



AC(OC) II PVK Skript

Thea Ortner
tortner@student.ethz.ch

Zürich, Juni 2023

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
VCS - Vereinigung der Chemiestudierenden

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	4
2 Wichtige Abkürzungen	5
2.1 Moleküle	5
3 Resonanzstrukturen	6
3.1 Regeln zur Formulierung von Resonanzstrukturen	6
3.2 Beurteilung der Stabilität von Resonanzstrukturen	6
3.3 Übungsaufgaben	7
4 Substituenteneffekte	8
4.1 σ -Effekte	8
4.2 π -Effekte	8
5 Stabilität von reaktiven Intermediaten	9
5.1 Carbokationen	9
5.2 Radikale	9
5.3 Carbanionen	10
5.4 Bredt'sche Regel	10
6 Säuren und Basen	11
6.1 Säuren und Säurestärke	11
6.2 Basen und Basenstärke	11
6.3 Übungsaufgaben	12
6.3.1 Azidität	12
6.3.2 Homolytische Spaltung	13
6.3.3 Carbanionen	14
7 Nukleophile und Elektrophile	15
7.1 Nukleophile	15
7.2 Elektrophile	15
8 Die Hammett-Beziehung	16
8.1 Substituentenkonstante σ	16
8.2 Reaktionskonstante ρ	17
9 Thermodynamik vs. Kinetik	18
10 Elektrophile Addition an C,C-Doppelbildungen	19
10.1 Mechanismus	19
10.2 Energiediagramm	19
10.3 Fürst-Plattner Regel	20

10.4 Syn und Anti	20
10.5 Typische Elektrophile Additionen	20
10.5.1 Proton als Elektrophil	20
10.5.2 Halogenmoleküle	21
10.5.3 Addition von Wasser	21
10.6 Substituenteneinfluss	21
10.7 Übungsaufgaben	22
11 Elektrophile Aromatische Substitution	23
11.1 Mechanismus	23
11.2 Energiediagramm	23
11.3 Zweitsubstitution	23
11.4 Drittsubstitution	24
11.5 Übungsaufgaben	25
12 Nucleophile Substitution	26
12.1 S_N1 Mechanismus	26
12.2 S_N1 Energiediagramm	26
12.3 S_N2 Mechanismus	26
12.4 S_N2 Energiediagramm	26
12.5 Ambidente Nukleophile	27
12.6 Stereoisomerie	27
12.7 S_N1 vs. S_N2	28
12.8 Übungsaufgaben	29
13 β-Eliminierungen	31
13.1 E1 Mechanismus	31
13.2 E1 Energiediagramm	31
13.3 E2 Mechanismus	31
13.4 E2 Energiediagramm	31
13.5 E1 _{cb} Mechanismus	32
13.6 E1 _{cb} Energiediagramm	32
13.7 Hofmann vs. Saytzeff	32
13.8 E1 vs. E2 vs. E1 _{cb}	33
13.9 SN vs. E	33
13.10 Übungsaufgaben	34
14 Kombinierte Aufgaben	35
14.1 Retrosynthese	35
14.2 Reaktionsprodukte	38
14.3 Reagenzien	40
14.4 Selektivitäten	41
14.5 Synthesewege	42

15 Zusätzliche Aufgaben	44
15.1 Resonanzübungen	44
15.2 Dirigierende Effekte	48
15.3 pKa-Werte	48
15.4 Substituenteneffekte	48
15.5 Nucleophile Substitution	49
15.6 Elektrophile Aromatische Substitution	50

1 Einleitung

Dieses Skript ist die Grundlage des Prüfungsvorbereitungskurses (PVK) für die Vorlesung Allgemeine Chemie II - Organische Chemie¹. Das Skript wurde basierend auf den Vorlesungsinhalten sowie den Übungen der Vorlesung von Professor Dr. Peter Chen erstellt. Als Hilfe wurde zudem das PVK Skript von Philip Blank vom Sommer 2022 genutzt. Danke, Philip, fürs zur Verfügung stellen!

+++ Disclaimer +++

Das Skript sowie der PVK behandeln eine Auswahl der wichtigsten prüfungsrelevanten Themen in AC(OC) II. Sie sind allerdings kein vollumfänglicher Ersatz für die Vorlesung.

¹chen.ethz.ch/education/acoc-ii

2 Wichtige Abkürzungen

EN = Elektronegativität

2.1 Moleküle

Folgende Abkürzungen sollten für die Prüfung bekannt sein.

Ph	Ar	Bn	Ac
Et	AcOH	DMF	DMSO
THF	DCM	iPrOH	MeCN

Tabelle 1: Wichtige Abkürzungen in ACOC II

3 Resonanzstrukturen

Resonanzstrukturen können für delokalisierte Systeme (Systeme mit π - Elektronen) formuliert werden. Dabei tragen alle Resonanzstrukturen zu einem Teil zur realen Struktur bei, wobei der Beitrag von der Stabilität der jeweiligen Resonanzstruktur abhängig ist. Die Realstruktur ist am stabilsten. Resonanzstrukturen werden mit Doppelpfeilen \leftrightarrow getrennt.

3.1 Regeln zur Formulierung von Resonanzstrukturen

- Atomkoordinaten dürfen nicht verändert werden $\rightarrow \sigma$ -Bindungen bleiben bestehen, es werden nur π -Bindungen verschoben.
- Die **Oktettregel** für Elemente der 2. Periode muss streng befolgt werden. Es gilt die maximale Valenzelektronenzahl von 8, es stehen keine weiteren Orbitale zu Aufnahme von Elektronen zur Verfügung.
- Mehrfachladungstrennung vermeiden. \rightarrow Nicht mehr als zwei Formalladungen pro Struktur.
- Stickstoff oder Sauerstoff ohne volle Valenzschale (8 Elektronen) vermeiden.

3.2 Beurteilung der Stabilität von Resonanzstrukturen

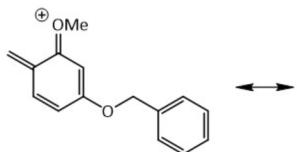
Folgende Kriterien gelten mit abnehmender Relevanz für die Beurteilung der Stabilität einer Resonanzstruktur.

1. Maximale Anzahl kovalenter Bindungen
2. Geringere (keine) Ladungstrennung
3. Wenn Ladungstrennung: Formalladungen ist gemäss der Elektronegativität der beteiligten Atome verteilt

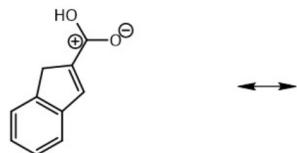
3.3 Übungsaufgaben

Ergänze die Resonanzstrukturen und gib jeweils die stabilste Resonanzstruktur an.

A)



B)



4 Substituenteneffekte

Wie verändern sich die chemischen Eigenschaften einer Verbindung, wenn ein an der Reaktion nicht unmittelbar beteiligtes H-Atom (Referenz) durch einen Substituenten X ersetzt wird?

Substituenteneffekte beschreiben den Einfluss von X und können in sterische und elektronische Einflüsse unterteilt werden. Bei den elektronischen Einflüssen unterscheidet man σ - ("induktive") und π - ("mesomere") Effekte.

Grundsätzlich werden Substituenten, welche Elektronendichte von sich weg, in Richtung des reaktiven Zentrums schieben, als Donoren ("+") bezeichnet. Sie wirken aktivierend. Substituenten, welche Elektronendichte zu sich ziehen, werden als Akzeptoren ("−") bezeichnet.

4.1 σ -Effekte

Die σ - (induktive) Effekte beschreiben den Einfluss über das σ - Bindungsgerüst eines Moleküls. Sie beruhen hauptsächlich auf Elektronegativitätsunterschieden zwischen der Referenz -H und -X. Sie nehmen mit zunehmender Distanz schnell ab.

