

„Warum sind Dieselmotoren „NO_x- und NO₂-Schleudern?“ – eine zweifelhafte Erklärung des Umweltbundesamts UBA et al.

Auslöser für die vorliegende Abhandlung war eine Diskussion mit Studierenden während meiner Vorlesung über das spezifische Emissionsverhalten von Otto- und Dieselmotoren. Viele Studierende sind verunsichert aufgrund völlig gegensätzlicher Darstellungen zur verbrennungsmotorischen Stickoxid-Emission in den Medien, Vorlesungen und auch im Unterricht an den Berufsschulen.

Zur wissenschaftlichen Klärung des Sachverhalts sind nachfolgend in chronologischer Reihenfolge zunächst ausgewählte Resultate einer Recherche aufgeführt, **die dem dieselmotorischen Arbeitsverfahren im Vergleich zum ottomotorischen Brennverfahren wesentlich höhere Stickoxid-Emissionen zuschreiben.**

Das Umweltbundesamt, 2013:

„Dieselmotoren erzeugen – **bei Turboaufladung besonders stark** – prozessbedingt wesentlich **mehr NO_x als Ottomotoren**. Der **permanent hohe Luftüberschuss in der Flamme** und **höhere Verbrennungstemperaturen** begünstigen die chemischen Reaktionen, die zur Oxidation des Luftstickstoffs führen.“, (UBA, 2013).

Prof. Dr. K. Schreiner, Fachgebiet Verbrennungsmotoren, Hochschule Konstanz, 2015:

„Nun ist es so, dass der Dieselmotor mit einem Luftüberschuss gefahren wird. Der braucht mehr Luft, als er eigentlich zum Verbrennen des Kraftstoffes benötigt: **Und weil der Dieselmotor mehr Luft hat, hat er auch mehr Stickoxide.**“, (Wagner, 2015)

Die Welt, 2015:

„Hauptmittent ist der Dieselmotor, in dem während der Verbrennung aufgrund des **technisch bedingten Luftüberschusses und der hohen Temperaturen mehr NO_x** entsteht als im Benziner“, (WELT, 2015)

Deutschlandfunk, 2015:

„Doch warum entstehen die Stickoxide eigentlich **nur bei Diesel-PKW?**“, (Wagner, 2015)

Verband der Automobilindustrie, 2016:

„Eine Herausforderung beim Dieselmotor sind dagegen vor allem **die vergleichsweise hohen NO_x-Emissionen**. Sie resultieren ebenso wie der geringe Kraftstoffverbrauch **aus dem hohen**

Druck und damit hohen Verbrennungstemperaturen, die sich bei der Verbrennung im Zylinder des Dieselmotors aufbauen.“, (VDA, 2016, Seite 4)

Die Automobilwoche, 2016:

„Selbstzünder sind verbrauchsärmer und CO₂-effizienter als Benziner. Aufgrund der Verbrennungsvorgangs entstehen aber eben auch Feinstaubpartikel und **höhere Mengen von Stickoxiden**. Der Feinstaub kann mit Hilfe von Partikelfiltern in modernen Motoren inzwischen zu großen Teilen abgefangen werden. Stickoxide bleiben aber ein Problem. **Der hohe Sauerstoffanteil bei der Verbrennung** des Kraftstoffs erhöht die Effizienz, begünstigt aber auch die Stickoxid-Bildung.“, (Automobilwoche, 2016)

The image is a screenshot of the FIS (Forschungs-Informationssystem) website. At the top left is the FIS logo with the text 'Forschungs-Informationssystem'. To the right are navigation icons for 'SUCHE', 'ÜBER FIS', 'FAQ', 'NEWSLETTER', and 'ANMELDEN'. Below the logo is a dark blue bar with the text 'Mobilität und Verkehr'. Underneath are two tabs: 'Energie, Umwelt und Klima' and 'Luftschadstoffe und Lärm'. The main content area features a yellow hexagonal icon with 'Sb' and the title 'Zielkonflikte bei der Abstimmung moderner Motoren'. Below the title, it says 'Erstellt am: 22.08.2019 | Stand des Wissens: 26.08.2019' and 'Synthesebericht gehört zu: Feinstaub im Straßenverkehr'. On the right, there is a box for 'Ansprechpartner' listing 'Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Volkswirtschaftslehre (ECON), Prof. Dr. Kay Mitusch'. The main text of the article is highlighted in yellow and reads: 'Die Abgase von Dieselmotoren enthalten deutlich mehr Stickoxide als die von Ottomotoren. Dies liegt vorrangig an der höheren Verbrennungstemperatur beim Diesel. Zusätzlich ist eine Abgasnachbehandlung wie beim Ottomotor mittels Drei-Wege-Katalysator nicht möglich [Gutt18]. In modernen Dieselfahrzeugen wird daher ein SCR-Katalysator (AdBlue Einspritzung) oder ein NOx-Speicherkatalysator verbaut. Bei Nachrüstsystemen liegt der Kraftstoffmehrerverbrauch bei bis zu sechs Prozent aufgrund der Energie, die zum Heizen und Betrieb des Katalysators notwendig ist [ADAC19].'

