

Diplomarbeit

Kurbelwinkelbasierte Modellbildung der Stickoxid- und Rußemissionen bei dieselmotorischer Verbrennung

Autor: Josef Schäffler
Betreuung: Dr. Daniel Alberer
Fertigstellung: September 2011

Kurzfassung

Die Anwendungsbereiche von Dieselmotoren sind durch Innovationen wie die Hochdruckeinspritzung, Aufladetechnik, Abgasrückführung und moderne Motorsteuerkonzepte in der Vergangenheit immer breiter geworden. Strenger werdende Emissionsvorschriften und der Ruf nach immer leistungsfähigeren, kraftstoffsparenderen Motoren erfordern aber trotzdem eine stetige Weiterentwicklung dieser Technologien.

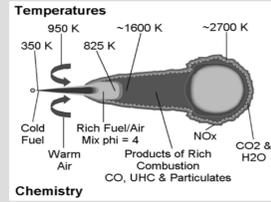
Im Zuge der Dieselmotorverbrennung entstehen neben Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid, die durch unvollständige Verbrennung verursacht werden, Stickoxide (NOx) und Ruß. Stickoxide greifen u.a. die Schleimhäute und Atmungsorgane an und begünstigen Atemwegserkrankungen. Ruß ist generell hoch karzinogen und weitere Einflüsse von Rußpartikeln auf die Gesundheit liefern bis heute Diskussionstoff unter Experten. Daher werden starke Verminderungen, insbesondere der Partikel und der NOx Emission, gefordert. Gestützt wird diese Forderung durch immer strengere gesetzliche Anforderungen an die Abgasgrenzwerte. Die Einhaltung dieser Grenzwerte ist nur durch einen hohen Entwicklungsaufwand zu realisieren, der alle Potentiale zur Reduktion der Emissionen ausnützt.

Um die Entstehung von NOx und Ruß während der Verbrennung zu verstehen und somit die Emissionen zu kontrollieren, sind geeignete Modelle erforderlich. Die Modellierung der Emissionen ist jedoch nicht einfach und war in der Vergangenheit schon Bestandteil vieler Werke und ist bis heute noch nicht eindeutig beschrieben. Die vorgestellten Ansätze reichen von CFD-Modellen über phänomenologische Modelle, nulldimensionale Ein- und Mehrzonen-Modelle bis zu rein empirischen Modellen. Mit steigendem Detaillierungsgrad steigen der Rechenaufwand und die Menge der abzustimmenden Parameter.

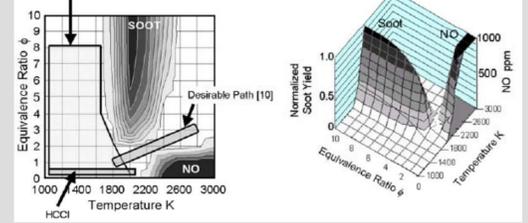
In dieser Arbeit wurden aus der einschlägigen Literatur bekannte Ansätze zur Vorhersage der Ruß- und NO-Emissionen modelliert. Das implementierte NO-Modell wurde vereinfacht, um eine echtzeitfähige Anwendung zur Berechnung der Stickoxide zu erhalten. Des Weiteren wurde aufbauend auf die Grundstruktur des Rußmodells nach Hiroyasu eine kurbelwinkel aufgelöste Beschreibung mit Hilfe datenbasierter Methoden zur Vorhersage der Rußemissionen erstellt.

Schadstoffbildung

- Schadstoffbildung durch unvollständige Verbrennung
- Stickoxidbildung in den heißen Zonen des Verbrennungsgases
- Rußbildung in fetten Gebieten des Einspritzstrahls
- Zielkonflikt Stickoxid / Ruß

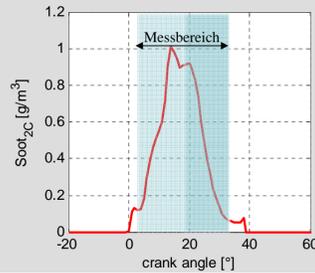


Smokeless Rich Combustion by Reducing Temperature



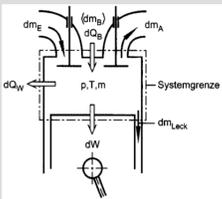
Prüfstandstechnik

- Messung an hochdynamischen Motorprüfständen
- Indizierdruckmessung als Basis der Verbrennungsanalyse
- 2-Farben Spektroskopie zur In-Zylinder Ruß- und Temperaturmessung



