|  |
| --- |
| Maturaarbeit 2011 |
| Ein Leitprogramm der charakteristischen Reaktionen der organischen Chemie |
| Jacqueline Waldvogel Eichhof 115  8234 Stetten SH |

*Betreut durch:*Dr. Bernadette Stypinski

.

Kantonsschule Schaffhausen

Klasse 4nc

Fach Chemie

HS 2011

*Eingereicht am:* 06.12.2011

Inhaltsverzeichnis

[Vorwort 2](#_Toc310541950)

[Motivation 2](#_Toc310541951)

[Ein kleiner Überblick und die Funktionsweise 3](#_Toc310541952)

[Substitutions-Reaktionen 4](#_Toc310541953)

[Radikale Substitution 4](#_Toc310541954)

[Wo man radikale Substitution beobachten kann 5](#_Toc310541955)

[Experiment zur radikaler Substitution 5](#_Toc310541956)

[Aufgaben zu radikalen Substitutionen 5](#_Toc310541957)

[Elektrophile Substitution 6](#_Toc310541958)

[Der ±I- und ±M-Effekt 7](#_Toc310541959)

[Besondere Arten von elektrophiler Substitution 9](#_Toc310541960)

[Experiment zur elektrophilen Substitution 9](#_Toc310541961)

[Aufgaben zu elektrophile Substitutionen 9](#_Toc310541962)

[Die KKK-Regel und die SSS-Regel 10](#_Toc310541963)

[Aufgaben zur KKK-Regel und SSS-Regel 10](#_Toc310541964)

[Nucleophile Substitution 11](#_Toc310541965)

[Einflüsse auf die Reaktionsgeschwindigkeit 12](#_Toc310541966)

[Experiment zur nucleophilen Substitution 13](#_Toc310541967)

[Aufgaben zu nucleophilen Substitutionen 13](#_Toc310541968)

[Eliminierungs-Reaktionen 14](#_Toc310541969)

[Nucleophile Substitution ↔ Eliminierungs-Reaktionen 15](#_Toc310541970)

[Aufgaben zu Eliminierungs-Reaktionen 15](#_Toc310541971)

[Additionsreaktionen 16](#_Toc310541972)

[Elektrophile Addition 16](#_Toc310541973)

[Experimente zur Additionsreaktion 18](#_Toc310541974)

[Aufgaben zu Additionsreaktionen 18](#_Toc310541975)

[Zusatzkapitel: Redox-Reaktionen 19](#_Toc310541976)

[Akzeptor-Donor-Reaktion 19](#_Toc310541977)

[Oxidationszahlen 19](#_Toc310541978)

[Ermittlung der Oxidationszahl 19](#_Toc310541979)

[Aufgaben zur Oxidationszahl 20](#_Toc310541980)

[Aufstellen einer Redox-Reaktionsgleichung 20](#_Toc310541981)

[Aufgaben zu Redox-Reaktionsgleichungen 21](#_Toc310541982)

[Die Redox-Reihe 21](#_Toc310541983)

[Aufgaben zu Redox-Reaktionen 22](#_Toc310541984)

[Experiment zu Redox-Reaktionen 22](#_Toc310541985)

[Redox-Reaktionen in der organischen Chemie 23](#_Toc310541986)

[Experiment zur Oxidation eines Alkohols 24](#_Toc310541987)

[Aufgaben zu Oxidationen von Alkohole 24](#_Toc310541988)

[Anwendungen von Redox-Reaktionen 24](#_Toc310541989)

[Definitionen 25](#_Toc310541990)

[Lösungen 26](#_Toc310541991)

[Experiment zu radikaler Substitution 26](#_Toc310541992)

[Aufgaben zur radikaler Substitution 26](#_Toc310541993)

[Experiment zur elektrophilen Substitution 27](#_Toc310541994)

[Aufgaben zur elektrophilen Substitution 27](#_Toc310541995)

[Aufgaben zur KKK-Regel und SSS-Regel 27](#_Toc310541996)

[Experiment zur nucleophilen Substitution 27](#_Toc310541997)

[Aufgaben zur nucleophilen Substitution 27](#_Toc310541998)

[Aufgaben zu Eliminierungs-Reaktionen 28](#_Toc310541999)

[Experimente zu Additions-Reaktionen 28](#_Toc310542000)

[Aufgaben zu Additions-Reaktionen 28](#_Toc310542001)

[Aufgaben zur Oxidationszahl 28](#_Toc310542002)

[Aufgaben zu Redox-Reaktionsgleichungen 29](#_Toc310542003)

[Aufgaben zu Redox-Reaktionen 30](#_Toc310542004)

[Experimente zu Redox-Reaktionen 30](#_Toc310542005)

[Experiment zur Oxidation eines Alkohols 31](#_Toc310542006)

[Aufgaben zu Oxidationen von Alkohole 31](#_Toc310542007)

[Schlusswort 32](#_Toc310542008)

[Danksagung 32](#_Toc310542009)

[Quellenangabe 33](#_Toc310542010)

Vorwort

In diesem Kapitel erfahren Sie, warum ich dieses Leitprogramm geschrieben habe und wie es funktioniert. Zudem erhalten sie einen kurzen Überblick über den Inhalt der Arbeit.

Motivation

Schon seit langer Zeit war mir klar, dass ich meine Maturaarbeit in Chemie schreiben möchte. Es gab nur etwas zu klären: Welches Thema soll ich bearbeiten? Verschiedenste Fragen schwirrten mir im Kopf herum, aber auf ein Thema konnte ich mich nicht festlegen. Als ich dann auf die Idee gebracht wurde, ein Leitprogramm zu schreiben, war ich im ersten Moment nicht so begeistert. Die anfänglichen Zweifel verschwanden nach kurzem Nachdenken und ich nahm dieses Herausforderung gerne an.

Das Thema der charakteristischen Reaktionen der organischen Chemie habe ich gewählt, weil es das einzige, grosse Thema ist, über das ich noch nichts wusste. So musste ich die ganze Theorie selbst lernen. Dieses Selbststudium eines doch relativ komplexen Kapitels der organischen Chemie war nicht einfach, aber gleichzeitig auch sehr spannend.

Ein kleiner Überblick und die Funktionsweise

Dieses Leitprogramm beschäftigt sich mit den meisten charakteristischen Reaktionen der organischen Chemie:

* Substitutions-Reaktionen
  + Radikale Substitution
  + Elektrophile Substitution
  + Nucleophile Substitution
* Eliminierungsreaktion
* Additionsreaktion

Nach dem Kapitel der Additionsreaktionen ist noch ein *Zusatzkapitel* über die Redox-Reaktionen angeheftet, welches bei genügender Zeit bearbeitet werden kann.

Nach dem Zusatzkapitel finden Sie die Definitionen einiger Begriffe. Danach kommt das Lösungs-Kapitel, wo Sie die Antworten zu allen gestellten Fragen zu den Experimenten und auch die Lösungen der Aufgaben finden.

Um dieses Leitprogramm bearbeiten zu können, sollten die Lernenden insbesondere die Stoffklassen der organischen Chemie kennen und auch anwenden können. Auch ein Grundwissen der Chemie muss vorhanden sein: Die verschiedenen Bindungen, chemische Eigenschaften, wie Ionisierungsenergie, Elektronegativität, Periodensystem und seine Gruppen etc. Ist dieses Vorwissen vorhanden, sollte es kein Problem sein, die Texte und Begriffe richtig zu verstehen.

Die Lernenden können dieses Leitprogramm im Selbststudium durcharbeiten und sich danach auch selbstständig auf die Prüfung vorbereiten. Selbstverständlich steht ihnen während dieser Zeit immer eine Lehrperson zur Seite, die Fragen beantwortet und Unklarheiten beseitigt.

Zur erleichterten Bearbeitung des Leitprogramms gehören folgende Punkte:

* Die Reihenfolge der einzelnen Kapitel sollte eingehalten werden.
* Es sollten alle Experimente zum richtigen Zeitpunkt durchgeführt werden, da teilweise auf deren Erkenntnisse aufgebaut wird.
* Die Aufgaben zum Kapitel sollten zum richtigen Zeitpunkt gelöst werden.
* Die Antworten zu den gestellten Fragen sollten schriftlich festgehalten werden. Dies erleichtert das Lernen und die Prüfungsvorbereitung.

Substitutions-Reaktionen

Bei Substitutions-Reaktionen wird, wie der Name schon sagt, ein Wasserstoffatom durch ein anderes Atom oder eine Atomgruppe ersetzt. Das neu vorhandene nennt man Substituent oder funktionelle Gruppe.

# Radikale Substitution[[1]](#footnote-1)

Bei Bestrahlung mit energiereichem Licht (oder bei sehr hohen Temperaturen) reagieren **Alkane** mit **Halogenen** nach dem Prinzip einer Kettenreaktion, der **Radikal-Kettenreaktion SR**:  
Durch die Bestrahlung mit dem Licht spaltet sich das Halogenmolekül homolytisch in seine Atome, wobei zwei sehr reaktive Radikale entstehen. Trifft eines dieser beiden Radikale auf ein Alkan, so wird ein Wasserstoff-Atom vom Alkan abgespalten, welches sich dann mit dem Halogen-Radikal verbindet. Dabei entsteht ein Radikal vom ehemaligen Alkan. Stösst dieses Alkan-Radikal nun auf ein Halogen-Molekül, so spaltet sich das Halogen in seine zwei Atome und eines dieser Halogenatome verbindet sich mit dem Alkan-Radikal. Das übrig gebliebene Halogen-Radikal kann wieder auf ein Alkan treffen und so wiederholt sich der ganze Kreislauf.   
Das entstandene Produkt der Reaktion kann nach demselben Prinzip weiterreagieren. Die radikale Substitution ist also keine gute Methode um ein Halogenalkan herzustellen.

Diese Kettenreaktion verläuft solange, bis keine Radikale mehr da sind. Der Kettenabbruch tritt also nur ein, wenn sich zwei Radikale zu einem Molekül zusammenschliessen.   
Bei Abbruchreaktionen, die diese Kettenreaktionen stoppen können, kombinieren sich zwei Radikale zu einem Molekül. Dieses Molekül zerfällt jedoch sofort wieder in die zwei Radikale, falls die Energie, die beim Zusammenschluss frei wird, nicht abtransportiert wird. Dazu müssen jedoch drei Teile zusammenstossen, wobei das dritte Teilchen die freigesetzte Energie in Form von kinetischer Energie aufnimmt. Weitaus häufiger treffen zwei Radikale an der Gefässwand zusammen, welche dann die freigesetzte Energie aufnimmt.

