

Folie 7: Benzin und Diesel – die klassischen Kraftstoffe

Die klassischen Kraftstoffe werden aus Erdöl gewonnen. Bedingt durch seine Entstehung aus organischem Material unter Luftabschluss besteht Erdöl aus Kohlenwasserstoffverbindungen. Dieses Wissen und Grundkenntnisse über Alkane, Isomerie, Mehrfachbindungen und ringförmige Strukturen werden hier vorausgesetzt.

Die **Abbildung oben** gibt einen kurzen Überblick über die einzelnen Fraktionen. Benzin und Diesel sind hervorgehoben. Da Siedebereiche angegeben sind, können die Schüler schließen, dass es sich bei den Fraktionen um Gemenge handelt. Die Siedetemperaturunterschiede zwischen Benzin und Diesel zeigen, dass Diesel aus größeren, wahrscheinlich längerkettigen Kohlenwasserstoffen besteht.

Vergleicht man die Viskosität von Benzin und Diesel, erhärtet sich die Vermutung. Diesel hat eine zehnmal höhere Viskosität als Benzin. Das bedeutet, dass die zwischenmolekularen Anziehungskräfte zwischen den größeren Dieselmolekülen höher sind, als die zwischen den kleineren Benzinmolekülen.

Verfahren der Benzinherstellung

Die Abbildungen in der Mitte zeigen die chemischen Umwandlungen zur Anpassung des Rohbensins an die Erfordernisse im Motor.

Abbildung Mitte links: Cracken: Der Anteil an Benzin, der durch *Destillation* aus dem Erdöl gewonnen wird, deckt in keiner Weise den weltweiten Bedarf. Deshalb gewinnt man auf chemischem Wege, durch *Cracken*, aus den zähflüssigen, hoch siedenden Rückständen weiteres Benzin.

Thermisches Cracken: Heizöl S und Bitumen werden unter Druck auf 600 °C erhitzt; dabei entstehen niedrig siedende Benzinfraktionen und Gase. Dieses Verfahren wird zur Benzingewinnung nicht mehr angewandt, weil die Crackprodukte zu kurzkettig, unverzweigt und häufig ungesättigt (Olefine) sind. Zur Herstellung von Olefinen als Ausgangsprodukte für die Kunststoffindustrie wird es jedoch weiterhin durchgeführt.

Bei den Verfahren des *katalytischen Crackens* handelt es sich v. a. um das Fluid Catalytic Cracking (FCC), das überwiegend zur Gewinnung von Benzin eingesetzt wird und das Hydrocracken, bei dem hochwertiges Gasöl und Kerosin entstehen.

Fluid Catalytic Cracking (FCC): Bei Temperaturen bis 500 °C werden unter Normaldruck die hoch siedenden Rückstände am Katalysator in benzintaugliche Verbindungen zerlegt. Eine ständige Regenerierung des Katalysators ist nötig, da dieser sich mit Kohlenstoff belädt.

Die Verbrennung dieses Kohlenstoffs liefert aber wieder die Energie für die Erhitzung des Schweröls. Dieses Verfahren wird überwiegend zur Benzingewinnung angewandt (*Festbett-Technologie*). Bei Temperaturen bis 400 °C werden unter Hochdruck (100–150 bar) und Wasserstoffzufuhr am Katalysator die Rückstände in Cycloalkane zerlegt.

Das *Hydrocracken* ist gut geeignet zur Gewinnung von hochwertigem Gasöl und Kerosin, nicht aber von Benzin, da die hoch klopfesten Aromaten durch Wasserstoffanlagerung in weniger klopfeste Cycloalkane umgewandelt werden.

