

[9] Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Wissenschaft (Berlin) und Ministerium für Bildung, Jugend und Sport Land Brandenburg: Rahmenlehrplan Physik 7–10, 2016. Online: <http://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/rlp-online/c-faecher/physik/kompetenzentwicklung/> (letzter Zugriff: 29.7.2016)

[10] K. Möller, I. Hardy, A. Jonen, T. Kleickmann, E. Blumberg: Naturwissenschaften in der Primarstufe. Zur Förderung konzeptuellen Verständnisses durch Unterricht und zur Wirksamkeit von Lehrerfortbildungen. In: M. Prenzel & L. Allolio-Näcke (Hg.), *Untersuchungen zur Bildungsqualität von Schule*, Münster, Waxmann, 161–193, 2006.

[11] M. Lichtfeldt, J. Peuckert: Die Behandlung der Dichte im Unterricht, *NiU-Ph*, 41, 22–26 (1997).

[12] T. Größ-Niehaus, S. Schanze: Lernervorstellungen zum Dichte-Begriff, *Chemkon*, 17 (2), 71–74 (2010).

[13] S. Streller, M. Erb, C. Bolte: Das Berliner ProNawi-Projekt. Förderung naturwissenschaftlicher Kompetenzen durch die Projektgruppe Naturwissenschaften, *NiU-Ch*, 23, 130/131, 76–79 (2012).

[14] C. Frühinsfeld, D. Knebel: *Der Froschkönig*. In: M. Erb & S. Streller (Hg.), *Es wa(h)r einmal... Naturwissenschaften im Märchen*, Münster, Schöningh-Verlag, 57–77, 2014.

[15] M. Erb, S. Streller (Hg.), *Es wa(h)r einmal... Naturwissenschaften im Märchen*, Münster, Schöningh-Verlag, 2014.

[16] W. Junker, *Physik für Ahnungslose. Eine Einsteigerhilfe für Studierende*, Stuttgart, S. Hirzel Verlag, 2. Aufl. 2004.

[17] H. Fischler, M. Lichtfeld: *Teilchen und Atome*, *NiU-Ph*, 41, 4–8 (1997).

[18] H. Kuchling: *Taschenbuch der Physik*, Fachbuchverlag Leipzig, 21. akt. Aufl. 2014.

Anschriften der Verfasser

Dr. Sabine Streller

Freie Universität Berlin
Takustr. 3, 14195 Berlin
ist wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Arbeitsgruppe Didaktik der Chemie
sabine.streller@fu-berlin.de

Detlef Knebel

Oberstufenzentrum Kommunikations-, Informations- und Medientechnik (OSZ KIM) Berlin, ist Lehrer für Physik, Mathematik, ev. Religion und Darstellendes Spiel

Carbenium-Ionen – Schlüsselstrukturen für prozessorientierte Betrachtungen organisch-chemischer Reaktionen

N. Graulich und M. Schween

Carbenium-Ionen sind Schlüsselstrukturen in vielen organisch-chemischen Reaktionen. Die experimentelle Untersuchung des Auftretens und der Stabilität von Carbenium-Ionen ermöglicht eine Neuausrichtung der Betrachtungen organisch-chemischer Reaktionen in der Sekundarstufe II und kann Ausgangspunkt für die bisher fehlende Prozessorientierung in der Organischen Chemie sein.

Stichwörter: Carbenium-Ionen, reaktive Zwischenstufen, Übergangszustände

Einleitung

Reaktionsmechanismen der organischen Chemie scheinen sich still und leise aus dem Kanon der Sekundarstufe II verabschiedet zu haben.¹ Die Abkehr von den Reaktionsmechanismen wird einerseits sicherlich bedingt durch den Anspruch, Chemie möglichst alltagsnah zu unter-

richten, andererseits aber auch durch neue Sicherheitsbestimmungen, die den Umgang mit bestimmten Reagenzien und Lösungsmitteln in der Schule limitiert haben. Entgegen dieser allgemeinen Entwicklung stellt sich die Frage, ob Reaktionsmechanismen nicht doch einen prominenten Platz im Curriculum der Oberstufe verdient hätten, da sich insbesondere anhand von Mechanismen das „Wesen“ der Organischen Chemie wie an kaum einem anderen Gegenstand erarbeiten lässt. Die Frage besteht allerdings, wie Reaktionsmechanismen so neu inszeniert werden können, dass Lernende einen Zugang zu den Disziplin-typischen Denk- und Arbeitsweisen finden.

