



# Chemie im Motor

Volker Bornitzky, WS 06/07; Felix Dippold, WS 14/15

## Gliederung

1	Die Verbrennung .....	2
1.1	Die Zündung.....	2
1.2	Die Mischungstypen .....	2
1.3	Funktionsweise des Viertakt-Ottomotors .....	4
1.4	Die Schadstoffe .....	4
2	Das Motor-Klopfen .....	5
2.1	Klopf-Wirkung.....	5
2.2	Die Oktan-Zahl .....	5
2.3	Anti-Klopfmittel .....	5
2.3.1	BTX-Aromaten .....	5
2.3.2	Scavenger.....	6
3	Ausblicke .....	7
3.1	Benzin .....	7
3.2	Diesel .....	7

**Einstieg:** Rund 90% der weltweit erzeugten Energie entsteht durch Verbrennungsprozesse. Einen Großteil davon macht sich der Mensch für Transport-Prozesse zu Nutze (Auto, LKW, Schiff-Fahrt). Dabei entsteht leider auch jede Menge umweltschädlicher und gesundheitsgefährdender Stoffe. Daher muss die Verbrennung möglichst effizient gestaltet werden. Ein genauerer Blick auf die Verbrennungsmotoren ist daher lohnenswert.



Abb. 1: Motor [1]

# 1 Die Verbrennung

Beim **Verbrennungsmotor** wird ein Gemisch aus Kraft-Stoff und Luft in einer Brennkammer (Zylinder) entzündet und verbrannt. Durch die Expansion der Verbrennungsgase wird der entsprechende Kolben in Bewegung gesetzt.

## 1.1 Die Zündung

Hier unterscheidet man zwei Fälle:

- Bei Otto-Motoren (Benzin) wird das Kraftstoff-Luft-Gemisch durch Fremd-Zündung (Zündkerze) zur Reaktion gebracht.
- Bei Diesel-Motoren startet die Verbrennung durch Selbst-Zündung während der Einspritzung des Kraftstoffes.

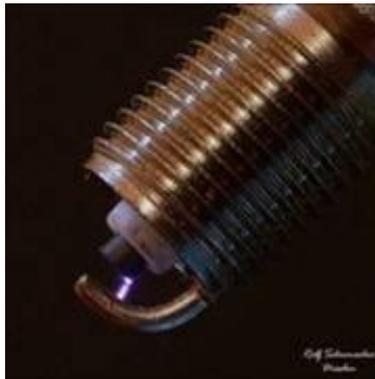


Abb. 2: Zündkerze [2]

## 1.2 Die Mischungstypen

Allgemein wird in jedem Verbrennungsprozess ein Brennstoff (z. B. Benzin) mit einem Oxidationsmittel umgesetzt. Dabei ist die so genannte „**vorgemischte**“ Verbrennung von der „**nicht vorgemischten**“ Verbrennung zu unterscheiden.

Im ersten Fall wird das Oxidationsmittel (z. B. Sauerstoff) dem Brennstoff (z. B. Benzin) bereits beigemischt, während es im zweiten Fall erst durch Diffusion an den Verbrennungsort (Brenner) gelangt.



Abb. 3: Mischungstypen, links „vorgemischte“, rechts „nicht vorgemischte“ Verbrennung [1]