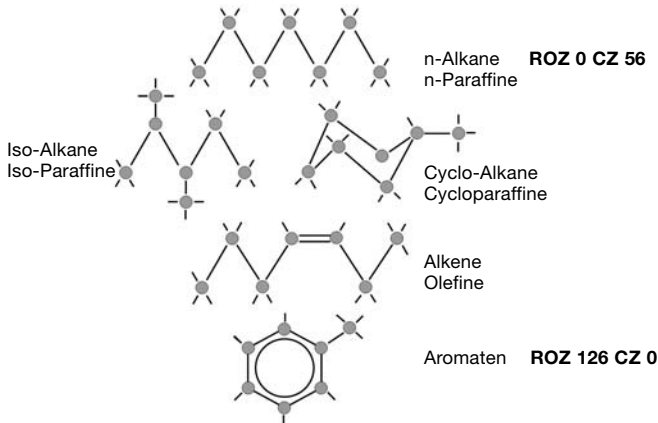
Was passiert nun eigentlich beim Cracken? Beim Cracken (to crack, engl. zerbrechen, aufspalten) werden langkettige Kohlenwasserstoffmoleküle in kürzere umgewandelt. Aus hoch siedenden Fraktionen entstehen niedrig siedende. Hierbei fallen größere Mengen kurzkettige, gasige und ungesättigte Kohlenwasserstoffe an, die durch *Polymerisieren* in einem Reaktor zu überwiegend verzweigten Iso-Alkanen verbunden werden. Es entsteht so genanntes Polymer-Benzin oder Polymerisat.

Abbildung Mitte rechts: Reformieren: Beim Reformieren entsprechen die Ausgangsverbindungen aus dem Schwerbenzin zwar im Molekulargewicht denen, die man für Otto-Kraftstoffe braucht, sie haben aber zu niedrige Octanzahlen und müssen deshalb in Kohlenwasserstoffe mit hohen Octanzahlen, also in verzweigte und ringförmige Verbindungen, umgewandelt werden.

Dazu wird das Schwerbenzin unter erhöhtem Druck (15–50 bar) und erhöhter Temperatur (~500 °C) in Gegenwart des Katalysators Platin zur Reaktion gebracht. Neben den klopfesteren Benzinbestandteilen fällt dabei auch Wasserstoff an.

Zusammensetzung der Kraftstoffe:

1. Otto-Kraftstoff = Benzin oder Superbenzin
Gemenge aus geraden, verzweigten und ringförmigen Kohlenwasserstoffen mit 5–9 C-Atomen.
2. Diesel-Kraftstoff
Gemenge aus geraden, verzweigten und ringförmigen Kohlenwasserstoffen mit 10–22 C-Atomen.



Die verschiedenen Kohlenwasserstoffverbindungen in Kraftstoffen

Flammpunkt

Die in der *unteren Abbildung* gezeigte Einstufung brennbarer Stoffe in Gefahrklassen ist zwar rechtlich durch die neue Betriebssicherheitsverordnung außer Kraft gesetzt. Da der Gesetzgeber aber für ihre Regelungsinhalte noch keinen Ersatz geschaffen hat, gelten die bisherigen Vorschriften nach wie vor als „Stand der Sicherheitstechnik“. Die Fachwelt ist sich darin einig, dass sie deshalb bis zum Erlass neuer Richtlinien/Regeln weiterhin anzuwenden sind.

Definition: Der **Flammpunkt** ist die Temperatur, bei der ein brennbarer Stoff gerade so viel Dämpfe entwickelt, dass das Dampf-Luft-Gemisch durch eine 5 mm lange Zündflamme zum Aufflammen gebracht wird.

Da die Flammtemperatur von Ottokraftstoff deutlich unter 21 °C (von –45 °C bis +10 °C) liegt, besteht an Tankstellen die Gefahr der Entzündung (höchste Gefahrklasse, Warnhinweise).

Hier kann man wieder den Zusammenhang zwischen Molekülgröße und Siedetemperatur herstellen. Benzin besteht aus kleineren Molekülen und hat eine niedrigere Siedetemperatur, wie schon aus der Erdölfraction ersichtlich. Deshalb verdunstet Benzin bei niedrigen Temperaturen, d. h. bei üblichen Außentemperaturen ist ein Luft-Benzindampf-Verhältnis erreicht, das sich leicht entzündet.

Diesel dagegen verdampft erst bei sehr viel höheren Temperaturen aufgrund seiner größeren Moleküle. Deswegen ist er erst bei höheren Temperaturen entflammbar (siehe Kopiervorlage 14: Siedetemperaturen und Flammpunkte von Kraftstoffen).

