

2024

Abitur

Original-Prüfung
mit Lösungen

**MEHR
ERFAHREN**

Hessen

Chemie



STARK

Inhalt

Vorwort
Stichwortverzeichnis
Periodensystem der Elemente

Hinweise und Tipps zum Landesabitur

1	Ablauf der Prüfung	I
2	Inhalte und Aufbau der Prüfungsaufgaben	II
3	Leistungsanforderungen	VII
3.1	Kompetenzen	VII
3.2	Inhaltsbezogene Leistungsanforderungen	VIII
3.3	Methodenbezogene Anforderungen	VIII
3.4	Aufgabenstruktur und Aufgabentypen	IX
3.5	Bewertung der Aufgaben	IX
4	Anforderungsbereiche und Operatoren	X
5	Methodische Hinweise und allgemeine Tipps zur schriftlichen Prüfung ...	XIV
5.1	Lösungsplan zur Bearbeitung der Aufgaben	XIV
5.2	Tipps zur Analyse von Tabellen, Diagrammen und Abbildungen	XVI
5.3	Mögliche Formelschreibweisen	XVII
5.4	Häufig anzutreffende Fehlertypen im Fach Chemie	XVIII

Original-Abituraufgaben

Grundkurs 2020

Aufgabe A: Apfelsaft	GK 2020-1
Aufgabe B: Grillen	GK 2020-3
Aufgabe C: Alkohole und Redoxreaktionen	GK 2020-6

Leistungskurs 2020

Aufgabe A: Eisen, Korrosionsschutz und Kunststoffe	LK 2020-1
Aufgabe B: Nitrile und Cyanide	LK 2020-6
Aufgabe C: Xanthan	LK 2020-9

Grundkurs 2021

Aufgabe B: Chloramphenicol	GK 2021-1
Aufgabe C: Fette	GK 2021-4
Aufgabe D: Bodenbeläge aus PVC und Kork	GK 2021-8

Leistungskurs 2021

Aufgabe B: Abgase von Dieselmotoren	LK 2021-1
Aufgabe C: Styrol und Polystyrol	LK 2021-6
Aufgabe D: Chemische Synthesen	LK 2021-10

Grundkurs 2022

Aufgabe A: Rund ums Frühstück	GK 2022-1
Aufgabe B: Ethin und andere Alkine	GK 2022-4
Aufgabe C: Salpetersäure und Stickstoffwasserstoffsäure	GK 2022-7

Leistungskurs 2022

Aufgabe A: Eigenschaften und Reaktionen von Aldehyden	LK 2022-1
Aufgabe B: Chemie rund um Chlor	LK 2022-5
Aufgabe C: Chemie der Banane	LK 2022-8

Grundkurs und Leistungskurs 2023

Aufgaben www.stark-verlag.de/mystark

Sobald die Original-Prüfungsaufgaben 2023 freigegeben sind, können Sie sie als PDF auf der Plattform MyStark herunterladen (Zugangscod e siehe Umschlaginnenseite).

Autoren

Cay Götz: Lösungen zu den Abituraufgaben 2023

Stefan Dönges: Lösungen zu den Abituraufgaben 2020–2022

Die Original-Prüfungsaufgaben wurden vom hessischen Kultusministerium erstellt.

Vorwort

Liebe Schülerin, lieber Schüler,

das vorliegende Buch ermöglicht es Ihnen, sich optimal auf das **Landesabitur 2024** in Hessen im Fach Chemie vorzubereiten.

Im Abschnitt „**Hinweise und Tipps für die Abiturprüfung im Fach Chemie**“ bieten wir Ihnen ausführliche Hinweise zum **Ablauf und den Anforderungen der schriftlichen Prüfung** in Hessen. Zusätzlich werden die Anforderungsbereiche der Abiturprüfung genau erläutert und die Unterteilung der Prüfungsaufgaben in Reproduktions-, Transfer- und problemlösende Aufgaben an Beispielen erklärt.

Der Hauptteil des Buches enthält die offiziellen, vom hessischen Kultusministerium gestellten **Abitur-Prüfungsaufgaben** der Jahre **2020 bis 2023 für den Grund- und den Leistungskurs**. Sobald die **Prüfungen 2023** des GK und des LK freigegeben sind, können sie als PDF auf der Plattform MyStark heruntergeladen werden.

Zu jeder Aufgabe sind von unseren Autoren vorgeschlagene und vollständig ausformulierte Lösungen hinzugefügt. Die grau gerauteten Bearbeitungshinweise bieten Ihnen wertvolle Tipps zum Lösungsansatz und wichtige Zusatzinformationen.

