

---

## Inhaltsverzeichnis

---

|                                                                          |          |
|--------------------------------------------------------------------------|----------|
| Inhaltsverzeichnis.....                                                  | i        |
| Abbildungsverzeichnis.....                                               | v        |
| Tabellenverzeichnis.....                                                 | viii     |
| Formelverzeichnis .....                                                  | x        |
| Abkürzungsverzeichnis.....                                               | xiii     |
| Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes .....                          | xvi      |
| <b>1 Einleitung .....</b>                                                | <b>1</b> |
| 1.1 Abgasnachbehandlung bei Dieselfahrzeugen .....                       | 2        |
| 1.2 Einordnung der Arbeit .....                                          | 3        |
| 1.3 Technologierückblick zu Katalysatoren vor dem Abgasturbolader .....  | 4        |
| 1.3.1 Mercedes Benz OM603 Diesel trap oxidizer .....                     | 5        |
| 1.3.2 Subaru Otto pre catalytic converter .....                          | 8        |
| <b>2 Emissionsentstehung, Abgasnachbehandlung und Gesetzgebung .....</b> | <b>9</b> |
| 2.1 Entstehung von Stickoxiden.....                                      | 13       |
| 2.1.1 Thermisches NO (Zeldovich und Lavoie) .....                        | 14       |
| 2.1.2 Prompt-NO (Fenimore).....                                          | 14       |
| 2.1.3 Brennstoff-NO.....                                                 | 15       |
| 2.1.4 N <sub>2</sub> O-Mechanismus .....                                 | 15       |
| 2.1.5 NO <sub>2</sub> Bildung.....                                       | 15       |
| 2.2 Entstehung von Sekundäremissionen.....                               | 16       |
| 2.2.1 N <sub>2</sub> O-Emissionen.....                                   | 16       |
| 2.2.2 NH <sub>3</sub> -Emissionen.....                                   | 17       |
| 2.3 Externe Abgasrückführung .....                                       | 18       |
| 2.3.1 Niederdruck-Abgasrückführung .....                                 | 19       |
| 2.3.2 Hochdruck-Abgasrückführung .....                                   | 19       |
| 2.4 Abgasnachbehandlung.....                                             | 20       |

|          |                                                                           |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.1    | Dieseloxydationskatalysator .....                                         | 20        |
| 2.4.2    | Stickoxid-Speicher-katalysator.....                                       | 22        |
| 2.4.3    | Dieselpartikelfilter .....                                                | 24        |
| 2.4.4    | SCR-Katalysator .....                                                     | 24        |
| 2.4.5    | Ammoniak-schlupf-katalysator .....                                        | 31        |
| 2.5      | Euro Abgasgesetzgebung.....                                               | 32        |
| 2.5.1    | Euro 6 .....                                                              | 32        |
| 2.5.2    | Prognose nach Euro 6d.....                                                | 34        |
| 2.6      | CO <sub>2</sub> Gesetzgebung.....                                         | 35        |
| <b>3</b> | <b>Forschung und Entwicklung an PKW-Dieselmotorantriebssträngen .....</b> | <b>38</b> |
| 3.1      | Entwicklungsschwerpunkte bei PKW-Dieselantriebssträngen .....             | 38        |
| 3.1.1    | SCR-Doppeldosierung von Harnstoffwasserlösung .....                       | 38        |
| 3.1.2    | Elektrifizierung – 48 V Mildhybridsystem .....                            | 39        |
| 3.1.3    | Elektrischer Zusatzverdichter .....                                       | 41        |
| 3.1.4    | Forschung an Katalysatoren vor dem Abgasturbolader .....                  | 43        |
| 3.1.5    | Heizkatalysator .....                                                     | 54        |
| 3.2      | Umfang und Ziel der Arbeit.....                                           | 55        |
| <b>4</b> | <b>Versuchsmethodik und untersuchte Antriebsstränge .....</b>             | <b>57</b> |
| 4.1      | Engine-in-the-Loop (EiL) Motorenprüfstand.....                            | 57        |
| 4.2      | Thermodynamische Optimierung der Ladeluftkühlung am EiL.....              | 59        |
| 4.2.1    | Thermische Umgebungsbedingungen .....                                     | 59        |
| 4.2.2    | Einfluss der Ladeluftkühlung auf das Rohemissionsverhalten.....           | 61        |
| 4.2.3    | Dynamisches Engine-in-the-Loop Ladeluftkühlermodul.....                   | 64        |
| 4.2.4    | Modellbasierte Lüftersteuerung am Ladeluftkühler .....                    | 65        |
| 4.3      | Versuchsplanung .....                                                     | 68        |
| 4.3.1    | Beschreibung der methodischen Vorgehensweise .....                        | 68        |
| 4.3.2    | Testzyklen und Routen .....                                               | 71        |
| 4.3.3    | Bewertung der Testszenarien .....                                         | 76        |
| 4.4      | Untersuchte Antriebsstränge und Peripherie .....                          | 79        |