Bild 1: „**Höhere Verbrennungstemperaturen beim Dieselmotor**“, so das Institut für Volkswirtschaftslehre am KIT, Prof. Dr. Kay Mitusch, (FIS, 2019)

Autoexperte Ferdinand Dudenhöffer, 2017:

„Beim Diesel ist es so, dass der Diesel einen besseren Wirkungsgrad hat als der Benziner, weil er hochverdichtet den Treibstoff verbrennt. Je besser ich verbrenne, desto geringer ist natürlich mein CO₂-Ausstoß.“ Doch es gibt auch einen entscheidenden Nachteil: **Durch die höhere Verbrennungstemperatur werden dafür mehr andere Schadstoffe ausgestoßen.**“, (SWR, 2017)

Bundesverband der Deutschen Industrie, 2018:

„Vor allem **die vergleichsweise hohen NO_x-Emissionen** sind eine Herausforderung. Sie resultieren, ebenso wie der geringe Kraftstoffverbrauch, **aus dem besonderen Verbrennungsverfahren.**“, (BDI, 2018)

Spiegel, 2019:

„Benziner bilden so gut wie keine Stickoxide, deshalb konzentrieren sich die Diskussionen auf Diesel“, (Spiegel, 2019).

Prof. Dr. S. Reindl et al., Institut für Automobilwirtschaft ifa, 2019

„Die NO_x-Konzentration der Abgase von Dieselmotoren ist **konzeptbedingt** – **wegen hoher Verbrennungstemperaturen bei Luftüberschuss** – **höher als bei Benzinmotoren**“, (Reindl, 2019)

Zusammenfassend begründen die aufgezeigten Quellen die „im Vergleich zu Ottomotoren wesentlich höhere Stickoxid-Emissionen des Dieselmotors“ primär mit:

- **Höheren Verbrennungstemperaturen (und höherer Druck)**
- **Luftüberschuss, d.h. höherer Sauerstoffanteil bei der Verbrennung**

Daneben schaffen es tatsächlich einige Medien, **das Thema „motorische Stickoxid-Bildung“ als spezifisches Phänomen des Dieselmotors zu vermitteln**, siehe bspw. (Spiegel, 2019) und (Deutschlandfunk, 2015).

Auf den ersten Blick ist höchst interessant ist, dass es sich **in allen Quellen ausnahmslos um unbelegte Behauptungen handelt**. Eindeutige Messwerte, aussagekräftige Diagramme oder sonstige verwertbare Belege sucht man indessen vergebens. Die in der chronologischen Reihenfolge früheste Behauptung stammt vom Umweltbundesamt UBA aus dem Jahr 2013.

Thermodynamische Faktenlage

Unterschiedliche Verbrennungstemperaturen

Zu den charakteristischen Merkmalen des klassischen diesel- und des ottomotorischen Brennverfahrens gehören u.a. die **wesentlichen Unterschiede im Verdichtungsverhältnis sowie auch im Verbrennungsluftverhältnis**. Aus ersterem resultiert das beim Ottomotor deutlich geringere Druckniveau im Brennraum. Der permanente Motorbetrieb nahe am stöchiometrischen Luftverhältnis im Vergleich zum je nach Lastanforderung variierenden überstöchiometrischen Betrieb des Dieselmotors verursacht die **höheren Spitzentemperaturen im Brennraum des Ottomotors**, siehe bspw. auch (Pischinger et al., 2002, Seite 181).

„Der **stöchiometrisch geregelte Ottomotor** weist im Vergleich der Brennverfahren die **höchsten mittleren Verbrennungstemperaturen** auf ...“, (Merker et al., 2015).

„**Beim Dieselmotor** liegen durch den Luftüberschuss **grundsätzlich niedrigere Verbrennungstemperaturen** vor ...“, (Beidl, 2010)

Bild 2 illustriert dazu die typischen kurbelwinkel-aufgelösten Verläufe der mittleren Gastemperatur im Brennraum eines Dieselmotors und eines Ottomotors. Diese Darstellung findet man in dieser oder abgewandelter Form in zahlreichen Standardwerken und Vorlesungsunterlagen über den Verbrennungsmotor.