Zum chemischen Hintergrund und zur Erklärung der Reaktionen gibt es nicht viel zu sagen. Auch hier möchten die Atome die Oktettregel erfüllen, um so möglichst stabil zu werden. Dass die Elektronenpaarbindung eine vergleichsweise einfache Möglichkeit ist, die Oktettregel zu erfüllen, haben Sie schon früher gesehen.   
Das energiereiche Licht, das zum Start der Reaktion eingesetzt wird, bringt die nötige Energie mit, die kovalente Bindung zwischen den zwei Halogen-Atomen zu spalten.

##### Beispiel einer Radikal-Kettenreaktion: Brom reagiert mit Methan

Start:   
Kettenfortpflanzung:   
   
**Reaktion: **Abbruch:   
   
 

Weiterreaktion:   
   
 

## 

## Wo man radikale Substitution beobachten kann

* **Autooxidation mit Sauerstoff:** verantwortlich für die Alterung von Gummi an der Luft, Härtung von Lacken und das Ranzigwerden von Fetten

### C:\Dokumente und Einstellungen\Anwender\Lokale Einstellungen\Temporary Internet Files\Content.IE5\CIFJ69KK\MC900238955[1].wmfExperiment zur radikaler Substitution

**Brom reagiert (nicht immer) mit Heptan***Tragen Sie bei diesem Versuch eine Schutzbrille. Arbeiten Sie in der Kapelle.*Material: Heptan, Brom, UV-Lampe, Becherglas

* Notieren Sie zuerst, in welcher Gruppe Brom liegt und was für eine organische Verbindung Heptan ist. Welche Reaktion ist für diese Reaktionspartner charakteristisch?
* Mischen Sie Heptan mit Brom in einem Becherglas. Beobachten Sie, was passiert.
* Bestrahlen Sie das Gemisch mit UV-Licht. Was passiert? Warum? Notieren Sie die Reaktionsgleichungen dieser Kettenreaktion (Start-, Fortpflanzungs-, Abbruchs-, und Weiterreaktion).

Entsorgung: Die Chemikalien sind fachgerecht zu entsorgen: organische Abfälle.

### 🖋Aufgaben zu radikalen Substitutionen

1. Was versteht man unter einer Substitutions-Reaktion? Notieren Sie die allgemeine Formel einer Substitutions-Reaktion.
2. Was versteht man unter einem Radikal? Nennen Sie mindestens drei Beispiele.
3. Wie kommt es zu einem Kettenabbruch?
4. Warum braucht es Licht, damit die radikale Substitutions-Reaktion läuft?
5. Welche Reaktionsprodukte entstehen, wenn ein Chlormolekül auf ein Ethanmolekül trifft?

# Elektrophile Substitution[[2]](#footnote-2)

Die elektrophile Substitution SE ist die charakteristische Reaktion der **Arenen**. Der Substituent ist dabei eine sehr stark elektrophile, kationische Gruppe (E+), welche meist aus einer Lewis-Säure gewonnen wird. Im Gegensatz dazu, wirkt der Benzol-Ring wie eine Lewis-Base.

Ein **Elektrophil** ist ein Teilchen mit positiver Ladung oder positiver Partialladung. Es greift das π-Elektronensystem des Benzol-Ringes an. Durch Wechselwirkungen zwischen dem E+ und dem Aren, bindet sich das E+ locker an das Aren, was π-Komplex genannt wird. Man kann sich das vorstellen, als würde das E+ über dem planaren π-Elektronensystem des Arens „schweben“, angezogen von den Elektronen. Durch die Anlagerung von E+ an ein Kohlenstoffatom (des Arens) entsteht das sogenannte Benzenium- oder Phenonium-Ion, auch σ-Komplex genannt. Dabei sind zwei Gruppen, die ausserhalb des Ringes liegen, an ein Kohlenstoff-Atom des Benzol-Ring gebunden. Zudem ist noch eine delokalisierte positive Ladung am Benzol-Ring. Dieses 4π-Elektronensystem ist zwar stabil, das 6π-Elektronensystem des Benzol-Ringes ist aber weitaus stabiler. Also wird der σ-Komplex zu einem Benzol-Ring zurückgebildet, indem das Proton an das Anion, welches bei der Herstellung des kationischen Elektrophil gebildet wurde, abgegeben wird. So entsteht wieder die ursprüngliche Lewis-Säure. Sie ist also bei dieser Reaktion in Form eines Katalysators anzutreffen.

##### Beispiel einer elektrophilen Monosubstitution: Salpetersäure (HNO3) reagiert mit Benzol

SE End.tifBildung von E+ aus einer Lewis-Säure: HNO3 + 2H2SO4  NO2+ +H3O+ + 2HSO4

Bildung des π-Komplexes:

C6H6 + NO2+  C6H6NO2+

Bildung des σ-Komplexes:

C6H6NO2+  C6H5NO2H+

SE End.tif

vollständig substituiertes Aren:

C6H5NO2H+  C6H5NO2 + H+

**Gesamtreaktion: C6H6 + HNO3 C6H5NO2 + H2O**

Das entstandene, substituierte Aren kann weiterreagieren, also nochmals substituiert werden. Die Platzwahl des zweiten Substituenten wird durch den schon Vorhandenen bestimmt. Die verschiedenen Wirkungen des ersten Substituenten gehen auf den I- und den M-Effekt zurück.

## Der ±I- und ±M-Effekt

Der **induktive Effekt, kurz I-Effekt**, ist der schwächere Effekt von beiden. Er geht auf die unterschiedlichen Elektronennegativitäten der Atome an einer Bindung zurück, also auf die Polarisation einer Bindung. In einem Molekül entstehen Stellen mit erhöhter oder verminderter Elektronendichte.  
Die Mehrheit der Substituenten zeigt einen –I-Effekt. Das heisst, sie ziehen das Bindungselektronenpaar näher zu sich und polarisieren die Bindung dadurch. Die Elektronendichte am Kohlenstoff nimmt somit ab. Der Gegensatz dazu, der +I-Effekt, tritt bei elektropositiveren Substituenten ein.

**Beispiel:** Fluor  
 Fluor hat eine sehr grosse Elektronennegativität, es hat also ein sehr grosses Interesse ein Elektron aufzunehmen. Diese Eigenschaft führt dazu, dass Fluor die Bindungselektronen zu sich zieht. Beim Fluor wirkt also ein starker –I-Effekt. Dasselbe gilt auch für Chlor, Brom und Iod.

Der **mesomere Effekt, kurz M-Effekt**, ist der weitaus wichtigere Effekt. Durch nichtbindende Elektronenpaare oder π-Elektronen des Substituenten wird die Elektronendichte im Π-Elektronensystem (bspw. des Benzol-Ringes) verändert.   
Wenn der Substituent dem Ring Elektronen hinzufügt, also die Elektronendichte im Ring erhöht, spricht man vom +M-Effekt. Wird die Elektronendichte im Ring verkleinert, spricht man vom –M-Effekt.

**Beispiel:** Sauerstoff O-  
 Sauerstoff besitzt mindestens ein freies Elektronenpaar, welches dem Bindungspartner übergeben werden kann. Damit wird die Elektronendichte des Bindungspartners erhöht, was der +M-Effekt ist.

Ist sowohl der I- als auch der M-Effekt vorhanden, so wirkt je nach Substituent der I-Effekt oder der M-Effekt.

* **Reaktionsgeschwindigkeit**: Arene mit erhöhter Elektronendichte sind reaktionsfreudiger:  
  Erhöht der Substituent die Elektronendichte im Aren, zeigt er eine aktivierende Wirkung und die Reaktionsgeschwindigkeit ist eher hoch. Es ist ziemlich schwierig die Reaktion nach der Monosubstitution abzubrechen.  
  Verringert der Substituent die Elektronendichte im Aren, zeigt er eine desaktivierende Wirkung und die Reaktionsgeschwindigkeit ist eher klein. Unter solchen Bedingungen ist eine Mehrfachsubstitution eher selten.
* **Platz des zweiten Substituenten**: Dieser kann entweder in die ortho-, meta- oder para-Stellung.[[3]](#footnote-3) Die Entscheidung, welcher Platz der Zweit-Substituent bekommt, entscheidet der M-Effekt des ersten Substituenten

##### Tabelle: dirigierende Wirkung verschiedener Erst-Substituenten bei der elektrophilen Zweitsubstitution von (monosubstituierten) aromatischer Verbindungen

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| meta-dirigierende Erstsubstituenten | ortho-/ para-dirigierende Erstsubstituenten | |
| wirken desaktivierend auf die Reaktions-geschwindigkeit | wirken desaktivierend auf die Reaktions-geschwindigkeit | wirken aktivierend auf die Reaktions- geschwindigkeit |
| es wirkt der –M-Effekt | SPEZIALFALL[[4]](#footnote-4) | es wirkt der +M-Effekt |
| -NH3+  -NR3+ -COOR  -COOH  -CHO  -CO-R  -NO2  -SO3H2 | -Halogene  🡪 -F, -Cl, -Br, -I | -O-  -NH2  -NH-R  -NR2  -OH  -O-R  -NH-CO-R  -O-COR  -R (=Alkylgruppen) |
| es entstehen 1,3-Isomere des Arens | es entstehen 1,2- oder 1,4-Isomere des Arens | |

##### Beispiele von Zweifachsubstitutionen

##### Nitrierung von Phenol: Phenol: C6H5OH erster Substituent: -OH → +M-Effekt → ortho-/ para-dirigierend

→ 2-Nitrophenol und 4-Nitrophenol

##### Bromierung von Nitrobenzol:

Nitrobenzol: C6H5NO2   
erster Substituent: -NO2 → -M-Effekt → meta-dirigierend

→ 1-Brom-3-nitrobenzol

## Besondere Arten von elektrophiler Substitution

Von grosser Bedeutung sind die folgenden elektrophilen Substitutionen:

* Nitrierung: Benzol reagiert mit HNO3 zu Nitrobenzol (C6H5NO2) und Wasser. H2SO4 gibt man als Katalysator dazu.
* Sulfonierung: Benzol reagiert mit SO3 zu Benzolsulfonsäure (C6H5HSO3).   
   Man gibt ebenfalls H2SO4 als Katalysator dazu.
* Halogenierung: Benzol reagiert mit Br2 zu Brombenzol (C6H5Br) und HBr.   
   Hier verwendet man FeBr3 als Katalysator.
* Friedels-Crafts-Alkylierung: Benzol reagiert mit H3CCl zu Methylbenzol (Toluol: C6H5CH3) und HCl.  
   Man fügt AlCl3 als Katalysator zu.