1 Perspektivwechsel von der Anorganischen zur Organischen Chemie

Anorganische Chemie als die Chemie aller Elemente und Organische Chemie als Chemie der Kohlenstoffverbindungen

sind zwar über den Wortstamm miteinander verwandt, bei genauerem Hinsehen wird aber schnell klar, dass sich Fragestellungen und Perspektiven beider Disziplinen bezüglich chemischer Reaktionen deutlich voneinander unterscheiden. Während die Anorganische Chemie, vereinfacht gesagt, den Blick auf das „Was“ richtet, also auf den Aufbau der Materie, fragt die Organische Chemie nach dem „Wie“, also nach den Prozessen, die bei Reaktionen im Detail ablaufen. In der Anorganik werden beispielsweise Elektronenübertragungsreaktionen mit Oxidationszahlen und Ladungen an Edukten und Produkten beschrieben, in der Organik hingegen werden Elektronenbewegungen symbolisch mit gebogenen Pfeilen ausgedrückt, und es gibt Repräsentationen für Übergangszustände und reaktive Zwischenstufen. Der an diesem Beispiel so offenkundige Unterschied von einer Produkt- hin zu einer prozessbezogenen bzw.

¹ So ist z. B. in den Richtlinien und Lehrplänen für die Sekundarstufe II für Nordrhein-Westfalen von 1999 auf S. 26 f. noch davon die Rede, dass die Formulierung eines Reaktionsmechanismus [...] der Schulung des Modelldenkens dienen und zu einem vertieften Verständnis der verschiedenen Reaktionstypen führen kann. Ferner war die Aufklärung eines Reaktionsmechanismus – eventuell auch unter Einbeziehung von Ergebnissen moderner analytischer Verfahren, z. B. der IR- und NMR-Spektroskopie – [...] für den Leistungskurs vorgesehen. Im Kernlehrplan Chemie aus dem Jahr 2014 fehlt der Begriff „Reaktionsmechanismus“ hingegen vollends [1].



Abb. 1: Wofür sich Anorganische und Organische Chemie so interessieren ...

Karikaturen: M. Schween, H. Barth, N. Graulich

mechanistischen Betrachtung von Reaktionen ist essentiell, um das „Wesen“ der Organischen Chemie verstehen zu lernen (Abb. 1).

Von Schülerinnen und Schülern fordert dies, ganz neue Fragen an chemische Reaktionen zu stellen. Das gelingt ihnen oft aber nur sehr schwer, denn das bis in der Sekundarstufe I betrachtete Standard-Reaktionsschema $A + B \rightarrow C + D$ bestimmt erfahrungsgemäß nach wie vor ihr Denken. Allerdings muss sich mit dem curricularen Übergang von der Anorganischen zur Organischen Chemie der Schwerpunkt auf die Prozesse verschieben, die sich hinter dem Reaktionspfeil verbergen.²

Der Standardweg zur Erkenntnisgewinnung in der Organischen Chemie der Sekundarstufe II beim Arbeiten mit Mechanismen führt allerdings in der Praxis, sofern sie überhaupt Gegenstand des Unterrichts sind, über die phänomenologische Betrachtung der entstehenden Produkte. Typische Beispiele dafür sind Geruchsnachweise von Aromastoffen bei der Veresterung von Carbonsäuren, HBr-Nachweisreaktionen durch Indikatorpapier bei der radikalischen Bromierung, der Nachweis von Kondensationsprodukten bei Polykondensationsreaktionen u. a. m. Die Nachweise von Produkten oder Nebenprodukten erlauben jedoch in keinem Fall Rückschlüsse auf den Reaktionsverlauf im Detail oder gar dessen Einflussfaktoren. Verglichen mit der „anorganischen Perspektive“ auf Reaktionen ändert sich für die Schülerinnen und Schüler dadurch nicht viel. Die Produkte oder die entstehenden Stoffklassen stehen weiterhin im Fokus der Betrachtungen. Dies hat zur

Folge, dass Reaktionen eher als singuläre Ereignisse angesehen werden und das Aufspüren mechanistischer Gemeinsamkeiten zwischen Reaktionen, wie z. B. der Verlauf über vergleichbare Zwischenstufen, Zufallsbefunde bleiben. Ohne eine explizite schulgerechte Analytik und beobachtbare Effekte an Zwischenstufen lassen sich allerdings weder Aussagen über Reaktionsverläufe untersuchen noch grundlegende chemische Konzepte wie Mesomerie oder Hyperkonjugation erklären und experimentell belegen.

Die Kernfragen lauten also: Wie gelingt es, dass sich der Blick der Lernenden nicht nur auf die Endprodukte richtet, sondern auf das „Dazwischen“, auf den Reaktionsverlauf? Wie lassen sich die in der Sekundarstufe II behandelten Reaktionen fundiert mechanistisch betrachten und das konzeptbasierte Denken der Schülerinnen und Schüler fördern?