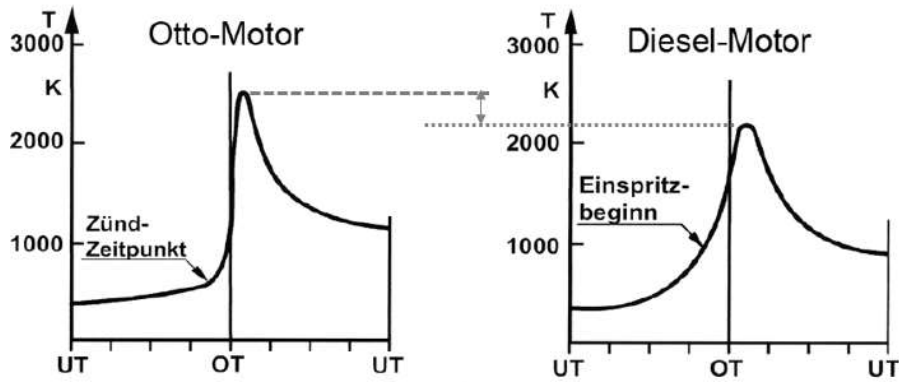


Bild 2: Typischer Verlauf der Gastemperaturen bei Otto- und Dieselmotoren, Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik der Universität Magdeburg, (ISUT, 2010)

Man erkennt neben einer um etwa 300K niedrigeren Maximaltemperatur beim Dieselmotor auch deutlich die Temperaturunterschiede bei beiden Verfahren bis zum Einsetzen der Verbrennung aufgrund des niedrigeren Verdichtungsverhältnisses beim Ottomotor.

Vergleichbare Kurvenverläufe finden sich auch in Forschung und Lehre des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik IVT an der TU Graz, Bild 3.

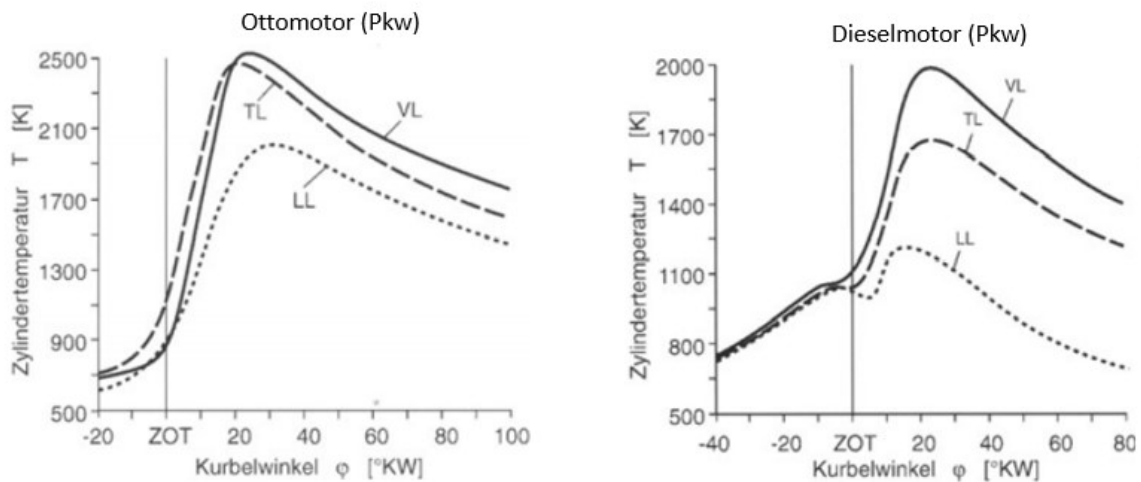


Bild 3: Vergleich der Gastemperaturen in typischen Otto- und Dieselmotoren, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik IVT der Technischen Universität Graz, (Wimmer, 2018)

Auch diese Darstellung (man beachte die unterschiedlichen Maßstäbe der Ordinaten!) **verdeutlicht die niedrigeren Verbrennungstemperaturen beim Dieselmotor, die in allen Lastfällen mehrere hundert Kelvin betragen können.** Nota bene liegt dabei der maximale Gasdruck im Zylinder (in Bild 3 nicht dargestellt) des Dieselmotors mit etwa 150 bar mehr als doppelt so hoch als beim Ottomotor mit ca. 60 bar.

Das unterschiedliche Druck- und Temperaturniveau von Otto- und Dieserverfahren kann weiterhin über die thermodynamische Prozessrechnung verifiziert werden. Wie in Bild 4 exemplarisch für eine Brenndauer von 50 °KW gezeigt wird, arbeitet der Dieselmotor immer bei tieferen Zylindertemperaturen als der Ottomotor.

