



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Nachhaltige Emissionsminderungsmaßnahmen bei Verbrennungsmotoren

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerd Mauschitz

(E166 Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften,
Forschungsbereich: mechanische Verfahrenstechnik und Luftreinhaltetechnik)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Alexander Kageneck

00627929 (066482)

Stollbergstr. 11

80539 München, Deutschland

Wien, im November 2017

Alexander Kageneck



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im November 2017

Alexander Kageneck

Danksagung

Ganz besonderen Dank gilt Herrn Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerd Mauschitz für das Ermöglichen und Fördern dieser Diplomarbeit. Ohne die zahlreichen, konstruktiven Gespräche und Diskussionen, sowie die Unterstützung und Betreuung wäre es nie zum Abschluss dieser Arbeit gekommen.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Werner für die Übernahme des Zweitprüfers.

Besonderer Dank gilt auch meinen Studienkollegen, mit denen ich schöne gemeinsame Jahre an der TU-Wien verbringen durfte, in denen wir uns universitär wie auch außeruniversitär immer gegenseitig unterstützt haben.

Nicht zuletzt gilt mein allergrößter Dank meiner ganzen Familie und Verwandtschaft, besonders meinen Eltern Teresa und Karl-Erbo sowie meiner Geschwistern Helena, Clemens und Laura, für das Ermöglichen dieses Studiums, für die Unterstützung jeglicher Art, für den Glauben an mich und letztlich für all die Geduld in den letzten Jahren. Vielen Dank, ohne euch wäre das nicht möglich gewesen.

Kurzfassung

Die Fahrzeugindustrie steht vor einem großen Umbruch. Die Konzentration an/ Anteil von Kohlenstoffdioxid in der Luft steigt seit Jahren mit einer alarmierenden Rate und die Luftqualität in industrialisierten Ländern hat sich durch weitere Luftschadstoffe derart verschlechtert, dass die Gesetzgebung mit immer schärfer werdenden Regularien zur Tat schreitet. Einige Fahrzeughersteller haben zu illegalen Mitteln gegriffen, um die - vor allem in den USA - strengen Abgasvorschriften einzuhalten und gleichzeitig nicht an Motorleistung einbüßen zu müssen. Seit dem ‚Abgasskandal‘ ist der Verbrennungsmotor, vor allem der Dieselmotor, deutlich unter Beschuss geraten. Diese Arbeit soll einem ein detailliertes Bild von dem Verbrennungsmotor, den Schadstoffen die während des Verbrennungsprozesses entstehen sowie den letzten Stand der Technik bezüglich der Schadstoffreduzierung geben.

Am Anfang der Arbeit wird der Otto- und Dieselmotor mit ihren jeweiligen Kraftstoffen und Verbrennungsverfahren ausführlich beschrieben. Darauf folgend werden die wichtigsten konventionellen Luftschadstoffe (NO_x, CO, CH, SO₂, PM) und das Treibhausgas CO₂ sowie ihre Bildung durch die zwei konventionellen Verbrennungsmotoren (gründlich) dargelegt. Anschließend werden die Regularien (in Europa und den USA) zur Emissionsminderung sowie die relevantesten Vorschriften zur Abgasmessung für Verbrennungsmotoren genannt.

Der Fokus dieser Arbeit liegt jedoch darin, die Maßnahmen, die die Fahrzeugindustrie bis dato vorgestellt bzw. unternommen hat um den Schadstoffausstoß des Motorenabgases zu reduzieren, zu nennen. Dazu zählen neuere Motorenkonzepte, inner- und außermotorische Maßnahmen zur Schadstoffreduzierung (z. B. die sekundären Abgasnachbehandlungsmethoden), alternative Antriebsvarianten und alternative Kraftstoffe.

Die sekundären Abgasnachbehandlungsmethoden, die sich bis dato in Kraftfahrzeugen mit konventionellem Verbrennungsmotor durchgesetzt haben (z. B. NSC und NH₃-SCR), stoßen allmählich an ihre Grenzen. Die Gesetzgebung macht den Schritt zu alternativen Antrieben und Kraftstoffen durch immer wieder neu festgelegte und verschärfte Grenzwerte für den Schadstoffausstoß unumgänglich.

Abstract

The automotive industry is on the verge of a substantial change. The amount of carbon dioxide in the atmosphere has been increasing drastically over the last few years and the air quality in the industrialized world has reached alarming levels due to further air pollutants. Legislation is being passed on a yearly basis due to these disturbing prospects. Several automobile manufacturers have lately tried to illegally manipulate their emissions during exhaust-gas measurements to meet the criteria of the, especially in the USA, tough emission regulations while not losing the performance of their engine. The internal combustion engine, especially the diesel engine, has come under fire since the news about the 'emission scandal' broke loose. This thesis shall give a detailed overview of the internal combustion engine, the pollutants which arise due to the combustion process as well as the newest technology used to reduce the amount of pollutants created.

It starts off with an elaborate view of the petrol and diesel engine with its fuel and combustion processes respectively. Subsequently it will characterize the most important conventional air pollutants (NO_x , CO, CH, SO_2 , PM) and the greenhouse gas CO_2 as well as the formation of these pollutants by the two conventional internal combustion engines. Following this is a depiction of the regulations (in the USA and Europe) regarding emission reduction and of the most relevant regulations regarding emission measurement of internal combustion engines.

The focus of this thesis is however on the measures presented or taken by the automotive industry in tackling the duty of reducing the emission of pollutants caused by engines in these automobiles. New motor concepts have been introduced, inner and outer measures for pollutant reduction (e. g. secondary pollutant reduction) designed and installed as well as alternative engines and fuels presented.

Secondary pollutant reduction systems (e. g. NSC and NH_3 -SCR), which have been installed in most automobiles today, are slowly reaching their limit of success. Legislation has been toughening their limits on emissions, which will make a change to alternative engines and fuels inevitable.

Symbole und Abkürzungen

Symbole

λ	Lambda, Luftzahl
ΔT	Temperaturdifferenz
∞	unendlich

Einheiten

g	Gramm
h	Stunde
K	Kelvin
kg	Kilogramm = 10^3 g
km	Kilometer
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
lb	Pfund
m	Meter
min	Minute
min ⁻¹	Umdrehungen pro Minute (Drehzahl)
mm	Millimeter = 10^{-3} m
ms	Millisekunde
m.-%	Massenanteil
nm	Nanometer = 10^{-9} m
ppb	parts per billion, Teile einer Milliarde; 1 ppb = 10^{-9}
ppm	parts per million, Teile einer Million; 1 ppm = 10^{-6}
s	Sekunde
Vol.-%	Volumenprozent

μm	Mikrometer = 10^{-6} m
$^{\circ}\text{C}$	Grad Celsius

Chemische Abkürzungen

Al_2O_3	Aluminiumoxid
C	Kohlenstoff
CeO_2	Cer(IV)oxid
CH_4	Methan
$\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$	Harnstoff
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO_2	Kohlenstoffdioxid
FCKW	Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe
HC / CH	Kohlenwasserstoffe
H_2	Wasserstoff
HNO_3	Salpetersäure
H_2O	Wasser
NO	Stickstoffmonoxid
NO_2	Stickstoffdioxid
NO_x	Stickstoffoxide bzw. Stickoxide
N_2	Stickstoff
N_2O	Distickstoffmonoxid bzw. Lachgas
OH	Hydroxyl
O_2	Sauerstoff
O_3	Ozon
Pd	Palladium
Pt	Platin
Rh	Rhodium

SO ₂	Schwefeldioxid
THC	Total Hydrocarbons - gesamte Menge der Kohlenwasserstoffe
ZrO ₂	Zirkonium(IV)oxid

Abkürzungen

AGR	Abgasrückführung
AU	Abgasuntersuchung
ATL	Abgasturboaufladung
BEV	Battery Electric Vehicle - Elektroauto
BDE	Benzindirekteinspritzung
CARB	California Air Resources Board – Die zuständige Behörde für Luftreinhaltung in Kalifornien
COP	Conference of the Parties - Vertragsstaatenkonferenz
CZ	Cetanzahl
DIN	Deutsches Institut für Normung
DK	Dieselmotortreibstoff
DOC	Diesel Oxidation Catalyst – Dieseloxidationskatalysator
DPF	Diesel-Partikelfilter
ECE	United Nations Economic Commission for Europe - Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
EG	Europäische Gemeinschaft
EN	Europäische Norm
EPA	Environmental Protection Agency – Umweltschutzbehörde USA
FAME	Fatt Acid Methyl Ester – Biodiesel
FCHEV / FCEV	Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle - Brennstoffzellenfahrzeug
FTP	Federal Test Procedure – US-Testzyklus
HEV	Hybrid Electric Vehicle – Hybridelektrofahrzeug

Ifo	Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e. V.
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization – Internationale Organisation für Normung
Kat	Katalysator
Lkw	Lastkraftwagen
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
Nfz	Nutzfahrzeug
Nkw	Nutzkraftwagen
NSC	NO _x -Speicherkatalysator
OBD	On-Board-Diagnose
OK	Ottokraftstoff
OT	Oberer Totpunkt
OZ	Oktanzahl
ÖNORM	Austrian Standards Institute veröffentlichte nationale Norm
PEMS	Portable Emission Measurement System – mobiles Abgasmessgerät
Pkw	Personenkraftwagen
PM	Partikelmasse
PN	Partikelzahl
REX / REEV	Range Extender Electric Vehicle – Fahrzeug mit Reichweitenverlängerungssystem
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
SCR	Selective Catalytic Reduction – Selektive Katalytische Reduktion
St	Stöchiometrisch
THG	Treibhausgas

UT	Unterer Totpunkt
WLTP / WLTC	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure bzw. Cycle - weltweit einheitliches Testverfahren für leichtgewichtige Nutzfahrzeuge

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Luft und Atmosphäre.....	3
3	Der Verbrennungsmotor.....	8
3.1	Allgemeines	8
3.2	Kraftstoffe und Kraftstoffchemie	12
3.2.1	Diesel.....	15
3.2.2	Benzin (Ottokraftstoff).....	19
3.3	Die Takte eines Verbrennungsmotors	20
3.4	Verbrennungsverfahren.....	22
3.4.1	Dieselmotoren.....	26
3.4.2	Ottomotoren	28
3.5	Die Luftzahl λ	30
3.5.1	Luftzahl beim Dieselmotor	32
3.5.2	Luftzahl beim Ottomotor.....	33
3.6	Einspritzzeitpunkt und Brennverlauf	34
4	Luftschadstoffe.....	37
4.1	Stickstoffoxide (NO _x).....	42
4.1.1	Stickstoffmonoxid (NO)	44
4.1.2	Stickstoffdioxid (NO ₂).....	44
4.2	Partikeln (PM).....	46
4.3	Kohlenstoffmonoxid (CO)	50
4.4	Kohlenstoffdioxid (CO ₂).....	51
4.5	Kohlenwasserstoffe (HC).....	53
4.6	Schwefeldioxid (SO ₂).....	55
5	Gesetzgebung und Prüfverfahren	57
5.1	Prüfverfahren.....	58
5.1.1	Typprüfung - Testzyklen	59
5.1.2	Serienprüfung	60
5.1.3	Feldüberwachung	60

5.2	Gesetzgebung – Europa.....	61
5.2.1	CO ₂ -Emission	63
5.2.2	Periodische Abgasuntersuchung (AU)	64
5.3	Gesetzgebung – USA.....	64
5.3.1	CARB.....	65
5.3.2	EPA.....	66
5.3.3	FTP-75 Testzyklus	67
5.4	Abgasmesstechnik	68
5.4.1	Rollenprüfstand.....	68
5.4.2	PEMS.....	70
6	Schadstoffreduzierende Maßnahmen	71
6.1	Innermotorische Maßnahmen.....	72
6.1.1	Downsizing mit Aufladung.....	72
6.1.2	Abgasrückführung (AGR).....	77
6.1.3	Einspritzung	77
6.2	Außermotorische Maßnahmen (Abgasnachbehandlung)	78
6.2.1	Dieseloxidationskatalysator (DOC)	79
6.2.2	Katalysatoren zur NO _x -Minderung (Sekundärmaßnahmen)	81
6.2.3	Diesel-Partikelfilter (DPF)	86
6.2.4	Geregelter Drei-Wege-Katalysator (Ottomotor).....	88
7	Zukünftige Alternativen	92
7.1	Alternative Brennverfahren.....	92
7.2	Alternative Antriebe	94
7.2.1	Hybridelektrofahrzeuge (HEV)	94
7.2.2	Elektrische Antriebe (BEV, REX, PHEV, FCEV).....	97
7.3	Alternative Kraftstoffe	98
8	Zusammenfassung und Ausblick	100
9	Literatur- und Quellenverzeichnis	102
10	Abbildungsverzeichnis	106
11	Gleichungsverzeichnis	108
12	Tabellenverzeichnis	109

1 Einleitung

Die Fahrzeugindustrie steht vor einem großen Umbruch. Durch den im September 2015 von Volkswagen ausgelösten ‚Diesel- bzw. Abgasskandal‘ ist das Image des Verbrennungsmotors deutlich unter Beschuss geraten. Volkswagen und einige Tochterunternehmen der Volkswagen AG installierten in zwei Diesel-Motorenreihen (EA189 und EA288) eine Software, die die Motorsteuerung während einer Abgasmessung illegal beeinflusste, um einen geringeren Schadstoffausstoß vorzutäuschen. Mithilfe dieser Manipulation wurde der Versuch unternommen, die strengen in den USA herrschenden Abgasvorschriften der CARB und EPA (siehe Kapitel 5.3) zu umgehen.¹

Immer mehr Länder leiten drastische Schritte für das schnellstmögliche Verbot des Verbrennungsmotors ein. Großbritannien und Frankreich setzten sich zum Ziel, ab dem Jahr 2040 den Verkauf von Neufahrzeugen mit Diesel- oder Benzinmotor zu verbieten. Norwegen will bereits ab 2025 nur noch lokal emissionsfreie Fahrzeuge zulassen. Vereinzelte Fahrzeughersteller stellen sich schon langsam komplett auf alternative Antriebe um. Volvo will ab 2019 nur noch Fahrzeuge mit Hybrid- oder reinem Elektromotor herstellen.² In Deutschland werden 600.000 Arbeitsplätze durch den Bau des Verbrennungsmotors direkt oder indirekt ausgemacht. Das sind laut Ifo 7,5 % der deutschen Industrie-Beschäftigung.³

Eine nachhaltige Verbesserung der Luftqualität in industrialisierten Ländern wird nur dann erreicht werden können, wenn die Schadstofffreisetzungen des Automobilsektors zukünftig drastisch verringert werden.

Die Diplomarbeit soll zunächst die Bildung der wichtigsten konventionellen Luftschadstoffe (NO_x, CO, CH, SO₂, PM) und des Treibhausgases CO₂ durch die gebräuchlichsten Verbrennungsmotoren (Ottomotor und Dieselmotor) beschreiben. Es sollen in Folge wichtige Beispiele für gesetzliche Regularien zur Emissionsminderung genannt und Vorschriften zur Abgasmessung für Verbrennungsmotoren beschrieben werden.

Besonderes Augenmerk soll im Rahmen dieser Diplomarbeit jenen inner- und außermotorischen Maßnahmen gewidmet werden, welche einer nachhaltigen Absenkung der Luftschadstoffemissionen dienen sollen. Hierbei sollen vor allem neuere Motorenkonzepte, sekundäre Abgasnachbehandlungsmethoden, alternative

¹ vgl. <http://www.zeit.de/wirtschaft/diesel-skandal-volkswagen-abgase> (Gelesen am: 14.08.2017)

² vgl. <https://www.welt.de/wirtschaft/article167086871/Europas-Abkehr-vom-Verbrennungsmotor.html> (Gelesen am: 17.08.2017)

³ vgl. <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/diesel-und-benziner-warum-ein-motorenverbot-moeglich-scheint-a-1158531-3.html> (Gelesen am: 18.08.2017)

Antriebsvarianten und alternative Kraftstoffe beschrieben und einen Vergleich unterzogen werden.

2 Luft und Atmosphäre

Sauerstoff ist – neben den Kohlenwasserstoffen der Kraftstoffe – der wichtigste Bestandteil im Verbrennungsprozess des Motors. Ohne ihn könnte es zu keiner Oxidation des Kraftstoffes kommen. Die Oxidation ist zuständig für den ausschlaggebenden Wandel von chemischer Energie in Wärme.⁴ Sauerstoff wird in Form von Luft (circa 23 % Sauerstoff) dem Brennraum zugeführt. Die Eigenschaften von Luft listet Tabelle 1 auf:

Luft	Wert	Bemerkung
Dichte	1,293 kg/m ³	unter Normbedingungen
Schallgeschwindigkeit	331,5 m/s	unter Normbedingungen
c _p	1,005 kJ/(kg K)	Spez. Wärmekapazität isobar
c _v	0,718 kJ/(kg K)	Spez. Wärmekapazität isochor
Molmasse	29 g/mol	
Hauptbestandteile (ungefährer Massenanteil)		
Anteil (Masse) Stickstoff N ₂	75,5%	28 g/mol
Anteil (Masse) Sauerstoff O ₂	23,1%	32 g/mol
Anteil (Masse) Argon Ar	1,3%	40 g/mol

Tabelle 1: Ausgewählte Kennzahlen trockener Luft (Meereshöhe)⁵

„Unsere Erde ist in drei Bereiche unterteilt, die untereinander in enger Wechselbeziehung stehen und in denen sich das menschliche Leben abspielt: die Atmosphäre (Lufthülle), die Hydrosphäre (Wasserhülle) und die Lithosphäre (Gesteinsmantel).“⁶

Die Atmosphäre hat in dieser Aufzählung nicht nur die kleinste Masse, sondern ist in Bezug auf die Chemie am einfachsten aufgebaut. Sie absorbiert einen Großteil der UV-Strahlung aus dem Weltall, lässt lebensnotwendiges Sonnenlicht durch und stellt mit ihren Spurengasen ein Strahlungsgleichgewicht her. Nur mit ihr ist überhaupt ein Leben auf der Erde möglich. Zudem ist sie neben der Hydrosphäre das Transportmittel für natürliche und anthropogene (vom Menschen erzeugte) Emissionen. Die Atmosphäre ist in verschiedenen Schichten aufgebaut, die nach der Temperatur unterteilt sind. Die unterste Schicht ist die Troposphäre, die etwa 80 % der gesamten Luft enthält. Danach kommen die Stratosphäre, die Mesosphäre und schließlich die Thermosphäre.⁷

Trockene Luft besteht zu 99,03 Vol.-% aus Stickstoff und Sauerstoff. Argon hat einen Volumenanteil von etwa 0,93 Vol.-% – alle restlichen Bestandteile liegen jeweils unter 0,1 Vol.-% und werden Spurengase genannt. Die Konzentration der Spurengase wird

⁴ vgl. Mollenhauer/Tschöke, 2007, S.68

⁵ vgl. Hilgers, 2016, S.7

⁶ Benedix, 2015, S.103

⁷ vgl. Förtsch/Meinholz, 2013, S.1

nicht in Prozent, sondern in ppm (parts per million, Teile einer Million; $1 \text{ ppm} = 10^{-6}$ -> $1 \text{ mg pro kg bzw. } 1 \text{ ml pro m}^3$) oder in ppb (parts per billion, Teile einer Milliarde; $1 \text{ ppb} = 10^{-9}$ -> $1 \text{ } \mu\text{g pro kg bzw. } 1 \text{ } \mu\text{l pro m}^3$) angezeigt.⁸

Bestandteil	Formel	Volumenanteil	
		Trockene Luft	Normale Luft
Stickstoff	N ₂	78,084 Vol.-%	76,6 Vol.-%
Sauerstoff	O ₂	20,946 Vol.-%	20,5 Vol.-%
Wasserdampf	H ₂ O	0	2 Vol.-% ⁵⁾
Argon	Ar	0,934 Vol.-%	0,9 Vol.-%
Kohlenstoffdioxid	CO ₂	0,0354 Vol.-% (354 ppm) ¹⁾	0,034 Vol.-%
Neon	Ne	18,18 ppm	17 ppm
Helium	He	5,24 ppm	5 ppm
Methan	CH ₄	1,7 ... 1,8 ppm ²⁾	1,5 ppm
Krypton	Kr	1,14 ppm	1,0 ppm
Wasserstoff	H ₂	0,56 ppm	0,5 ppm
Distickstoffmonoxid	N ₂ O	310 ppb ³⁾	300 ppb
Xenon	Xe	87 ppb	87 ppb
Kohlenstoffmonoxid ⁴⁾	CO	30 - 250 ppb	30 - 250 ppb
Ozon ⁴⁾	O ₃	10 - 100 ppb	10 - 100 ppb
Stickstoffdioxid	NO ₂	10 - 100 ppb	10 - 100 ppb
Schwefeldioxid	SO ₂	< 1 - 50 ppb	< 1 - 50 ppb

Tabelle 2: Zusammensetzung von trockener und „normaler“ Luft (Bezugsjahr 1992)⁹

1) Gehalt im Jahr 2014: >400 ppm²⁾ >1,8 ppm³⁾ 325 ppb⁴⁾ Starke zeitliche Fluktuationen⁵⁾ Annahme eines mittleren Wertes von 2 Vol.-% Wasserdampf in der Atmosphäre

Wasserdampf (H₂O-Dampf) ist nach Stickstoff und Sauerstoff das dritthäufigste Gas in der Atmosphäre, wird bei der Diskussion der Luftzusammensetzung aber häufig außer Acht gelassen, da sein Volumenanteil starken Schwankungen ausgesetzt ist. An kalten und wolkenfreien Tagen kann der Wert deutlich unter 1 Vol.-% liegen, während dieser an heißen und schwülen Tagen bis auf 4 Vol.-% klettern kann. H₂O-Dampf zählt mit Kohlenstoffdioxid (CO₂) zu den folgenschwersten Treibhausgasen.¹⁰ In Abb. 2 ist die Verteilung des Wasserdampfgehaltes in der Atmosphäre zu sehen.

⁸ vgl. Förtsch/Meinholz, 2013, S.2

⁹ vgl. Benedix, 2015, S.104

¹⁰ vgl. Ebenda, S.104f

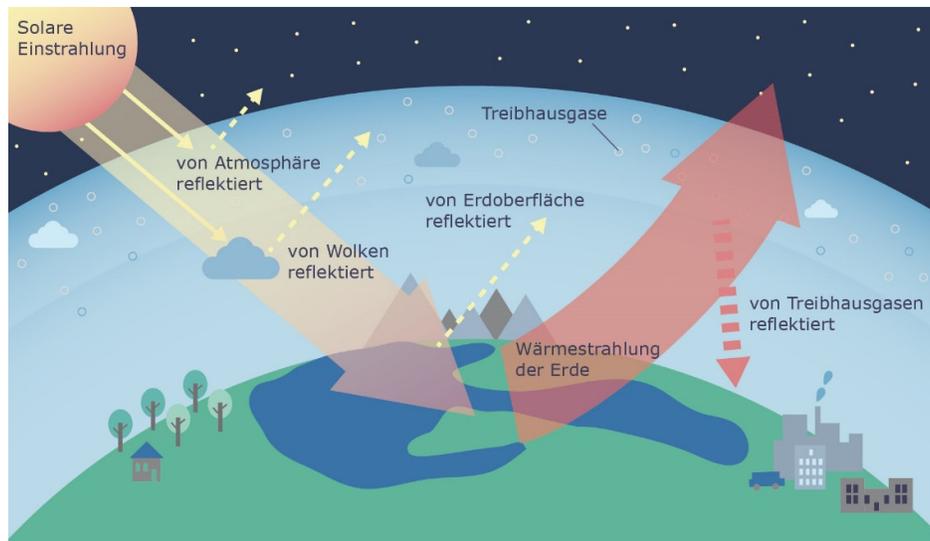


Abbildung 1: Treibhauseffekt¹¹

Der natürliche Treibhauseffekt mit seinen wichtigsten Treibhausgasen – Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Wasserdampf (H₂O-Dampf) – ist der Hauptgrund, warum die Erde bewohnbar ist und nicht auskühlt. Die solare Einstrahlung mit ihrem infraroten Licht (kurzwellige elektromagnetische Einstrahlung) würde bei einer klaren Atmosphäre – ohne Treibhausgase – wieder in den Weltraum zurückreflektiert werden.¹² CO₂, CH₄, Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW), Ozon (O₃), Lachgas (N₂O) und weitere Treibhausgase (zumeist Spurengase) absorbieren die Wärmestrahlung der Erde (langwellige Rückstrahlung), speichern sie in Form von Molekülschwingungen und strahlen sie daraufhin wieder zur Erde zurück. Die Treibhausgase reflektieren zudem die von der Erdoberfläche oder von Wolken reflektierten infraroten Strahlen der Sonne zurück zur Erde. Durch diese Prozesse erwärmt sich die Atmosphäre.¹³ Dieser natürliche Treibhauseffekt ermöglicht eine mittlere Ozean- und Landoberflächentemperatur von $\Delta T_N \approx 14 \text{ }^\circ\text{C}$.¹⁴

Seit Millionen von Jahren ist die Zusammensetzung von Luft relativ gleich geblieben. Die industrielle Revolution, die vor etwa 150 Jahren einsetzte, war der Startschuss für eine alarmierende Entwicklung. Die Konzentration einiger Spurengase – wie z. B. Kohlenstoffdioxid (CO₂), Ozon (O₃), Methan (CH₄) und Distickstoffmonoxid (N₂O) – steigt seitdem mit einer alarmierenden Rate an und hat großen Einfluss auf das Weltklima.¹⁵ Durch den anthropogenen Beitrag zum Treibhauseffekt ist 2013 von der IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) messtechnisch eine

¹¹ <http://www.adenauercampus.de/lernmodul-energetraeger-2>

¹² vgl. Wiegler, 2016, S.1135

¹³ vgl. Kurzweil, 2015, S.153

¹⁴ vgl. Wiegler, 2016, S.1135

¹⁵ vgl. Benedix, 2015, S.104f

Temperaturerhöhung in den letzten 100 Jahren linear approximiert um $\Delta T \approx 0,9 \text{ }^\circ\text{C}$ (im globalen Mittel) nachgewiesen worden.¹⁶

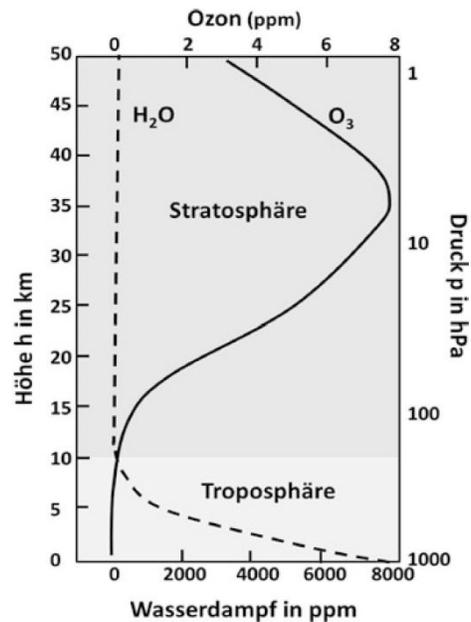


Abbildung 2: Verteilung von O_3 und H_2O -Dampf in der Atmosphäre¹⁷

Der Kraftfahrzeugverkehr hat maßgebenden Anteil an der Verschlechterung der Luftqualität in industrialisierten Ländern. Beispielgebend dafür ist der z. B. der Anteil des Verkehrs an den gesamten Stickstoffoxidemissionen in Deutschland (siehe Abb. 3). Trotz einer deutlich zu sehenden Minderung liegt der Verkehrsbereich bei einem Emissionsanteil von ca. 38 % und ist damit weiterhin mit Abstand der größte Verursacher von NO_x -Emissionen.¹⁸ Ein weiteres Beispiel ist der Anteil des Verkehrs an den gesamten Feinstaub (PM_{10})-Emissionen in Österreich (siehe Abb. 4). Trotz des in den letzten 5 Jahren sichtbaren Rückgangs von zweiter an vierter Stelle, ist die Menge an PM_{10} -Emissionen, die durch den Verkehr verursacht wird, weiterhin erschreckend hoch.¹⁹

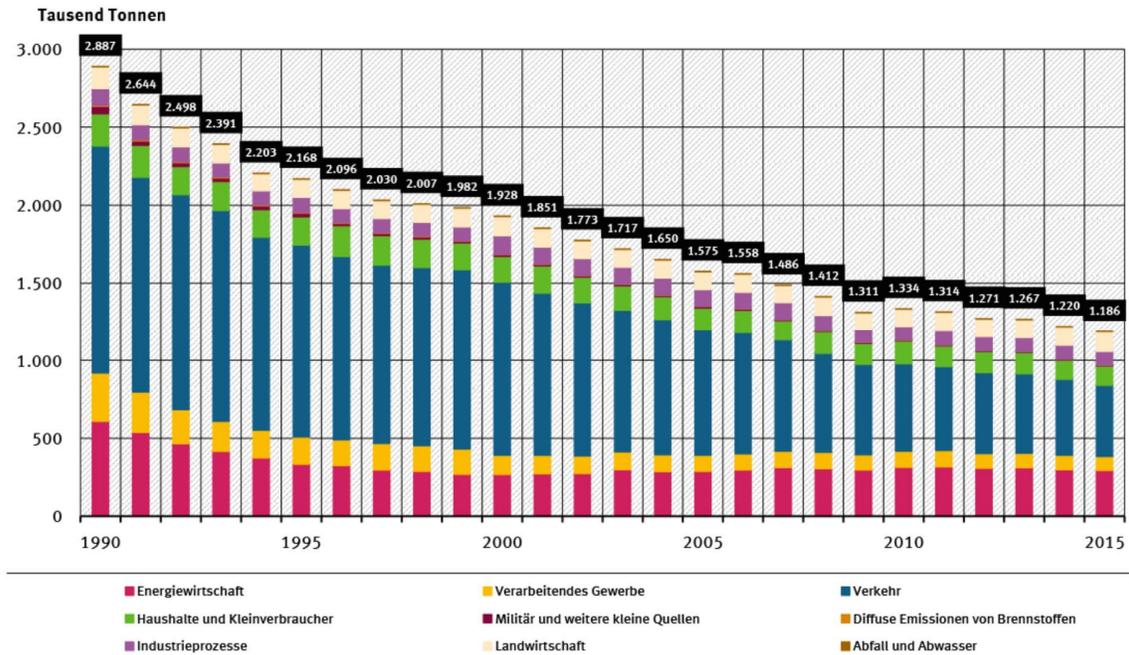
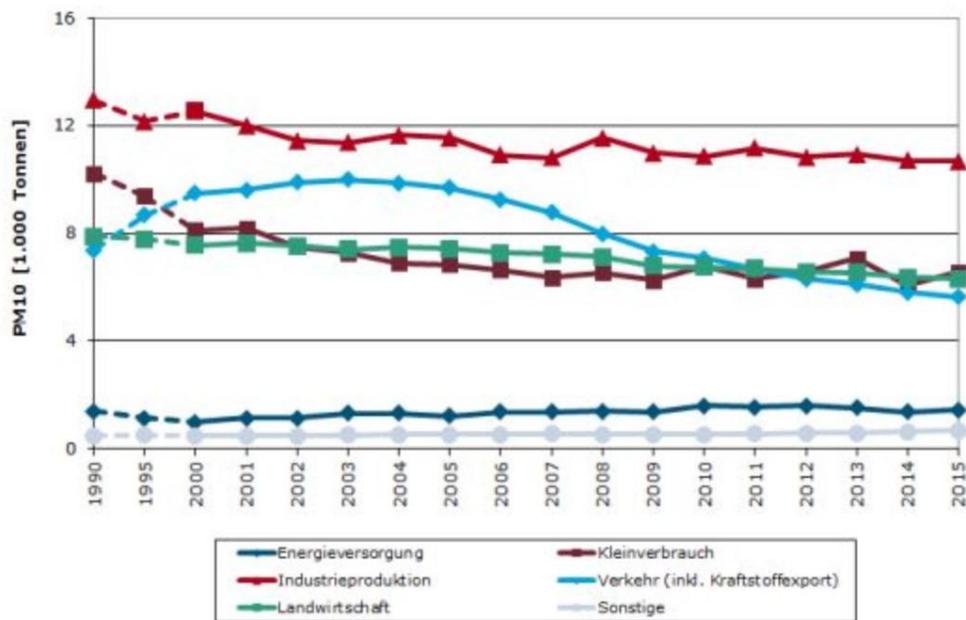
Um zu verstehen wie es zu diesen Schadstoffemissionen in Kraftfahrzeugen kommt, werden anschließend die Grundlagen des Verbrennungsmotors ausführlich erläutert.

¹⁶ vgl. Wiegleb, 2016, S.1135

¹⁷ Ebenda, S.16

¹⁸ vgl. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/stickstoffoxid-emissionen#textpart-1> (Gelesen am: 11.06.2017)

¹⁹ vgl. <http://www.umweltbundesamt.at/pm10/> (Gelesen am: 11.06.2017)

Abbildung 3: Stickstoffoxid (gerechnet als NO₂)-Emissionen nach Sektoren (DE)²⁰Abbildung 4: PM₁₀-Emissionen nach Sektoren (AT)²¹

²⁰ <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/stickstoffoxid-emissionen#textpart-1> (Gelesen am: 11.06.2017)

²¹ <http://www.umweltbundesamt.at/pm10/> (Gelesen am: 11.06.2017)

3 Der Verbrennungsmotor

3.1 Allgemeines

Die in Kraftfahrzeugen eingesetzten Antriebsmaschinen sind bis dato beinahe ausschließlich Verbrennungskraftmaschinen. Erst seit wenigen Jahren und vor allem seit dem ‚Diesel- bzw. Abgasskandal‘ im September 2015 kommen alternative Antriebe wie z. B. der Elektro- und Hybridmotor in Kraftfahrzeugen vermehrt zum Vorschein. In Deutschland erfolgten im Jahr 2016 52,1 % (+ 3,6 % im Vergleich zum Vorjahr) der Pkw-Neuzulassungen mit Benzinmotoren, 45,9 % (- 4,4 %) mit Dieselmotoren und 2,0 % (+ 17,6 %) mit alternativem Antrieb.²² Im ersten Halbjahr 2017 ist dieser Anteil auf 3,0 % der Pkw-Neuzulassungen gestiegen.²³

In Österreich lag im gleichen Jahr der Benzinmotorenanteil bei 40,0 % (+ 0,5 %), der Dieselmotorenanteil bei 57,3 % (- 1,7 %) und der Anteil an alternativen Antrieben bei 2,7 % (+ 42 %). Von diesen 2,7 % sind etwa 42,4 % reine Elektroautos und 48,6 % Benzin/Elektro-Hybridfahrzeuge - der Rest besteht aus Diesel/Elektro-Hybridfahrzeugen, Erdgasfahrzeugen und Erdgasfahrzeugen mit einem Benzinreservetank.²⁴

Der Kraftstoff, der für Verbrennungskraftmaschinen eingesetzt wird (hauptsächlich Benzin und Diesel), besteht zum Großteil aus Kohlenwasserstoffen. Diese Kohlenwasserstoffe oxidieren mit dem Sauerstoff der Verbrennungsluft und wandeln die in ihnen gespeicherte chemische Energie in Wärme um. Die Wärme wird dann direkt an das Arbeitsmedium der Maschine weitergegeben. Durch den Anstieg des Drucks (Expansion) im Arbeitsmedium wird eine Kolbenbewegung (mechanische Arbeit) aktiviert.²⁵

Bei der Energiewandlung differenziert man zwischen motorischer, thermischer und allgemeiner Energiewandlung. Die allgemeine Energiewandlung wird definiert als technischer Prozess in einer Energiewandlungsanlage, die Primär- in Sekundärenergie konvertiert (siehe Abb. 5).²⁶

²² vgl. http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/neuzulassungen_node.html (Gelesen am: 12.02.2017)

²³ vgl. <http://www.handelsblatt.com/auto/nachrichten/neuzulassungen-im-ersten-halbjahr-2017-alternative-antriebe-im-aufwind/20017096.html> (Gelesen am: 14.07.2017)

²⁴ vgl.

http://www.fahrzeugindustrie.at/fileadmin/content/Zahlen_Fakten/Statistikjahrbuch/Seite6.6_2016.pdf (Gelesen am: 13.02.2017)

²⁵ vgl. Mollenhauer/Tschöke, 2007, S.68

²⁶ vgl. Merker/Schwarz, 2009, S.9

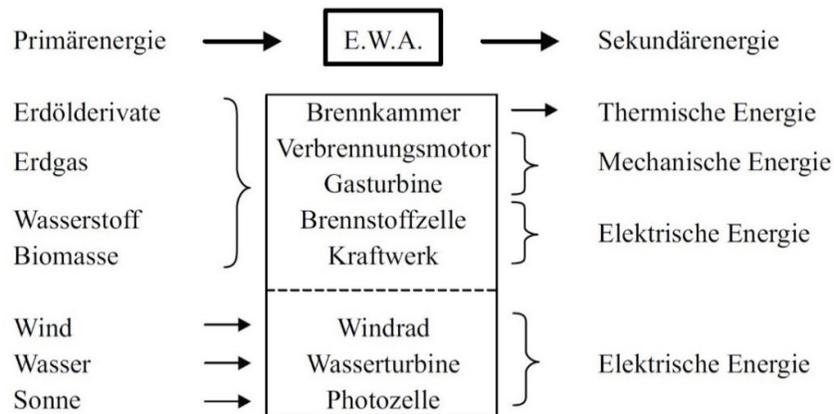


Abbildung 5: Schema der allgemeinen Energiewandlung²⁷

Das Motorkonzept stellt sich aus mehreren Faktoren zusammen. So ist z. B.

- das Arbeitsverfahren in Zweitakt oder Viertakt,
- der Arbeitsprozess in Diesel oder Otto,
- die Kühlungsart in Wasser oder Luft unterteilt.

Weitere Faktoren sind die Leistungsabstufung, die Anordnung und Zahl der Zylinder, die Triebwerkskonfiguration, die Aufladung, die Steuerungsart, die Kurbelgehäusebauart etc.²⁸

Man spricht sowohl bei einem Ottomotor (Benzinmotor) als auch bei einem Dieselmotor von einer ‚offenen Prozessführung mit innerer Verbrennung‘, da das Arbeitsmedium (auch Arbeitsgas genannt) nach jeder Expansion einen Austausch vornimmt und da die Verbrennung lediglich im Bereich des Arbeitsraumes der Verbrennungskraftmaschine erfolgt.²⁹

Beim klassischen Ottomotor wird das Luft-Kraftstoff-Gemisch, welches vorher verdichtet wurde, durch eine zeitlich gesteuerte Fremdzündung zum Brennen gebracht. Im Gegensatz dazu wird beim Dieselmotor der Kraftstoff direkt in den Brennraum gespritzt, wo er sich an der Luftladung entzündet, die im Voraus auf eine ausreichend hohe Temperatur verdichtet wurde.³⁰

Der Dieselmotor ist somit ein Selbstzündungsmotor mit innerer Gemischbildung. Sein Wirkungsgrad ist im Vergleich zum Ottomotor durch die höhere Verdichtung bemerkbar besser und kann mehr als 50 % bei großen, langsam laufenden Motoren betragen. Unter den bisherigen Verbrennungskraftmaschinen ist dieser Wert nicht zu überbieten. Durch diesen beachtlichen Wirkungsgrad ist der damit verbundene

²⁷ Merker/Schwarz, 2009, S.9

²⁸ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.355

²⁹ vgl. Mollenhauer/Tschöke, 2007, S.68

³⁰ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.9

Kraftstoffverbrauch verhältnismäßig gering. Diese vorteilhaften Voraussetzungen sowie steuerlich begünstigte Treibstoffpreise haben dem Dieselmotor zu großer Verbreitung verholfen. Dieselmotoren finden hauptsächlich ihren Einsatz in Pkw, leichten und schweren Nkw, Stationärmotoren, Land- und Baumaschinen, Lokomotiven und Schiffen.³¹

Verbrennungsmotoren können in Bezug auf die Gemischbildung auf folgende Weise unterschieden werden:

- die äußere Gemischbildung bildet das Luft-Kraftstoff-Gemisch im Einlasssystem durch Einspritzung oder durch einen Vergaser (veraltet),
- die innere Gemischbildung bildet das Luft-Kraftstoff-Gemisch im Arbeitsraum (Brennraum) durch Einspritzung.³²

Die Qualität des Gemischs kann folgendermaßen unterschieden werden:

- ein homogenes Gemisch entsteht in einem Vergaser, bei der Saugrohreinspritzung des Ottomotors oder bei der ottomotorischen Benzindirekteinspritzung (BDE) während des Ansaugtakts (siehe Kapitel 3.3),
- ein inhomogenes bzw. heterogenes Gemisch ergibt sich bei der BDE und beim Dieselmotor durch die späte und kurze Einspritzung gegen Ende des Verdichtungstaktes (siehe Kapitel 3.3).