**Experiment:** Unterschied von linearen und verzweigten Kohlenwasserstoffen bei der Verbrennung.

**Material:**

- Petrischalen
- Streichhölzer

**Chemikalien:**

- **n-Heptan**

CAS-Nr.: 142-82-5



Gefahr

H225, H304, H315, H336, H410  
P210, P240, P273, P302+P352,  
P403+P233, P301+P330+P331

- **Isooctan (2,2,4-Trimethylpentan)**

CAS-Nr.: 540-84-1



Gefahr

H225, H304, H315, H336, H410  
P210, P273, P331, P301+P310,  
P302+P352

**Durchführung:** Je 20 mL n-Heptan und Isooctan werden vergleichend in zwei Petrischalen nebeneinander verbrannt.

**Beobachtung:** n-Heptan brennt heller und weniger rußend als Isooctan.

**Interpretation:** Das orangefarbene leuchten stammt von Ruß-Partikeln.

Außerdem unterscheidet man zwischen fetten und mageren Gemischen. Die optimale Verbrennung findet bei einem Luft-Sauerstoff-Verhältnis statt, das dem stöchiometrischen Verhältnis entspricht. Bei Luft-Unterschuss spricht man von fetten, bei Luft-Überschuss von mageren Gemischen.

**Experiment:** Einfluss des Luft-Brennstoff-Verhältnisses

**Material:**

- Experimentiersatz
- Pasteur-Pipette, Hütchen
- Plexiglas-Silo mit Piezo-Zünder
- Haar-Trockner

**Chemikalien:**

- **Petrolether**

SDB 40-60°C

CAS-Nr.: 64742-49-0



Gefahr

H225, H304, H315, H336, H361f, H373, H411  
P201, P210, P301+P310, P331, P370+P378, P501

**Durchführung.** In das Silo werden verschiedene Mengen Petrolether gegeben (zwischen 5 und 18 Tropfen), das Silo wird verschlossen und gut geschüttelt und dann wird mit dem Piezo-Zünder gezündet. Gas-Reste werden mittels Haar-Trockner aus dem Silo entfernt, bevor erneut gefüllt wird.

**Beobachtung:**

- 5 und 18 Tropfen: keine Reaktion
- 7 und 15 Tropfen: leicht Reaktion
- 12 Tropfen: sehr heftige Reaktion

**Interpretation:** Je näher das Luft-Brennstoff-Verhältnis an das stöchiometrische Verhältnis kommt, desto idealer läuft die Verbrennung ab und desto heftiger ist die Reaktion.

Bei < 12 Tropfen wird das Gemisch zu mager, bei > 12 Tropfen zu fett.

Dabei wird die Verbrennung unvollständiger, oder (bei zu fetten und zu mageren Gemischen) läuft überhaupt nicht mehr ab.

### 1.3 Funktionsweise des Viertakt-Ottomotors

Ein Viertakt-Ottomotor funktioniert nach folgendem Prinzip:

Zuerst öffnet sich das Einlass-Ventil und das vorgemischte Luft-Brennstoff-Gemisch wird aus dem Vergaser in den Zylinder gesogen. Das Einlass-Ventil schließt sich, der Kolben bewegt sich nach oben und verdichtet das Gemisch. Dabei steigt der Druck auf etwa 15 bar, und dadurch auch die Temperatur auf etwa 500°C.

Anschließend erzeugt die Zündkerze einen Zünd-Funken. Das Gemisch entzündet sich, die Temperatur steigt auf etwa 2.000°C an. Zusätzlich erhöht sich der Druck. Der Kolben wird dadurch nach unten gedrückt.

Schließlich öffnet sich das Auslass-Ventil und die Verbrennungsprodukte werden durch den sich erneut nach oben bewegenden Kolben in den Abgas-Trakt gedrückt. Die Temperatur der Abgase sinkt durch Druck-Minderung auf etwa 800°C. Die mechanische Arbeit wird dabei komplett im 3. Takt geleistet. Durch die Zündung des Gemischs wird der Kolben nach unten gedrückt und treibt so die Kurbelwelle an.