### Beschreibung: C:\Dokumente und Einstellungen\Anwender\Lokale Einstellungen\Temporary Internet Files\Content.IE5\CIFJ69KK\MC900238955[1].wmfExperiment zur elektrophilen Substitution

**Bromierung von Benzol***Tragen Sie bei diesem Versuch eine Schutzbrille. Arbeiten Sie in der Kapelle.*Material: Benzol, Bromwasser, Aluminiumbromid, Reagenzglas, Pipette

* Notieren Sie die Summenformeln der Reaktionspartner. Welche Reaktion erwarten Sie? Notieren Sie die Reaktionsgleichungen.
* Füllen Sie ein wenig Benzol in ein Reagenzglas und geben sie wenig Bromwasser hinzu. Notieren und begründen Sie Ihre Beobachtungen.
* Fügen Sie nun ein wenig Aluminiumbromid als Katalysator hinzu. Notieren und begründen Sie Ihre Beobachtungen.

Entsorgung: Die Chemikalien sind fachgerecht zu entsorgen: organische Abfälle.

### 🖋Aufgaben zu elektrophile Substitutionen

1. Was versteht man unter einem Elektrophil? Nennen Sie mindestens drei Beispiele.
2. Für welche organischen Verbindungen sind elektrophile Substitutions-Reaktionen typisch?
3. Wann kommt es zu einem +M-Effekt, wann kommt es zu einem –M-Effekt? Nennen Sie jeweils drei Beispiele.
4. Welche Erstsubstituenten sind meta-dirigierend? Welcher Effekt wirkt dabei? Nennen Sie mindestens drei Beispiele.

## Die KKK-Regel und die SSS-Regel[[5]](#footnote-5)

Die KKK- und die SSS-Regel sind Merkregeln, die aus Beobachtungen abgeleitet sind. Sie helfen bei der Entscheidung, ob es sich um eine elektrophile oder um eine radikale Substitution an einem Alkylbenzol[[6]](#footnote-6) handelt.

Nehmen wir Toluol als Beispiel um die Regeln zu veranschaulichen:  
Wenn man zu Toluol (Benzolring mit einem CH3-Molekül als Seitenkette) Br2 hinzufügt, gibt es sowohl theoretisch, als auch praktisch zwei Reaktionen, die ablaufen können. Einerseits kann der aromatische Benzolring angegriffen werden, was eine elektrophile Substitution wäre. Anderseits kann aber auch die Seitenkette (hier CH3) angegriffen werden, was eine radikale Substitution wäre. Welche der beiden Reaktionen abläuft, kommt auf die vorherrschenden Reaktionsbedingungen an. Und genau hier kommt die KKK- und die SSS-Regel ins Spiel:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **KKK-Regel** | **SSS-Regel** |
| **Bedeutung für die drei Buchstaben** | -**K**älte -**K**atalysator → **K**ern | - **S**iedehitze  - **S**onnenlicht  → **S**eitenkette |
| **Reaktionsbedingungen** | Bei niedriger Temperatur und in Anwesenheit eines Katalysators wird der aromatische Kern des Alkylbenzols angegriffen. | Bei erhöhter Temperatur und gleichzeitiger Bestrahlung mit Licht wird die Seitenkette des Alkylbenzols angegriffen. |
| **Reaktionsmechanismus** | Elektrophile Substitution | Radikale Substitution |

Zurück zum Beispiel: Findet die Reaktion zwischen Toluol und Br2 bei niedriger Temperatur und in Anwesenheit eines Katalysator (beispielsweise Eisen(III)-Bromid: FeBr3) statt, so wird der aromatische Kern angegriffen. Es läuft eine elektrophile Substitution am Benzolring ab, wobei 2-Bromtoluol und 4-Bromtoluol entsteht.[[7]](#footnote-7)

Gibt man Brom bei erhöhter Temperatur zu Toluol und bestrahlt das Ganze zusätzlich mit Licht, so wird die Seitenkette angegriffen. Es läuft also eine radikale Substitution an der Seitenkette CH3 ab, wobei H-Atome ersetzt werden. Bei einer Monosubstitution entsteht dabei Brommethyl-Benzol.

### 🖋Aufgaben zur KKK-Regel und SSS-Regel

1. Das Reaktionsmilieu ist erwärmt. Was wird angegriffen?
2. Für was stehen die drei K’s? Für was stehen die drei S’s?

# Nucleophile Substitution[[8]](#footnote-8)

Die nucleophile Substitution SN ist die typische Reaktion für Halogenalkane in Anwesenheit eines Nucleophil. Es wird eine Bindung, welche aufgrund der unterschiedlichen Elektronennegativitäten polar ist, getrennt. Die Elektronen der vorherigen Bindung werden beide der Abgangsgruppe, der sogenannter **nucleofugen Gruppe** zugeteilt. Der positiv geladene Teil der ehemaligen Verbindung bindet sich neu an das **Nucleophil**, welches ein einsames Elektronenpaar oder eine negative Ladung besitzt.

Allgemein sieht der Reaktionsablauf der nucleophilen Substitution wie folgt aus:  
Nu- + R-X → Nu-R + X-

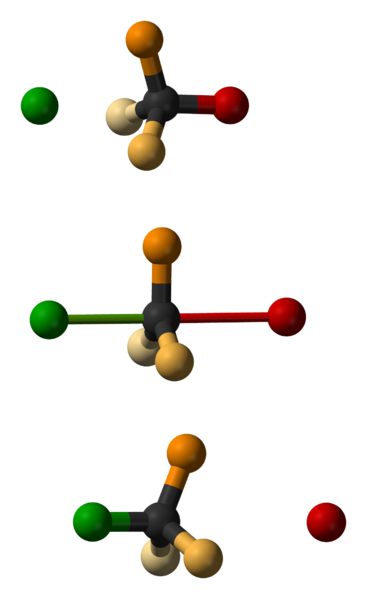
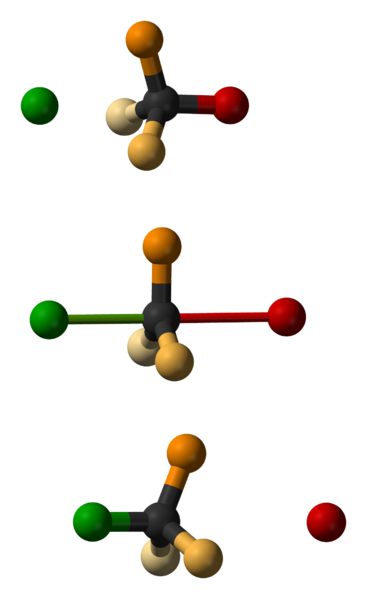
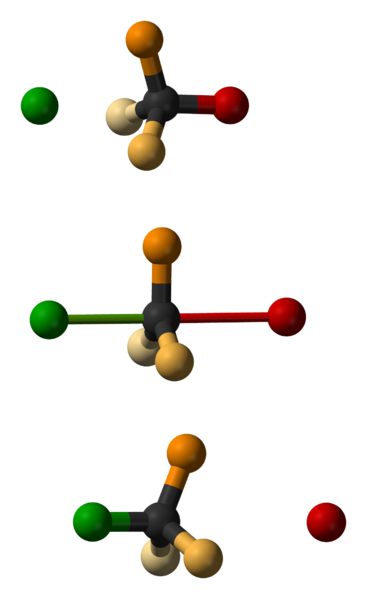
Es gibt zwei verschiedene Grenzfälle für die SN:

* **SN1-Reaktion:**Liegt beim Substrat eine sogenannte sterische Hinderung vor, muss diese zuerst durch eine Abspaltung behoben werden. Es entsteht das Halogen-Anion und ein Carbenium-Ion. Dieser erste Reaktionsschritt ist der Langsamste und damit der Geschwindigkeitsbestimmende.[[9]](#footnote-9)   
  Dann lagert sich das Nucleophil an das Carbenium-Ion an, da dieses planar ist kann es vom Nucleophil von beiden Seiten angegriffen werden. Dies spielt bei chiralen Molekülen eine Rolle, denn entweder sind die H-Atome im Vergleich zum Anfangszustand gleich oder ‚umgeklappt‘. Man kann sich das ungefähr so vorstellen, als würde ein Regenschirm im Sturm ‚umklappen‘.
* **SN2-Reaktion:**Das Nucleophil greift das Substrat auf der zum Halogen-Atom rückwärtigen Seite an. Durch diese Annäherung des Nucleophils bildet sich eine Bindung zwischen ihm und dem C-Atom des Substrats, wobei die C-X-Bindung (die Bindung zwischen dem C- und dem Halogen-Atom) geschwächt wird. Das Halogen-Anion wird abgespalten, während sich das Nucleophil sich an das verbleibende Substrat bindet. Über die Reaktion gesehen, werden die H-Atome ‚umgeklappt‘, was man auch ‚*Walden Umkehr*‘ nennt.

**Methanhydrooxid.tifBeispiel für das ‚Umklappen‘: Walden Umkehr**

**Fluormethan.tif**

Dass die H-Atome umgeklappt sind, ist bei chiralen Molekülen von grosser Bedeutung.

[](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bb/Walden-inversion-3D-balls.png)

+

+

*Abbildung: Walden Umkehr[[10]](#footnote-10)*

Im Allgemeinen sind nucleophile Substitutionen umkehrbare Gleichgewichtsreaktionen. Man kann also die Lage des Gleichgewichts und somit auch die Reaktionsgeschwindigkeit der Reaktion beeinflussen. Für den ersten Grenzfall SN1 gelten die folgenden Regeln für den Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit. Beim zweiten Grenzfall SN2 hat die Nucleophilie des hinzukommenden Nucleophils keinen Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit, da sie am geschwindigkeitsbestimmenden Schritt nicht beteiligt ist.