Der Ort der Gemischbildung wird wie folgt unterteilt:

- die direkte Einspritzung in den Arbeitsraum – z. B. beim DI-Dieselmotor (Direct Injection) und bei BDE-Motoren,
- die indirekte Einspritzung in einen Nebenbrennraum – z. B. bei Luftspeicher-, Vorkammer- oder Wirbelkammer-Dieselmotoren (IDI, Indirect Injection),
- die Saugrohreinspritzung bei Ottomotoren, die zentral oder zylinderindividuell stattfindet.³³

Verbrennungsmotoren sind häufig mit einem Lader (siehe Kapitel 6.1.1) ausgerüstet. Zu den häufigsten Ladearten zählen der Abgasturbolader und der Kompressor, wobei der Kompressor zunehmend seltener aufzufinden ist. Lader erhöhen nicht nur die Leistung und das Drehmoment eines Motors, sondern verbessern außerdem den Wirkungsgrad, reduzieren die Schadstoffe im Abgas und vermindern das Verbrennungsgeräusch.³⁴ Durch Aufladung wird Luft vorverdichtet, wodurch eine größere Ladungsmenge in den Zylinder gelangt. Der Verdichter befördert die Frischladung Luft direkt in den Zylinder. Beim reinen Saugmotor muss die

³¹ vgl. Reif, 2012a, S.24ff

³² vgl. Wallentowitz/Reif, 2006, S.8

³³ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.10

³⁴ vgl. Reif, 2012a, S.28

Frischladung (Gemisch bzw. Luft) vom Arbeitskolben in den Zylinder angesaugt werden (Selbstansaugen).³⁵

Der Aufbau eines Vierzylinder-Dieselmotors ist in Abb. 6 vereinfacht dargestellt. Durch die Auf- und Abwärtsbewegung der Kolben wird die Pleuelstange (11) angetrieben – mithilfe der Pleuelstange (11) in eine Rotationsbewegung. Es kommt stets zu leichten Ungleichheiten in der Verbrennung der einzelnen Zylinder, die zu einer Unförmigkeit in der Rotationsbewegung der Pleuelstange führen. Um diese Unförmigkeit zu mindern, wird eine Schwungmasse (15) am Ende der Pleuelstange angebracht.³⁶

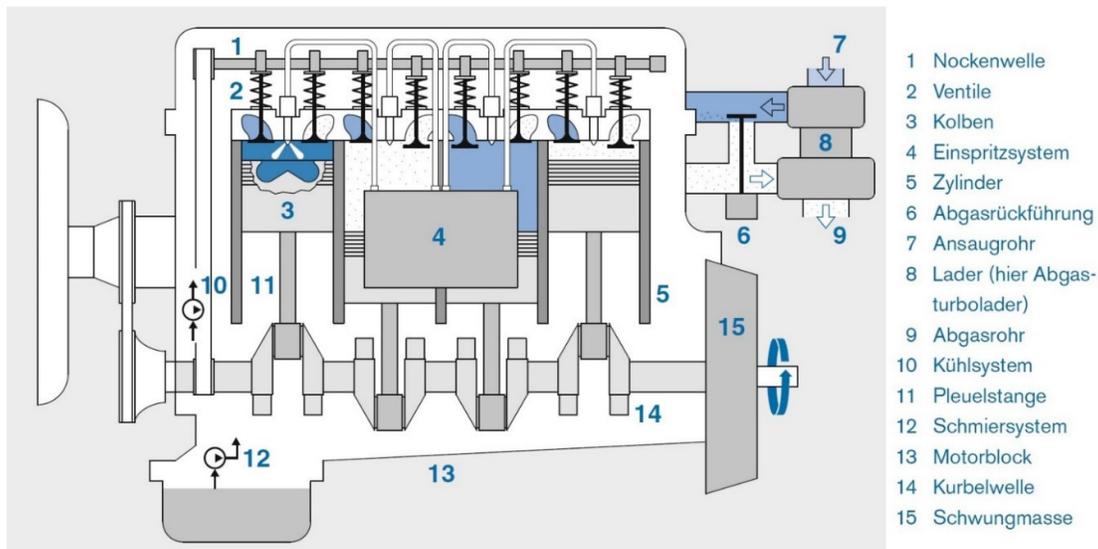


Abbildung 6: Vierzylinder-Dieselmotor ohne Hilfsaggregate (Schema)³⁷

Die seit Jahrzehnten zunehmend strenger werdenden Regulierungen bezüglich Abgasemissionen zwingen die Fahrzeugindustrie, effizientere Kraftfahrzeuge zu konstruieren, die nicht nur Kraftstoff sparen, sondern die für die Umwelt gefährlichen Emissionen reduzieren.³⁸ Beim Dieselmotor hat sich beispielsweise die Abgasrückführung als eine bewährte Methode erwiesen, um die Stickstoffoxid-Emission zu mindern. Hierbei wird ein Teil des Abgases zurück in den Ansaugtrakt des Motors gelenkt, was durch zusätzliches Kühlen des Abgases zu noch besseren Ergebnissen führen kann. Weitere Maßnahmen zur Schadstoffreduktion werden in Kapitel 6 behandelt.³⁹

³⁵ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.10

³⁶ vgl. Reif, 2012a, S.28

³⁷ Ebenda, S.28

³⁸ vgl. Hering/Martin/Stohrer, 2009, S.332

³⁹ vgl. Reif, 2012a, S.28

3.2 Kraftstoffe und Kraftstoffchemie

Die Kraftstoffe (Mineralöle), die für Otto- und Dieselmotoren zum Einsatz kommen, werden überwiegend durch Destillation von Erdöl gewonnen und stellen Gemische aus Hunderten von verschiedenen Kohlenwasserstoffen unterschiedlicher Gruppen ($C_xH_y[O_z]$) dar.⁴⁰ Diese Zusammensetzungen bestimmen die chemischen und physikalischen und somit letztlich die motorischen Eigenschaften.⁴¹ Einige der motorischen Eigenschaften sind beispielsweise die Klopfestigkeit, die Zündwilligkeit, der Dampfdruck, die Viskosität und die Kälteeigenschaften. Mineralöl enthält zudem Stickstoff-, Schwefel- und Sauerstoffverbindungen.⁴² Damit eine gleichbleibende Qualität und Zusammensetzung gewährleistet ist, werden die Grenzwerte der wichtigsten Elemente von motorischen Kraftstoffen (Diesel, Benzin etc.) in Normen definiert. Diese Grenzwerte (z. B. in Deutschland, siehe Tabelle 3) gewähren einen sicheren Motorbetrieb.⁴³

	Diesekraftstoff (DIN) EN590	Ottokraftstoff (DIN) EN228	Biodiesel (FAME) (DIN) EN 14214
Dichte in kg/m ³ bei 15 °C (min./max.)	820 / 845	720 / 775	860 / 900
Viskosität in mm ² /s bei 40 °C (min./max.)	2,0 / 4,5	nicht definiert	3,5 / 5,0
Oktanzahl/Cetanzahl (min.)	51	ROZ95 / MOZ85	51
Schwefelgehalt in mg/kg (max.)	10 (seit 1.1.2009)	10 (seit 1.1.2009)	10
Anteil von alt. Kraftstoffen (max.)	7 % FAME (Fettsäuremethylester)	5 % Ethanol	-

Tabelle 3: Eigenschaften motorischer Brennstoffe in den (DIN) EN-Normen⁴⁴

FAME steht für Fatty Acid Methyl Ester bzw. Fettsäuremethylester. Obwohl der Diesel- und Ottokraftstoff (DK und OK) aus dem gleichen Erdöl hergestellt wird, unterscheiden sich ihre Zusammensetzungen von Kohlenwasserstoffen deutlich.⁴⁵ Abb. 7 verdeutlicht die auffallenden Unterschiede zwischen dem OK und dem DK – z. B. die hohen Anteile an Zykloalkanen beim Diesel und die hohen Anteile an Aromaten beim Benzin.⁴⁶

⁴⁰ vgl. Merker/Schwarz, 2009, S.115

⁴¹ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.638

⁴² vgl. Van Basshuysen, 2017, S.387f

⁴³ vgl. Merker/Schwarz, 2009, S.115

⁴⁴ vgl. Ebenda, S.115

⁴⁵ vgl. Lunanova, 2009, S.33

⁴⁶ vgl. Merker/Schwarz, 2009, S.119

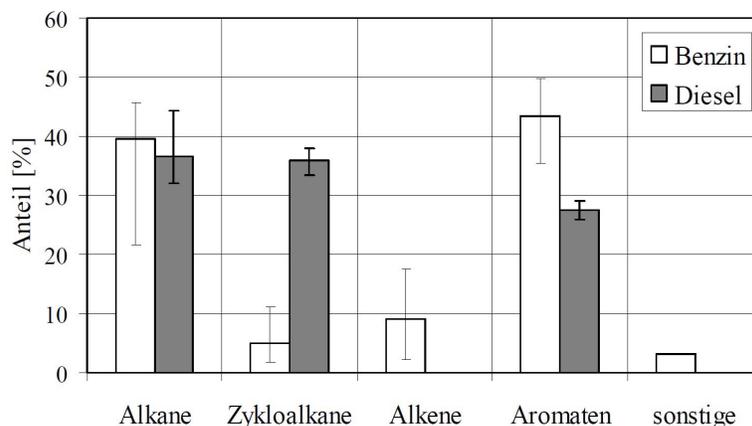


Abbildung 7: Zusammensetzung von Benzin und Diesel⁴⁷

Verdeutlicht wird zudem der Unterschied von Diesel und Benzin, wenn man sich das Siedeverhalten anschaut.⁴⁸ Sowohl Diesel als auch Benzin sind Gemische aus Erdöl und haben deswegen keinen Siedepunkt (wie bei Reinstoffen), sondern eine Siedelinie, die vom bereits verdunsteten Volumenanteil abhängt. Die üblichen Siedelinien von Diesel und Benzin sowie die durch die europäischen Normen EN 590 (Diesel) und EN 228 (Benzin) festgelegten Grenzen sind in Abb. 8 dargestellt.⁴⁹

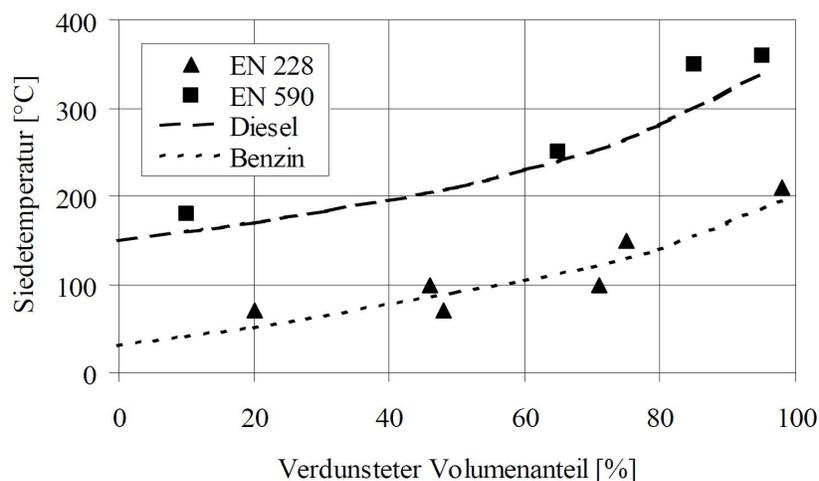


Abbildung 8: Typische Siedelinien für Benzin und Diesel⁵⁰

In Raffinerien, in denen aus Erdöl hauptsächlich Kraft- und Schmierstoffe erzeugt werden, werden die Erdölbestandteile nach ihrer Siedelinie separiert, um sie danach auf chemischer und physikalischer Basis zu ändern. Dieses Nachbehandeln (Reinigen) wird durch die Zusammenstellung verschiedener Verfahren bewerkstelligt, um am Ende ein Fertigprodukt zu haben, welches frei von allen störenden

⁴⁷ Merker/Schwarz, 2009, S.119

⁴⁸ vgl. Lunanova, 2009, S.33

⁴⁹ vgl. Peitz/Bernhard/Mehring/Elsener/Kröcher, 2012, S.626

⁵⁰ Merker/Schwarz, 2009, S.119

Bestandteilen des Erdöls ist.⁵¹ Elemente wie etwa Schwefel sind in geringer Konzentration im Erdöl zu finden und müssen im Nachbehandlungsprozess, so gut es geht, eliminiert werden.⁵² Zu den bekanntesten Trennungsvorgängen (siehe Abb. 9) zählen das Filtrieren, das Extrahieren, das Absorbieren und vor allem das Destillieren (atmosphärisch oder im Vakuum). Als bekannte Umwandlungsverfahren (Konversion) zählt man das HydroCracken, das Reformieren (Reforming), das Alkylieren, das Polymerisieren, das Isomerisieren und das Cracken (gleichbedeutend mit Konversion).⁵³

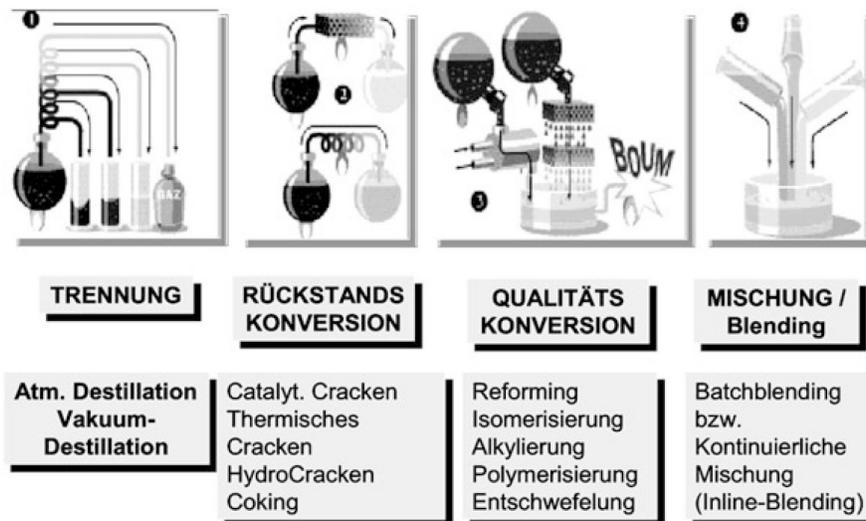


Abbildung 9: Grundzüge der Raffinerie-Arbeitsverfahren⁵⁴

Alternative Kraftstoffe (siehe Kapitel 7.3), insbesondere in der Beimischung zu klassischen Kraftstoffen, gewinnen zunehmend an Bedeutung. So ist es z. B. seit 2009 in Europa Standard, 7 % Biodiesel dem Dieselmotorkraftstoff beizumischen (sogenannter B7-Diesel).⁵⁵ Biodiesel ist ein durch Veresterung (Bildung von Ester) von Pflanzenölen hergestellter alternativer Kraftstoff. Dem Benzin wird in Europa hauptsächlich Ethanol (10 % = E10) als alternativer Kraftstoff beigemischt. In manchen Ländern wie in den USA werden Kraftstoffe mit einem Ethanolgehalt von 70 % angeboten. Gasförmige Kraftstoffe wie Erdgas – komprimiert (CNG = Compressed Natural Gas) oder verflüssigt (LNG = Liquefied Natural Gas) – gewinnen ebenso an Bedeutung.⁵⁶

Während Erdgas als leichtester Energieträger aus wenigen und genau definierten Kohlenwasserstoffen besteht, im Wesentlichen aus Methan (CH_4), enthält Benzin

⁵¹ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.388

⁵² vgl. Mollenhauer/Tschöke, 2007, S.90

⁵³ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.388

⁵⁴ Ebenda, S.388

⁵⁵ vgl. Hilgers, 2016, S.6

⁵⁶ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.638

mehr als 200 verschiedenartige Kohlenwasserstoffe – Dieselkraftstoffe noch deutlich mehr.⁵⁷

3.2.1 Diesel

Diesel hat einen Siedebereich von rund 180 °C bis 370 °C (siehe Abb. 8) und ist hauptsächlich für den Einsatz in Fahrzeugdieselmotoren (Pkw und Nkw) bestimmt. Der Treibstoff besteht aus etwa 300 unterschiedlichen Kohlenwasserstoffen, die durch Trennungs- und Nachbearbeitungsverfahren in Raffinerien erzeugt werden. Anfangs war Diesel ein einfaches Destillationsprodukt, aber innerhalb der letzten Jahrzehnte hat sich Diesel zu einem komplexen Kraftstoff entwickelt. Die steigenden Anforderungen bezüglich Leistung, Verbrauch und vor allem Umwelt haben die Mineralölindustrie zu dieser Entwicklung veranlasst. Seit 1987 werden dem Diesel Additive hinzugefügt und seit 2004 werden ‚Designerkraftstoffe‘ – teilweise mit synthetischen Bestandteilen (siehe Kapitel 7.3) – beigemischt, die eigens für spezialisierte Motorkonzepte entwickelt wurden.⁵⁸

DK entzündet bei etwa 350 °C – die untere Grenze liegt bei ca. 200 °C. OK dagegen muss deutlich höheren Temperaturen ausgesetzt sein – etwa 500 °C – um zu entzünden.⁵⁹ In Tabelle 4 sind wichtige Eigenschaften des DK aufgelistet.

Kenngröße	Wert	Anmerkung
Dichte	0,838 kg/l	0,82 - 0,845 kg/l
Räumlicher Wärmeausdehnungskoeffizient	0,95 10 ⁻³ K ⁻¹	bei 20 °C
Heizwert	42,6 MJ/kg	39 - 43,2 MJ/kg
Kohlenstoffdioxidemission bei Verbrennung	2,65 kg/l	
Schallgeschwindigkeit in Diesel	ca. 1400 m/s	bei 20 °C, Normalluftdruck

Tabelle 4: Eigenschaften des Dieselkraftstoffes⁶⁰

DK wird aus den Mitteldestillaten gewonnen. Das Rohöl durchläuft eines der typischen Trennverfahren (zumeist durch Cracken), wodurch sowohl die Qualität als auch die Ausbeute aus dem Rohöl erhöht werden. Alle genannten Crackverfahren brechen schwersiedende Rohölfraktionen auf und wandeln diese zu leichtsiedenden Kohlenwasserstoffen um.⁶¹

Abb. 10 zeigt das vereinfachte Schema einer Rohöldestillationsanlage.

⁵⁷ vgl. Mollenhauer/Tschöke, 2007, S.90

⁵⁸ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.893

⁵⁹ vgl. Reif, 2012a, S.46

⁶⁰ vgl. Antoshkiv/Berg/Wagner, 2007, S.3

⁶¹ vgl. Mollenhauer/Tschöke, 2007, S.87

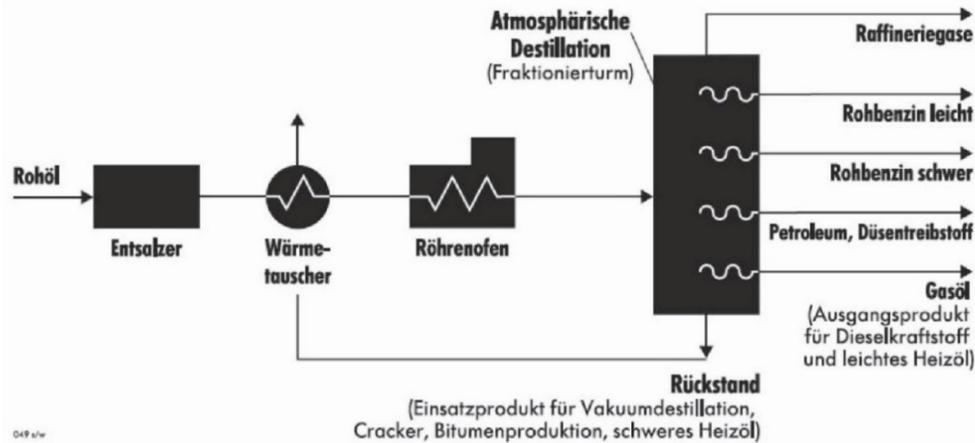


Abbildung 10: Vereinfachtes Schema einer Rohöldestillationsanlage⁶²

Um der steigenden Nachfrage nach DK gerecht zu werden, mischen Raffinerien inzwischen Konversionsprodukte (katalytische und thermische Crack-Komponenten) bei. Diese Konversionsprodukte werden aus Schwerölen durch das Zerteilen großer Moleküle hergestellt.⁶³

Die Kohlenwasserstoffe des DK müssen eine gute Selbstzündung bei hohem Druck aufweisen. Der Benzinmotor mit seiner Fremdzündung hat dieses Problem nicht. Die Kohlenwasserstoffe sind überwiegend Normalparaffine, die kettenförmig mit Kohlenstoff-einfachbindungen (siehe Abb. 11) vorliegen. Normalparaffine bilden eine Untergruppe der Alkane (gesättigte Kohlenwasserstoffe).⁶⁴

Qualitativer DK ist durch folgende Merkmale definiert:

- eine hohe Cetanzahl,
- ein relativ niedriges Siedeende,
- einen engen Dichte- und Viskositätsbereich,
- einen niedrigen Aromaten- und insbesondere Polyaromatengehalt sowie
- einen niedrigen Schwefelgehalt.⁶⁵

⁶² Mollenhauer/Tschöke, 2007, S.87

⁶³ vgl. Reif, 2012a, S.46

⁶⁴ vgl. Mollenhauer/Tschöke, 2007, S.90

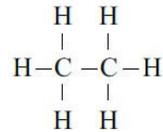
⁶⁵ vgl. Reif, 2012a, S.46

Alkane C_nH_{2n+2} (früher: Paraffine)

Kettenförmig aufgebaute Kohlenwasserstoffe mit nur Einfach-Bindungen

Normal-Paraffine

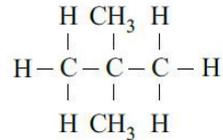
gerad-kettenförmig



Ethan

Iso-Paraffine

verzweigt-kettenförmig



2,2 Dimethylpropan

Abbildung 11: Aufbau der Alkane bzw. Paraffine⁶⁶

Die Anforderungen für Dieseldieselkraftstoffe sind in Europa in den Vorschriften 2003/17/EG und vor allem in der DIN bzw. ÖNORM EN ISO 590 (siehe Tabelle 5) zu finden. Weltweit vereinheitlichte Dieseldieselstandards sind nicht vorhanden. Ein hoher Wasseranteil oder ein hoher Schwefelanteil ist in einigen Ländern zu finden. Dies kann zur Schädigung des Dieseldieselmotors führen. Am stärksten ist das Abgasnachbehandlungs- und das Einspritzsystem von einer schlechten DK-Qualität betroffen. Nur hochwertige Kraftstoffe können zu niedrigen Abgasemissionen führen.⁶⁷

Kriterium	Kenngroße	Einheit
Cetanzahl	≥ 51	-
Cetanindex	≥ 46	-
CFPP in sechs jahreszeitlichen Klassen, max.	+5...-20	°C
Flammpunkt	≥ 55	°C
Dichte bei 15 °C	820...845	kg/m ³
Viskosität bei 40 °C	2,00...4,50	mm ² /s
Schmierfähigkeit	≤ 460	μm (wear scar diameter)
Schwefelgehalt	≤ 10	mg/kg
Wassergehalt	≤ 200	mg/kg
Gesamtverschmutzung	≤ 24	mg/kg
FAME-Gehalt	≤ 7	Vol.-%

Tabelle 5: Ausgewählte Anforderungen an Dieseldieselkraftstoffe (EN 590)⁶⁸

Additive machen im Allgemeinen nur < 0,1 % des Inhalts des DK aus. So ändern sich die bestimmenden Faktoren wie Siedeverlauf, Viskosität und Dichte nicht entscheidend.⁶⁹ FAME (Fatty Acyd Methyl Ester) ist ein weiterer Begriff für Biodiesel,

⁶⁶ Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.638

⁶⁷ vgl. Hilgers, 2016, S.5f

⁶⁸ vgl. DIN EN 590, 2013-12, S.8f

⁶⁹ vgl. Reif, 2012a, S.51

während CFPP (Cold Filter Plugging Point) die Filtrierbarkeitsgrenze des Diesels angibt.

Die Cetanzahl (CZ) ist der signifikante Wert für die Zündfähigkeit des Dieselkraftstoffes. Sie wird wie die Oktanzahl (siehe Kapitel 3.2.2) nach einem spezifizierten Verfahren (DIN bzw. ÖNORM EN ISO 5165) bestimmt. Die Zündfähigkeit eines Kraftstoffes steigt mit der Kettenlänge der Kohlenwasserstoffe an. Eine hohe Cetanzahl bedeutet folglich, dass eine hohe Zündfähigkeit des Kraftstoffes gewährleistet ist. DK sollte einen Wert zwischen 40 und 65 haben.⁷⁰

Die Anforderungen an den Dieselkraftstoff – wie z. B. die Wintertauglichkeit, die Schmierfähigkeit, die Zündwilligkeit oder die Abgasemission – sind ohne den Einsatz von Additiven nicht realisierbar.⁷¹ Abb. 12 zeigt die wichtigsten Einsatzgebiete von Additiven.

Probleme bei Dieselfahrzeugen, die durch Additive gelöst werden können

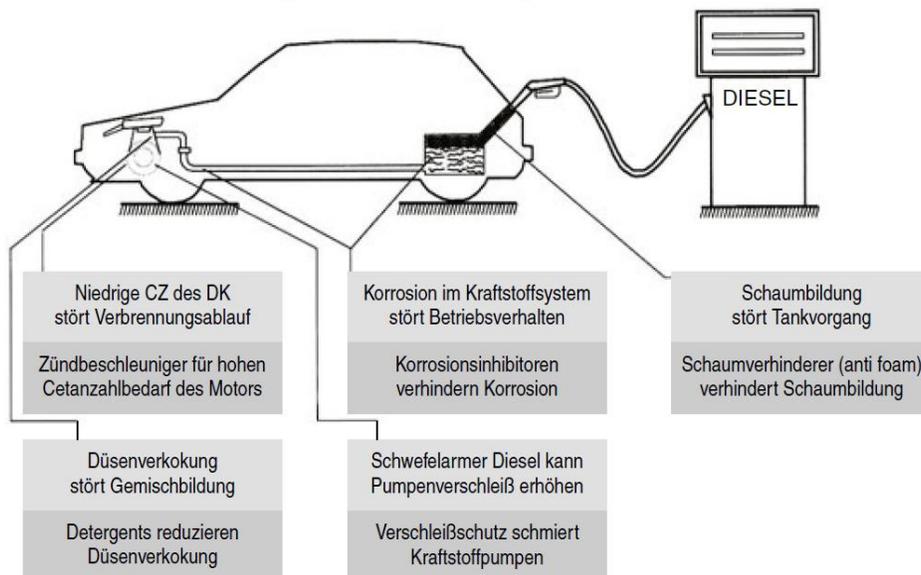


Abbildung 12: Probleme in Dieselfahrzeugen, die durch Additive gelöst werden⁷²

Die relevantesten Additivgruppen sind:

- Fließverbesserer sowie Wax-Anti-Settling-Additive, um die Wintertauglichkeit zu verbessern,
- Zündbeschleuniger, um den Zündverzug (siehe Kapitel 3.6) zu verkürzen und das Brennverhalten zu verbessern,
- Additive für den Verschleißschutz der Pumpen und Einspritzdüsen,

⁷⁰ vgl. Merker/Schwarz, 2009, S.121f

⁷¹ vgl. Mollenhauer/Tschöke, 2007, S.86

⁷² Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.900

- Schaumdämpfer, um während des Tankens die Schaumbildung und das Überschwappen zu verhindern,
- Detergenzien, um die Einspritzdüsen und das Kraftstoffsystem sauber zu halten,
- Additive für den Korrosionsschutz des Kraftstoffsystems,
- Antioxidantien, Dehazer und Metalldeaktivatoren, um die Kraftstofflagerstabilität zu verbessern.⁷³

3.2.2 Benzin (Ottokraftstoff)

Benzin (Ottokraftstoff) ist ein bei Raumtemperatur flüssiges Gemisch von Kohlenwasserstoffen und hat einen Siedebereich von rund 30 °C bis 210 °C (siehe Abb. 8).⁷⁴ Es wird den leichtsiedenden Komponenten des Erdöls zugeteilt. Benzin besteht aus etwa 200 unterschiedlichen Kohlenwasserstoffen und wird mittels verschiedener Trennungs- und Nachbearbeitungsverfahren als Grundbenzin in Raffinerien erzeugt.⁷⁵ Neben den üblichen Kohlenwasserstoffen – wie Aromaten, Paraffinen und Olefinen – sind im Benzin heutzutage sauerstoffhaltige Ersatzkomponenten (Alkohole und Ether) zu finden.⁷⁶ Diese Ersatzkomponenten sind beispielsweise Ethanol, Tertiärbutanol, Ether, Methyltertiärbutylether (MTBE) und/oder Ethyltertiärbutylether (ETBE). Die Kohlenwasserstoffe werden heute in erster Linie aus Erdöl gewonnen.⁷⁷

Benzin	Wert	Anmerkung
Dichte	0,753 kg/l	0,720 - 0,775 kg/l
Räumlicher Wärmeausdehnungskoeffizient	1,06 10 ⁻³ K ⁻¹	bei 20 °C
Heizwert	41,1 MJ/kg	40,1 - 41,8 MJ/kg
Kohlenstoffdioxidemission bei Verbrennung	2,32 kg/l	
Schallgeschwindigkeit in Benzin	ca. 1166 m/s	bei 17 °C, Normalluftdruck

Tabelle 6: Eigenschaften des Ottokraftstoffes⁷⁸

In Deutschland und in Österreich werden derzeit mehrere blei- und schwefelfreie Ottokraftstoffsorten angeboten: Super (mit 5 bzw. 10 Vol.-% Ethanol) seit 1986, SuperPlus seit 1989 und einige Premiumprodukte wie z. B. ‚Ultimate 102‘. Normalbenzin ist bereits wenige Jahre nach seiner Einführung 1985 wieder langsam vom Markt genommen worden. Der Druck an die Fahrzeughersteller, den Verbrauch und den CO₂-Ausstoß zunehmend zu senken, führte zu einer Motorauswahl, die beinahe ausschließlich auf Super oder SuperPlus ausgelegt war.⁷⁹

⁷³ vgl. Mollenhauer/Tschöke, 2007, S.92

⁷⁴ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.390

⁷⁵ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.906

⁷⁶ vgl. Peitz/Bernhard/Mehring/Elsener/Kröcher, 2012, S.626

⁷⁷ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.390

⁷⁸ vgl. Antoshkiv/Berg/Wagner, 2007, S.3

⁷⁹ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.390f

Ein wichtiges Merkmal, um den Unterschied der einzelnen Ottokraftstoffsorten auszumachen, ist die Oktanzahl (OZ). Sie ist ein Maß für die Klopfestigkeit (siehe Kapitel 3.4.2) des Kraftstoffes. Je höher die Oktanzahl ist, desto höher ist die Zündwilligkeit bzw. Klopfestigkeit. Sie wird nach EN ISO 5163 und 5164 bestimmt.⁸⁰ Die Anforderungen für Ottokraftstoffe sind in Europa in der DIN bzw. ÖNORM EN 228 zu finden.⁸¹

Die Explosionsgrenzen des OK sind von großer Bedeutung. Sie markieren die Grenzen des Luft-Kraftstoff-Gemischs (Dampf), innerhalb derer eine Fremdzündung (Zündkerze) zu einer schlagartigen Verbrennung des Gemischs führt. Die untere Grenze (wenig Kraftstoffdampf) und die obere Grenze (viel Kraftstoffdampf) sind differenziert zu betrachten. Außerhalb dieser Grenzen kann es nach der Zündung zu keiner Verbrennung kommen. Ottokraftstoffe haben zumeist eine untere Explosionsgrenze von annähernd 1 Vol.-% und eine obere von annähernd 8 Vol.-% Kraftstoff in Luft.⁸²

Additive (siehe Kapitel 3.2.1) werden dem OK ebenfalls beigefügt. Es werden dabei gezielt anwendungstechnische Eigenschaften verbessert. Zumeist geschieht die Vermischung während der Beladung der Tankwagen. Erst danach wird der Kraftstoff ‚marktreif‘.⁸³

3.3 Die Takte eines Verbrennungsmotors

Das Arbeitsverfahren des Diesel- und Ottomotors läuft nach dem Zweitakt- oder nach dem Viertakt-Prinzip ab. Die Verbrennung des Luft-Kraftstoff-Gemischs treibt einen Kolben in einem Zylinder in einer Auf- und Abwärtsbewegung periodisch an. Dadurch kam man auf den Namen ‚Hubkolbenmotor‘.⁸⁴ Die Zylinder eines Mehrzylindermotors führen die unterschiedlichen Takte zeitversetzt durch. Das bedeutet Folgendes: Während ein Zylinder durch die Expansion des Arbeitsgases Arbeit verrichtet, sind die anderen Zylinder auf diese mechanische Energie angewiesen, um die restlichen Takte durchzuführen.⁸⁵

Im Kraftfahrzeug werden fast ausschließlich Viertakt-Motoren eingesetzt.

Die Takte dieses Viertaktprozesses (siehe Abb. 13) laufen nach folgender Reihenfolge ab:

⁸⁰ vgl. Merker/Schwarz, 2009, S.120

⁸¹ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.391

⁸² vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.906

⁸³ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.390

⁸⁴ vgl. Reif, 2012a, S.28

⁸⁵ vgl. Hilgers, 2016, S.3f

1. Im ersten Takt (Ansaugtakt) wird – ausgehend vom oberen Totpunkt (OT) – Luft (Dieselmotor und Ottomotor mit Direkteinspritzung) bzw. ein Luft-Kraftstoff-Gemisch (Ottomotor mit Vergaser oder Saugrohreinspritzung) in den Brennraum angesaugt. Dabei bewegt sich der Kolben nach unten und ermöglicht das Einströmen der Luft bzw. des Gemischs durch ein Einlassventil. Heutzutage sind zwei Einlass- bzw. Auslassventile üblich (Vierventilmotor). Durch die häufig in modernen Motoren aufzufindenden Turbolader gelangt die Luft bereits komprimiert in den Brennraum (Diesel- oder Ottomotor mit Direkteinspritzung) bzw. in den Vergaser und kann dadurch eine größere Menge an Luft bzw. an Gemisch im Zylinder unterbringen im Vergleich zum konventionellen Saugmotor. Das Ansaugen ist mit Erreichen des unteren Totpunktes (UT) abgeschlossen. Die Einlassventile sind dabei wieder in ihrem geschlossenen Zustand.⁸⁶
2. Im zweiten Takt (Verdichtungstakt) wird die meist vorkomprimierte Luft bzw. das Luft-Kraftstoff-Gemisch zusätzlich durch den sich vom unteren Totpunkt aus rasch nach oben bewegendem Kolben verdichtet. Der Kolben bewegt sich mithilfe der Schwungmasse des drehenden Motors und der verrichtenden Arbeit der restlichen Zylinder. Die Verdichtung führt zu einer raschen Erwärmung der Luft bzw. des Luft-Kraftstoff-Gemischs.⁸⁷ Schließlich wird am Ende des zweiten Takts beim Dieselmotor der Kraftstoff direkt in den Brennraum eingespritzt und entzündet sich selbstständig (Selbstzünder) an der verdichteten und dadurch erhitzten Luft. Bei der Benzindirekteinspritzung wird der Kraftstoff gleichzeitig mit der Luft in den Brennraum gespritzt. Der Ottomotor ist kein Selbstzünder und muss daher mit einer Zündkerze ausgestattet sein.⁸⁸
3. Der dritte Takt (Arbeitstakt) beginnt mit der Explosion des Gases, welches den Kolben wieder abwärts drückt. Dabei wird die mechanische Arbeit verrichtet, welche die Kurbelwelle und die Schwungmasse des Motors antreibt.⁸⁹
4. Im letzten Takt (Ausstoßtakt) wird ab dem unteren Totpunkt der Kolben wieder nach oben geschoben, womit das Abgas aus dem Zylinder transportiert wird. Dabei werden die Auslassventile geöffnet.⁹⁰

⁸⁶ vgl. Fuhrmann, 2013, S.16

⁸⁷ vgl. Hilgers, 2016, S.3f

⁸⁸ vgl. Peitz/Bernhard/Mehring/Elsener/Kröcher, 2012, S.624

⁸⁹ vgl. Hilgers, 2016, S.4

⁹⁰ vgl. Ebenda, S.3f

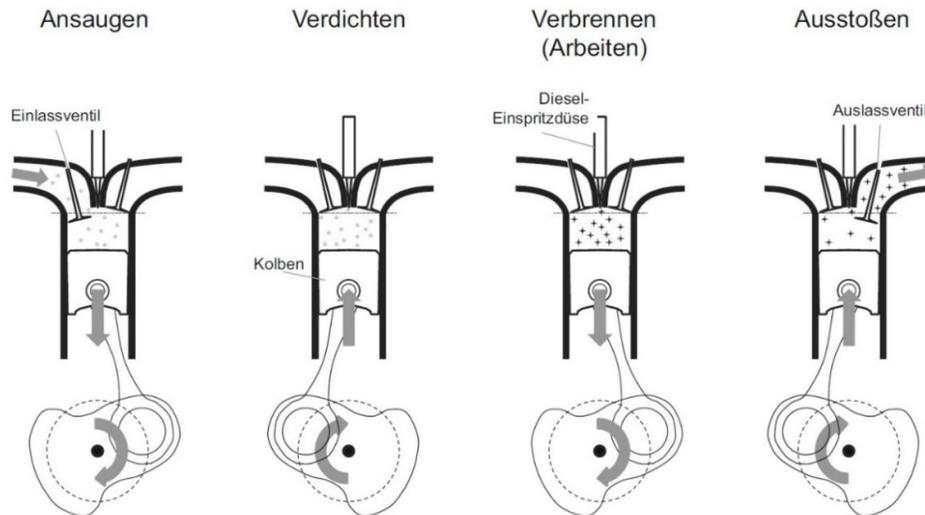


Abbildung 13: Die vier Takte des Viertaktprozesses (Dieselmotor)⁹¹

Beim Zweitaktverfahren gibt es lediglich den Verdichtungstakt (zweiter Takt) und den Arbeitstakt (dritter Takt). Der Austausch der Luftladung geschieht zwischen diesen beiden Takten, während der Pleier in der Nähe des UT ist.⁹²

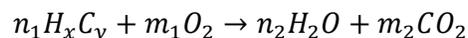
3.4 Verbrennungsverfahren

„Unter Verbrennung werden chemische Reaktionen verstanden, bei denen sich ein Stoff unter Wärmefreisetzung (exotherm) mit molekularem Sauerstoff verbindet (Oxidation). Die Einleitung einer Verbrennung erfolgt durch die Zündung.“⁹³

Motorische Verbrennungsprozesse können nach folgenden Kategorien aufgliedert werden:

- Brennstoff bzw. Kraftstoff: flüssig, gasförmig, leicht- und schwersiedend
- Gemischbildungsart: innere und äußere, homogen, heterogen
- Zündungsart: Fremdzündung (Zündkerze), Selbstzündung⁹⁴

Eine ideale und vollständige Verbrennung reinen Kraftstoffes (mit ausreichend Sauerstoff) weist folgende allgemeine chemische Reaktion auf:



Gleichung 1: Vollständige und ideale Verbrennung reinen Kraftstoffes⁹⁵

⁹¹ Hilgers, 2016, S.4

⁹² vgl. Fuhrmann, 2013, S.17

⁹³ Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.657

⁹⁴ vgl. Ebenda, S.638

⁹⁵ Reif, 2012a, S.492

Kohlenwasserstoffe ($n_1\text{H}_x\text{C}_y$) oxidieren mit dem Sauerstoff ($m_1\text{O}_2$) der Luft und bilden dabei Wasserdampf ($n_2\text{H}_2\text{O}$) und Kohlenstoffdioxid ($m_2\text{CO}_2$). Da aber eine ideale Verbrennung in der Praxis nicht möglich und die Kraftstoffzusammensetzung nicht von reiner Natur ist, entwickeln sich neben Wasserdampf (H_2O -Dampf) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) zusätzliche Abgaskomponenten (siehe Abb. 14).⁹⁶

Zu differenzieren sind die Begriffe vollständige und unvollständige sowie vollkommene und unvollkommene Verbrennung. Ist eine Luftzahl von $\lambda \geq 1,0$ (siehe Kapitel 3.5) gegeben, dann ist für die vollständige Verbrennung des Kraftstoffes theoretisch ausreichend Sauerstoff (O_2) vorhanden. De facto findet die Verbrennung nur im besten Fall bis zum chemischen Gleichgewicht statt – selbst unter Idealbedingungen. Somit läuft die Verbrennung unvollständig ab. Das Gleiche geschieht bei Luftzahlen von $\lambda < 1,0$, da von vornherein ein Sauerstoffmangel vorhanden ist. Durch die unvollständige Verbrennung des Kraftstoffes bleiben gewisse Mengen an unerwünschten Nebenprodukten vorhanden. Eine unvollkommene Verbrennung kann bei allen Luftzahlen vorkommen, da sich z. B. der Kraftstoff nicht ideal mit dem Sauerstoff vermischt oder da manche chemische Reaktionen zu langsam stattfinden, um ein chemisches Gleichgewicht zu erreichen.⁹⁷

Die Hauptbestandteile des Motorenabgases sind:

- **Wasserdampf** (H_2O -Dampf)

Der Wasserstoff, der chemisch im Kraftstoff gebunden ist, reagiert im Verbrennungsprozess u. a. zu Wasserdampf, der anschließend beinahe vollständig zu H_2O kondensiert, während er den Auspuff verlässt. An kalten Wintertagen ist er als Dampfwolke am Auspuff erkennbar. Der Dieselmotor im Teillastbereich hat einen H_2O -Anteil im Abgas von etwa 2,6 Vol.-%, wobei es im Ottomotor mit $\lambda = 1$ um die 8,5 Vol.-% sind.⁹⁸

- **Sauerstoff** (O_2)

Sauerstoff ist ausschlaggebend für die Verbrennung des Kraftstoffes. Die Zusammensetzung des Luft-Kraftstoff-Gemisches wird in heutigen Kraftfahrzeugen elektronisch geregelt. Im Dieselmotor ist ein Luftüberschuss von etwa $\lambda = 1,3$ (mageres Gemisch) essenziell, wobei im Ottomotor ein Verbrennungsluftverhältnis von etwa $\lambda = 1$ angepeilt wird. Da eine ideale und vollständige Verbrennung in der Praxis nicht möglich ist, bleiben circa 0,8 Vol.-%

⁹⁶ vgl. Reif, 2012a, S.492

⁹⁷ vgl. Merker/Schwarz, 2009, S.189f

⁹⁸ vgl. Szikora, 2015, S.9

% vom Abgas des Ottomotors Sauerstoff. Beim Dieselmotor sind es 15 Vol.-%.⁹⁹

- **Stickstoff (N₂)**

Stickstoff macht in etwa 78 Vol.-% von der trockenen Luft aus, die in den Motor gesaugt wird. Dieser verlässt den Auspuff mit einem Anteil von 68,8 (Ottomotor) bzw. 75,2 (Dieselmotor) Vol.-% am Abgas. Stickstoff macht somit den größten Anteil des Abgases aus.¹⁰⁰

- **Kohlenstoffdioxid (CO₂)**

Bei vollständiger Verbrennung wandelt sich der im Kraftstoff gebundene Kohlenstoff in Kohlenstoffdioxid (CO₂) um. Der Anteil im Abgas ist betriebspunktabhängig und macht im Ottomotor etwa 21 Vol.-% aus. Der Dieselmotor hat mit circa 7,1 Vol.-% einen deutlich niedrigeren Anteil. Um die Kohlenstoffdioxidemission zu begrenzen, muss der Kraftstoffverbrauch reduziert werden, da sich beide direkt proportional zueinander verhalten.¹⁰¹

CO₂ ist ein Treibhausgas und hat einen bedeutenden Anteil an der globalen Klimaveränderung. Der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre hat sich in den letzten 80 Jahren um etwa 50 % von circa 300 ppm auf circa 450 ppm erhöht. Die Fahrzeugindustrie versucht deshalb, den Treibstoffverbrauch von Verbrennungskraftmaschinen und damit den CO₂-Ausstoß zu reduzieren.¹⁰²

- **Schadstoffe (exkl. CO₂)**

Etwa 0,09 Vol.-% des Abgases von einem Dieselmotor sind Schadstoffe. Die Hauptschadstoffe sind dabei Kohlenstoffmonoxid (CO) und Stickstoffoxide (NO_x) sowie Feinstäube. Der Schadstoffanteil eines Ottomotors ist mit 0,9 Vol.-% um ein Zehnfaches höher als beim Dieselmotor. Hier sind die Hauptschadstoffe Kohlenstoffmonoxid (CO), Stickstoffoxide (NO_x) und unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC).¹⁰³

⁹⁹ vgl. Jung, 2014, S.19

¹⁰⁰ vgl. Fuhrmann, 2013, S.26

¹⁰¹ vgl. Reif, 2012a, S.492

¹⁰² vgl. Fuhrmann, 2013, S.26

¹⁰³ vgl. Reif, 2012a, S.493

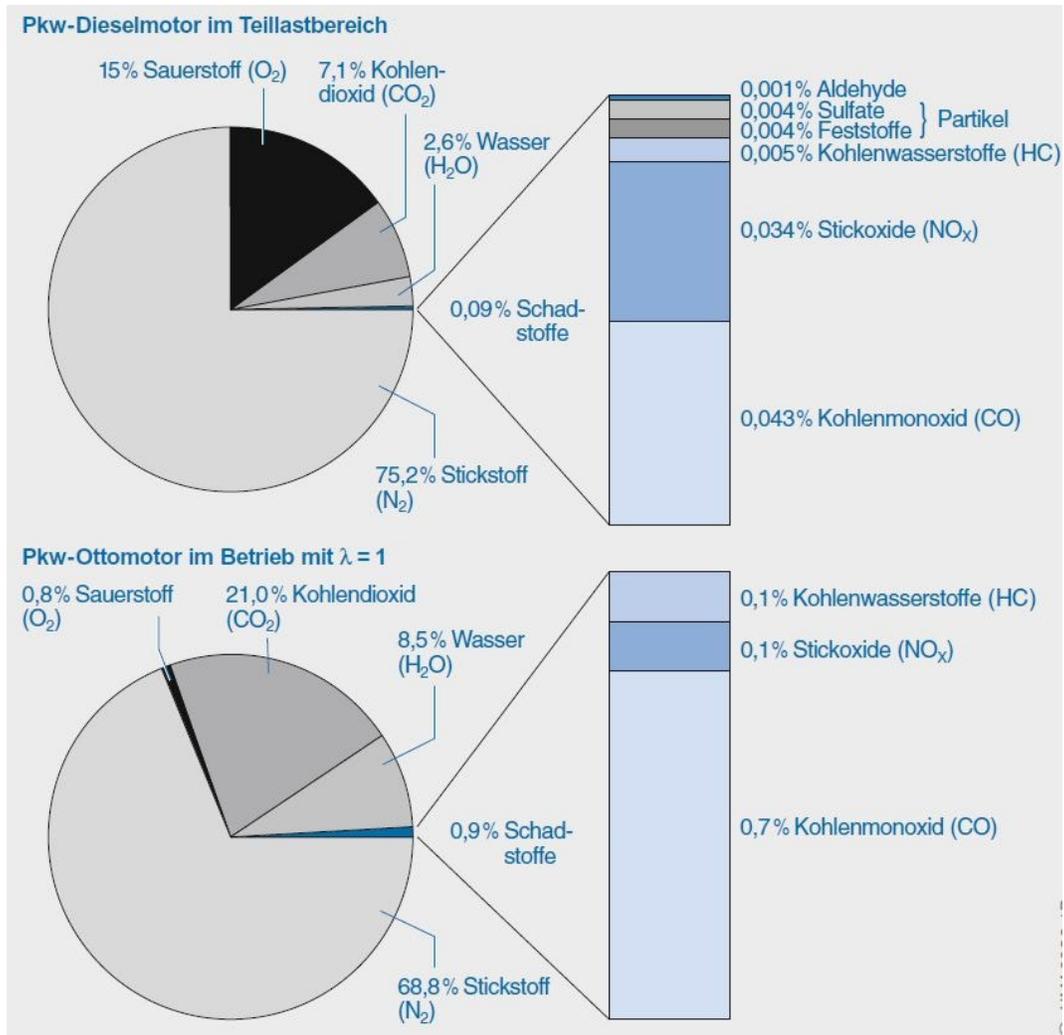


Abbildung 14: Abgaszusammensetzung von Verbrennungsmotoren - Rohemission¹⁰⁴

Die Verbrennung des Luft-Kraftstoff-Gemisches ist nur unter bestimmten Voraussetzungen möglich:

- Ein Mindestenergieniveau (Aktivierungsenergie) muss vorhanden sein, damit die einzelnen Moleküle miteinander reagieren können. Der Anteil an Molekülen, die ausreichend Energie besitzen, um eine Reaktion zu vollziehen, steigt exponentiell mit der ansteigenden Temperatur des Gemisches an.¹⁰⁵
- Eine festgelegte Zusammensetzung muss für das Reaktionsgemisch gesichert sein. Ist der Anteil des einen oder anderen Reaktionspartners zu groß, kann eine sich selbst tragende und stabile Reaktion nicht stattfinden. Diese festgelegte Zusammensetzung erfolgt innerhalb sogenannter Zündgrenzen, die eine überwiegend fehlerfreie Zündung garantieren. Zumeist gilt das bei einem

¹⁰⁴ http://www.auto-umwelt.at/_emissionen/em_abg.htm

¹⁰⁵ vgl. Jung, 2014, S.19

Luft-Kraftstoff-Verhältnis von ca. 0,6 bis 1,0. Mit steigender Temperatur des Gemisches vergrößert sich die Spanne der Zündgrenzen.¹⁰⁶

Tabelle 7 zeigt den Vergleich charakteristischer Daten von Otto- und Dieselmotoren mit und ohne Aufladung (siehe Kapitel 6.1.1).