Lernen Sie gerne am **PC** oder **Tablet**? Nutzen Sie die Plattform MyStark, um mithilfe von **interaktiven Aufgaben** Ihr chemisches Fachwissen effektiv zu trainieren. Außerdem stehen Ihnen hier hilfreiche **Lernvideos** zu zentralen Themen zur Verfügung (Zugangscode siehe Umschlaginnenseite).



Sollten nach Erscheinen dieses Bandes noch wichtige Änderungen in der Abitur-Prüfung 2024 vom Kultusministerium bekannt gegeben werden, sind aktuelle Informationen dazu online auf der Plattform MyStark abrufbar.

Viel Erfolg wünschen Ihnen Verlag und Autoren!

Hinweise und Tipps zum Landesabitur

1 Ablauf der Prüfung

Die Abiturprüfung in Hessen findet als Zentralabitur statt, d. h., die Aufgaben für die schriftliche Prüfung werden vom Hessischen Kultusministerium zentral gestellt und sind für alle Abiturientinnen und Abiturienten verbindlich. Alle Schülerinnen und Schüler an den Gymnasien Hessens schreiben diese Prüfung jeweils an demselben Tag.

Aufbau der Prüfungsaufgaben

Landesweit werden im Grundkursfach und Leistungskursfach Chemie jedem Gymnasium am Prüfungstag dieselben drei Aufgabenvorschläge vorgelegt, von denen zwei bearbeitet werden müssen. Einer der drei Vorschläge kann also von Ihnen ausgeschlossen werden.

In den Jahren 2022 und 2023 wurden als Folge der Covid-19-Pandemie vier Vorschläge zur Verfügung gestellt, aus denen die Lehrkraft drei auswählte, die den Prüflingen vorgelegt wurden. Aus diesen mussten wie immer zwei bearbeitet werden. In diesem Buch finden Sie jeweils drei dieser vier Aufgabenvorschläge, was dem Umfang einer regulären Prüfung entspricht.

Die Ihnen vorgelegten Prüfungsaufgaben enthalten mehrere Teilaufgaben. Die Teilaufgaben bestehen sowohl aus Anteilen, die auszuwertende Materialvorgaben enthalten und Texterläuterungen erforderlich machen, als auch aus Anteilen, die keine oder wenig Materialvorgaben enthalten und in erster Linie mithilfe von chemischen Gleichungen o. ä. zu lösen sind. Außerdem sind alle Aufgaben in einen Kontext eingebettet. Eine Bearbeitung ist weitgehend unabhängig voneinander möglich. Die Aufgaben können mehrere der unten aufgeführten Kursthemen enthalten, die miteinander vernetzt sein können.

Dauer der Prüfung und zugelassene Hilfsmittel

Die Gesamtbearbeitungszeit in der Abiturprüfung beträgt **300 Minuten** für den **Leistungskurs** und **255 Minuten** für den **Grundkurs** inklusive einer Auswahlzeit von jeweils 60 Minuten. Aufgrund der Covid-19-Pandemie wurden zusätzliche 30 Minuten Bearbeitungszeit in den Jahren 2022 und 2023 gewährt.

Als **Hilfsmittel** werden während der Abiturarbeit zugelassen:

- Wörterbuch zur deutschen Rechtschreibung
- Das der Prüfungsaufgabe beigelegte Periodensystem der Elemente
- Eingeführter Taschenrechner (bei grafikfähigen Rechnern und Computeralgebra-systemen ist ein Reset durchzuführen).

2 Inhalte und Aufbau der Prüfungsaufgaben

Die Abiturprüfung wird auf Basis der Kerncurricula für die gymnasiale Oberstufe (KCGO) durchgeführt. In der nachfolgenden Tabelle sind die im Lehrplan enthaltenen Unterrichtsinhalte für Grund- und Leistungskurs wiedergegeben, die *kursiv* gesetzten Inhalte gelten nur für den Leistungskurs.

Die mit einem Stern* markierten Themen sind bedingt durch die Covid-19-Pandemie von Einschränkungen betroffen: Die **grau hinterlegten Zeilen** sind **nicht** Teil der inhaltlichen Konkretisierungen der schriftlichen Abiturprüfung im Jahr 2024, werden aber nach Möglichkeit im Unterricht behandelt (Stand: Mai 2023).