## Einflüsse auf die Reaktionsgeschwindigkeit[[11]](#footnote-11)

##### Einfluss des Nucleophils

Je schneller ein Nucleophil sein freies Elektronenpaar zur Verfügung stellt, desto reaktiver ist das Nucleophil. Die Nucleophilie ist von verschiedenen Faktoren abhängig:

* Elektronendichte: Je grösser die Elektronendichte am betreffenden Atom ist, desto stärker nucleophil ist das Atom.  
  🡪 Anionen sind stärker nucleophil als ihr entsprechendes, ungeladenes Teilchen
* Polarisierbarkeit[[12]](#footnote-12): Je mehr das Teilchen sich polarisieren lässt, desto stärker nucleophil ist es.

**Einfluss der nucleofugen Gruppe**Da eine C-I-Bindung länger ist als eine C-F-Bindung, ist die Bindungsenergie der C-I-Bindung kleiner. Eine C-I-Bindung lässt sich also viel leichter spalten als eine C-F-Bindung. Die Reaktivität und damit auch die Reaktionsgeschwindigkeit nimmt also vom Fluoralkan zum Iodalkan zu.

**Einfluss der Reaktionsbedingungen**

* Da nucleophile Substitutionen umkehrbare Gleichgewichtsreaktionen sind, kann man die Lage des Gleichgewichts und somit die Reaktionsgeschwindigkeit und die Ausbeute nach den schon bekannten Regeln lenken.   
  Beispiel: Erhöht man die Konzentration der Edukte, so verlagert sich das Gleichgewicht weiter auf die Seite der Produkte und umgekehrt.
* Lösungsmittel[[13]](#footnote-13): in aprotischen Lösungsmitteln läuft eine nucleophile Substitution schneller als in einem protischen.

**Einfluss der Substratstruktur**

Die Struktur des Substrats hat einen direkten Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit. So kann beispielsweise eine zusätzlich vorhandene Methyl-Gruppe die Reaktion stark verlangsamen, da sie dem angreifenden Nucleophil keinen Platz gewährt. Eine solche Reaktionsbehinderung wird *sterische Hinderung* genannt.  
Da dieser Einfluss aber sehr schwer zu definieren ist, wird er nicht weiter erklärt.

### C:\Dokumente und Einstellungen\Anwender\Lokale Einstellungen\Temporary Internet Files\Content.IE5\CIFJ69KK\MC900238955[1].wmfExperiment zur nucleophilen Substitution[[14]](#footnote-14)

*Tragen Sie bei diesem Versuch eine Schutzbrille. Arbeiten Sie in der Kapelle.*Material: Ethanol, Silbernitrat-Lösung (1%), 1-Brombutan, 2-Brombutan, 2-Brom-2-methylpropan, drei Reagenzgläser mit Stopfen, Pipette

* Geben Sie in die drei Reagenzgläser jeweils 1ml Silbernitrat-Lösung und 2ml Ethanol.
* Geben Sie je drei Tropfen eines der drei Bromalkane.
* Verschliessen Sie die Reagenzgläser und notieren Sie die Beobachtungen zur Reaktionsgeschwindigkeit.

Entsorgung: Die Chemikalien sind fachgerecht zu entsorgen: organische Abfälle.

### 🖋Aufgaben zu nucleophilen Substitutionen

1. Was versteht man unter einem Nucleophil? Nennen Sie mindestens drei Beispiele.
2. Nennen Sie drei Einflüsse auf die Reaktionsgeschwindigkeit.
3. Erklären Sie den Einfluss des Nucleophils auf die Reaktionsgeschwindigkeit. Von was ist die Nucleophilie abhängig? Erklären Sie.
4. Welches Halogen eignet sich am besten als nucleofuge Gruppe aufzutreten? Begründen Sie.

# Eliminierungs-Reaktionen

Eliminierungen verlaufen ähnlich wie die nucleophile Substitution, allerdings lagert sich die nucleophile Gruppe nicht an. Stattdessen wirkt sie in ihrer Anwesenheit als Base, was eine Abspaltung eines Protons bewirkt. Dieses Proton wird häufig von einem β-C-Atom[[15]](#footnote-15) abgespalten. In diesem Fall spricht man von einer β-Eliminierung.  
Auch bei Eliminierungsreaktionen gibt es wieder zwei Grenzfälle:

* **E1-Mechanismus:[[16]](#footnote-16)**Ist das Medium sauer oder neutral und ist das intermediäre C-Ion stabil (bspw. ein tertiäres Carbenium-Ion), so verläuft die Reaktion im E1-Mechanismus.  
  Das Halogen-Ion eines Halogenalkans wird unter Bildung eines tertiären Carbenium-Ions abgespalten. Das eintretende Nucleophil, welches als Base wirkt, führt zur Abspaltung eines Protons.[[17]](#footnote-17) Das Proton reagiert mit der Base zu ihrer konjugierten Säure und aus einer Einfach-Bindung am Carbenium-Ion wird eine Doppelbindung.  
    
  Bildung des Carbenium-Ions:   
  S-B-Reaktion: 
* **E2-Mechanismus:[[18]](#footnote-18)**Ist das Medium basisch, wird die Reaktion mittels E2-Mechanismus durchgeführt. Dabei finden die Bildung und die Spaltung von Bindungen in einem Schritt statt. So wie die nucleophile Gruppe bei der SN2-Reaktion mit dem C-Atom reagiert, so reagiert sie beim E2-Mechanismus mit einem H-Atom.  
  Die nucleophile Gruppe, die als Base wirkt, bildet eine sehr schwache Bindung zu einem H-Atom des Halogenalkans. Dadurch wird die Bindung zum β-C-Atom geschwächt. Gleichzeitig entsteht eine neue, sehr schwache Bindung an diesem β-C-Atom. Meist wird aus einer Einfach-Bindung zum α-C-Atom eine Doppelbindung. Dadurch wird die Bindung zwischen dem Halogen und dem α-C-Atom stark geschwächt. Schliesslich spalten sich die konjugierte Säure der nucleophilen Gruppe und das Halogen-Ion ab und es entsteht noch ein Alken.  
    
  Bildung des Überganszustands:   
  Abspaltungen: 

## Nucleophile Substitution ↔ Eliminierungs-Reaktionen[[19]](#footnote-19)

Die nucleophilen Substitutions-Reaktionen und die Eliminierungs-Reaktionen stehen oft in der direkten Konkurrenz, da die gleichen Reaktionspartner beide Reaktionen eingehen können. Eine höhere Temperatur begünstigt die Eliminierungsreaktionen.

Die Edukte sind also die gleichen, bei den Produkten gibt’s nicht nur bei den Verbindungen Unterschiede: Bei Eliminierungs-Reaktionen ist die Zahl der Teilchen nach der Reaktion grösser als vor der Reaktion. Bei Substitutions-Reaktionen bleibt sie jedoch gleich gross.

Da Experimente zur Eliminierungs-Reaktionen sehr kompliziert und meistens auch gefährlich sind, wird in diesem Leitprogramm auf ein solches verzichtet.

### 🖋Aufgaben zu Eliminierungs-Reaktionen

* 1. Was versteht man unter einer Eliminierung?
  2. Erläutern Sie den Begriff „β-Eliminierung“.
  3. Erklären Sie, welche Substitutions-Reaktion eine direkte Konkurrenz der Eliminierungs-Reaktion ist. Warum?
  4. Bei der direkten Konkurrenz zwischen den Eliminierungs-Reaktionen und den Substitutions-Reaktionen spielt die Temperatur eine wichtige Rolle. Welche Reaktion wird durch eine höhere Temperatur begünstigt?

# Additionsreaktionen[[20]](#footnote-20)

Additionsreaktionen sind das Gegenstück zum Ergebnis der β-Eliminierung. Sie sind charakteristisch für **ungesättigte Verbindungen**, also für Alkene und Alkine, aber auch für C=O- und C≡N-Bindungen.

## Elektrophile Addition

Da elektrophile Teilchen besonders geeignet sind π-Elektronen, wie sie in Mehrfachbindungen vorhanden sind, anzugreifen, sind die meisten Additionen elektrophil. Die elektrophile Addition AE verläuft immer in zwei Schritten: Zuerst kommt es, ähnlich zur SE, zu Wechselwirkungen zwischen dem Elektrophil und dem π-Elektronensystem der Mehrfachbindung. Das Elektrophil bindet sich etwas geschwächt an das Atom der Mehrfachbindung, welche durch diese Bindung aufgelöst wird. Es entsteht also aus einem π-Komplex ein σ-Komplex. Dieser σ-Komplex beschreibt das entstandene, positiv geladene Carbenium-Ion. In einem zweiten Schritt kann ein Nucleophil an das Carbenium-Ion gebunden werden und es entsteht das Produkt der elektrophilen Addition:

produkt Ae.tif

An der obenstehenden Strukturformel kann man sehen, dass es von grosser Bedeutung ist, ob die Verbindung E-Nu symmetrisch oder unsymmetrisch ist.

#### Addition von symmetrischen Molekülen

Wird ein symmetrisches Molekül, wie beispielsweise Br2, an eine ungesättigte Verbindung addiert, so wird an jedem Ende der Mehrfachbindung ein Atom gleicher Art addiert.   
Bei symmetrischen Alkenen ist der Angriff des Nucleophils an beiden Seiten des Übergangszustands, im Beispiel der Bromierung ist dies das Bromonium-Ion, gleich wahrscheinlich. Ist der Übergangszustand unsymmetrisch, wird das Nucleophil an der sterisch weniger gehinderten Position angreifen.

**AE ende.tifBeispiel einer elektrophilen Addition: Bromierung (symmetrisch) von Ethen**

Bildung des π-Komplexs:

Bildung des Bromonium-Ions:

Bildung des anti-Produkts[[21]](#footnote-21):

#### Addition von asymmetrischen Molekülen

Bei der Addition einer unsymmetrischen Verbindung, wie beispielsweise HBr, an eine ungesättigte Verbindung, werden an den beiden Enden der Mehrfachbindung verschiedene Atome addiert. Dadurch können zwei Produkte entstehen, welche meist Produkt I und Produkt II genannt werden. Empirisch stellt man fest, dass die Ausbeute des Produkts II viel grösser ist. Das Produkt I ist nur in sehr geringen Mengen vorhanden. Der Grund dafür liegt in der Stabilität des Carbenium-Ions[[22]](#footnote-22): Da das sekundäre stabiler ist als das primäre Carbenium-Ion, wird die Herstellung des Produkts II begünstigt.