Motorart		Maximale Drehzahl [min ⁻¹]	Maximaler Mitteldruck [bar]	Literleistung [kW/l]	Kraftstoffverbrauch Bestpunkt [g/kWh]
Ottomotor für Pkw	Saugmotor	... 9.000	bis etwa 15	100	minimal 225
	Mit Aufladung	bis 8.500	bis etwa 20	bis etwa 125	minimal 225
Ottomotor für Motorräder		17	bis etwa 14	50 ... 150	k. A.
Dieselmotor für Pkw	Saugmotor	bis 5.000	bis 9	bis etwa 30	etwa 210
	Mit Aufladung	3.500 ... 4.500	bis etwa 27	bis etwa 105	etwa 205

Tabelle 7: Vergleich charakteristischer Daten von Otto- und Dieselmotoren¹⁰⁷

Der Mitteldruck ist eine Rechengröße, um den Ladungswechsel und den Wirkungsgrad eines Kraftfahrzeugmotors unabhängig von Hubraum bzw. Hubvolumen des Motors zu beurteilen. Die Literleistung (auch Hubraumleistung) ist eine weitere Rechengröße um Parallelen zu ziehen zwischen den Motorleistungen von Motoren unterschiedlicher Hubraumgröße. Die Literleistung ist der Quotient aus der Nennleistung [kW] und dem Hubraum des Motors [l]. Der Kraftstoffverbrauch Bestpunkt wird bestimmt aus dem Verbrauchskennfeld und gibt an wie viel g Kraftstoff pro kWh verbraucht werden. Diesel hat, wie aus Tabelle 7 zu sehen ist, einen deutlich besseren Kraftstoffverbrauch – Pkw-Saugmotoren mit Ottokraftstoff können bis zu 350 g/kWh erreichen.¹⁰⁸

Seit Beginn der durch Motoren angetriebenen Mobilität gibt es die Rivalität zwischen dem Verbrennungs- und dem Elektromotor. Der Verbrennungsmotor hat hauptsächlich wegen der höheren Leistung, der besseren Speicherbarkeit der Energie im Kraftstofftank und der Reichweite mit einer Tankfüllung die Oberhand gewonnen. Seit geraumer Zeit werden aber Elektroautos und vor allem Hybridfahrzeuge (Benzin/Elektro, Diesel/Elektro) beliebter, da sie einige Vorteile gegenüber dem klassischen Verbrennungsmotor bieten und insbesondere umweltfreundlicher sind – siehe Kapitel 7.2.¹⁰⁹

3.4.1 Dieselmotoren

Dieselmotoren arbeiten nach dem Zweitakt- oder dem Viertakt-Verfahren. Mittelschnell- und schnelllaufende Viertakt-Motoren findet man z. B. in Pkw und Nfz. Diese Motoren sind zumeist mit ein oder zwei Einlass- bzw. Auslassventilen versehen.

¹⁰⁶ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.657

¹⁰⁷ vgl. Ebenda, 2015, S.1019

¹⁰⁸ vgl. Ebenda, 2015, S.1019

¹⁰⁹ vgl. Wallentowitz/Freialdenhoven, 2011, S.1

Zweitakt-Motoren, die langsam laufen, werden weitgehend für große Schiffe herangezogen und finden ihren Einsatz zudem in der stationären Stromerzeugung.¹¹⁰

Der konventionelle Dieselmotor arbeitet nach dem Prinzip der Selbstzündung. Dabei wird reine oder vorverdichtete Luft (Aufladung, siehe Kapitel 6.1.1) in den Brennraum gesaugt und hochverdichtet. Kurz vor dem oberen Totpunkt (OT) des Zylinders wird der Kraftstoff eingespritzt.¹¹¹ Der Kraftstoff wird zuerst in kleine Tropfen zerstäubt, bevor er verdunstet und sich mit der Luft vermischt. Es entsteht dabei ein heterogenes Gemisch aus dem Kraftstoff und der Luft.¹¹² Die Zündung findet ohne fremde Zündquelle statt. Sie erfolgt allein durch die Übertragung der Wärme von der hochverdichteten Luft auf den Kraftstoff. Der Dieselmotor wird deswegen als ein Motor mit ‚innerer Gemischbildung‘ und ‚Selbstzündung‘ bezeichnet.¹¹³

Abb. 15 zeigt schematisch die wesentlichen Zusammenhänge und Wechselwirkungen der im Brennraum eines Dieselmotors ablaufenden Prozesse.

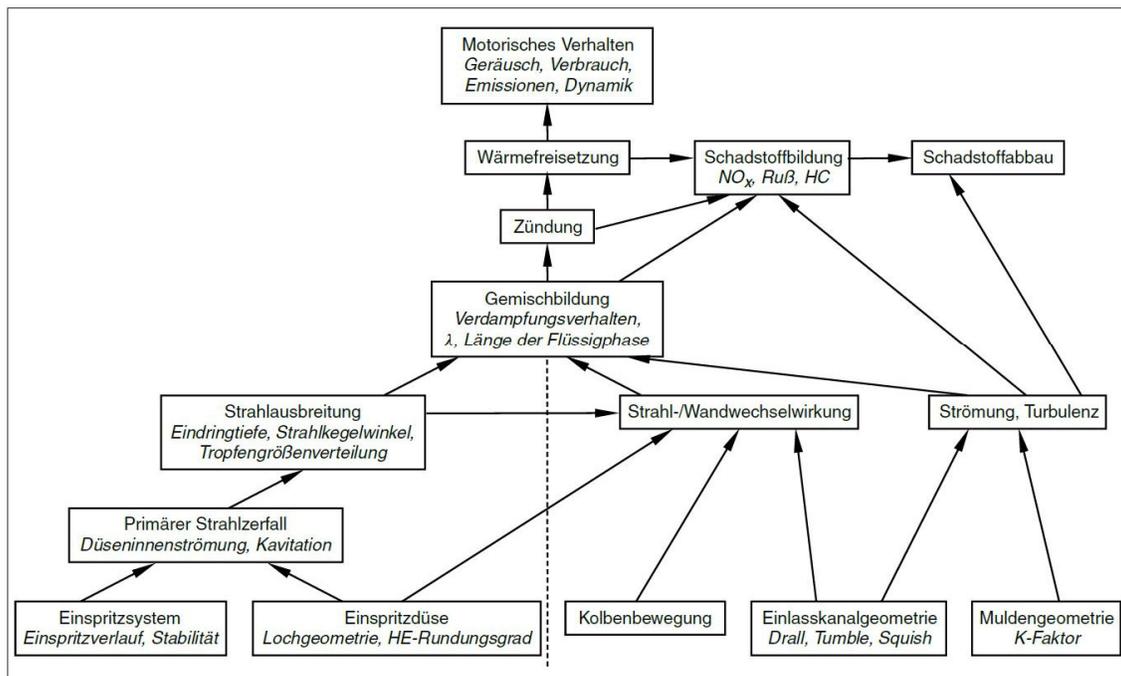


Abbildung 15: Vorgänge bei der Gemischbildung und Verbrennung im Dieselmotor¹¹⁴

„Die Art der Kraftstoffeinspritzung bestimmt neben dem Kraftstoff selbst, der Ladungsbewegung im Brennraum, der Brennraumgeometrie und dem thermischen

¹¹⁰ vgl. Merker/Schwarz, 2009, S.132

¹¹¹ vgl. Mollenhauer/Tschöke, 2007, S.68f

¹¹² vgl. Merker/Schwarz, 2009, S.124

¹¹³ vgl. Mollenhauer/Tschöke, 2007, S.68f

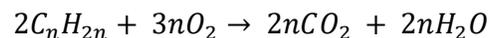
¹¹⁴ Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.658

*Zustand von Zylinderladung und brennraumbegrenzenden Wänden die Gemischbildung.*¹¹⁵

Eine ordentliche Zerstäubung und eine rasche Einspritzung des Kraftstoffes sind die Vorbedingungen für ein genaues Gemisch von Kraftstoff und Luft.¹¹⁶ Die innere Gemischbildung des Dieselmotors läuft im Gegensatz zu der klassischen des Ottomotors in extrem kurzer Zeit ab. Deshalb ist die Drehzahl des Dieselmotors begrenzt und überschreitet selten einen Wert von 4800 min^{-1} . Um jedoch die Leistung des Dieselmotors aufrechtzuerhalten, wird sehr häufig eine Aufladung (zumeist ein Turbolader, siehe Kapitel 6.1.1.2) verwendet.¹¹⁷

Die Menge an eingespritztem Kraftstoff bestimmt die Last des Motors. Dieselmotoren arbeiten normalerweise mit einem mageren Luftverhältnis (siehe Kapitel 3.5). Die direkte Einspritzung ist jedoch ungenau und kann zu abweichenden Gemischbereichen – stöchiometrisch bis hin zu sehr fett – führen. Diese ungleichmäßigen Gemischbildungen wirken sich auf die Schadstoffemission negativ aus – besonders bei der Bildung von Stickstoffoxiden und Rußpartikeln.¹¹⁸

Allgemein kommen im Diesel auf ein Kohlenstoffatom zwei Wasserstoffatome. Summarisch kann man die Verbrennung von Dieseldieselkraftstoff (DK) mit folgender Gleichung beschreiben (in der Praxis hat jedes Molekül eine eigene Verbrennungsgleichung, da ein Kraftstoff aus vielen unterschiedlichen Kohlenwasserstoffverbindungen besteht):



Gleichung 2: Stöchiometrische Verbrennungsgleichung Diesel¹¹⁹

3.4.2 Ottomotoren

Der Ottomotor braucht im Gegensatz zum Dieselmotor eine Fremdzündung (Zündkerze). Beim konventionellen Ottomotor wird das Luft-Kraftstoff-Gemisch im Saugrohr – äußeres Gemisch – zusammengestellt.¹²⁰ Heutzutage kann jedoch das für die Verbrennung notwendige Luft-Kraftstoff-Gemisch auf unterschiedliche Weise aufbereitet werden:

- eine homogene Gemischaufbereitung mit äußerer Gemischbildung (Port-Fuel-Injection, PFI),

¹¹⁵ Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.662

¹¹⁶ vgl. Merker/Schwarz, 2009, S.124

¹¹⁷ vgl. Mollenhauer/Tschöke, 2007, S.69

¹¹⁸ vgl. Merker/Schwarz, 2009, S.124

¹¹⁹ Hilgers, 2016, S.6

¹²⁰ vgl. Mollenhauer/Tschöke, 2007, S.68

- eine homogene Gemischaufbereitung, die in der Zeit der Ansaugphase den Kraftstoff in den Brennraum einspritzt (Direct-Injection-Spark-Ignition, DISI-homogen),
- eine geschichtete Gemischaufbereitung, die nahezu am Ende des Verdichtungstaktes den Kraftstoff in den Brennraum einspritzt (Direct-Injection-Spark-Ignition, DISI-geschichtet).¹²¹

Die homogene Gemischaufbereitung (sowohl innere als auch äußere Gemischbildung) ändert die Leistung mithilfe der Füllungsveränderung – Quantitätsregelung. Die geschichtete Gemischaufbereitung variiert jedoch die Luftverhältnisse während der Aufbereitung – Qualitätsregelung. Hierdurch ist eine drosselfreie Laststeuerung möglich, die zu einer drastischen Reduzierung von Ladungswechselverlusten führt. Die verkürzte Zeit zur Gemischaufbereitung bei der Direkteinspritzung hat sowohl bei Diesel- als auch bei Ottomotoren zur Folge, dass sich die Gemischaufbereitung und die darauffolgende Verbrennung beinahe zur gleichen Zeit abspielen. Die Konsequenz ist, dass sich die Emissionen von unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC), von Kohlenstoffmonoxid (CO) und vom sonst nicht beim Ottomotor als relevant eingestuftem Partikelaustritt (Ruß) erhöhen.¹²²

Um den optimalen Zündzeitpunkt zu berechnen, werden Kennfelder (Last und Drehzahl) herangezogen. Im Allgemeinen ist ein in Richtung früh festgelegter Zündzeitpunkt vorteilhaft für Motoren mit hoher Last und hoher Drehzahl. Die Gefahr liegt aber darin, dass es zu einer unkontrollierten und explosionsartigen Verbrennung (Klopfen) kommen kann.¹²³ Der bezüglich des Kennfeldes optimale Zündzeitpunkt ist daher so gut wie unerreichbar. Um trotzdem den bestmöglichen Zündzeitpunkt zu erreichen, wird eine Klopfregelung eingesetzt, die sich sukzessiv in Richtung früh herantastet, bis das Klopfen beginnt.¹²⁴ Nach Erreichen dieser Klopfgrenze wird die Zündung wieder etwas Richtung spät verschoben und festgemacht. Gelegentlich kommt es zu einem leichten Klopfen, aber sofern dies nicht periodisch auftritt, schädigt es den Motor nicht. Die Klopfregelung kann auch den Zündzeitpunkt für unterschiedliche Kraftstoffqualitäten anpassen.¹²⁵ Gemessen wird die Klopfgrenze von einem Klopfensensor, der im Motorblock angebracht ist. Der Piezokeramiksensoren nimmt die explosionsartigen Erschütterungen des Klopfens auf (siehe Abb. 16) und setzt sie in elektrische Spannung um.¹²⁶

¹²¹ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.675

¹²² vgl. Ebenda, S.675ff

¹²³ vgl. Borgeest, 2010, S.305f

¹²⁴ vgl. Isermann, 2010, S.360

¹²⁵ vgl. Reif, 2014, S.156

¹²⁶ vgl. Reif, 2010a, S.44

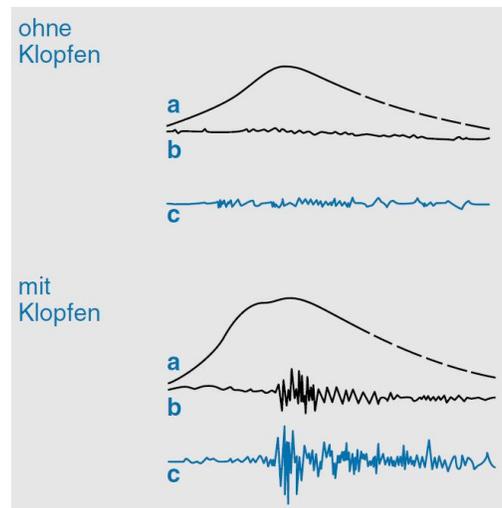


Abbildung 16: Signale des Klopfensors (Oszilloskopdarstellung)¹²⁷

a: Druckverlauf im Zylinder; b: gefiltertes Drucksignal; c: Signal des Klopfensors

3.5 Die Luftzahl λ

Zur Kennzeichnung dafür, in welchem Verhältnis Luft und Kraftstoff im Brennraum vorhanden sind, wurde die Luftzahl λ eingeführt.¹²⁸ Diese beschreibt zudem, wie weit das vorhandene Luft-Kraftstoff-Gemisch vom stöchiometrischen Massenverhältnis abweicht.¹²⁹ Stöchiometrisch bedeutet, dass der Kraftstoff (alle Moleküle) vollständig mit dem Sauerstoff der Luft reagiert, sodass kein Sauerstoff mehr übrig bleibt. λ ist also das Verhältnis der Massen von tatsächlich vorhandener Luft m_L zu der Luft $m_{L,St}$, die nötig ist, um den Kraftstoff stöchiometrisch zu verbrennen.¹³⁰

$$\lambda = \frac{m_L}{m_{L,St}} = \frac{m_L}{m_K L_{St}}$$

Gleichung 3: Luftzahl bzw. Luft-Kraftstoff-Verhältnis¹³¹

Der stöchiometrische Luftbedarf L_{St} ist definiert als das Verhältnis der Massen aus Luft $m_{L,St}$ und Kraftstoff m_K bei rein stöchiometrischen Verhältnissen.

$$L_{St} = \frac{m_{L,St}}{m_K}$$

Gleichung 4: Stöchiometrischer Luftbedarf¹³²

¹²⁷ Reif, 2010b, S.149

¹²⁸ vgl. Hilgers, 2016, S.7

¹²⁹ vgl. Reif, 2012b, S.10

¹³⁰ vgl. Hilgers, 2016, S.7

¹³¹ Ebenda, S.7

¹³² Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.24

$\lambda = 1$: Die zugeführte Masse an Luft entspricht der theoretisch erforderlichen Masse an Luft, die notwendig ist, um den ganzen Kraftstoff zu verbrennen (= stöchiometrisches Verbrennungsluftverhältnis).

$\lambda < 1$: Es herrscht Luftmangel und das führt zu einem nicht vollständigen Verbrennen des Kraftstoffes. Man spricht dabei von einem fetten Gemisch.

$\lambda > 1$: Es herrscht Luftüberschuss, d. h. es steht mehr Luft als notwendig zur Verfügung. Man spricht dabei von einem mageren Gemisch.¹³³

Die Stöchiometrie des Luft-Kraftstoff-Gemisches ist signifikant, um die Effizienz des Motorbetriebs zu gewährleisten – der Kraftstoff wird vollständig verbrannt – und um die Schadstoffemissionen zu drosseln. Speziell der Dieselmotor weist ein relativ breites Spektrum an Luftzahlen auf.¹³⁴

Der stöchiometrische Luftbedarf nimmt großen Einfluss auf die Zumischung des Kraftstoffes im Motorbetrieb und muss deshalb dem jeweiligen Kraftstoff angepasst werden. Er kann aus den Massenanteilen der im Kraftstoff enthaltenen chemischen Elemente ermittelt werden.¹³⁵ Gleichung 5 zeigt die Berechnung des stöchiometrischen Luftbedarfs für schwefelfreie Kohlenwasserstoffgemische anhand der chemischen Elemente Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O):

$$L_{St} = \frac{O}{0,23}$$

mit $O = 2,67 * 0,01 [C] + 8 * 0,01 [H_2] - 0,01 [O_2]$

Gleichung 5: Stöchiometrischer Luftbedarf anhand C, H und O im Kraftstoff¹³⁶

Kraftstoff	[% (m/m)]*			C/H	[kg/kg] L
	C	H	O		
Normalbenzin	~ 85,5	~ 14,5	-	~ 5,9	~ 14,9
Superbenzin	~ 85,1	~ 13,9	~ 1	~ 6,1	~ 14,6
SuperPlus	~ 84,7	~ 13,3	~ 2	~ 6,5	~ 14,4
Dieselmotorkraftstoff	~ 86,3	~ 13,7	-	~ 6,3	~ 14,8

Tabelle 8: C/H-Verhältnis und Luftbedarf diverser Kraftstoffe¹³⁷

* % (m/m) entspricht Massen-%

¹³³ vgl. Reif, 2012b, S.10

¹³⁴ vgl. Hilgers, 2016, S.7

¹³⁵ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.24f

¹³⁶ Ebenda, S.892

¹³⁷ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.892

Tabelle 8 zeigt die Massenanteile von Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O), die daraus resultierenden C/H-Verhältnisse und den theoretischen Luftbedarf der wichtigsten Kraftstoffe.

3.5.1 Luftzahl beim Dieselmotor

Luftmangel – ein fettes Gemisch – führt zu einer rußenden Verbrennung. Um der Entwicklung von diesen fetten Gemischen entgegenzuwirken, muss – im Gegensatz zum Ottomotor – gänzlich mit Luftüberschuss gearbeitet werden. Bei Dieselmotoren mit Aufladung liegt die Luftzahl ungefähr zwischen $\lambda = 1,15$ und $\lambda = 2,0$. Der Wert steigt auf über $\lambda > 10$, wenn der Motor im Leerlauf ist. Innerhalb des Brennraums schwanken die λ -Werte stark. Dies hat einen ausschlaggebenden Effekt auf die Selbstzündung und auf die Schadstoffbildung (siehe Abb. 17) des Motors.¹³⁸

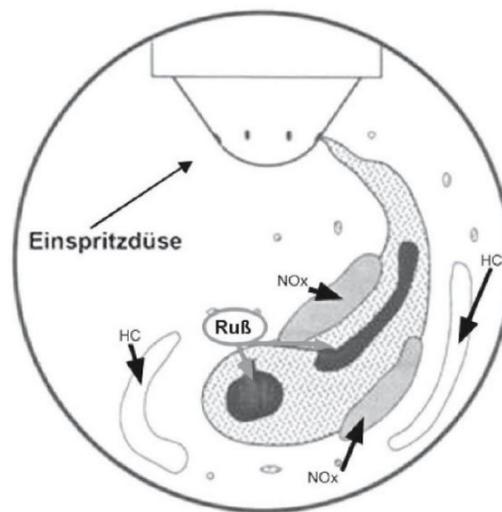


Abbildung 17: Entstehungsbereiche der Schadstoffe im Brennraum eines Dieselmotors bei heterogenem Gemisch¹³⁹

Der Dieselmotor mit innerer Gemischbildung (späte Einspritzung) hat im Brennraum einen eindeutigen Luft-Kraftstoff-Gradienten (λ -Gradienten). In der Mitte des Kraftstoffstrahls ist praktisch kein Sauerstoff vorzufinden ($\lambda \approx 0$), wobei es zusätzlich Bereiche des Brennraums gibt, die mit reiner Luft ($\lambda = \infty$) versehen sind. Somit sind während der Einspritzung Luftzahlen zwischen $\infty > \lambda > 0$ zu finden. Aufgrund der kurzen Einspritzzeit des Verbrennungsprozesses beim Dieselmotor ist ein homogenes Gemisch unerreichbar, weswegen bei einem heterogenen Gemisch unter Volllast ein Luftüberschuss von 5 bis 15 Vol.-% gewährleistet sein muss.¹⁴⁰

¹³⁸ vgl. Reif, 2012b, S.10f

¹³⁹ Mollenhauer/Tschöke, 2007, S.69

¹⁴⁰ vgl. Jung, 2014, S.19

Der Luft-Kraftstoff-Gradient ist nicht nur für die Qualität des Gemisches, sondern auch für Temperaturunterschiede im Brennraum maßgebend. In der Mitte des Kraftstoffstrahls ($\lambda \approx 0$) sind die niedrigsten Temperaturen zu finden. Hier entwickeln sich Rußpartikel durch den Luftmangel (siehe Abb. 17).¹⁴¹ Am Rand des Strahls ($\infty > \lambda$) – wo die Temperaturen durch die Verbrennung am höchsten sind – gibt es eine Mischung aus Luftüberschuss und sehr hohen Temperaturen, die zu der Entstehung von Stickstoffoxiden (NO_x) führen. Entfernt man sich vom Kraftstoffstrahl, sinken die Temperaturen rapide und es kann zu keiner vollständigen Oxidation des Kraftstoffes kommen. Hier entstehen dann unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC).¹⁴²

3.5.2 Luftzahl beim Ottomotor

Der Ottomotor hat ein breites Spektrum an Luftzahlen. Die Höchstleistung erreicht ein Ottomotor mit Luftmangel, also mit fetten (kraftstoffreichen) Gemischen. Hier liegen die Luftzahlen zwischen $\lambda = 0,85$ und $\lambda = 0,90$. Wird ein niedriger Verbrauch angepeilt, kann es zu einem mageren Gemisch von circa $\lambda = 1,1$ kommen. Bei einem Ottomotor mit Direkteinspritzung können es sogar bis zu $\lambda = 2$ sein.¹⁴³ Ottomotoren mit Saugrohreinspritzung arbeiten jedoch fast ausschließlich mit einem stöchiometrischen Gemisch ($\lambda = 1$).¹⁴⁴

In Abb. 18 ist die Entstehung von Stickstoffoxiden (NO_x) und Partikeln (PM) in Abhängigkeit von dem Luft-Kraftstoff-Verhältnis und der Verbrennungstemperatur zu sehen. Deutlich zu sehen ist wie im fetten Bereich die Partikelentstehung begünstigt wird und ab dem stöchiometrischen Bereich die NO_x -Entstehung ansteigt. Die Partikelentstehung beginnt ab einer relativ niedrigen Verbrennungstemperatur von ca. 1000 K und erreicht ihr Maximum bei Temperaturen zwischen 1500 und 1800 K. NO_x entsteht erst ab Verbrennungstemperaturen von ca. 2000 K.¹⁴⁵

¹⁴¹ vgl. Möltner, 2014, S.6

¹⁴² vgl. Mollenhauer/Tschöke, 2007, S.69f

¹⁴³ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.893

¹⁴⁴ vgl. Ebenda, S.25

¹⁴⁵ vgl. Hilgers, 2016, S.40

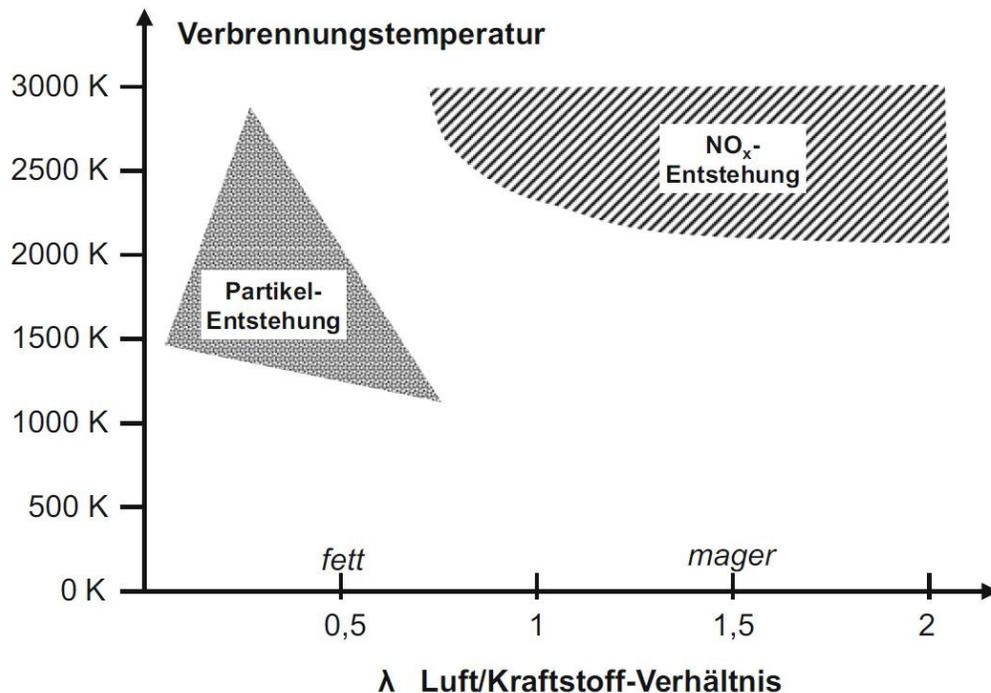


Abbildung 18: Schadstoffentstehung in Abhängigkeit vom Luft/Kraftstoff-Verhältnis und von der Verbrennungstemperatur¹⁴⁶

3.6 Einspritzzeitpunkt und Brennverlauf

Der Einspritzzeitpunkt des Diesel- oder Ottomotors mit Benzindirekteinspritzung (BDE) bestimmt den Anfang und den Ablauf der Verbrennung und hängt von der Last, der Drehzahl und der Brennraumtemperatur des Motors ab. Über die Einspritzung lassen sich die Geräusch- und Emissionsentwicklung sowie der Kraftstoffverbrauch optimieren. Sie findet erst am Ende des zweiten Taktes (Verdichtungstakt, siehe Kapitel 3.3) statt.¹⁴⁷ Verschiebt man den Einspritzzeitpunkt in Richtung spät – so kurz wie möglich vor dem obersten Totpunkt (OT) –, dann wirkt sich das positiv auf den Kraftstoffverbrauch und die Stickstoffoxid-Emission (NO_x) aus. Allerdings steigen dadurch die Partikel- (PM), die unverbrannte Kohlenwasserstoff- (HC) und die Kohlenstoffmonoxid-Emission (CO). Verschiebt man den Einspritzzeitpunkt in Richtung früh, dreht man diesen Vorgang um. Hier wird der Zielkonflikt zwischen der Partikel- sowie Kohlenwasserstoff-Emission und der Stickstoffoxid-Emission deutlich.¹⁴⁸

Für die Geräuschentwicklung (harter oder ruhiger Lauf) des Verbrennungsmotors ist der Zündverzug die ausschlaggebende Messgröße.¹⁴⁹ Es ist die Zeit, die ab dem

¹⁴⁶ Hilgers, 2016, S.40

¹⁴⁷ vgl. Möltner, 2014, S.14

¹⁴⁸ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.431

¹⁴⁹ vgl. Möltner, 2014, S.8

Beginn der Einspritzung bis zum ersten Druckanstieg – durch die Explosion des Luft-Kraftstoff-Gemisches – gemessen wird. In der Regel ist der Zündverzug beim Dieselmotor 1 bis 2 ms.¹⁵⁰ Erstrebenswert ist ein Zündverzug von 1 ms, da bereits 2 ms zu einem unruhigeren und härteren Motorlauf, zu einem höheren Kraftstoffverbrauch und zu einem höheren Schadstoffausstoß führen. Den größten Einfluss auf den Zündverzug hat die Cetanzahl (Zündfähigkeit des Kraftstoffes). Weitere wichtige Einflussgrößen sind die Brennraumtemperatur (siehe Gleichung 6), der Brennraumdruck und die Art des Mischvorganges.¹⁵¹

Ein rasches und frühes Ende der Verbrennung wird angestrebt. Konstruktiv kann dies durch die richtige Ausbildung des Brennraums – abhängig vom Einspritzsystem – und durch die Optimierung der Strömungsvorgänge, die innerhalb des Brennraums stattfinden, gelingen.¹⁵²

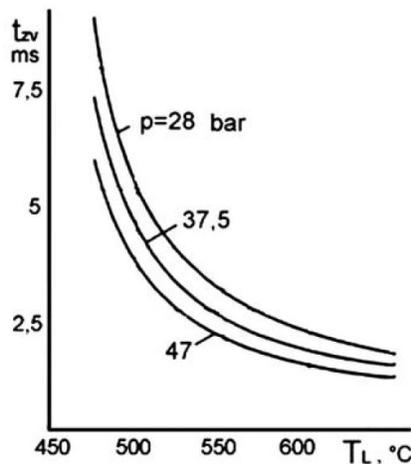


Abbildung 19: Zündverzug bei direkter Einspritzung¹⁵³

t_{zv} : Zündverzug [ms]; p : Brennraumdruck [bar]; T_L : Brennraumtemperatur [°C]

In Abb. 19 ist deutlich zu sehen, wie der Zündverzug mit steigendem Brennraumdruck und bei steigenden Brennraumtemperaturen abnimmt.

$$t_{zv} = C_1 * \frac{e^{\frac{E}{RT_2}}}{p_2^{C_2}}$$

Gleichung 6: Exponentielle Abhängigkeit der Zündverzugszeit von der Brennraumtemperatur¹⁵⁴

¹⁵⁰ vgl. Möltner, 2014, S.8

¹⁵¹ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.431f

¹⁵² vgl. Ebenda, S.432

¹⁵³ Antoshkiv/Berg/Wagner, 2007, S.2

¹⁵⁴ Ebenda, S.2

C_1, C_2 : Konstanten; T_2 oder T_L : Brennraumtemperatur [$^{\circ}\text{C}$]; p_2 oder p : Brennraumdruck [bar]; R : Allgemeine Gaskonstante [$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$]; E : Aktivierungsenergie [J]

Klopfen (siehe Kapitel 3.4.2) ist ein Thema für Ottomotoren und verschwindet mit fallender Brennraumtemperatur sowie mit einem niedrigen Brennraumdruck. In Bezug auf Abb. 19 kann festgestellt werden, dass ein langer Zündverzug die beste Voraussetzung für den Verbrennungsvorgang des Ottomotors ist.¹⁵⁵

¹⁵⁵ vgl. Antoshkiv/Berg/Wagner, 2007, S.3

4 Luftschadstoffe

„Die direkte Abgabe der Abgaskomponenten aus Verbrennungsvorgängen an die Umgebung, d. h. die Emission ist der primäre und wichtigste Prozess in einer Wirkkette von der Emission über die Transmission zur Immission und Wirkung.“¹⁵⁶

In der Regel unterscheidet man zwischen natürlichen Emissionen (z. B. aus Vulkanaktivität, von den Meeren oder aus der Zersetzung von Biomasse) und anthropogenen Emissionen (vom Menschen verursacht - beispielsweise durch Verkehr, Industrie, Landwirtschaft oder Energieerzeugung).¹⁵⁷

Verkehrsemissionen werden im Allgemeinen angegeben

- in parts-per-million (ppm)
- als Molanteil
- in g/kWh (Masse an Schadstoff in Bezug auf die geleistete Arbeit des Fahrzeugs)
- oder in g/km.