Q1: Stoffgruppen in der organischen Chemie

Kohlenwasserstoffe	Übersicht über die Substanzklassen der Alkane, Alkene: Nomenklatur, homologe Reihen, Konstitutionsisomerie
	Struktur-Eigenschafts-Beziehungen: VAN-DER-WAALS-Kräfte als intermolekulare Wechselwirkungen im Kontext von Struktur und Eigenschaften (Schmelz- oder Siedetemperaturen, Löslichkeit)
	Vollständige Oxidation: Verbrennungsreaktion einschließlich Oxidationszahlen und Nachweis von Kohlenstoffdioxid und Wasser
	Reaktionstypen und -mechanismen: radikalische Substitution am Alkan sowie elektrophile Addition von Molekülen des Typs X_2 und HX (<i>MARKOVNIKOV-Regel</i>) an eine C–C-Mehrfachbindung (Nachweis der C–C-Doppelbindung mit Brom)
	<i>Reaktionstyp der Eliminierung, cis-trans-Isomerie, induktive Effekte (bezüglich Addition)</i>
	<i>Elektrophile Substitution: Reaktionstyp und Reaktionsmechanismus (Mechanismus der Bromierung)</i>
	<i>Vereinfachtes Orbitalmodell: σ- und π-Bindung, sp^3-, sp^2- und sp-Hybridisierung (Hybridisierung der Kohlenstoffatome)</i>
	<i>Eigenschaften und Bindungsverhältnisse im Benzen (Benzol) auf Basis des Mesomeriemodells und des vereinfachten Orbitalmodells</i>
Alkanole	Nomenklatur, homologe Reihe, Konstitutionsisomerie, Struktur-Eigenschafts-Beziehungen im Zusammenhang mit Dipol-Dipol-Wechselwirkungen und Wasserstoffbrücken (Schmelz- oder Siedetemperaturen, Löslichkeit)

falten. Sind Zeichnungen, Skizzen oder Tabellen anzufertigen, dann erstellen Sie diese sauber, übersichtlich und nicht zu klein. Sie sind grundsätzlich vollständig zu beschriften.

- Beginnen Sie die Beantwortung der nächsten Frage auf einer neuen Seite oder lassen Sie zumindest mehrere Leerzeilen frei, sodass sie gegebenenfalls beim Überprüfen auf Vollständigkeit problemlos noch Ergänzungen einfügen können. Reicht in diesem Fall der Leerraum dennoch nicht für Ihre Nachträge, dann müssen Sie diese auf dem Zusatzblatt eindeutig unter Verwendung sinnvoller Symbole dem ersten Teil Ihrer Antwort zuordnen.

- **Überprüfen auf Vollständigkeit:**

- Kontrollieren Sie, ob Sie alle Bedingungen und Aspekte der Aufgabenstellung (unter Einbeziehung der einleitenden Informationen zu den Teilaufgaben) erfasst haben.
- Prüfen Sie, ob alle wesentlichen Inhalte berücksichtigt wurden.
- Überprüfen Sie, ob das vorgegebene Material sinnvoll und angemessen ausgewertet wurde.
- Lesen Sie den Text noch einmal durch und berichtigen Sie eventuelle Fehler in der Grammatik, Rechtschreibung oder Zeichensetzung.
- Zuletzt sollten Sie die Seiten vollständig durchnummerieren und auf jedes Einzelblatt Ihren Namen schreiben.

5.2 Tipps zur Analyse von Tabellen, Diagrammen und Abbildungen

Ein Bestandteil der Aufgabenstellungen im Fach Chemie kann auch die Analyse von Material in Form von Tabellen sowie Grafiken sein.

In **Tabellen** sind oft Daten aus chemischen Experimenten zusammengefasst. Eine andere Art der Präsentation von Zahlenmaterial sind **Diagramme**. Zur Auswertung einer Tabelle oder eines Diagramms dient ein Fragenkatalog, mit dem alle wesentlichen Aspekte erfasst werden können:

- Welche Größen sind in der Tabelle/dem Diagramm dargestellt? Achten Sie auf die Überschriften und den Begleittext.
- Welcher Diagrammtyp liegt vor (z. B. Säulendiagramm, Kreisdiagramm)?
- Welche Größen sind gegeneinander aufgetragen? Welche ist die unabhängige, welche die abhängige Größe?
- Was sind die Bezugsgrößen: Zahlenarten (absolute Zahlen, Prozentzahlen), Zahlenwerte (gerundet, geschätzt, vorläufig)?
- Welche Auffälligkeiten/Tendenzen sind zu erkennen?
- Welche Kategorien werden miteinander in Beziehung gesetzt (z. B. bei Tabellen in Kopfzeile, Spalten und Vorspalten)?
- Welche Hauptaussagen lassen sich formulieren (Trends/Tendenzen)?
- Welche Teilaussagen lassen sich treffen (Minima, Maxima, Zunahme, Abnahme, Stagnation, Zahlensprünge, Anomalien, Gleichmäßigkeiten und regelhafte Verläufe, unterschiedliche Phasen, Wechselbeziehungen zwischen verschiedenen Variablen/Merkmalen usw.)?