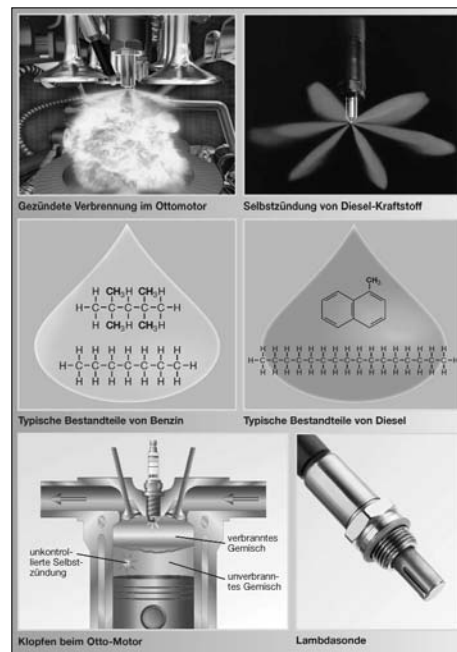
Definition: Die **Zündtemperatur** ist die Temperatur, bei der sich ein entflammbares Gemisch ohne äußeren Zündfunken selbst entzündet.

Eine weitere Kenngröße ist der **Brennpunkt**. Darunter versteht man die Temperatur, bei der eine Flüssigkeit so viele Dämpfe gebildet hat, dass sie bei Zündung nicht nur aufflammt (Flammpunkt) sondern weiter brennt. Diese Temperatur liegt nur ungefähr 25–30 °C über dem Flammpunkt.

| Temperatur-Kenndaten in °C | |
|--|---------------------|
| Flammpunkt Ottokraftstoff | –30 °C bis –40 °C |
| Flammpunkt Diesekraftstoff | 58 °C bis 65 °C |
| Zündtemperatur Ottokraftstoff | 220 °C bis 450 °C |
| Zündtemperatur Diesekraftstoff | 220 °C bis 300 °C |
| Verbrennungstemperatur Gemisch Kraftstoff/Luft | 2000 °C bis 2500 °C |

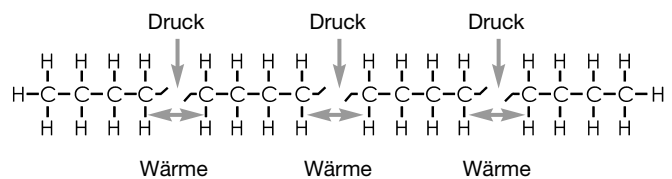
Die Zündtemperatur der Kohlenwasserstoffe sinkt im Gegensatz zum Flammpunkt mit steigender Molekülmasse, weil bei den längeren Molekülketten durch die Bewegung bei der Erwärmung die Elektronenpaarbindungen leichter aufbrechen. Hierbei entstehen Kohlenwasserstoff- und Wasserstoffradikale, die leicht mit Sauerstoff reagieren.

Die Zündtemperatur von Benzin liegt zwischen 220 und 460 °C, die von Diesel zwischen 200 und 350 °C.



Folie 8: Zündung, Verbrennung und Klopfen

Die *Abbildungen links und rechts oben* stellen die unterschiedlichen Zündvorgänge beim Ottomotor und beim Dieselmotor dar. Beim Ottomotor wird das Kraftstoff-Luftgemisch durch die Zündkerze gezündet. Beim Dieselmotor wird die Ansaugluft im Brennraum stark verdichtet. Dadurch erhitzt sie sich, so dass sich der eingespritzte Diesel-Kraftstoff darin nach möglichst kurzer Zeit (Zündverzug ~0,001 s) von selbst entzündet.



Langkettige Moleküle im Diesel zerfallen unter dem Druck und der Hitze im Brennraum in kleinere Molekülbruchstücke, die sich mit Sauerstoff verbinden. Bei ausreichender Sauerstoffzufuhr entstehen schließlich Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf (siehe auch Zündtemperatur).