Bei der elektrophilen Addition von unsymmetrischen Molekülen gilt die **Regel von Markovnikov**: Sind die beiden C-Atome der Mehrfachbindung mit unterschiedlich vielen H-Atome verbunden, so wird der elektropositivere Teil des Addenden an das wasserstoffreichere C-Atom addiert.   
Einfacher gesagt und meistens anwendbar: „Bei der Addition von HX wandert das H-Atom an das C-Atom, das die meisten H-Atome hat.“

**Beispiel einer elektrophilen Addition: Bromwasser (unsymmetrisch) reagiert mit Propen**

[H3C-CH-CH3]+ + Br-→ H3C-CH(Br)-CH3

2-Brompropan

H3C-CH=CH2 + H+ + Br-

[H3C-CH2-CH2]+ + Br-→ H3C-CH2-CH2-Br

1-Brompropan

Gemäss der Regel von Markovnikov wandert das H-Atom an das C-Atom, das die meisten H-Atome besitzt. Das erste Produkt ist demnach viel häufiger vorhanden.

#### Addition an Alkine

Additionen an Alkine führen zuerst zu einem Alken mit den Addenden. An diesem kann noch einmal eine Addition stattfinden. Das Produkt wäre dann ein Alkan.  
Alkine sind allerdings weniger reaktionsfreudig. Es benötigt meist ein Katalysator.

**Beispiel einer elektrophilen Addition: Bromierung (symmetrisch) von Ethin**

HC≡CH +Br2 → CHBr=CHBr  
CHBr=CHBr + Br2 → CH(Br)2-CH(Br)2

1,1,2,2-Tetrabrom-ethan

Auch die radikale Addition und die nucleophile Addition existieren. Diese Reaktionen werden in diesem Leitprogramm jedoch nicht behandelt, da sie seltener vorkommen und dadurch nicht so wichtig sind. Auch die Polymerisation gehört streng genommen zu den Additionsreaktionen. Auch sie wird in diesem Leitprogramm nicht näher erklärt.

### C:\Dokumente und Einstellungen\Anwender\Lokale Einstellungen\Temporary Internet Files\Content.IE5\CIFJ69KK\MC900238955[1].wmfExperimente zur Additionsreaktion

**Brom und Cyclohexen***Tragen Sie bei diesem Versuch eine Schutzbrille. Arbeiten Sie in der Kapelle.*Material: Cyclohexen, Bromwasser, Reagenzglas, Pipette

* Notieren Sie zuerst, in welcher Gruppe Brom liegt und was für eine organische Verbindung Cyclohexen ist. Notieren Sie die beiden Summenformeln.
* Was für eine Reaktion erwarten Sie? Notieren Sie die Reaktionsgleichungen. Wie heisst das Reaktionsprodukt?
* Füllen Sie wenig Cyclohexen in ein Reagenzglas und geben sie ein paar Tropfen Bromwasser hinzu. Notieren Sie Ihre Beobachtungen.

Entsorgung: Die Chemikalien sind fachgerecht zu entsorgen: Organische Abfälle.

### 🖋Aufgaben zu Additionsreaktionen

1. Wie lautet die allgemeine Formel einer Additionsreaktion?
2. Was sind die typischen Reaktionspartner einer Additionsreaktion?
3. Warum muss man zwischen der Addition eines symmetrischen Moleküls und der Addition eines asymmetrischen Moleküls unterscheiden? Begründen Sie ihre Antwort anhand eines Beispiels.
4. Wasser wird an Ethen addiert. Notieren Sie die Reaktionsgleichungen und benennen Sie das Reaktionsprodukt.

Zusatzkapitel: Redox-Reaktionen

Eine Redox-Reaktion ist eine Akzeptor-Donor-Reaktion, zusammengesetzt aus einer Reduktion und einer Oxidation. Im alltäglichen Leben spricht man oft von einer Oxidation, wenn einer der Reaktionspartner Sauerstoff ist (bspw. das Rosten von Eisen). Dass dies bei einer Oxidation nicht immer der Fall ist, werden wir in diesem Kapitel noch sehen.

## Akzeptor-Donor-Reaktion

Bei einer Redox-Reaktion werden Elektronen übertragen. Der **Elektronenübertragungsprozess** besteht aus der Elektronenabgabe, der sogenannten **Oxidation** und der Elektronenaufnahme, der **Reduktion**. Das Element, das oxidiert wird und damit die Reduktion erzwingt, nennt man **Reduktionsmittel**. Das **Oxidationsmittel**, ist das Element, welches die Oxidation erzwingt und dabei selbst reduziert wird.  
Wie wir bereits wissen, gibt es viele Elemente, deren äusserste Hauptschale nicht gefüllt ist. Sie besitzen also Valenzelektronen (VE). Weil jedes Element die Oktettregel erfüllen will, geben die Metalle ihre Valenzelektronen ab, während Nichtmetalle diese abgegebenen Elektronen aufnehmen. So können beide die Oktettregel erfüllen.

Oxidationszahlen  
Eine Oxidationszahl, kurz OZ, ist eine fiktive Ladungszahl. Sie hilft uns zu wissen, wie viele Elektronen ein Element aufnehmen oder abgeben wird. Oxidationszahlen werden in römischen Zahlen angegeben. Über der Abkürzung des jeweiligen Elementes in der Summenformel steht die Oxidationszahl für ein Atom.  
Da Elektronen eine negative Ladung haben, wird die Oxidationszahl bei der Oxidation erhöht und bei der Reduktion verkleinert.

## Ermittlung der Oxidationszahl

* Metalle haben immer positive OZ
  + Metalle der Gruppe I +I
  + Metalle der Gruppe II +II
  + Aluminium +III
* Wasserstoff +I  
  Ausnahme: in Metallhydriden (NaH, CaH2, AlH3) -I
* Sauerstoff -II  
  Ausnahme: in Peroxiden (H2O2) -I
* Die Summe aller OZ‘s in einer Verbindung muss 0 ergeben
* Elemente haben eine OZ gleich 0
* Bei Ionen: Die Summe aller OZ’s muss gleich der Ionenladung sein
* organische Verbindungen
  + müssen auf C-Atome zerlegt werden
  + pro C-Atom muss die OZ 0 sein

##### propanol.tifBeispiel: Oxidationszahl einer organischen Verbindung (Propanol) ermitteln

+I

+I

+I

+I

+I

+I

+I

-II

-I

-II

-III

+I

1. Zerlegung nach C-Atome
2. OZ bekannter Elemente (hier: H, O) aufschreiben
3. OZ der C-Atome ausrechnen.



## 

### 🖋Aufgaben zur Oxidationszahl

Ermitteln Sie die Oxidationszahl(-en) folgender Elemente oder Verbindungen.

1. a) O2 b) O c) O2-
2. a) Na+ b) Na c) NaCl
3. a) H b) H2 c) H2O
4. a) NaF b) MgO c)Fe2O3
5. a) Ag b) Al2O3 c) CH4
6. a) CH3CH3 b) CO2 c) Butansäure
7. a) CH3CH2OH b) CaH2 c) CH3CH2OCH2CH2CH3
8. a) C b) H2O2 c) Kohlenstoffmonoxid
9. a) OH- b) PO43- c) Propansäureethylester

## Aufstellen einer Redox-Reaktionsgleichung[[23]](#footnote-23)

1. Bestimmen, ob die einzelnen Elemente oxidieren oder reduzieren
2. Oxidation aufschreiben inkl. Oxidationszahlen
3. Reduktion aufschreiben inkl. Oxidationszahlen
4. Oxidation und Reduktion mit möglichst kleinen Faktoren multiplizieren, sodass die Anzahl der (abgegebenen/ aufgenommenen) Elektronen gleich gross ist
5. Oxidation und Reduktion addieren, um die (ausgeglichene) Redox-Reaktionsgleichung zu bekommen
6. eventuell: Ionen, die sich verbinden könnten, zusammenfassen
7. eventuell: nicht an der Reaktion beteiligte Ionen in der Redox-Reaktionsgleichung ergänzen

Beispiel: Redox-Reaktionsgleichung aufstellen  
*Natrium reagiert mit Chlor*

1. Natrium gibt das VE ab – Natrium oxidiert  
   Chlor nimmt ein Elektron auf – Chlor reduziert
2. Oxidation: 
3. Reduktion: 
4. Reduktion mit 2 multiplizieren: 
5. Redox: 
6. 

### 🖋Aufgaben zu Redox-Reaktionsgleichungen

1. Wie viele Elektronen werden bei folgenden (Teil-)Reaktionen übertragen? Handelt es sich dabei um eine Reduktion oder um eine Oxidation?
2.  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_
3.  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_
4.  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_
5.  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_
6.  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_
7. Liegt bei folgenden Beispielen, die oxidierte oder die reduzierte Form des Elementes vor? Unterstreichen Sie die oxidierte Form.
   1. 
   2. 
   3. 
   4. 
   5. 
8. Handelt es sich bei folgenden Reaktionen um Redox-Reaktionen?
9. 
10. 
11. 
12. 
13. 
14. Stellen Sie die Redox-Reaktionsgleichungen auf.
15. Kohlenstoff reagiert mit Sauerstoff
16. Wasserstoff reagiert mit Sauerstoff zu Wasser
17. Ammoniak (NH3) reagiert mit Sauerstoff zu Stickstoff und Wasser

Die Redox-Reihe  
Es ist naheliegend, dass wie bei den Säure-Base-Reaktionen, auch bei den Redox-Reaktionen nicht alle Reaktionspartner miteinander reagieren. Doch wie weiss man, ob die Reaktion (spontan) stattfindet oder nicht?

Analog zur Reihe der Säure- bzw. Base-Stärke gibt es die Redox-Reihe. Sie ist in den meisten Fällen ähnlich wie die Säure-Basen-Tabelle aufgebaut. So gilt: Je weiter oben die reduzierte Form eines Stoffes steht, desto schneller wird der Stoff sein(-e) Elektron(-en) abgeben. Im Gegenteil dazu gilt: Je weiter unten die oxidierte Form eines Stoffes steht, desto schneller wird der Stoff (ein) Elektron(-en) aufnehmen.

Auch bei dieser Tabelle gilt: Befinden sich die Reaktionspartner in der **S**-Stellung (links oben und rechts unten), so läuft die Reaktion **s**pontan, also von **s**elbst ab.