σ -Donoren (+I): Teilchen, die elektronenschiebend wirken → negativ geladene Teilchen, Teilchen mit einer niedrigen EN, Ausbildung von Hybridorbitalen.

σ -Akzeptoren (-I): Teilchen, die elektronenziehend wirken → positiv geladene Teilchen, Teilchen mit hoher EN, umso höher die EN umso stärker der Effekt.

4.2 π -Effekte

Für π -Effekte, auch mesomere Effekte genannt, werden Elektronen in einem konjugierten System, sprich einer π -Bindung oder einem **freien Elektronenpaar** benötigt. Diese können unabhängig von der σ -Bindung bewegt werden.

π -Donoren (+M): Atome oder Gruppen, die über π -Elektronen , welche sie dem konjugierten System hinzugeben können, verfügen.

π -Akzeptoren (-M): Atome oder Gruppen, die π -Elektronen aus einer Doppel- oder Dreifachbindung aufnehmen können.

Bei vielen Substituenten treten σ - und π - Effekt nebeneinander oder auch entgegengesetzt (z.B. $-\text{NR}_2$: π -Donor und σ -Akzeptor) auf.

Faustregel: Im Allgemeinen dominieren π -Effekte gegenüber σ - Effekten. Eine Ausnahme bilden hierbei Halogene, bei welchen aufgrund der hohen EN der σ -Effekt überwiegt.

σ -Akzeptoren	σ -Donoren	π -Akzeptoren	π -Donoren
$-\text{SO}_2\text{R}$	$-\text{CO}_2^-$	$-\text{SO}_2\text{CF}_3$	$-\text{NR}_2$
$-\text{NH}_3^+, -\text{NR}_3^+$	$-\text{CR}_3, -\text{CHR}_2$	$-\text{NO}_2$	$-\text{NH}_2$
$-\text{NO}_2$	$-\text{CH}_2\text{R}$	$-\text{C}\equiv\text{N}$	$-\text{OR}, -\text{OH}$
$-\text{C}\equiv\text{N}$	$-\text{CH}_3$	$-\text{COOH}$	$-\text{NHCOR}$
$-\text{F}, -\text{Cl}, -\text{Br}, -\text{I}$	$-\text{SiR}_3$	$-\text{COOR}$	$-\text{C}_6\text{H}_6$
$-\text{OR}, -\text{OH}$	$-\text{SnR}_3, -\text{GeR}_3$	$-\text{SO}_2\text{R}$	$-\text{F}, -\text{Cl}, -\text{I}, -\text{Br}$
$-\text{CO}_2\text{H}$	$-\text{O}^-$	$-\text{CONH}_2$	$-\text{O}^-$
$-\text{CO}_2\text{R}$		$-\text{CONR}_2$	$-\text{S}^-$
$-\text{COR}$		$-\text{C}=\text{N}-\text{R}$	
$-\text{CHO}$		$-\text{S}(\text{=O})\text{R}$	
$-\text{NR}_2$		$-\text{C}=\text{O}$	
$-\text{SR}$			
$-\text{C}\equiv\text{CH}$			
$-\text{C}_6\text{H}_6$			
$-\text{CR}=\text{CR}_2$			

Tabelle 2: Eigenschaften verschiedener Substituenten

5 Stabilität von reaktiven Intermediaten

5.1 Carbokationen

Carbokationen sind Elektronenmangelverbindungen. Daher wirken elektronenschiebende, den Elektronenmangel ausgleichende Substituenteneffekte stabilisierend. Dies sind **σ - und π - Donoren**, wobei π -Effekte den grösseren Einfluss haben.

Das leere Orbital ist bei einem möglichst kleinen s-Anteil am stabilsten (energetisch höherliegend). Daher gilt $\mathbf{p} > \mathbf{sp}^3 > \mathbf{sp}^2 > \mathbf{sp}$.

Die meisten Carbokationen sind \mathbf{sp}^2 hybridisiert und obligat planar. Die Umhybridisierung von \mathbf{sp}^2 zu \mathbf{sp}^3 kostet viel Energie, weshalb **Kationen an Brückenköpfen sehr instabil** sind.

Einen weiteren wichtigen Einfluss hat die **Hyperkonjugation**, also die elektronische Wechselwirkung zwischen einem vollständig besetzten Orbital einer σ -Bindung (hier: C-H oder C-C-Bindung) und einem benachbarten unbesetzten oder einfach besetzten Molekülorbital. Daraus resultiert eine Resonanzstabilisierung.

5.2 Radikale

Radikale entstehen durch homolytische Spaltung von Einfachbindungen, wobei die beiden Bindungselektronen auf beide Bindungspartner aufgeteilt werden. $\text{A}-\text{B} \longrightarrow \text{A}\bullet + \bullet\text{B}$. Radikale sind ebenfalls Elektronenmangelverbindungen, es gelten die gleichen Stabilitätskriterien wie für Carbokationen.

Radikale sind normalerweise angenähert planar und sp^2 hybridisiert. Das einsame Elektron befindet sich im p_z Orbital. Aufgrund des kleinen Energieaufwands kann das Radikal aber zu sp^3 umhybridisiert werden. Aus diesem Grund **können Radikale an Brückenköpfen gebildet werden.**

5.3 Carbanionen

Carbanionen sind Elektronenüberschussverbindungen. Daher wirken elektronenentziehende, den Elektronenüberschuss ausgleichende, Substituenteneffekte stabilisierend. Dies sind **σ - und π - Akzeptoren**, wobei π -Effekte den grösseren Einfluss haben.

Das doppelt besetzte Orbital ist bei einem möglichst hohen s-Anteil am stabilsten. Wenn allerdings eine Resonanzstabilisierung des p-Orbitals möglich ist, ist dieses meistens am stabilsten. Daher gilt **$p(\text{delokalisiert}) > sp > sp^2 > sp^3 > p(\text{nicht delok.})$**

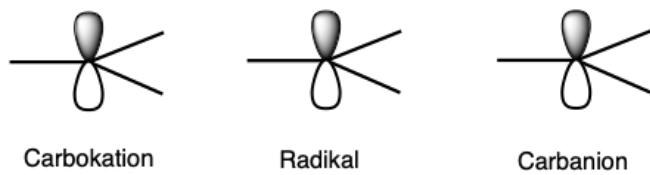


Abbildung 1: Orbitalmodelle

5.4 Bredt'sche Regel

Die Bredt'sche Regel besagt, dass der grösste, eine *trans*-Doppelbindung am Brückenkopf einschliessende Ring eines überbrückten Systems mindestens acht Ringglieder umfassen muss.

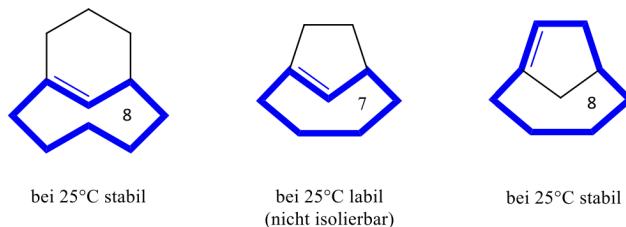
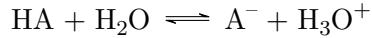


Abbildung 2: Anwendung der Bredt'schen Regel

6 Säuren und Basen

Die grundlegende Reaktion von Säuren und Basen ist ein Protonenaustausch.



Hierbei dient HA als Säure und H₂O als Base. A⁻ bezeichnet man als konjugierte Säure, H₃O⁺ als konjugierte Base.

