
1 Einleitung

Seit der Erfindung des Automobils durch Carl Benz im Jahre 1885 ist der Innovationsreichtum rund um das Automobil ungebrochen. Mit den fallenden Preisen für Fahrzeuge zu Zeiten Henry Fords, wurde das Auto der breiten Masse zugänglich gemacht und etablierte sich Stück für Stück als ein Status Symbol und als Inbegriff der mobilen Unabhängigkeit jeder Person.

Heute ist der Begriff Elektro-Mobilität in aller Munde. Die erzielten Fortschritte auf diesem für die Automobilindustrie wiederentdeckten Gebiet sind beachtlich, dennoch reicht der derzeitige Entwicklungsstand nicht aus, die Verbrennungskraftmaschine von ihrer Pole-Position als das Antriebsaggregat schlechthin zu verdrängen. So werden weiterhin konventionelle Verbrennungsmotoren in moderne Fahrzeuge verbaut, als Hybride aber auch insbesondere als alleiniges Antriebsaggregat.

Um die 133 Jahre alte Erfindung weiterhin wettbewerbsfähig gegenüber den heute noch unkonventionellen Antrieben zu halten, gilt es den Verbrennungsmotor stets weiterzuentwickeln. Hierbei wird entscheidend für den Fortbestand von Benz' Erfindung die maximal erreichbare Effizienz sein. Dabei muss gleichsam die Effizienz in der Herstellung (Gewicht, Kosten, etc.) und im Kundenbetrieb (Dauerhaltbarkeit, Verbrauch, Emissionen, etc.) fortwährend optimiert werden.

Zusätzlich muss sich der Verbrennungsmotor unter dem Fokus lokaler Emissionsfreiheit mit dem Elektromotor messen und kann in dieser Disziplin nur bestehen, wenn auch weiterhin niedrigste Emissionswerte erzielt und die strengen Vorgaben der Legislative eingehalten werden. Das heißt die wesentlichen, zukünftigen Anforderungen an die Verbrennungskraftmaschine sind: Die Darstellung von Motorenkonzepten mit niedrigsten Emissionen bei gleichzeitig immer niedrigeren Verbräuchen.

In den ersten Sekunden nach Motorstart entstehen mit fast 50 %-Anteil an den Gesamtemissionen der größte Teil der Emissionen. Daher liegt der Fokus der Emissionsvermeidung auf dieser Phase. In der Zeit, bis der Katalysator seine Betriebstemperatur zur ausreichenden Konvertierung erreicht hat, muss dieser aktiv geheizt werden. Dies geschieht nahezu ausschließlich motorisch und verursacht einen erhöhten Verbrauch. Daraus ergibt sich die Zwangsverknüpfung, dass aktuell niedrigste Emissionen nur durch gleichzeitig (deutlich) erhöhten Verbrauch im Katalysatorheizen realisiert werden können.



Zukünftig wird die CO₂-Anspannung für die Automobilindustrie immer größer werden. Daher ist das Ziel dieser Arbeit die Potentialanalyse und wissenschaftliche Einordnung von fünf verschiedenen Abgasnachbehandlungskonzepten hinsichtlich des Minimal-Verbrauchs und niedrigsten Abgasemissionen, um diesen physikalischen Zusammenhang kritisch zu beleuchten. Es werden die beiden von direkteinspritzenden Ottomotoren bekannten Konzepte, das Katalysatorheizen über Wirkungsgradverschlechterung mit seitlicher (sHDEV) und zentraler Injektorlage (zHDEV), als Magnetspulenantrieb mit Mehrlochventil und Piezoantrieb mit nach außenöffnendem Injektor (A-Düse) analysiert. Außerdem wird das System mit seitlicher Injektorlage in Kombination mit einem Sekundärluftsystem, sowie eine Kombination aus einer seitlichen Injektorlage mit einem Abgasbrenner untersucht. Hierzu werden die Systeme im stationären Katalysatorheizen in Bezug auf Heiz-Leistung und Verbrauch verglichen. Auftretende Unterschiede werden simulativ, mittels Brennverfahrensanalyse und teilweise mit optischer Messtechnik und Lichtleitermessungen untersucht.