Die Einheit g/km ist die gebräuchlichste, da alle Abgasemissionsvorschriften nach dieser determiniert werden. So kann ein Fahrzeug nach seiner Umweltfreundlichkeit kategorisiert werden.¹⁵⁸

Immission (engl. air quality) ist der Prozess, der nach der Transmission stattfindet. Es ist somit die sich an einem Ort (z. B. eine Messstelle an einer Straßenkreuzung) endgültig einstellende Belastung des Menschen (anthropogen) oder der Natur durch Abgasemission und durch die darauffolgende Transmission.¹⁵⁹ Die Einwirkung der Immission ist abhängig von der Menge des Emissionsausstoßes und von der geografischen Lage (Stadt oder Land). Sie variiert daher sehr stark. Weitere wichtige Einflussfaktoren sind klimatische Zustände wie Wind und Temperatur sowie chemische Reaktionen der Emissionen (z. B. Smog). Am schnellsten schwindet Immission durch Niederschlag, Vegetation und chemische Reaktion. Praktisch alle Schadstoffe, die sich im Abgas befinden (z. B. NO_x, CO, SO₂), bauen sich vergleichsweise rasch ab. Nur der Abbau von Kohlenstoffdioxid (CO₂) ist sehr langwierig, da sich dieses in der oberen Atmosphäre absetzt und dort zu einem Treibhausgas wird.¹⁶⁰

Verbrennt man einen aus Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen (H_xC_y bzw. C_xH_y) zusammengesetzten Brennstoff vollständig, lauten die Bestandteile des Abgases

¹⁵⁶ Mollenhauer/Tschöke, 2007, S.461

¹⁵⁷ vgl. Ebenda, S.461

¹⁵⁸ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.437

¹⁵⁹ vgl. Mollenhauer/Tschöke, 2007, S.463

¹⁶⁰ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.437

Sauerstoff (O_2), Kohlenstoffdioxid (CO_2), Stickstoff (N_2) und Wasserdampf (H_2O -Dampf). In der Praxis ist jedoch eine ideale Verbrennung unmöglich, weshalb einige unerwünschte Schadstoffe aus dem Auspuff austreten. Eine unvollständige Verbrennung bringt Schadstoffe wie Kohlenstoffmonoxid (CO) und unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) sowie Stickstoffoxide (NO_x) und Partikeln (PM) hervor.¹⁶¹ Letztere beiden Schadstoffe können mit gegenwärtigen NO_x -Speicherkatalysatoren bzw. Partikelfiltern um fast 90 % gemindert werden.¹⁶² Zusätzlich kann es durch den Schwefelgehalt des Kraftstoffes zur Bildung von schädlichem Schwefeldioxid (SO_2) kommen.¹⁶³

Schadstoffe entstehen überwiegend durch die Unterbrechung der Reaktionsketten (siehe Abb. 20) infolge der kurzen Verweilzeit im Brennraum. Der Gleichgewichtszustand ist dadurch unterbrochen. Die unvollständige Verbrennung ist außerdem von dem Brennverfahren, von der innermotorischen Gemischbildung und von der örtlichen Luftzahl λ abhängig.¹⁶⁴

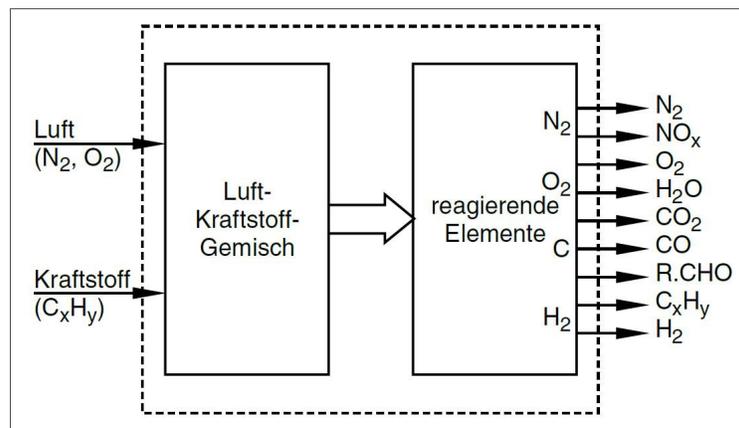


Abbildung 20: Reaktionsmechanismen im Brennraum¹⁶⁵

Die Luftzahl λ und die damit gekoppelte Temperatur der Verbrennung sind überwiegend für die Entstehung von Kohlenstoffmonoxid (CO), unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC) und Stickstoffoxiden (NO_x) verantwortlich (siehe Abb. 21). Die Entstehung von CO und HC wird bei einem fetten Gemisch ($\lambda < 1,0$) begünstigt, wobei die NO_x -Bildung hauptsächlich bei hohen Temperaturen und bei ausreichendem Sauerstoffanteil ($\lambda \approx 1,1$) gefördert wird.¹⁶⁶ Der Überschuss an Sauerstoff untergeht nicht nur eine Reaktion mit dem Kraftstoff, sondern ab einer bestimmten Temperatur auch mit dem Stickstoff der Verbrennungsluft. Ab einer Luftzahl von $\lambda > 1,2$ fällt die

¹⁶¹ vgl. Merker/Schwarz, 2009, S.189

¹⁶² vgl. Reif, 2012a, S.494

¹⁶³ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.434f

¹⁶⁴ vgl. Ebenda, S.434f

¹⁶⁵ Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.826

¹⁶⁶ vgl. Merker/Schwarz, 2009, S.190

Temperatur der Verbrennung, was zu einem Abfall der NO_x -Bildung und gleichzeitig zu einem Anstieg der HC-Bildung führt.¹⁶⁷

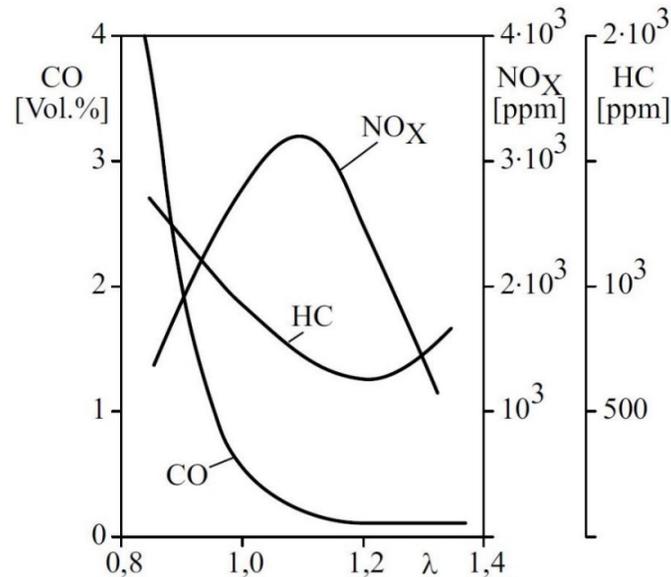


Abbildung 21: Schadstoffbildung in Abhängigkeit von der Luftzahl λ ¹⁶⁸

CO_2 wird grundsätzlich nicht als Schadstoff klassifiziert, da es nicht eine direkte Gefahr für den Menschen darstellt und da es ein Endprodukt von jedem oxidierenden Kohlenwasserstoff ist. Es ist jedoch ein großer Mitverursacher des Treibhauseffekts (siehe Kapitel 2) und kann ausschließlich durch eine motorseitige Verbrauchsreduzierung oder durch eine Veränderung des Brennstoffs (z. B. weniger Kohlenstoffanteile) gesenkt werden.¹⁶⁹

Partikelemissionen waren früher in den meisten Fällen bei Dieselmotoren zu finden. Seit dem Anstieg des Direkteinspritzverfahrens sind sie jedoch auch zu einer Problematik des Ottomotors geworden. Sie entstehen wie die anderen Schadstoffe durch unvollständige Verbrennung des Kraftstoffes – besonders dann, wenn das Gemisch fett ($\lambda < 1,0$) ist.¹⁷⁰ Zu unterscheiden ist zwischen Partikeln (z. B. Ruß und anorganische bzw. Metallverbindungen) und Tröpfchen (z. B. Öl und Kraftstoffanteile).¹⁷¹

Außerdem werden Emissionen durch die Kurbelgehäuseentlüftung freigesetzt. Gase (Leckgase) entfliehen dem Brennraum über die Zylinderleckagen in das Kurbelgehäuse. Darauf gelangen sie wieder in das Saugrohr und anschließend in den Brennraum. Beim Dieselmotor machen diese Leckgase nur einen geringen Anteil aus

¹⁶⁷ vgl. Hilgers, 2016, S.40

¹⁶⁸ Merker/Schwarz, 2009, S.189

¹⁶⁹ vgl. Eichelseder/Klüting/Piock, 2008, S.150

¹⁷⁰ vgl. Hilgers, 2016, S.40

¹⁷¹ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.434f

– etwa 10 % von den Leckgasen des Ottomotors –, da nur reine Luft zur Verdichtung herangezogen wird. Trotz dieses geringen Anteils müssen Dieselmotoren eine geschlossene Kurbelgehäuseentlüftung aufweisen. Der Ottomotor muss zudem mit Kraftstoffverdunstungs-Rückhaltesystemen ausgestattet sein, da es sogar beim Stillstand des Fahrzeugs zur Verdunstung von flüchtigen Teilen (überwiegend Kohlenwasserstoffe) des Kraftstoffes – und damit zu unerwünschten Emissionen – kommt. Beim Dieselmotorkraftstoff sind diese flüchtigen Bestandteile nicht vorhanden und brauchen deshalb nicht beachtet werden.¹⁷²

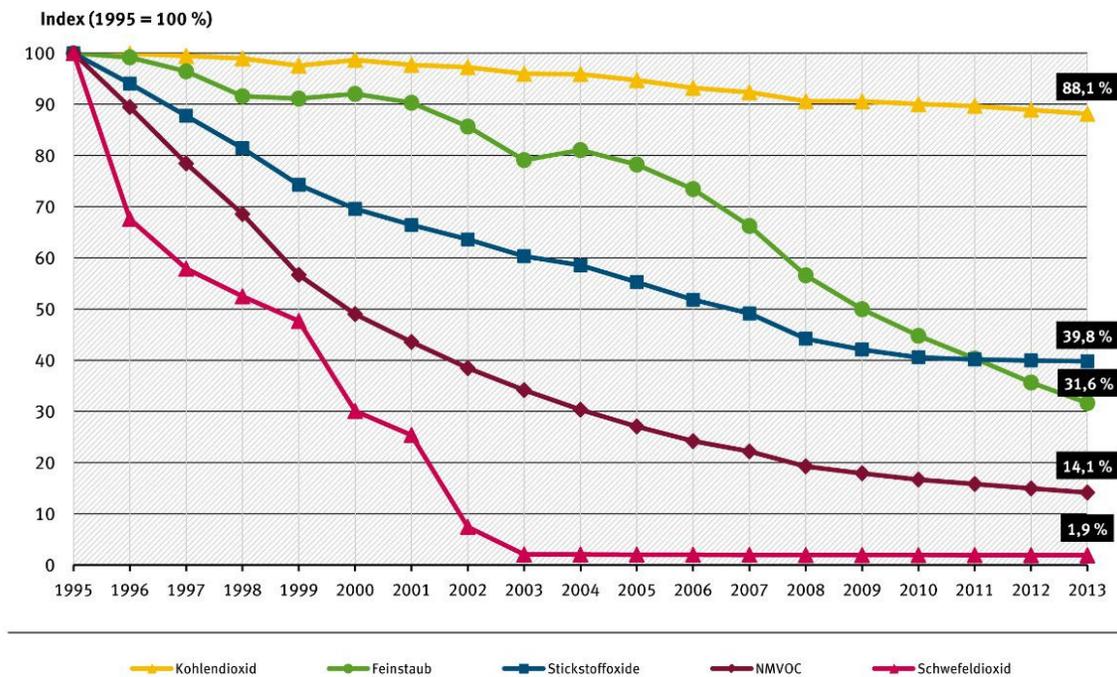


Abbildung 22: Spezifische Emissionen Pkw (DE)¹⁷³

Spezifische Emissionen = direkte Emissionen/Verkehrsaufwand

In Abb. 22 sind die wichtigsten spezifischen Emissionen von Pkw in Deutschland zwischen 1995 und 2013 aufgezeigt. Hieraus wird das fast gänzliche Verschwinden von Schwefeldioxid (SO₂) im Jahr 2003 ersichtlich. Die anderen Schadstoffe sind auch stetig Jahr für Jahr gesunken. Nur Kohlenstoffdioxid (CO₂) ist kaum gesunken, da die Reduzierungsmaßnahmen nur durch Verringerung des Kraftstoffverbrauchs zu erreichen sind.

Das Kyoto-Protokoll (COP 3 im Jahr 1998) war die erste Klimakonferenz, an der rechtlich verbindliche Ziele für Emissionshöchstmengen international bestimmt wurden. Einen großen Beitrag dazu sollte die Fahrzeugindustrie durch die

¹⁷² vgl. Reif, 2012a, S.492

¹⁷³ <http://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/schadstoff-treibhausgas-emissionen-des#textpart-1> (Gelesen am: 14.09.2017)

Reduzierung der CO₂-Emissionen leisten.¹⁷⁴ Japan hatte sich z. B. vorgenommen, die CO₂-Emission bis 2010 um 20 % zu senken. Andere Länder wie z. B. Südkorea und Taiwan haben sich das Ziel gesetzt, einen zulassungsrelevanten maximalen Verbrauchswert festzulegen, der nicht überschritten werden darf. China hat erstmals 2005 Maßnahmen zur CO₂-Emissionsreduzierung in Angriff genommen. Abb. 23 zeigt die für Pkw weltweit zukünftig vorgeschlagenen sowie bereits zum Teil festgelegten Grenzwerte für CO₂-Emissionen in [g/km]. Die EU hat sich dazu entschieden, auf einen Grenzwert von 95 g CO₂/km ab dem Jahr 2020 hinzusteuern. Es wird aktuell darüber verhandelt, ob ab dem Jahr 2025 sogar ein Grenzwert von 70 g/km anvisiert werden soll.¹⁷⁵

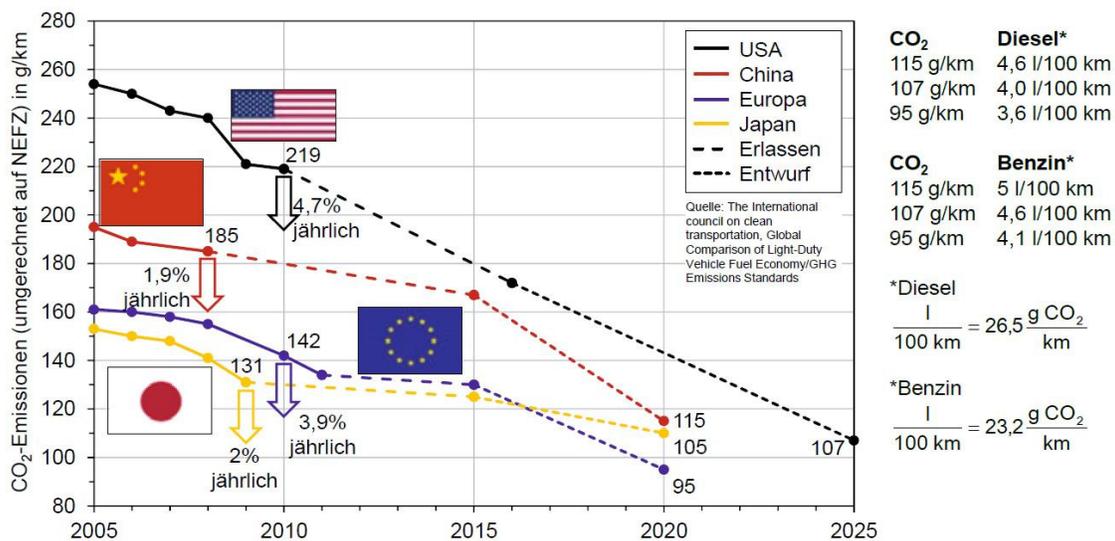


Abbildung 23: Weltweite Reduktionsziele für CO₂-Emissionen in g/km für Pkw¹⁷⁶

NEFZ: Neuer Europäischer Fahrzyklus (siehe Kapitel 5.2)

Bei der Klimakonferenz in Paris (COP 21) im Jahr 2015 haben knapp 190 Industriestaaten ihre Klimaschutzpläne vorgelegt. Das erklärte Ziel ist es, die Erderwärmung auf weniger als 2 °C einzuschränken. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die globalen Netto-Treibhausgasemissionen ab 2050 verschwinden.¹⁷⁷

Im Folgenden werden die wichtigsten konventionellen Luftschadstoffe aufgelistet.

¹⁷⁴ vgl. Möltner, 2014, S.28

¹⁷⁵ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.257ff

¹⁷⁶ Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.1159

¹⁷⁷ vgl. http://www.zeit.de/thema/klimagipfel-2015_ (Gelesen am: 12.05.2017)

4.1 Stickstoffoxide (NO_x)

Stickstoffoxide „bilden sich als Folge von Nebenreaktionen bei allen Verbrennungsvorgängen mit Luft, in der Stickstoff enthalten ist.“¹⁷⁸

Sie sind Gase mit der chemischen Formel NO_x und entstehen aus verschiedenen Verbindungen von Stickstoff (N₂) und Sauerstoff (O₂).¹⁷⁹ Würde sich der Stickstoff der angesaugten Luft streng inert verhalten (keine Reaktion mit potenziellen Reaktionspartnern), käme es zu keiner Bildung von Stickstoffoxiden. Vor allem sind hohe Brennraumtemperaturen und eine reichliche Sauerstoffkonzentration für die Stickstoffoxidbildung verantwortlich. Der Verbrennungsprozess hat eine zusätzliche Wirkung auf die Entstehung. Wird z. B. der Einspritzzeitpunkt auf spät verlegt, ist eine deutlich niedrigere Temperatur möglich. Gleiches ist mit einer Ladeluftkühlung zu bewerkstelligen.¹⁸⁰

Es gibt folgende Stickstoffsauerstoffverbindung: 8 Stickstoffoxide sowie zwei Stickstoffsauerstoffsäuren (Salpetrige Säure HNO₂ und Salpetersäure HNO₃)

Zu den acht Stickstoffoxiden gehören:

Bezeichnung	Chemische Summenformel	Oxidationsstufe
Distickstoffmonoxid	N ₂ O	+ I
Stickstoffmonoxid	NO	+ II
Distickstofftrioxid	N ₂ O ₃	+ III
Stickstoffdioxid	NO ₂	+ IV
Distickstofftetroxid	N ₂ O ₄	+ IV
Distickstoffpentoxid	N ₂ O ₅	+ V
Stickstofftrioxid	NO ₃	+ VI
Distickstoffhexaoxid	N ₂ O ₆	+ VI

Tabelle 9: Grenzwerte für Schadstoffemissionen von Pkw (EU)¹⁸¹

Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO₂) und Distickstoffmonoxid (N₂O) machen den Großteil der Stickstoffoxide im Abgas des Verbrennungsmotors aus.¹⁸² Im Dieselmotor liegt das NO-zu-NO₂-Verhältnis bei 0,6 bis 0,9. Das NO oxidiert aber anschließend mit dem Sauerstoff (O₂) der Luft und wird zu NO₂. Im Ottomotor liegt das NO-zu-NO₂-Verhältnis sogar bei über 0,99. Die maximale Stickstoffoxid-Konzentration tritt auf, wenn das Gemisch leicht mager ($\lambda \approx 1,1$ siehe Abb. 21) ist.¹⁸³

¹⁷⁸ Reif, 2012a, S.494

¹⁷⁹ vgl. Hilgers, 2016, S.40

¹⁸⁰ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.436

¹⁸¹ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.827

¹⁸² vgl. Reif, 2012a, S.494

¹⁸³ vgl. Mollenhauer/Tschöke, 2007, S.469f

Stickstoffoxide gehören aus mehreren Gründen zu den Luftschadstoffen. Sie sind nicht nur für Menschen direkt gesundheitsschädigend – Reizung und Schädigung der Atemwege bzw. Angriff auf die Schleimhaut –, sondern tragen besonders zum sauren Regen bei (siehe Gleichung 7) und zur Bildung troposphärischen Ozons und dem Ozonloch bei.¹⁸⁴

Stickstoffoxidbildung im Ottomotor

Ottomotoren mit Direkteinspritzung und Schichtladung (im Bereich der Zündkerze ein zündfähiges Gemisch, im restlichen Brennraum ein eher mageres Gemisch) haben im Vergleich zu Ottomotoren mit Saugrohreinspritzung oder mit Vergasern wegen ihrer geringeren Mitteltemperatur einen deutlich niedrigeren NO_x-Ausstoß. Die Schichtladung, mit ihren lokal vorhandenen mageren Zonen, erzeugt jedoch eine Zunahme der unverbrannten Kohlenwasserstoff- (HC) und Kohlenstoffmonoxid-Emission (CO).¹⁸⁵

Stickstoffoxidbildung im Dieselmotor

Die Entstehung von Stickstoffoxiden im Dieselmotor ähnelt der Entstehung im Ottomotor. Das NO-zu-NO₂-Verhältnis liegt zwischen 0,6 und 0,9 und ist abhängig von der Last: Bei kleiner Last entsteht mehr NO₂.¹⁸⁶ NO₂ bildet sich beinahe ausschließlich am Rand des Kraftstoffstrahls (siehe Abb. 17). Dieselmotoren mit einem unterteilten Brennraum (Kammermotor) stoßen deutlich weniger NO_x aus als jene mit klassischer Direkteinspritzung. Der äußerst hohe Luftmangel, der bei hohen Temperaturen in der Vorkammer entsteht, reduziert die NO_x-Emission. Das fertige Gemisch wandert von der Vorkammer in den Hauptbrennraum, wo es zu einem Luftüberschuss und zu einem deutlichen Abfall der Temperatur kommt. Die Direkteinspritzung setzt sich jedoch gegenüber dem Kammermotor durch Einsatz einer Abgasrückführung (siehe Kapitel 6.1.2) durch.¹⁸⁷

Abb. 24 zeigt die NO_x-Belastung in Österreich zwischen den Jahren 1998 und 2015. Zu sehen ist die deutliche Minderung der maximalen Werte ab ca. 2006, wobei der Mittelwert relativ konstant geblieben ist. In Abb. 4 ist dann noch deutlicher zu erkennen wie die Verläufe der einzelnen Sektoren (z. B. Verkehr) über die letzten Jahre verlaufen sind.

¹⁸⁴ vgl. Hilgers, 2016, S.40

¹⁸⁵ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.827

¹⁸⁶ vgl. Hering/Martin/Stohrer, 2009, S.448

¹⁸⁷ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.828f

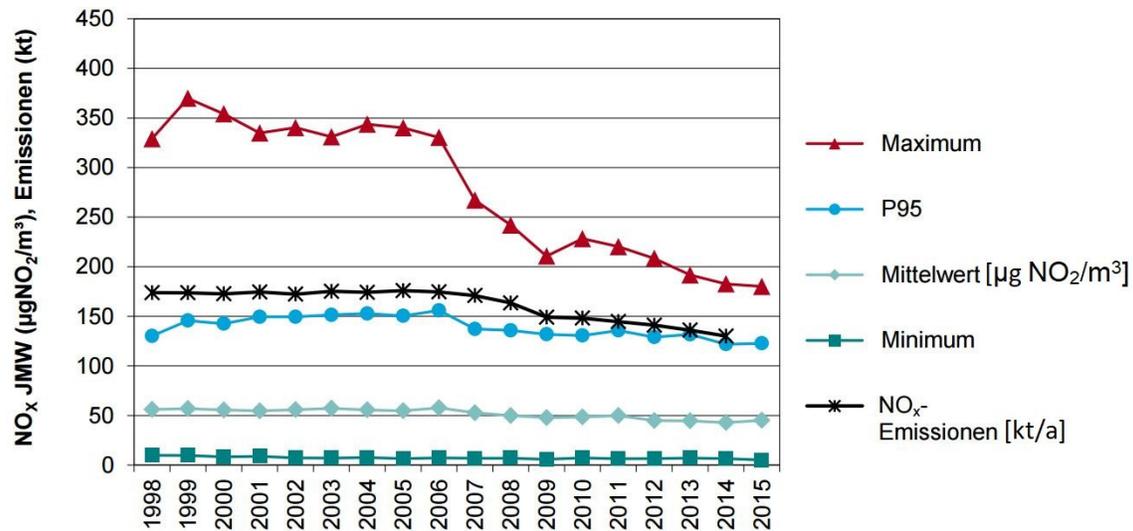


Abbildung 24: Trend der NO_x-Belastung (berechnet als NO₂) für alle Sektoren (AT)¹⁸⁸

4.1.1 Stickstoffmonoxid (NO)

Stickstoffmonoxid hat die chemische Formel NO und ist ein geruch-, geschmack- sowie farbloses Gas.¹⁸⁹ Es wirkt sich ab 20 ppm (parts per million) negativ auf die Lungenfunktion aus und greift die Schleimhäute an.¹⁹⁰ In der Umgebungsluft ist NO instabil und oxidiert mit O₂ zu NO₂. Anschließend kann sich NO₂ weiter zu Salpetersäure (HNO₃) entwickeln, was zu saurem Regen führt (siehe Gleichung 7).¹⁹¹

Stickstoffmonoxid bildet sich als farbloses und giftiges Gas auf drei unterschiedliche Arten: Thermisches NO bildet sich in Abhängigkeit von den Parametern Druck, Verweilzeit, Sauerstoffgehalt, Luftzahl (λ) und Temperatur. Die NO-Bildung erreicht ein Maximum bei Temperaturen von rund 1925 °C bis 2125 °C und verkleinert sich rapide, sobald es höhere Temperaturen erreicht (thermische Zersetzungstemperatur). Unter 470 °C ist für die Zersetzung von NO eine große Aktivierungsenergie erforderlich. Promptes NO bildet sich als Nebenreaktion in der Flammenfront mithilfe von Hydroxyl-Radikalen (OH-Radikalen). Zusätzliche Verknüpfungen entstehen mit freien Stickstoffmolekülen.¹⁹²

4.1.2 Stickstoffdioxid (NO₂)

Stickstoffdioxid hat die chemische Formel NO₂ und ist in reiner Form ein rotbraunes, stechend chlorartig riechendes und giftiges Gas. Schon eine geringe Menge kann zu

¹⁸⁸ <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0562.pdf> S.39 (Gelesen am: 17.06.2017)

¹⁸⁹ vgl. Möltner, 2014, S.6

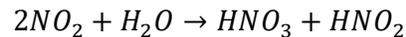
¹⁹⁰ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.438

¹⁹¹ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.245

¹⁹² vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.827

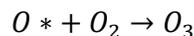
einer Lungenreizung führen. Es ist zudem gewebeschädigend und greift die Schleimhäute an. Speziell für Asthmatiker stellt es unter körperlicher Belastung ein Problem dar.¹⁹³ NO₂ macht im Durchschnitt 5 % des NO_x-Ausstoßes bei Kraftfahrzeugen aus.¹⁹⁴

NO₂ entwickelt sich über Zeit und in Verbindung mit Feuchtigkeit zu Salpetersäure (HNO₃) – siehe Gleichung 7. Salpetersäure leistet nach Schwefelsäure (H₂SO₄) den größten Beitrag zum sauren Regen. Saurer Regen hat einen maßgeblichen Anteil am Waldsterben. Stickstoffoxide sind außerdem in Verbindung mit Kohlenwasserstoffen (HC) verantwortlich für die Photo-smogbildung.¹⁹⁵



Gleichung 7: Bildung von Stickstoff-Sauerstoffsäuren durch Stickstoffdioxid¹⁹⁶

Stickstoffdioxid kann auch durch die Einwirkung von UV-Strahlen zu Ozon (O₃) umgewandelt werden (siehe Gleichung 8). Ozon ist besonders in der Nähe des Bodens (troposphärisches Ozon) schädlich und führt zur Reizung der Atemwege wegen seiner oxidierenden Wirkung. Außerdem kann Ozon bei empfindlichen Menschen zu Schläfenkopfschmerzen führen.¹⁹⁷



Gleichung 8: Photolytische Bildung von Ozon durch Stickstoffdioxid¹⁹⁸

In Abb. 25 sind die Jahresmittelwerte des NO₂-Ausstoßes in Deutschland zwischen 1995 und 2015, aufgeteilt in ländlicher Hintergrund, städtischer/vorstädtischer Hintergrund und verkehrsnah, zu sehen. Bei allen drei Kurven ist eine Minderung der Stickstoffdioxid-Konzentrationen zu sehen. Ein Bild über die Aufteilung der Stickstoffoxidemissionen (gerechnet als NO₂) kann man sich mit Abb. 3 verschaffen.

¹⁹³ vgl. Mollenhauer/Tschöke, 2007, S.469f

¹⁹⁴ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.436

¹⁹⁵ vgl. Hering/Martin/Stohrer, 2009, S.448

¹⁹⁶ Hilgers, 2016, S.40

¹⁹⁷ vgl. Ebenda, S.40

¹⁹⁸ Ebenda, S.41

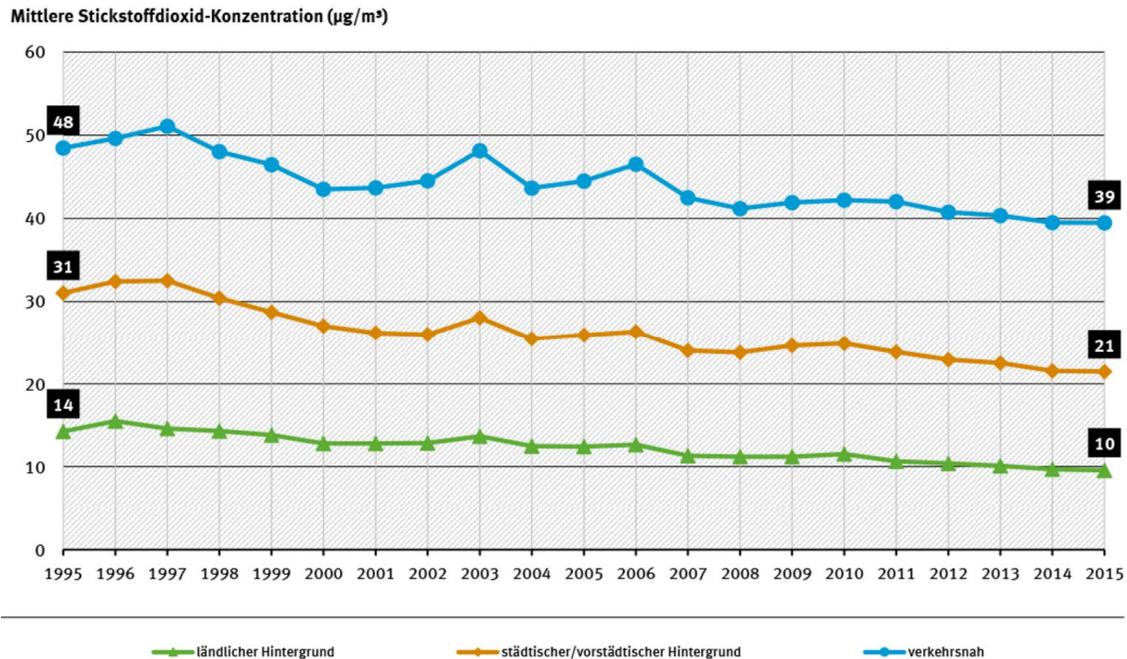


Abbildung 25: Trend der Stickstoffdioxid-Jahresmittelwerte (DE)¹⁹⁹

4.2 Partikeln (PM)

„Zu den Partikeln zählen alle Komponenten, die unterhalb von 51,7 °C auf einem Filter ausgeschieden werden können.“²⁰⁰

Partikeln sind mikroskopisch bzw. submikroskopisch kleine Festkörper (Feststoffe), die im Abgas (hauptsächlich im Dieselaabgas) vorkommen. Die Größen der Partikel unterscheiden sich stark voneinander. Um die Menge aller Partikel im Abgas zu messen, werden diese vorwiegend in drei Gruppen unterteilt:

- PM₁₀ (particulate matter 10 microns) bezeichnet jene Staubfraktion, die mehr als 50 % aller Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser von 10 μm beinhaltet
- PM_{2,5} bezeichnet jene Staubfraktion, die mehr als 50 % aller Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser von 2,5 μm beinhaltet
- UP bzw. UFP (ultrafeine Partikel) bezeichnet jene Staubfraktion, die mehr als 50 % aller Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser von 100 nm beinhaltet.²⁰¹

Partikeln entstehen bei unvollständiger Verbrennung des Kraftstoffes. Das Brennverfahren und der Betriebspunkt des Motors haben einen großen Einfluss auf

¹⁹⁹ <http://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/stickstoffdioxid-belastung#textpart-1> (Gelesen am: 11.03.2017)

²⁰⁰ Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.827f

²⁰¹ vgl. Hilgers, 2016, S.41

die Partikelentstehung. Sie setzen sich maßgeblich aus ausgedehnten Ketten von elementaren Kohlenstoffteilchen – meistens Ruß genannt – zusammen. An diese Kohlenstoffteilchen binden sich dann unverbrannte und teilverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) absorptiv – siehe Kapitel 4.5.²⁰² Eine ausreichende Gemischaufbereitung kann die Rußbildung senken. Fundamental für dieses Ziel sind der Einspritzdruck, die Brennraum- und Strahlgeometrie sowie der Luftdrall (Drall des eingespritzten Strahls).²⁰³

Hinzu kommen Schmieröl- und Kraftstoffaerosole – heterogene Gemische aus festen oder flüssigen Schwebeteilchen im Gas –, die zumeist aus den Additiven entstehen, sowie Sulfate – Salze der Schwefelsäure (siehe Kapitel 4.1.2) –, die sich an dem Kohlenstoffteilchen anlagern. Sulfate bilden sich durch den Schwefelgehalt des Kraftstoffes. Heutige Kraftstoffe haben einen derart geringen Schwefelanteil (≤ 10 ppm), dass diese Schadstoffe von untergeordneter Bedeutung sind.²⁰⁴ Partikeln können zudem durch Asche, Verschleiß (z. B. der Reifen) und Korrosionsprodukte entstehen. Ein Beispiel ist der Kolbenverschleiß der zu Chrom und Nickelaerosolen führt.²⁰⁵

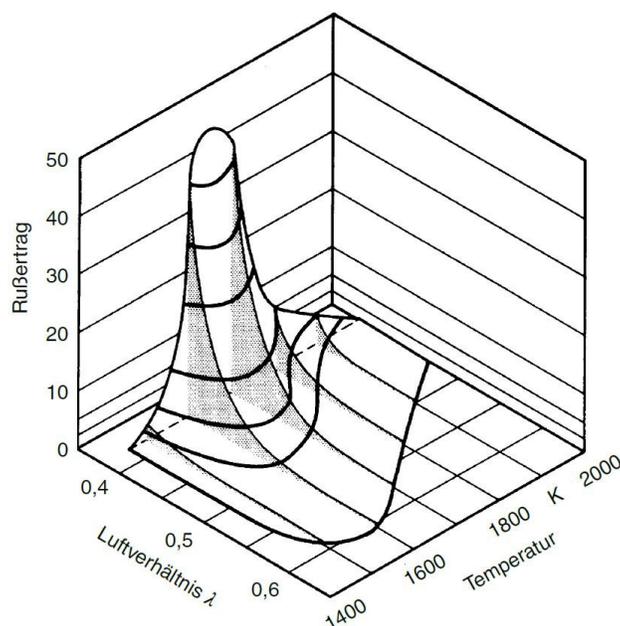


Abbildung 26: Rußertrag in Abhängigkeit von Temperatur und Luftverhältnis²⁰⁶

Das Luft-Kraftstoff-Verhältnis und die Verbrennungstemperatur haben den größten Einfluss auf den Rußertrag (Rußmasse/Gesamtkohlenstoffmasse). Der Rußertrag

²⁰² vgl. Merker/Schwarz, 2009, S.201

²⁰³ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.436f

²⁰⁴ vgl. Reif, 2012a, S.495

²⁰⁵ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.827f

²⁰⁶ Ebenda, S.662

erreicht seinen Höchstwert in Zonen mit extremem Luftmangel ($\lambda < 0,6$) und bei Temperaturen von ca. 1500 bis 1800 K (siehe Abb. 26).²⁰⁷

Partikelemissionen sind überwiegend ein Problem des Dieselmotors. Der geringe Partikelausstoß des Ottomotors mit Direkteinspritzung kann hingegen weitestgehend ignoriert werden.²⁰⁸

Die Partikel- und die unverbrannte Kohlenwasserstoff-Emission (HC) stehen im Zielkonflikt mit der Stickstoffoxid-Emission (NO_x). Die Voraussetzungen für einen niedrigen Partikel- bzw. HC-Ausstoß sind gegensätzlich zu den Voraussetzungen für einen niedrigen NO_x -Ausstoß.²⁰⁹ Die sekundäre Bildungsphase (Rußnachoxidation), die am Ende der Verbrennung stattfindet, spielt dabei eine wichtige Rolle. Die Rußnachoxidation wird durch eine gute Gemischbildungsenergie begünstigt und mindert die Partikel- bzw. HC-Bildung. Folgende Kriterien sind für eine gute Gemischbildungsenergie wichtig:

- gezielter Luftdrall (Turbulenz) im Brennraum
- höherer Einspritzdruck
- hohe Einspritzrate am Ende des Einspritzvorganges
- hohe Gleichverteilung des Luft-Kraftstoff-Gemisches

Diese vier Kriterien begünstigen jedoch die Stickstoffoxid-Bildung.²¹⁰

Feinstaub, ein Teil des Schwebstaubs der Luft, wird zum Großteil durch die Partikelemission von Pkw verursacht. Weitere Beiträge liefern Brennanlagen (Heizungen oder Industrieanlagen) sowie natürliche Ursachen wie z. B. Erosion und Waldbrände.²¹¹ In den Abbildungen 27 und 28 sind die Feinstaubemissionen in Deutschland in den Jahren 1995 bis 2014 nach Quellkategorien aufgelistet. Hier ist deutlich zu erkennen, dass in beinahe allen Kategorien die Menge an ausgestoßenem Feinstaub von Jahr zu Jahr gesunken ist – vor allem bei Feinstaub in der Größe $\text{PM}_{2,5}$.

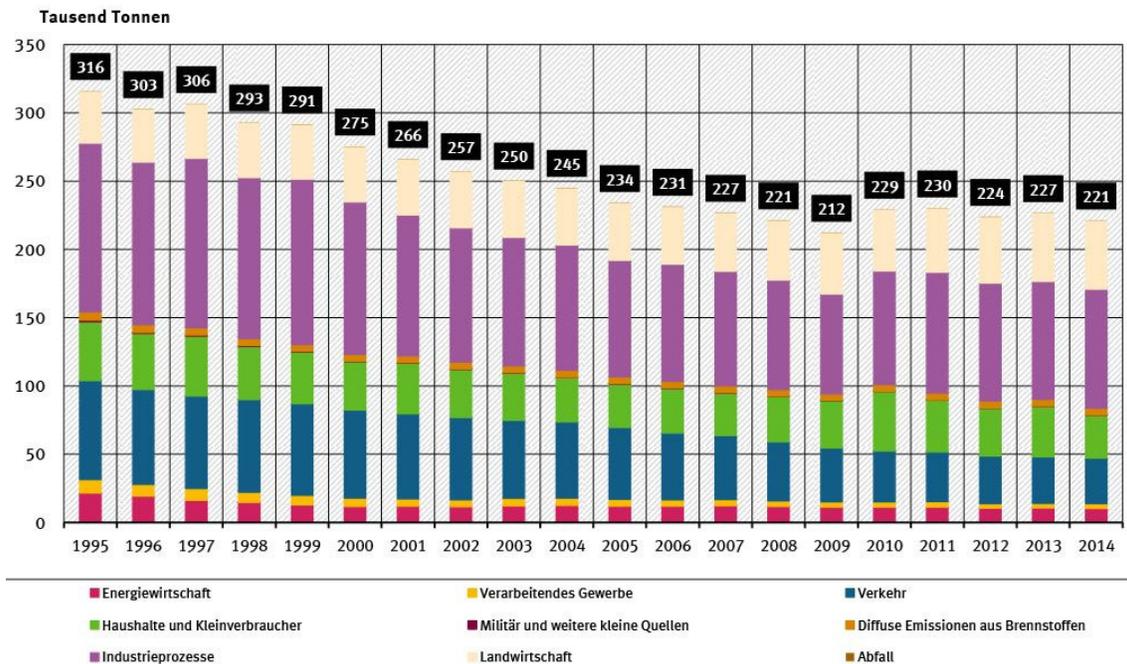
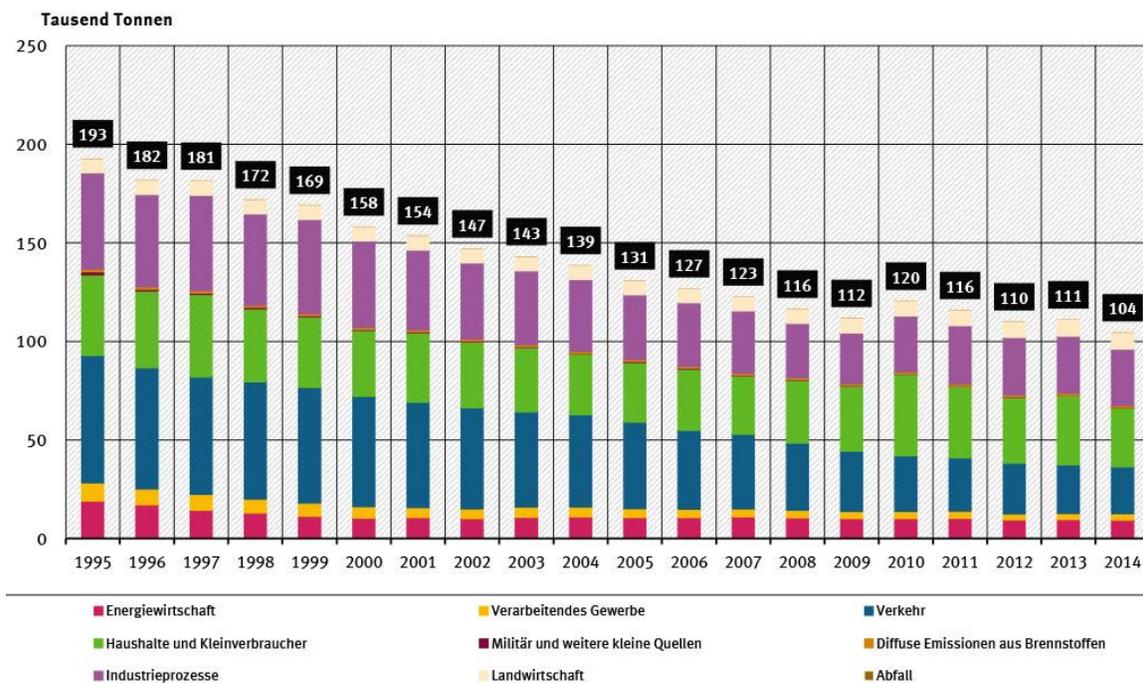
²⁰⁷ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.436

²⁰⁸ vgl. Reif, 2012a, S.495

²⁰⁹ vgl. Siebenpfeiffer, 2014, S.158

²¹⁰ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.829

²¹¹ vgl. Hilgers, 2016, S.41

Abbildung 27: Staubemissionen (PM₁₀) nach Quellkategorien (DE)²¹²Abbildung 28: Staubemissionen (PM_{2,5}) nach Quellkategorien (DE)²¹³

Seit den 1990er Jahren werden bei Pkw Rußpartikelfilter eingesetzt, um die hauptsächlich bei Dieselmotoren hervorgebrachten Feinstaubpartikel zu reduzieren.

212

<http://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/emission-von-feinstaub-der-partikelgroesse-pm10#textpart-1> (Gelesen am: 24.04.2017)

213

<http://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/emission-von-feinstaub-der-partikelgroesse-pm25#textpart-1> (Gelesen am: 24.04.2017)

Ungefähr zur gleichen Zeit werden Hochdruck-Einspritzsysteme bei Dieselmotoren vermehrt eingesetzt, die zwar die Leistung des Motors steigern und den Kraftstoffverbrauch herabsetzen, andererseits aber auch die Größe der emittierten Partikel so stark verkleinern, dass sie für Menschen zu einer erhöhten gesundheitlichen Gefahr werden.²¹⁴

4.3 Kohlenstoffmonoxid (CO)

Kohlenstoffmonoxid wird durch die unvollständige Verbrennung eines fetten Luft-Kraftstoff-Gemischs ($\lambda < 1,0$) – bedingt durch den lokalen Luftmangel – gebildet.²¹⁵ Es entsteht als Zwischenprodukt der Oxidation bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen und kann theoretisch bei stöchiometrischen bzw. überstöchiometrischen Verhältnissen ($\lambda = 1,0$ bzw. $\lambda > 1,0$) direkt vollständig zu Kohlenstoffdioxid (CO₂) oxidieren (siehe Gleichung 9).²¹⁶ Im Allgemeinen hängt die Kohlenstoffmonoxid-Bildung vom lokalen Luftverhältnis (λ), von der Temperatur und von dem Druck im Brennraum ab. Parameter wie Verdichtungsverhältnis, Lastzustand und Zündzeitpunkt haben einen geringfügigeren Einfluss auf die Kohlenstoffmonoxid-Bildung.²¹⁷

Bei $\lambda < 1,0$ steigt die Kohlenstoffmonoxid-Emission beinahe linear mit abnehmender Luftzahl (siehe Abb. 21). Kohlenstoffmonoxid kann außerdem aus einem mageren Gemisch ($\lambda > 1,0$) hervorgehen – jedoch mit einem sehr geringen Anteil und praktisch unabhängig vom Luft-Kraftstoff-Verhältnis.²¹⁸ Beim Dieselmotor ergeben sich durch die fehlende Homogenität des Gemischs (geschichtete Gemischaufbereitung) Bereiche mit einem Luftmangel, wodurch auch in diesen Bereichen Kohlenstoffmonoxid entsteht.²¹⁹ Der Kohlenstoffmonoxid-Anteil im Abgas des Dieselmotors beträgt etwa 0,043 Vol.-%. Beim Ottomotor macht er dagegen 0,7 Vol.-% aus (siehe Abb. 14).²²⁰

CO ist ein geschmack-, geruch- und farbloses Gas, welches die Sauerstoffaufnahmefähigkeit des Blutes hemmt, wodurch es zu einer Vergiftung des Körpers kommt.²²¹ Es bindet sich um den Faktor 240-300 stärker an Hämoglobin (O₂-Träger des Blutes) als sich Sauerstoff an Hämoglobin bindet. Aus diesem Grund

²¹⁴ vgl. Wallentowitz/Freialdenhoven, 2011, S.57

²¹⁵ vgl. Reif, 2012a, S.494

²¹⁶ vgl. Merker/Schwarz, 2009, S.191

²¹⁷ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.826

²¹⁸ vgl. Reif, 2012a, S.494

²¹⁹ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.828

²²⁰ vgl. Reif, 2012a, S.493

²²¹ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.437

können schon geringe CO Anteile in der Atemluft zum Erstickten führen.²²² Ein Atemluftanteil von 0,3 Vol.-% CO kann in weniger als 30 min zum Tod führen.²²³

Abb. 29 zeigt die Kohlenstoffmonoxid-Belastung in Österreich zwischen den Jahren 1998 und 2015.