6.1 Säuren und Säurestärke

Ein Maß für die Säurestärke ist der pk_a , welcher wie folgt definiert ist:

$$\text{pk}_a = -\log_{10}(K_a) \quad (1)$$

Er kann als "Bereitschaft" der Säure, das Proton abzugeben, gesehen werden. **Je kleiner der pk_a -Wert, desto stärker die Säure.** Da durch die Deprotonierung ein Anion entsteht, gelten die Faktoren für die Stabilität von Carbanionen.

Folgende Grundregeln sollten beachtet werden:

- Carbonsäuren sind allgemein azider als Alkohole
- Das Ausbilden von benachbarten H-Brücken stabilisiert

6.2 Basen und Basenstärke

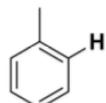
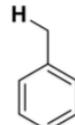
Die Basenstärke ist analog zur Säurestärke über den pk_b definiert. Eine Base ist umso stärker, umso stabiler die konjugierte Base (Kationenstabilität).

6.3 Übungsaufgaben

6.3.1 Azidität

Welches der markierten Wasserstoffatome wird jeweils leichter heterolytisch abgespalten und warum?

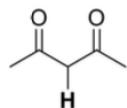
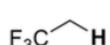
A)



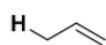
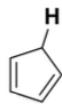
B)



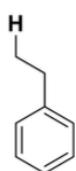
C)



D)



E)



6.3.2 Homolytische Spaltung

Welches der markierten Wasserstoffatome wird jeweils leichter homolytisch abgespalten und warum?

F)



G)



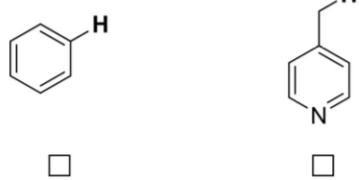
H)



I)

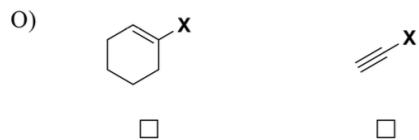
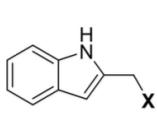
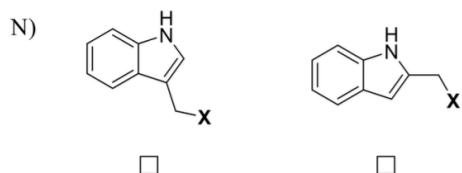
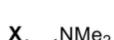
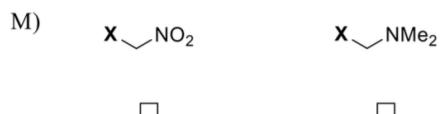
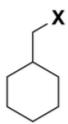
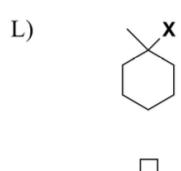
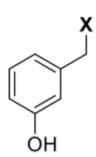
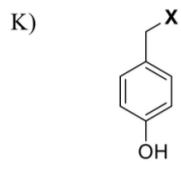


J)



6.3.3 Carbanionen

Welche der folgenden nucleofugen Abgangsgruppen X wird jeweils leichter heterolytisch abgespalten und warum?



7 Nukleophile und Elektrophile

Die Unterteilung von Reaktanden in Nukleophile und Elektrophile ist wichtig, um Reaktionen erkennen und formulieren zu können. Die Unterteilung wird für neutrale Atome, Moleküle oder Ionen durchgeführt. Moleküle, welche sowohl nukleophile als auch elektrophile Zentren besitzen, nennt man **Amphiphile**.

7.1 Nukleophile

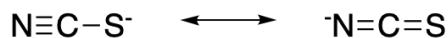
Nukleophile enthalten ein Atom oder Zentrum mit Elektronenüberschuss, sie verfügen über

- energetisch hochliegende, doppelt besetzte, nichtbindende ("freie") Elektronenpaare **oder**
- Bindungen aus p- Atomorbitalen (π -Bindungen).

Nukleophile können Substituenten mit niedriger Elektronendichte angreifen. Nukleophile sind meistens auch Reduktionsmittel (geben Elektronen ab) und/oder Basen.

Ambidente Nukleophile besitzen mehrere nukleophile Zentren.

Ein typisches Beispiel hierfür ist **Thiocyanat**:



Weitere wichtige ambidente Nucleophile sind:

Enolat	Cyanid	Nitrit
--------	--------	--------

Tabelle 3: Wichtige ambidente Nucleophile in ACOC II

7.2 Elektrophile

Elektrophile enthalten ein Zentrum mit Elektronenunderschuss, sie verfügen über

- energetisch tiefliegende, unbesetzte Atom- oder Molekülorbitale.

Elektrophile können von Substraten mit hoher Elektronendichte angegriffen werden. Elektrophile sind meistens auch Oxidationsmittel (nehmen Elektronen auf) und/oder Säuren.

8 Die *Hammett*-Beziehung

Die *Hammett*-Beziehung dient der Quantifizierung von Substituenteneffekten. Die Zusammenhänge der Effekte wurden in der folgenden Gleichung zusammengefasst:

$$\log\left(\frac{k_x}{k_H}\right) = \rho \cdot \sigma \quad (2)$$

Hierbei wird entweder k = Geschwindigkeitskonstante oder K = Gleichgewichtskonstante genutzt.

8.1 Substituentenkonstante σ

Die Substituenteneinflüsse wurden anhand des Vergleiches zwischen pKa-Werten von Benzoesäure mit substituierter Benzoesäure bestimmt. Aufgrund der sterischen Effekte bei *ortho*-substituierten Benzoesäuren wurden die Werte für *meta*- und *para*-substituierte Benzoesäuren bestimmt.

$\sigma > 0$: **Akzeptor** → reduziert die Elektronendichte gegenüber H als Referenz.

$\sigma < 0$: **Donor** → erhöht die Elektronendichte gegenüber H als Referenz.

Neben dem σ -Effekt muss auch der π -Effekt beachtet werden, weshalb für π -Donor Substituenten die σ^+ -Werte und für π -Akzeptor Substituenten die σ^- -Werte genutzt werden.

Diese Werte wurden aus der Azidität bestimmt, da sie aber nicht einfach so auf andere Reaktionen übertragen werden können, wird der Skalierungsfaktor ρ (*Reaktionskonstante*) genutzt.

Die σ Werte können visuell in einem Graph gegen den $\log(k_{rel})$ aufgetragen werden. Dabei ergibt sich ρ als die lineare Steigung.

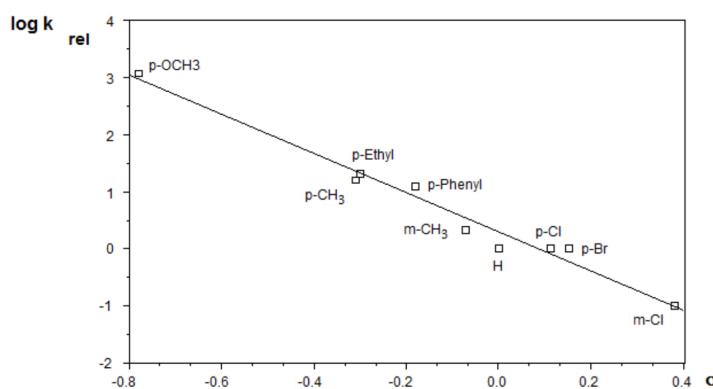


Abbildung 3: Beispiel einer Hammett Kurve

8.2 Reaktionskonstante ρ

Die Reaktionskonstante ρ beschreibt den Einfluss eines Substituenten X auf die Reaktionsgeschwindigkeit einer bestimmten Reaktion. Je kleiner der Absolutbetrag von ρ , desto kleiner der Einfluss von X.