Abbildungen Mitte links und rechts: Sowohl beim Otto- als auch beim Diesel-Kraftstoff spielt das Zündverhalten im Motor eine wichtige Rolle. Angegeben wird dies jeweils durch einen Kennwert. Beim Benzin ist das die ROZ (Research Octanzahl, meist einfach Octanzahl), beim Diesel die CZ (Cetanzahl). Die Abbildungen zeigen die Referenzverbindungen.

| Klopfestigkeit von Otto-Kraftstoff (ROZ: Research Octanzahl) | Zündwilligkeit von Diesel-Kraftstoff (CZ: Cetanzahl) |
|--|---|
| Referenzverbindungen: – n-Heptan: ROZ 0 → keine Klopfestigkeit – Iso-Octan (2,2,4 Trimethylpentan): ROZ 100 → hohe Klopfestigkeit $ \begin{array}{ccccccc} & \text{H} & \text{CH}_3 & \text{H} & & \text{CH}_3 & \text{H} \\ & & & & & & \\ \text{H} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - & \text{C} & - \text{C} & - \text{H} \\ & & & & & & \\ & \text{H} & \text{CH}_3 & \text{H} & & \text{H} & \text{H} \end{array} $ | Referenzverbindungen: – Cetan = n-Hexadecan CZ 100 → hohe Zündwilligkeit – Methylnaphthalin  – CZ 0 → niedrige Zündwilligkeit |
| Ist an der Tanksäule eine Octanzahl von 95 angegeben bedeutet das, dass sich das Gemisch wie ein Gemenge aus 95 % Iso-Octan und 5 % Heptan verhält. Es sagt nichts über die tatsächliche Zusammensetzung des Kraftstoffes aus. | Diesekraftstoff mit der Cetanzahl 51 verhält sich wie ein Gemisch aus 51 % Cetan und 49 % Methylnaphthalin. Es sagt nichts über die tatsächliche Zusammensetzung des Kraftstoffes aus. |
| Stoffe, die die Klopfestigkeit verbessern: – Aromaten = ringförmige ungesättigte Kohlenwasserstoffe (Beispiel Benzol) haben eine hohe Klopfestigkeit. Seit 1998 darf wegen der krebserzeugenden Wirkung nur noch max. 1 % Benzol im Kraftstoff enthalten sein. – früher Bleialkyle: Bleitetraethyl TEL (C ₂ H ₅) ₄ Pb und Bleitetramethyl → heute verboten (unverbleites Benzin darf jedoch noch max. 0,013 g/l Blei enthalten). Bei zu hohem Bleigehalt im Benzin entsteht Bleistaub im Abgas, der sich an der Lambdasonde und an den aktiven Zentren des Katalysators absetzt und diese Komponenten unbrauchbar macht. – Alkohole haben ebenfalls eine hohe Klopfestigkeit → in heutigen Otto-Kraftstoffen enthalten. – Etha-Zusätze: MTBE (Methyl-Tertiär-Butylether) | – CZ heutiger Diesel-Kraftstoffe: 51–55 (Super Diesel) („Shell V- Power“ und „Aral Ultimate“ haben fast CZ 60) – Zündbeschleuniger erhöhen die Zündwilligkeit (0,1–1 Vol.%) |

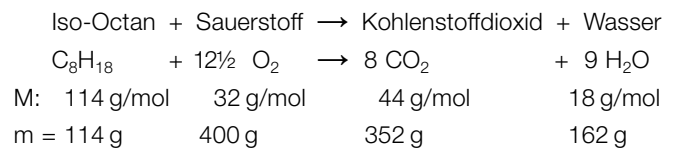
Bei Diesel-Kraftstoff ist die Zündunwilligkeit der ringförmigen Verbindungen ein Nachteil, bei Otto-Kraftstoff ein Vorteil (Klopfestigkeit). Die Qualität des Diesel-Kraftstoffes steigt also mit dem Anteil der geradkettigen Kohlenwasserstoffe, die des Otto-Kraftstoffes mit dem Anteil der verzweigten und ringförmigen Anteile.

Beim Ottomotor muss sichergestellt sein, dass der Kraftstoff ausschließlich durch die Zündkerze gezündet wird. Jede andere Zündung verschlechtert die Leistung des Motors erheblich und führt zu rascherem Verschleiß. Beim Dieselmotor soll der Kraftstoff selbst zünden, d. h. er muss in einem weiten Außentemperaturspektrum besonders zündwillig sein.