- Welcher Arbeitsauftrag ist mit dem Diagramm/der Tabelle verbunden? (Unabhängig davon sollten Sie Ihrer Lösung immer eine knappe Beschreibung der in der Tabelle oder der Darstellung enthaltenen Gegebenheiten im Rahmen der jeweiligen Fragestellungen voranstellen.)
- Welche Antwort gibt die Tabelle/das Diagramm auf die Fragestellung?
- Welche Aussagen werden durch die Daten nahegelegt?
- Welche neuen Fragen werden durch die Informationen der Tabelle/des Diagramms aufgeworfen?
- Was sind mögliche Ursachen für die der Tabelle/dem Diagramm entnommenen Sachverhalte?

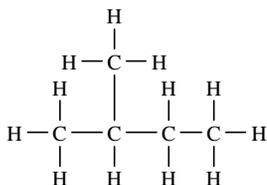
Abbildungen in der Chemie zeigen meist entweder Strukturen (z. B. einen Formelausschnitt, Elektrolysezelle) oder Prozesse (z. B. Herstellung von Aluminium). Der erste Schritt Ihrer Lösung sollte auch hier immer darin bestehen, die bildlich dargestellte Information in Worte zu fassen („Untertitel“ der Abbildung). Die weitere Analyse ist dann sehr stark von der Art der Abbildung und der damit verbundenen Fragestellung abhängig. Aber auch hier helfen einige Grundfragen weiter:

- Wie ist die Abbildung zustande gekommen? Ist es z. B. die Skizze zur Struktur von Eiweiß oder die schematische Darstellung eines Experiments? (Beachten Sie dabei auch den vorangestellten Text, die Bildunterschrift und die angegebene Quelle.)
- Was wissen Sie über die dargestellten Strukturen oder Abläufe? Welche Fachbegriffe können Sie zuordnen?
- Was sind die wichtigen Merkmale der dargestellten Objekte oder Sachverhalte? Vergleichen Sie Teilabbildungen miteinander. Formulieren Sie Kern- und Teilaussagen.
- Welche Arbeitsanweisung ist mit der Abbildung verknüpft? Sollen Sie z. B. die Abbildung zur Erläuterung eines Sachverhaltes verwenden oder wird von Ihnen eine Hypothese über den Ablauf des dargestellten Experiments erwartet?
- Welche für die Beantwortung der Fragestellung relevanten Informationen lassen sich aus den Darstellungen entnehmen und welche Fragen stellen sich?
- Welche Ursachen und Mechanismen könnten hinter den dargestellten Prozessen stecken? Wie sind auftretende Besonderheiten zu erklären?

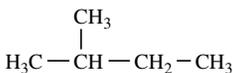
5.3 Mögliche Formelschreibweisen

Alternativ zu den meist in der Schule gebräuchlichen Formelschreibweisen (Strukturformel nach LEWIS, Halbstrukturformel) kann auch die Skelettformelschreibweise verwendet werden, die in der Wissenschaft die ursprünglichen Schreibweisen weitestgehend abgelöst hat. Die Enden der Bindungsstriche entsprechen dabei jeweils einem Kohlenstoffatom und der entsprechenden Anzahl an gebundenen Wasserstoffatomen. Alle nicht Kohlenstoff- oder Wasserstoffatome werden mit dem Elementsymbol ergänzt.

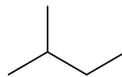
Beispiel: 2-Methylbutan



Strukturformel nach Lewis

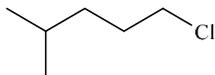


Halbstrukturformel

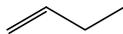


Skelettformelschreibweise

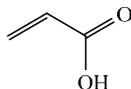
Weitere Beispiele:



1-Chlor-4-methylpentan



But-1-en



Propensäure

5.4 Häufig anzutreffende Fehlertypen im Fach Chemie

- **Reaktionsgleichungen:** Achten Sie genau darauf, dass die Reaktionsgleichungen ausgeglichen sind. Kontrollieren Sie die Anzahl der einzelnen Atomarten auf beiden Seiten der Gleichung und die Anzahl der Ladungen.
- **Valenzstrichformeln, Strukturformeln:** Überprüfen Sie die Anzahl der Bindungsstriche bzw. Valenzstriche. Dividieren Sie einfach die Gesamtzahl der Außenelektronen durch 2! Beachten Sie weiterhin die Anzahl der Bindungen, die von einem Atom ausgehen.
- **Stoffe und Teilchen unterscheiden:** Bei Erläuterungen und Darstellungen ist häufig nach Zusammenhängen zwischen der Stoffebene und der Teilchenebene gefragt. Es ist wichtig, dass Sie durch korrekten Ausdruck und durch Verwendung der Fachsprache die beiden Ebenen nicht vermischen.

Beispiel:

falsch: Calcium ist im Calciumchlorid zweifach positiv geladen.

richtig: Calciumchlorid besteht aus zweifach positiv geladenen Calcium-Ionen und zwei einfach negativ geladenen Chlorid-Ionen.