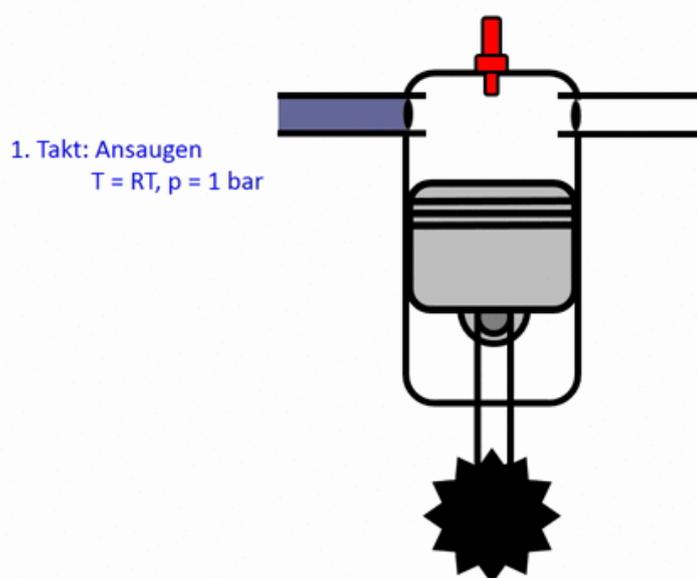


Abb. 4: Viertakt-Ottomotor ([download](#) animated gif)

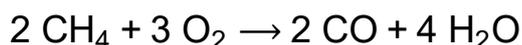
### 1.4 Die Schadstoffe

Folgende Schadstoffe können bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen in Luft entstehen:

**CO, CO<sub>2</sub>**



*Stöchiometrische Verbrennung*



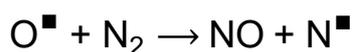
*„fette“ Verbrennung: Luft-Unterschuss*

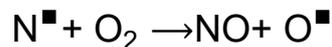


*„magere“ Verbrennung: Luft-Überschuss*

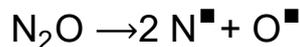
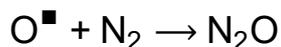
**NO<sub>x</sub>**

Thermisches NO (Zeldovich NO):





Variante des thermischen NO (NO aus Lach-Gas):



Promptes NO (Fenimore NO):



Das CH-Radikal wird aus C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (Ethin) gebildet, welches wiederum aus einer Rekombination zweier CH<sub>3</sub>-Radikale hervorgeht. NO ist farblos und reagiert mit Luft zum braunen NO<sub>2</sub>.

## 2 Das Motor-Klopfen

### 2.1 Klopf-Wirkung

Bei starken Erhitzen werden vor allem von Molekülen linearer Kohlenwasserstoffe (KW) Wasserstoff-Atome abgespalten (**Radikal-Bildung**). Wasserstoff-Radikale reagieren besonders leicht mit Sauerstoff und zwar auch ohne Zündung durch eine Zündkerze. Dadurch erfolgt die Verbrennung nicht mehr längs einer von der Zündkerze weg wandernden Flammen-Front (a), sondern setzt an verschiedenen Stellen im Zylinder ein und verbrennt unregelmäßig (b).

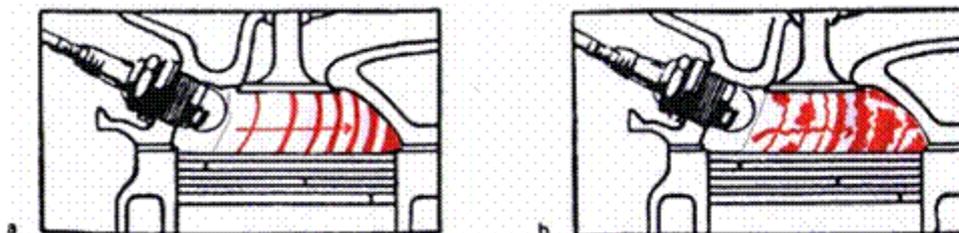


Abb. 5: Klopf-Wirkung [3]

a) reguläre Verbrennung

b) Klopfen auslösende irreguläre Verbrennung

### 2.2 Die Oktan-Zahl

Zur Beschreibung der Klopf-Festigkeit von Treibstoffen hat man die **relative Oktan-Zahl** (ROZ) eingeführt. Man hat reinem Oktan die Oktan-Zahl 100 zugeordnet, reinem n-Heptan die Oktan-Zahl 0. Relativ dazu wird in Test-Motoren die Klopf-Festigkeit experimentell bestimmt.