Es folgt der Übertrag aller Systeme in die Verbrauchszyklen Neuer Europäischer Fahrzyklus und FTP-75. Dort werden die Konzepte bei gleicher Katalysatorheizdauer miteinander verglichen. In einem weiteren Schritt werden die Emissionen über eine sukzessive Kürzung der Heiz-Dauer auf den halben Emissionsgrenzwert gleichgestellt. Sich ergebene Verbrauchsvorteile werden final ausgewiesen und sind das systemabhängige Differenzierungsmerkmal der unterschiedlichen Konzepte.

Dadurch wird die Möglichkeit geschaffen, für zukünftige Motorengenerationen und Abgasstufen zielgerichtet *das Abgasnachbehandlungssystem* auszuwählen, welches in der Summe aller Eigenschaften (insbesondere Emissionen und Verbrauch) am besten zu den gestellten Anforderungen passt.

2 Stand der Technik

Dieses Kapitel befasst sich mit der weltweit vorherrschenden Abgasgesetzgebung, mit den Entstehungsmechanismen der Abgasemissionen bei der Verbrennung von Otto-Kraftstoff in einer Verbrennungskraftmaschine und mit der Abgasenergie, die im Motorbetrieb entsteht. Kapitel 2 bildet die Grundlage der vorliegenden Arbeit, beschreibt den Stand der Technik und leitet den Handlungsbedarf her.

2.1 Abgasgesetzgebung für Personenkraftwagen

2.1.1 Abgasgesetzgebung in Europa

In Europa werden Fahrzeuge („neue Typen“) aktuell nach der EU6c Gesetzgebung zugelassen (siehe [10]). Die Grenzwerte der flüchtigen Emissionen entsprechen denen, der in dieser Arbeit behandelten EU6W Gesetzgebung. Abnahmezyklus für alle flüchtigen Emissionen war bis September 2017 der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ). Dieser wurde durch den Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC) ersetzt. Der CO₂-Verbrauch wird immer noch im Neuen Europäischen Fahrzyklus ermittelt. Abbildung 2 zeigt die Fahrkurve des Neuen Europäischen Fahrzyklus als Geschwindigkeit über der Zeit und die EU6c-Grenzwerte.

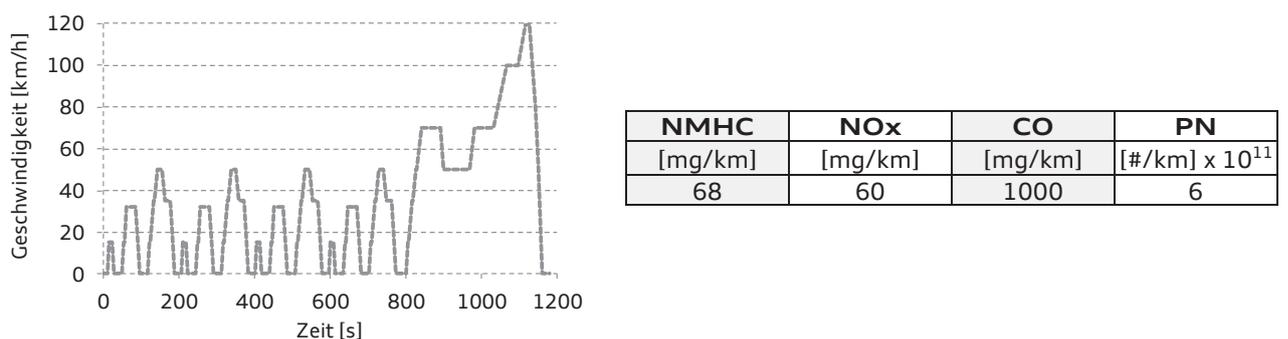


Abbildung 1: Fahrkurve Neuer Europäischer Fahrzyklus und EU6c-Grenzwerte

Dieser Zyklus wird in der vorliegenden Arbeit für die Bewertung der Abgasnachbehandlungssysteme im instationären Zustand genutzt und die Analyse der Verbrauchspotentiale angewandt.