- **Stöchiometrie, Rechnen mit Einheiten:** Grundsätzlich sind die Ergebnisse **mit Einheiten** anzugeben, ein fehlender aufgabenbezogener Antwortsatz führt sehr häufig zum Punktverlust. Nutzen Sie Teile der Aufgabenstellung zur korrekten Formulierung des Antwortsatzes. Beachten Sie die gesuchten Größen und prüfen Sie, ob die Einheiten passend dazu angegeben sind.
- **Notieren von offensichtlich falschen Ergebnissen:** Prüfen Sie, ob das Ergebnis Ihrer Rechnung die richtige Größenordnung besitzt. Diese lässt sich anhand der gegebenen Größen, die in die Rechnung eingehen, abschätzen. Bei offensichtlich falschen Ergebnissen, die Sie während der Prüfungszeit nicht mehr korrigieren können, sollten Sie unbedingt einen kurzen Hinweis geben, sodass Sie noch Bewertungspunkte „retten“ können – erst recht dann, wenn Sie vielleicht sogar die Fehlerquelle umreißen können.

Aufgabe B

Abgase von Dieselmotoren

BE

Dieselmotorkraftstoff besteht aus einem Gemisch verschiedener flüssiger Kohlenwasserstoff-Verbindungen und bildet den Treibstoff der Kraftfahrzeuge mit Dieselmotoren.

Um die Entzündlichkeit von verschiedenen Dieselmotorkraftstoffen beurteilen zu können, wurde die Cetanzahl eingeführt. Dabei wird ein Dieselmotorkraftstoff mit verschiedenen Gemischen aus leicht entzündlichem Cetan (*n*-Hexadecan) und zündträgem 1-Methylnaphthalin verglichen.

Bei der Verbrennung von Dieselmotorkraftstoff bilden sich ungewollt auch Stickstoffoxide. Aufgrund ihrer schädlichen Wirkung auf die Atmungsorgane sind diese Stoffe, die man oft unter dem Kürzel NO_x zusammenfasst, immer wieder in der umweltpolitischen Diskussion. Um ihren Ausstoß zu reduzieren, setzt man in Dieselfahrzeugen seit einigen Jahren die sogenannte SCR-Technologie ein. Dabei wird Harnstoff in den heißen Abgas-Strom eingespritzt.

Aufgrund seines Molekülbaus kann man Harnstoff zur Stoffgruppe der sogenannten Carbonsäureamide zählen. Ein weiterer Vertreter dieser Gruppe ist Ethansäureamid.

2.1 Cetan heißt mit wissenschaftlichem Namen *n*-Hexadecan. Hiervon existieren zahlreiche Konstitutionsisomere (Strukturisomere, Material 1).

Zeichnen Sie jeweils die Strukturformel für ein Beispiel von Konstitutionsisomer A sowie für ein Beispiel von Konstitutionsisomer B und beschriften Sie in Konstitutionsisomer A mindestens ein asymmetrisches C-Atom.

Benennen Sie die gezeichneten Konstitutionsisomere A und B gemäß der IUPAC-Nomenklatur.

HINWEIS: Die stereochemische Konfiguration muss im Rahmen der Benennung nicht angegeben werden.

6

2.2 Material 2 beschreibt die wesentlichen Vorgänge zur Abgasbehandlung in einem SCR-Katalysator.

Formulieren Sie jeweils die Reaktionsgleichung für die Thermolyse-Reaktion von Harnstoff sowie für die Hydrolyse-Reaktion von Isocyansäure (Material 2).

Formulieren Sie für die Standard-SCR-Reaktion die Reaktionsgleichung (Material 2) und berechnen Sie mithilfe von Material 3 die Standard-Reaktionsenthalpie.

Formulieren Sie für die schnelle SCR-Reaktion (Material 2) die Reaktionsgleichung und zeigen Sie unter Angabe der wesentlichen Oxidationszahlen und Elektronenübergänge, dass es sich um eine Redox-Reaktion handelt. 13

- 2.3 Eine handelsübliche AdBlue®-Lösung hat eine Dichte von $\rho = 1,09 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ und enthält einen Massenanteil von 32,5 % Harnstoff. Berechnen Sie die in 1 Liter AdBlue®-Lösung enthaltene Stoffmenge an Harnstoff sowie die gesamte Stoffmenge an Ammoniak, die daraus gebildet werden kann.

HINWEIS: Berücksichtigen Sie die bei der Thermolyse-Reaktion und Hydrolyse-Reaktion (Material 2) entstehende Gesamtmenge an Ammoniak.