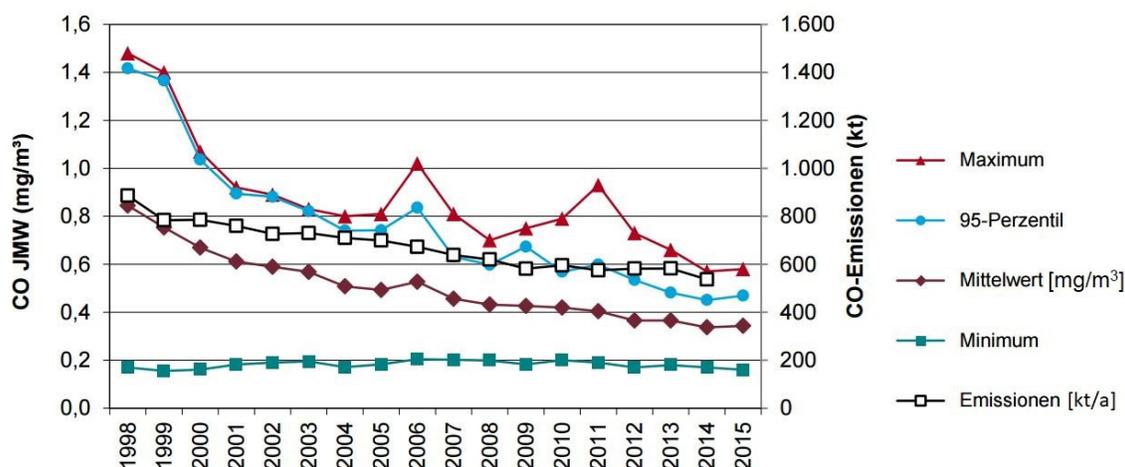


Abbildung 29: Trend der CO-Belastung und der CO-Emissionen in Österreich (AT)²²⁴

4.4 Kohlenstoffdioxid (CO₂)

CO₂ trägt maßgeblich zum ‚Treibhauseffekt‘ (siehe Kapitel 2) bei und zählt deshalb sowohl in Europa als auch in den meisten Industrieländern zu den limitierten Abgaskomponenten. Abb. 23 zeigt die Ziele einiger großer Kohlenstoffdioxidemittenten. Diese zukünftig vorgeschlagenen sowie bereits zum Teil festgelegten Grenzwerte für CO₂-Emissionen werden jährlich bei den UN-Klimakonferenzen vorgelegt.²²⁵

Kohlenstoffdioxid entsteht durch eine vollständige Verbrennung des Kraftstoffes, welcher hauptsächlich aus Kohlenstoffmolekülen besteht. Der Kohlenstoff (C) oxidiert mit dem Sauerstoff der angesaugten Luft (O₂) und verlässt den Auspuff als Kohlenstoffdioxid (CO₂). Die Kohlenstoffdioxid-Emission ist im Allgemeinen vom Verbrauch und von der Zusammensetzung des Kraftstoffes abhängig. Bei stöchiometrischen Verhältnissen ($\lambda = 1,0$) erreicht die Kohlenstoffdioxid-Bildung ihr Maximum.²²⁶

²²² vgl. Van Basshuysen, 2017, S.244

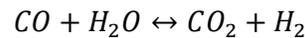
²²³ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.437

²²⁴ <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0562.pdf> S.49 (Gelesen am: 14.08.2017)

²²⁵ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.258

²²⁶ vgl. Lunanova, 2009, S.3

Die Bildung von CO_2 kann auch durch die ‚Wassergaskonvertierungsreaktion‘ zustande kommen:



Gleichung 9: Wassergas-Shift-Reaktion²²⁷

Der Dieselmotor hat gegenüber dem Ottomotor einen deutlich niedrigeren spezifischen Kraftstoffverbrauch und ein im Teillastbereich vorteilhafteres Verhalten, sodass es zu einem geringeren CO_2 -Ausstoß von 20 % kommen kann.²²⁸

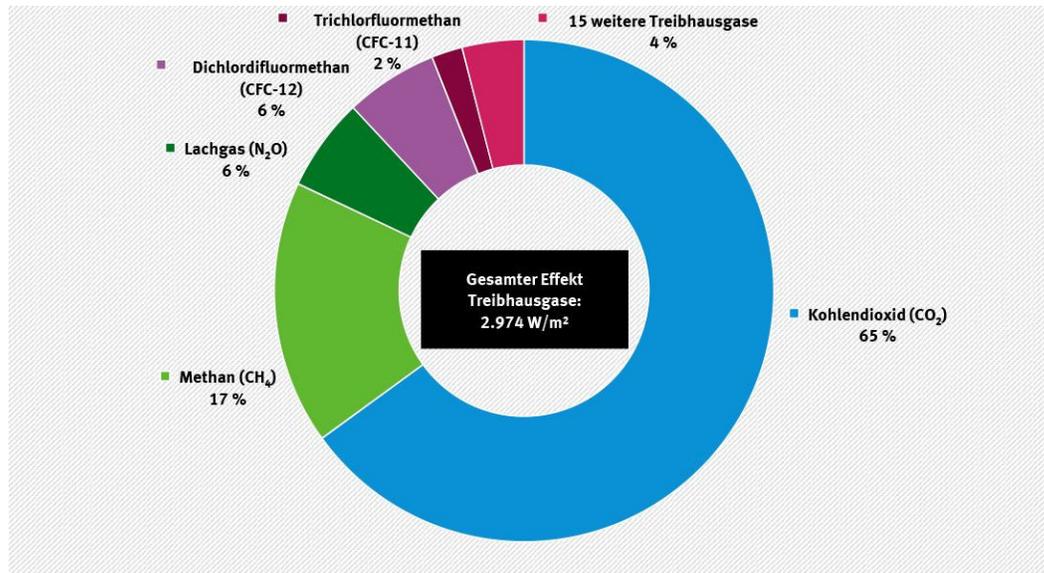


Abbildung 30: Beitrag zum Treibhauseffekt durch Kohlenstoffdioxid und durch langlebige Treibhausgase (anthropogen)²²⁹

Kohlenstoffdioxid macht etwa 65 % des anthropogenen Treibhauseffektes weltweit aus (siehe Abb. 30). Dieser Wert steigt durch die Industrialisierung und durch die Abhängigkeit von Rohöl, vor allem in Entwicklungsländern, jährlich an (siehe Abb. 31).

Um die Menge an Kohlenstoffdioxid, die sich bei der Verbrennung von einem Liter Diesel freisetzt, zu berechnen, muss man wie folgt vorgehen: 1 Liter Diesel wiegt in etwa 0,838 kg (siehe Tabelle 4). Im Diesel kommt beinahe ausnahmslos ein Kohlenstoffatom (C) auf zwei Wasserstoffatome (H). Die molare Masse von C ist 12 g/mol und die von H beträgt 1 g/mol, sodass der Kohlenstoffanteil im Diesel etwa 12/14 ist. Bei der Verbrennung von Diesel entstehen dann aus 12 g C etwa 44 g CO_2 , da ein Sauerstoffatom (O) eine molare Masse von etwa 16 g/mol hat.²³⁰ Mit dieser Zusammensetzung kommt man auf den Kohlenstoffdioxid-Ausstoß pro Liter Diesel:

²²⁷ Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.826

²²⁸ vgl. Ebenda, S.826ff

²²⁹ <http://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#textpart-4> (Gelesen am: 14.08.2017)

²³⁰ vgl. Hilgers, 2016, S.6

$$0,838 \text{ kg/l} * \left(\frac{12}{14}\right)_{\text{Masse C/C+H}} * \left(\frac{44}{12}\right)_{\text{Masse CO}_2/\text{C}} = 2,63 \text{ kg/l}$$

Gleichung 10: Kohlenstoffdioxid-Ausstoß pro Liter Diesel (ohne Emissionen der Bereitstellungskette)²³¹

Die Verbrennung von einem Liter Benzin produziert etwa 2,33 kg CO₂ (ohne Emissionen der Bereitstellungskette). Damit liegt der CO₂-Dieselmotorausstoß etwa 12 % höher als der des Benzinmotors. Der Grund dafür liegt in der höheren Dichte des Dieselkraftstoffes (DK) (siehe Tabelle 4 + 6).

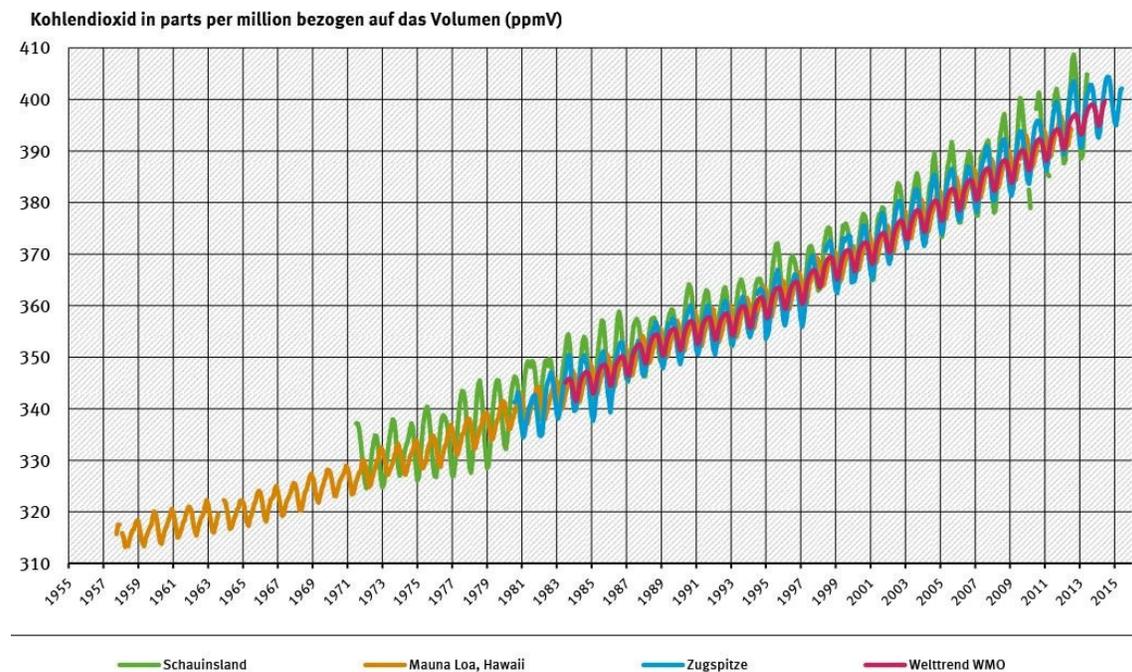


Abbildung 31: Zeitliche Änderung der Kohlenstoffdioxid-Konzentration in der Atmosphäre (Monatsmittel)²³²

4.5 Kohlenwasserstoffe (HC)

Wie bereits in Kapitel 3.2 erwähnt, bestehen Kraftstoffe grundsätzlich aus Gemischen aus Hunderten von verschiedenen Kohlenwasserstoffen unterschiedlicher Gruppen.²³³ Kohlenwasserstoffe setzen sich aus ring- oder kettenförmigen chemischen Verbindungen zusammen, die aus H- und C-Atomen entstehen. Zu den gasförmigen Kohlenwasserstoff-Emissionen gehören:

- unverbrannte Stoffe wie Aromate, Paraffine und Olefine
- teilverbrannte Stoffe wie Aldehyde und Ketone

²³¹ Hilgers, 2016, S.6

²³² <http://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#textpart-1> (Gelesen am: 14.08.2017)

²³³ vgl. Merker/Schwarz, 2009, S.115

- sowie thermische Crackprodukte wie Acetylen und Äthylen²³⁴

Un- und teilverbrannte Kohlenwasserstoffe können nicht nur aus dem Kraftstoff entstehen, sondern gelegentlich auch aus den eingesetzten Schmiermitteln.²³⁵ Während der Verbrennung können sich durch das Trennen von langen Molekülketten neuartige Kohlenwasserstoffverbindungen bilden, die im Kraftstoff anfangs nicht aufzufinden waren.²³⁶

HC-Emissionen entstehen oft aus einer nicht hinreichenden Aufbereitung des Kraftstoffes. Verantwortlich dafür sind:

- Anlagerungen vom Kraftstoff an den Wänden des Brennraums
- nicht ausreichende Zerstäubung während der Einspritzung (zu große Tropfenkollektive)
- ein unbeabsichtigtes Öffnen der Düsennadel (Nachspritzen)
- die Schichtladung bzw. das heterogene Gemisch des Dieselmotors (auch Ottomotor mit Direkteinspritzung) und die dadurch entstehenden mageren Zonen ($\lambda > 1,0$)²³⁷

Die Düsennadel übernimmt bei Vergasern die Luft-Kraftstoff-Gemischzusammensetzung. Sie wird je nach Lastzustand mehr oder weniger weit aus der Nadeldüse, auch Düsenloch genannt, herausgezogen. Die konische Nadel gibt je nach Stellung einen größeren oder kleineren Ringspalt frei, über den die Kraftstoffzufuhr erfolgt.²³⁸

Wie in Abbildung 17 zu sehen ist, entstehen bei einem Dieselmotor ($\lambda > 1,0$) innerhalb der ‚Flammenfront‘ keine messbaren Kohlenwasserstoff-Konzentrationen. Nur am Rand des Brennraums, wo die Luftzahl gegen unendlich geht, kann es zur HC-Bildung beim Dieselmotor kommen.²³⁹ Generell hat die HC-Bildung ein Minimum bei einer Luftzahl von $\lambda = 1,2$ (siehe Abb. 21).²⁴⁰

Eine hohe Verbrennungstemperatur führt zu einer deutlichen Reduktion der HC-Bildung. Insbesondere der Verdichtungsdruck – die Temperatur steigt linear mit der Verdichtung an – ist entscheidend. Der Dieselmotor hat gegenüber dem Ottomotor eine deutlich höhere Verdichtung – 30 bar bis 50 bar im Vergleich zu 8 bis 18 bar –

²³⁴ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.435f

²³⁵ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.826f

²³⁶ vgl. Reif, 2012a, S.494

²³⁷ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.435f

²³⁸ vgl. Siebenpfeiffer, 2014, S.133

²³⁹ vgl. Merker/Schwarz, 2009, S.192

²⁴⁰ vgl. Ebenda, S.189

sowie eine deutlich höhere Verbrennungstemperatur – 700 °C bis 900 °C im Vergleich zu 400 bis 600 °C. Er hat deswegen eine signifikant niedrigere HC-Emission.²⁴¹

Kohlenwasserstoffe gelten bei Dauereinwirkung als krebserregend, wenn sie aromatisch (benzoid) sind. Unverbrannte Kohlenwasserstoffe haben abhängig von ihrer Struktur eine narkotische Wirkung und können zudem zu Reizwirkungen in der Schleimhaut führen.²⁴² Kohlenwasserstoffe sind außerdem ein Mitverursacher für die Photosmogbildung (ungesättigte HC).²⁴³ Teilverbrannte Kohlenwasserstoffe wie Aldehyde oder Ketone haben einen auffälligen, unangenehmen Geruch und können durch die Einwirkung der Sonne zu Folgeprodukten umgewandelt werden, die dann krebserregend auf Menschen wirken.²⁴⁴

4.6 Schwefeldioxid (SO₂)

Schwefelverbindungen, in erster Linie Schwefeldioxid (SO₂), entstehen durch den Schwefelgehalt im Kraftstoff. Der Schwefeldioxidanteil ist im Abgas in den letzten Jahrzehnten so gut wie verschwunden. Im Vergleich zu 1995 ist heute nur noch etwa 1,9 % dieses Schadstoffes im Pkw Abgas zu finden (siehe Abb. 22). Die EU-Gesetzgebung hat diesen Schadstoff daher nicht mehr im Fokus.²⁴⁵

Schwefelverbindungen im katalytisch nachzubehandelnden Abgas haben oft eine Deaktivierung des Katalysatormaterials zur Folge. Motoren, die mit einer Direkteinspritzung arbeiten und zusätzlich einen NO_x-Speicherkatalysator haben, können eine Deaktivierung durch Sulfatisierung erfahren. Zur thermischen Reaktivierung des sulfatisierten Katalysatormaterials ist ein hoher Energieverbrauch notwendig, welcher die Vorteile bezüglich Kraftstoffverbrauch des Direkteinspritzers annulliert.²⁴⁶

Schwefeldioxid ist ein farbloses Gas mit einem sauren Geschmack und mit stechendem Geruch. In Kombination mit Wasser wird es zu schwefeliger Säure. Auf Menschen hat es eine unangenehme Reizwirkung und eine ätzende Wirkung auf die Schleimhaut.²⁴⁷

Bis Ende 1999 durften sowohl Benzin als auch Diesel in Europa einen Schwefelanteil von 500 ppm nicht überschreiten. Danach galt ein Wert von 150 ppm für Benzin und 350 ppm für Diesel als Norm. Ab 2005 verschärfte sich der Grenzwert für beide

²⁴¹ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.435f

²⁴² vgl. Van Basshuysen, 2017, S.244

²⁴³ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.438

²⁴⁴ vgl. Reif, 2012a, S.494

²⁴⁵ vgl. Ebenda, S.494f

²⁴⁶ vgl. Ebenda, S.494f

²⁴⁷ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.438

Kraftstoffe auf 50 ppm. Ein Schwefelanteil von ≤ 10 ppm wurde europaweit ab 2005 (in Deutschland schon ab 2003) flächendeckend verordnet.²⁴⁸

²⁴⁸ vgl. Reif, 2012a, S.495

5 Gesetzgebung und Prüfverfahren

„Seit zu Beginn der 1950er Jahre das Problem der Luftverschmutzung, ausgehend von Los Angeles, erstmals bekannt wurde, wurden im Laufe der Jahre weltweit Vorschriften zur Reinhaltung der Luft und Verminderung der Schadstoffemissionen von Kraftfahrzeugen eingeführt.“²⁴⁹

In Los Angeles setzten sich wegen der geografischen Lage Emissionen wie eine Dunstglocke über der Stadt fest und beschleunigten dadurch die Smogbildung.²⁵⁰ Die 1959 in Kalifornien definierten „Air Quality Standards“ haben zu der Einführung der Emissionsgrenzwerte für Kfz geführt, welche ab 1966 ebendort rechtswirksam wurden. Ab 1968 gab es in den gesamten USA festgeschriebene Emissionsgrenzwerte („Clean Air Act“). Seitdem wurden fast jährlich weitere Verschärfungen bezüglich der Grenzwerte verordnet.²⁵¹

In den 1960er-Jahren wurde erstmals in Europa über die Gefahren des Kohlenstoffmonoxid-Ausstoßes (CO) gesprochen. Dies hatte eine Begrenzung der unverbrannten Kohlenstoffverbindungen – wie Kohlenstoffmonoxid und Kohlenwasserstoffe (HC) – zur Folge.²⁵² Der tendenzielle Anstieg der aus Verbrennungsprozessen hervorgehenden Spurengase und deren Fernverfrachtung zogen nach sich, dass in den 1970er und 80er Jahren auch durch sauren Regen und Photooxidantien Schäden an Baumbeständen verursacht wurden. Da diese Stoffe auch durch Stickstoffoxide und unverbrannte Kohlenwasserstoffe entstehen können, zieht dies einen unmittelbaren Handlungsbedarf hinsichtlich der Reduzierung der Emissionen auch dieser Stoffe nach sich.²⁵³

Gesetzliche Beschränkungen hinsichtlich der Geräuschemission von Pkw gibt es in Deutschland und Österreich seit 1958. Die Begrenzungen bezüglich der Pkw-Schadstoffe wurden 1971 in den meisten europäischen Ländern (dazu zählten Deutschland und Österreich) per Gesetz beschlossen. Wie in den USA wurden in Europa seitdem weitere Verschärfungen unternommen. Der Verbrennungsmotor musste sich dementsprechend weiterentwickeln.²⁵⁴ Erst Anfang der 1990er-Jahre gewann die u. a. durch CO₂-Emissionen des Verkehrs verursachte anthropogene Erderwärmung umweltrelevante Bedeutung; dies führte zu einer Begrenzung der THG-Emissionen.²⁵⁵

²⁴⁹ Van Basshuysen, 2017, S.248

²⁵⁰ vgl. Reif, 2012a, S.496

²⁵¹ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.248

²⁵² vgl. Siebenpfeiffer, 2014, S.133

²⁵³ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.817f

²⁵⁴ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.248

²⁵⁵ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.817

In den letzten Jahren waren in manchen Regionen Europas eine deutliche Erhöhung der Feinstaub-Konzentration (PM₁₀) zu verzeichnen und dies führte zu einer deutlichen Verschärfung regionaler PM₁₀-Grenzwerte. In Stuttgart z. B. wird es ab 2018 an Feinstaubtagen ein Fahrverbot für Dieselfahrzeuge geben, welche die Euro-6 Norm (siehe Tabelle 10) nicht erfüllen können.²⁵⁶

Im Wesentlichen gibt es folgende Abgasgesetzgebungen die überregionale Bedeutung erlang haben (Abb. 32):

- CARB (California Air Resources Board), Kalifornien
- EPA (Environmental Protection Agency), USA
- EU-Gesetzgebung
- Japan-Gesetzgebung²⁵⁷

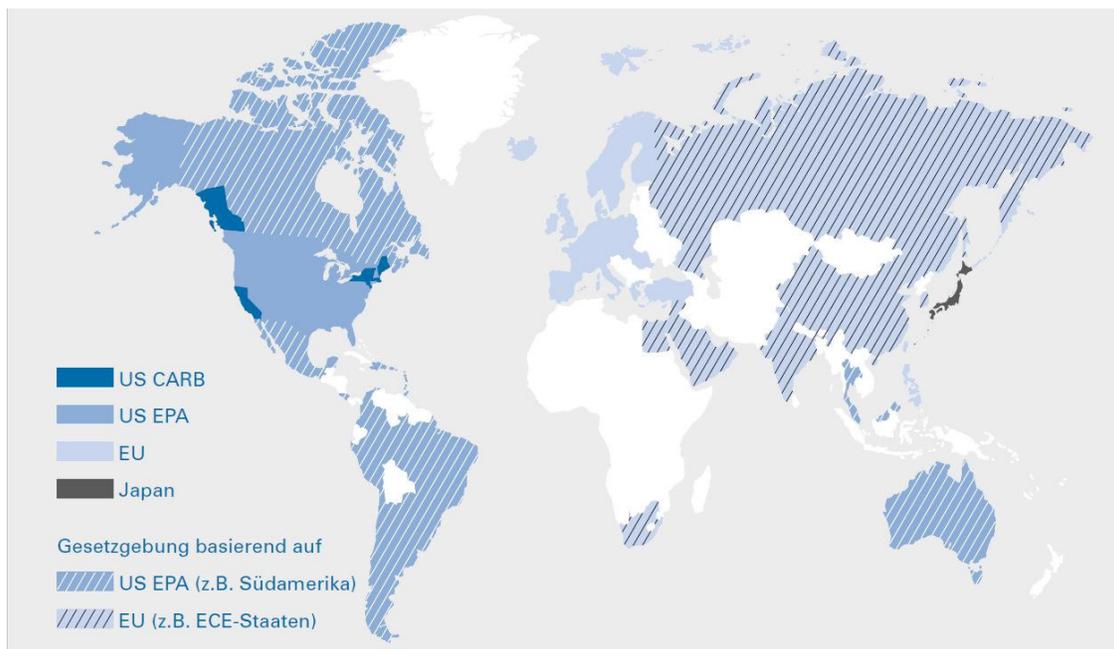


Abbildung 32: Geltungsbereiche der verschiedenen Abgasgesetzgebungen für Pkw und leichte Nkw²⁵⁸

5.1 Prüfverfahren

Es gibt drei Hauptprüfungen für Fahrzeughersteller, die per Gesetz festgeschrieben sind. Sie unterscheiden sich je nach Fahrzeugklasse und Zweck der Prüfung:

- Die Typprüfung (TA, engl. Type Approval), um die allgemeine Betriebserlaubnis für einen Fahrzeug- und Motortyp zu erhalten,

²⁵⁶ vgl. <http://www.swr.de/swraktuell/bw/fahrverbote-wegen-feinstaub-in-stuttgart-muss-ihr-wagen-stehen-bleiben/-/id=1622/did=19060952/nid=1622/19lxaw9/> (Gelesen am: 14.08.2017)

²⁵⁷ vgl. Reif, 2012a, S.496

²⁵⁸ vgl. Siebenfeiffer, 2014, S.162

- die Serienprüfung als strichprobenartige Inspektion während der laufenden Fertigung („Conformity of Production“) und
- die Feldüberwachung, die während des Fahrbetriebs eine konstante Abgasprüfung durchführt.²⁵⁹

5.1.1 Typprüfung - Testzyklen

In geradezu allen Ländern mit hohem Motorisierungsgrad gibt es gesetzliche Regulierungen hinsichtlich der Schadstoffemission. Damit die Kraftfahrzeuge reproduzierbar und vergleichbar sind, werden die Schadstoffe nach genauen Testzyklen (Prüfverfahren) analysiert. Das reale Fahrverhalten wird in diesen Testzyklen so gut wie möglich nachgebildet. 1966 gelangte in Kalifornien der erste Testzyklus – ‚California-Testzyklus‘ – zur Durchführung.²⁶⁰

Die bekanntesten Testzyklen sind:

- US-Procedure FTP 75 und US-Highway mit den Zusätzen SC03 (Klimaanlage) und US06 (aggressive Fahrweise)
- Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ) – WLTP bzw. WLTC ab 01.09.2017
- Japanischer 10/15-Mode Heißtest und 11-Mode Kalttest²⁶¹

Seit 1997 gilt in Europa der gesetzlich vorgegebene ‚Neue Europäische Fahrzyklus‘ (NEFZ) für Kraftfahrzeughersteller, bei dem die Schadstoff- und CO₂-Emissionen sowie der Kraftstoffverbrauch vom Hersteller ermittelt werden müssen, damit es zur Zulassung und zum Vertrieb der Fahrzeuge kommen kann.²⁶² Da in den letzten Jahren mit mehreren Spritmonitortests gezeigt wurde, dass dieser Fahrzyklus den realen Fahrbetrieb deutlich verfehlt, wird ein neuer Testzyklus ab 01.09.2017 zum Einsatz gelangen.²⁶³

Dieser Zyklus nennt sich WLTP bzw. WLTC (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure bzw. Cycle) – zu Deutsch ‚weltweit einheitliches Testverfahren für leichtgewichtige Nutzfahrzeuge‘ – und soll das reale Fahrverhalten deutlich besser imitieren (siehe Abb. 33).²⁶⁴ Um ein so reales Fahrverhalten wie möglich zu gewährleisten, werden beim WLTP im realen Verkehr (RDE, Real Driving Emissions) portable Emissionsmesssysteme (PEMS, Portable Emission Measurement System) im bzw. am Kofferraum eingebaut um die Luftschadstoffemissionen quantifizieren zu können (siehe Kapitel 5.4.2).²⁶⁵

²⁵⁹ vgl. Reif, 2012a, S.497

²⁶⁰ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.248

²⁶¹ vgl. Ebenda, S.249

²⁶² vgl. Siebenpfeiffer, 2014, S.133

²⁶³ vgl. Borgeest, 2016, S.197

²⁶⁴ vgl. Siebenpfeiffer, 2014, S.134

²⁶⁵ vgl. Borgeest, 2016, S.197

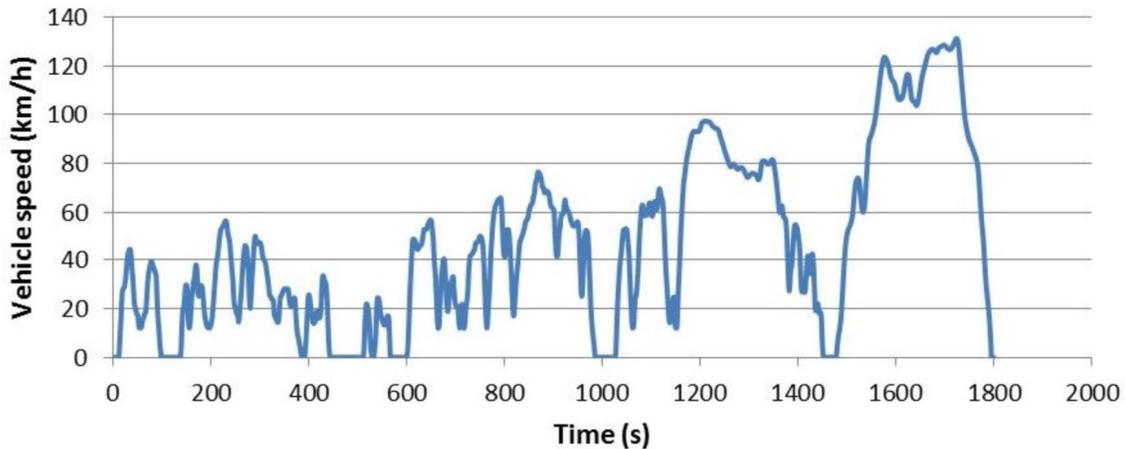


Abbildung 33: WLTP – Worldwide harmonized light-duty vehicles test procedures, class 3²⁶⁶

Die Hauptmerkmale des WLTP sind:

- Distanz: 23,262 km
- Dauer: 1800 s
- Durchschnittsgeschwindigkeit: 46,5 km/h

5.1.2 Serienprüfung

Größtenteils wird die Serienprüfung vom Fahrzeughersteller selbst als eine Komponente der Qualitätskontrolle erledigt. Dabei werden im Allgemeinen die gleichen Prüfungen und Grenzwerte wie in der Typprüfung verwendet. Nachprüfungen können nach Wunsch der Zulassungsbehörde in Auftrag gegeben werden. Die EU-Gesetzgebung – ECE-Richtlinie (United Nations Economic Commission for Europe) – sieht vor, dass stichprobenartige Messungen an drei bis maximal 32 Fahrzeugen vorgenommen werden, um die Fertigungsstreuung zu analysieren. In den USA – und insbesondere in Kalifornien – wird ein noch höherer Anspruch an die Serienprüfung gesetzt.²⁶⁷

5.1.3 Feldüberwachung

Bei der Feldüberwachung werden stichprobenartig Fahrzeuge für eine Emissionskontrolle selektiert. Das Alter und die Laufleistung dieser Fahrzeuge müssen innerhalb vorgesehener Grenzen liegen. Die Emissionskontrolle der Feldüberwachung ist einfacher gestaltet als die der Typprüfung.²⁶⁸

²⁶⁶ <http://www.car-engineer.com/the-different-driving-cycles/> (Gelesen am: 14.08.2017)

²⁶⁷ vgl. Reif, 2012a, S.497

²⁶⁸ vgl. Szikora, 2015, S.15

5.2 Gesetzgebung – Europa

Die EU-Kommission hat Grenzwerte für folgende Schadstoffe in Abgasen von Pkw verordnet (siehe Tab. 10): Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Stickstoffoxide (NO_x) und Partikelmasse bzw. -anzahl

	Schadstoff in g/km	Euro-4	Euro-5	Euro-6
Typprüfung		01.01.2005	01.09.2009	01.09.2014
Serienprüfung		01.01.2006	01.01.2011	01.09.2015
Richtlinie/ Verordnung (VO)		98/69/EG	VO EG 715/2007** i.V. mit VO EG 692/2008 und VO EG 459/2012	
Benzin	CO	1	1	1
	HC + NO _x	-	-	-
	THC	0,1	0,1	0,1
	NO _x	0,08	0,06	0,06
	Partikel- masse (PM)	-	0,0045	0,0045
	Partikelanzahl (PN) (in Anzahl/km)	-	-	6,0 x 10 ¹¹
	NMHC	-	0,068	0,068
Diesel	CO	0,5	0,5	0,5
	HC + NO _x / THC + NO _x (ab Euro 5)	0,3	0,23	0,17
	NO _x	0,25	0,18	0,08
	Partikel- masse (PM)	0,025	0,0045	0,0045
	Partikelanzahl (PN) (in Anzahl/km)	-	6,0 x 10 ¹¹	6,0 x 10 ¹¹

Tabelle 10: Grenzwerte für Schadstoffemissionen von Pkw (EU)²⁶⁹

THC: Total Hydrocarbons bzw. gesamte Menge der Kohlenwasserstoffe

NHMC: Non-Methane-Hydrocarbons bzw. Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe

²⁶⁹ vgl. <http://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/pkw-leichte-nutzfahrzeuge> (Gelesen am: 24.03.2017)

Die EU-Kommission bestimmt die Richtlinien der europäischen Abgasgesetzgebung, die ihren Ursprung für neue Pkw und leichte Nkw in der Richtlinie 70/220/ECE aus dem Jahr 1970 hat. Darin waren die von der ECE festgelegten Grenzwerte für Abgasemissionen (ECE R15) zu finden.²⁷⁰

In der Richtlinie ECE R15 sind erstmals Emissionsgrenzwerte für Kohlenstoffmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffe (HC) durch die EU-Kommission festgelegt worden. Dann sind mit der Einführung der Richtlinie ECE R15/04 im Jahr 1981 die Grenzwerte für CO weiter gesunken, während die Grenzwerte für HC und Stickstoffoxide (NO_x) vereint wurden. Dazu kamen ab 1985 in vielen europäischen Ländern steuerliche Vorteile für Ottomotoren, die mit einem Katalysator ausgestattet waren. Mit dem Euro-1-Standard (ab 01.07.1992) und dem Euro-2-Standard (ab 01.01.1996) wurden unter der neuen Richtlinie 93/59/ECE verschärfte Grenzwerte eingeführt, die mit den steuerlichen Vorteilen dazu geführt haben, dass die meisten neuen europäischen ottomotorischen Fahrzeuge mit geregelten Drei-Wege-Katalysatoren ausgestattet waren.²⁷¹

Ab dem 01.01.2000 war der Euro-3-Standard (Richtlinie 98/69/ECE) die Norm. Mit ihr kam die Einführung einer On-Board-Diagnose (OBD), die dem US-Standard sehr ähnelte. Der Euro-4-Standard wurde am 01.01.2005 eingeführt (siehe Tabelle 10), am 01.09.2009 folgte der Euro-5-Standard, der erstmals einen Grenzwert für die Partikelmasse für Ottomotoren beinhaltete. Der derzeit gültige Euro-6-Standard (seit 01.09.2014) begrenzt erstmalig die Partikelanzahl (PN) im Abgas des Ottomotors. Sonst hat sich gegenüber dem Euro-5-Standard nur der THC + NO_x- und der NO_x-Grenzwert beim Dieselmotor verringert. Beim Ottomotor ist alles gleich geblieben. Wenn man die heutigen Grenzwerte mit denen des Euro-3-Standards (vor ca. 17 Jahren) vergleicht, haben z. B. CO, NO_x und HC (bzw. THC) eine Senkung von über 40 % erfahren.²⁷²

Der per Gesetz im EG-Raum festgeschriebene Testzyklus NEFZ – auch NEDC (New European Driving Cycle) oder MVEG (Motor Vehicle Emissions Group) genannt – setzt sich aus zwei Teilen zusammen: Teil 1 – der innerstädtische Fahrzyklus – wird bis 800 s lang gefahren und Teil 2 – der außerstädtische Fahrzyklus – kommt im Anschluss (siehe Abb. 34). Der innerstädtische Fahrzyklus fängt mit einem Kaltstart an, enthält sehr hohe Leerlaufanteile bzw. Schubbetrieb (31 %) und wiederholt sich insgesamt viermal. Die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit liegt bei nur 19 km/h.²⁷³

²⁷⁰ vgl. Reif, 2012a, S.504

²⁷¹ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.817

²⁷² vgl. Van Basshuysen, 2017, S.249f

²⁷³ vgl. Ebenda, S.251

Teil 2 – auch Extra Urban Driving Cycle (EUDC) genannt – wurde erst 1992 eingeführt und enthält Geschwindigkeiten von bis zu 120 km/h. Dieser Fahrzyklus wird aber nur einmal durchfahren und simuliert das Fahren auf Landstraßen und Autobahnen.²⁷⁴

Der NEFZ-Fahrzyklus meidet starke Beschleunigungen, die zu einem größeren Partikelaustritt führen. Darüber hinaus werden Geschwindigkeiten von 120 km/h nicht überschritten, bei denen der NO_x-Ausstoß äußerst hoch wird.²⁷⁵

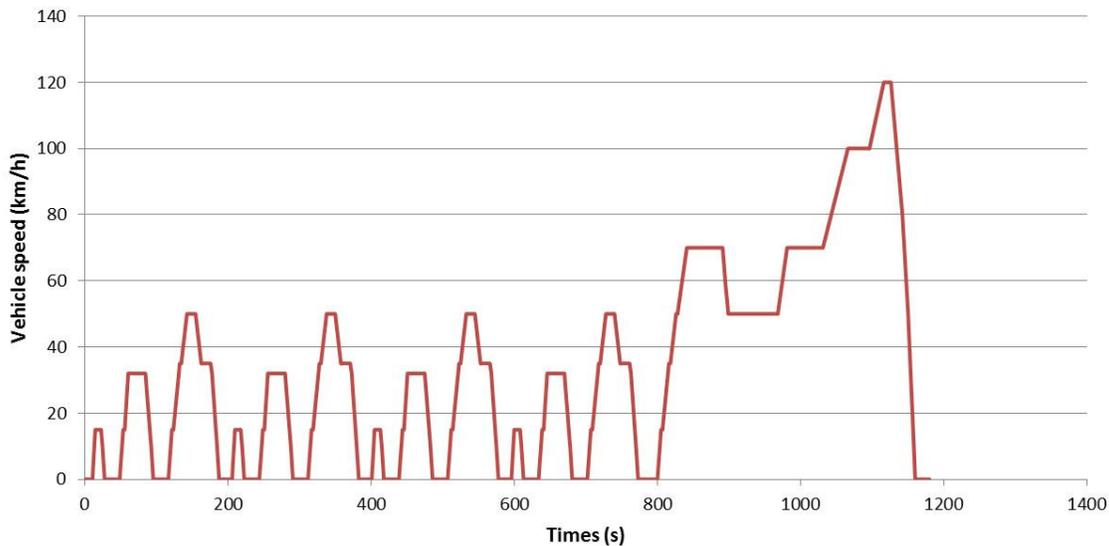


Abbildung 34: NEFZ – Neuer Europäischer Fahrzyklus²⁷⁶

Die Hauptmerkmale des NEFZ sind:

- Distanz: 11,023 km
- Dauer: 1180 s
- Durchschnittsgeschwindigkeit: 33,6 km/h

5.2.1 CO₂-Emission

Da CO₂ nicht als Schadstoff klassifiziert ist, waren bis vor Kurzem keine Grenzwerte per Gesetz festgeschrieben. Die EU-Kommission hat aber dann vor einigen Jahren beschlossen, dass bis 2015 der CO₂-Ausstoß auf 120 g/km und ab 2021 auf 95 g/km limitiert werden soll. 95 g/km entsprechen etwa 4,1 l/100 km Benzin bzw. 3,6 l/100 km Diesel. Das würde im Vergleich zum durchschnittlichen Ausstoß von 2007 (158,7 g/km) eine Verringerung um etwa 40 % ausmachen.²⁷⁷

²⁷⁴ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.251

²⁷⁵ vgl. Borgeest, 2016, S.197

²⁷⁶ <http://www.car-engineer.com/the-different-driving-cycles/> (Gelesen am: 14.08.2017)

²⁷⁷ vgl. https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars_de (Gelesen am: 12.04.2017)

5.2.2 Periodische Abgasuntersuchung (AU)

In Deutschland muss nach Kauf eines Pkw nach drei Jahren eine Abgasuntersuchung vollzogen werden. Danach müssen im Abstand von zwei Jahren Abgaswerte erneut untersucht werden. In Österreich gilt die 3-2-1 Regelung, nach der wie in Deutschland die erste Untersuchung nach drei Jahren stattfindet, die zweite zwei Jahre später und danach jede Untersuchung im jährlichen Abstand.²⁷⁸ Beim Ottomotor wird viel Wert auf die Kohlenstoffmonoxid-Messung gelegt – beim Dieselmotor hingegen auf die Rauchgas-Trübungsmessung (Rußanteil im Abgas). Dazu kommt eine Untersuchung des On-Board-Diagnose-Systems (OBD), damit während des Fahrzeugbetriebs alle abgasrelevanten Systeme garantiert funktionieren.²⁷⁹

5.3 Gesetzgebung – USA

„Kalifornien hat aufgrund seiner besonderen klimatischen Verhältnisse immer eine Vorreiterrolle bei der Abgasgesetzgebung eingenommen und die US-Emissionsgesetzgebung wesentlich beeinflusst.“²⁸⁰

Mit dem ‚Clean Air Act‘ im Jahr 1968 wurden erstmals in den gesamten USA Grenzwerte festgelegt, die 1977 erneuert wurden. Mit dieser Überarbeitung wurde eine 90-prozentige Verminderung der Schadstoffemissionen vorgeschrieben, die dazu führte, dass alle Fahrzeughersteller ihre ottomotorischen Pkw mit Drei-Wege-Katalysatoren ausstatteten. Seit Inkrafttreten dieser Regelung werden alle Abgaswerte (Massenemissionen) nach dem FTP-75-Testzyklus (Federal Test Procedure) berechnet. Mit den in den Jahren 1994 und 1998 neu definierten und verschärften Grenzwerten wurde auch die On-Board-Diagnose (OBD) eingeführt. Mit ihr konnten alle emissionsrelevanten Komponenten des Fahrzeugs kontinuierlich auf Fehler (Eigendiagnose) untersucht werden.²⁸¹

Abb. 35 zeigt die über die letzten zwei Jahrzehnte von der CARB und EPA vorgelegten Abgasnormen.