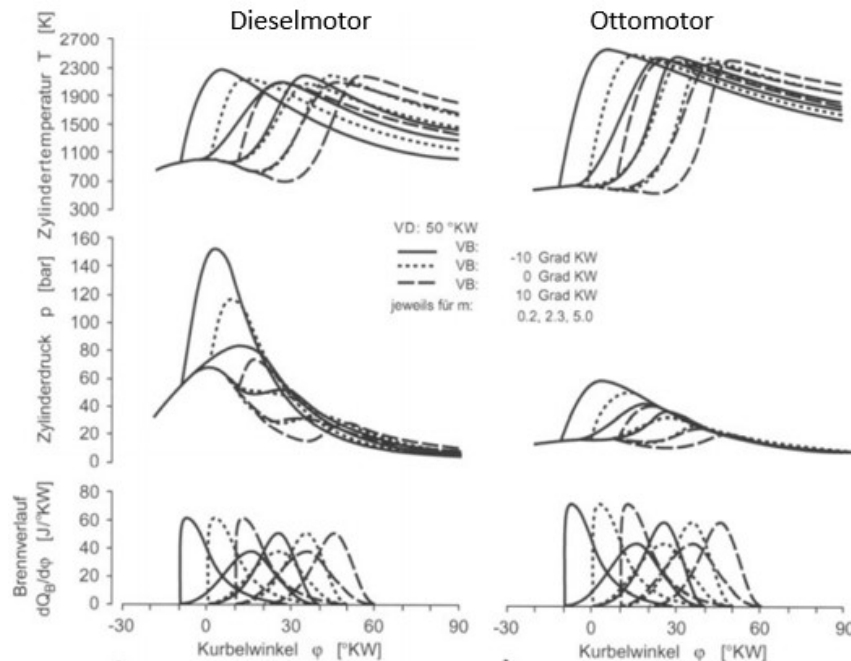


Bild 4: Resultate thermodynamischer Prozessrechnung für Otto- und Dieselmotoren für Variationen von Brennbeginn, Brenndauer und Formfaktor des Brennerverlaufs, (Pischinger et al., 2009, Seite 180)

Die Simulation ergibt nachfolgende Wertebereiche der maximalen Zylindertemperaturen, der Höchstdrücke während der Verbrennung sowie der Druckgradienten bei Otto- und Dieselmotoren, (Pischinger et al., 2009):

	Dieselmotor	Ottomotor
T_{\max}	1900 bis 2300 K	2500 bis 2700 K
p_{\max}	70 bis 150 bar	15 bis 65 bar
$dp/d\varphi_{\max}$	2,5 bis 35 bar/°KW	0,3 bis 20 bar/°KW

Nach den Darstellungen des Umweltbundesamts UBA sollen die Prozesstemperaturen in turboaufgeladenen Dieselmotoren besonders hoch sein, (UBA, 2013). Auch diese Behauptung entspricht nicht der Realität. Wie später noch gezeigt wird, liegen die Stickoxid-Emissionen aufgeladener, ladeluftgekühlter Dieselmotoren sogar deutlich unter den Emissionen von Diesel-Saugmotoren. Trotz höherer Drücke im Brennraum (Bild 5, oben) resultieren beim turboaufgeladenen Dieselmotor erkennbar niedrigere Temperaturen in der Verbrennungsphase im Vergleich zur Saugversion, siehe beispielhaft Bild 5 unten. Ganz

eindeutig erkannt man aber auch in diesem Vergleichsdiagramm die deutlich höheren Gastemperaturen im Verlauf der ottomotorischen Verbrennung.

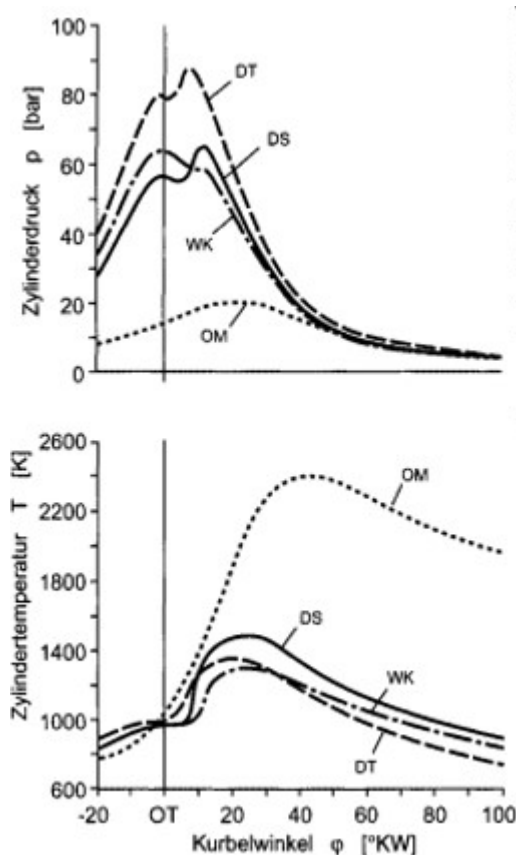


Bild 5: Druck- und Temperaturverläufe bei Teillast von Ottomotor (OM), Diesel-Saugmotor (DS), Diesel Turbomotor (DT) und Diesel-Kammermotor (WK), (Pischinger et al., 2009, Seite 376)

Druck und Temperatur im Brennraum sind über die thermische Zustandsgleichung $p \cdot V = m \cdot R \cdot T$ gekoppelt. In dieser Beziehung bedeuten p den Zylinderdruck, V das Zylindervolumen, m die Ladungsmasse im Brennraum, R die Gaskonstante und schließlich T die mittlere Gastemperatur.