Bestimmen Sie anschließend die Stoffmenge an Stickstoffmonoxid, die mit dieser Stoffmenge Harnstoff insgesamt im Standard-SCR-Verfahren (Material 2) umgesetzt werden kann. 7

- 2.4 Ammoniak hat einen pK_B -Wert von 4,76 und bildet beim Einleiten in Wasser eine alkalische Lösung. Auch Methylamin (Aminomethan) bildet beim Einleiten in Wasser eine alkalische Lösung.

Beschreiben Sie auch mithilfe einer Reaktionsgleichung sowie unter Verwendung des Donator-Akzeptor-Konzeptes die Bildung der alkalischen Lösung beim Einleiten von Ammoniak in Wasser.

Erläutern Sie allgemein die Aussage des pK_B -Wertes und entscheiden Sie, ob Methylamin (Aminomethan) einen im Vergleich zu Ammoniak höheren oder niedrigeren pK_B -Wert hat. 10

- 2.5 Gelingt im Abgassystem keine vollständige Zersetzung des Harnstoffs, so können sich dort aus der Isocyanursäure feste Ablagerungen aus Cyanursäure bilden.

Cyanursäure ist eine Verbindung, die sich im Labor unter bestimmten Bedingungen zu Isocyanursäure umwandeln kann (Material 4).

Begründen Sie, dass Cyanursäure ebenso wie Benzol eine aromatische Verbindung ist. Formulieren Sie die Strukturformel von Isocyanursäure. 7

- 2.6 Material 5 beschreibt einen Weg zur Herstellung eines Carbonsäureamids im Labor.

Entwickeln Sie unter Verwendung von Strukturformeln mit bindenden und nicht bindenden Elektronenpaaren einen möglichen Reaktionsmechanismus für Schritt 1 der Synthese von Ethansäureamid (Material 5).

Geben Sie für das Ethansäureamid-Molekül die Oxidationszahlen der Kohlenstoff-Atome sowie des Sauerstoff-Atoms und des Stickstoff-Atoms an. $\frac{7}{50}$

Material 1: Mögliche Konstitutionsisomere von *n*-Hexadecan

Von der Verbindung Hexadecan existieren 10 359 Konstitutionsisomere (Strukturisomere).

Konstitutionsisomer A ist ein Konstitutionsisomer der Verbindung, das drei verschiedene Alkyl-Substituenten sowie mindestens ein asymmetrisches C-Atom enthält.

Konstitutionsisomer B ist ein Konstitutionsisomer der Verbindung, das kein asymmetrisches C-Atom enthält.

Material 2: Abgasbehandlung im SCR-Katalysator

Die im Dieselmotor während des Verbrennungsprozesses entstehenden Stickstoffoxide (z. B. Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid) werden im Rahmen der SCR-Technologie (*Selective Catalytic Reduction* oder *Selektive katalytische Reduktion*) zunächst über einen Sensor analysiert. Je nach Konzentration werden dann unterschiedliche Mengen an sogenanntem AdBlue®, einer wässrigen Harnstoff-Lösung, in den Abgastrakt des Fahrzeugs eingespritzt.

Der eingespritzte Harnstoff wird nun durch Hitze zu Isocyanensäure (HNCO) und Ammoniak (NH₃) zersetzt (Thermolyse-Reaktion). Die gebildete Isocyanensäure reagiert anschließend mit Wasser zu weiterem Ammoniak und Kohlenstoffdioxid (Hydrolyse-Reaktion).

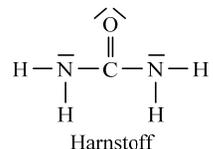
Der gebildete Ammoniak ist Ausgangsstoff für die eigentliche Reaktion im SCR-Katalysator und reagiert in Redox-Reaktionen mit den Stickstoffoxiden zu den ungiftigen Stoffen Stickstoff und Wasserdampf.

Zu den Reaktionen im SCR-Katalysator existieren je nach Abgas-Temperatur unterschiedliche Varianten, so z. B.

die Standard-SCR und die Schnelle SCR:

Bei der Standard-SCR-Reaktion reagieren 4 mol Ammoniak mit 4 mol Stickstoffmonoxid und 1 mol Sauerstoff zu 4 mol Stickstoff und 6 mol Wasserdampf.

Bei der Schnellen SCR-Reaktion reagiert Ammoniak mit Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid zu Stickstoff und Wasserdampf.