Abbildung 35: EPA & CARB²⁸²

²⁷⁸ vgl. Szikora, 2015, S26

²⁷⁹ vgl. Reif, 2012a, S.506

²⁸⁰ Van Basshuysen, 2017, S.251

²⁸¹ vgl. Ebenda, S.251

²⁸² <http://delphi.com/docs/default-source/worldwide-emissions-standards/delphi-worldwide-emissions-standards-passenger-cars-light-duty-2016-7.pdf> S.3 (Gelesen am: 07.08.2017)

5.3.1 CARB

Die zuständige Behörde für Luftreinhaltung in Kalifornien – CARB (California Air Resources Board) – legt für Pkw und leichte Nkw (LDT, Light-Duty Trucks) folgende Abgasnormen fest:

- LEV I
- LEV II
- LEV III (LEV: Low Emission Vehicle)

Die Norm LEV I war von 1994 bis 2003 für Pkw und Nkw bis 6.000 lb (ca. 2.700 kg) Gesamtgewicht gültig. Ab 2004 war die Norm LEV II für neue Fahrzeuge bis zu einem Gesamtgewicht von 14.000 lb (ca. 6.350 kg) geltend. 2015 wurde die aktuelle Norm LEV III eingeführt (siehe Tabelle 11), die wieder nur für Fahrzeuge bis 8.500 lb (ca. 3.850 kg) bindend ist.²⁸³

Folgende Schadstoffe sind durch die CARB-Gesetzgebung begrenzt:

- Kohlenstoffmonoxid (CO)
- Stickstoffoxide (NO_x)
- nicht-methanhaltige organische Gase – Non-Methane Organic Gas (NMOG)
- Formaldehyd (HCHO) ab LEV II
- Partikelmasse (PM) – Ottomotor erst ab LEV II²⁸⁴

Die Grenzwerte sind zusätzlich in Abgaskategorien unterteilt:

- Tier 1 (nur LEV I)
- TLEV (Transitional Low-Emission Vehicle; nur LEV I)
- LEV (Low-Emission Vehicle, d. h. Fahrzeuge mit niedrigen Abgas- und Verdunstungsemissionen)
- ULEV (Ultra-Low-Emission Vehicle)
- SULEV (Super Ultra-Low-Emission Vehicle)²⁸⁵

Dazu gibt es drei weitere Kategorien von emissionsfreien bzw. fast emissionsfreien Fahrzeugen:

- ZEV (Zero-Emission Vehicle, d. h. Fahrzeuge ohne Abgas- und Verdunstungsemissionen) wie z. B. Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge
- PZEV (Partial ZEV, entspricht im Wesentlichen SULEV, jedoch höhere Anforderungen bezüglich Verdunstungsemissionen und Dauerhaltbarkeit)

²⁸³ vgl. Reif, 2012a, S.498

²⁸⁴ vgl. Szikora, 2015, S.44

²⁸⁵ vgl. Reif, 2012a, S.498f

- AT-PZEV (Advanced Technology PZEV, wie z. B. Hybride)²⁸⁶

Das ZEV-Mandat wurde 2005 eingeführt, um den Anteil an Fahrzeugen mit geringer Emission sowie an Fahrzeugen, die emissionsfrei sind, zu forcieren. Da dieses ZEV-Mandat für mittelgroße Fahrzeughersteller unerreichbar war, wurde ein PZEV (Partial Zero Emission Vehicle) eingeführt, welches dem SULEV ähnelt, aber keine Verdunstungsemission des Kraftstoffes aufweist. Die großen Fahrzeughersteller müssen aber wachsende Stückzahlen an AT-PZEV und ZEV produzieren. Das SULEV-Mandat hat die derzeit niedrigsten zugelassenen Grenzwerte aller Mandate in Kalifornien und wird in einigen weiteren Staaten der USA übernommen. Mit SULEV kann die Emission theoretisch bis zu 99 % gesenkt werden.²⁸⁷

Pkw Haltbarkeit	Emissions-Kategorie	CO [g/mi]	NMOG + NO _x [g/mi]	HCHO [mg/mi]	PM [g/mi]
150.000 mi	LEV160	4,2	0,16	4	0,01
	ULEV125	2,1	0,125	4	0,01
	ULEV70	1,7	0,07	4	0,01
	ULEV50	1,7	0,05	4	0,01
	SULEV30	1,0	0,03	4	0,01
	SULEV20	1,0	0,02	4	0,01

Tabelle 11: Grenzwerte für Schadstoffemissionen – LEV III FTP Standards²⁸⁸

5.3.2 EPA

Die US EPA (Environmental Protection Agency) legt für Pkw und leichte Nkw (LDT, Light-Duty Trucks) Abgasnormen fest (siehe Tabelle 12), die bundesweit gelten. Einige Staaten – New York, New Jersey, Vermont, Arizona, Connecticut, Maine, Maryland, Massachusetts, New Mexico, Oregon, Pennsylvania, Rhode Island, Washington und District of Columbia – haben die strengere kalifornische CARB-Gesetzgebung implementiert.²⁸⁹

Seit 2004, als Tier 2 bundesweit eingeführt wurde, haben Fahrzeuge mit Otto- und Dieselmotoren die gleichen Abgasgrenzwerte. Tier 2 hat folgende Änderungen zusätzlich bewirkt:

- ein Flottendurchschnitt für NO_x wird eingeführt
- Formaldehyd (HCHO) wird als einzelner Schadstoff gesehen und bekommt dadurch seine eigene Kategorie

²⁸⁶ vgl. Reif, 2012a, S.499

²⁸⁷ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.252

²⁸⁸ vgl. <http://delphi.com/docs/default-source/worldwide-emissions-standards/delphi-worldwide-emissions-standards-passenger-cars-light-duty-2016-7.pdf> S.21 (Gelesen am: 01.04.2017)

²⁸⁹ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.251

- Pkw und leichte Nkw bis 6.000 lb (ca. 2.700 kg) werden als eine Fahrzeugklasse erklärt²⁹⁰

Pkw Haltbarkeit	Emissions-Kategorie	CO [g/mi]	NMOG + NO _x [g/mi]	HCHO [mg/mi]	PM [mg/mi]
150.000 mi	Bin 160	4.2	0.16	4	3
	Bin 125	2.1	0.125	4	3
	Bin 70	1.7	0.07	4	3
	Bin 50	1.7	0.05	4	3
	Bin 30	1,0	0.03	4	3
	Bin 20	1,0	0.02	4	3
	Bin 0	0	0	0	0

Tabelle 12: Grenzwerte für Schadstoffemissionen von – TIER 3 FTP Standards²⁹¹

5.3.3 FTP-75 Testzyklus

Der aktuelle Testzyklus der EPA heißt FTP-75 (Federal Test Procedure 75) und wird seit 1978 eingesetzt. Dieser Test (siehe Abb. 36) besteht aus drei Phasen:

- Phase 1 ist die ‚Cold Start Phase‘ (Kaltstartphase) und ist nach 505 s beendet
- Phase 2 ist die ‚Transient Phase‘ (Übergangsphase) und ist nach 1372 s beendet
- Phase 3 ist die ‚Hot Start Phase‘ (Heißstartphase) und wiederholt die erste Phase.

Die ersten zwei Phasen werden als UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule) bezeichnet.²⁹² Hinzu kommt zwischen der zweiten und der dritten Phase eine zehnminütige Leerlauf- bzw. Standzeit.²⁹³

Der Anteil der Leerlaufzeit (17,9 %) ist hier deutlich niedriger als beim europäischen Standard (NEFZ), weshalb die Anteile für Verzögerung (Abbremsen) und Beschleunigung größer sind.²⁹⁴

Die Hauptmerkmale des FTP-75 sind:

- Distanz: 11,04 Meilen (ca. 17,77 km), davon 7,5 Meilen (UDDS)
- Dauer: 1874 s
- Durchschnittsgeschwindigkeit: 21,2 mph (ca. 34,1 km/h)

²⁹⁰ vgl. Reif, 2012a, S.502f

²⁹¹ vgl. <http://delphi.com/docs/default-source/worldwide-emissions-standards/delphi-worldwide-emissions-standards-passenger-cars-light-duty-2016-7.pdf> S.16 (Gelesen am: 03.07.2017)

²⁹² vgl. Eichelseder/Klüting/Piock, 2008, S.4f

²⁹³ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.253

²⁹⁴ vgl. Ebenda, S.254

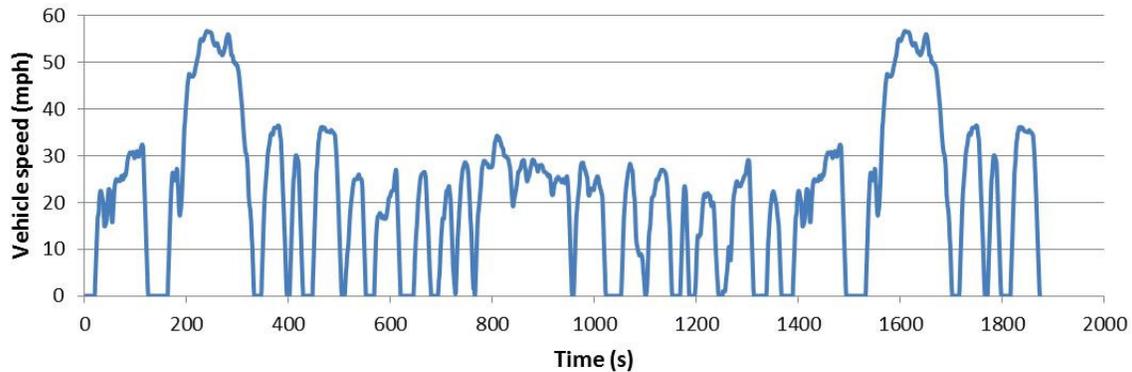


Abbildung 36: FTP-75 (Federal Test Procedure)²⁹⁵

5.4 Abgasmesstechnik

Um die allgemeine Betriebserlaubnis für Pkw und leichte Nkw zu bekommen, müssen Fahrzeughersteller eine Typprüfung durchführen, bei der die Abgaswerte auf Rollenprüfständen gemessen werden.²⁹⁶ Ab September 2017 – mit der Einführung des neuen WTLP-Fahrzyklus – werden mobile Messgeräte (PEMS, Portable Emission Measurement System), die im bzw. am Kofferraum angebracht sein werden, normbestimmend.²⁹⁷

Den größten Ausstoß hat ein modernes Fahrzeug mit Abgasnachbehandlung innerhalb der ersten Minute, wenn das Fahrzeug einen ‚Kaltstart‘ vollführt. Das Abgasnachbehandlungssystem zeigt erst ab einer Abgastemperatur von einigen 100 °C Wirkung und mindert dann den Schadstoffausstoß um bis zu 98 %. Sowohl beim Rollenprüfstand als auch bei der PEMS-Technik wird auf Grundlage eines Kaltstarts gemessen. Dafür muss das Fahrzeug mindestens sechs Stunden lang ohne Betrieb bei einer Außentemperatur von 20 °C bis 30 °C stehen.²⁹⁸

5.4.1 Rollenprüfstand

Der Rollenprüfstand hat einige Vorteile im Vergleich zur Messung während einer tatsächlichen Straßenfahrt:

- Die Umgebungsbedingungen bleiben konstant und bieten somit eine gute Reproduzierbarkeit der Abgaswerte.
- Die Abgaswerte können leicht zum Vergleich herangezogen werden, da ein genauer Fahrzyklus eingehalten wird.

²⁹⁵ <http://www.car-engineer.com/the-different-driving-cycles/> (Gelesen am: 14.08.2017)

²⁹⁶ vgl. Reif, 2015a, S.140

²⁹⁷ vgl. Szikora, 2015, S.45

²⁹⁸ vgl. Paulweber/Lebert, 2014, S.97

- Es muss kein mobiles Messgerät am Fahrzeug installiert werden.²⁹⁹

Zu den Nachteilen zählt die sehr große und teure Installation des Rollenprüfstandes.

Das Verfahren, das weltweit am häufigsten eingesetzt wird, um Abgaswerte von einem Rollenprüfstand aus zu messen, ist das CVS-Verdünnungsverfahren (Constant Volume Sampling).³⁰⁰ 1972 in den USA erstmals vorgestellt, wurde das CVS-Verfahren für Pkw und leichte Nkw zur Abgasmessung herangezogen. 1982 wurde dann eine überarbeitete Version auch in Europa eingeführt.³⁰¹

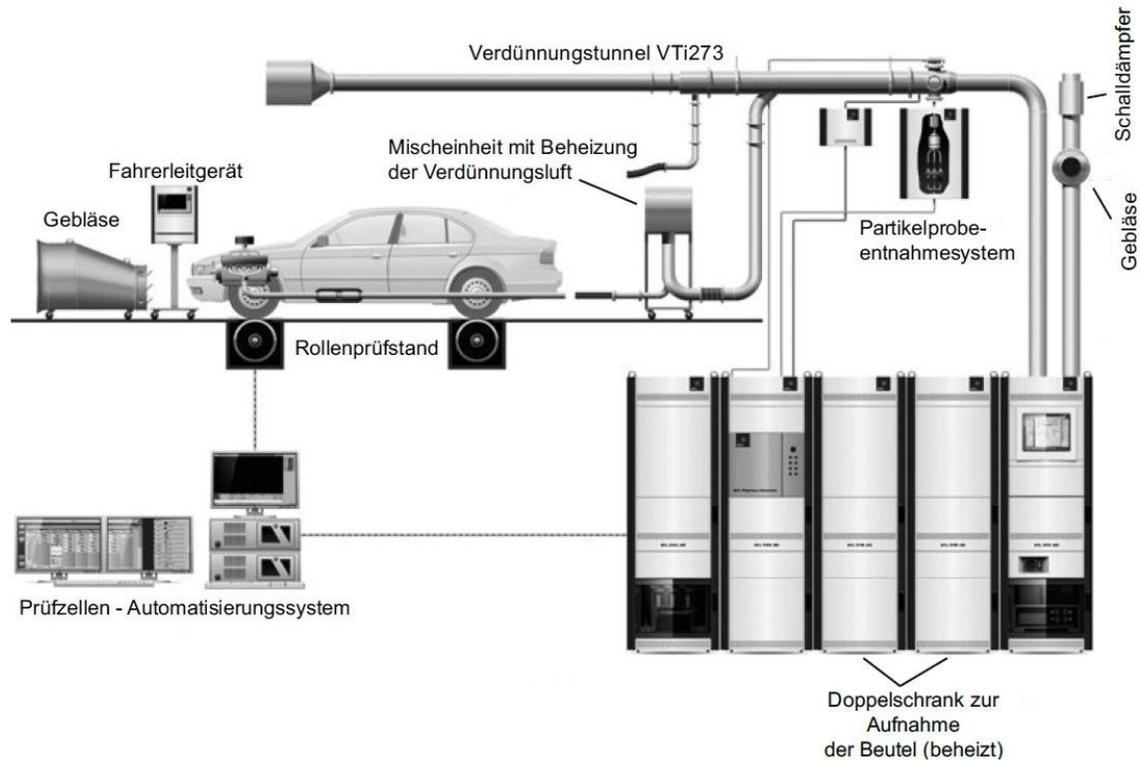


Abbildung 37: Rollprüfstand mit CVS-Abgasverdünnungssystem³⁰²

Beim CVS-Verdünnungsverfahren (siehe Abb. 37) wird dem Abgas warme Luft beigemischt und nachfolgend wird das Gemisch in Beuteln gesammelt. Die Abgaswerte können erst am Ende des Tests ausgewertet werden.³⁰³ Durch das Beimischen von warmer Luft wird dem Kondensieren des Wasserdampfes (H_2O -Dampf) im Abgas größtenteils entgegengewirkt, da ansonsten viele wasserlösliche Gaskomponenten nicht richtig ausgelesen werden könnten. Die hinzugefügte Luft

²⁹⁹ vgl. Reif, 2012a, S.516

³⁰⁰ vgl. Wiegleb, 2016, S.903

³⁰¹ vgl. Reif, 2012a, S.516

³⁰² Paulweber/Lebert, 2014, S.97

³⁰³ vgl. Ebenda, S.101

imitiert zudem die eigentliche atmosphärische Verdünnung, die Schadstoffe im Freien ausgesetzt sind, und verhindert somit chemische Nachreaktionen.³⁰⁴

Bei der Fahrt auf dem Rollprüfstand müssen Kräfte, die bei einer realen Straßenfahrt vorkommen, simuliert werden. Dazu zählen die Trägheitskräfte der Fahrzeuge sowie Luft- und Rollwiderstände. Mit einem Gebläse (siehe Abb. 37) kann z. B. der Luftwiderstand nachgebildet werden, während mit einer Asynchron- bzw. Gleichstrommaschine der Widerstand der Rollen des Prüfstandes reproduziert werden kann.³⁰⁵

5.4.2 PEMS

Das mobile Messverfahren PEMS (Portable Emission Measurement System) wurde erstmals 2002 auf den Markt gebracht, wobei damit nur gasförmige Schadstoffe wie Kohlenstoffmonoxid (CO), Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO₂) und Kohlenwasserstoffe (HC bzw. THC) gemessen werden konnten. 2005 wurde eine Erweiterung mit Partikelmassen-Messung und proportionaler Verdünnung des Abgases vorgestellt. In Europa ist die PEMS-Technologie der ‚In-Service Conformity‘-Gesetzgebung und in den USA der ‚In-Use Compliance‘-Gesetzgebung zuzuordnen.³⁰⁶

Seit 2014 sind weiterentwickelte – leichtere und kleinere – PEMS-Systeme (siehe Abb. 38) auf dem Markt, die entweder im Kofferraum oder auf der Anhängerkupplung des Fahrzeugs installiert werden können. Die äußere Installation ist zeitsparender und leichter zu montieren. Ab September 2017 wird das PEMS-System im WLTP-Fahrzyklus integriert sein.³⁰⁷



Abbildung 38: PEMS – Portable Emission Measurement System³⁰⁸

³⁰⁴ vgl. Reif, 2015a, S.142

³⁰⁵ vgl. Reif, 2012a, S.517

³⁰⁶ vgl. Wiegler, 2016, S.907

³⁰⁷ vgl. Ebenda, S.907f

³⁰⁸ <http://www.automotivetestingtechnologyinternational.com/articles.php?ArticleID=1373> (Gelesen am: 14.08.2017)

6 Schadstoffreduzierende Maßnahmen

„Bei einfachen Fahrzeugen wie Motorrollern werden die Abfallprodukte einer unvollständigen motorischen Verbrennung direkt an die Umwelt abgegeben, bei Pkw und inzwischen auch bei Lkw ist eine Abgasnachbehandlung zur Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte unverzichtbar.“³⁰⁹

Eine bewährte Methode ist das ‚Downsizing‘ (primäre Emissionsminderungsmaßnahme), zu dem die Aufladung gehört. Hier wird der Motor verkleinert (z. B. weniger Zylinder und kleinerer Hubraum), während gleichzeitig durch effizienzsteigernde Maßnahmen die gleiche Leistung erzielt wird. Dadurch sinkt der Kraftstoffverbrauch, was zu einer Schadstoffabnahme führt.³¹⁰

Die Schadstoffe, die am meisten zu beachten sind, sind Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Stickstoffoxide (NO_x). Unverbrannte sowie teilverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) sind ein zusätzliches Problem der ottomotorischen Verbrennung, dagegen haben Dieselmotoren mit dem Partikel- bzw. Ruß-Ausstoß zu kämpfen. Dies hat zur Entwicklung von diversen Systemen geführt, die darauf spezialisiert sind, die zuvor genannten Schadstoffe zu eliminieren bzw. zu verringern (sekundäre Emissionsminderungsmaßnahmen).³¹¹

Für Ottomotoren gibt es seit den 1980er-Jahren den Drei-Wege-Katalysator, der unverbrannte Kohlenwasserstoffe, Kohlenstoffmonoxid und Stickstoffoxide zu Wasser (H₂O), Stickstoff (N₂) und Kohlenstoffdioxid umwandelt. Der Katalysator kann nur bei stöchiometrischen Verhältnissen ($\lambda = 1$) ordnungsgemäß arbeiten.³¹²

Beim Dieselmotor, der mit Luftüberschuss betrieben wird, kann der Drei-Wege-Katalysator nicht zur NO_x-Reduktion herangezogen werden, da die unverbrannten Kohlenwasserstoff- und Kohlenstoffmonoxid-Emissionen im mageren Dieselabgas nicht mit den Stickstoffoxiden, sondern mit dem Restsauerstoff des Abgases reagieren.³¹³ Um die Kohlenwasserstoff- und Kohlenstoffmonoxid-Emissionen aus dem Dieselabgas zu eliminieren, kann ein Dieseloxidationskatalysator (DOC) eingesetzt werden. Für die Stickstoffoxidbeseitigung kann entweder ein NO_x-Speicherkatalysator (NSC) oder ein SCR-Katalysator (Selektive Katalytische Reduktion) in Betracht gezogen werden. Partikeln und Ruß werden durch spezielle Dieselpartikelfilter (DPF) entfernt.³¹⁴

³⁰⁹ Borgeest, 2016, S.28

³¹⁰ vgl. Wallentowitz/Freialdenhoven, 2011, S.54

³¹¹ vgl. Ebenda, S.54

³¹² vgl. Reif, 2015a, S.60

³¹³ vgl. Ebenda, S.60

³¹⁴ vgl. Borgeest, 2016, S.28

Die Menge an ausgestoßenem Kohlenstoffdioxid als Verbrennungsprodukt hat eine direkt proportionale Beziehung zum Kraftstoffverbrauch, so dass nur durch verbrauchsreduzierenden Maßnahmen eine Abnahme des Kohlenstoffdioxid-Ausstoßes zu erreichen ist.³¹⁵

Die Minderungsraten, die für die Einhaltung der immer strenger werdenden Abgasvorschriften erforderlich sind, sind nur durch eine effiziente Kombination von inner- und außermotorischen Maßnahmen zu erreichen.³¹⁶

6.1 Innermotorische Maßnahmen

6.1.1 Downsizing mit Aufladung

Das ‚Downsizing‘ von Verbrennungsmotoren wird momentan von den meisten Fahrzeugherstellern durchgeführt. Downsizing bedeutet die Verkleinerung des Motors (z. B. die Zylinderzahl von 8 auf 6 bzw. den Hubraum von 2 Liter auf 1,4 Liter), was gleichzeitig zu einer Gewichtsabnahme des Fahrzeuges führt. Damit der Motor trotz Downsizing die gleiche Leistung bzw. das gleiche Drehmoment behält, muss eine Art von Aufladung eingerichtet werden.³¹⁷ Die Aufladung ist eine Vorverdichtung der Verbrennungsluft.³¹⁸

Beim reinen Saugmotor wird die Luft vom Arbeitskolben in den Zylinder gesaugt (Selbstansaugen). Die Aufladung dagegen transportiert die Luft durch Überdruck in den Motor.³¹⁹ Die Hauptziele der Aufladung sind die Abgasemissions- und Kraftstoffverbrauchssenkung.³²⁰

Verbrennungsmotoren sind auf ein spezielles Gemisch aus Luft und Kraftstoff angewiesen, welches entzündet wird und folglich zu der Leistung des Motors führt. Wird der Motor stöchiometrisch ($\lambda = 1$) betrieben, sind für 1 kg Kraftstoff etwa 14,4 kg Luft notwendig, damit es zu einer theoretisch vollständigen Verbrennung kommen kann. Verdichtet man die Luft vorher, was eine Zunahme der Luftmasse bedeutet, kann gleichfalls mehr Kraftstoffmasse zugeführt werden. Je mehr Kraftstoff zur Verbrennung verfügbar ist, desto höher ist die Leistung des Motors. Die Aufladung steigert somit den Liefergrad (λ_L).³²¹

Bei einem Verbrennungsmotor mit innermotorischer Verbrennung beschreibt der Liefergrad (λ_L) den Quotienten aus der nach Abschluss eines Ladungswechsels

³¹⁵ vgl. Wallentowitz/Freialdenhoven, 2011, S.54

³¹⁶ vgl. Reif, 2015a, S.60

³¹⁷ vgl. Wallentowitz/Freialdenhoven, 2011, S.42f

³¹⁸ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.467

³¹⁹ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.10

³²⁰ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.187

³²¹ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.467

tatsächlich im Zylinder enthaltenen Frischladung zur theoretisch maximal möglichen Befüllung.³²²

Abb. 39 zeigt die prinzipiellen Möglichkeiten der Aufladung.

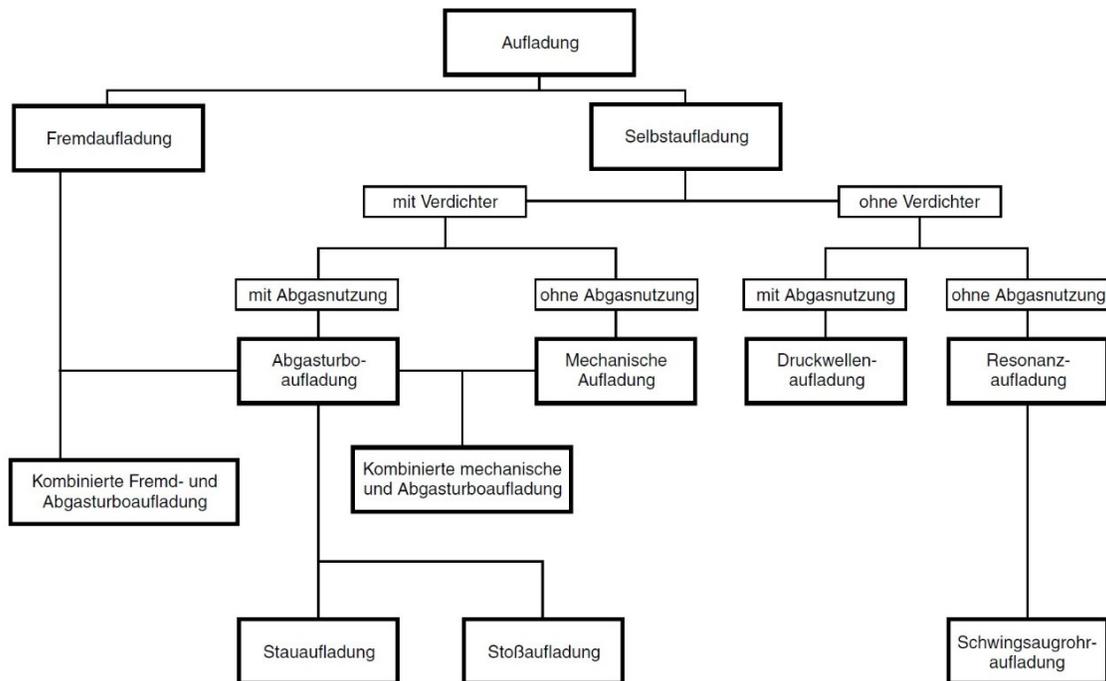


Abbildung 39: Möglichkeiten der Aufladung³²³

Es gibt drei verschiedene Verfahren zur Aufladung, die sich durchgesetzt haben:

- die Fremdaufladung
- die mechanische Aufladung
- die Abgasturboaufladung³²⁴

Für die Fremdaufladung wird der Ladeverdichter durch ein eigenes und vom Motor getrenntes Antriebsaggregat – z. B. in Form eines Elektromotors – in Gang gebracht. Nachteilig sind die hohen Kosten und deswegen findet die Fremdaufladung kaum noch ihren Einsatz im Kfz-Bereich.³²⁵

Die Aufladung erwärmt die Ladeluft auf bis zu 190 °C. Um eine noch höhere Luftdichte und damit eine höhere Leistung zu erzielen, muss die Ladeluft wieder etwas abgekühlt werden, bevor sie in den Brennraum eintritt. Hierfür wird eine Ladeluftkühlung zwischen dem Verdichter und dem Motor installiert. Die Ladeluftkühlung wirkt sich

³²² vgl. Siebenpfeiffer, 2014, S.156

³²³ Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.11

³²⁴ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.468

³²⁵ vgl. Ebenda, S.468

sowohl auf den Verbrauch und die Leistung als auch auf den Schadstoffausstoß positiv aus.³²⁶

Der Dieselmotor und der Ottomotor mit Direkteinspritzung eignen sich gut zur Aufladung, da nur Luft und kein Luft-Kraftstoff-Gemisch zur Verdichtung herangezogen wird.³²⁷

6.1.1.1 Mechanische Aufladung (Kompressor)

Kompressoren sind mechanisch mit der Kurbelwelle verbunden (siehe Abb. 40) und werden zumeist von einem Riemen in Bewegung gesetzt (manchmal auch durch Ketten oder Keilriemen).³²⁸ Da die Aufladung mechanisch abläuft, muss die Antriebsleistung vom Motor kommen (je nach Pkw-Motorgröße zwischen 10 und 15 kW). Dies ist der Hauptnachteil der mechanischen Aufladung gegenüber Verfahren wie der Abgasturboaufladung, welche unabhängig vom Motor betrieben werden.³²⁹

Die Vorteile der mechanischen Aufladung sind:

- ein direkter Antrieb vom Motor, der durch eine Magnetkupplung ein- oder ausgeschaltet werden kann,
- bei niedrigen Drehzahlen kann der Kompressor binnen kurzer Zeit einen ausreichenden Ladedruck aufbauen (im Gegensatz zum Turbolader mit seinem Turboloch – siehe Kapitel 6.1.1.2),
- ein sehr gutes Ansprechverhalten,
- und eine geringe Komplexität von Abgas- und Frischluftführung.

Die Nachteile sind:

- ein schlechterer Gesamtwirkungsgrad gegenüber anderen Verfahren (zwischen 10 und 15 kW Antriebsleistung geht dem Motor verloren),
- mehr als 1,8 bar Ladedruck können wegen der Abdichtung nicht erreicht werden,
- ein großer Platzbedarf,
- relativ teuer.³³⁰

Kompressoren haben im Vergleich zur Abgasturboaufladung einen schlechteren Wirkungsgrad sowie einen höheren Kraftstoffverbrauch zur Folge und finden deswegen kaum noch Einsatz in neuen Pkw.³³¹

³²⁶ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.188

³²⁷ vgl. Reif, 2012a, S.57

³²⁸ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.468

³²⁹ vgl. Wallentowitz/Freialdenhoven, 2011, S.43

³³⁰ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.193

³³¹ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.469

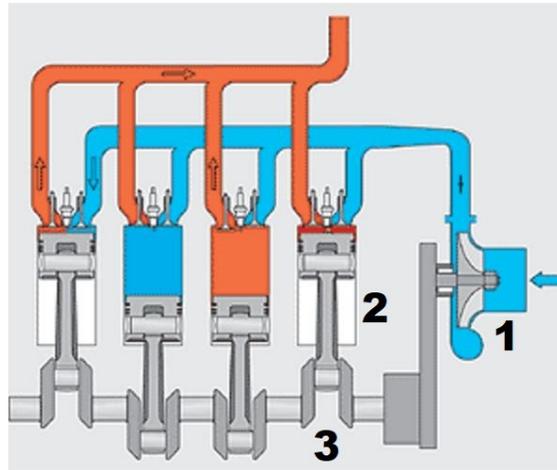


Abbildung 40: Prinzip der mechanischen Aufladung (Kompressor)³³²

1: Kompressor (Roots-Gebläse, Schraubenverdichter, Spirallader); 2: Zylinder mit Kolben; 3: Nockenwelle

6.1.1.2 Abgasturboaufladung (Abgasturbolader bzw. ATL)

Abgasturboaufladung ist ein Verfahren der Aufladung, bei der die Abgasenergie in Form von Abgasdruck und Abgastemperatur verwendet wird, um die Ladeluft zu verdichten.³³³ Es wird also nicht die Drehzahl des Laders von der Drehzahl des Motors bestimmt, sondern von dem Volumenstrom des Abgases. Durch den Abgasturbolader ist ein Leistungsanstieg von 30 % realisierbar.³³⁴

Der Abgasturbolader ist aus einem Verdichter (Zentrifugalverdichter, siehe Abb. 41 rechts) und einer Turbine (Abb. 41 links) aufgebaut, die auf der gleichen Welle liegen.³³⁵ Die Turbine wandelt die Energie des Abgases in kinetische bzw. Rotationsenergie um und treibt damit das Verdichterrad (Turbogebläse) in einer Rotationsbewegung an. Das Verdichterrad saugt Luft an, komprimiert diese und leitet diese an den Motor weiter.³³⁶ Mit Ausnahme kleiner thermischer und mechanischer Energieverluste sind Turbine und Verdichterrad im stationären Gleichgewicht.³³⁷

Die rein thermodynamische Verbindung zwischen dem Turbolader und dem Motor hat gewisse Vorteile:

- Der Verbrauch eines Fahrzeugs mit Abgasturbolader ist wesentlich kleiner als der Verbrauch eines reinen Saugmotors gleicher Leistung. Die sonst verloren gegangene Energie des Abgases trägt zur Leistung des Turbomotors bei.

³³² <http://www.turbos.borgwarner.com/de/products/turbochargerPrinciples.aspx>

³³³ vgl. Wallentowitz/Freialdenhoven, 2011, S.43

³³⁴ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.469

³³⁵ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.198f

³³⁶ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.469

³³⁷ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.198f

- In höheren Drehzahlbereichen hat der Turbomotor eine bessere Leistung bzw. ein besseres Ansprechverhalten, da der Luftdruck des Saugmotors dabei stetig abfällt und der des Turbomotors durch den konstanten Nachschub an Abgasenergie relativ konstant gehalten wird.³³⁸

Bei älteren ATL-Systemen lag ein bedeutender Nachteil darin, dass bei den unteren Drehzahlen oder bei einem Lastwechsel nur sehr wenig Abgasenergie vorhanden und somit ein deutlicher Leistungsschwund bemerkbar war. Damit zusammenhängend waren das Turboloch, der Turboschub und ein verhältnismäßig hoher Kraftstoffverbrauch.³³⁹ Das Turboloch ist das in den unteren Drehzahlen schwache Ansprechverhalten durch die niedrige Leistung. Der Turboschub ist der plötzliche Leistungssprung nach dem Turboloch. Heutige Turbolader haben durch Weiterentwicklung der Technologie diese Nachteile fast komplett beseitigt. Durch die Modifikation des Anströmungsverhaltens des Abgases hinsichtlich einer verbesserten Arbeitsweise der Turbine kann es zu einer Optimierung der Wirkungsweise eines einzelnen Turboladers kommen. Dies kann entweder durch die Einrichtung einer variablen Turbinengeometrie oder durch die Aufspaltung des Abgasmassenstroms geschehen.³⁴⁰

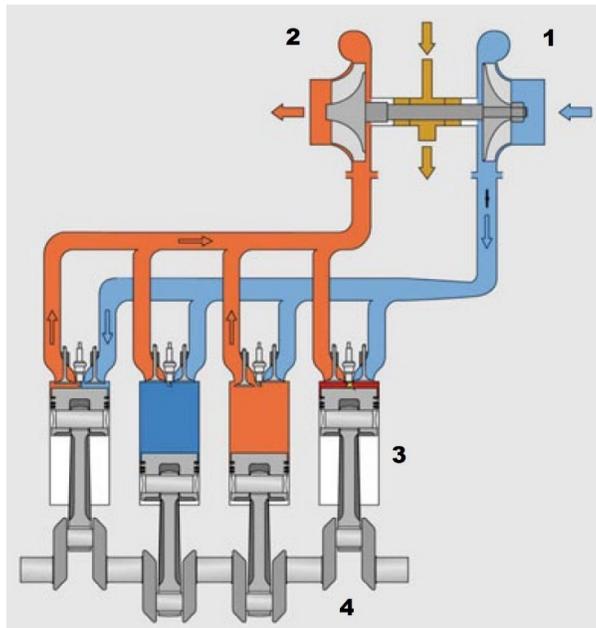


Abbildung 41: Prinzip der Abgasturboaufladung (Turbolader)³⁴¹

1: Verdichter; 2: Turbine; 3: Zylinder mit Kolben; 4: Nockenwelle

³³⁸ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.198

³³⁹ vgl. Szikora, 2015, S.44

³⁴⁰ vgl. Wallentowitz/Freialdenhoven, 2011, S.43

³⁴¹ <http://www.turbos.borgwarner.com/de/products/turbochargerPrinciples.aspx>

6.1.2 Abgasrückführung (AGR)

Eine weitere Methode zur Schadstoffreduzierung ist die Abgasrückführung (AGR), bei der das verbrannte Abgas (d. h. ein reaktionsträges Gas) dem frischen Luft-Kraftstoff-Gemisch wieder zugeführt wird.³⁴² Die AGR kann auf zwei Arten vollzogen werden:

- interne Abgasrückführung
- externe Abgasrückführung

Bei der internen AGR wird durch eine passende Nockenwellenverstellung ein Teil des verbrannten Abgases während des vierten Takts (siehe Kapitel 3.3) im Brennraum gelassen. Die externe AGR entnimmt aus dem Abgassystem das Inertgas und führt es zurück in das Ansaugsystem.³⁴³ Vor allem Motoren mit Direkteinspritzung (sowohl Diesel- als auch Ottomotoren) verwenden die externe AGR.³⁴⁴

Die Abgasrückführung reduziert die Brennraumtemperatur – da weniger Sauerstoff bzw. Frischluft für die Verbrennung zur Verfügung steht –, wodurch die Stickstoffoxid-Bildung (NO_x) geringer ausfällt – siehe Abb. 18.³⁴⁵ Jedoch steigen die Laufunruhe und – durch die vergleichsweise niedrige Temperatur – die unverbrannte Kohlenwasserstoff-Emission (HC). Außerdem fällt durch die AGR der Wirkungsgrad des Motors.³⁴⁶

Durch die Zufuhr der nicht brennbaren Gase zur Ansaugluft kann zur gleichen Zeit die Drosselklappe weiter geöffnet werden. Dies führt zu einer Reduzierung der Drosselverluste und somit zu einer Kraftstoffeinsparung. Die maximale Abgasrückführrate liegt beim Ottomotor bei etwa 30 %, die des Dieselmotors bei bis zu 50 %.³⁴⁷ Da heißes Abgas ein großes Volumen einnimmt und damit in den Brennraum mehr Abgas für die Verbrennung des Kraftstoffs gelangt, wird das Abgas während der Rückführung gekühlt. Man spricht dabei von gekühlter AGR.³⁴⁸

6.1.3 Einspritzung

Der Einspritzbeginn, der Einspritzverlauf und die Zerstäubung des Kraftstoffes haben einen großen Einfluss auf die Schadstoffreduzierung. Wie in Kapitel 3.6 beschrieben, bestimmt der Einspritzzeitpunkt den Anfang und den Ablauf der Verbrennung. Dieser hängt von der Last, der Drehzahl und der Brennraumtemperatur des Motors ab. Verschiebt man den Einspritzzeitpunkt in Richtung spät – so kurz wie möglich vor dem obersten Totpunkt (OT) –, wirkt sich das positiv auf den Kraftstoffverbrauch und die

³⁴² vgl. Reif, 2015a, S.87f

³⁴³ vgl. Van Basshuysen, 2017, S.263

³⁴⁴ vgl. Reif, 2015a, S.87f

³⁴⁵ vgl. Wallentowitz/Freialdenhoven, 2011, S.57

³⁴⁶ vgl. Hilgers, 2016, S.41

³⁴⁷ vgl. Wallentowitz/Freialdenhoven, 2011, S.57

³⁴⁸ vgl. Hilgers, 2016, S.41f

Stickstoffoxid-Emission (NO_x) aus. Allerdings steigen dadurch auch die Partikel- (PM), die unverbrannten Kohlenwasserstoff- (HC) und die Kohlenstoffmonoxid-Emissionen (CO) an. Weicht man beim Anfang des Einspritzzeitpunkts um 1°KW (Kurbelwellenwinkel) ab, kann das zu einer Veränderung der NO_x -Emission um 5 % und der HC-Emission um 15 % führen. Die Winkelgeschwindigkeit ist die zeitliche Ableitung des Kurbelwellenwinkels, demzufolge kann der Kurbelwellenwinkel durch Integrieren der Winkelgeschwindigkeiten über die Zeit bestimmt werden.³⁴⁹

$$\varphi = \int_0^t \omega \, d\tau + \varphi_0$$

Gleichung 11: Kurbelwellenwinkel³⁵⁰

φ_0 : Position der Kurbelwelle zu $t=0$; ω : Winkelgeschwindigkeit; $d\tau$: infinitesimale Zeitspanne

Durch richtiges Ausgestalten der Kolbenmulde wird eine schwache Verwirbelung geschaffen, wodurch sich mit einer modernen 8-Lochdüse und mit einem hohen Einspritzdruck das Luft-Kraftstoff-Gemisch gut vermischt. Auf diese Weise sinkt die Partikelemission stark.³⁵¹

6.2 Außermotorische Maßnahmen (Abgasnachbehandlung)

Für die Abgasnachbehandlung gibt es verschiedene Katalysatoren und Filter, die eingesetzt werden können.

„Als Katalysator bezeichnet man in der Chemie einen Stoff, der die Reaktionsgeschwindigkeit einer chemischen Reaktion beeinflusst, ohne dabei selbst verbraucht zu werden.“³⁵²

Diese Beeinflussung der Reaktionsgeschwindigkeit findet durch die Steigung oder Senkung der Aktivierungsenergie statt. Benötigt man einen Katalysator, der zu einer Steigerung der Aktivierungsenergie beiträgt, so nennt man dies negative Katalyse. Ein Katalysator, der zum Herabsetzen der Aktivierungsenergie dient, führt zur positiven Katalyse. Im Grunde wird durch einen Katalysator die Kinetik einer chemischen Reaktion verändert, ohne eine Wirkung auf die Thermodynamik zu haben.³⁵³

³⁴⁹ vgl. Hoepke/Breuer, 2016, S.438

³⁵⁰ vgl. Siebenpfeiffer, 2014, S.156

³⁵¹ vgl. Ebenda, S.438

³⁵² <http://www.chemie.de/lexikon/Katalysator.html> (Gelesen am: 14.08.2017)

³⁵³ vgl. <http://www.chemie.de/lexikon/Katalysator.html> (Gelesen am: 14.08.2017)

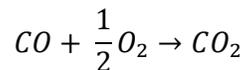
6.2.1 Dieseloxydationskatalysator (DOC)

Die Kraftstoffverbrennung im Dieselmotor verläuft lokal stöchiometrisch mitunter sogar unter Sauerstoffmangel. Da der Brennstoff in der Brennkammer nicht gleichmäßig verteilt vorliegt, führt die Verbrennung insgesamt zu einem hohen Luftüberschuss ($\lambda > 1$). Dem Abgas liegen somit lokale Sauerstoffanteile vor die eine Reaktion der NO_x nicht ermöglichen.