Verbrennungsanalyse

- 1-Zonen Rechnung als Basis der Ruß- und NO-Modellierung
- 4 unbekannte Größen bei 3 zur Verfügung stehenden Gleichungen
- Lösung des Systems durch Messung des Zylinderdrucks



$$\frac{dm}{d\varphi} = \frac{dm_E}{d\varphi} - \frac{dm_A}{d\varphi} - \frac{dm_{Lack}}{d\varphi}$$

$$\frac{dU}{d\varphi} = -p \frac{dV}{d\varphi} + \frac{dQ_{in}}{d\varphi} - \frac{dQ_{out}}{d\varphi}$$

$$\frac{pdV}{d\varphi} + V \frac{dp}{d\varphi} = m \cdot R \frac{dT}{d\varphi} + m \cdot T \frac{dR}{d\varphi} + R \cdot T \frac{dm}{d\varphi}$$

- Teilung des Brennraums in 2 fiktive Zonen → Unverbrannt / Verbrannt
- Beschreibung der Temperatur der heißen Zone zur NO-Berechnung

$$p(\varphi) \cdot V(\varphi)_{burned} = m(\varphi)_{burned} \cdot T(\varphi)_{burned} \cdot R(\varphi)_{burned}$$

$$p(\varphi) \cdot V(\varphi)_{unburned} = m(\varphi)_{unburned} \cdot T(\varphi)_{unburned} \cdot R(\varphi)_{unburned}$$

$$V(\varphi) = V(\varphi)_{burned} + V(\varphi)_{unburned}$$

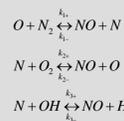
- Empirische Beschreibung der Temperaturdifferenz

$$T(\varphi)_{burned} - T(\varphi)_{unburned} = B(\varphi) \cdot A$$

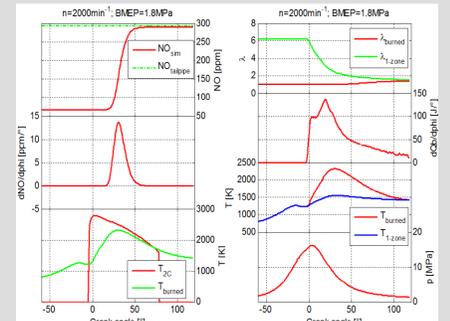
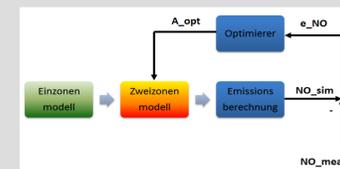
$$A = A_{Specific} \frac{1.2 + (\lambda - 1.2)^{1.5}}{2.2 \lambda_{Prime}}$$

NO - Modellierung

- Heider Modell
- Berechnung der NO Bildungsrate mit Zeldovich Mechanismus:



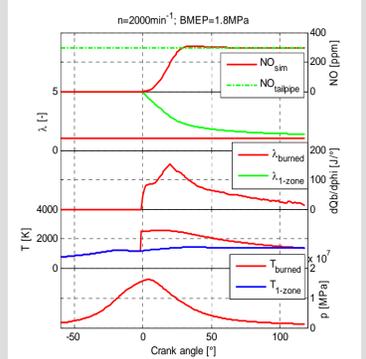
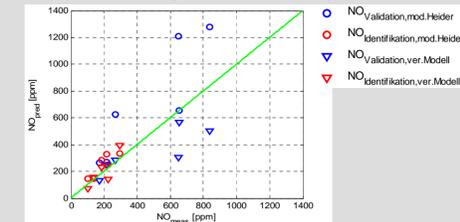
- Anpassung des Modells an im Abgas gemessene NO-Konzentrationen mit nichtlinearem Optimierer:



- Echtzeitfähiges NO-Modell

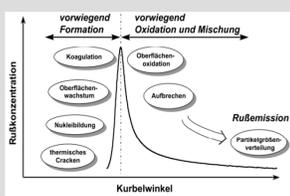


- Gegenüberstellung Heider / echtzeitfähiges Modell

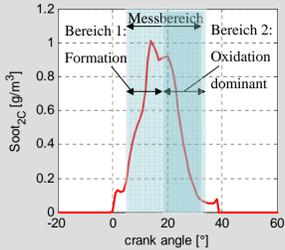


Ruß - Modellierung

- Grundstruktur Formation / Oxidation



- JKU Modell
- Aufteilung der gemessenen Rußmasse in 2 Bereiche

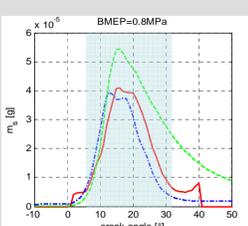


- Modellierung nach Hiroyasu

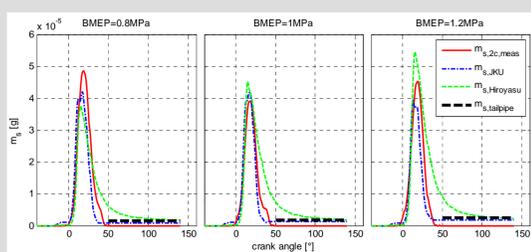
$$\frac{dm_s}{dt} = A_s \cdot \frac{dm_{s,2c}}{dt} \cdot p^{0.5} \cdot \exp\left(-\frac{E_{Ts}}{R \cdot T}\right)$$

$$\frac{dm_{s,2c}}{dt} = A_{s,2c} \cdot m_s \cdot \lambda_{O_2} \cdot p^{1.5} \cdot \exp\left(-\frac{E_{s,2c}}{R \cdot T}\right)$$

