtung der Reaktion des 4,4',4''-Trimethoxytriphenylmethylchlorids (Abb. 43).

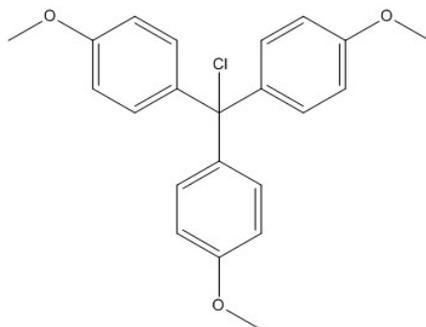


Abbildung 43: 4,4',4''-Trimethoxytriphenylmethylchlorid.

Die Reaktion verläuft hier bereits ohne Zugabe einer Lewis-Säure rasch ab.<sup>[29]</sup> Dies spricht für eine deutlich bessere Stabilisierung des entstehenden Carbenium-Ions. Das sich bildende Carbenium-Ion lässt sich auf Grund der Methoxy-Substituenten leider nicht mit dem neuen Mesomeriemodell darstellen. Für blinde und sehbehinderte Schüler muss daher auf eine Abbildung im taktilen Druck oder die Anwendung von Magnetegetafeln zurückgegriffen werden. Mit dem bereits erarbeiteten Vorwissen ist eine Behandlung des mesomeren Effekts der Methoxy-Substituenten jedoch möglich. Diese Betrachtung weist darüber hinaus auf den Einfluss von Substituenten auf mesomere Systeme und damit vor allem auf den Mechanismus der elektrophilen Substitution am Aromaten hin, der thematisch außerhalb dieser Einführung liegt. Die Besprechung des 4,4',4''-Trimethoxytriphenylmethyl-Kations kann daher als Vorbereitung auf die durch Substituenten ausgelösten, mesomeren Effekte angesehen werden. Darüber hinaus lässt sich an diesem Carbenium-Ion eine Unterscheidung verschiedener Grenzformeln vornehmen. Im 4,4',4''-Trimethoxytriphenylmethyl-Kation existieren zwei verschiedene Arten von Grenzformeln, zehn Grenzformeln mit Elektronensextett und drei Grenzformeln mit vollständigem Elektronenoktett (Abb. 44).

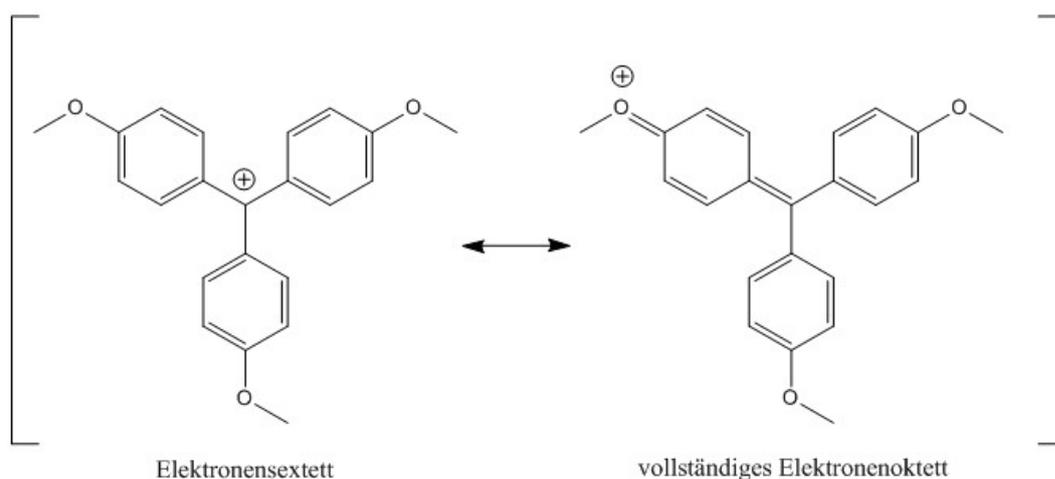


Abbildung 44: Zwei Grenzformeln des 4,4',4''-Trimethoxytriphenylmethyl-Kations mit Elektronensextett beziehungsweise vollständigem Elektronenoktett.