Die Ladungsmasse ist beim Dieselmotor aufgrund des überstöchiometrischen Betriebs aber stets höher als beim Ottomotor. In der Teillast tritt der Unterschied noch stärker heraus, da der Ottomotor aufgrund seiner Quantitätsregelung die Masse des Gemischs bei konstantem Verbrennungsluftverhältnis zunehmend drosselt.

Unterschiedliches Emissionsniveau bei NO und NO₂

Über 90 % der motorischen Stickoxid-Emission bestehen aus Stickstoffmonoxid NO, das sich während des Verbrennungsprozesses nicht in der Flamme bildet, sondern im verbrannten Gas, auch „Post-Flame“ Bereich genannt. Das „thermische“ Stickoxid entsteht bei Gastemperaturen über etwa 2000 K nach dem von *Zeldovich* im Jahr 1946 postulierten Reaktionsmechanismus. Die Höhe der NO-Konzentration ist dabei primär anhängig von der Gastemperatur, der Sauerstoff-Konzentration und der Reaktionszeit. Speziell der Einfluss der Temperatur wirkt sich dabei exponentiell auf die Schadstoff-Bildung aus

Neben dem Temperaturniveau der Verbrennungsgase spielt aber auch das Verbrennungsluftverhältnis λ eine wichtige Rolle. In Bild 6 sieht man zur Verdeutlichung

einen weiteren „Klassiker“ aus Kompendien und Unterrichtsmaterialien über Verbrennungsmotoren. Vergleichbare Darstellungen findet man u.a. auch bei Tschöke et al. (2010), Pischinger et al. (2009) und Beidl (2010).

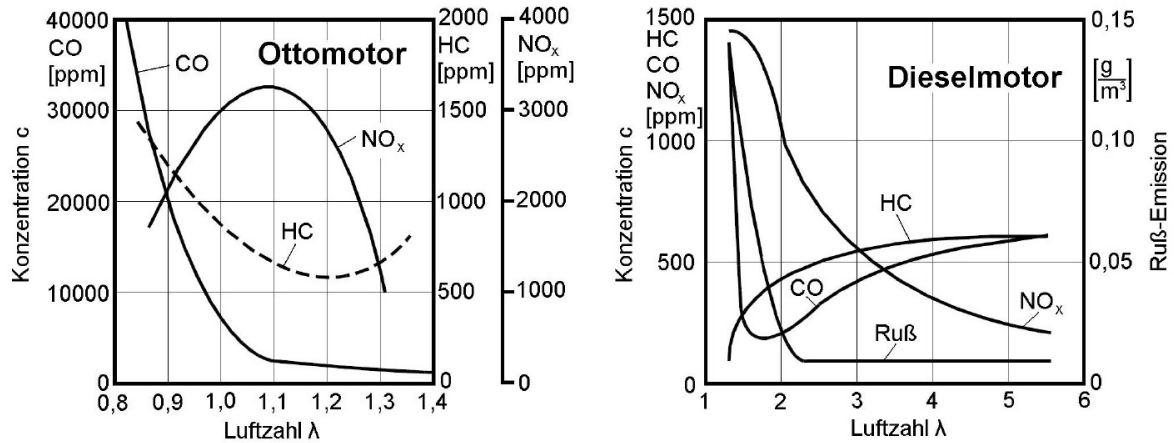


Bild 6: Einfluss der Luftzahl auf motorische Emissionen, Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik der Universität Magdeburg, (ISUT, 2010)

Das Maximum der Stickoxid-Bildung liegt sowohl beim otto- als auch beim dieselmotorischen Brennverfahren leicht über dem stöchiometrischen Luftverhältnis bei etwa $\lambda = 1,1$. Dies erklärt sich aus der Interaktion von Temperatur und Sauerstoff-Gehalt hinsichtlich der NO-Entstehung. Das Maximum der (hier nicht dargestellten) Verbrennungstemperatur wird bei einer leicht unterstöchiometrischen, daher sauerstoffarmen Zylinderladung mit einem λ von ca. 0,9 erzielt. Zu höheren Luftzahlen hin nimmt die Gastemperatur dann kontinuierlich ab bei gleichzeitig ansteigendem Sauerstoff-Anteil, der den sinkenden Temperatureinfluss zunächst noch kompensiert. Die Stickoxid-Bildung nimmt dadurch weiter zu bis zum Erreichen des bereits erwähnten Maximums. Bei noch weiterer Abmagerung dominiert aber die abfallende Verbrennungstemperatur und die NO-Bildung sinkt schnell ab.