Abbildung links unten: Das Klopfen im Ottomotor entsteht (sehr vereinfacht, die komplizierten Vorgänge sind noch nicht in allen Einzelschritten geklärt), wenn während der gleichmäßigen Verbrennung an der Flammenfront das noch unverbrannte Gemisch unkontrolliert zu zünden beginnt. Die höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flamme, die mit diesem Vorgang einhergeht, führt zu einem schnelleren und stärkeren Druckanstieg im Zylinder und damit zu einem stärkeren Verschleiß bei verminderter Leistung. Der Begriff „Klopfen“ ist auf das im Fahrzeuginnenraum wahrnehmbare unruhige Motorlaufgeräusch zurückzuführen, das durch die nicht vollständig kontrollierte und ungleichmäßige Verbrennung entsteht.

Kraftstoff-Luft-Gemenge

Berechnung des theoretischen Luftbedarfs am Beispiel der Verbrennung von Iso-Octan (siehe Kopiervorlage 15: Zündung und Verbrennung von Kraftstoffen):



1 kg Iso-Octan = 8,77 Mol benötigen also (8,77 x 400 g =) 3,5 kg Sauerstoff.

Luft enthält etwa 21 Vol.% Sauerstoff und 78 Vol.% Stickstoff. Multipliziert man diese Volumenverhältnisse jeweils mit der Molmasse von O₂ (32 g/mol) und N₂ (28 g/mol), so erhält man ein Gewichtsverhältnis von **Sauerstoff zu Stickstoff** in der Luft von **1 : 3,25**. Die Luftmenge, die 3,5 kg Sauerstoff enthält, enthält also (3,25 x 3,5 =) 11,38 kg Stickstoff. Der theoretische **Luftbedarf für die Verbrennung von 1 kg Iso-Octan** beträgt also (3,5 kg + 11,38 kg =) **14,88 kg**. Bei einer Dichte der Luft von 1,2 kg/m³ entspricht das (14,88 : 1,2 =) **12,4 m³ Luft**.

Da man Benzin in Volumeneinheiten misst, ist es wesentlich anschaulicher den Luftbedarf von 1 Liter Iso-Octan zu berechnen. Iso-Octan hat die Dichte 0,69 g/cm³. **1 l Iso-Octan** wiegt also 0,69 kg und **benötigt** damit (0,69 x 12,4 m³ =) **8,6 m³ Luft**.

Bei der Verbrennung im Motor herrschen keine idealen Bedingungen, außerdem ist die Luftdichte abhängig von der Höhe und der Temperatur. Darüber hinaus haben wir hier reines Iso-Octan als Rechenbeispiel genommen. Der tatsächliche Luftbedarf übersteigt also den hier berechneten theoretischen, so dass man gerundet sagen kann:

1 l Ottokraftstoff braucht bei der Verbrennung ungefähr den Sauerstoff von 10 m³ Luft.

Abbildung rechts unten: Der tatsächliche Luftbedarf für die Verbrennung des Kraftstoffes im Motor unter den jeweiligen Bedingungen wird durch die so genannte **Lambdasonde** ermittelt, die den Sauerstoffgehalt der Abgase vor dem Eintritt in den Katalysator misst. Über ein Steuergerät regelt diese Messung die Zusammensetzung des Kraftstoff-Luft-Gemenges, das in den Brennraum geführt wird. Der Luftbedarf im Motor errechnet sich aus dem theoretischen Luftbedarf multipliziert mit der ermittelten Luftzahl λ .

$$L_{\text{(tatsächlicher Luftbedarf)}} = \lambda_{\text{(Luftzahl)}} * L_0 \text{ (theoretischer Luftbedarf)}$$

Ist der Lambdawert klein, spricht man von einem „**fetten**“ Gemisch (viel Kraftstoff im Verhältnis zur Luft), ist der Lambdawert groß, spricht man von einem „**mageren**“ Gemisch (wenig Kraftstoff im Verhältnis zur Luft). $\lambda = 1$ entspricht dem theoretischen Luftbedarf bei der Verbrennung.