### 2.3 Anti-Klopfmittel

#### 2.3.1 BTX-Aromaten

Man nutzt von vornherein solche Kohlenwasserstoffe als Treibstoffe oder Treibstoff-Zusatz, die keine oder weniger Wasserstoff-Radikale bilden. Hierzu gehören aromatisch Kohlenwasserstoffe, die sog. **BTX-Aromaten** (**B**enzol, **T**oluol und **X**ylol-Isomere). Folglich ist der Aromaten-Anteil in Super-Benzin besonders hoch.

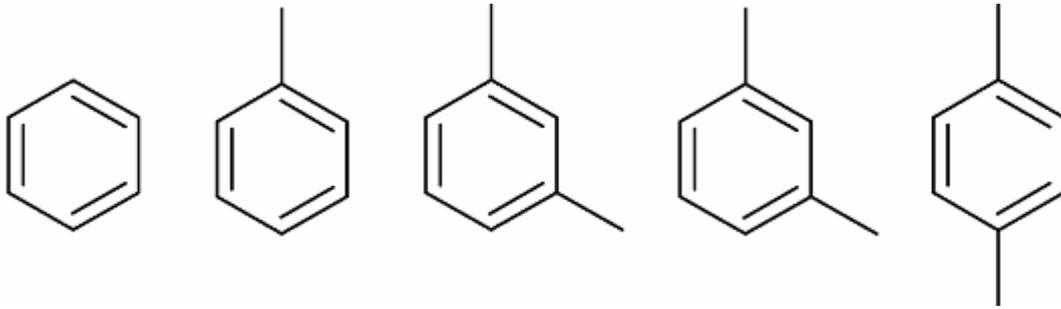


Abb. 6: BTX-Aromaten

### 2.3.2 Scavenger

Man fängt entstandene Wasserstoff-Radikale ab. Dazu setzt man von vornherein instabile Verbindungen zu, aus denen im heißen Treibstoff-Luft-Gemisch rasch Kohlenwasserstoff-Radikale entstehen, die mit den freien Wasserstoff-Radikalen reagieren. Beispiele sind die verzweigten Kohlenwasserstoffe, hier vor allem das Isooctan. Beim Zerfall bilden sich zwei isomere Butyl-Radikale:

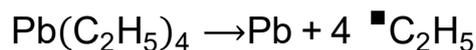


Abb. 7: Radikal-Entstehung durch den Zerfall einer Kohlenwasserstoff-Kette

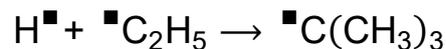
Die entstandenen Kohlenwasserstoff-Radikale verbinden sich ihrerseits wieder mit freien Radikalen, z. B. Wasserstoff. Diese Reaktion wird als Radikal-Fang bezeichnet und die entsprechenden Radikal-Fänger heißen **Scavenger** (engl. Straßen-Kehrer).

#### Verbleites Benzin

In verbleitem Benzin ist **Bleitetraethyl** enthalten, das rasch unter Bildung von vier Ethyl-Radikalen zerfällt:

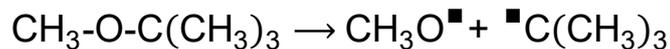


Diese Radikale wirken wieder als Scavenger:



#### Bleifreies Benzin

Ein guter Ersatz für Bleitetraethyl ist **Methyl-t-Butyl-Ether** (MBE): In der Hitze zerfallen dessen Moleküle und bilden die bereits angesprochenen Scavenger:



## 3 Ausblicke

### 3.1 Benzin

Werden Verbrennungsmotoren eines Tages mit Laser gezündet?