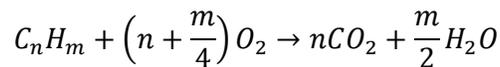
Mithilfe eines Dieseloxydationskatalysators (DOC, Diesel Oxidation Catalyst) werden folgende Aufgaben durchgeführt:

1. der Abbau der Kohlenstoffmonoxid- (CO) und Kohlenwasserstoff-Emissionen (HC),
2. die Minderung der Partikelemission (PM),
3. die Oxidation von Stickstoffmonoxid (NO) zu Stickstoffdioxid (NO_2),
4. als katalytischer Brenner eingesetzt.³⁵⁴

1. CO und HC werden zu Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasserdampf (H_2O -Dampf) oxidiert. Die Schadstoffe fangen ab einer Temperatur von $170\text{ }^\circ\text{C}$ – der Light-off-Temperatur – zu oxidieren an.³⁵⁵



Gleichung 12: Oxidation von Kohlenmonoxid³⁵⁶



Gleichung 13: Oxidation der Kohlenwasserstoffe³⁵⁷

2. Durch zunehmende Temperaturen desorbieren Kohlenwasserstoffe vermehrt von der Partikeloberfläche. Der Dieseloxydationskatalysator oxidiert infolge die desorbierten Kohlenwasserstoffverbindungen. Der Partikelaustritt wird dabei um ca. 30 % verringert.³⁵⁸

3. Der DOC ist außerdem dafür zuständig, dass NO zu NO_2 oxidiert wird. Bei höheren NO_2 -Abgasanteilen arbeiten die nachgeschalteten Systeme (wie Partikelfilter, SCR, NSC – siehe Abb. 42) effizienter. Höhere Temperaturen ($> 180\text{ }^\circ\text{C}$) begünstigen die NO -Oxidation.³⁵⁹

³⁵⁴ vgl. Reif, 2015a, S.77

³⁵⁵ vgl. Wedeniwski, 2015, S.55

³⁵⁶ vgl. Siebenpfeiffer, 2014, S.156

³⁵⁷ Ebenda, S.156

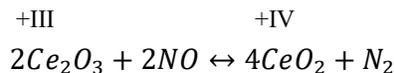
³⁵⁸ vgl. Reif, 2015a, S.77

³⁵⁹ vgl. Wedeniwski, 2015, S.56

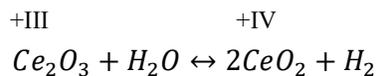
4. Partikelfilter erfordern zum thermischen Regenerieren eine hohe Abgastemperatur. Der DOC leistet zur Erbringung der hohen Abgastemperatur seinen Anteil, indem die Reaktionswärme der CO- und HC-Oxidation bereitsteht. Diesen Reinigungsprozess nennt man katalytisches Brennen bzw. Cat-Burner.³⁶⁰

Die Oxidationsreaktionen des DOC ähneln denen des Drei-Wege-Katalysators (siehe Kapitel 6.2.4). Der ‚Washcoat‘ (katalytisch aktive Beschichtung des Trägermaterials) setzt sich aus den Edelmetallkomponenten Platin (Pt), Rhodium (Rh) und Palladium (Pd) zusammen.³⁶¹ Dazu kommt die Oxidmischung aus Aluminiumoxid (Al₂O₃), Zirkonoxid (ZrO₂) und Ceroxid (CeO₂). Man greift vor allem auf leichte und schwere Platinmetalle als Promotoren zurück, da diese besonders reaktiv bei niedrigen Abgastemperaturen sind (T < 200 °C).³⁶²

Ceroxid bzw. Cer(IV)-Oxid übernimmt die Aufgabe eines Sauerstoffspeichers. Während des magerbetriebes speichert Ceroxid Sauerstoff

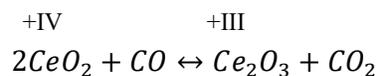


Gleichung 14: Oxidation von Cer(III)-Oxid durch NO³⁶³

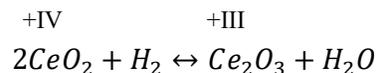


Gleichung 15: Oxidation von Cer(III)-Oxid durch H₂O³⁶⁴

Während des Fettbetriebes liefert Ceroxid Sauerstoff:



Gleichung 16: Reduktion von Cer(IV)-Oxid durch CO³⁶⁵



Gleichung 17: Reduktion von Cer(IV)-Oxid durch H₂³⁶⁶

³⁶⁰ vgl. Reif, 2015a, S.78

³⁶¹ vgl. Günel, 2012, S.43

³⁶² vgl. Förtsch/Meinholz, 2013, S.248

³⁶³ vgl. Siebenpfeiffer, 2014, S.156

³⁶⁴ vgl. Ebenda, S.156

³⁶⁵ vgl. Ebenda, S.156

³⁶⁶ vgl. Ebenda, S.156

Gleichung 18: Ceroxid als Sauerstoffspeicher³⁶⁷

6.2.2 Katalysatoren zur NO_x-Minderung (Sekundärmaßnahmen)

6.2.2.1 NO_x-Speicherkatalysator (NSC)

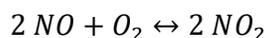
In der Motorentechnik wird hierbei von einem ‚Katalysator‘ gesprochen obwohl es sich aus Sicht der Verfahrenstechnik um einen ‚Absorber‘ handelt.

NO_x-Speicherkatalysatoren finden grundsätzlich beim Dieselmotor, aber auch bei einem modernen Benzindirekteinspritzer (BDE) ihren Einsatz.³⁶⁸ Die Stickstoffoxide werden von einem ‚NO_x-Absorber‘ absorbiert und gespeichert. Der zumeist davor montierte DOC – siehe Kap. 6.2.1 – hilft dabei durch die Oxidation von Stickstoffmonoxid (NO) zu Stickstoffdioxid (NO₂). Wenn der NSC mit Stickstoffoxiden gesättigt ist, schaltet der Motor für ein paar Sekunden in einen fetten Bereich ($\lambda < 1$) um. Der Katalysator wird dabei mit Kohlenstoffmonoxid (CO) und mit Kohlenwasserstoffen (HC) beaufschlagt. Das führt zu einem Freisetzen von NO, bis die NO_x-Speicherkomponente wieder frei ist. Dieser Prozess wiederholt sich in bestimmten Abständen und führt zu einem merkbaren Anstieg des Kraftstoffverbrauchs. Es können aber bis zu 70 % des Stickstoffoxid-Ausstoßes durch diese Abgasnachbehandlungsmethode beseitigt werden.³⁶⁹

Der ‚Washcoat‘ (katalytisch aktive Beschichtung) des NO_x-Speicherkatalysators besteht aus Oxiden und Carbonaten der Alkali- und schweren Erdalkalimetalle (sehr reaktive Metalle aus der ersten und zweiten Hauptgruppe des Periodensystems). Cer (Ce, Metall der seltenen Erde) wird zudem als Sauerstoffspeicher beim Dieselmotor verwendet.³⁷⁰ Diese Beschichtung ähnelt jener des DOC sehr.

Die Funktionsweise des NSC lässt sich in folgende vier Teilschritte zerlegen:

1. In der Speicherphase ($\lambda > 1$) oxidiert das NO zu NO₂. Der zumeist vorgeschaltete DOC übernimmt einen Großteil dieser Arbeit.

Gleichung 19: Die Speicherphase des NSC³⁷¹

³⁶⁷ vgl. Siebenpfeiffer, 2014, S.156

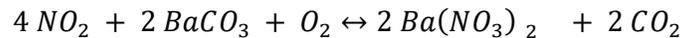
³⁶⁸ vgl. Wedeniwski, 2015, S.56

³⁶⁹ vgl. Wallentowitz/Freialdenhoven, 2011, S.56

³⁷⁰ vgl. Förtsch/Meinholz, 2013, S.249

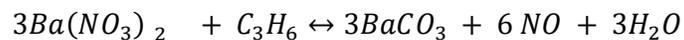
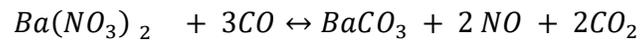
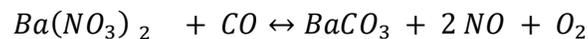
³⁷¹ Ebenda, S.249

2. Das NO_2 reagiert mit dem ‚ NO_x -Absorber‘ (z. B. aus Bariumcarbonat – BaCO_3), setzt dabei CO_2 frei und bildet Bariumnitrat – $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$.



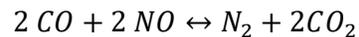
Gleichung 20: Die Reaktion des NO_x -Absorbers³⁷²

3. In der Regenerationsphase ($\lambda < 1$) mischt sich im Abgasstrom vermehrt CO und HC , sodass sich das Bariumnitrat zu Bariumcarbonat rückbildet.³⁷³ Dabei setzt sich NO frei, bis sich die NO_x -Speicherkomponente zurückbildet.



Gleichung 21: Die Regenerationsphase des NSC³⁷⁴

4. Das freigesetzte NO reduziert sich in Gegenwart der Edelmetallkomponenten des Katalysatormaterials mit CO bzw. KW zu CO_2 und H_2O .



Gleichung 22: Reduktion von NO zu N_2 ³⁷⁵

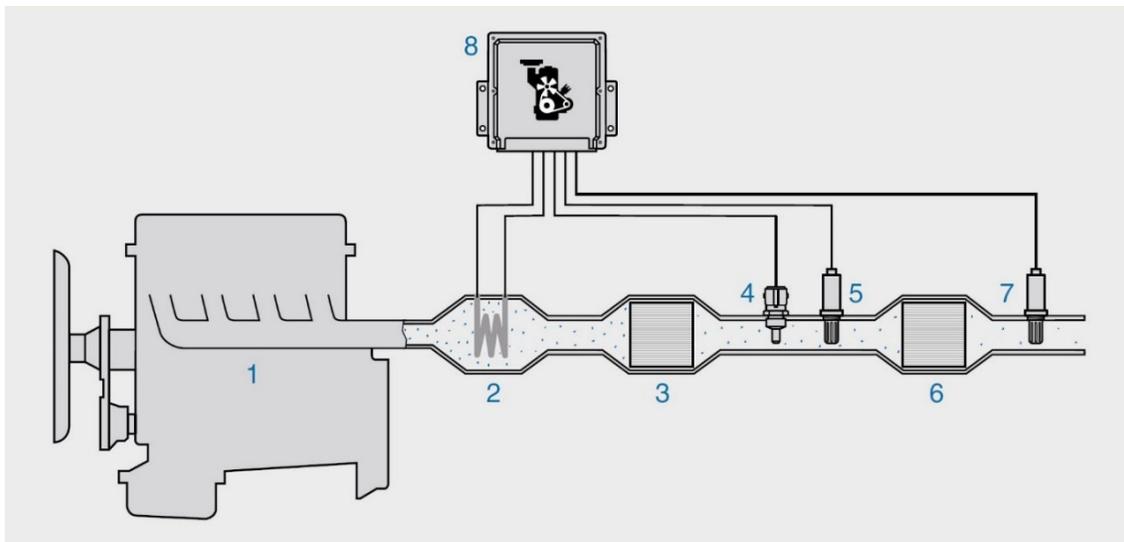


Abbildung 42: Prinzip einer Abgasanlage (Dieselmotor)³⁷⁶

³⁷² Förtsch/Meinholz, 2013, S.249

³⁷³ vgl. Wedeniwski, 2015, S.66

³⁷⁴ Förtsch/Meinholz, 2013, S.250

³⁷⁵ Ebenda, S.250

³⁷⁶ <http://www.kfztech.de/kfztechnik/motor/diesel/dieselabgas2.htm>

1: Dieselmotor; 2: Abgasheizung (optional); 3: DOC; 4: Temperatursensor; 5: Breitband- λ -Sonde; 6: DPNR-Modul = NO_x -Speicherkatalysator + Diesel-Partikelfilter; 7: NO_x -Sensor; 8: Motorsteuergerät

Heutige Dieselfahrzeuge haben in der Regel ein ‚D-Kat-System‘ direkt hinter dem Motor installiert.³⁷⁷ Es besteht aus einem DOC und einem DPNR-Modul (Diesel Particulate NO_x -Reduction). DPNR-Module sind ein Diesel-Partikelfilter und ein NO_x -Speicherkatalysator in einem System vereint. Dabei ist der DOC vor dem DPNR-System platziert (siehe Abb. 42).³⁷⁸

6.2.2.2 Selektive Katalytische Reduktion von Stickstoffoxiden mit Ammoniak (NH_3 -SCR)

Ein weiteres Verfahren zur Stickstoffoxidemissionsminderung ist die Selektive Katalytische Reduktion (SCR, Selective Catalytic Reduction), die eine Beimischung von Ammoniak (NH_3) einsetzt. Früher haben SCR-Systeme ihren Einsatz nur in großen Dieselfahrzeugen (z. B. Lkw über 6 t) gefunden, um den strikten Euro-5-Standard einzuhalten. Heutzutage findet man SCR-Systeme in nahezu allen Fahrzeugen (sowohl in leichten Nkw als auch in Pkw), da die Gesetzgebung Grenzwerte für Stickstoffoxide vorgibt, die nicht anders einzuhalten wären – vor allem in den USA. Der große Vorteil der SCR-Systeme ist, dass sie nicht nur den Verbrennungsmotor zu einer höheren Kraftstoffeffizienz verhelfen, sondern auch zu einem verbesserten Leistungsverhalten führen.³⁷⁹

Das SCR-Verfahren (siehe Abb. 43) verwendet einen abgesonderten Tank gefüllt mit einer wässrigen Harnstofflösung ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) als Reduktionsmittel.³⁸⁰ Diese Harnstofflösung (Harnstoff: 32,5 m.-% und Wasser: 67,5 m.-%), die von dem deutschen Verband der Automobilindustrie e. V. als Marke unter dem Namen ‚AdBlue‘ geschützt wurde, wird in genau berechneten Abständen mithilfe einer Pumpe in den Abgasstrom eingespritzt. Dort hydrolysiert die Lösung zu NH_3 und CO_2 (siehe Gleichung 23 + 24).³⁸¹

Der darauffolgende Katalysator wandelt dann das NO_x in Stickstoff (N_2) und Wasser (H_2O) um. Durch diese Prozesse kann der Stickstoffoxid-Ausstoß um bis zu 98 % gesenkt werden. Der Verbrauchsquotient von Harnstofflösung zu Kraftstoff liegt zwischen 0,02 und 0,08.³⁸² Infolgedessen muss das AdBlue bei einem mittelgroßen Pkw lediglich etwa alle 30.000 km nachgefüllt werden.³⁸³

³⁷⁷ vgl. Wedeniwski, 2015, S.66

³⁷⁸ vgl. Förtsch/Meinholz, 2013, S.250

³⁷⁹ vgl. Wallentowitz/Freialdenhoven, 2011, S.56

³⁸⁰ vgl. Peitz/Bernhard/Mehring/Elsener/Kröcher, 2012, S.626

³⁸¹ vgl. Wallentowitz/Freialdenhoven, 2011, S.56

³⁸² vgl. Ebenda, S.56

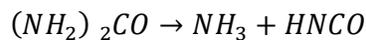
³⁸³ vgl. Peitz/Bernhard/Mehring/Elsener/Kröcher, 2012, S.626

Das oben beschriebene SCR-Verfahren mit seiner Einspritzung von Harnstoff als Reduktionsmittel wird als ‚aktives‘ Verfahren definiert. Ein ‚passives‘ Verfahren verwendet kein zusätzliches Reduktionsmittel, sondern setzt allein die teilverbrannten Kohlenwasserstoffe (HC), die sich im Abgas befinden, als Reduktionsmittel ein. Ein Vorteil des passiven Verfahrens liegt darin, dass kein Reduktionsmittel nachgefüllt werden muss. Nachteilig sind die deutlich schlechteren Umsatzraten in Bezug auf die NO_x .³⁸⁴

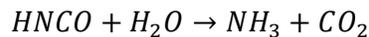
Beim ‚aktiven‘ SCR-De NO_x -Verfahren ist es zur Erzielung hoher NO_x -Minderungsraten erforderlich, das ‚AdBlue‘ im richtigen Verhältnis zur Stickstoffoxidemission des Motors zu dosieren. Da SCR-Katalysatoren (TiO_2 / V_2O_5 / WO_3) bis zu einer gewissen Menge NH_3 durch Chemisorption speichern können, muss die Dosierung das Mittel der NH_3 -Emission entsprechen. Ist die Reduktionsmitteldosierung zu gering, so steigt die NO_x -Umsatzrate. Wird zu viel Reduktionsmittel am Abgas zudosiert, so reagiert das daraus gebildete NH_3 nicht vollständig mit dem NO_x und verlässt als NH_3 über den Abgasstrom als sekundäre Emission den Motor. NH_3 ist ein stechend riechendes und gefährliches Umweltgift. Um den NH_3 -Schlupf Einhalt zu gebieten, ist eine größere Auslegung des Katalysators (größeres NH_3 -Einspeichervermögen) vonnöten. Andernfalls kann ein NH_3 -Oxidationskatalysator dem SCR-De NO_x -Katalysator nachgeschaltet werden.³⁸⁵

Das ‚aktive‘ SCR-De NO_x -Verfahren umfasst somit folgende Teilschritte:

1. Thermo- und Hydrolytische Spaltung der wässrigen Harnstofflösung

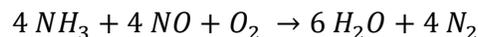


Gleichung 23: Thermolyse

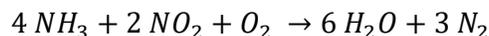


Gleichung 24: Hydrolyse³⁸⁶

2. Das eigentliche SCR-De NO_x -Verfahren³⁸⁷



Gleichung 25: Reduktion von Stickstoffmonoxid zu N_2 und H_2O in Beisein von O_2 ³⁸⁸



Gleichung 26: Reduktion von Stickstoffdioxid zu N_2 und H_2O in Beisein von O_2 ³⁸⁹

³⁸⁴ vgl. Förtsch/Meinholz, 2013, S.250

³⁸⁵ vgl. Ebenda, S.250

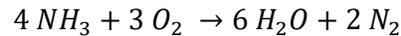
³⁸⁶ Ebenda, S.251

³⁸⁷ vgl. Wedeniwski, 2015, S.75

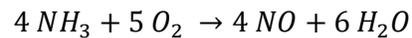
³⁸⁸ Förtsch/Meinholz, 2013, S.251

³⁸⁹ Ebenda, S.251

3. Minderung der sekundären NH_3 -Emission (Ammoniakschlupf) durch katalytische Oxidation³⁹⁰



Gleichung 27: Oxidation von Ammoniak zu elementarem N_2 in Beisein von O_2 ³⁹¹



Gleichung 28: Oxidation von Ammoniak zu NO in Beisein von O_2 ³⁹²

Die NO_x -Minderung durch das ‚aktive‘ SCR-De NO_x -Verfahren erfolgt ohne Änderung der motorischen Verbrennung. Damit bleiben die guten Motorwirkungsgrade zumeist erhalten.³⁹³

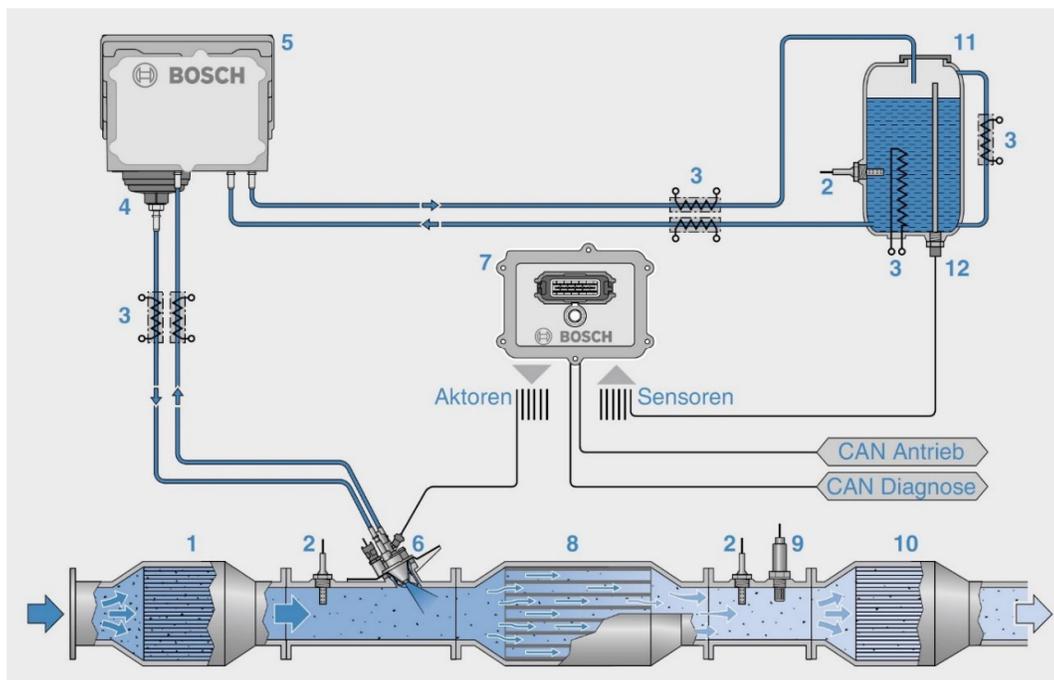


Abbildung 43: Selektive Katalytische Reduktion von Bosch³⁹⁴

1: DOC; 2: Temperatursensor; 3: Heizung; 4: Filter; 5: Fördermodul; 6: AdBlue-Dosiermodul; 7: Dosiersteuergerät; 8: SCR-Katalysator; 9: NO_x -Sensor; 10: Schlupf-Katalysator; 11: AdBlue-Tank (Harnstoff-Wasser-Lösung); 12: AdBlue-Füllstands-Sensor

³⁹⁰ vgl. Wedeniwski, 2015, S.75

³⁹¹ Förtsch/Meinholz, 2013, S.251

³⁹² Ebenda, S.251

³⁹³ vgl. Günel, 2012, S.30

³⁹⁴ <http://www.kfztech.de/kfztechnik/motor/diesel/dieselabgas2.htm>

6.2.3 Diesel-Partikelfilter (DPF)

„Das meistdiskutierte Problem der Dieselaabgase stellen die Rußpartikel dar, die mit krebserregenden und erbgutverändernden Substanzen, z. B. NO₂-haltigen polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffverbindungen, belegt sind.“³⁹⁵

Die Hauptaufgabe des Diesel-Partikelfilters (DPF) ist das Entfernen der Feinstaubpartikel aus dem Abgasstrom durch filternde Abscheidung. Dazu kommt im Allgemeinen das Verbrennen dieser Partikel (zumeist Ruß) zu Kohlenstoffdioxid (CO₂), sobald das Filtermedium eine ausgewählte Beladung erreicht hat. Aufgrund dieser thermischen Regeneration muss sich der Partikelfilter aus hitzebeständigen Materialien (wie z. B. aus Metallen oder keramischen Werkstoffen) zusammensetzen.³⁹⁶

Es gibt zwei verschiedene Filterbauweisen:

- Der Wandstromfilter – auch geschlossenes System genannt – ist ein durch Extrusion (Masse durch formgebende Öffnung herausgepresst) hergestellter Wabenkörper (siehe Abb. 44), der aus vielen quadratischen parallel zueinander angeordneten Kanälen besteht. Diese Kanäle sind abwechselnd am Ende mit Keramikstopfen verschlossen. Das Abgas diffundiert dann gezwungenermaßen durch die porösen Keramikwände (Membrane) hindurch.³⁹⁷
- Beim Durchflussfilter – auch Nebenstromfilter oder offenes System genannt – strömt das Abgas innerhalb des Filters entlang absorbierender Oberflächen.³⁹⁸

Beide Filterbauweisen beruhen auf dem Prinzip der Kohäsionskraft. Die Kohäsion ist der Zusammenhalt der Moleküle eines Stoffes mithilfe von Molekularkräften.³⁹⁹

Die Wandstromfiltertechnik hat sich wegen ihres höheren Wirkungsgrads (ca. 99,9 %) gegenüber der Durchflussfiltertechnik (ca. 60 %) durchgesetzt, besitzt aber einen erwähnenswerten Nachteil.⁴⁰⁰ Die Rußpartikel lagern sich im und auf dem Filtermedium ab und erhöhen damit den Strömungswiderstand, sodass eine Regeneration des Filtermediums notwendig ist. Durch diesen sich wiederholt aufbauenden Strömungswiderstand und infolge der Filtermittelregeneration steigt folglich der Kraftstoffverbrauch.⁴⁰¹

³⁹⁵ Förstner, 2012, S.244

³⁹⁶ vgl. Wallentowitz/Freialdenhoven, 2011, S.57

³⁹⁷ vgl. Förtsch/Meinholz, 2013, S.249

³⁹⁸ vgl. Wallentowitz/Freialdenhoven, 2011, S.57

³⁹⁹ vgl. Paulweber/Lebert, 2014, S.123

⁴⁰⁰ vgl. Wallentowitz/Freialdenhoven, 2011, S.57

⁴⁰¹ vgl. Förtsch/Meinholz, 2013, S.248

Zum Regenerieren des Partikelfiltermediums gibt es zwei verschiedene Verfahren:

- Beim ‚passiven Verfahren‘ wird über eine katalytische Reaktion der Ruß verbrannt – katalytische Regeneration. Es kann dabei dem Kraftstoff ein Additiv (Ceroxid Lösung) beigemischt werden, um die Temperatur zur Verbrennung der Partikel deutlich abzusenken (additivunterstützte Regeneration bei 450 °C).⁴⁰²
- Beim ‚aktiven Verfahren‘ wird der Filter auf eine bestimmte Temperatur (550 – 600 °C) aufgeheizt, um den Ruß zu verbrennen. Hierfür wird Kraftstoff innermotorisch oder in den Abgasstrang nahegespritzt um die Verbrennungswärme bereitzustellen. Auch durch Vorschalten eines Oxidationskatalysators kann Wärme bereitgestellt werden, die dem Regenerieren dient. Dazu zählt auch eine elektrische Beheizung, die kurz vor dem Filter installiert wird und die das Abgas auf eine bestimmte Temperatur aufwärmt (nur bei stationären Anlagen mit Stromausschluss). Der katalytische Brenner (Cat-Burner) des Dieseloxydationskatalysators ist die wohl gängigste Methode der Regeneration unter den aktiven Verfahren (siehe Kapitel 6.2.1).⁴⁰³

Um den Beladungszustand des Filtermediums zu messen, wird ein Differenzdruckensor vor und nach dem Filter eingebaut. In der Regel muss alle 100.000 km der Partikelfilter ausgebaut werden, um mechanisch gereinigt zu werden.⁴⁰⁴

Bis zum Euro-4-Standard waren innermotorische Maßnahmen der Schadstoffreduzierung zur Einhaltung der Grenzwerte ausreichend. Ab dem Euro-5-Standard wurde durch die weitere Verschärfung des PM-Grenzwerts und durch die erstmalige Angabe eines Grenzwerts für die Partikelanzahl (PN) der Einsatz eines Partikelfilters unumgänglich.⁴⁰⁵ Lkw bzw. schwere Nkw machen nur knapp 10 % des gesamten Straßenverkehrs aus, sind aber für circa 70 % der Ruß- und Staubemissionen verantwortlich. Erst mit der Einführung des Euro-6-Standards – 01.01.2014 – wurde es für schwere Nkw unerlässlich, sich mit einem Partikelfilter auszustatten.⁴⁰⁶

⁴⁰² vgl. Paulweber/Lebert, 2014, S.94

⁴⁰³ vgl. Förtsch/Meinholz, 2013, S.248

⁴⁰⁴ vgl. Wallentowitz/Freialdenhoven, 2011, S.57

⁴⁰⁵ vgl. Günel, 2012, S.30

⁴⁰⁶ vgl. Förstner, 2012, S.244

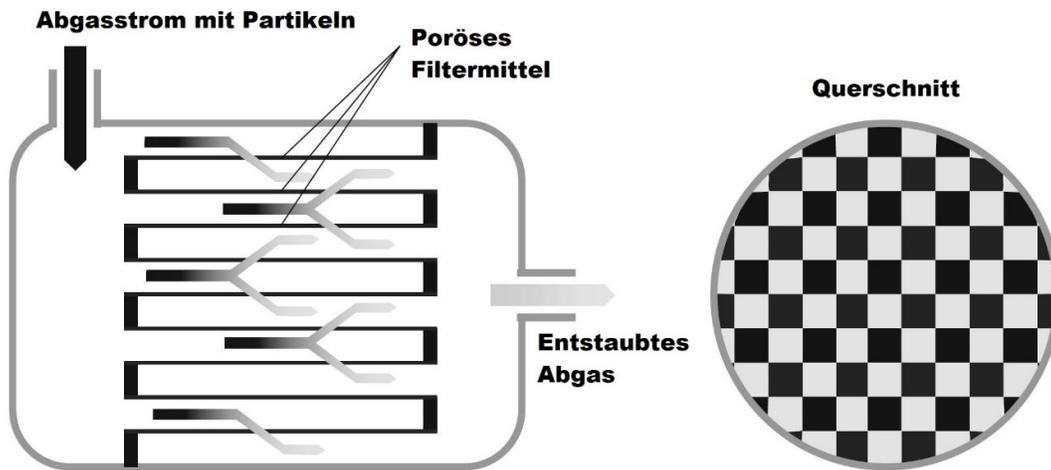
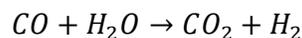
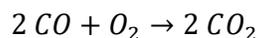


Abbildung 44: Dieselpartikelfilter (Wandstromfilter)⁴⁰⁷

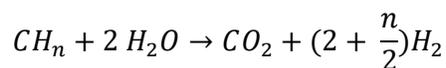
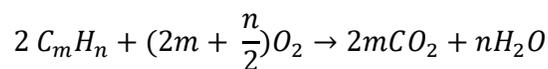
6.2.4 Geregelter Drei-Wege-Katalysator (Ottomotor)

Der geregelte Drei-Wege-Katalysator für Viertakt-Ottomotoren wandelt bei 300 °C bis 840 °C die Schadstoffe unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC), Kohlenstoffmonoxid (CO) und Stickstoffoxide (NO_x) in die ungiftigen Endprodukte Kohlenstoffdioxid (CO₂), Stickstoff (N₂) und Wasserdampf (H₂O-Dampf) um.⁴⁰⁸ Um eine optimale Funktionsweise zu gewährleisten, muss das Luft-Kraftstoff-Gemisch einer bestimmten Zusammensetzung entsprechen.⁴⁰⁹ Der Wirkungsgrad des Drei-Wege-Katalysators beträgt circa 90 %.⁴¹⁰

Im Drei-Wege-Katalysator laufen drei primäre chemische Reaktionen ab: Kohlenstoffmonoxid und unverbrannte Kohlenwasserstoffe werden oxidiert, Stickstoffoxide werden reduziert.⁴¹¹ Die Oxidation von Kohlenstoffmonoxid und unverbrannten Kohlenwasserstoffen läuft anhand folgender Gleichungen ab:



Gleichung 29: Oxidation von Kohlenstoffmonoxid⁴¹²



⁴⁰⁷ <http://www.kfztech.de/kfztechnik/motor/diesel/dieselabgas3.htm>

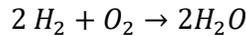
⁴⁰⁸ vgl. Kurzweil, 2015, S.134

⁴⁰⁹ vgl. Förstner, 2012, S.243

⁴¹⁰ vgl. Wallentowitz/Freialdenhoven, 2011, S.54f

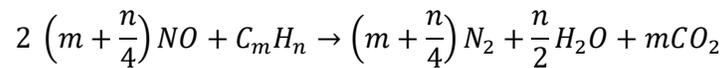
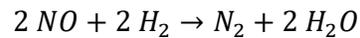
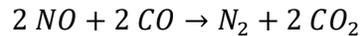
⁴¹¹ Borgeest, 2016, S.28

⁴¹² Reif, 2015a, S.99

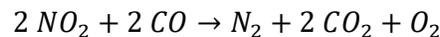


Gleichung 30: Oxidation von unverbrannten Kohlenwasserstoffen⁴¹³

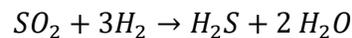
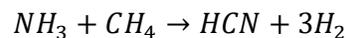
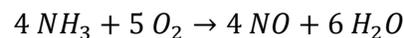
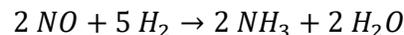
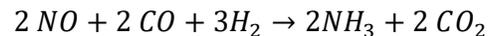
Die Reduktion von Stickstoffoxiden – Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) – läuft anhand folgender Gleichungen ab:



Gleichung 31: Reduktion von Stickstoffmonoxid⁴¹⁴



Gleichung 32: Reduktion von Stickstoffdioxid⁴¹⁵



Gleichung 33: Unerwünschte Nebenreaktionen⁴¹⁶

Bei einem geregelten Drei-Wege-Katalysator (TiO₂ / V₂O₅ / WO₃) wird ein Verbrennungsluftverhältnis von ungefähr $\lambda = 1$ (stöchiometrische Luftzahl, siehe Kapitel 3.5) eingehalten. Herrscht ein zu großer Luftüberschuss (mageres Gemisch, $\lambda \gg 1$), kann es zu keiner Reduktion der NO_x kommen. Bei zu großem Luftmangel (fettes Gemisch, $\lambda \ll 1$) ist eine Oxidation von HC und CO nicht möglich.⁴¹⁷ Es gibt einen bestimmten optimalen Luftzahlbereich, innerhalb dessen alle drei Reaktionen parallel zueinander ablaufen. Dieser enge Bereich, der durch das Katalysatormaterial bestimmt wird, steht in Wechselwirkung mit einem bestimmten Sauerstoffgehalt des Abgases. Vor dem Drei-Wege-Katalysator ist eine Yttrium-dotierte Zirkoniumdioxidsonde (O₂- λ -Sonde, siehe Abb. 45) eingebaut,⁴¹⁸ die den

⁴¹³ Reif, 2015a, S.99

⁴¹⁴ Ebenda, S.99

⁴¹⁵ Ebenda, S.99

⁴¹⁶ Ebenda, S.99

⁴¹⁷ vgl. Borgeest, 2016, S.28

⁴¹⁸ vgl. Schäuffele/Zurawka, 2016, S.313

Sauerstoffgehalt des Gemisches misst und so regelt, dass im Einspritzer oder Vergaser der Sauerstoffgehalt ideal ist („geregelter Katalysator“).⁴¹⁹

Der Sauerstoff, der notwendig ist, um HC und CO zu oxidieren, wird entweder aus den Stickstoffoxiden des Abgases entnommen oder aus dem Abgas selbst. Dies hängt von der Zusammensetzung des Luft-Kraftstoff-Gemischs ab.⁴²⁰

Verbrennungsmotoren, die in einem mageren Bereich ($\lambda > 1$) arbeiten – wie z. B. Dieselmotoren, Otto-Magermixmotoren oder Ottomotoren mit Benzindirekteinspritzung –, können nicht auf den Einsatz eines Drei-Wege-Katalysators setzen, da die Reduktion von Stickstoffoxiden ausschließlich bei einem nahezu stöchiometrischen Luft-Kraftstoff-Verhältnis möglich ist. Diese Motoren, die in einem mageren Bereich arbeiten, können anstelle einen Oxidationskatalysator (siehe Kapitel 6.2.1) zur Umwandlung von CO und CH zu CO₂ und H₂O verwenden. Die Minderung der NO_x-Emissionen erfolgt dann in einem nachgeschalteten NO_x-Speicherkatalysator.⁴²¹

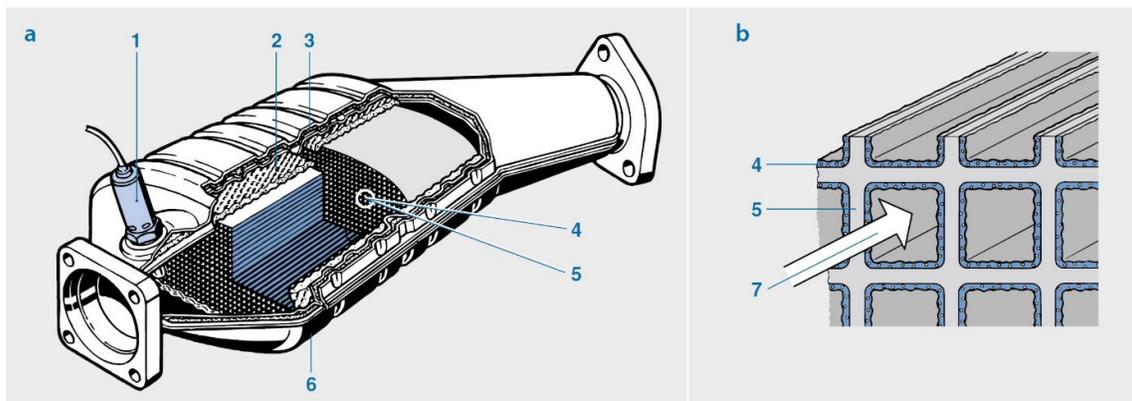


Abbildung 45: Drei-Wege-Katalysator mit λ -Sonde⁴²²

a: Gesamter Katalysator; b: Trägermaterial mit Washcoat- und Edelmetallbeschichtung;

1: O₂- λ -Sonde; 2: Quellmatte; 3: wärmegedämmte Doppelschale; 4: Washcoat (Al₂O₃-Trägerschicht) mit Edelmetallpromotoren; 5: Trägermaterial (Monolith); 6: Gehäuse; 7: Abgasstrom mit Schadstoffen

Bei den heute in den Kraftfahrzeugen verbauten Drei-Wege-Katalysatoren handelt es sich um Metallblechkatalysatoren und Keramikmonolithkatalysatoren.

1. Beim Metallblechkatalysator wird anstelle der keramischen Monolithen eine spiralförmige Wicklung von speziellem Metallblech bzw. -folien (0,03 – 0,08

⁴¹⁹ vgl. Förstner, 2012, S.243

⁴²⁰ vgl. Reif, 2015a, S.99

⁴²¹ vgl. Wallentowitz/Freialdenhoven, 2011, S.55

⁴²² <http://www.kfztech.de/kfztechnik/motor/diesel/dieselabgas3.htm>

- mm) eingesetzt, die abwechselnd aus glatten und gewellten Lagen bestehen. Hierfür werden Aluminiumlegierte Edelstähle (Alu-Stahl) herangezogen. An der Oberfläche des Stahlträgers wird der mit Promotoren versehene Washcoat aufgebracht. Vorteile eines Metallträgers ist die Stoßunempfindlichkeit und die schnellere Aufheizzeit.
2. Bei den Keramikmonolithkatalysatoren verwendet man als Trägermaterial in vielen Fällen Cordierit, ein sehr gut temperaturbeständiges Magnesium-Aluminium-Gerüstsilikat welches entsprechend promotiert wird. Das Trägermaterial liegt bei den Monolithkatalysatoren als Parallelstrom- (oder Kanal-) Katalysator vor. Die Kanäle verfügen über quadratische, triangulare oder hexagonale Querschnitte. Die Vorteile des Keramikträgers sind eine bessere Rückgewinnung der Edelmetalle, es ist kostengünstiger und die konstanteren Betriebstemperaturen.⁴²³

⁴²³ vgl. Borgeest, 2016, S.28

7 Zukünftige Alternativen

Bereits im Jahre 2002 hat der VDA (Verband der Deutschen Automobilindustrie, Berlin) einen Bericht über den Strukturwandel in der Automobilindustrie durch den immer weiter steigenden Wertanteil der Elektrik und Elektronik sowie innerhalb dieser den noch schneller steigenden Softwareanteil veröffentlicht. Innerhalb der Mechatronik nimmt der Anteil der Software kontinuierlich zu und führt gleichzeitig zu einem sinkenden Anteil der Mechanik. Dieser Strukturwandel wird in Abb. 46 ersichtlich. Der Softwareanteil – gemessen an Entwicklungsaufwänden und -kosten – ist heutzutage bereits größer als der Mechanikanteil.⁴²⁴

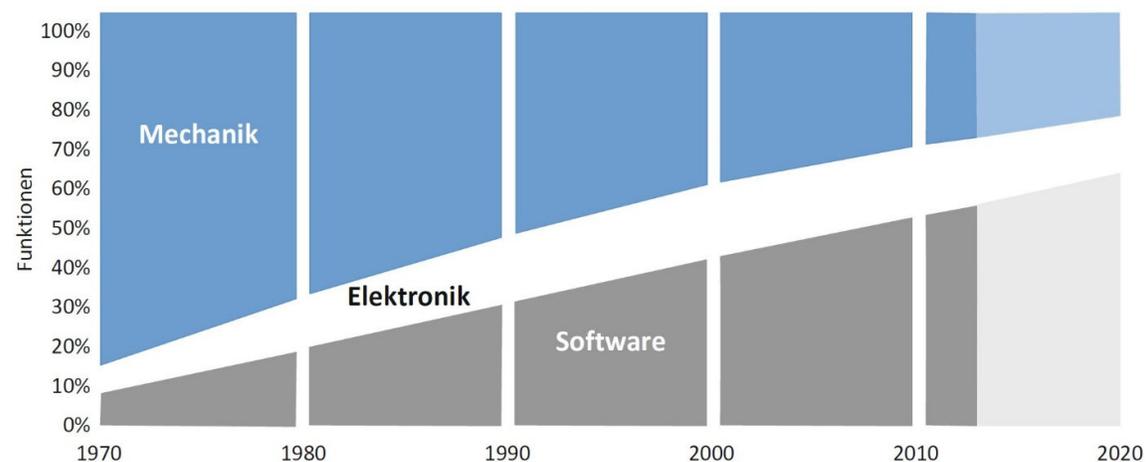


Abbildung 46: Anteil des Entwicklungsaufwands der Mechanik, Elektronik und Software⁴²⁵

Aufgrund der durch die Gesetzgebung immer strenger werdenden Regulierung bezüglich Schadstoff-Emissionen, musste es ein großes Umdenken in der Automobilindustrie geben. Durch kürzlich vorgestellte alternative Brennverfahren, alternative Antriebe und alternative Kraftstoffe hat sich jedoch die Automobilindustrie auf diesen Wandel vorbereitet.⁴²⁶

7.1 Alternative Brennverfahren

Beim traditionellen Dieselmotor gibt es einen Zielkonflikt zwischen dem Partikel- und dem Stickstoffoxid-Ausstoß (siehe Kapitel 3.6). Alternative Brennverfahren werden eingesetzt, um genau jene Bereiche zu meiden. Das gebräuchlichste Verfahren ist der Versuch, das Gemisch zu homogenisieren.⁴²⁷ Dies kann durch eine äußere Gemischbildung (z. B. Saugrohreinspritzung) sowie durch Verschiebung des direkten Einspritzzeitpunktes in Richtung eines möglichst frühes Zeitpunktes. Die

⁴²⁴ vgl. Wedeniwski, 2015, S.37

⁴²⁵ Ebenda, S.38

⁴²⁶ vgl. Isermann, 2010, S.223f

⁴²⁷ vgl. Liebl/Beidl, 2016, S.581

Verbrennungstemperatur sinkt aber dabei und führt zu erhöhten Kohlenwasserstoff- und Kohlenstoffmonoxid-Emissionen.⁴²⁸

Die bekanntesten alternativen Brennverfahren sind:

- HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition), welches in Luftzahlbereichen arbeitet in denen die Stickstoffoxidbildung am höchsten ist (λ zwischen 1,0 und 2,0).⁴²⁹ Die Verbrennungstemperatur bleibt jedoch unterhalb jener Temperatur, die für eine Stickstoffoxidbildung vorteilhaft ist (siehe Abb. 18) und dadurch kann der Euro-6-Standard eingehalten werden. Durch die richtige Ansaugtemperatur, Abgasrückführrate und dem richtigen Verdichtungsverhältnis kann dies bewerkstelligt werden. Die Einspritzung wird Richtung sehr früh im Verdichtungstakt (siehe Kapitel 3.3) gelegt – ca. 120 °KW (Kurbelwellenwinkel) vor dem oberen Totpunkt (OT) – und ermöglicht somit eine frühe Gemischbildung, die zu einer guten Homogenisierung führt.⁴³⁰ Diese Homogenisierung vermindert auch die Rußbildung, da fette Gemischzonen ($\lambda < 1,0$) kaum entstehen. Dieses Brennverfahren ist auch beim Ottomotor vorteilhaft.⁴³¹
- HCLI (Homogeneous Charge Late Injection) funktioniert im Prinzip wie das HCCI Brennverfahren, nur dass die Einspritzung sehr spät im Verdichtungstakt eintritt – ca. 40 °KW vor dem OT. Die Stickstoffoxid- und Rußbildung werden damit gemindert.⁴³²
- HPLI (Highly Premixed Late Injection) hat auch einen sehr späten Einspritzzeitpunkt im Verdichtungstakt und unterbindet dadurch die Diffusionsverbrennung (eine sich entzündende Tröpfchenwolke und kein Gas). Durch die Verlängerung des Zündverzuges (siehe Kapitel 3.6) kann es zu einer ausreichenden Homogenisierung kommen.⁴³³
- Die Niedertemperaturverbrennung verhindert die Bildung von Ruß, indem die Verbrennungstemperatur soweit abgesenkt wird, dass die Temperatur der Rußbildung unterschritten wird.⁴³⁴ Dies kann durch sehr hohe Abgasrückführaten verwirklicht werden. Es wird jedoch keine Homogenisierung vollzogen und das führt zu lokalen Luftverhältnissen, in denen Ruß wiederum gebildet werden kann.⁴³⁵

⁴²⁸ vgl. Pflaum, 2010, S.26f

⁴²⁹ vgl. Reif, 2015b, S.16f

⁴³⁰ vgl. Liebl/Beidl, 2015, S.390

⁴³¹ vgl. Fuhrmann, 2013, S.13f

⁴³² vgl. Isermann, 2010, S.260f

⁴³³ vgl. Pflaum, 2010, S.27

⁴³⁴ vgl. Reif, 2015a, S.53

⁴³⁵ vgl. Pflaum, 2010, S.27

7.2 Alternative Antriebe

In der unten stehenden Abb. 47 sind die wesentlichen Ursachen für die Entwicklung alternativer Antriebssysteme dargestellt. Der erste Treiber, die Gesetzgebung bzw. Politik, übt durch ihre Reglementierungen Einfluss auf die Forschung und Entwicklungen innerhalb der Automobilindustrie aus (Dynamisierungsklausel). Der Kunde stellt durch die stete Veränderung seines Verhaltens und seiner Bedürfnisse, woraus sich wiederum andauernd neue Anforderungen bzgl. des Automobils ergeben, den zweiten Einflussfaktor dar. Der dritte wesentliche Grund für die Entwicklung alternativer Antriebe bezieht sich auf die Verfügbarkeit fossiler Ressourcen.⁴³⁶

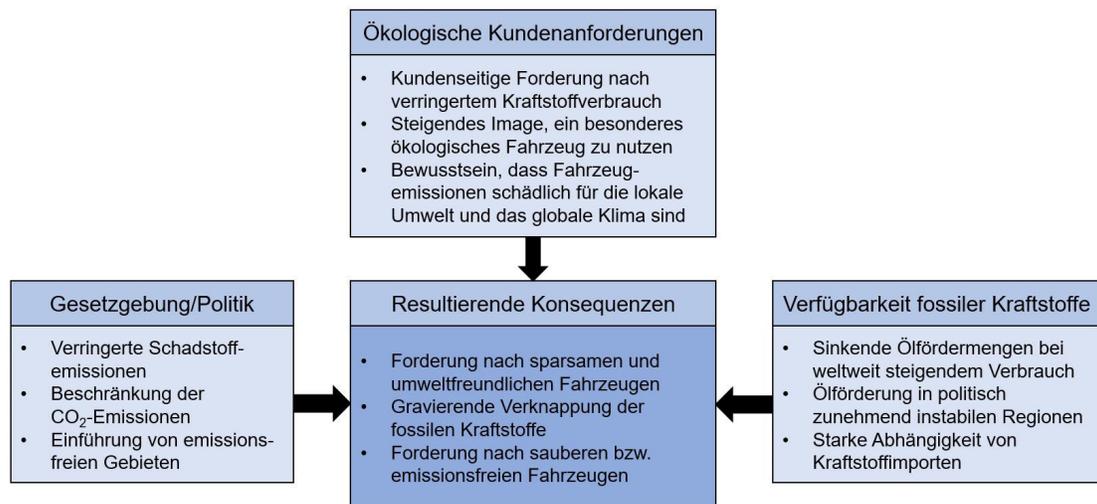


Abbildung 47: Einflussfaktoren für zunehmende Diversifizierung und Elektrifizierung des Antriebstrangs⁴³⁷

Die drei bedeutendsten Antriebsarten für Kfz sind Verbrennungskraftmotoren – z. B. Diesel, Benzin, Gas (Erdgas und Flüssiggas), Ethanol und Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge – sowie Hybridelektroantriebe und rein-elektrische Antriebe.⁴³⁸ Die alternativen Kraftstoffe für Verbrennungskraftmotoren werden in Kapitel 7.3 beschrieben.