Unter Beachtung der unterschiedlichen Skalen in Bild 6 wird deutlich, dass die Stickoxid-Bildung des Dieselmotors im Rohabgas nur einen Bruchteil derer eines Ottomotors im Rohgas beträgt! Ottomotoren werden aktuell seit Einführung des 3-Weg-Katalysators bei annähernd stöchiometrischem Gemisch und damit nahezu in allen Lastfällen nahe ihres Stickoxid-Maximums betrieben. Der Dieselmotor erreicht sein NO-Maximum nur bei Vollast bei einem Verbrennungsluftverhältnis von etwa 1,2 bis 1,3. Mit abnehmender Last steigt die Luftzahl bis auf einen Wert über 5. Im Einklang damit sinkt die NO-Bildung kontinuierlich ab, Bild 6 links.

Bemerkenswert sind auch die vergleichsweise niedrigen CO- und HC-Emissionen des Dieselmotors: „Gegenüber dem Ottomotor liegen die Rohemissionen des Dieselmotors insgesamt niedriger.“ (Pischinger et al., 2009, Seite 281), siehe u.a. auch (van Basshuysen, 2017, Seite 39)

Fast schon in Vergessenheit geraten ist der Emissionsvorteil bei Stickoxiden der bis in die 90er Jahre im Pkw-Bereich dominierenden Kammernmotoren, Bild 7. Durch Zerteilung des Brennraums und die damit verbundenen zweistufigen Verbrennung wurde das erwähnte Maximum der Stickoxid-Bildung geschickt umgangen.

„Die NO_x-Emissionen liegen etwa um 2/3 niedriger als beim vergleichbaren Ottomotor, da das Temperaturniveau aufgrund des Luftüberschusses niedriger liegt. Dabei weisen Vorkammermotoren niedrigere Werte auf als Direkteinspritzer. Gründe dafür sind die stärkere Gemischschichtung und die langsamere Brenngeschwindigkeit“, (Beidl, 2010, Seite 26), siehe auch Bild 7.

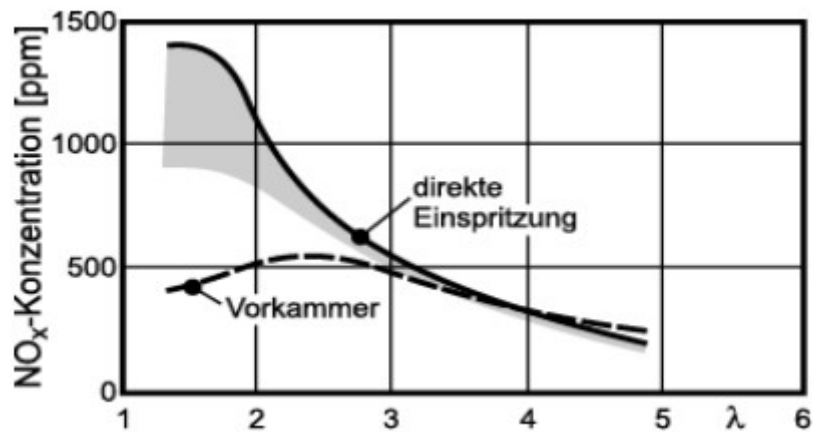


Bild 7: Einfluss der Luftzahl auf die Stickoxid-Emission von direkteinspritzenden Dieselmotoren und Vorkammer-Dieselmotoren (Beidl, 2010)

Stickoxid-Kennfelder ausgeführter Motoren

Bild 8 stellt schließlich beispielhaft die NO_x-Emissionen eines typischen-Dieselmotors (linkes Teilbild) in der Pkw-Anwendung und eines Pkw-Benzinmotors (rechtes Teilbild) im Kennfeld dar, (van Basshuysen et al., 2017).