2 Carbenium-Ionen als Ausgangspunkt mechanistischer Betrachtungen

Für eine experimentelle Betrachtung organisch-chemischer Reaktionen, die explizit den Weg zum Produkt beleuchtet, eignet sich die Beobachtung der reaktiven Zwischenstufen, die bei einem Großteil organisch-chemischer Reaktionstypen auftreten: Carbenium-Ionen, Carbanionen, Carbene und Radikale. Während die beiden letzteren mit schulischer Analytik experimentell kaum zugänglich sind, lassen sich hingegen ausreichend langlebige Carbanionen (z. B. Enolat-Ionen) und Carbenium-Ionen durch Leitfähigkeitsmessungen und/oder das Auftreten von Farbigkeit untersuchen (z. B. durch Entstehen ausgedehnter π -Systeme). Gerade Carbenium-Ionen sind Zwischenstufen vieler, nach unserer Einschätzung in Leistungskursen der Sekundarstufe II zu behandelnder wichtiger organisch-chemischer Reaktionen (siehe Abb. 2). Sie sind

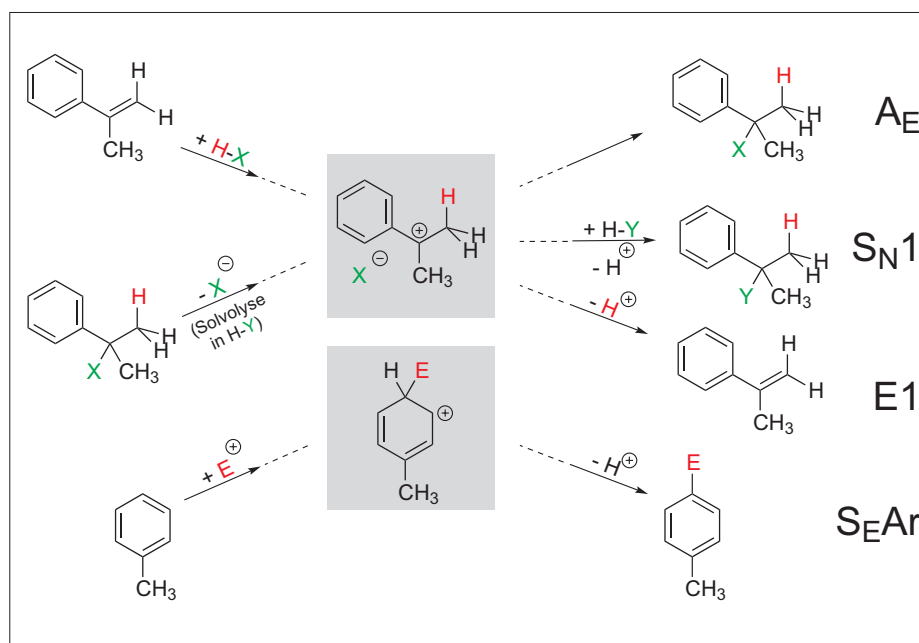


Abb. 2: Carbenium-Ionen als Zwischenstufen wichtiger Reaktionen

² Übrigens verfolgen selbst fortgeschrittene Studierende beim Postulieren von Mechanismen noch die Strategie, Elektronen ungeachtet fachlicher Korrektheit solange zu verschieben, bis sie zum gewünschten Produkt gelangen [2].

Umlagerungen von Carbenium-Ionen

Die unterschiedliche thermodynamische Stabilität von möglichen Carbenium-Ionen verursacht häufig Umlagerungsreaktionen wie sigmatrope [1,2]-Alkyl-, -Aryl- oder -Hydrid-Verschiebungen, indem beispielsweise aus einem thermodynamisch instabileren Carbenium-Ion ein stabileres entsteht. Aus Sicht der Synthese sind sigmatrope Umlagerungen als Möglichkeit immer dann mit zu berücksichtigen, wenn die Entstehung von Carbenium-Ionen denkbar ist. Ist Substrat-, Mechanismus- und Solvens-bedingt die Bildung von Sextett-Zentren an vormaligen Stereozentren möglich, so ist zudem immer mehr oder weniger Racemisierung die Folge. – In der gymnasialen Lehrerbildung können beide Sachverhalte gegebenenfalls Erweiterungen darstellen.

Kasten 1: Umlagerungen von Carbenium-Ionen (zusammengestellt von den Autoren)

z. B. Schlüsselstrukturen bei Konkurrenzreaktionen von unimolekularen nukleophilen Substitutionsreaktionen und Eliminierungen nach S_N1 bzw. $E1$ an Halogenalkanen, bei elektrophilen Additionsreaktionen von Brønstedsäuren an Alkene sowie (in Form von σ -Komplexen) bei elektrophilen Substitutionen an Aromaten (s. Kasten 1).