$\rho > 0$: Negative Ladung im ÜZ → Akzeptorsubstituenten beschleunigen die Reaktion (positiver $\log(k_{rel})$), da sie die negative Ladung stabilisieren.

$\rho < 0$: Positive Ladung im ÜZ → Donorsubstituenten beschleunigen die Reaktion (positiver $\log(k_{rel})$), da sie die positive Ladung stabilisieren.

9 Thermodynamik vs. Kinetik

Die Unterscheidung zwischen thermodynamischen und kinetischen Produkten kann am Besten anhand eines Energiediagramms veranschaulicht werden.

Kinetische Produkte werden schneller gebildet und durch den Reaktionsmechanismus und die Geschwindigkeit der Reaktion bestimmt.

Thermodynamische Produkte hingegen sind diejenigen, die die geringste freie Energie haben und daher am stabilsten sind. Sie repräsentieren den energetisch günstigsten Endzustand einer Reaktion.



Abbildung 4: Reaktionsdiagramm zur Veranschaulichung von kinetischer vs thermodynamischer Kontrolle

10 Elektrophile Addition an C,C-Doppelbindungen

10.1 Mechanismus

X^+ greift zuerst an, daher **Elektrophile** Addition. Der σ -Komplex ist ein überbrücktes Kation, welches den konfigurationellen Verlauf der Addition kontrolliert. Ein normales Carbokation als Übergangszustand kontrolliert den konfigurationellen Verlauf hingegen nicht.

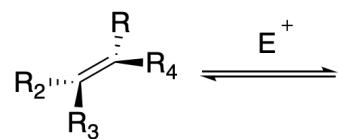


Abbildung 5: Mechanismus der Elektrophilen Addition an eine C,C-Doppelbindung

10.2 Energiediagramm



Abbildung 6: Reaktionsdiagramm Elektrophile Addition an eine C,C-Doppelbindung

Welche Faktoren stabilisieren das Carbokation, sodass es bevorzugt als Intermediat auftritt?

-
-
-

10.3 Fürst-Plattner Regel

Die Fürst-Plattner Regel wird für die Öffnung des σ -Komplexes an konformationell festgelegten Cyclohexanderivaten verwendet.

Regel: Cyclohexan-Oxirane werden obligat trans-diaxial geöffnet.

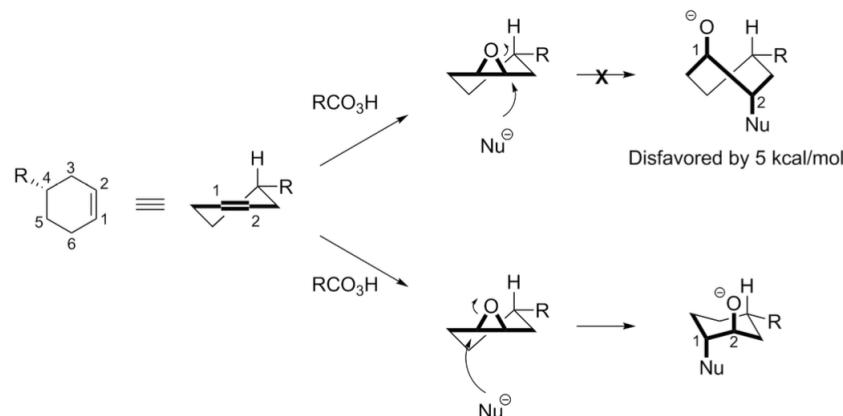


Abbildung 7: Veranschaulichung der Fürst-Plattner Regel

10.4 Syn und Anti

Syn: Elektrophil und Nukleophil befinden sich auf der gleichen Seite

Anti: Elektrophil und Nukleophil befinden sich auf entgegengesetzter Seite → bei σ -Komplexen durch Rückseitenangriff gebildet.

10.5 Typische Elektrophile Additionen

10.5.1 Proton als Elektrophil

Die elektrophile Addition eines Protons verläuft in der Regel über ein intermediär gebildetes Carbokation.

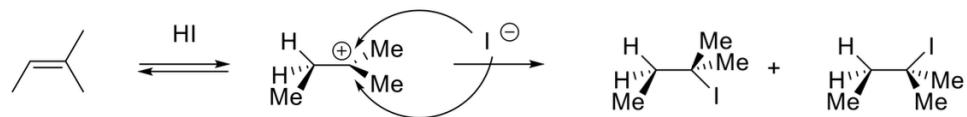


Abbildung 8: Elektrophile Addition mit Proton als Elektrophil

Markownikow-Regel: Das Wasserstoffatom addiert am wasserstoffreicherem (niedriger substituierten Kohlenstoffatom).

Was führt zu Anti Markownikow Produkten?

- Radikalreaktion
- Resonanzstabilisierung
- Hydroborierung

10.5.2 Halogenmoleküle

Die elektrophile Addition eines Halogenmoleküls verläuft in der Regel über den σ -Komplex.

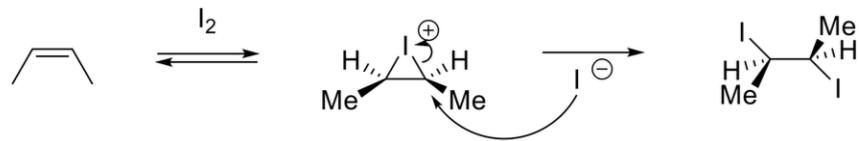


Abbildung 9: Elektrophile Addition von einem Halogenmolekül

10.5.3 Addition von Wasser

Bei der elektrophilen Addition von Wasser entsteht ein Alkohol.

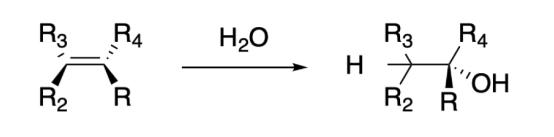


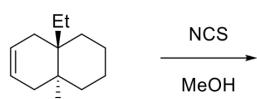
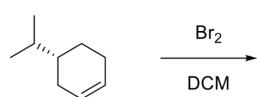
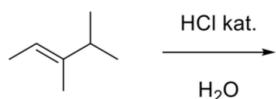
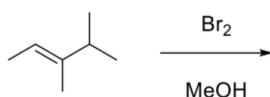
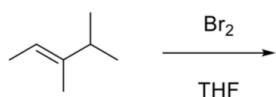
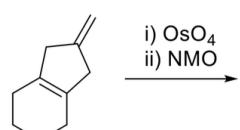
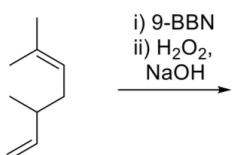
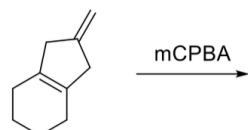
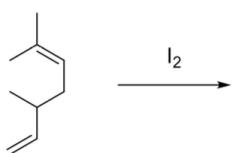
Abbildung 10: Elektrophile Addition von Wasser

10.6 Substituenteneinfluss

Elektronenschiebende Substituenten beschleunigen die Reaktion aufgrund der erhöhten Elektronendichte in der Doppelbindung. Die Wirkung der Substituenten an der Doppelbindung ist additiv.

10.7 Übungsaufgaben

Zeichne die Produkte der jeweiligen Reaktionen. Nehme dabei an, dass jeweils nur ein Äquivalent vorliegt.