Material 3: Thermodynamische Daten

Stoff	Molare Standardbildungsenthalpie $\Delta_f H_m^0$ [kJ · mol ⁻¹]
Ammoniak	-46
Sauerstoff	0
Stickstoff	0
Stickstoffmonoxid	+90
Wasser (gasförmig)	-242

Die **Standardreaktionsenthalpie** zu dieser Reaktion lässt sich aus den Standardbildungsenthalpien ($\Delta_f H_m^0$) der Produkte und Edukte berechnen:

$$\Delta_R H_m^0 = \sum \Delta_f H_m^0 (\text{Produkte}) - \sum \Delta_f H_m^0 (\text{Edukte})$$

hier:

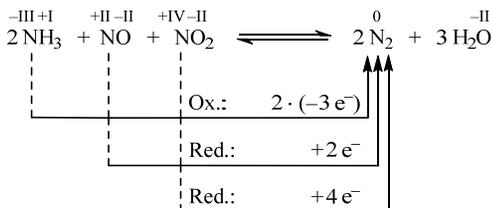
$$\begin{aligned} \Delta_R H_m^0 &= [4 \cdot \Delta_f H_m^0 (\text{N}_2) + 6 \cdot \Delta_f H_m^0 (\text{H}_2\text{O})] \\ &\quad - [4 \cdot \Delta_f H_m^0 (\text{NH}_3) + 4 \cdot \Delta_f H_m^0 (\text{NO}) + 1 \cdot \Delta_f H_m^0 (\text{O}_2)] \\ &= [4 \text{ mol} \cdot (0 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}) + 6 \text{ mol} \cdot (-242 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1})] \\ &\quad - [4 \text{ mol} \cdot (-46 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}) + 4 \text{ mol} \cdot (+90 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}) + 1 \text{ mol} \cdot (0 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1})] \end{aligned}$$

$$\Delta_R H_m^0 = -1628 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$



Die Standardbildungsenthalpie von Elementen in ihrem Grundzustand beträgt $0 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Die **Reaktionsgleichung** für die schnelle SCR-Reaktion lautet:



Wie die Oxidationszahlen zeigen, handelt es sich bei dieser Reaktion um eine Redoxreaktion. Es werden insgesamt 6 Elektronen übertragen.

Reduktion: Stickstoffatom des Stickstoffmonoxid-Moleküls von +II zu +/-0 und Stickstoffatom des Stickstoffdioxid-Moleküls von +IV zu +/-0

Oxidation: Stickstoff-Atom des Ammoniak-Moleküls von -III zu +/-0



Bei dieser Redoxreaktion laufen Oxidation und Reduktion an Atomen des gleichen Elements ab. Dadurch wird aus der höheren und niedrigeren Oxidationsstufe dieses Elements eine mittlere gebildet. Diese Art von Redoxreaktion nennt man *Komproportionierung* bzw. *Synproportionierung*.

- 2.3 Berechnung der Stoffmenge n an **Harnstoff**, die in 1 Liter AdBlue®-Lösung enthalten ist:

$$m(\text{AdBlue}^{\circledR}\text{-Lösung}) = V \cdot \rho = 1000 \text{ mL} \cdot 1,09 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1} = 1090 \text{ g}$$

$$m(\text{Harnstoff}) = m(\text{Lösung}) \cdot 32,5\% = \frac{1090 \text{ g} \cdot 32,5}{100} = 354,25 \text{ g}$$

$$M(\text{Harnstoff}) \approx 60,04 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$n(\text{Harnstoff}) = \frac{m(\text{Harnstoff})}{M(\text{Harnstoff})} = \frac{354,25 \text{ g}}{60,04 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}} \approx 5,9 \text{ mol}$$

Berechnung der Stoffmenge n an **Ammoniak**, die daraus gebildet werden kann:

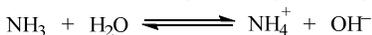
1 mol Harnstoff liefert laut der beiden Reaktionsgleichungen aus Aufgabe 2.2 insgesamt 2 mol Ammoniak. Somit können auf diesem Wege 11,8 mol Ammoniak (NH_3) gebildet werden.

▧ *1 mol NH_3 werden über die Thermolysereaktion und ein weiteres Mol NH_3 über die Hydrolysereaktion gebildet.*

Berechnung der Stoffmenge n an **Stickstoffmonoxid**, die insgesamt umgesetzt werden kann:

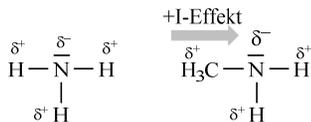
Gemäß der Standard-SCR-Reaktion reagieren Ammoniak und Stickstoffmonoxid im Verhältnis 1 zu 1. Somit können aus den zuvor errechneten 11,8 mol Ammoniak 11,8 mol schädliches Stickstoffmonoxid zu Stickstoff umgesetzt werden.