Obwohl die *all*-Oktett-Grenzformeln<sup>[21]</sup> eine positive Ladung am elektronegativen Sauerstoff-Atom aufweisen, sind sie auf Grund des für alle Atome erreichten Elektronenoktetts offenbar bedeutsam.<sup>[29]</sup> Die hohe Stabilität des 4,4',4''-Trimethoxytriphenylmethyl-Kations kann daher neben der großen Anzahl von dreizehn mesomeren Grenzformeln vor allem auf die gut stabilisierten *all*-Oktett-Grenzformeln zurückgeführt werden. Diese ermöglichen eine Abspaltung des Chlorid-Ions bereits ohne die

Zugabe eines Katalysators.

Die hier experimentell nachgewiesenen mesomeren Effekte sowie die unterschiedlichen mesomeren Grenzformeln weisen auf die folgende Betrachtung mesomerer Systeme hin, die bei Substitutionen an aromatischen Systemen als  $\sigma$ -Komplexe entstehen und im Anschluss an diese Einleitung besprochen werden können. Da die mesomeren Systeme jedoch stark von den mesomeren Effekten der Substituenten beeinflusst werden, lassen sich diese nicht mehr mit dem neuen Mesomeriemodell darstellen. Daher wird die modellgestützte Einführung in das Mesomerie-Konzept an dieser Stelle beendet. Weitere Betrachtungen des  $S_E$ -Ar-Mechanismus sind zwar vor allem im Hinblick auf die Betrachtung der gebildeten  $\pi$ -Komplexe möglich, für die Betrachtung der Substituenteneinflüsse muss jedoch auf herkömmliche Darstellung von mesomeren Grenzformeln zurückgegriffen werden. Die Verwendung der Mesomeriemodelle übt und erleichtert jedoch die Erstellung solcher zweidimensionaler Grenzformeln in Lewis-Schreibweise auf Papier oder den Magnetlegetafeln. Daher sollten die Schüler nach der anfänglichen Arbeit mit den Mesomeriemodellen in der Lage sein, zweidimensionale Grenzformeln zu erstellen und die mesomeren Effekte der Substituenten an diesen zu verstehen.

## 8. Einsatz der Modelle

Im Rahmen der Erstellung der Mesomeriemodelle wurden diese an der Carl-Strehl-Schule in Marburg zur Erprobung der Anwendbarkeit im Unterricht mit blinden und sehbehinderten Schülern in einem Grundkurs im Fach Chemie eingesetzt. Darüber hinaus wurden sie bei der Durchführung des von C. Schmitt und M. Schween entwickelten Workshops zu Carbenium-Ionen<sup>[29]</sup> sowohl mit blinden und sehbehinderten Schülern als auch mit nicht-beeinträchtigten Schülern eingesetzt (Abb. 45). An dieser Stelle soll daher von den beim Einsatz der Modellen gemachten Erfahrungen berichtet werden.

Es stellte sich frühzeitig heraus, dass die Modelle gut taktil erfahrbar und die Strukturen von blinden und sehbehinderten Schülern gut zu erkennen sind. Im Vergleich zu den Magnetlegetafeln ist das Erstellen mesomerer Grenzformeln in deutlich geringerer Zeit möglich.