11 Elektrophile Aromatische Substitution

11.1 Mechanismus

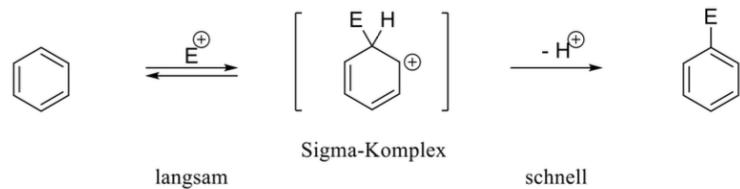


Abbildung 11: Mechanismus Elektrophile Aromatische Substitution

11.2 Energiediagramm



Abbildung 12: Energiediagramm Elektrophile Aromatische Substitution

11.3 Zweitsusbtitution

Bei der Zweitsubstitution wird die Regioselektivität relevant. Dazu werden dirigierende Effekte, welche durch die sterischen und elektronischen Substituenteneffekte bestimmt werden, genutzt.

Elektronischer Effekt	Dirigierender Effekt
σ -Akzeptoren	<i>meta</i> -dirigierend
π -Akzeptoren	<i>meta</i> -dirigierend
σ -Donoren	<i>para</i> - und <i>ortho</i> -dirigierend
π -Donoren	<i>para</i> - und <i>ortho</i> -dirigierend

Tabelle 4: Dirigierende Effekte bei der Zweitsubstitution am Benzolkern

Zusätzlich sind folgende Punkte zu beachten:

- π -Effekte sind meistens ausschlaggebend und überwiegen die σ -Effekte.
- Halogensubstituenten (π -Donor und σ -Akzeptor): *ortho/para*-dirigierend
- Bei Donoren wird in der Regel aus sterischen Gründen die *para*-Position bevorzugt substituiert. Bei kleinen sterischen Effekten wird *ortho* statistisch häufiger substituiert (2x *ortho* vs 1x *para*)

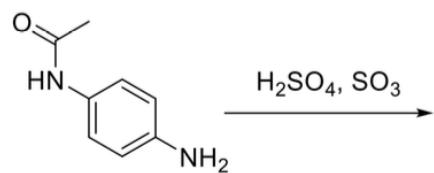
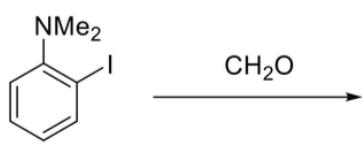
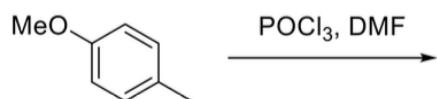
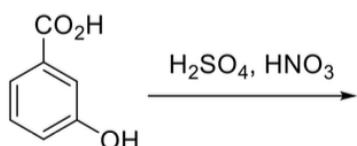
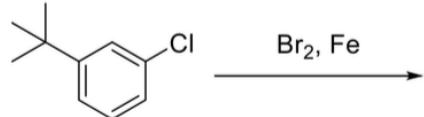
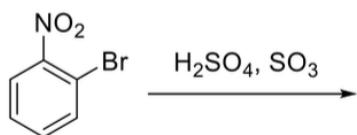
11.4 Drittsubstitution

Für die Drittsubstitution müssen die Substituenteneffekte beider bereits vorhandenen Substituenten betrachtet werden. Wenn sich die Effekte für eine Position verstärken, wird diese substituiert. Verstärken sich die Effekte für mehrere oder gegensätzliche Positionen, gelten folgende Regeln:

- Die am stärksten aktivierende Gruppe bestimmt den Ort der Drittsubstitution.
Amine (+M, +I) > Alkohole, Ether (+M, -I) > Amide, Ester (+M, -I) > Alkyl (+I) > Halogene (+M schwach, -I)
- Die Bildung von 1,2,3-trisubstituierten Produkten ist sterisch erschwert.
- Falls aktivierende und desaktivierende Gruppen in *meta*-Stellung zueinander stehen, erfolgt Substitution in **para-Position zu der am stärksten aktivierenden Gruppe**.

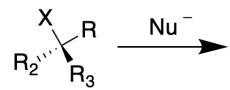
11.5 Übungsaufgaben

Gib jeweils die Produkte der folgenden Reaktionen an.



12 Nucleophile Substitution

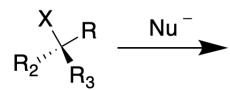
12.1 S_N1 Mechanismus



12.2 S_N1 Energiediagramm



12.3 S_N2 Mechanismus



12.4 S_N2 Energiediagramm



12.5 Ambidente Nukleophile

Bestimmte Moleküle besitzen mehrere nucleophile Zentren (Nu), mit welchen sie nucleophile Substitutionen eingehen können.

Die Vohersage, welches Zentrum wann reagiert, ist anhand der Lösungsmittelleffekte und des HSAB Konzeptes möglich. Es gilt, dass **ein Nucleophil umso leichter nach dem S_N2 Mechanismus reagiert, umso weicher es ist.**

12.6 Stereoisomerie

Epoxide werden entsprechend der Fürst-Plattner Regel geöffnet. (Siehe Teil Elektrophile Addition)

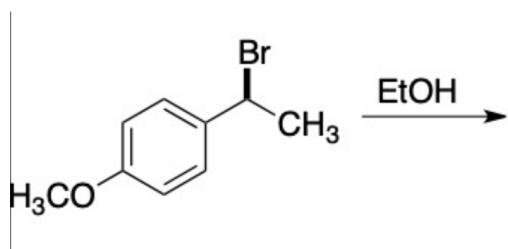
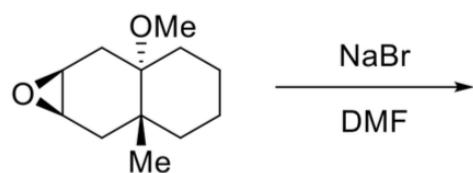
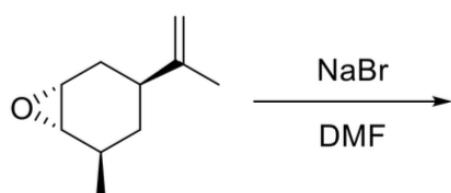
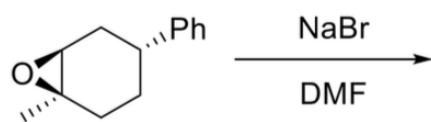
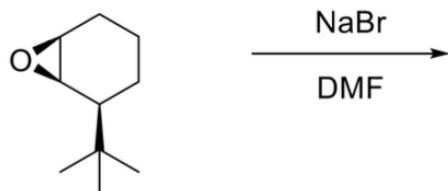
12.7 S_N1 vs. S_N2

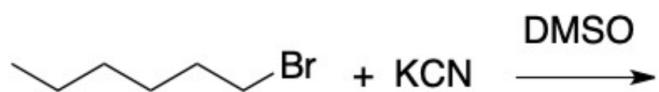
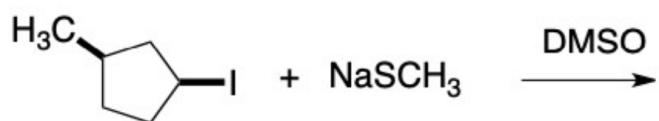
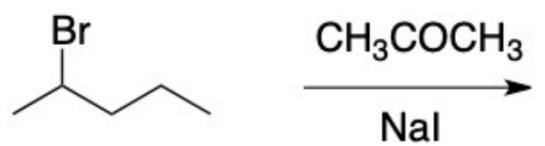
	S_N1	S_N2
Kinetik		
Stereoinformation		
Zwischenstufe		
Substituenteneinfluss		
Sterik Edukt		
Lösungsmittel		
Abgangsgruppe		
Nukleophil		
Vorteile		

Tabelle 5: Unterscheidungsmerkmale S_N1 vs. S_N2

12.8 Übungsaufgaben

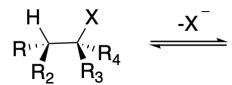
Gib jeweils die Produkte der folgenden Reaktionen an.