- 2.4 Die **alkalische Reaktion** des Ammoniaks bei der Reaktion mit Wasser lässt sich mittels Reaktionsgleichung wie folgt beschreiben:



Das Donator-Akzeptor-Konzept von Säure-Base-Reaktionen lässt sich bei dieser Reaktion wie folgt erklären: Beim Einleiten des gasförmigen Ammoniaks in Wasser kommt es zu einer **Protolysereaktion**, bei der das Wassermolekül als Protonendonator ein H^+ -Ion an das freie Elektronenpaar des Ammoniakmoleküls abgibt. Ammoniak tritt bei dieser Reaktion daher als **Protonenakzeptor** auf. Durch diese Reaktion kommt es zur Bildung von Hydroxid-Ionen, welche für die alkalische Reaktion der Lösung verantwortlich sind.

Mittels des $\text{p}K_{\text{B}}$ -Wertes lässt sich eine Aussage über die Basenstärke eines Stoffes treffen. Dabei gilt: Je **niedriger der $\text{p}K_{\text{B}}$ -Wert** ist, desto **stärker basisch** ist der jeweilige Stoff, desto höher ist also sein Bestreben, ein H^+ -Ion aufzunehmen. Der $\text{p}K_{\text{B}}$ -Wert von Ammoniak ist laut Aufgabenstellung mit 4,76 angegeben, was dafür spricht, dass es sich bei Ammoniak um eine schwache Base handelt. Vergleicht man die Strukturen von Ammoniak und Methylamin, so ist im Methylamin-Molekül formal ein Wasserstoffatom gegen eine Methyl-Gruppe ausgetauscht.



Diese Methyl-Gruppe übt einen **+I-Effekt** auf das Stickstoff-Atom aus. Dieser positive induktive Effekt ist ein elektronendichteschiebender Effekt, weshalb die Elektronendichte am Stickstoffatom dadurch im Vergleich zum Ammoniak erhöht ist. Diese **erhöhte Elektronendichte** am Stickstoffatom erleichtert die Aufnahme des Protons durch das freie Elektronenpaar und erhöht damit die Affinität, ein Proton zu binden, und damit auch dessen Basizität. Vereinfacht gesagt, steht durch den elektronendichteschiebenden Effekt dem Stickstoffatom mehr Elektronendichte zum Binden des Protons zur Verfügung, weshalb das **Methylamin** eine **stärkere Base** ist und dadurch natürlich einen niedrigeren pK_B -Wert aufweist.

Wasserstoffatome wirken weder schiebend noch ziehend auf die Elektronendichte. Allen anderen Substituenten in organischen Verbindungen wird im Vergleich zum Wasserstoffatom entweder ein elektronendichteschiebender Effekt oder ein elektronendichteziehender Effekt zugeordnet.

Halogene wie Fluor, Chlor oder Brom üben aufgrund ihrer im Vergleich zu den meisten anderen Atomen höheren Elektronegativität einen **negativen induktiven Effekt (-I-Effekt)** aus. Sie wirken daher elektronendichteziehend auf Nachbaratome oder Nachbargruppen.

Alkylreste, wie beispielsweise die angegebene Methyl-Gruppe, weisen hingegen einen elektronendichteschiebenden Effekt auf. Durch diesen **positiven induktiven Effekt (+I-Effekt)** erhöhen sie die Elektronendichte an Nachbaratomen oder Nachbargruppen.

*Diese ladungsdichteverändernden Effekte wirken allerdings nur **wenige** Bindungen weit (ca. drei bis vier). Danach können die Effekte vernachlässigt werden.*

- 2.5 Bei der in Material 4 dargestellten **Cyanursäure** handelt es sich um eine (hetero)-aromatische Verbindung. Da die Cyanursäure eine **zyklische** Verbindung ist, bei der alle Ringatome, die Kohlenstoffatome wie die Stickstoffatome, sp^2 -hybridisiert sind, ist das Ringsystem in jedem Fall **planar** aufgebaut. Die übrigen sechs p-Orbitale, die nicht an der Hybridisierung teilnehmen, stehen alle senkrecht zur Ringebene. Dadurch können sie, genauso wie beim Benzol, durch Überlappung ein **delokalisiertes π -Elektronensystem** oberhalb und unterhalb der Ringebene mit insgesamt 6 Elektronen ausbilden.

Darüber hinaus erfüllt die Verbindung auch die **HÜCKEL-Regel**. Das heißt, das Molekül erfüllt mit der Zahl $n = 1$ die folgende Bedingung:

$$4n + 2 = \text{Anzahl der } \pi\text{-Elektronen (hier gleich 6 } \pi\text{-Elektronen).}$$

Sind bei einer Verbindung die zuvor beschriebenen Bedingungen erfüllt, so handelt es sich um eine aromatische Verbindung.



© **STARK Verlag**

www.stark-verlag.de
info@stark-verlag.de

Der Datenbestand der STARK Verlag GmbH ist urheberrechtlich international geschützt. Kein Teil dieser Daten darf ohne Zustimmung des Rechteinhabers in irgendeiner Form verwertet werden.

STARK