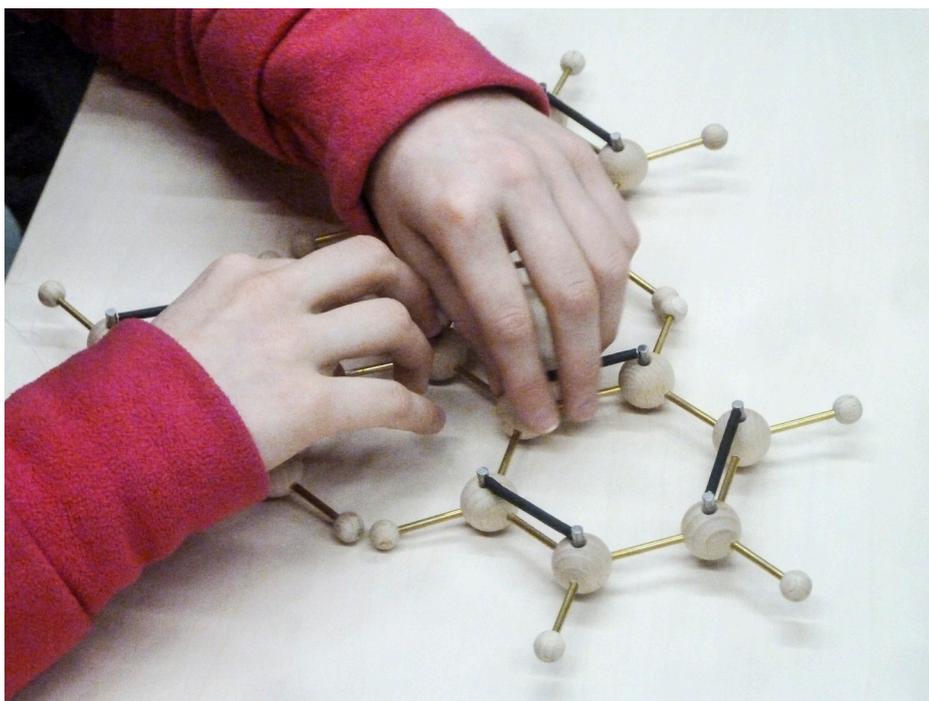


Abbildung 45: Arbeiten mit den Mesomeriemodellen im Rahmen des Workshops.

Dies wird einerseits durch den Aufbau der Modelle sowie die Kompatibilität der Modelle mit den Regeln zum Erstellen mesomerer Grenzformeln in Lewis-Schreibweise ermöglicht, welche ohne Probleme auf die Mesomeriemodelle angewendet werden können. Darüber hinaus ermöglichen die Modelle eine Betrachtung der räumlichen Struktur der Moleküle. Dies macht die zeitaufwändige Benutzung von Kugel-Stab-

Modellen obsolet und erleichtert das Verstehen, da nur ein Modell zur Besprechung aller Inhalte benötigt wird. So ermöglichen die Modelle ein Verstehen des mesomeren Konzeptes, welches dem unter Verwendung der Magnetlegetafeln und taktil gedruckter Zeichnungen mindestens ebenbürtig ist, jedoch weniger Zeit in Anspruch nimmt. Im Rahmen des Workshops zeigten sich die gleichen positiven Eigenschaften der Modelle. Darüber hinaus ermöglichen sie durch die reduzierte Darstellung der Inhalte eine leichter verständliche Abbildung der im Workshop eingesetzten komplexen Moleküle. Weiterhin bieten die Modelle eine gute Möglichkeit, in kurzer Zeit diskutierte Inhalte zu verdeutlichen. So wurden Ideen von Schülern verbal formuliert und zugleich am Modell umgesetzt. Gerade blinde und sehbehinderte Schüler können so den diskutierten Inhalten besser folgen. Im Rahmen des Workshops wurden die Mesomeriemodelle auch von nicht-beeinträchtigten Schülern mit Erfolg angewendet. Diese stellen dabei eine sinnvolle Ergänzung zu der eingesetzten Lewis-Schreibweise dar und halfen auch bei der besseren Vorstellung dreidimensionaler Strukturen sowie der Elektronenverschiebung im mesomeren System.

## 9. Fazit

Das Mesomerie-Konzept, welches sich mit der Delokalisation von Elektronensystemen befasst, stellt in der organischen Chemie ein wichtiges Konzept zum Verständnis der Stabilität und der Reaktionen organischer Moleküle dar. Auf Grund seiner Relevanz für das chemische Verständnis wird es auch im Chemieunterricht der gymnasialen Oberstufe behandelt. Die Beschreibung mesomerer Systeme findet hier vor allem durch die Betrachtung mesomerer Grenzformeln in Lewis-Schreibweise statt, die wegen ihrer Komplexität von blinden und sehbehinderten Schülern jedoch nur eingeschränkt erfassbar sind. Da keine angemessenen Darstellungen dieser Grenzformeln für blinde und sehbehinderte Schüler existieren, können Probleme beim Verständnis des Mesomerie-Konzepts entstehen, die eine erfolgreiche Teilnahme am Chemieunterricht verhindern. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit Mesomeriemodelle erstellt, die von blinden und sehbehinderten Schülern erfahren werden können und so eine Benachteiligung verhindern sollen.