Carbenium-Ionen werden durch Hyperkonjugation mit benachbarten Alkylgruppen (+ I-Effekte) oder durch Konjugation mit Alkenyl- oder Arylgruppen (+ M-Effekte), aber auch durch Heteroatome wie Sauerstoff und Stickstoff in α -Position stabilisiert.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass durch das Auftreten von Carbenium-Ionen in vielen Reaktionen mechanistische Ähnlichkeiten zwischen diesen bestehen und Effekte oft mit denselben Konzepten zu deuten sind (s. Kasten 2 on-

line). Das Verständnis dieser Effekte und die Einflussfaktoren auf die Bildung und die Stabilität von Carbenium-Ionen ist daher eine wichtige Grundlage, um Vorhersagen über Reaktionsverläufe treffen zu können.

3 Das Carbenium-Ion als Schlüsselstruktur zu den Schlüsselkonzepten der Organischen Chemie

Carbenium-Ionen sind zweifellos Schlüsselstrukturen der Organischen Chemie. Doch was bedeutet dies aus fachdidaktischer Sicht? Welche Rolle spielen sie für die Erarbeitung und Anwendung von Schlüsselkonzepten der Organischen Chemie und wie lässt sich dies spiralcurricular an die Basiskonzepte anknüpfen [3]? Carbenium-Ionen sind als „reaktive Zwischenstufen“ zunächst einmal organisch-chemische Strukturen, d. h. echte Teilchen, die man auf der makroskopischen Ebene

beobachten und mit verschiedenen analytischen Methoden untersuchen kann, wenn sie ausreichend lang existieren. Für den Lernprozess ist es wichtig, dies sowie auf der Konzeptebene die Struktur-Eigenschaftsbeziehungen des Teilchens unter Anwendung geeigneter Strukturrepräsentationen ausführlich zu thematisieren (s. Abb. 3). Carbenium-Ionen sind Elektrosenxtett-Teilchen, in denen das zentrale Kohlenstoffatom nur drei σ -Bindungen trägt. Aus diesem Sachverhalt sollten die Schülerinnen und Schüler – abhängig von ihren Voraussetzungen (nach dem Orbitalmodell, aber auch nach dem VSEPR-Modell) unter Umständen unter Nutzung von 3D-Modellen – eine planare Struktur ableiten können.

Ferner sollten sie herleiten können, dass Carbenium-Ionen *Elektronendefizit-Teilchen* und damit relativ instabile *Hochenergieteilchen* sind, da sie von der Oktett-Regel abweichen. Mit dieser Betrachtungsweise knüpfen Lernende gleichermaßen an zwei Basiskonzepte an, das Energie-Konzept sowie das Donor-Akzeptor-Konzept: Im Detail ist an dieser Stelle – sozusagen als Grundprinzip von Teilchenstabilisierung – zu erarbeiten, dass Elektronen-sextett-Teilchen nur existieren können, wenn ihr Elektronenpaar-Mangel durch geeignete *Elektronen-liefernde* Gruppen in der Nachbarschaft wenigstens teilweise kompensiert werden kann. Am wirkungsvollsten geschieht dies, wenn die positive Ladung des Sextett-Zentrums durch nachbarständige besetzte π -Orbitale *delokalisiert* werden kann. Die Basissätze der Orbitale der aromatischen π -Elektronen (s. Abb. 4, links) sind nämlich *parallel* zum leeren p-Orbital am Sextett-Zentrum ausgerichtet und können daher optimal mit diesem wechselwirken.

Auf der Ebene der Strukturrepräsentation lässt sich diese Form der Stabilisierung durch die Formulierung von *Grenzformeln* darstellen (unter Verwendung von Mesomerie- und gebogenen Pfeilen). Die Delokalisation der positiven Ladung in der Repräsentation mesomerer Grenzformeln sollte für Schülerinnen und Schüler darüber hinaus ein Synonym für *Strukturstabilisierung* werden. Als deutlich weniger günstig ist von Lernenden folgerichtig der Fall zu bewerten, bei dem der Elektronenpaar-Mangel am Sextett-Zentrum nur durch benachbarte besetzte σ -Orbitale kompensiert wird, also durch *Hyperkonjugation* (auch Induktiver Effekt, kurz I-Effekt). Im Unterschied zur Mesomerie bleibt aus Sicht der Lernenden die