### 🖋Aufgaben zu Redox-Reaktionen

1. Reagiert Silber mit Nickel(II)-Ionen spontan? Begründen Sie Ihre Antwort.   
   Schreiben Sie die Reaktionsgleichung und die Gleichungen der Teilreaktionen – auch wenn die Reaktion nicht spontan ablaufen würde.
2. Kommt Kalium in der Natur häufiger als Kalium-Metall oder als K+ vor? Warum?
3. Es fällt auf, dass insbesondere Alkalimetalle starke Reduktionsmittel sind. Erklären Sie diese Tatsache.
4. Was passiert wenn ein Ohrring aus Nickel mit Wasser und dem Sauerstoff aus der Luft in Kontakt kommt?
5. Warum sollte man den restlichen Inhalt einer geöffneten Konservendose nicht in der Konservendose aufbewahren?   
   Hierbei handelt es sich um eine aufgeschnittene Aluminium-Konservendose, die mit Zinn (Sn) überzogen und mit Ananas-Scheiben und Ananas-Saft gefüllt ist.

### C:\Dokumente und Einstellungen\Anwender\Lokale Einstellungen\Temporary Internet Files\Content.IE5\CIFJ69KK\MC900238955[1].wmfExperiment zu Redox-Reaktionen

Die chemische Brausetablette: Natrium in Wasser  
*Tragen Sie bei diesem Versuch eine Schutzbrille. Arbeiten Sie in der Kapelle.*Material: Wasser, elementares Natrium, weites Becherglas, Messer, Pinzette

* Füllen Sie das Becherglas bis 1.5cm unterhalb des Randes mit Wasser.
* Schneiden Sie mit einem Messer ein Stück Natrium ab. Beobachte das frisch geschnittene Natrium. Was geschieht mit der Oberfläche, wenn sie mit der feuchten Luft in Kontakt kommt?
* Geben Sie das Natriumstück mit einer Pinzette vorsichtig in das mit Wasser gefüllte Becherglas. Was können Sie beobachten? Warum? Geben Sie alle Reaktionsgleichungen an.

Entsorgung: Die Chemikalien in einen von der Lehrperson bereitgestellten Behälter leeren.

##### Reaktion von Eisen mit Schwefel[[24]](#footnote-24) *Tragen Sie bei diesen Versuch eine Schutzbrille. Arbeiten Sie in der Kapelle.*

Material: Eisenpulver, Schwefelpulver, Reagenzglas, Reagenzglashalter, Stativ, Bunsenbrenner

* Durchmischen Sie 2 Spatel Eisen und 3 Spatel Schwefel im Reagenzglas.
* Spannen Sie das RG in das Stativ in der Kapelle ein.
* Erhitzen Sie das Gemisch bis es zur Reaktion kommt.  
  **VORSICHT:** Die Reaktion kann sehr heftig auftreten, falls die Edukte in grösseren Mengen vorhanden sind oder das Eisen- bzw. Schwefelpulver sehr fein ist.

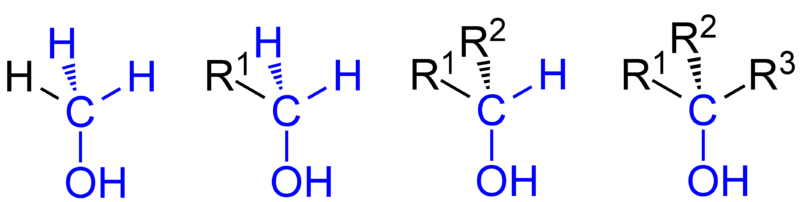
Was können Sie beobachten? Warum? Schreiben Sie die Reaktionsgleichungen auf.

Entsorgung: Die Chemikalien sind fachgerecht zu entsorgen: Glasabfall.

### Redox-Reaktionen in der organischen Chemie

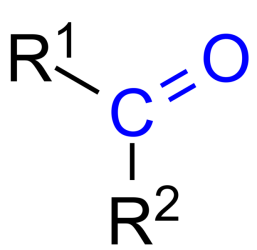
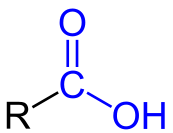
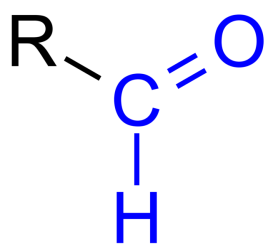
Auch organische Stoffe können an Redox-Reaktionen teilnehmen. Das bekannteste Beispiel ist Alkohol. Alkohol kann zu Aldehyden, Ketone und sogar zu Carbonsäuren oxidieren.

Man unterscheidet zwischen primären Alkoholen, sekundären und tertiären Alkoholen. Ist das C-Atom, an das die OH-Gruppe gebunden ist, mit nur einem anderen C-Atom gebunden, spricht man von einem primären Alkohol. Ist das C-Atom, das die OH-Gruppe trägt, an zwei weitere C-Atome gebunden, so ist es ein sekundärer Alkohol. Analog dazu, muss das C-Atom, das die OH-Gruppe eines tertiären Alkohols trägt, an drei weitere C-Atome gebunden sein.

[](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/25/Prim._sec._tert._Alcohols_V.1.png)

*Abbildung: primärer Alkohol, sekundärer Alkohol, tertiärer Alkohol[[25]](#footnote-25)*

**Primäre Alkohole oxidieren in Anwesenheit eines Oxidationsmittels zum zugehörigen Aldehyd, welche später sogar zur zugehörigen Carbonsäure oxidieren können.  
Sekundäre Alkohole oxidieren zum zugehörigen Keton, falls ein Elektronendonator vorhanden ist.  
Tertiäre Alkohole können nicht oxidiert werden.**

[](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cb/Ketone_Structural_Formulae_V.1.png)[](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/28/Carboxylic_Acid_General_Structure_V.1.svg)[](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/63/Aldehyde_Structural_Formulae_V.1.png)

Zur Repetition:

*Abbildung: Aldehyd[[26]](#footnote-26) Abbildung: Carbonsäure[[27]](#footnote-27) Abbildung: Keton[[28]](#footnote-28)*

### C:\Dokumente und Einstellungen\Anwender\Lokale Einstellungen\Temporary Internet Files\Content.IE5\CIFJ69KK\MC900238955[1].wmfExperiment zur Oxidation eines Alkohols

*Tragen Sie bei diesem Versuch eine Schutzbrille. Arbeiten Sie in der Kapelle.*Material: n-Propanol (1-Propanol), 2-Propanol, tertiäres Butanol, Kaliumpermanganat - Lösung (0.006M), Wasser, Natronlauge (0.1M), Becherglas, mindestens drei Reagenzgläser, Pipette  
**HINWEIS:** Mn+VII-Ionen färben violett, Mn+VI-Ionen färben grün, Mn+IV-Ionen färben braun

* Mischen Sie 1ml KMnO4-Lösung mit 15ml Wasser und 15ml Natronlauge im Becherglas und verteilen Sie das Gemisch dann gleichmässig in drei Reagenzgläser.
* Überlegen Sie sich nun, was passieren könnte, wenn Sie die drei verschiedenen Alkohole zu dem Gemisch im jeweiligen Reagenzglas füllen. Notieren Sie Ihre Überlegungen.
* Füllen Sie nun in jedes der Reagenzgläser je 4ml eines der Alkohole. Was passiert?

Entsorgung: Die Chemikalien sind fachgerecht zu entsorgen: organische Abfälle.

### 🖋Aufgaben zu Oxidationen von Alkohole

1. Was entsteht, wenn Butan-1-ol oxidiert wird?
2. Was entsteht, wenn Pentan-2-ol oxidiert wird?
3. Zu was kann ein tertiärer Alkohol oxidieren?

### Anwendungen von Redox-Reaktionen[[29]](#footnote-29)

* **chemische Industrie:** stickstoffhaltige Verbindungen, wieDüngemittel, Farbstoffe, Sprengmittel, Polyamide sind alle aus Ammoniak hergestellt, welcher mittels Redox-Reaktionen synthetisiert wurde.  
  Technisch wichtige Elektrolyseverfahren beruhen alle auf Redox-Reaktionen, genauso wie die Herstellung organischer Stoffe, wie Alkohole, Säuren, Carbonsäuren etc.
* **Verwendung fossiler Energieträger:** die gesamten Verbrennungsvorgänge von fossilen Brenn- und Treibstoffen, wie Benzin, Diesel, Kerosin, Kohle, Erdöl etc. sind Redox-Reaktionen. Selbst das Prinzip der Raketentreibstoffe beruht auf Redox-Reaktionen.
* **Sprengstoff/ Explosionen:** stark exotherme Reaktionen von Explosivstoffe, setzten Gase frei, welche sich extrem schnell ausdehnen und damit die deutlich spürbaren Druckwellen einer Explosion werden.
* **Metallurgie:** nur mittels Redox-Reaktionen kann man Metalle aus Metallerzen gewinnen, damit die reinen Metalle, welche nur selten elementar in der Natur vorkommen, weiterverarbeitet werden können.
* **Pyrotechnische Industrie:** Dank Redox-Reaktionen, bei denen oft ein Teil der enthaltenen Energie in Form von Licht freigesetzt wird, gibt es heute unzählig verschiedene Feuerwerkskörper.
* **Nachweise:** Grundlage vieler Analysemethoden in der Chemie sind die Redox-Reaktionen.
* **Lebensmittelindustrie:** sogar hier sind Redox-Reaktionen der Schlüssel zum Ziel. Beispiel: mittels Redox-Reaktionen kann Margarine aus Ölen herstellen.
* **Natur:** die bekannteste und zugleich wichtigste Redox-Reaktion ist die Fotosynthese. Dank ihr können wir alle (Menschen, Tiere und Pflanzen) auf dieser Erde leben.

Definitionen

Akzeptor  
Der Stoff, der etwas akzeptiert. Bei Redox-Reaktionen ist das Reduktionsmittel der Akzeptor. Es akzeptiert die Elektronen und nimmt sie auf.

**Aprotische Lösungsmittel**Verfügt das Molekül des Lösungsmittels nicht über eine funktionelle Gruppe, aus der H-Atome als Protonen abgegeben werden können, so spricht man von aprotischen Lösungsmittel.

**Donor**Der Stoff, der etwas (ab-)gibt. Das Oxidationsmittel ist bei Redox-Reaktionen der Donor. Es gibt sein(-e) Valenzelektron(-en) ab.