2.1.2 Abgasgesetzgebung in Amerika

Die amerikanische Gesetzgebung gliedert sich auf in die Gesetzgebung der EPA (Environmental Protection Agency) und der CARB (Californian Air Research Board). Innerhalb der vorliegenden Arbeit werden die deutlich strengere Abgasgesetzgebung der CARB und die dazugehörigen LEV VIII Grenzwerte behandelt. Außerdem wird ausschließlich der Zyklus FTP-75 betrachtet. Der FTP-75 wird in 3 Phasen unterteilt (siehe Abbildung 2). Phase 1 und 3 sind identisch. Vor Phase 3 gibt es eine zehnminütige Pause:

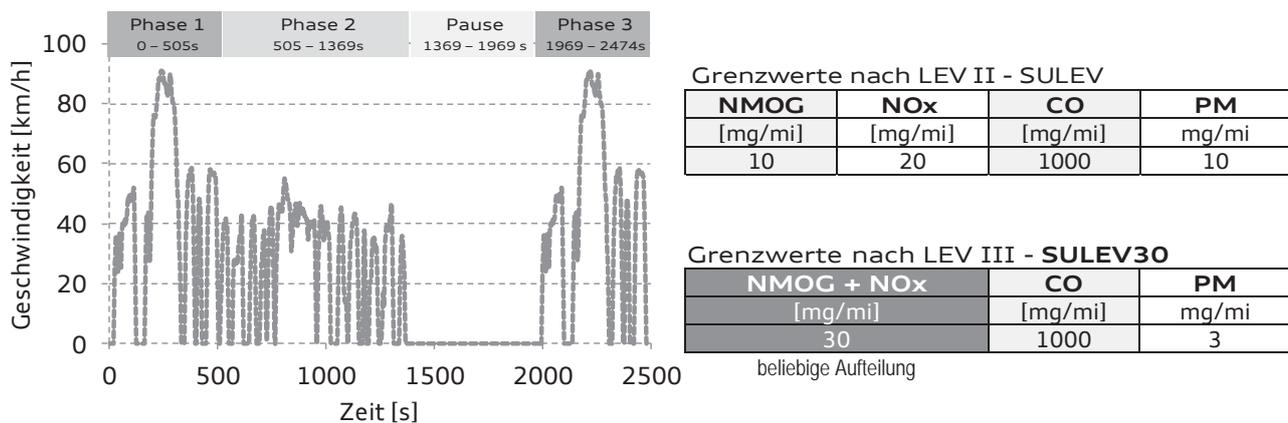


Abbildung 2: Fahrkurve FTP-75 und LEV VII/LEV VIII-Grenzwerte

Anders als in der europäischen Gesetzgebung, werden die Emissionen (e) in der amerikanischen Gesetzgebung in den einzelnen Phasen ($1,2,3$) über der Strecke (s) gewichtet [16]:

$$\frac{e}{s} = 0,43 \frac{e_1 + e_2}{s_1 + s_2} + 0,57 \frac{e_2 + e_3}{s_2 + s_3}$$

Formel 2-1: Gewichtung der Emissionen in LEV VII

Durch die Formel wird der Kaltstart, welcher relativ zur gesamt gefahrenen Strecke einen zeitlich kleinen Anteil hat, heruntergewichtet.

2.1.3 Weitere Abgasgesetzgebungen

Neben den Abgasgesetzgebungen aus Europa und Amerika gibt es noch die Japanische mit eigenen Abgaszyklen. Die übrigen Länder setzen eine der drei genannten Abgasgesetze für die eigenen Belange um, wie beispielsweise die Volksrepublik China, die aktuell die Europäische Abgasgesetzgebung (EU5) nutzt [10]. Staaten wie Brasilien oder Süd-Korea wenden die

obengenannten Gesetzgebungen für ihre Belange an (bspw. Brasilien mit hohen Ethanolanteilen im Kraftstoff). Damit konzentriert sich die vorliegende Arbeit auf die Gesetzgebung *EU6c* und *LEVIII*.

2.2 Abgasentstehung und Abgaszusammensetzung

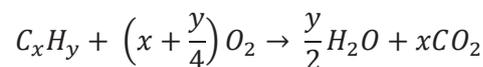
Diesel- und Ottokraftstoffe bestehen aus einer Vielzahl an Kohlen- und Wasserstoffen, verbunden in unterschiedlichen Kettenarten und -längen (Alkane, Alkene, Aromate und Alkohole). Hierbei beeinflusst die Mischung der einzelnen Komponenten die motorischen Eigenschaften wesentlich [12], [15], [24].