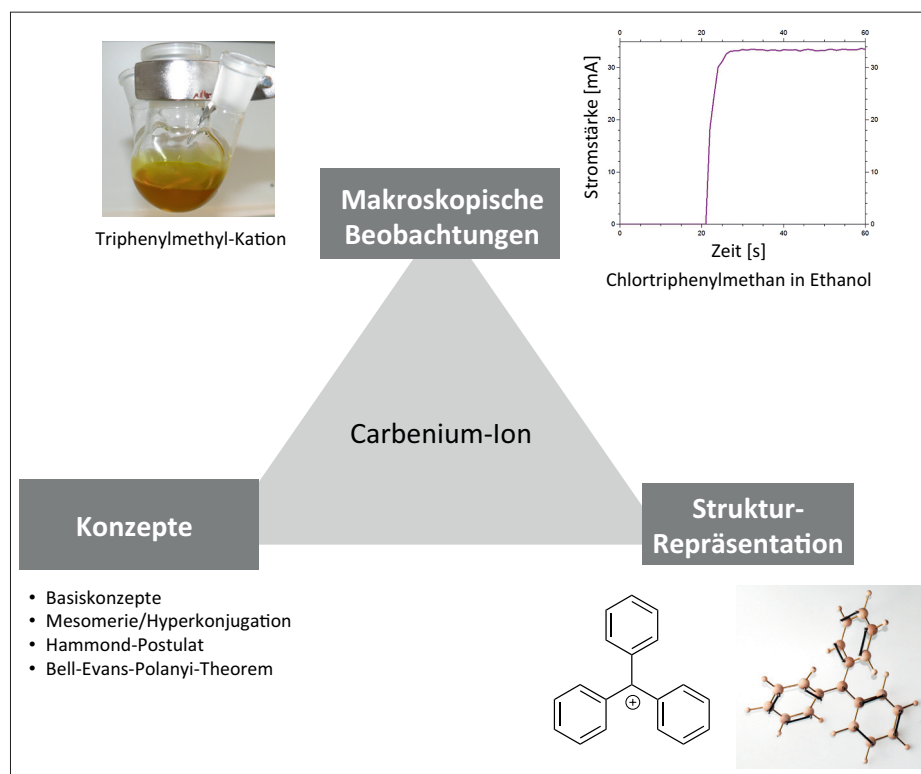


Abb. 3: Ebenen der Betrachtung organisch-chemischer Reaktionen am Beispiel der Solvolyse von Chlortriphenylmethan in Ethanol