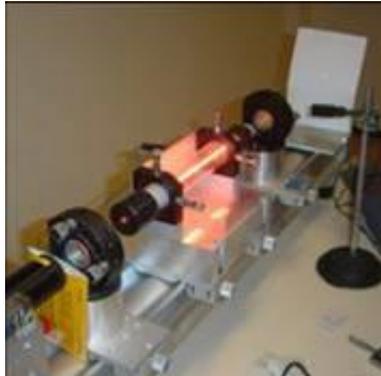


Abb. 8: Demonstrationslaser [7]

#### Vorteile:

- freie Wahl des Zünd-Ortes
- erhöhte Zünd-Sicherheit
- Verschleißfrei
- geringerer Zünd-Verzug
- Entzündung magerer Gemische (Luft-Überschuss)

#### Nachteil:

- Hohe Anschaffungskosten noch im vierstelligen Bereich, daher vorläufig erst in stationären Großgas-Motoren einsetzbar

### 3.2 Diesel

Rußfreie Verbrennung von Diesel als Mikro-Emulsion mit Wasser?

- Erniedrigung der Verbrennungstemperatur bei zunehmendem Druck
- Gleiche Arbeit bei niedrigerem Wärme-Verlust (Energie-Einsparung)
- Wasser und Öl liegen eng benachbart vor (gleichmäßige Verbrennung, d. h. weniger Schadstoffe) [4]

**Zusammenfassung:** Es ist sehr wichtig bei Verbrennungsmotoren eine möglichst effiziente und schadstoffarme Verbrennung zu gewährleisten. Im Verbrennungsmotor wird ein Luft-Gas-Gemisch (entweder vorgemischt und nicht vorgemischt) entzündet (entweder Selbst-Zündung oder Fremd-Zündung) und aus der Verbrennung mechanische Arbeit gewonnen. Das Luft-Brennstoff-Verhältnis wirkt sich dabei auf die Vollständigkeit der Verbrennung aus. Beim 4-Takt-Ottomotor verläuft die Verbrennung in 4 Schritten (Ansaugen, Verdichten, Arbeiten, Ausstoßen), wodurch die Effizienz gesteigert werden kann. Bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen entstehen im Motor allerdings ungewollte Abgase ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$ , ...). Von zentraler Bedeutung ist auch der Brennstoff selbst. Effiziente Motoren arbeiten mit hohen Verdichtungen. Bei diesen hohen Drücken neigen lineare Kohlenwasserstoffe eher zur ungewollten Selbst-Zündung (Motor-Klopfen) als verzweigte. Dem Klopfen kann man z. B. durch Zugabe von BTX-Aromaten entgegenwirken. Ein Maß für die Klopf-Festigkeit ist die Oktan-Zahl (OZ).

**Abschluss.** Um die Effizienz der Motoren zu steigern gibt es allerdings noch eine weitere Möglichkeit. Es kann Lach-Gas eingesetzt werden, um dem Motor schnell viel Sauerstoff für die Verbrennung zu liefern (siehe NO aus Lachgas). Dadurch kann in kürzerer Zeit mehr Brennstoff umgesetzt werden und die Motor-Leistung steigt rasant. Dabei spielt der Umwelt-Aspekt aber natürlich keine Rolle mehr.

**Quellen:**

1. Chem.Unserer Zeit, 2005, 39, 246-254
2. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c3/Spark-plug01.jpeg> (Autor: Ralf Schumacher, 16.02.16, GNU free documentation license)
3. Quelle vom 03.07.2008 ab 8.7.15 verschollen.
4. <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-19-04121>, 30.06.2015
5. <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/version30/text30.html>, 30.06.2015
6. Kolar, J., Stickoxide und Luftreinhaltung, Springer, 1990, S.19f.
7. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4b/Laser\\_DSC09088.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4b/Laser_DSC09088.JPG), (Autor: David Monniaux, 16.02.2016, GNU free documentation license)