|          |                                                                      |            |
|----------|----------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.4.1    | Versuchsmotor .....                                                  | 79         |
| 4.4.2    | Konventionelle Abgasanlage - Serienantriebsstrang .....              | 80         |
| 4.4.3    | Wechselcanningsystem für Voruntersuchungen .....                     | 81         |
| 4.4.4    | Pre-Turbo-Hybridantriebsstrang 1 (PTH-1) .....                       | 83         |
| 4.4.5    | Pre-Turbo-Hybridantriebsstrang 2 (PTH-2) .....                       | 84         |
| 4.4.6    | Luftpfad mit elektrischem Zusatzverdichter .....                     | 85         |
| 4.4.7    | HWL Dosiersystem .....                                               | 87         |
| 4.4.8    | Vergleichsantriebsstrang mit Heizkatalysator .....                   | 91         |
| 4.5      | Messsystematik .....                                                 | 92         |
| 4.6      | Simulationen .....                                                   | 93         |
| 4.6.1    | Auslegung und CFD-Berechnungen der HWL-Dosierstrecke .....           | 94         |
| 4.6.2    | Fahrzeug- und Antriebsstrangsimulation .....                         | 97         |
| <b>5</b> | <b>Versuchsdurchführung und Potenzialbewertung .....</b>             | <b>98</b>  |
| 5.1      | Betrachtung der Einzelsysteme und Systemreaktionen .....             | 98         |
| 5.1.1    | Einflüsse von Katalysatoren vor dem ATL auf das ECU-Verhalten .....  | 98         |
| 5.1.2    | Thermodynamische Untersuchungen vor dem Abgasturbolader .....        | 103        |
| 5.1.3    | Dynamikverhalten und eZV-Regelungskonzeptentwicklung .....           | 111        |
| 5.1.4    | Umsatzverhalten der SCR-Katalysatoren .....                          | 117        |
| 5.2      | Systembetrachtung am simulierten Fahrzeug .....                      | 124        |
| 5.2.1    | Thermodynamische Bedingungen für die Abgaskatalyse .....             | 125        |
| 5.2.2    | SCR-Umsatzverhalten der PTH-Systeme am EiL-Prüfstand .....           | 131        |
| 5.2.3    | SCR-Volumenvariation vor dem ATL in Simulation und Versuch .....     | 139        |
| 5.2.4    | Übergabebereich der SCR-Systeme und NH <sub>3</sub> -Verhalten ..... | 141        |
| 5.2.5    | Energetische Betrachtung der Systeme .....                           | 146        |
| 5.3      | Systemische Bewertung der Ergebnisse .....                           | 155        |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>                            | <b>157</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis .....</b>                                    | <b>159</b> |

|                                                                                     |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Anhang.....</b>                                                                  | <b>170</b> |
| A        Höhenprofile der Routen.....                                               | 170        |
| B        BMWf Förderung.....                                                        | 171        |
| <b>Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge im Rahmen dieser Arbeit.....</b>        | <b>172</b> |
| <b>Verzeichnis studentischer Arbeiten im thematischen Rahmen dieser Arbeit ....</b> | <b>173</b> |