7.2.1 Hybridelektrofahrzeuge (HEV)

Obwohl das Hybridelektrofahrzeug zur Gruppe der Hybridfahrzeuge gehört, wird in dieser Arbeit nur auf diese eine, elektrische Variante eingegangen, da die restlichen

⁴³⁶ vgl. Wallentowitz/Freialdenhoven, 2011, S.3

⁴³⁷ Ebenda, S.3

⁴³⁸ vgl. http://www.austrian-mobile-power.at/amp/AMP_Factsheets/Austrian_Mobile_Power_Factsheet_02_Antriebsarten_E-Fahrzeuge.pdf S.1 (Gelesen am: 21.04.2017)

Varianten so gut wie gar nicht auf dem Markt erscheinen.⁴³⁹ Die Definition nach SAE (Society of Automobile Engineers) für Hybridfahrzeuge lautet:

„Ein Hybridfahrzeug besteht aus zwei oder mehr Energiespeichern mit ihren dazugehörigen Energiewandlern, die wahlweise gemeinsam oder jeweils getrennt das Fahrzeug antreiben.“⁴⁴⁰

Die größten Vorteile des Hybridfahrzeuges sind folgende:

1. Verbrauchsreduzierung
2. Deutlich niedrigere Emissionen bis hin zu emissionsfreiem Fahren
3. Geräuschärmeres Fahren
4. Fahrstabilisierung
5. Erhöhung der Fahrleistung⁴⁴¹

Ein Hybridelektrofahrzeug (HEV, Hybrid Electric Vehicle) verwendet als Energiespeicher Kraftstoffe und Batterien und als Wandler Verbrennungs- und Elektromotoren. Der Anteil der Leistung des elektrischen Antriebs an der gesamten Leistung des Fahrzeugs variiert und kann dementsprechend in drei Klassen unterteilt werden:

- ‚Mikrohybride‘ Kraftfahrzeuge haben einen elektrischen Motor der nicht für den Antrieb des Fahrzeuges eingesetzt wird, sondern für Aufgaben wie die Start-Stopp-Automatik und die Bremsenergieerückgewinnung,⁴⁴²
- ‚Mildhybride‘ Kraftfahrzeuge setzen den elektrischen Motor auch im Antrieb ein, um den Verbrennungsmotor zu unterstützen,
- ‚Vollhybride‘ Kraftfahrzeuge können den elektrischen Motor getrennt vom Verbrennungsmotor für den Antrieb einsetzen und ermöglichen somit ein vollelektrisches Fahren.⁴⁴³

Zusätzlich werden Hybridantriebe nach ihrer Systemstruktur eingeteilt (siehe Abb. 48):

- Bei einem ‚seriellen Hybridantrieb‘ erzeugt der Verbrennungsmotor mechanische Energie, die einer elektrischen Maschine (zumeist einem Generator) zugeführt wird und dann in elektrische Energie umgewandelt wird. Diese elektrische Energie wird dann an eine zweite elektrische Maschine – den Elektromotor – übergeben, der das Fahrzeug antreibt.⁴⁴⁴ Der Radantrieb erfolgt somit stets rein elektrisch. Die elektrische Energie, die vom Generator erzeugt

⁴³⁹ vgl. Liebl, 2014, S.243

⁴⁴⁰ Reif/Noreikat/Borgeest, 2012, S.7

⁴⁴¹ vgl. Braess/Seiffert, 2013, S.187

⁴⁴² vgl. Liebl, 2014, S.233

⁴⁴³ vgl. <http://www.austrian-mobile->

[power.at/amp/AMP_Factsheets/Austrian_Mobile_Power_Factsheet_02_Antriebsarten_E-Fahrzeuge.pdf](http://www.austrian-mobile-power.at/amp/AMP_Factsheets/Austrian_Mobile_Power_Factsheet_02_Antriebsarten_E-Fahrzeuge.pdf) S.1 (Gelesen am: 21.04.2017)

⁴⁴⁴ vgl. Reif/Noreikat/Borgeest, 2012, S.28

- wird, kann auch in einer Batterie zwischengespeichert werden.⁴⁴⁵ Ein Beispiel für einen seriellen Hybridantrieb befindet sich im REX (Range Extender Electric Vehicle, siehe Kapitel 7.2.2.2).
- Bei einem ‚parallelen Hybridantrieb‘ (P-Hybrid) sind die elektrische Maschine – der Elektromotor – und der Verbrennungsmotor entlang des Antriebsstrangs miteinander verbunden. Im Gegensatz zum seriellen Hybridantrieb ist beim parallelen Hybridantrieb nur eine einzige elektrische Maschine erforderlich. Dadurch vereinfacht sich die Integration der elektrischen Komponente in den bestehenden konventionellen Antriebsstrang.⁴⁴⁶ Es ist rein elektrisches, rein verbrennungsmotorisches oder ein kombiniertes Fahren möglich. Parallelhybridantriebe, die nur einen leistungsarmen elektrischen Motor haben (bis ca. 10 kW) nennt man ‚Mildhybridantrieb‘.⁴⁴⁷
 - Ein ‚Misch-Hybridantrieb‘ ist eine Kombination aus parallelem und/oder seriellen Leistungsfluss. Die Ausstattung derer mit Verbrennungsmotor, elektrischen Maschinen, Getriebekomponenten, Kupplungen, Freilaufen, Bremsen kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. Die Vorteile des Misch-Hybridantriebs sind die direkte Leistungsteilnahme des Verbrennungsmotors und der Einsatz stufenlos variabler Getriebe des Verbrennungsmotors durch die Leistungsverzweigung. Nachteilig ist die vergrößerte Komplexität mit entsprechendem Steuerungsaufwand.⁴⁴⁸

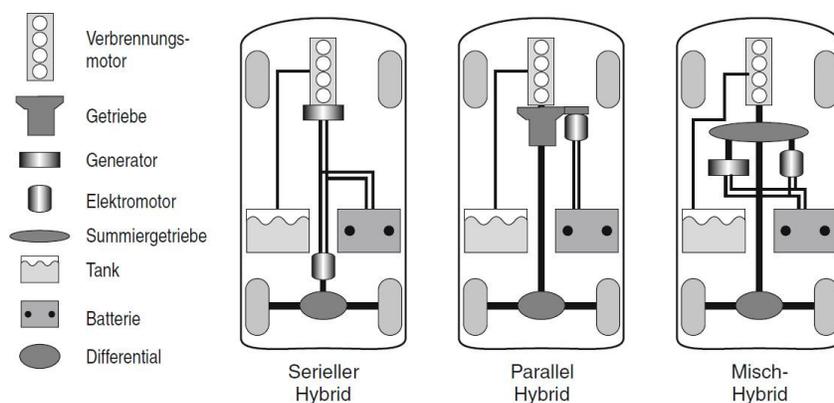


Abbildung 48: Systemstruktur von Hybridantrieben⁴⁴⁹

⁴⁴⁵ vgl. Braess/Seiffert, 2013, S.191

⁴⁴⁶ vgl. Reif/Noreikat/Borgeest, 2012, S.31

⁴⁴⁷ vgl. Braess/Seiffert, 2013, S.187

⁴⁴⁸ vgl. Ebenda, S.192

⁴⁴⁹ Jung, 2014, S.19

7.2.2 Elektrische Antriebe (BEV, REX, PHEV, FCEV)

7.2.2.1 Battery Electric Vehicle (BEV)

Dem rein batteriebetriebenen Fahrzeug steht einzig ein Elektromotor als Antrieb zur Verfügung.⁴⁵⁰ Ein BEV ist ein emissionsfreies Fahrzeug, aber die Energie, die verwendet wird, um die Batterie zu laden, ist nicht ausschließlich emissionsfrei. Das wohl bekannteste Beispiel für ein BEV ist der Tesla Model S mit seinen 0g CO₂/km.⁴⁵¹

In aktuellen Elektro- und Hybridfahrzeugen werden Lithium-Ionen-Akkus verwendet, da diese sich insbesondere durch eine hohe Energie- und Leistungsdichte auszeichnen. Allerdings besitzen jene Akkus im Zusammenhang mit Überladung, Tiefentladung und thermischen Bedingungen wenig Toleranz und daher sollten die Zellen während des Betriebs stets kontrolliert werden. Die Batterie trägt hauptsächlich bei reinen Elektrofahrzeugen (BEV) stark zur Wertschöpfung bei. Da die Betriebsstrategie des Speichers letztendlich wichtige Charakteristika des Fahrzeugs (z. B. maximale Leistung, Verfügbarkeit der Leistung, Reichweite) beeinflusst, kann das Wissen über den Batteriezustand als ein maßgebender Wettbewerbsvorteil fungieren.⁴⁵²

7.2.2.2 Range Extender Electric Vehicle (REX bzw. REEV)

REX bzw. REEV sind Fahrzeuge mit Reichweitenverlängerungssystemen. Neben dem Elektromotor ist ein Verbrennungsmotor vorhanden, welcher über einen Generator die Batterie des Fahrzeugs aufladen kann (On-Board erzeugter Strom). Die Batterie kann aber auch konventionell über das Stromnetz geladen werden. Der Verbrennungsmotor schaltet sich erst ein, wenn der Ladungszustand der Batterie einen kritisch niedrigen Wert erreicht hat. Dadurch kann eine deutlich längere Fahrzeit als bei einem reinen BEV erzielt werden.⁴⁵³ Der große Unterschied zum PHEV ist, dass die Räder allein nur vom Elektromotor angetrieben werden. Es ist somit ein serieller Hybrid (siehe Kapitel 7.2.1). Ein bekanntes Beispiel für ein REX ist der BMW i3 mit seinen durchschnittlichen 13g CO₂/km.⁴⁵⁴

⁴⁵⁰ vgl. http://www.austrian-mobile-power.at/amp/AMP_Factsheets/Austrian_Mobile_Power_Factsheet_02_Antriebsarten_E-Fahrzeuge.pdf S.1 (Gelesen am: 21.04.2017)

⁴⁵¹ vgl. Tober, 2012, S.110

⁴⁵² vgl. Tille, 2016, S.21

⁴⁵³ vgl. Reif/Noreikat/Borgeest, 2012, S.69

⁴⁵⁴ vgl. http://www.austrian-mobile-power.at/amp/AMP_Factsheets/Austrian_Mobile_Power_Factsheet_02_Antriebsarten_E-Fahrzeuge.pdf S.1 (Gelesen am: 21.04.2017)

7.2.2.3 Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)

Das Plug-in Hybrid Electric Vehicle wird sowohl über einen Verbrennungsmotor als auch über einen Elektromotor angetrieben. Die Batterie des PHEV kann auch mittels Stecker am Stromnetz geladen werden.⁴⁵⁵ Der Antrieb kann rein elektrisch, rein vom Verbrennungsmotor oder aus einer Mischung von beidem erfolgen. Es stellt somit eine Brückentechnologie zwischen einem ‚Vollhybridenantrieb‘ und dem BEV dar.⁴⁵⁶ Die Vorteile beider Systeme verschmelzen in einem PHEV. Ein Beispiel für ein PHEV ist der Toyota Prius PHV.⁴⁵⁷

7.2.2.4 Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV bzw. FCHEV)

FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) und FCHEV (Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle) sind Fahrzeuge, die einen rein elektrischen Antrieb haben, deren elektrische Energie entweder aus Wasserstoff oder Ethanol mittels einer Brennstoffzelle erzeugt wird.⁴⁵⁸ Dabei wird entweder der Elektromotor direkt angetrieben oder die Energie in einer Batterie zwischengespeichert. Ein bekanntes Beispiel eines FCEV ist der Hyundai ix35.⁴⁵⁹

7.3 Alternative Kraftstoffe

Alternative Kraftstoffe setzen sich immer weiter durch, vor allen Dingen in Verbindung mit klassischen Kraftstoffen. B7-Diesel stellt in diesem Zusammenhang ein Beispiel dar, da bei diesem bis zu maximal 7 Vol.-% Biodiesel dem Dieselkraftstoff beigefügt werden. Biodiesel ist ein alternativer Kraftstoff, der durch Veresterung von Pflanzenölen erzeugt wird. In Europa wird Benzin vorwiegend Ethanol (10 Vol.-% = E10) als alternativer Kraftstoff beigefügt.⁴⁶⁰ Kraftstoffe mit einem Ethanolgehalt von 70 Vol.-% werden in gewissen Ländern, wie bspw. den USA angeboten. Gasförmige Kraftstoffe wie Erdgas – komprimiert (CNG = Compressed Natural Gas) oder verflüssigt (LNG = Liquefied Natural Gas) – werden ebenfalls immer wichtiger.⁴⁶¹

Biokraftstoffe der 1. Generation

- Pflanzenöl
- aus Pflanzenöl (hauptsächlich Rapsöl) durch Veresterung hergestellter Biodiesel (FAME)

⁴⁵⁵ vgl. http://www.austrian-mobile-power.at/amp/AMP_Factsheets/Austrian_Mobile_Power_Factsheet_02_Antriebsarten_E-Fahrzeuge.pdf S.2 (Gelesen am: 21.04.2017)

⁴⁵⁶ vgl. Siebenpfeiffer, 2014, S.156

⁴⁵⁷ vgl. Reif/Noreikat/Borgeest, 2012, S.68f

⁴⁵⁸ vgl. Liebl/Beidl, 2016, S.476

⁴⁵⁹ vgl. Braess/Seiffert, 2013, S.184

⁴⁶⁰ vgl. Tober, 2012, S.112

⁴⁶¹ vgl. Van Basshuysen/Schäfer, 2015, S.638

- Bioethanol auf der Basis von Zucker- und Stärkepflanzen

Biokraftstoffe der 2. Generation

- Biogas (auf Erdgasqualität aufbereitet),
- Biomass-to-Liquid (BtL),
- Bioethanol auf Lignozellulosebasis.⁴⁶²

Bei der Erzeugung von Biokraftstoffen unterscheidet man grundsätzlich zwischen Biokraftstoffen der ersten und der zweiten Generation. Die erste Generation benutzt nur die Frucht (Öl, Zucker, Stärke), der Rest wird als Futtermittel genutzt. Die zweite Generation verwendet hingegen die ganze Pflanze, teilweise auch mitsamt der schwer aufzuschließenden Cellulose.⁴⁶³

Biodiesel aus Rapsöl (Fatt Acyd Methyl Ester, FAME) hat sich in Europa momentan gegenüber anderen Biokraftstoffen durchgesetzt. Zudem wird zunehmend darauf gesetzt, Biodiesel zu hydrierten Pflanzenölen (Hydrotreated Vegetable Oils, HVO) und synthetischem Diesel (Biomass-to-Liquid, BtL) weiterzuentwickeln. BtL weist dank seines biogenen Ursprungs einen annähernd geschlossenen CO₂-Kreislauf auf. Es wird prognostiziert, dass HVO oder BtL Biodiesel in seiner Dominanz ablösen werden.⁴⁶⁴

GTL (Gas to Liquid) und CTL (Coal to Liquid) stellen weitere alternative Dieselkraftstoffe dar. Erdölbegleitgas, das bei der Rohölförderung entsteht, wird oftmals für die Erzeugung von GTL benutzt. Das Erdölbegleitgas wurde zuvor häufig abgefackelt und steuert nun dazu bei, dass eine wirtschaftlichere Herstellung des Kraftstoffs möglich ist.⁴⁶⁵

Abhängig von der Region gibt es unterschiedliche politische Herangehensweisen, um sich den Herausforderungen zu stellen.⁴⁶⁶ Die Klimaerwärmung ist in Europa ein vorrangig zu lösendes Problem. Die Reduzierung der CO₂-Emissionen stellt dementsprechend eine politische Prämisse dar. In den USA bestehen derzeit die politischen Bestrebungen hingegen die Energieversorgung sicherzustellen.⁴⁶⁷

⁴⁶² vgl. <http://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/kraft-betriebsstoffe/alternative-kraftstoffe#textpart-2> (Gelesen am: 07.05.2017)

⁴⁶³ vgl. Pflaum, 2010, S.10

⁴⁶⁴ vgl. Braess/Seiffert, 2013, S.470

⁴⁶⁵ vgl. Pflaum, 2010, S.10

⁴⁶⁶ vgl. Gacsai, 2016, S.17ff

⁴⁶⁷ vgl. Braess/Seiffert, 2013, S.469

8 Zusammenfassung und Ausblick

Um die Luftqualität in industrialisierten Ländern nachhaltig zu verbessern, hat die Gesetzgebung eine Reduzierung der wichtigsten konventionellen Luftschadstoffe (NO_x , CO , CH , SO_2 , PM) sowie des Treibhausgases CO_2 vorgeschrieben. Auf diese Weise wurde die Automobilindustrie auch dazu gezwungen, die Abgasemissionen ihrer Pkw's durch inner- und außermotorischen Maßnahmen deutlich zu drosseln. Die vorherigen Seiten geben unter anderem einen Überblick über die zurzeit verfügbaren Maßnahmen zur Senkung der Abgasemissionen, die aktuellen vom Gesetzgeber (konzentriert auf Europa und den USA) vorgeschriebenen Prüfverfahren und Abgasmesstechniken sowie die alternativen Brennverfahren, Antriebe und Kraftstoffe die heutzutage und in Zukunft in der Automobilindustrie eingesetzt werden.

Im ersten Teil der Arbeit sind Kennzahlen und die Zusammensetzung trockener Luft aufgelistet. Zudem werden der Aufbau und die Funktionsweise der Atmosphäre umrisshaft erläutert. Darüber hinaus wird eine kurze Einführung zu den wichtigsten Treibhausgasen und ihren Beitrag zum Treibhauseffekt vorgestellt.

Im nächsten Kapitel wird der konventionelle Verbrennungsmotor (sowohl Diesel- als auch Ottomotor) im Detail beschrieben. Zunächst wird der allgemeine Aufbau der zwei Motoren dargestellt. Die jeweiligen Kraftstoffe mit ihren chemischen Zusammensetzungen und ihrer Herstellung, sowie deren Vor- und Nachteile werden daraufhin aufgezeigt. Neuartige, alternative Kraftstoffe werden an dieser Stelle auch ein erstes Mal angeführt. Eine kurze Auflistung der wichtigsten Additive, die zu den Kraftstoffen beigemischt werden, um die herkömmlichsten Probleme zu beseitigen, wird gegeben. Anschließend werden die Takte, die unterschiedlichen Verbrennungsverfahren – mit den daraus resultierenden Hauptbestandteilen des Abgases – und Luftzahlen, sowie die Brennverläufe des Diesel- und Ottomotors ausführlich ausgearbeitet.

Der folgende Teil zählt die wichtigsten konventionellen Luftschadstoffe mit ihren Auswirkungen auf den Menschen und die Umwelt auf. Die chemische Entstehung und Zusammensetzung, sowie die Entstehung im Verbrennungsprozess (bei welchen Luftzahlen) werden genauer beschrieben. Dazu werden einige Grafiken aufgezeigt, die den Anteil des Verkehrs am gesamten anthropogenen Ausstoß sowie die Jahresmittelwerte in Deutschland und Österreich über einige Jahrzehnte zeigen. Festzustellen ist, dass einige Schadstoffe durch die strenge Gesetzgebung und die daraus resultierenden inner- und außermotorischen Maßnahmen zur Schadstoffsenkung in den letzten Jahren deutlich beigetragen haben. Andererseits gibt es Bestandteile am Abgas (wie z. B. CO_2) die einen alarmierenden Anstieg aufweisen.

Auf den folgenden Seiten werden die Gesetzgebung und einige Prüfverfahren (Typprüfung, Serienprüfung, Feldüberwachung), die auf den in Europa und in den USA geltenden Regularien basieren, aufgezeigt. In den USA ist zwischen der EPA und der CARB zu unterscheiden, die unterschiedliche Grenzwerte für Schadstoffe vorgeben. In Europa wurde mit dem 01. September 2017 ein neuer Fahrzyklus (WLTP, Worldwide harmonized light-duty vehicles test procedure) bzw. Messverfahren für Abgasemissionen eingeführt, der das reale Fahrverhalten eines Kraftfahrzeugs deutlich besser imitiert und somit genauere Verbrauchs- und Abgaswerte erfasst. Dazu zählt auch ein portables Emissionsmesssystem (PEMS, Portable emission measurement system), welches die von einigen Automobilherstellern illegal eingebaute Software zur Beeinflussung der Motorsteuerung und Vortäuschung eines geringeren Schadstoffausstoßes umgeht. Der in der Gesetzgebung deutliche Trend zu einem ganzheitlichen Verbot von Schadstoffen und somit zu einem in vorhersehbarer Zukunft nicht mehr existierenden konventionellen Verbrennungsmotor ist bemerkbar.

Im Folgenden werden die schadstoffreduzierenden Maßnahmen, die inner- und außermotorisch angewendet werden, geschildert. Die chemischen Reaktionen, die während eines katalytischen Prozesses ablaufen, sind aufgelistet. Innermotorisch trägt das Downsizing mit seinen diversen Arten der Aufladung, die Abgasrückführung (AGR) und die Art der Einspritzung am meisten zur Schadstoffreduzierung bei. Die Abgasnachbehandlung, die außermotorisch verläuft, besteht hauptsächlich aus folgenden Maßnahmen: der Dieseloxidationskatalysator (DOC), die Katalysatoren zur NO_x-Minderung mit ihren zwei Hauptvertretern NO_x-Speicherkatalysator (NSC) und die selektive katalytische Reduktion von Stickstoffoxiden mit Ammoniak (NH₃-SCR), der Diesel-Partikelfilter (DPF) und der geregelte Drei-Wege-Katalysator. Ein besonderes Augenmerk wird auf die Sekundärmaßnahmen gelegt, da diese ihren Einsatz hauptsächlich in Dieselfahrzeugen finden und der Dieselmotor seit dem ‚Abgasskandal‘ deutlich unter Beschuss geraten ist. Dem NSC gelingt eine ca. 70 prozentige Reduzierung des Stickstoffoxid-Ausstoßes. Heutzutage findet man ein NSC zumeist in einem ‚D-Kat-System‘, welches aus einem DOC und einem DPNR-Modul (NSC + Diesel-Partikelfilter) besteht. NH₃-SCR-Systeme arbeiten mit einer Beimischung von Ammoniak, welcher aus einer wässrigen Harnstofflösung im Abgasstrom entsteht. Das SCR-System mit der Einspritzung von Harnstoff wird als ‚aktives‘ Verfahren angesehen. Da NH₃-SCR-Systeme zu einer sehr guten Kraftstoffeffizienz und einem verbesserten Leistungsverhalten verhelfen, finden sie großen Einsatz in heutigen Fahrzeugen.

Zum Abschluss werden zukünftige Alternativen (alternative Brennverfahren, alternative Antriebe und alternative Kraftstoffe) dargestellt. Zu den alternativen Antrieben gehören die Hybridelektrofahrzeuge und die elektrischen Antriebe. Durch die besonders in den letzten Jahren immer stärker begrenzten Schadstoffe, rüstet sich die Automobilindustrie um und legt immer mehr Wert auf diese Alternativen.

9 Literatur- und Quellenverzeichnis

Antoshkiv, Oleksiy; Berg, Heinz Peter; Wagner, Rodion: Untersuchungen des ottomotorischen Betriebs mit verschiedenen Kraftstoffmischungen, BTU Cottbus, Eigenverlag, Cottbus, 2007

Benedix, Roland: Bauchemie, Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten, 6. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015

Borgeest, Kai: Elektronik in der Fahrzeugtechnik, Hardware, Software und Projektmanagement, 2. Auflage, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2010

Borgeest, Kai: Messtechnik und Prüfstände für Verbrennungsmotoren, Messungen am Motor, Abgasanalytik, Prüfstände und Medienversorgung, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016

Braess, Hans-Hermann; Seiffert, Ulrich: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 7. Auflage, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2013

Eichlseder, Helmut; Klüting, Manfred; Piock, Walter F.: Grundlagen und Technologien des Ottomotors, Springer-Verlag, Wien, 2008

Förstner, Ulrich: Umweltschutztechnik, 8. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012

Förtsch, Gabi; Meinholz, Heinz: Handbuch Betrieblicher Immissionsschutz, Springer Spektrum, Wiesbaden, 2013

Fuhrmann, Johannes: Ökologische Bewertung von Harnstoff als Ausgangsbasis für das Reduktionsmittel NH_3 in SCR-Systemen, Diss., Techn. Univ., Wien, 2013

Gacsai, Krisztián: Evaluierung des möglichen CO_2 -Einsparpotentials bei gleichzeitiger Optimierung von motor- und kraftstoffseitigen Maßnahmen bei Ottomotoren, Diss., Techn. Univ., Wien, 2016

Günel, Zehra Rana: Bewertung von Dieseloxydationskatalysatoren unter spezieller Berücksichtigung der NO_2 -Bildungsrate, Diss., Techn. Univ., Wien, 2012

Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: Taschenbuch der Mathematik und Physik, 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009

Hilgers, Michael: Dieselmotor, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016

Hoepke, Erich; Breuer, Stefan: Nutzfahrzeugtechnik, Grundlagen, Systeme, Komponenten, 8. Auflage, Springer-Vieweg, Wiesbaden, 2016

Isermann, Rolf: Elektronisches Management motorischer Fahrzeugantriebe, Elektronik, Modellbildung, Regelung und Diagnose für Verbrennungsmotoren, Getriebe und Elektroantriebe, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2010

Jung, Sandra: Elektromobilität – Technologie mit Zukunft, Diss., Hochschule Mittweida, Berlin, 2014

Kurzweil, Peter: Chemie, Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente, 10. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015

Liebl, Johannes: Internationaler Motorenkongress 2014, Antriebstechnik im Fahrzeug, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014

Liebl, Johannes; Beidl, Christian: Internationaler Motorenkongress 2016, Mit Konferenz Nfz-Motorentechnologie, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016

Liebl, Johannes; Beidl, Christian: Internationaler Motorenkongress 2015, Mit Nutzfahrzeugmotoren – Spezial, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015

Lunanova, Marco: Optimierung von Nebenaggregaten, Maßnahmen zur Senkung der CO₂-Emission von Krafffahrzeugen, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009

Merker, Günter P.; Schwarz, Christian: Grundlagen Verbrennungsmotoren, Simulation der Gemischbildung, Verbrennung, Schadstoffbildung und Aufladung, 4. Auflage, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009

Mollenhauer, Klaus; Tschöke, Helmut: Handbuch Dieselmotoren, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007

Möltner, Lukas: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Ammoniakaufbereitung aus AdBlue® unter besonderer Berücksichtigung der Tropfen/Abgas- und Tropfen/Wandinteraktion, Diss., Techn. Univ., Wien, 2014

Norm DIN EN 590: Kraftstoffe für Krafffahrzeuge – Dieselmotoren – Anforderungen und Prüfverfahren, Berlin, 2013-12

Paulweber, Michael; Lebert, Klaus: Mess- und Prüfstandstechnik, Antriebsstrangenentwicklung, Hybridisierung, Elektrifizierung, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014

Peitz, Daniel; Bernhard, Andreas M.; Mehring, Max; Elsener, Martin; Kröcher, Oliver: Chemie Ingenieur Technik, Harnstoffhydrolyse für die selektive katalytische Reduktion von NO_x: Vergleich der Flüssig- und Gasphasenzersetzung, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2013

Pflaum, Heiko: Potenzial von synthetischen Dieseldieselkraftstoffen im motorischen Betrieb unter besonderer Berücksichtigung der Auswirkung alternativer Brennverfahren und Einspritzstrategien auf die Ruß- und Stickoxidbildung, Diss., Techn. Univ., Wien, 2010

Reif, Konrad: Moderne Dieseleinspritzsysteme, Common Rail und Einzelzylindersysteme, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2010, (zit. 2010a)

Reif, Konrad: Sensoren im Kraftfahrzeug, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2010, (zit. 2010b)

Reif, Konrad: Dieselmotor-Management, Systeme, Komponenten, Steuerung und Regelung, 5. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2012, (zit. 2012a)

Reif, Konrad: Klassische Diesel-Einspritzsysteme, Reiheneinspritzpumpen, Verteilereinspritzpumpen, Düsen, mechanische und elektronische Regler, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2012, (zit. 2012b)

Reif, Konrad: Automobilelektronik, Eine Einführung für Ingenieure, 5. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014

Reif, Konrad: Abgastechnik für Verbrennungsmotoren, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015, (zit. 2015a)

Reif, Konrad: Ottomotor-Management im Überblick, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015, (zit. 2015b)

Reif, Konrad; Noreikat, Karl E.; Borgeest, Kai: Kraftfahrzeug-Hybridantriebe, Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2012

Schäuffele, Jörg; Zurawka, Thomas: Automotive Software Engineering, Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge effizient einsetzen, 6. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016

Siebenpfeiffer, Wolfgang: Vernetztes Automobil, Sicherheit, Car-IT, Konzepte, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014

Szikora, Marcus: Ermittlung und Bewertung der Abbildungsgüte von Realfahrteinflüssen zur Darstellung von Real-Driving-Emissions-Messungen auf Rollenprüfständen, Diss., Techn. Univ., Wien, 2015

Tille, Thomas: Automobil-Sensorik, Ausgewählte Sensorprinzipien und deren automobiler Anwendung, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2016

Tober, Werner: Entwicklung der Schadstoff- und CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs in Österreich und Deutschland bis 2030 und Ableitung des Handlungsbedarfs, Diss., Techn. Univ., Wien, 2012

Van Basshuysen, Richard: Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direkteinblasung, Ottokraftstoffe, Erdgas, Methan, Wasserstoff, 4. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017

Van Basshuysen, Richard; Schäfer, Fred: Handbuch Verbrennungsmotor, Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven, 7. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015

Wallentowitz, Henning; Freialdenhoven, Arndt: Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges, Technologien, Märkte und Implikationen, 2. Auflage, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2011

Wallentowitz, Henning; Reif, Konrad: Handbuch Kraftfahrzeugelektronik, Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen, Vieweg, Wiesbaden, 2006

Wedeniowski, Sebastian: Mobilitätsrevolution in der Automobilindustrie, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2015

Wiegleb, Gerhard: Gasmesstechnik in Theorie und Praxis, Messgeräte, Sensoren, Anwendungen, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Treibhauseffekt.....	5
Abbildung 2: Verteilung von O ₃ und H ₂ O-Dampf in der Atmosphäre	6
Abbildung 3: Stickstoffoxid (gerechnet als NO ₂) -Emissionen nach Sektoren (DE)....	7
Abbildung 4: PM ₁₀ -Emissionen nach Sektoren (AT).....	7
Abbildung 5: Schema der allgemeinen Energiewandlung	9
Abbildung 6: Vierzylinder-Dieselmotor ohne Hilfsaggregate (Schema)	11
Abbildung 7: Zusammensetzung von Benzin und Diesel.....	13
Abbildung 8: Typische Siedelinien für Benzin und Diesel.....	13
Abbildung 9: Grundzüge der Raffinerie-Arbeitsverfahren	14
Abbildung 10: Vereinfachtes Schema einer Rohödestillationsanlage	16
Abbildung 11: Aufbau der Alkane bzw. Paraffine.....	17
Abbildung 12: Probleme in Dieselfahrzeugen, die durch Additive gelöst werden	18
Abbildung 13: Die vier Takte des Viertaktprozesses (Dieselmotor).....	22
Abbildung 14: Abgaszusammensetzung von Verbrennungsmotoren - Rohemission	25
Abbildung 15: Vorgänge bei der Gemischbildung und Verbrennung im Dieselmotor	27
Abbildung 16: Signale des Klopfensors (Oszilloskopdarstellung)	30
Abbildung 17: Entstehungsbereiche der Schadstoffe im Brennraum eines Dieselmotors bei heterogenem Gemisch.....	32
Abbildung 18: Schadstoffentstehung in Abhängigkeit vom Luft/Kraftstoff-Verhältnis und von der Verbrennungstemperatur	34
Abbildung 19: Zündverzug bei direkter Einspritzung	35
Abbildung 20: Reaktionsmechanismen im Brennraum	38
Abbildung 21: Schadstoffbildung in Abhängigkeit von der Luftzahl λ	39
Abbildung 22: Spezifische Emissionen Pkw (DE).....	40
Abbildung 23: Weltweite Reduktionsziele für CO ₂ -Emissionen in g/km für Pkw	41
Abbildung 24: Trend der NO _x -Belastung (berechnet als NO ₂) für alle Sektoren (AT)	44
Abbildung 25: Trend der Stickstoffdioxid-Jahresmittelwerte (DE).....	46
Abbildung 26: Rußertrag in Abhängigkeit von Temperatur und Luftverhältnis.....	47
Abbildung 27: Staubemissionen (PM ₁₀) nach Quellkategorien (DE).....	49
Abbildung 28: Staubemissionen (PM _{2,5}) nach Quellkategorien (DE)	49
Abbildung 29: Trend der CO-Belastung und der CO-Emissionen in Österreich (AT)	51
Abbildung 30: Beitrag zum Treibhauseffekt durch Kohlenstoffdioxid und durch langlebige Treibhausgase (anthropogen)	52
Abbildung 31: Zeitliche Änderung der Kohlenstoffdioxid-Konzentration in der Atmosphäre (Monatsmittel).....	53
Abbildung 32: Geltungsbereiche der verschiedenen Abgasgesetzgebungen für Pkw und leichte Nkw	58
Abbildung 33: WLTP – Worldwide harmonized light-duty vehicles test procedures, class 3	60

Abbildung 34: NEFZ – Neuer Europäischer Fahrzyklus	63
Abbildung 35: EPA & CARB	64
Abbildung 36: FTP-75 (Federal Test Procedure).....	68
Abbildung 37: Rollprüfstand mit CVS-Abgasverdünnungssystem	69
Abbildung 38: PEMS – Portable Emission Measurement System	70
Abbildung 39: Möglichkeiten der Aufladung.....	73
Abbildung 40: Prinzip der mechanischen Aufladung (Kompressor).....	75
Abbildung 41: Prinzip der Abgasturboaufladung (Turbolader).....	76
Abbildung 42: Prinzip einer Abgasanlage (Dieselmotor)	82
Abbildung 43: Selektive Katalytische Reduktion von Bosch	85
Abbildung 44: Dieselpartikelfilter (Wandstromfilter)	88
Abbildung 45: Drei-Wege-Katalysator mit λ -Sonde	90
Abbildung 46: Anteil des Entwicklungsaufwands der Mechanik, Elektronik und Software	92
Abbildung 47: Einflussfaktoren für zunehmende Diversifizierung und Elektrifizierung des Antriebstrangs.....	94
Abbildung 48: Systemstruktur von Hybridantrieben.....	96

11 Gleichungsverzeichnis

Gleichung 1: Vollständige und ideale Verbrennung reinen Kraftstoffes.....	22
Gleichung 2: Stöchiometrische Verbrennungsgleichung Diesel.....	28
Gleichung 3: Luftzahl bzw. Luft-Kraftstoff-Verhältnis.....	30
Gleichung 4: Stöchiometrischer Luftbedarf.....	30
Gleichung 5: Stöchiometrischer Luftbedarf anhand C, H und O im Kraftstoff.....	31
Gleichung 6: Exponentielle Abhängigkeit der Zündverzugszeit von der Brennraumtemperatur.....	35
Gleichung 7: Bildung von Stickstoff-Sauerstoffsäuren durch Stickstoffdioxid.....	45
Gleichung 8: Photolytische Bildung von Ozon durch Stickstoffdioxid.....	45
Gleichung 9: Wassergas-Shift-Reaktion.....	52
Gleichung 10: Kohlenstoffdioxid-Ausstoß pro Liter Diesel (ohne Emissionen der Bereitstellungskette).....	53
Gleichung 11: Kurbelwellenwinkel.....	78
Gleichung 12: Oxidation von Kohlenmonoxid.....	79
Gleichung 13: Oxidation von Kohlenwasserstoffe.....	79
Gleichung 14: Oxidation von Cer(III)-Oxid durch NO.....	80
Gleichung 15: Oxidation von Cer(III)-Oxid durch H ₂ O.....	80
Gleichung 16: Reduktion von Cer(IV)-Oxid durch CO.....	80
Gleichung 17: Reduktion von Cer(IV)-Oxid durch H ₂	80
Gleichung 18: Ceroxid als Sauerstoffspeicher.....	81
Gleichung 19: Die Speicherphase des NSC.....	81
Gleichung 20: Die Reaktion des NO _x -Absorbers.....	82
Gleichung 21: Die Regenerationsphase des NSC.....	82
Gleichung 22: Reduktion von NO zu N ₂	82
Gleichung 23: Thermolyse.....	84
Gleichung 24: Hydrolyse.....	84
Gleichung 25: Reduktion von Stickstoffmonoxid zu N ₂ und H ₂ O in Beisein von O ₂	84
Gleichung 26: Reduktion von Stickstoffdioxid zu N ₂ und H ₂ O in Beisein von O ₂	84
Gleichung 27: Oxidation von Ammoniak zu elementaren N ₂ in Beisein von O ₂	85
Gleichung 28: Oxidation von Ammoniak zu NO in Beisein von O ₂	85
Gleichung 29 : Oxidation von Kohlenstoffmonoxid.....	88
Gleichung 30 : Oxidation von unverbrannten Kohlenwasserstoffen.....	88-89
Gleichung 31 : Reduktion von Stickstoffmonoxid.....	89
Gleichung 32 : Reduktion von Stickstoffdioxid.....	89
Gleichung 33 : Unerwünschte Nebenreaktionen.....	89

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgewählte Kennzahlen trockener Luft (Meereshöhe)	3
Tabelle 2: Zusammensetzung von trockener und „normaler“ Luft (Bezugsjahr 1992)	4
Tabelle 3: Eigenschaften motorischer Brennstoffe in den (DIN) EN-Normen	12
Tabelle 4: Eigenschaften des Dieselmotorkraftstoffes	15
Tabelle 5: Ausgewählte Anforderungen an Dieselmotorkraftstoffe (EN 590)	17
Tabelle 6: Eigenschaften des Ottomotorkraftstoffes	19
Tabelle 7: Vergleich charakteristischer Daten von Otto- und Dieselmotoren	26
Tabelle 8: C/H-Verhältnis und Luftbedarf diverser Kraftstoffe	31
Tabelle 9: Grenzwerte für Schadstoffemissionen von Pkw (EU)	42
Tabelle 10: Grenzwerte für Schadstoffemissionen von Pkw (EU)	61
Tabelle 11: Grenzwerte für Schadstoffemissionen – LEV III FTP Standards	66
Tabelle 12: Grenzwerte für Schadstoffemissionen von – TIER 3 FTP Standards	67