Bei Verwendung magerer Kraftstoffgemische ist eine Kraftstoffeinsparung von bis zu 15 % möglich.

Der λ -Wert für Ottomotoren liegt zwischen 0,85 und 1,25, der für Dieselmotoren zwischen 1,2 und 2.

Welche Wirkung sich durch die Veränderung der Luftzufuhr zu einem brennbaren Stoff erzielen lässt, kann man in der Schule am leichtesten am Gasbrenner demonstrieren. Bei nicht geöffneter Luftzufuhr wird der Brennstoff unvollständig verbrannt, was man an der Entwicklung unverbrannten Kohlenstoffs leicht erkennt (Abscheidung an Magnesiumrinne), die Temperatur ist deutlich niedriger als bei geöffneter Luftzufuhr. Die nicht leuchtende Flamme ist erheblich heißer und brennt rußfrei.

Lösungen zu den Kopiervorlagen

Kopiervorlage 14: Siedetemperaturen und Flammpunkte von Kraftstoffen

- Die Anziehungskraft der Moleküle untereinander steigt, d. h. ihre Kettenlänge (Oberfläche) und ihre Molekülmasse steigen.
 - Die Fraktionen sind immer noch Gemenge von Kohlenwasserstoffen.
- Auch die Viskosität hängt mit der Molekülgröße zusammen. Wie die Siedepunkte steigt auch der Zähigkeitsgrad mit wachsender Molekülgröße wegen der steigenden zwischenmolekularen Anziehungskraft.
- Beim Cracken werden langkettige Moleküle aus dem schweren Heizöl in kürzerkettige Verbindungen gespalten, wie sie für das Benzin benötigt werden. Beim Reformieren werden geradkettige Moleküle in verzweigte oder ringförmige Moleküle umgewandelt, weil diese die Benzinqualität erhöhen. Beide Prozesse finden unter Druck bei etwa 500 °C an einem Katalysator statt.
- Benzin hat einen Flammpunkt von <21 °C, damit gehört es in die Gefahrklasse A I der nicht mit Wasser mischbaren brennbaren Flüssigkeiten. Solche Flüssigkeiten können bei den bei uns üblichen Temperaturen ohne weiteres durch einen kleinen Funken gezündet werden.

Als Flammpunkt bezeichnet man die Temperatur, bei der ein brennbarer Stoff gerade so viel Dämpfe entwickelt hat, dass diese entzündet werden können.

- Diesel bildet, aufgrund seiner höheren Siedetemperatur, erst bei höheren Temperaturen als Benzin Dampf-Luft-Gemische, die durch Funken entzündbar sind.

Die **Zündtemperatur** ist die Temperatur, bei der ein entflammbares Gemisch von selbst zündet, ohne dass Funken von außen nötig sind.

Die Zündtemperaturen beider Kraftstoffarten liegen über 200 °C, bei dieser Temperatur zerbrechen die langkettigen Dieselmoleküle leichter als die kürzeren Benzinmoleküle. Die entstehenden „Bruchstücke“ reagieren leichter spontan mit Sauerstoff als die Benzinbestandteile.

Kopiervorlage 15: Zündung und Verbrennung von Kraftstoffen

- Dieselmotoren haben keine Zündkerzen. Sie sind Selbstzünder.
- Beim Dieselmotor wird die angesaugte Luft im Brennraum stark verdichtet. Sie erhitzt sich so stark, dass die Zündtemperatur des eingespritzten Dieselkraftstoffs überschritten wird und er sich von selbst entzündet. Beim Ottomotor wird das Benzin-Luft-Gemisch durch den Funken der Zündkerze entflammt.
- n-Heptan
Iso-Octan oder 2,2,4 Trimethylpentan
 - Vom Iso-Octan leitet sich die Octanzahl ab, die auf jeder Benzintanksäule angegeben ist, (z. B. ROZ 98 für Superbenzin).
Je höher die Octanzahl ist, desto größer ist die Klopfestigkeit des Benzins.
- Unter „Klopfen“ versteht man eine Selbstzündung im Brennraum des Zylinders eines Ottomotors neben der Zündung durch die Zündkerze. Es kommt dadurch zu einer unregelmäßigen Verbrennung unter erhöhtem Druck, die hörbare Geräusche verursacht (daher der Begriff „Klopfen“), die Motorleistung mindert und den Verschleiß erhöht.
- Ottokraftstoffe enthalten viele verzweigte und ringförmige Verbindungen, da diese zündunwillig sind, also die Klopfestigkeit erhöhen. Dieselmotoren enthalten viele länger- und geradkettige Verbindungen, die wegen ihrer Zündwilligkeit die Selbstzündung ermöglichen.
- Iso-Octan + Sauerstoff → Kohlenstoffdioxid + Wasser