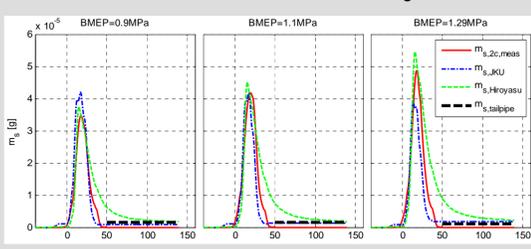
- Beurteilung der Modellgüte in fix definiertem Bereich



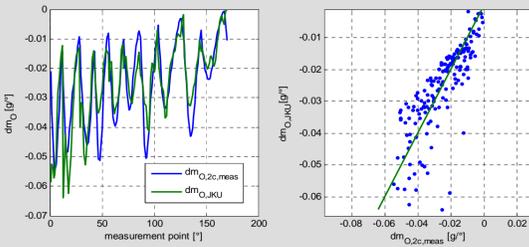
- Identifikationsergebnisse



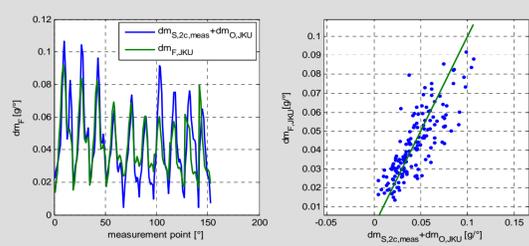
- Validierungsergebnisse



- Systematische Bestimmung der Eingangsparameter und Koeffizienten für das Oxidationsmodell



- Systematische Bestimmung der Eingangsparameter und Koeffizienten für ein virtuelles Formationsmodell



- Identifizierte Modellstruktur

$$m_s = m_p - m_o$$

$$\frac{dm_s}{d\varphi} = e^{a_s} \cdot \left(\frac{dm_{s,2c}}{d\varphi}\right)^{b_s} \cdot p^{c_s} \cdot O_2^{d_s} \cdot OH^{e_s} \cdot e^{-\frac{E_{Ts}}{R \cdot T}}$$

$$\frac{dm_{s,2c}}{d\varphi} = e^{a_{s,2c}} \cdot m_s^{b_{s,2c}} \cdot \lambda_{O_2}^{c_{s,2c}} \cdot p^{d_{s,2c}} \cdot e^{-\frac{E_{s,2c}}{R \cdot T}}$$

Resultate - Ausblick

NO - Modellierung

- Heider Modell
- Hoher Rechenaufwand (speziell zur Berechnung der Kalorik)
- Keine Wiedergabe der NO-Konzentration über den gesamten Betriebsbereich

- Echtzeitfähiges Modell
- Gute Vorhersage für bestimmten Betriebsbereich nach Modellabstimmung

- Ausblick
- Erweiterung des echtzeitfähigen Modells für transiente Vorgänge

Ruß - Modellierung

- Hiroyasu / datenbasiertes Modell
- Ähnliche Ergebnisse für beide Modelle
- Modellparameter lassen sich durch systematische Methoden bestimmen

- Ausblick
- Modellentwurf für mehrere Drehzahlen → größerer Betriebsbereich
- Vereinfachtes Einzonenmodell aus echtzeitfähigem NO-Modell als Basis
- Einbindung von nicht kurbelwinkel aufgelösten Größen (AGR-Rate, Drehzahl, Mitteldruck, ...)

BMEP	e_JKU	e_Hiro	e_tailpipe_JKU	e_tailpipe_Hiro
1,4	2,356	1,03	-0,352	-0,041
1,2	1,221	0,250	-0,200	0,739
1	1,032	10,720	0,034	-1,524
0,8	1,818	2,990	0,734	1,811
Mittelwert	1,607	3,748	0,054	0,246

BMEP	e_JKU	e_Hiro	e_tailpipe_JKU	e_tailpipe_Hiro
1,29	2,085	0,210	-0,458	0,194
1,1	0,490	13,690	0,127	-1,838
0,9	0,658	2,340	0,368	1,506
Mittelwert	1,078	5,413	0,013	-0,046