

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	VII
Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XIX
Abkürzungsverzeichnis	XXI
Symbolverzeichnis	XXVII
Zusammenfassung	XXIX
Abstract	XXXI
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Die Partikel	5
2.2 Die Bildung der Partikel	9
2.3 Die Stickstoffoxide	13
2.3.1 Die thermische Stickstoffmonoxid-Entstehung im Verbrennungsmotor (nach Zeldovich)	15
2.3.2 Die prompte Stickstoffmonoxid-Entstehung (nach Fenimore)	20
2.3.3 Die Stickstoffdioxid-Entstehung	22
3 Stand der Technik	23
3.1 Emissionsmessung	23
3.2 Messgeräte zur NO _x -Messung	26
3.2.1 Der Chemilumineszenz-Detektor (CLD)	26
3.2.2 Der (Zirkonium-)NO _x -Sensor (ZrO ₂ -Sensor)	30

3.2.3	Das Fourier-Transformation-Infrarot-Spektroskop (FTIR-Spektroskop)	32
3.2.4	Der elektrochemische NO-Sensor	33
3.2.5	Der Nicht-Dispersive Infrarot-Analysator (NDIR-Analysator)	34
3.2.6	Die Quantenkaskadenlasertechnik (QKL-Technik)	35
3.3	Messgeräte zur Partikel-Messung	36
3.3.1	Der fotoakustische Soot-Sensor (PASS)	38
3.3.2	Die elektrischen Mobilitätsspektrometer	41
3.3.3	Geräte auf Basis der Lichtabsorptionseigenschaft von Partikeln	43
3.3.4	Der Flammenionisationsdetektor (FID/fast-FID)	44
3.3.5	Real time PM Analyzer	47
3.4	Messgerät zur CO- und CO ₂ -Messung	48
4	Versuchsaufbau	51
4.1	Der Prüfling	51
4.2	Die Motorsteuerung	52
4.3	Die Sensorik	53
4.4	Die Messgeräte	55
5	Stationäre Emissionsmessung	57
5.1	Start-up der Messgeräte	57
5.1.1	Lage und Einschubform des Micro-Soot-Sensors	57
5.1.2	Analyse und Validierung des Ruß-Messverfahrens	60
5.2	Zylinderspezifische Auflösung des NO-Messverfahrens	63
5.3	Stationäre Parametervariationen	67
5.3.1	Variation der EKAS-Stellung	67
5.3.2	Variation der Saugrohrtemperatur (über Ladeluftkühler)	70

5.3.3	Variation der Saugrohrtemperatur (über AGR-Kühler-Bypass)	72
5.3.4	Variation der Voreinspritzstrategie	74
5.3.5	Variation des Raildrucks	76
5.3.6	Variation des Ladedrucks (über VTG-Stellung)	79
5.3.7	Variation der Motorbetriebstemperatur über Kühlwasser- und Öl-Temperatur	81
5.3.8	Lambda-Variation über die Einspritzmenge	95
6	Instationäre Emissionsmessung	101
6.1	Potential der Messgeräte	102
6.2	Einfluss des Rampengradienten auf die instationären Emissionen	107
6.2.1	Analyse einer Außerorts-NEFZ-Rampe	108
6.2.2	Analyse einer WLTP-Rampe	114
6.3	Analyse thermischer Effekte auf die NO-Emissionen	117
6.3.1	Lastanhebung ab der Leerlauf-Drehzahl	117
6.3.2	Nulllast bei mittlerer Motordrehzahl	119
6.3.3	Lastanhebung und -absenkung ab der Leerlauf-Drehzahl im Kaltstart	124
6.3.4	Lastanhebung bei unterschiedlicher Motorbetriebstemperatur	129
7	Schlussfolgerung und Ausblick	133
8	Literaturverzeichnis	137