Eine exakte Zusammensetzung von Kraftstoffen ist schwierig zu quantifizieren, daher wird zur allgemeinen Beschreibung von Kraftstoffen die nachfolgende Summenformel genutzt:



Formel 2-2: Allgemeine Summenformel Kraftstoff

Bei der motorinternen Verbrennung mit Luft, chemisch die Bruttoreaktionsgleichung einer Oxidation, spaltet sich das obige Molekül auf. Die allgemeine Reaktionsgleichung zeigt die ablaufende Reaktion:



Formel 2-3: Reaktionsgleichung von Kraftstoff

Per Definition [61] gilt die obige Gleichung nur unter Standardbedingungen¹ und nur bei Verwendung von reinem Sauerstoff. Beide idealisierten Annahmen liegen im realen Motorbetrieb nicht vor. Zum einen verbrennt man den Kraftstoff mit Umgebungsluft² und zum anderen verläuft eine Verbrennung bei Temperaturen und Drücken deutlich über den Standardbedingungen von 298,15 K ab. Eine Verbrennung in einem Teillastpunkt (2000 1/min, 2 bar Mitteldruck) findet bereits bei Zylinderdrücken von 20 bar und einer Brennraum-Temperatur von deutlich mehr als 1000 K statt. Auf weitere Entstehungsmechanismen wird in den einzelnen Unterkapiteln genauer eingegangen. Ein Hauptparameter, der die gesetzlich limitierten Abgasbestandteile HC, NOx und CO stark beeinflusst ist das Luftverhältnis, Lambda. Lambda ist als Verhältnis aus tatsächlicher Luftmasse zu stöchiometrischer³ Luftmasse definiert.

¹ Standardbedingungen = T = 298,15 K und p = 100.000 Pa

² Umgebungsluft: N₂ = 78 Vol - %, O₂ = 21 Vol - %, Ar = 1 Vol - %

³ Stöchiometrie: Notwendige Luftmasse für eine vollkommene Verbrennung (14,7/1)



Abbildung 3 zeigt den prinzipiellen Zusammenhang zwischen Lambda und den wesentlichen Abgas Komponenten HC, NO_x und CO. Dabei wird aufgrund der Achsenskalierung die Emission CO als 1/10 der Achse dargestellt, die abgelesenen Werte müssen also mit 10 multipliziert werden um den Messwert zu ermitteln. Die graue, durchgezogene Linie beschreibt das Kohlenstoffmonoxid (CO). CO ist im mageren Bereich auf einem absoluten Minimum. Sinkt das Verbrennungsluftverhältnis unter 1, steigen die Kohlenmonoxide mit einem sehr steilen Gradienten an. Im unterstöchiometrischen Bereich fehlen die Sauerstoffatome zur Oxidation von CO. Die HC-Emissionen verhalten sich ähnlich wie die CO-Emissionen, mit steigenden Emissionen im unterstöchiometrischen Betrieb, da Sauerstoff zur Verbrennung der Kohlenwasserstoffketten im Kraftstoff fehlen. Auch bei den HC-Emissionen ist ein Abfallen der Emissionen im überstöchiometrischen Bereich erkennbar, da ausreichend Sauerstoff zur Oxidation vorhanden ist.