Um eine gute Anwendbarkeit der Modelle zu erreichen, wurden die fachlichen, fachdidaktischen und inklusiven Anforderungen an die Mesomeriemodelle analysiert. Es konnte gezeigt werden, dass eine Darstellung des delokalisierten  $\pi$ -Elektronensystems für ein Verstehen des Mesomerie-Konzepts essentiell ist. Daher besteht die Hauptaufgabe der Modelle darin, das delokalisierte Elektronensystem darzustellen. Da dies im Unterricht fast ausschließlich in Form von mesomeren Grenzformeln in Lewis-Schreibweise stattfindet, wurde diese Darstellung dem Mesomeriemodell zugrunde gelegt. Zur Erzeugung einer möglichst guten taktilen Erfahrbarkeit wurde das Modell auf der Basis dreidimensionaler Kugel-Stab-Modelle erstellt, was darüber hinaus auch eine Betrachtung der dreidimensionalen Molekülstruktur erlaubt. Das erarbeitete Mesomeriemodell ermöglicht daher die Erstellung mesomerer Grenzformeln nach dem Mechanismus der Lewis-Schreibweise in dem taktil erfahrbaren, dreidimensionalen Aufbau der Kugel-Stab-Modelle.

Der Aufbau der Modelle ist zugunsten der Möglichkeit einer leichten Herstellung sehr einfach gehalten. Atome werden durch gebohrte Holzkugeln dargestellt, welche über verschiedene Metallstäbe miteinander verbunden sind. Alle benötigten Materialien sind im Baumarkt oder im Bastelbedarf erhältlich. Das zentrale Merkmal der Modelle sind die beweglichen  $\pi$ -Bindungen, die durch ein System von Magneten und Ankern frei beweglich sind und so eine uneingeschränkte Erstellung von Grenzformeln zu-

lassen. Da die einzelnen Bestandteile der Modelle beliebig miteinander kombiniert werden können, lassen sich viele unterschiedliche Moleküle darstellen und ermöglichen daher einen Einsatz der Modelle in vielen Situationen.

Die entwickelten dreidimensionalen Mesomeriemodelle fördern durch ihre taktile Erfahrbarkeit und die intuitive Anwendbarkeit ein besseres Verständnis des Mesomerie-Konzepts für Schüler mit Sehbeeinträchtigung. Trotz der Reduzierung der dargestellten Inhalte auf die Bewegung der  $\pi$ -Elektronen und den damit verbundenen Einschränkungen der vermittelbaren Inhalte erlauben die Mesomeriemodelle eine Betrachtung mesomerer Systeme und üben darüber hinaus die Verwendung zweidimensionaler Grenzformeln in Lewis-Schreibweise ein. Daher sind sie sehr gut für den Einsatz im Unterricht mit blinden und sehbehinderten Schülern geeignet. Durch den Abbau von Lernbarrieren und die Orientierung am Kerncurriculum des Landes Hessen schaffen sie eine weitergehende barrierefreie Teilnahme blinder und sehbehinderter Schüler am inklusiven Chemieunterricht in der gymnasialen Oberstufe. Die Mesomeriemodelle stellen darüber hinaus jedoch auch im Unterricht mit nicht-beeinträchtigten Schülern eine sinnvolle Ergänzung der Darstellungen mesomerer Systeme dar, da sie ein direktes Verfolgen der Elektronenbewegungen möglich machen. So kann das Verständnis des Mesomerie-Konzepts auch für schwächere Schüler erleichtert werden. Beim Einsatz der Modelle im Unterricht mit blinden und sehbehinderten Schülern sowie im Rahmen des Workshops konnte die Anwendbarkeit der Modelle sowie deren günstiger Einfluss auf ein Verstehen der Mesomerie bestätigt werden.