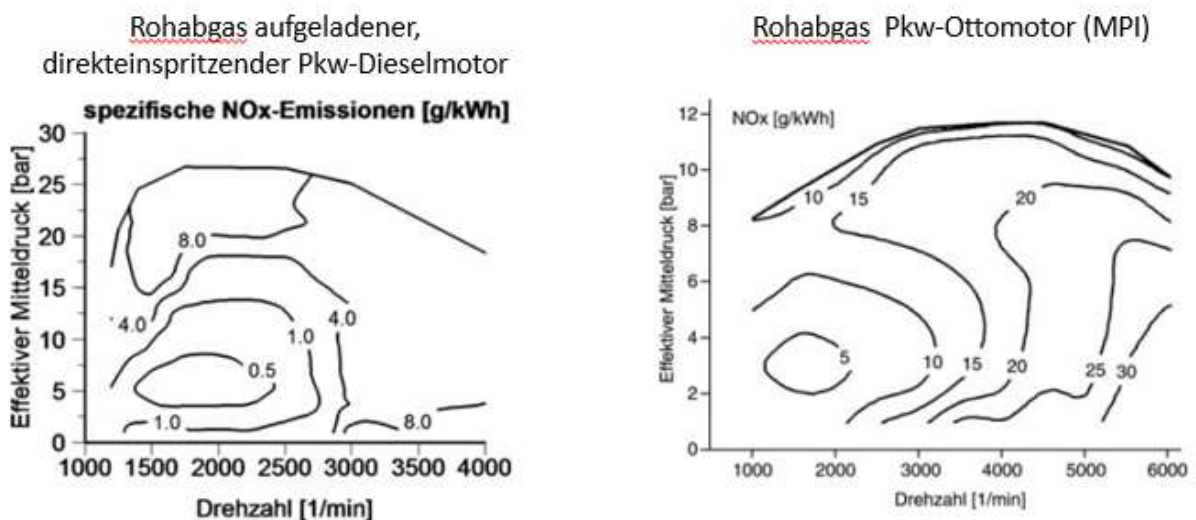


Bild 8: Kennfeld-Vergleich der Stickoxid-Emissionen eines typischen Diesel- und Ottomotors für Pkw-Anwendungen, (van Basshuysen et al., 2017)

Auch dieser Vergleich macht deutlich, dass die Stickoxid-Rohemissionen eines stöchiometrisch betriebenen Ottomotors im gesamten Betriebsbereich ein Vielfaches über denen eines Dieselmotors liegen.

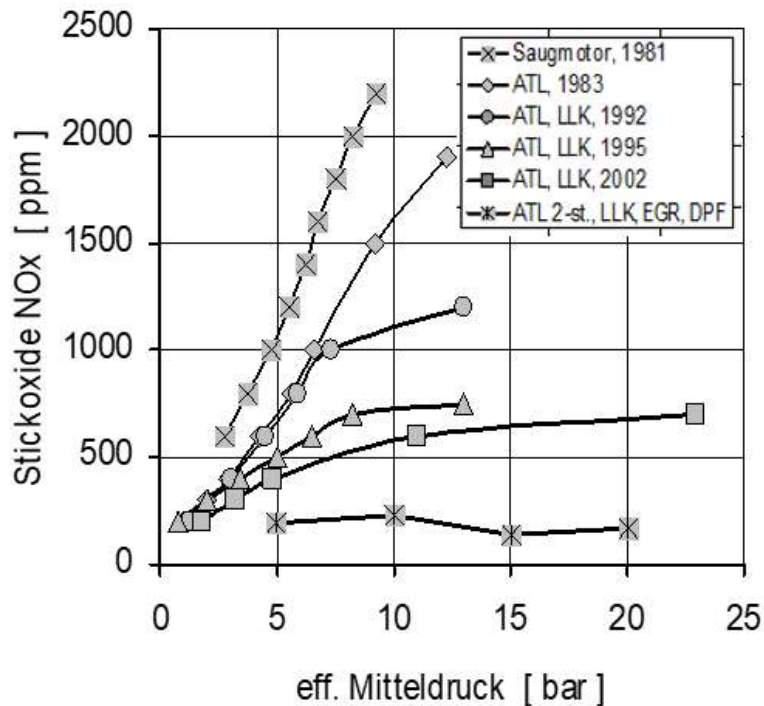


Bild 9: Historischer Vergleich dieselmotorischer Stickoxid-Emission zwischen Saugmotor und turboaufgeladenen Motoren (Hubvolumen ca. 2 l/Zyl., mittlere Drehzahl), (Gärtner, 2006)

Den positiven Einfluss der Aufladung und Ladeluftkühlung auf die NOx-Bildung illustriert abschließend das Bild 9. Die relativ hohen Emissionen des Saugmotors können durch Abgasturbo-Aufladung (ATL) und Ladeluftkühlung (LLK) wirkungsvoll abgesenkt werden, (Gärtner, 2006).

Zusammenfassung und Fazit

Die eingangs aufgeführten Behauptungen des Umweltbundesamts UBA und weiterer Quellen erweisen sich wie zuvor aufgezeigt insgesamt falsch und irreführend. Leider konnte im Rahmen der vorliegenden Abhandlung nicht (mehr) geklärt werden, wer oder was Auslöser und Ursprung dieser Desinformation war. Chronologisch betrachtet, liegt aber die Vermutung nahe, dass das Umweltbundesamt um 2013 diese Falschinformation publiziert hat und anderen Quellen diese „Erklärungen“ unreflektiert übernommen haben. Peinlich, dass ausgerechnet der Verband der Automobilindustrie VDA keine Gegendarstellung publiziert, sondern im Gegenteil die Falschinformation „der aus den hohen Drücken und damit hohen Temperaturen entstehenden hohen NOx-Emissionen“ wiederholt, (VDA, 2016, Seite 4).