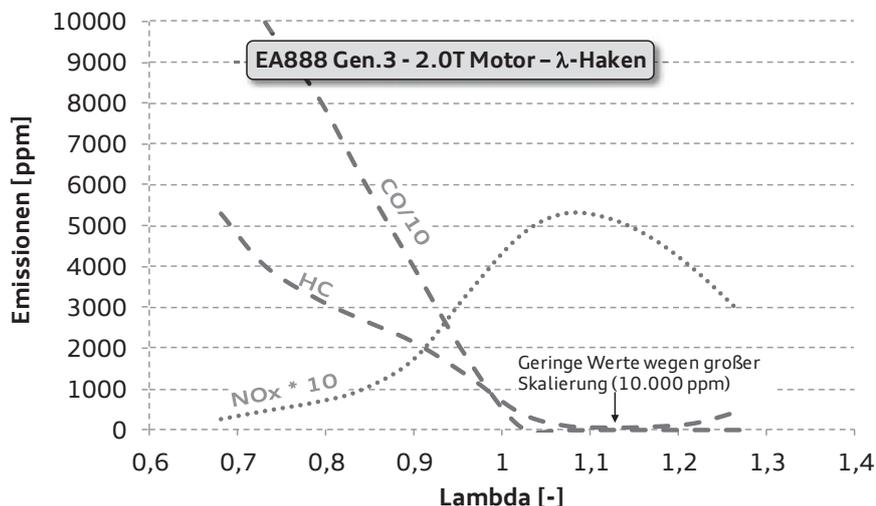


Abbildung 3: Einfluss Lambda auf Emissionen

Der Gradient im fetten Lambda-Bereich ist weniger stark als bei den CO-Emissionen. Für die NO_x-Emission gilt es genau umgekehrt. Die NO_x-Emissionen sinken, je fetter das Lambda wird. Das liegt an der fallenden Verbrennungstemperatur bei gleichzeitigem Luftmangel, da NO_x im Brennraum aus Stickstoff (N₂) unter Anwesenheit von Sauerstoff entsteht. Konträr dazu ist das Verhalten im Mageren, bei etwa Lambda = 1,1. Dort erreicht das NO_x sein Maximum, da sowohl die notwendige, hohe Temperatur, als auch ausreichend Sauerstoff zur Entstehung von Stickoxiden vorhanden ist.

2.2.1 Kohlenwasserstoffe

Bei der Verbrennung von Kraftstoff nach Formel 2-3 werden die Kohlen- und Wasserstoffe nicht vollständig oder nur teilweise oxidiert und mit dem Abgas in die Umwelt emittiert [3], [5], [9], [30], [31], [32], [42]. Diese Art des Abgases nennt man Kohlenwasserstoffe, oder kurz HC-Emissionen. Ein großer Teil dieser Verbindungen haben umweltschädliche bzw. gesundheitsschädliche Auswirkungen [12], [15]. Diese reichen von leicht narkotischer Wirkweise bis krebserregend. Bei hoher Verkehrs- und Industriedichte führt die hohe Menge an HC-Emissionen in der Luft im Zusammenspiel mit Sonneneinstrahlung zu sogenanntem Smog⁴ [12].

Der Gesetzgeber in den USA und in Europa unterteilen die HC-Emissionen nochmals in Methan (CH_4) und in Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMHC) aufgrund der hohen negativen Klimawirksamkeit von Methan. Zusätzlich gibt es in den USA den Grenzwert für NMOG (Nicht-Methan-Organisches-Gas). Unter NMOG inkludiert man unter anderem Aldehyde und Alkohole zu den NMHC-Emissionen. Das spezifische Treibhauspotential gibt an wie klimawirksam ein Stoff im Verhältnis zu einem Molekül CO_2 ist. Dieser Faktor ist bei Methan 30. Das bedeutet, dass das Treibhauspotential von Methan 30-mal so hoch wie das von Kohlenstoffdioxid ist [13]. Der Anteil an der Erderwärmung durch Methan liegt bei 20 %, was eine hohe Notwendigkeit verdeutlicht, diese Emissionen minimal zu halten. Loch [3] nennt unter anderem folgende Gründe für die HC-Entstehung:

Wall quenching (Flamme erlischt an den Brennraumwänden)

Da hinter der Flammenfront unter optimalen Bedingungen keine messbaren HC-Emissionen mehr auftreten [13], können die Emissionen nur aus Zonen kommen die gar nicht oder nur zu einem gewissen Teil an der Verbrennung teilnehmen. Dies sind zumeist Wand nahe Schichten. Ein hoher Teil der HC Emissionen entsteht dort, weil hier die Brenngeschwindigkeit derart stark sinkt, dass die Flamme vor der Wand erlischt, da die kalte Zylinderwand als Wärmesenke der energiegeladenen, brennenden Reaktionszone Temperatur und damit Energie zum fortbestehen entzieht [31], [32]. Ein weitaus höherer Anteil an den gesamten HC-Emissionen entsteht durch das Hineindrücken des Abgases in verschiedene, konstruktiv-notwendige Brennraumspalten während der Kompression. Derartige Spalträume sind unter anderem Spalte in der Zylinderkopfdichtung, der Feuersteg und das Zündkerzengewinde aber auch Poren, die aufgrund von Ablagerungen