## 10. Literaturverzeichnis

- [1] Walden, P. 100 Jahre Benzol. *Zeitschrift für angewandte Chemie* **1926**, *125* (5), 125–132.
- [2] Kekulé, A. Ueber einige Condensationsproducte des Aldehyds. *Liebigs Ann. Chem.* **1872**, *162* (1), 77–124.
- [3] Maier, G. „Aromatisch“ – was heißt das eigentlich? *ChiuZ* **1975**, *5*, 131–141.
- [4] Peter, K; Vollhardt, C; Schore, Neil E. *Organische Chemie*, 5. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim **2011**.
- [5] Kerber, R. C. If It's Resonance, What Is Resonating? *J. Chem. Educ.* **2006**, *83*, 223–227.
- [6] Hessisches Kultusministerium *Kerncurriculum gymnasiale Oberstufe des Landes Hessen für das Fach Chemie*, Wiesbaden **2016** (<https://kultusministerium.hessen.de/sites/default/files/media/kcgo-ch.pdf>, letzter Zugriff: 21.04.2016).
- [7] Abraham, M.; Kenkel, M.; Pradel, D.; Wild, U. Immer (noch) Theater mit der Inklusion! Inklusion bei Schülerinnen und Schülern mit Sehbeeinträchtigung, in: *Teilhabe ist das Ziel – Der Weg heißt: Inklusion. Beiträge zur Umsetzung der Inklusion in Oldenburg*, Lindemann, H. (Hrsg.) Weinheim/Basel **2016**, 101–118.
- [8] Hertlein, J. Das System der Chemieschrift in der deutschen Blindenschrift. Marburger Systematiken der Blindenschrift Teil 23, Verlag der Deutschen Blindenstudienanstalt e.V., Marburg **2005**.
- [9] Lang, M. Sehen, in: *Handbuch Inklusion und Sonderpädagogik*, Hedderich, I; Biewer, G; Hollenweger, J; Markowetz, R. (Hrsg.), Bad Heilbrunn **2016**, 234–240.
- [10] Micklos Lewis, A. L; Bodner, G. M. Chemical reactions: what understandings do students with blindness develop? *Chem. Educ. Res. Pract.*, **2013**, *14*, 625–636.
- [11] Supalo, C. A.; Kennedy, S. H. Using Commercially Available Techniques To Make Organic Chemistry Representations Tactile and More Accessible to Students with Blindness or Low Vision. *J. Chem. Educ.* **2014**, *91*, 1745–1747.
- [12] Mortimer, C. E.; Müller, U. *Chemie*, 8. Auflage, Thieme, Stuttgart **2003**.
- [13] Carey, F. A. *Organic Chemistry*, fourth ed., Boston u. a. **2000**.
- [14] Carey, F. A.; Sundberg, R. J. *Advanced Organic Chemistry, Part A. Structure and Mechanisms*, fourth ed., New York u. a. **2000**.

- [15] Graulich, N. The tip of the iceberg in organic chemistry classes: how do students deal with the invisible? *Chem. Educ. Res. Pract.* **2015**, *16*, 9–21.
- [16] Graulich, N.; Schreiner, P. R. Struktur-Eigenschafts-Beziehungen in der Organischen Chemie. Über die Entwicklung neuer Lehrkonzepte an Hochschulen. *ChemKon* **2011**, *18* (3), 109–114.
- [17] Lersch, R. Didaktik und Praxis kompetenzfördernden Unterrichts. *Schulpädagogik heute*, **2010**, *1*, 1–18.
- [18] Frey, G. Symbolische und ikonische Modelle. *Synthese* **1960**, *12* (2/3), 213–221.
- [19] Vachliotis, T.; Salta, K.; Vasiliou, P.; Tzougraki, Ch. Exploring Novel Tools for Assessing High School Students' Meaningful Understanding of Organic Reactions. *J. Chem. Educ.* **2011**, *88*, 337–345.
- [20] Klein, D., *Organic Chemistry as a second language. First semester topics*, 3. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim **2012**.
- [21] Brückner, R. Organic Mechanisms. Reactions, Stereochemistry and Synthesis, Springer: Berlin, **2010**, 81.
- [22] Fleming, I. *Molekülorbitale und Reaktionen organischer Verbindungen*, Wiley-VCH, Weinheim **2012**, 39.
- [23] Tews-Vogler, K; Bähnk, N. *99 Tipps Inklusion*, Berlin **2016**.
- [24] Burtscher, R.; Ditschek, E. J.; Ackermann, K.-E.; Kil, M.; Kronauer, M. Einleitung, in: *Zugänge zur Inklusion. Erwachsenenbildung, Behindertenpädagogik und Soziologie im Dialog*, Burtscher, R.; Ditschek, E. J.; Ackermann, K.-E.; Kil, M.; Kronauer, M. (Hrsg.), Bielefeld **2013**, 11–13.
- [25] Hirschberg, M; Lindmeier, C. Der Begriff „Inklusion“ – Ein Grundsatz der Menschenrechte und seine Bedeutung für die Erwachsenenbildung, in: *Zugänge zur Inklusion. Erwachsenenbildung, Behindertenpädagogik und Soziologie im Dialog*, Burtscher, R.; Ditschek, E. J.; Ackermann, K.-E.; Kil, M.; Kronauer, M. (Hrsg.), Bielefeld **2013**, 39–52.
- [26] Muñoz, V. Das Recht von Jungen und Mädchen mit Behinderungen auf Bildung und Erziehung, in: *Teilhabe ist das Ziel – Der Weg heißt: Inklusion. Beiträge zur Umsetzung der Inklusion in Oldenburg*, Lindemann, H. (Hrsg.), Weinheim/Basel **2016**, 17–28.
- [27] Lindemann, H. Teilhaberecht, Teilhabepflicht und Teilhabechance, in: *Teilhabe ist das Ziel – Der Weg heißt: Inklusion. Beiträge zur Umsetzung der Inklusion in Oldenburg*, Lindemann, H. (Hrsg.), Weinheim/Basel **2016**, 9–16.