Literaturverzeichnis

Automobilwoche (2016). *Hat der Dieselmotor noch eine Zukunft?*. Abgerufen am 15. August 2021, von

<https://www.automobilwoche.de/article/20160211/AGENTURMELDUNGEN/302119927/antriebstechnologien-hat-der-dieselmotor-noch-eine-zukunft>

BDI (2018). *Die Verbrennungstechnologien im Vergleich*. Bundesverband der Deutschen Industrie BDI e.V.. Abgerufen am 15. August 2021, von <https://bdi.eu/artikel/news/die-verbrennungstechnologien-im-vergleich/>

Beidl, C. (2010). Skriptum Verbrennungskraftmaschinen II, Kapitel 15. Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe vkm, TU Darmstadt.

FIS (2019). *Zielkonflikte bei der Abstimmung moderner Motoren*. Forschungsinformationssystem FIS – Mobilität und Verkehr. Abgerufen am 15. August 2021, von <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/503331/>

Gärtner, U.(2006). *Entwicklung der Leistungsdichte von Nfz-Dieselmotoren aus thermodynamischer Sicht*. 10. Symposium Dieselmotorentchnik, Technische Akademie Esslingen TAE, 2006.

Gutt, E. (2018). *Chemische Prozesse bei der Entstehung von Stickoxiden in Diesel- und Benzinmotoren*. Atene KOM Schriftriehe. Abgerufen am 15. August 2021, von https://atenekom.eu/wp-content/uploads/2018/02/180220_atene_Schriftenreihe_Artikel_1_web.pdf

ISUT (2010). Vorlesungsunterlagen des Instituts für Strömungsmechanik und Thermodynamik der Universität Magdeburg. Abgerufen von http://www.uni-magdeburg.de/isut/TV/Download/Kapitel_10_Verbrennung_WS0910.pdf

Merker, G.; Teichmann, R, (2014). *Grundlagen Verbrennungsmotoren*. Springer Vieweg, 7. Auflage 2014. DOI 10.1007/978-3-658-03195-4

Pischinger, R., Klell, M.; Sams, T. (2009). *Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine*. ISBN 978-3211-99276-0 3. Aufl., SpringerWienNewYork

Reindl, S .& Maier, B. (2019). *Wirkungen und Effekte der Hardware-Nachrüstung von Dieselfahrzeugen*. Gutachterliche Stellungnahme des Instituts für Automobilwirtschaft ifa vom 8. November 2019

van Basshuysen, R.; Schäfer, F. (2017). *Handbuch Verbrennungsmotor*. Springer Vieweg, 8. Auflage, 2017. DOI 10.1007/978-3-658-10902-8

Spiegel (2019). *Wie schädlich sind Feinstaub und Stickoxide?* Abgerufen von <https://www.spiegel.de/gesundheit/diagnose/faktencheck-wie-schaedlich-sind-feinstaub-und-stickoxide-a-1249897.html>

SWR (2017). *Das Dilemma mit CO2 und Schadstoffen*. Abgerufen am 15. August 2021, von <https://www.swrfernsehen.de/marktcheck/hintergrund/article-swr-6410.html>

Tschöke, H.; Mollenhauer, K.; Maier, R. (2018). *Handbuch Dieselmotoren*. Springer Referenz Technik, 4. Auflage 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-07697-9>

UBA (2013). *Warum sind Dieselmotoren „NOx- und NO2-Schleudern“?* Umweltbundesamt UBA. Abgerufen am 15. August 2021, von <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/warum-sind-dieselmotoren-nox-no2-schleudern>

VDA (2016). *Die Diesel-Technologie:Fragen und Antworten*. Verband der Automobilindustrie VDA, Stand 6. September 2016. Abgerufen am 15. August 2021, von <https://www.vda.de/de/services/Publikationen/die-diesel-technologie%3A-fragen-und-antworten.html>

Wagner, T. (2015). „*Man muss eine chemische Fabrik in das Fahrzeug einbauen*“. Deutschlandfunk vom 22.12.2015. Abgerufen von https://www.deutschlandfunk.de/stickoxide-der-diesel-pkw-man-muss-eine-chemische-fabrik-in.697.de.html?dram:article_id=340585

WELT (2015). *Schadstoffe im Autoabgas*. Die WELT am 29. September 2015. Abgerufen am 15. August 2021, von <https://www.welt.de/motor/news/article147006432/Schadstoffe-im-Autoabgas.html>

Wimmer, A. (2018). *Thermodynamik des Verbrennungsmotors*. Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz, Vorlesungsskript SS 2018.