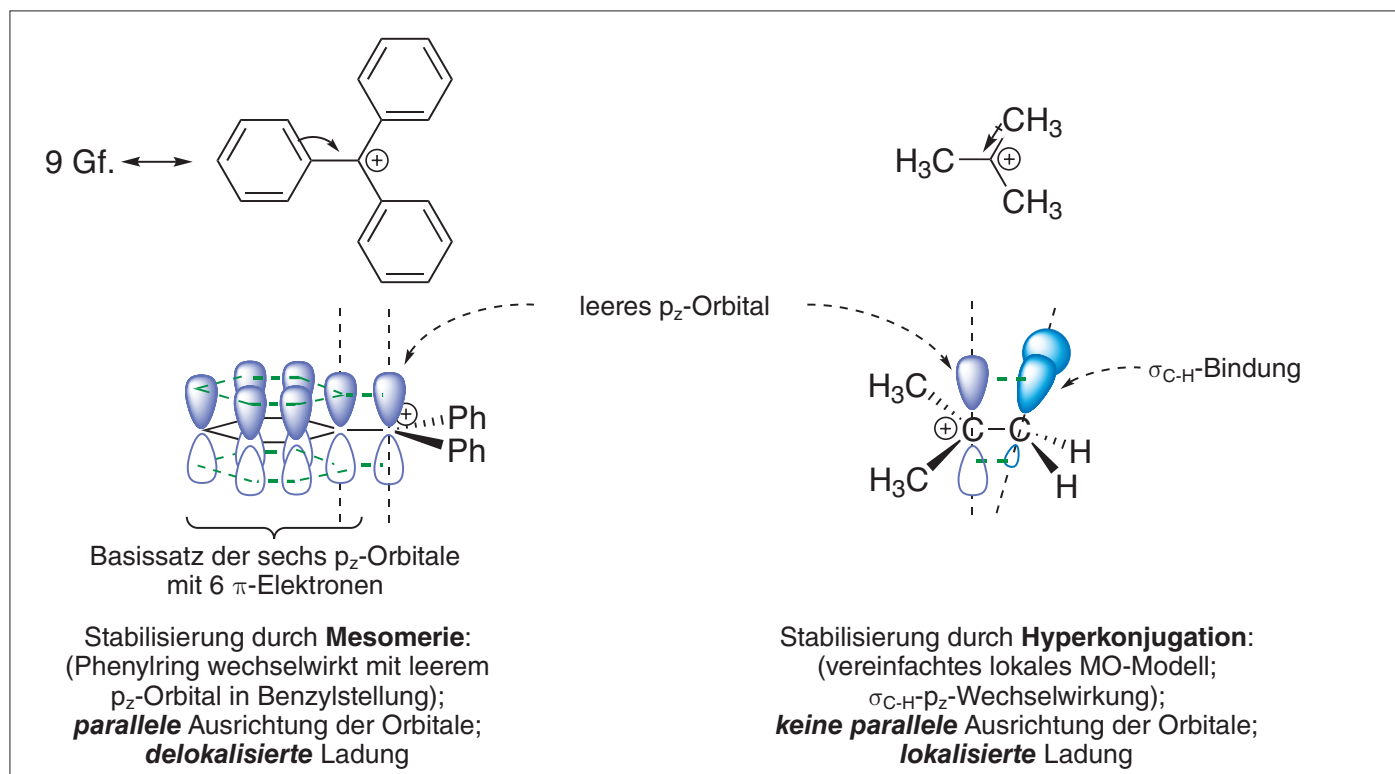


Abb. 4: Orbitalwechselwirkung bei mesomerer bzw. hyperkonjugativer Stabilisierung von Carbenium-Ionen

Ladung nun *lokalisiert*, und auch die geometrische Wechselwirkung der *nicht parallel* stehenden Orbitale ist weniger günstig (Abb. 4, rechts). Bis hierher ist die Betrachtung von Carbenium-Ionen mit Lernenden eine thermodynamische *Struktur-Betrachtung*, die mit einer energetischen Bewertung von Teilchenstabilitäten verknüpft ist. Auf dieser Stufe ist es möglich, anhand gezeichneter Struktur-Repräsentationen vorherzusagen zu können, dass z. B. Triphenylmethyl-Kationen als mit 10 Grenzformeln zu beschreibende Teilchen stabiler und energieärmer sein sollten als Diphenylmethyl-Kationen (mit nur sieben Grenzformeln). Ebenso lässt sich vorhersagen, dass Triphenylmethyl-Kationen stabiler sein sollten als *tert*-Butyl-Kationen, da letztere nur durch weniger wirksame Hyperkonjugation (neun „+ I-Effekte“) stabilisiert werden (Abb. 4). Doch wie lassen sich diese auf Struktur- und Konzept-Betrachtungen basierenden Hypothesen experimentell überprüfen?

Als Hochenergeteilchen werden Carbenium-Ionen typischerweise in *endergonischen* Teilschritten gebildet. Wie hoch allerdings der Übergangszustand, der für die Reaktionsgeschwindigkeit maßgeblich ist, liegt, ist nicht messbar, da sich jeweils wesentlich weniger Teilchen im Übergangszustand befinden als Carbenium-Ionen existieren, und sich diese daher der direkten Beobachtung entziehen. Wie aber kann man das Dilemma ange-

hen, dass man diese Information zum Abschätzen der Reaktionsgeschwindigkeit benötigt? Die Antwort darauf liefern *Konkurrenzexperimente*. Setzt man beispielsweise Chlortriphenylmethan und *tert*-Butylchlorid denselben Solvolysebedingungen einer S_N1 - bzw. E1-Reaktion aus (Lösen in protisch-polaren Lösungsmitteln wie z. B. Alkoholen), so ist zu beobachten, dass ersteres erheblich rascher reagiert. Damit weiß man, dass der Übergangszustand zum Trityl-Kation *niedriger* sein muss als der des *tert*-Butyl-Kations und diese energetische Abstufung auch der energetischen Abstufung der Carbenium-Ionen entspricht. Auf Leistungskursniveau könnte man diese Beobachtung bzw. Deutung auf das Hammond-Postulat und das Bell-Evans-Polanyi-Theorem zurückführen. Sie sagen zusammengefasst aus, dass in vergleichbaren endergonischen Reaktionen die Übergangszustände *spät* auf der Reaktionskoordinate durchlaufen werden und sowohl *strukturell* als auch *energetisch* eher den *Produkten* ähneln. Vor diesem Hintergrund ist der Schluss zulässig – und dies steht im Einklang mit experimentellen Ergebnissen – dass stabilere Produkte, z. B. ein stabileres Carbenium-Ion, über einen niedrigeren Übergangszustand und daher *rascher* gebildet werden als weniger stabile (s. Abb. 5).

In einem Chemie-Grundkurs hingegen wäre es sicher ausreichend, über die beobachtbare Bildungsgeschwindigkeit

Rückschlüsse auf die Stabilität der im Konkurrenzexperiment zu vergleichenden Carbenium-Ionen abzuleiten, ohne dass man hier das Hammond-Postulat oder das Bell-Evans-Polanyi-Theorem bemühen müsste.