- [28] Lindemann, H. Vorwort, in: *Teilhabe ist das Ziel – Der Weg heißt: Inklusion. Beiträge zur Umsetzung der Inklusion in Oldenburg*, Lindemann, H. (Hrsg.) Weinheim/Basel **2016**, 7.
- [29] Schmitt, C.; Schween, M. Carbenium ions as key structures – Practicing mechanistic thinking in a guided inquiry workshop. *J. Chem. Educ.* **2016**, zur Veröffentlichung eingerichtet.
- [30] Sicherheitsdatenbank GESTIS, <http://www.dguv.de/ifa/de/gestis/stoffdb/index.jsp#>, letzter Zugriff: 21.04.2016).

## **Danksagung**

Abschließend möchte ich mich bei all jenen bedanken, die durch ihre Unterstützung zur Entstehung der Arbeit beigetragen haben:

Mein besonderer Dank gilt Herrn DR. MICHAEL SCHWEEN für die interessante Themenstellung und die Betreuung der Arbeit sowie das Interesse und die stete Diskussionsbereitschaft.

Weiterhin danke ich ANDREAS TRABERT und CATHARINA SCHMITT für die Unterstützung bei der Anfertigung der Arbeit sowie die zahlreichen Anregungen und Diskussionen. Ebenfalls möchte ich mich für die Ermöglichung des Einsatzes der Modelle in den Workshops bedanken. CATHARINA SCHMITT danke ich außerdem für die Durchsicht der Arbeit.

Herrn PROF. DR. BERNHARD NEUMÜLLER danke ich für die Übernahme der Zweitkorrektur.

Herrn EGBERT MERKEL möchte ich für die Anfertigung der Modellbauteile danken.

Ebenso gilt mein Dank Herrn TOBIAS MAHNKE und Herrn HANNES WALTZ, die mir den Besuch des Chemieunterrichts an der Carl-Strehl-Schule und im Rahmen dessen auch den dortigen Einsatz der Modelle ermöglichten. Weiterhin möchte ich mich bei den Schülerinnen und Schülern des Grundkurses Chemie für das Testen und die zahlreichen Anregungen zur Verbesserung der Modelle bedanken.

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei VOLKER LINDENSTRUTH für die handwerklichen Tipps und Anregungen beim Bau der Modelle sowie die Bereitstellung der Werkzeuge bedanken. Darüber hinaus bedanke ich mich auch für das Erstellen der Fotografien und deren Bearbeitung.

Schließlich möchte ich mich bei REBECCA FREI für die Durchsicht und den Satz der Arbeit bedanken.

Tabelle: Benötigte Materialien zum Bau der Modelle

Molekül	$\sigma$ -Bindungen	$\pi$ -Bindungen	Stifte	Magneten	C-Kugeln	H-Kugeln	Cl-Kugeln
Allyl-Kation	7	1	3	2	3	5	-
Benzol (2x)	12	3	6	6	6	6	-
Benzyl-Kation	14	3	7	6	7	7	-
Diphenylmethyl-Kation	25	6	13	12	13	11	-
Triphenylmethyl-Kation	32	9	19	18	19	15	-
1,2-Dichlorbenzol (2x)	12	3	6	6	6	4	4
Gesamt	121	31	66	62	66	58	4
Material	Messing	Stahl	Stahl	Neodym	Holz	Holz	Holz
Länge	40 mm	29,9 mm	25 mm	5 mm	-	-	-
Durchmesser	3 mm	3 mm	4 mm	3 mm	20 mm	10 mm	25 mm

+ 10 tetraedrisch gebohrte C-Kugeln

**Versicherung:**

Ich versichere hiermit, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet und die Stellen, die anderen benutzten Druck- und digitalisierten Werken im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, mit Quellenangaben kenntlich gemacht habe. Sämtliche in der Arbeit verwendeten Abbildungen, Zeichnungen und Fotografien sind, sofern nicht anders angegeben, von mir selbst erstellt worden.

Marburg, den \_\_\_\_\_

Philipp Konrad Lindenstruth