$$\text{C}_8\text{H}_{18} + 12\frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow 8 \text{CO}_2 + 9 \text{H}_2\text{O}$$

| | | | | |
|-----|-----------|----------|----------|----------|
| M: | 114 g/mol | 32 g/mol | 44 g/mol | 18 g/mol |
| m = | 114 g | 400 g | 352 g | 162 g |

→ 1 kg Iso-Octan = 8,77 Mol **benötigen** also (8,77 x 400 g =) **3,5 kg Sauerstoff**.
 - Die Luftmenge, die 3,5 kg Sauerstoff enthält, enthält 3,25 x 3,5 = 11,38 kg Stickstoff.
3,5 kg + 11,38 kg = **14,88 kg**
14,88 x 1,2 = 17,856 m³ Luft
 - zur Verbrennung von 1 l Iso-Octan sind → (0,69 x 12,4 m³ =) **8,6 m³** Luft nötig.

Kopiervorlage 16: Versuche zu Verbrennung und Flammpunkt

Versuch 1: Verbrennung von verschiedenen Kohlenwasserstoffen

Beobachtungen: Man beobachtet eine zunehmende Rußentwicklung. Das Mengenverhältnis C : H verschiebt sich zugunsten des Kohlenstoffs:

| | C | H |
|------------|---|------|
| Pentan | 1 | 2,4 |
| Paraffinöl | 1 | 2,11 |
| Naphthalin | 1 | 0,8 |

Ergebnisse: Die Kohlenwasserstoffe aus dem Erdöl unterscheiden sich stark in ihrem Kohlenstoffanteil im Verhältnis zum Wasserstoff. Je höher der Kohlenstoffanteil im Molekül, desto stärker ist die Rußentwicklung. Langkettige und besonders ringförmige Kohlenwasserstoffe haben einen hohen Kohlenstoffanteil.

Versuch 2: Flammpunkt von Benzin und Diesel

Beobachtungen: Benzin entzündet sich bei Zimmertemperatur, Dieselöl muss erwärmt werden, um die Flammtemperatur zu erreichen. Bei Zimmertemperatur kann man den brennenden Holzspan sogar im Diesel löschen.

Ergebnisse: Die Flammtemperatur von Benzin ist niedriger, weil es aus Kohlenwasserstoffen mit geringerer Siedetemperatur besteht, die schneller verdampfen als die längerkettigen Moleküle des Diesels und daher bei geringerer Erwärmung zündfähige Gemische bilden.

Kopiervorlage 17: Versuche zur Zündung von Kraftstoffen

Versuch 3: Zündung durch adiabatische Kompression

Beobachtungen: Das Benzin zündet mit einem heftigen Knall.

Ergebnisse: Das Gemisch entzündet sich durch den Druck ohne Funken, wie der Kraftstoff im Dieselmotor.

Adiabatische Kompression = Kompression durch mechanische Arbeit, wobei die Energie im System in Wärme umgewandelt wird.

Versuch 4: Zündung eines Benzin-Luft-Gemisches

Beobachtungen: Bei zu geringer Benzinmenge kommt es nicht zur Zündung. Bei einem bestimmten Mischungsverhältnis gibt es eine heftige Explosion. Bei höherer Benzindampfkonzentration beobachtet man eine langsame Verbrennung.

Ergebnisse: Die Reaktion ist am heftigsten, wenn Luft und Benzinmenge genau aufeinander abgestimmt sind (stöchiometrisches Verhältnis), wie bei Wasserstoffknallgas.