Gelingen den Lernenden diese Verknüpfungen zwischen Struktur-Repräsentationen, Konzepten und makroskopischen Beobachtungen am Paradebeispiel der Carbenium-Ionen, haben sie damit einen prozessorientierten Zugang zur Organischen Chemie erarbeitet, den sie zukünftig in neuen mechanistischen Zusammenhängen immer wieder nutzen können. Damit überwinden sie letztlich auch die eingangs beschriebene wenig produktive Produktorientierung bzw. das Auswendiglernen von singulären Reaktionen.

4 Neue Experimente mit Carbenium-Ionen

Zur Beobachtung von Carbenium-Ionen als Zwischenstufen in verschiedenen Reaktionen (s. Abb. 2) ist bereits eine Reihe neuer Experimente entwickelt und beschrieben worden. Das erste Beispiel dafür beinhaltet die gezielte Erzeugung unterschiedlich stark mesomeriestabilerer Trityl- und Benzhydrylkationen und die Korrelation der Teilchenstabilitäten mit ihrer Bildungsgeschwindigkeit [4]. Auch zum Verständnis der Markownikow-Regel bei der elektrophilen Addition

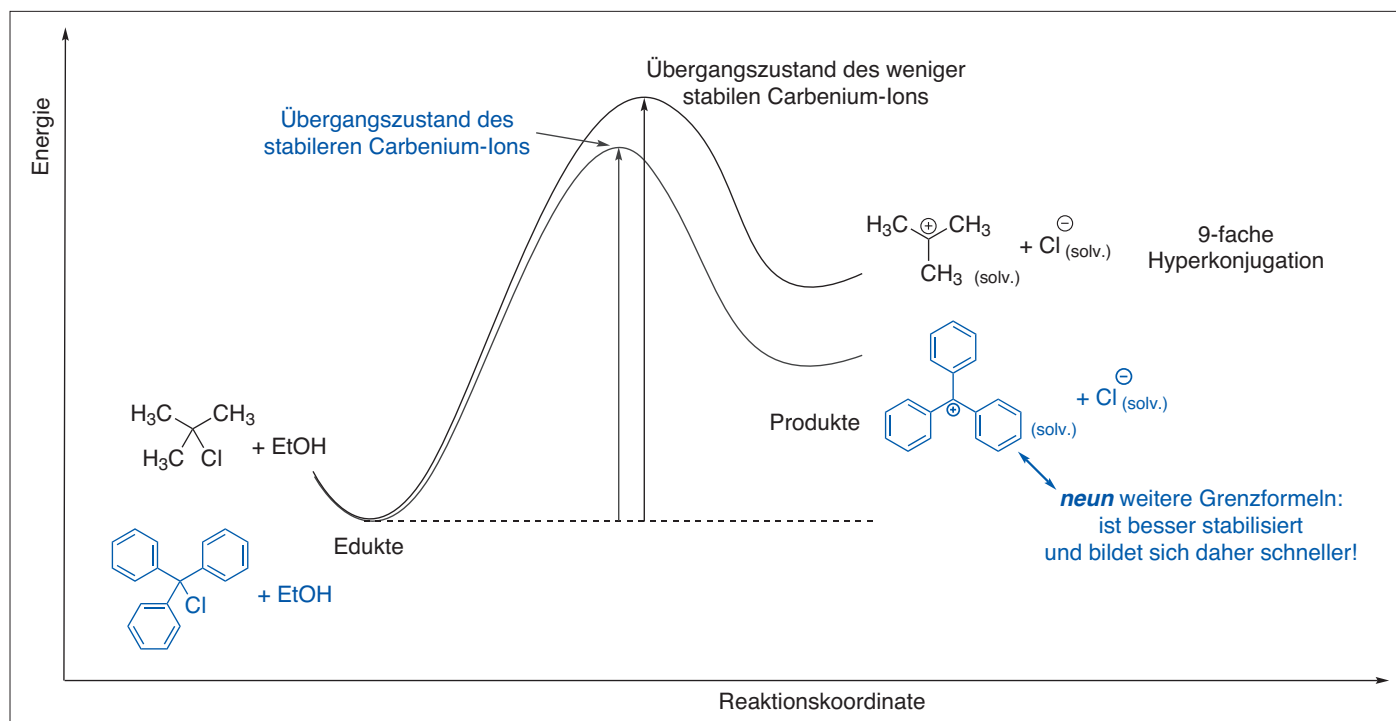


Abb. 5: Anwendung des Hammond-Postulats und des Bell-Evans-Polanyi-Theorems auf die Bildungsgeschwindigkeit unterschiedlich stabiler Carbenium-Ionen

von Brønsted-Säuren an unsymmetrisch substituierte Alkene [5] sowie zur Erzeugung und Beobachtung stabiler σ -Komplexe bei elektrophilen aromatischen Substitutionsreaktionen [6] sind bereits neue Experimente entwickelt worden. In allen Fällen erwiesen sich Konkurrenzexperimente als geeignetes Mittel, um Ursachen für unterschiedliche Reaktionsgeschwindigkeiten zu diskutieren und dabei die dahinterliegenden Konzepte zu erlernen oder anzuwenden. In einem weiteren aktuellen Beispiel wird die unterschiedliche Stärke mesomerer und induktiver Effekte bei S_N1 -Reaktionen beobachtet und auf ihre Ursachen zurückgeführt [7].