⁴ Wortschöpfung aus Smoke und Fog



entstehen, wie beispielsweise Verkokungen an den Injektoren [63], [64]. Abgeschirmt durch diese Hindernisse, kann die Flamme diesen Anteil des Verbrennungsgemischs nicht erreichen und somit nicht oxidieren. Während der Expansionsphase wird das Kraftstoff- respektive HC-Luftgemisch aus den Spalten und übrigen Kanten zurück in den Brennraum gesogen und nach dem Öffnen des Auslassventils in den Auslasskanal geschoben. Bei kaltem Katalysator gelangen die Roh-Emissionen ohne Katalyse in die Umwelt.

Bulk quenching (Flamme erlischt mitten im Brennraum)

Das Strömungsprofil der Flamme während der Verbrennung kann als turbulente Strömung beschrieben werden, dessen Geschwindigkeit (v_t) sich aus den Summanden einer laminaren Flammengeschwindigkeit (v_{fl}) und einer turbulenten Schwankungsgeschwindigkeit im unverbrannten Gas (v') beschrieben werden [11]:

$$v_t = v_{fl} + v'$$

Formel 2-4: Turbulente Strömung

Mit steigender Temperatur, also nach Zündung des Gemisches, steigt die laminare Flammengeschwindigkeit und somit nach Formel 2-4 auch v_t . Bei zu großer Turbulenzintensität aufgrund der erhöhten korrespondierenden Geschwindigkeit (ca. 40 cm/s) werden die Flammen gestreckt und erlöschen schließlich.

Ein weiterer Grund für das Erlöschen der Flamme sind Diffusionsprozesse, die im Brennraum während der Ausbreitung der Flamme auftreten. Antrieb der Diffusion ist der steile Konzentrationsgradient zwischen Flamme und übrigem Brennraum. Dabei diffundieren energiegeladene Radikale aus der Flammenzone heraus, ohne dass diese im gleichen Maße nachgeliefert werden. Dadurch fehlt Energie zum Fortbestand der Reaktion. Die Flamme erlischt. Hauptgrund für das bulk quenching ist eine schlechte Gemischaufbereitung wie sie im Kaltstart, Leerlauf und Katalysatorheizen auftreten kann [11]. Da HC-Moleküle ab einer Temperatur von etwa 800 K auch ohne Katalysator oxidieren, werden nicht alle im Brennraum entstehende Moleküle in die Umwelt ausgestoßen, sondern zuvor in Wasser und Kohlenstoffdioxid umgewandelt [13]. Daher findet man das Minimum der HC-Emissionen in Abbildung 3 bei leichtem Luftüberschuss. In diesem Punkt sind hohe Temperaturen und notwendige, noch nicht verbrauchte Sauerstoffatome vorhanden. Diese ermöglichen die Nach-Oxidation der Kohlenwasserstoffe [13], [15], [24].

Absorption und Desorption des Kraftstoffes im Ölfilm

Der technisch notwendige Ölfilm an der Brennraumwand nimmt vor allem während der Kompressionsphase Kraftstoff (-gas) auf (Absorption). Nach der Verbrennung werden Teile des Kraftstoffes desorbiert und können nachverbrennen [3].

Die 1995 eingeführte Technologie der direkt-einspritzenden Otto-Motoren stellt die Ingenieure vor zusätzliche Gemischbildungs-Probleme, auf die in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen wird:

- i. Unzureichende Gemischbildung, Kraftstofftröpfchen
- ii. Überstöchiometrische Gemisch und Gemischinhomogenitäten welche zu Luftmangel führen (vgl. Abbildung 3)
- iii. Brennraum-/Kolbenbenetzung

2.2.2 Stickoxide

In der Motorentechnik/Abgasgesetzgebung werden unter dem Oberbegriff der Stickstoffoxide (Stickoxide/ NO_x) die beiden auf Stickstoff basierenden Moleküle Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2) zusammengefasst. Es entstehen jedoch auch geringe Anteile an höheren Oxidationsstufen, wie beispielsweise Distickstoffmonoxid (N_2O) besser bekannt unter dem Trivialnamen⁵ „Lachgas“. Dieses trägt 300-mal stärker zum Treibhauseffekt bei als Kohlenstoffdioxid [12].