13 β -Eliminierungen

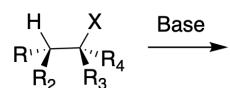
13.1 E1 Mechanismus



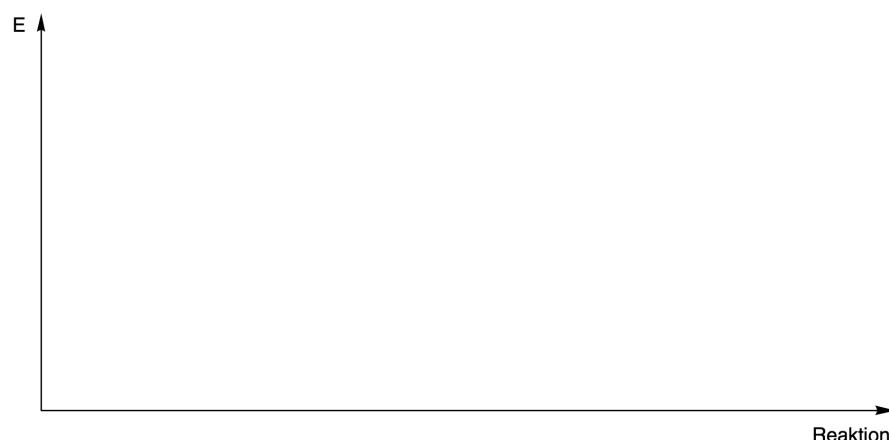
13.2 E1 Energiediagramm



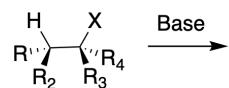
13.3 E2 Mechanismus



13.4 E2 Energiediagramm



13.5 E1_{cb} Mechanismus



13.6 E1_{cb} Energiediagramm



13.7 Hofmann vs. Saytzeff

Bei β -Eliminierungen an einem sekundären oder tertiären Kohlenstoff wird zwischen zwei regioselektiven Produkten unterschieden. Die Entstehung der Produkte hängt von der thermodynamischen und kinetischen Kontrolle ab.

Saytzeff Produkt: Höher substituierte Doppelbindung \rightarrow thermodynamisch günstiger

Hofmann Produkt: Niedriger substituierte Doppelbindung

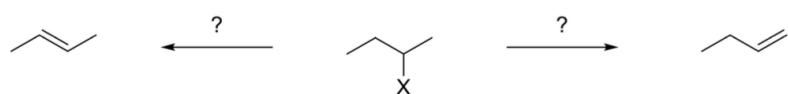


Abbildung 13: Hofmann vs. Saytzeff Produkt bei β -Eliminierungen

13.8 E1 vs. E2 vs. E1_cb

	E1	E2	E1 _c b
Kinetik			
Zwischenstufe			
Substituenteneinfluss			
Regioselektivität			
Lösungsmittel			
Abgangsgruppe			
Base			

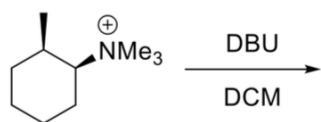
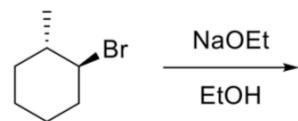
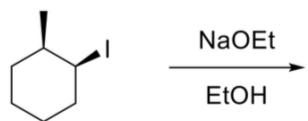
Tabelle 6: Unterscheidungsmerkmale E1 vs. E2 vs. E1_cb**13.9 SN vs. E**

SN	E

Tabelle 7: Unterscheidungsmerkmale SN vs. E

13.10 Übungsaufgaben

Gib jeweils das Produkt der folgenden Reaktionen an.



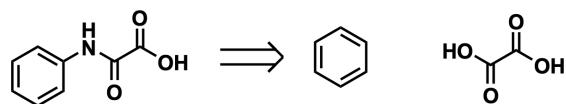
14 Kombinierte Aufgaben

14.1 Retrosynthese

Schlage einen Syntheseweg für das Produkt auf der linken Seite, ausgehend von den Edukten auf der rechten Seite vor. Wichtig: Es kann sein, dass du noch weitere Reagenzien/ kleine Edukte benötigst.²

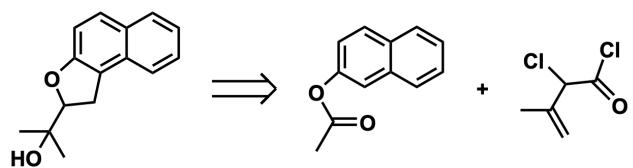
Der Pfeil \Rightarrow ist der Retrosynthese Pfeil. Der Pfeil zeigt von den Produkten zu den zu verwendenden Ausgangsstoffen.

1)

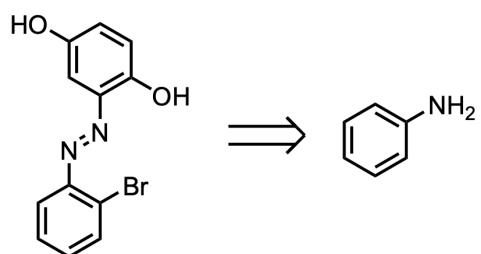


²Retrosynthethon Problems FS 2023

2)



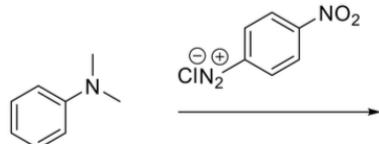
3)



14.2 Reaktionsprodukte

Gib jeweils das Produkt der folgenden Reaktionen an.

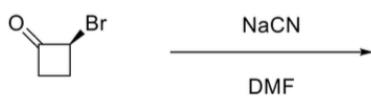
A)



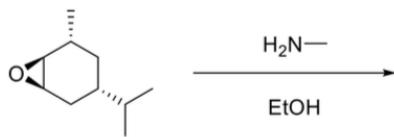
B)



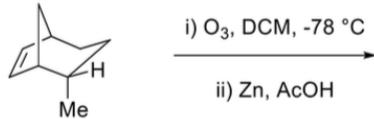
C)



D)



E)



F)



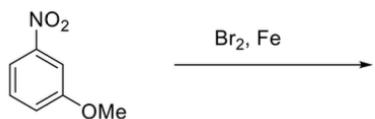
G)



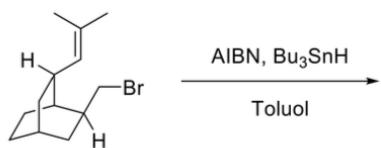
H)



I)



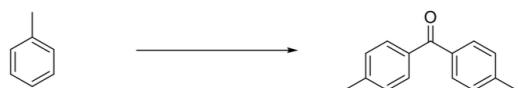
J)



14.3 Reagenzien

Gib jeweils die für die Reaktion benötigten Reagenzien an.

K)



L)



M)



N)



O)



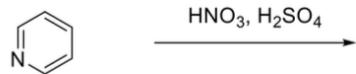
P)



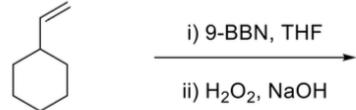
14.4 Selektivitäten

Ergänze die fehlenden Hauptprodukte. Welche Selektivität (Chemo-, Regio-, Stereoselektivität) liegt jeweils vor?