Fazit und Ausblick

Carbenium-Ionen als Schlüsselstrukturen eignen sich hervorragend, um den anspruchsvollen Perspektivenwechsel Lernender von einer vorrangig produktorientierten hin zu einer prozessorientierten Betrachtung chemischer Reaktionen zu bewältigen. Indem sie diesen Perspektivenwechsel vollziehen, erwerben Lernende zugleich einen Einblick in das „Wesen“ der Organischen Chemie bzw. ihr Disziplin-typisches Problemlöse-Vorgehen. Darüber hinaus lernen sie, dass wichtige Reaktionen mechanistisch über Schlüsselstrukturen und Schlüsselkonzepte miteinander verknüpft sind und so besser verstanden werden können.

Neue Experimente mit schulangemessener Analytik sind zwar die notwendige Bedingung dafür, dass Carbenium-Ionen

ihre Stärke als Schlüsselstrukturen organisch-chemischer Reaktionen ausspielen können, allerdings reicht dies alleine nicht aus. Ganz wesentlich ist vielmehr, und das gilt für andere Schulexperimente gleichermaßen, dass für die Lernenden Prozesse der Erkenntnisgewinnung immer in enger Verschränkung von Experiment, Konzept(-vernetzung) und Strukturrepräsentation inszeniert werden [8]. Nur so kommt den Experimenten die ihnen gebührende didaktische Funktion im Erkenntnisprozess zu, der Lernenden das Beobachten, Begründen und Schlussfolgern auf der Grundlage experimenteller Ergebnisse ermöglicht.

Nicht zuletzt wird dadurch bei den Schülerinnen und Schülern vernetztes, mechanistisches bzw. konzeptionelles Denken gefördert, das anschlussfähig an die Anforderungen von Chemie-Bachelor- und -Lehramtsstudiengängen ist. ■

Literatur

- [1] Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II – Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen (1999), Ritterbach Verlag und Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen (2014), Ministerium für Schule und Weiterbildung.
 [2] Bhattacharyya, G., Bodner, G. M., (2005), "It Gets Me to the Product": How Students Propose Organic Mechanisms, *J. Chem. Educ.*, **82**, 1402–1407.
 [3] KMK-Bildungsstandards im Fach Chemie für den mittleren Schulabschluss, vom

16.02.2004, Luchterhand.

- [4] C. Schmitt, O. Wißner, M. Schween, (2013), Carbenium-Ionen als reaktive Zwischenstufen. (Experimenteller) Zugang zu einem tiefergehenden Verständnis organischer Reaktionen. *CHEMKON 20* (2), S. 59–65.
 [5] Bruch, M., Schmitt, C., Schween, M. (2015). Die Markovnikov-Regel verstehen ... Neue Schlüsselexperimente: die Addition von Wasser an Alkene in zwei getrennten Schritten. *PdN-ChiS Heft 3/64*, 14–18.
 [6] Vorwerk, N., Schmitt, C., Schween, M. (2015). Elektrophile Substitutionsreaktionen an Aromaten verstehen – G-Komplexe als (experimentelle) Schlüsselstrukturen. *CHEMKON 22* (2), 59–68.
 [7] Schmitt, C., Seel, L., Schween, M. (2016). Organische Chemie verstehen – Schlüsselexperimente zu S_N1 -Reaktionen. Publikation in Vorbereitung.
 [8] Schmitt, C., Schween, M. (2016). Carbenium ions as a key structure – Understanding organic chemistry by interlocking theory and practice. Publikation in Vorbereitung.

Anschriften der Verfasser

Jun.-Prof. Dr. N. Graulich
 Justus-Liebig Universität Gießen
 Institut für Chemiedidaktik
 Heinrich-Buff Ring 17, 35392 Gießen
 Nicole.Graulich@didaktik.chemie.uni-giessen.de

Akad.-Dir. Dr. M. Schween
 Philipps-Universität Marburg
 AG Fachdidaktik Chemie
 Hans-Meerwein-Straße 4, 35043 Marburg
 schweenm@staff.uni-marburg.de