**Halogene**Die Elemente der Hauptgruppe VII heissen Halogene.

**Homolyse**Bei der Homolyse wird eine Elektronenpaarbindung so gespalten, dass danach jedes der beiden Atome eines der beiden Bindungselektronen erhält.

##### Monosubstitution

Die Monosubstitution beschreibt eine einfache, einmalige Substitution.

**Oktettregel**Die Oktettregel, oder auch Acht-Elektronen-Regel genannt, beschreibt das Bedürfnis aller Elementen ihre äusserste Hauptschale mit acht Elektronen zu besetzen. Dann ist sie voll. Die Elemente sind dann im „Paradies“-Zustand.

**Polarisierbarkeit**Die Polarisierbarkeit ist ein Mass für die Verformbarkeit der Elektronenhülle in einem elektrischen Feld. Je grösser ein Atom ist, desto leichter lässt es sich polarisieren.

**Protische Lösungsmittel**Verfügt das Molekül des Lösungsmittel über eine funktionelle Gruppe, aus der H-Atome als Protonen abgespalten werden können, ist es protisch.

**Radikal**Ein Teilchen mit ungepaarten Elektronen. Radikale sind sehr reaktiv. (Beispiele für Radikale: Chlor, Brom, Iod etc.)

**Valenzelektronen**Elektronen auf der äussersten, nicht vollständig gefüllten Hauptschale. Die Valenzelektronen können abgegeben werden, unter Aufwendung der Ionisierungsenergie, damit das Element die Oktettregel erfüllt.

Lösungen

### Experiment zu radikaler Substitution

**Brom reagiert (nicht immer) mit Heptan**

* Es passiert nichts. Es ist nichts vorhanden, was die Reaktion anregen könnte.
* Das Gemisch verfärbt sich. Durch die Bestrahlung mit dem energiereichen UV-Licht startet die Radikal-Kettenreaktion:

Start:   
Kettenfortpflanzung:   
   
**Reaktion: **Abbruch:   
   
 

Weiterreaktion:   
   
   
 …  
 

### Aufgaben zur radikaler Substitution

1. Bei einer Substitution wird ein Atom oder eine Atomgruppe von einem Molekül abgespalten. Genau an die Stelle, an der die austretende Gruppe gebunden war, wird ein neues Atom oder eine neue Atomgruppe, der sogenannte Substituent gebunden.
2. Radikale besitzen ein einsames Elektron, das heisst es gibt ein Elektron, das nicht gebunden ist. Dieses freie, einsame Elektron macht Radikale äusserst reaktionsfreudig. Durch Radikale und ihre Eigenschaft können rasch ablaufende Kettenreaktionen in Gang gesetzt werden.
3. Immer wenn zwei Radikale aufeinandertreffen, bricht diese Kette ab, da kein neues Radikal entsteht, welches weiterreagieren würde.
4. Wird ein Halogenmolekül (bspw. Br2) mit energiereichem Licht bestrahlt, so spaltet es sich homolytisch in zwei sehr reaktive Radikale. Diese Radikale sind die Grundsteine für die Kettenreaktion der radikalen Substitution.
5. Es entstehen Chlorethan und HCl:  
   

### Experiment zur elektrophilen Substitution

**Bromierung von Benzol**

* Benzol: C6H6 Brom: Br2Die Bromierung von Benzol ist eine elektrophile Substitution.
* Es passiert nichts, da Brom noch als Br2 vorhanden ist. In dieser Art ist Brom kein Elektrophil und darum reagiert nichts.
* Fügt man Aluminiumbromid AlBr3 als Katalysator hinzu, so startet die Reaktion:  
  

### Aufgaben zur elektrophilen Substitution

1. Elektrophile Teilchen sind Elektronenakzeptoren. Sie haben einen ‚Elektronenmangel‘ und suchen darum Elektronen. Das einfachste Beispiel sind die Kationen.  
   Beispiele: H+, Br+, O-, …
2. Elektrophile Substitutions-Reaktionen sind typisch für Arene.
3. Fügt der Substituent dem Ring Elektronen zu, ist der Substituent also elektronenschiebend, spricht man vom +M-Effekt. Dadurch wird die Elektronendichte im Ring erhöht.  
   Entzieht der Substituent dem Ring die Elektronen, spricht man vom –M-Effekt. Die Elektronendichte im Ring wird also verringert.
4. Ist der –M-Effekt vorhanden, kann der Erstsubstituent meta-dirigierend sein.   
   Beispiele für Erstsubstituenten, die meta-dirigierend sind: -COOH, -CHO, -NH3+, -NO2,…

### Aufgaben zur KKK-Regel und SSS-Regel

1. Werden die Reaktionspartner noch mit Licht bestrahlt, kann die Seitenkette angegriffen werden-
2. Kälte, Katalysator, Kern  
   Siedehitze (Wärme), Sonnenlicht (Licht), Seitenkette

### Experiment zur nucleophilen Substitution

* Reaktionsgeschwindigkeit: 2-Brom-2-methylpropan > 2-Brombutan > 1-Brombutan

### Aufgaben zur nucleophilen Substitution

1. Nucleophile Teilchen sind Elektronendonatoren. Nucleophile Haben einen ‚Elektronenüberschuss‘. Das einfachste Beispiel sind die Anionen. Aber auch Moleküle mit freien Elektronenpaare oder Moleküle, die Stellen mit höheren Elektronendichte (C=C oder C≡C Bindungen) aufweisen, gehören zu den nucleophilen Teilchen.  
   Beispiele: Br-, OH-, CN-, C=C, C≡C, NH3, O, …
2. Das Nucleophil, die nucleofuge Gruppe, die Reaktionsbedingungen, sowie die Substratstruktur beeinflussen die Reaktionsgeschwindigkeit.
3. Stellt ein Nucleophil sein freies Elektronenpaar schneller zur Verfügung, ist das Nucleophil selbst reaktionsfreudiger. Die Nuclephilie, also die Eigenschaft der nuclephilen Teilchen, ist von vielen Faktoren abhängig:
   * + - Elektronendichte
       - Polarisierbarkeit
4. Von den Halogenen Fluor, Chlor, Brom und Iod eignet sich Iod am besten als nucleofuge Gruppe. Die C-I-Bindung lässt sich am leichtesten spalten, so dass Iod als abtretende Gruppe die Reaktionsgeschwindigkeit eher hoch hält.

### Aufgaben zu Eliminierungs-Reaktionen

1. Unter einer Eliminierung versteht man eine Reaktion, bei der ein oder mehrere Atome oder Atomgruppen eines Moleküls abgespaltet werden, ohne dass das Molekül danach zerfällt.
2. Wird bei der Eliminierungs-Reaktion das oder die Atome am β-C-Atom abgespalten, so spricht man von der sogenannten β-Eliminierung.
3. Die Eliminierungs-Reaktion steht in direkter Konkurrenz mit der nucleophilen Substitution. Die typischen Reaktionspartner der einen Reaktion sind gleichzeitig auch typische Reaktionspartner der anderen Reaktion. Sie können dadurch nach den Schemas beider Reaktionen reagieren.
4. Eine höhere Temperatur begünstigt die Eliminierungs-Reaktionen.

### Experimente zu Additions-Reaktionen

**Brom und Cyclohexen**

* Bromwasser Br2 ist ein Halogen und liegt in der Gruppe VII des Periodensystems. Cyclohexen C6H10 gehört zu den Cycloalkenen, es besitzt also eine Doppelbindung.
* In diesem Fall wird Brom an das Cyclohexen addiert:  
  ****Das entstandene Reaktionsprodukt heisst 1,2-Dibromcyclohexan oder 1,4-Dibromcyclohexan.

### Aufgaben zu Additions-Reaktionen

1. 
2. Additionsreaktionen sind typische Reaktionen für ungesättigte Verbindungen, also Alkene, Alkine, aber auch Doppel- und Dreifachbindungen zwischen zwei verschiedenen Atomen.
3. Wird eine unsymmetrische Verbindung addiert, könnten theoretisch zwei verschiedene Produkte entstehen. Praktisch liegt die Ausbeute des Produkts II aber bei nahezu 100%. Das entstandene Produkt ist nicht symmetrisch.
4.   
   Es entsteht der zweite Alkohol, Ethanol.

### Aufgaben zur Oxidationszahl

1. a) b) c)
2. a) b) c)
3. a) b)c)
4. a b) c)
5. a) b)c)
6. a) b)c) Butansäure🡪
7. a) b)c)
8. a) b) c) Kohlenstoffmonoxid 🡪
9. a) b)c) Propansäureethylester🡪 

### Aufgaben zu Redox-Reaktionsgleichungen

1. 1. 2e- Reduktion  
   2. 8e- Reduktion  
   3. 3e- Oxidation  
   4. 0e- vollständige Redox-Reaktion  
   5. 2e- Reduktion
2. 1.   
   2.   
   3.   
   4.   
   5. 
3. 1. Ja  
   2. Ja  
   3. Nein. Dies ist eine Säure-Base-Reaktion. Es ist ein Protonenübertragungsprozess.  
   4. Nein. Es ist kein Elektronenübertragungsprozess.  
   5. Nein. Dies ist eine Säure-Base-Reaktion.
4. 1.   
    Ox:   
    Re: 

2.   
Ox:  | \*2  
Re: 

3.   
Ox:  | \*2  
Re:  | \*3

### Aufgaben zu Redox-Reaktionen

1. Z-Stellung 🡪 Nein, es reagiert nicht von selbst.

Ox:   
Re:   


1. Kalium tritt in der Natur häufiger als K+ auf, da das Kalium-Metall sein Valenzelektron sehr schnell abgibt und dann die Oktettregel erfüllt, also stabil ist.
2. Metalle, insbesondere Alkalimetalle haben nur wenige Valenzelektronen (Alkalimetalle besitzen nur ein Valenzelektron). Wenn sie die Valenzelektronen abgeben, erfüllen sie die Oktettregel und erreichen einen stabilen Zustand. Sie oxidieren also sehr häufig.
3. Ox:  | \*2  
   Re:   
     
   Das entstandene Nickel(II)-Hydroxid ist grünlich. Jetzt wissen wir, warum Nickelschmuck mit der Zeit eine eher hässliche und störende, grünliche Oberfläche hat.
4. Der Ananas-Saft ist leicht säuerlich. Er enthält also H3O+-Ionen. Der Zinnüberzug könnte mit den H3O+-Ionen reagieren, allerdings wurde der Überzug beim Aufschneiden verletzt und das darunterliegende Aluminium reagiert vor Zinn:  
     
   Die entstandenen Ionen sind im Ananas-Saft. Sie sollten nicht in den Körper gelangen.