A)



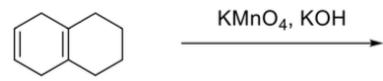
B)



C)



D)



E)



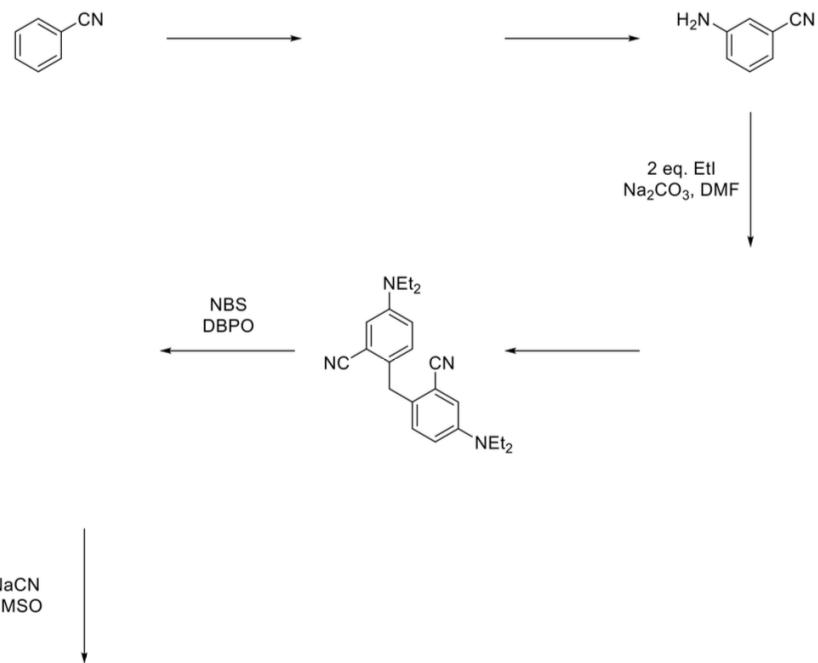
F)



14.5 Synthesewege

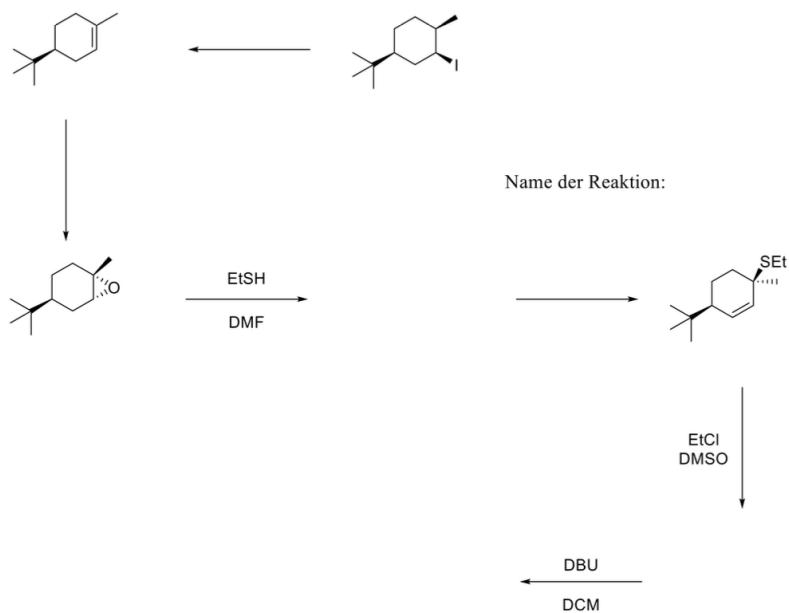
1) Ergänze die Synthesewege.

a)



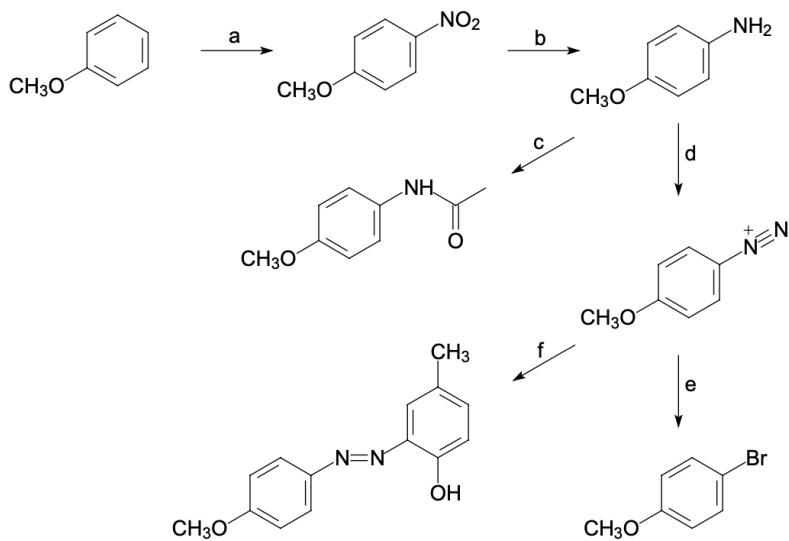
b)

Benennung der Regioselektivität:



Benennung der Regioselektivität:

2) Ergänze die benötigten Reagenzien.



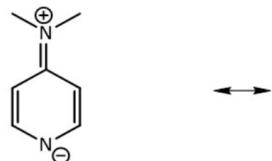
15 Zusätzliche Aufgaben

Die folgenden Aufgaben werden nicht im PVK behandelt, können aber als weitere Vorbereitung für die Prüfung benutzt werden. Die Lösungen werden nach Ende des PVKs bereitgestellt.

15.1 Resonanzübungen

Gib für die folgenden Moleküle weitere Resonanzstrukturen an.

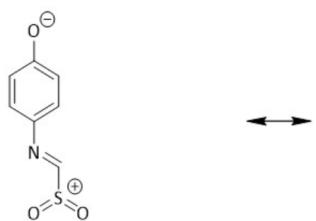
D)



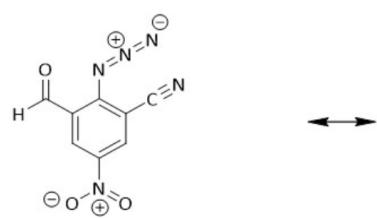
E)



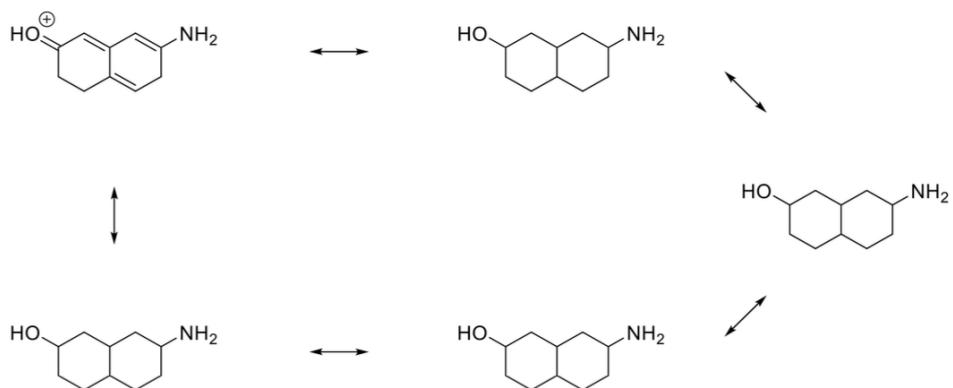
F)