NO_x besteht bei der ottomotorischen Verbrennung zu etwa 1-10 % aus NO_2 , der übrige Anteil entfällt auf NO. Reaktionen mit Stickstoff während der Verbrennung benötigen eine sehr hohe Aktivierungsenergie. Das heißt, es sind hohe Temperaturen notwendig, um die Reaktion zu starten. Hierbei muss die sehr feste dreifach Bindung zwischen den beiden N-Atomen des Stickstoffes aufgebrochen werden. Die Toxizität der „Nitrose Gase“, wie man die Masse an Stickoxiden beliebiger Zusammensetzung auch nennt, besteht unter anderen aus Schleimhaut- oder Lungenreizungen und ist möglicherweise kanzerogen bzgl. der Lunge [17], [24], [40], [45], [47]. In der Umwelt führt die Reaktion von NO_2 zu HNO_3 ⁶ zu saurem Regen. Ebenso bauen Stickoxide Ozon (O_3) ab, indem es mit diesem eine Verbindung eingeht. Folgen von Mangel an Ozon in der Atmosphäre wurden ausreichend in Medien, Literatur und Wissenschaft diskutiert. Daher ist es notwendig, auch die Stickoxide auf ein Minimum zu beschränken. Obwohl die Stickoxide hohe

⁵ Chemische Stoffnamen ohne Bezug auf Elemente/Zusammensetzung oder Struktur: vgl. Wasser (H_2O)

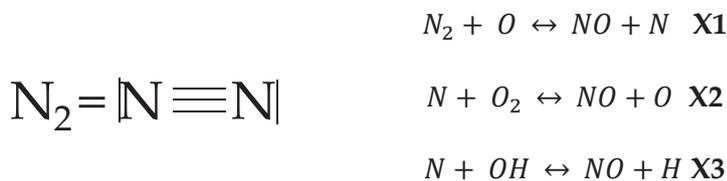
⁶ Trivialname: Salpetersäure



Verbrennungstemperaturen benötigen (aufgrund des endothermen Reaktionsmechanismus) liegt das Maximum der Stickoxide nicht bei $\lambda = 0,95$, dem Punkt der höchsten Temperatur, sondern im mageren Bereich bei einem Lambda von ca. 1,1 (siehe Abbildung 3, Seite 6). In diesem Betriebspunkt liegen sowohl noch hohe Temperaturen vor, wie auch eine genügende Menge an Sauerstoff, welcher zur Oxidation notwendig ist. Merker [15] teilt die unterschiedlichen Entstehungsmechanismen von Stickoxiden in fünf Punkte ein:

- i) Thermischer NO-Mechanismus
- ii) Prompt-NO-Mechanismus
- iii) Kraftstoff-NO-Mechanismus
- iv) Distickstoffoxid-Mechanismus
- v) Stickstoffdioxid-Mechanismus

Der **thermische NO-Mechanismus** trägt den Namen wegen seiner hohen Temperaturabhängigkeit und der damit verbundenen benötigten Aktivierungsenergie. Der hintergründige Reaktionsmechanismus wurde von Jakow Borissowitsch Seldowitsch erstmals 1946 erkannt und beschrieben. In der Literatur ist die Reaktion unter Zeldovich- oder richtiger Zel'dovich-Mechanismus bekannt. Die vorerst 2 Gleichungen wurden um eine weitere durch Lavoie erweitert, welche sich in der Gesamtheit so darstellen [1], [15]:



Formel 2-5: Thermischer NO-Mechanismus

In diesen Gleichungen ist X1 der zeitbestimmende Faktor, da zunächst die starke dreifach Bindung des Stickstoffs thermisch gebrochen werden muss, wozu hohe Temperaturen notwendig sind. Anschließend erfolgt eine Kettenreaktion (X2 und X3). Für den Start der Reaktion X1 ist atomarer Sauerstoff notwendig, welcher nach Formel 2-6 gebildet wird:



Formel 2-6: Bildung von atomarem Sauerstoff

Atomarer Sauerstoff wird nur unter extremen Temperaturen über 2000 K gebildet. Unter dieser Temperatur entsteht kein thermisches NO mehr und der Zel'dovich-Mechanismus kommt zum Erliegen.