### 

### Experimente zu Redox-Reaktionen

##### Die chemische Brausetablette: Natrium in Wasser

* Frisch geschnittenes Natrium reagiert innerhalb weniger Minuten mit der feuchten Raumluft:  
    
  Das entstandene Natriumhydroxid glänzt, dadurch entsteht der Oberflächenglanz, den man bei frisch geschnittenem Natrium sehen kann.
* Natrium reagiert mit dem Wasser:  
  

Das entstehende NaOH könnte nachgewiesen werden, wenn man dem Wasser im Becherglas vorgängig ein wenig Phenolphthalein zugefügt hätte. Das entstehende Wasserstoffgas H2 sieht man als Sprudel. Da die Reaktion allerdings stark exotherm ist, kann sich das Wasserstoffgas leicht entzünden:  
 (exotherme Reaktion = läuft von selbst ab)  
 Es verbrennt mit einer sehr hellen Flamme zu Wasser. Auch das noch vorhandene Natriumstück schmilzt bei der stark exothermen Reaktion.

##### Reaktion von Eisen mit Schwefel

* Das Gemisch glüht auf. Es entsteht Eisensulfid:  
  Ox:   
  Re:   
    
  Die Reaktion befindet sich in Z-Stellung. Sie läuft also nicht von selbst ab, darum erwärmen wir das Gemisch mit dem Bunsenbrenner.

### Experiment zur Oxidation eines Alkohols

Der primäre Alkohol (1-Propanol) wird in Anwesenheit eines Oxidationsmittels (hier: Kaliumpermanganat KMnO4) zum Aldehyd Propanal und später sogar zur Carbonsäure Propansäure oxidiert.   
Der sekundäre Alkohol (2-Propanol) wird in Anwesenheit des Kaliumpermanganats zum Keton Propanon oxidiert.  
Der tertiäre Alkohol kann nicht oxidieren.

Bei der Oxidation verändern sich die Farben der Gemische, so wie es im Hinweis steht.

### Aufgaben zu Oxidationen von Alkohole

1. Butan-1-ol oxidiert im ersten Schritt zu Butanal, später sogar zur Butansäure.
2. Pentan-2-ol oxidiert zu Pentan-2-on.
3. Tertiäre Alkohole können nicht oxidiert werden.

Schlusswort

Soeben sind wir am Schluss dieses Leitprogramms angelangt. Ich hoffe, dass es mir gelungen ist, das doch komplexe Thema der organischen Chemie verständlich aufzuzeigen, so dass Sie jetzt die behandelten Reaktionen verstehen, anwenden und erklären können.

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt meiner Betreuerin, Frau Dr. Bernadette Stypinski, die mir die Anregung zu dieser Maturaarbeit gegeben hat. Sie war zu jeder Zeit eine grosse Hilfe und eine tolle Ansprechperson.

Bei meiner Familie möchte ich mich auf jeden Fall bedanken. Vor allem meine Eltern haben mich während der ganzen Arbeit moralisch unterstützt und ermutigt, was mir viel Kraft gab. Vielen Dank dafür.

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich in irgendeiner Form unterstützt haben.

Vielen Dank für alles.

Quellenangabe

**Bücher:**

Arni, Arnold. Grundkurs Chemie II – Organische Chemie für Fachunterricht und Selbststudium. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH. 1998.

Asselborn, Wolfgang. Chemie heute – S II. Braunschweig: Westermann Schroedel. 2009

Chemie heute – Sekundarstufe II. Hannover: Schroedel Verlag. 2006

Mortimer, Charles E. und Müller, Ulrich. Chemie - Das Basiswissen der Chemie. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG. 2010.

Prof. Dr. Kemnitz, Erhard und Dr. Simon, Rüdiger, Duden Basiswissen Schule, Chemie Abitur. Frankfurt am Main: PATETEC Verlag für Bildungswesen Berlin. 2004.

**Links:**  
Netexperimente. de 2.0  
http://www.netexperimente.de/chemie/65.html; 02.09.2011

Wikipedia.org  
http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Aldehyde\_Structural\_Formulae\_V.1.png&filetimesfile=20100329161530; 01.12.2011

http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Carboxylic\_Acid\_General\_Structure\_V.1.svg&filetifiletim=20100410111520; 01.12.2011

http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Ketone\_Structural\_Formulae\_V.1.png&filetimestafi=20100329142209; 01.12.2011

http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Prim.\_sec.\_tert.\_Alcohols\_V.1.png&filetimestamp=20100532010053; 01.12.2011

http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Walden-inversion-3D balls.png&filetimestamp=20071201201516; 26.11.2011

1. vgl. Mortimer, Charles E. und Müller, Ulrich. Chemie - Das Basiswissen der Chemie. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG. 2010. S. 544-547. [↑](#footnote-ref-1)
2. vgl. Mortimer, Charles E. und Müller, Ulrich. Chemie - Das Basiswissen der Chemie. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG. 2010. S. 548-550. [↑](#footnote-ref-2)
3. Natürlich gibt es für die jeweilige Stellung zwei Möglichkeiten, die allerdings Bild und Spiegelbild sind. [↑](#footnote-ref-3)
4. Halogene haben einen sehr starken –I-Effekt, gleichzeitig aber auch einen etwas schwächeren +M-Effekt, welcher die desaktivierende Wirkung für die ortho-/ para-Stellung wieder etwas aufhebt. Halogene sind im Allgemeinen ortho-/ para-dirigierend. [↑](#footnote-ref-4)
5. vgl. Chemie heute – Sekundarstufe II. Hannover: Schroedel Verlag. 2006. S. 290. [↑](#footnote-ref-5)
6. Alkylbenzol: Ein Benzolring, der eine Seitenkette besitzt. Beispiel: Toluol: Benzolring mit Seitenkette CH3 [↑](#footnote-ref-6)
7. Wie man das Produkt einer Mehrfachsubstitution bestimmt, können Sie im Kapitel ‚*elektrophile Substitution*‘ nachlesen. (→ ±M- und ±I-Effekt) [↑](#footnote-ref-7)
8. wenn nichts anderes vermerkt ist, gilt:  
    vgl. Mortimer, Charles E. und Müller, Ulrich. Chemie - Das Basiswissen der Chemie. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG. 2010. S. 555-556. [↑](#footnote-ref-8)
9. Es gilt folglich das Reaktionsgeschwindkeitsgesetz für Reaktionen *1. Ordnung*, wofür auch die Eins in der Abkürzung SN*1* steht. [↑](#footnote-ref-9)
10. http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Walden-inversion-3D-balls.png&filetimestamp=20071201201516; 26.11.2011 [↑](#footnote-ref-10)
11. vgl. Chemie heute – Sekundarstufe II. Hannover: Schroedel Verlag. 2006. S. 242-243. [↑](#footnote-ref-11)
12. Ist das Teilchen stärker polarisierbar, so wird das freie Elektronenpaar besser zugänglich und es kann schneller reagieren. [↑](#footnote-ref-12)
13. Wasserstoffbrücken zwischen dem Lösungsmittel und dem Nucleophil können die Reaktion (stark) verlangsamen. [↑](#footnote-ref-13)
14. vgl. Asselborn, Wolfgang. Chemie heute – S II. Braunschweig: Westermann Schroedel. 2009. S. 310. [↑](#footnote-ref-14)
15. Die C-Atome in einer Kette werden entweder mit Zahlen [1,2,3,..] oder mit griechischen Buchstaben [α,β,γ,…] bezeichnet. Ein β-C-Atom ist dementsprechend das zweite C-Atome einer Kette. [↑](#footnote-ref-15)
16. vgl. Mortimer, Charles E. und Müller, Ulrich. Chemie - Das Basiswissen der Chemie. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG. 2010. S. 557. [↑](#footnote-ref-16)
17. → Säure-Base-Reaktion [↑](#footnote-ref-17)
18. vgl. Mortimer, Charles E. und Müller, Ulrich. Chemie - Das Basiswissen der Chemie. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG. 2010. S. 557. [↑](#footnote-ref-18)
19. vgl. Mortimer, Charles E. und Müller, Ulrich. Chemie - Das Basiswissen der Chemie. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG. 2010. S. 557. [↑](#footnote-ref-19)
20. vgl. Mortimer, Charles E. und Müller, Ulrich. Chemie - Das Basiswissen der Chemie. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG. 2010. S. 545. [↑](#footnote-ref-20)
21. Das ‚*anti*‘ verweist auf die Stellung der beiden Br-Atomen: Sie liegen sich *gegenüber*. [↑](#footnote-ref-21)
22. Die Stabilität der Carbenium-Ionen: tertiäres > sekundäres > primäres Carbenium-Ion > Methyl-Kation. [↑](#footnote-ref-22)
23. vgl. Chemie heute – Sekundarstufe II. Hannover: Schroedel Verlag. 2006. S. 132-133. [↑](#footnote-ref-23)
24. Mengenangaben gemäss http://www.netexperimente.de/chemie/65.html; 02.09.2011 [↑](#footnote-ref-24)
25. http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Prim.\_sec.\_tert.\_Alcohols\_V.1.png&filetimestamp=20100532010053; 01.12.2011 [↑](#footnote-ref-25)
26. http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Aldehyde\_Structural\_Formulae\_V.1.png&filetimesfile=20100329161530; 01.12.2011 [↑](#footnote-ref-26)
27. http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Carboxylic\_Acid\_General\_Structure\_V.1.svg&filetifiletim=20100410111520; 01.12.2011 [↑](#footnote-ref-27)
28. http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Ketone\_Structural\_Formulae\_V.1.png&filetimestafi=20100329142209; 01.12.2011 [↑](#footnote-ref-28)
29. vgl. Prof. Dr. Kemnitz, Erhard und Dr. Simon, Rüdiger, Duden Basiswissen Schule, Chemie Abitur. Frankfurt am Main: PATETEC Verlag für Bildungswesen Berlin. 2004. S. 205 – 206.

    [↑](#footnote-ref-29)