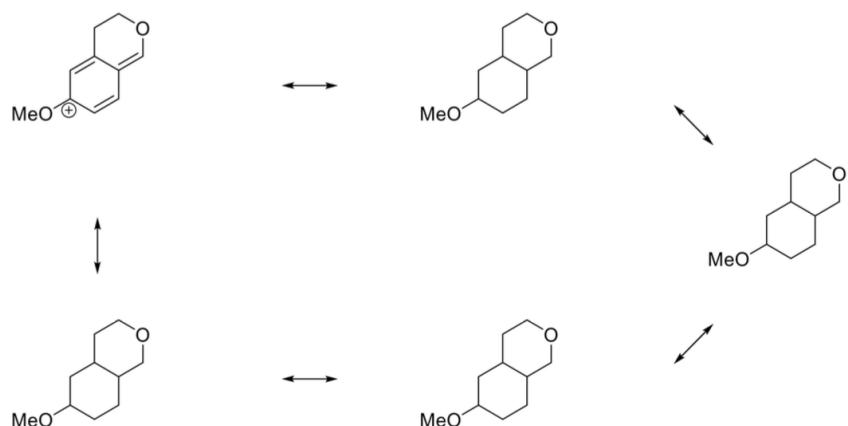
G)



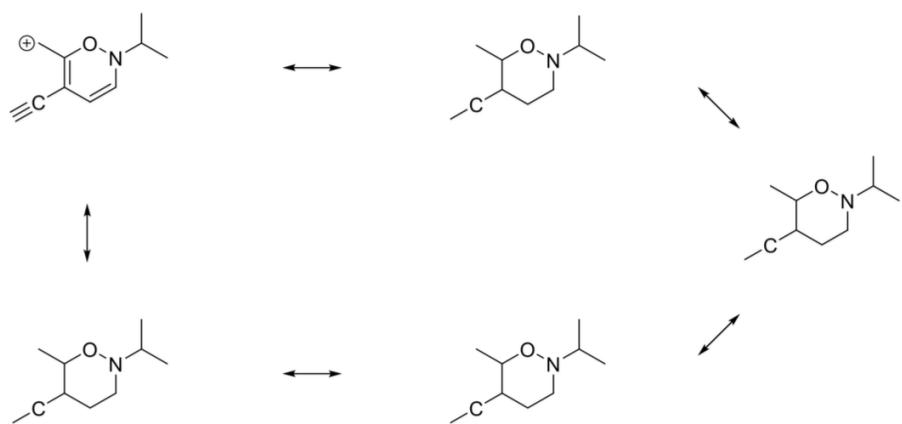
H)



I)



J)



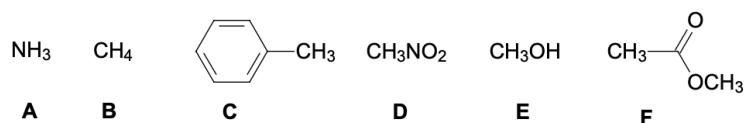
15.2 Dirigierende Effekte

Welche dirigierenden Effekte haben die folgenden Gruppen? ³

- | | | | | |
|--------------|-----------------------------|--|----------------------------|--|
| A -Cl | B -COOH | C -CH ₃ | D -NO ₂ | E -SO ₃ H |
| F -SH | G -COCH ₃ | H -N(CH ₃) ₂ | I -OCH ₃ | K -N ⁺ (CH ₃) ₃ |

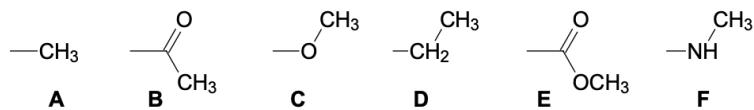
15.3 pKa-Werte

Ordne die folgenden Moleküle nach pKa-Wert.



15.4 Substituenteneffekte

Welche Substituenteneffekte (σ - und π - Effekte) haben die folgenden Gruppen?



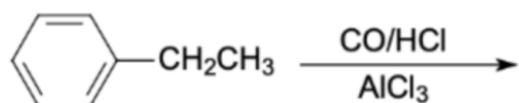
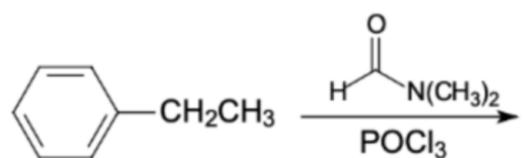
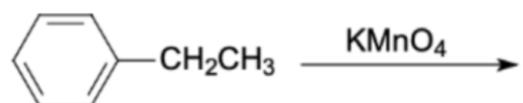
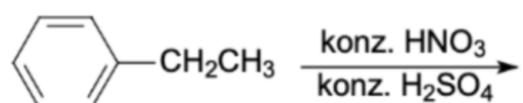
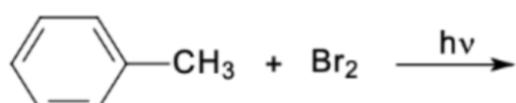
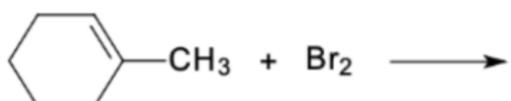
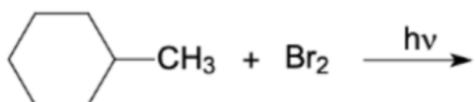
³Die folgenden Übungen wurden zum Teil aus den Übungsaufgaben zur OC1 Vorlesung der Uni Saarland übernommen

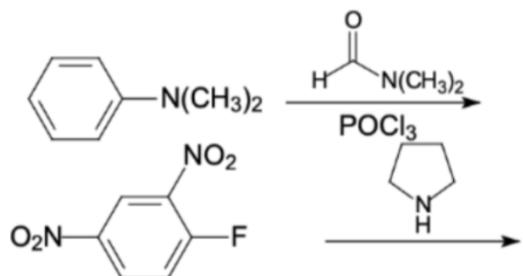
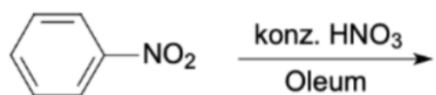
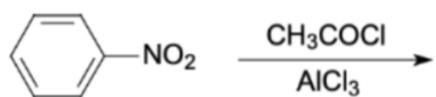
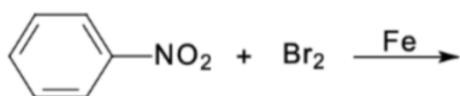
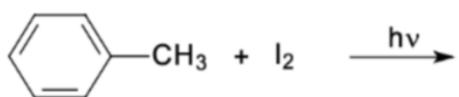
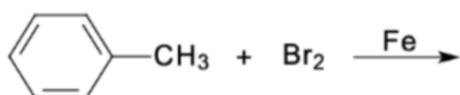
15.5 Nucleophile Substitution

1. Welche der folgenden Aussagen sind richtig?
 - (a) Die S_N2 Reaktion ist eine monomolekulare Reaktion.
 - (b) Ein Geschwindigkeitsgesetz 1. Ordnung gilt nur für S_N1 Reaktionen.
 - (c) Wagner-Meerwein Umlagerungen treten nicht bei S_N2 Reaktionen auf.
 - (d) Bei einer S_N2 Reaktionen wird ein Übergangszustand durchlaufen.
 - (e) Die S_N2 Reaktion zeichnet sich durch ein Energieminimum im Reaktionsprofil aus.
2. Welche der folgenden Aussagen sind falsch?
 - (a) S_N2 Reaktionen verlaufen unter Racemisierung.
 - (b) Die Inversion ist ein Charakteristikum von S_N2 Reaktionen.
 - (c) S_N1 Reaktionen erfolgen bevorzugt bei primären Halogeniden.
 - (d) Die S_N1 Reaktion wird durch e^- - ziehende Gruppen begünstigt.
 - (e) S_N1 -Reaktionen sind immer schneller als S_N2 -Reaktionen.

15.6 Elektrophile Aromatische Substitution

1) Gib jeweils die Produkte der folgenden Reaktionen an.





2) Gib jeweils die Reagenzien für die folgenden Reaktionen an.

