

1. Einleitung

Die Begrenzung des Klimawandels und seiner negativen Auswirkungen auf unser Leben und unsere Umwelt gehören ohne Zweifel zu den größten Herausforderungen unserer Zeit. In den vergangenen Jahren wurden daher auf internationaler Ebene immer wieder Bemühungen zur Minimierung des globalen Treibhausgasausstoßes unternommen. Als Meilensteine gelten dabei das Kyoto-Protokoll (1997), in dem sich alle Industriestaaten erstmalig zu einer Reduzierung des Treibhausgasausstoßes verpflichteten [108], sowie das Pariser Klimaabkommen (2015), das die Begrenzung der von Menschen bewirkten Erderwärmung auf maximal +2 °C gegenüber vorindustriellen Referenzwerten vorsieht [109]. Mit rund 24 % (Stand 2015) entsteht durch das Verkehrs- und Transportwesen ein signifikanter Beitrag zur globalen Kohlenstoffdioxid-Emission (CO₂) [52], sodass der Mobilitätssektor wesentlich zum Treibhauseffekt beiträgt. Vor diesem Hintergrund wurden vom europäischen Gesetzgeber Flottengrenzwerte für CO₂-Emissionen bei Personenkraftwagen (Pkw) festgelegt, deren Überschreitung mit hohen Strafzahlungen für die Automobilbauer geahndet wird [89]. Ab dem Jahr 2020 beträgt der CO₂-Flottengrenzwert für Pkw 95 g/km. Die Erfüllung dieser Vorgabe sowie der in Paris definierten Klimaziele [109] erfordern signifikante Weiterentwicklungen im Bereich der Pkw-Antriebstechnologie. Prinzipbedingt ist der Dieselmotor bei vergleichbarer Motorisierung dem Ottomotor entsprechend dem heutigem Technikstand effizienztechnisch überlegen und verursacht in Folge dessen einen geringeren spezifischen CO₂-Ausstoß. Ein hoher Dieselanteil innerhalb einer Fahrzeugflotte wirkt sich daher positiv auf deren CO₂-Gesamtbilanz aus. Dennoch sind sowohl für das dieselmotorische als auch für das ottomotorische Brennverfahren zusätzliche Maßnahmen erforderlich, um die vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Flottengrenzwerte sicher einzuhalten und auch darüber hinausgehende CO₂-Ziele zu erfüllen. Neben der Elektrifizierung von Fahrzeugen bietet die kontinuierliche Weiterentwicklung von Verbrennungsmotoren und deren Komponenten noch immer ein beachtliches Potenzial zur Reduktion der CO₂-Emissionen. Für das Erreichen der kurz- und mittelfristigen Klimaziele sind insbesondere die letztgenannten Maßnahmen von großer Bedeutung. Als besonders vielversprechender Ansatz gilt die Verwendung alternativer Kraftstoffe, die theoretisch einen nahezu CO₂-neutralen Betrieb von Verbrennungsmotoren ermöglichen [3]. Weitere Maßnahmen sind beispielsweise die Reibungsminimierung im Antriebsstrang, die Optimierung des Luftpfads durch den Einsatz leistungsfähiger Aufladeaggregate und effizienter Ladungskühlungen sowie die Bereitstellung zusätzlicher Freiheitsgrade im Ventiltrieb [82].

Neben CO₂ reglementiert der Gesetzgeber verschiedene motorische Schadstoffkomponenten, darunter Kohlenmonoxid (CO), unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC), Partikelanzahl und -masse (PN bzw. PM) sowie Stickoxide (NO_x). Um die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit von Emissionsergebnissen zu gewährleisten, wurden zum Zweck der Zertifizierung von Fahrzeugen lokalspezifische Prüfzyklen eingeführt, die unter klar definierten Randbedingungen auf Rollenprüfständen gefahren werden. Seit September 2017 ist die *Worldwide harmonized Light duty vehicles Test Procedure* (WLTP) das offizielle Testverfahren in der Europäischen Union. Die Emissionscharakteristik eines Fahrzeugs im Realfahrbetrieb wird jedoch maßgeblich durch die Fahrweise des Fahrers, die aktuelle Verkehrssituation bzw. das betrachtete Fahrprofil sowie die vorherrschenden Umgebungsbedingungen (z.B. Lufttemperatur und -druck) bestimmt. Da diese Rand- und Einsatzbedingungen im Allgemeinen nicht mit den im Prüfverfahren vorliegenden Bedingungen übereinstimmen, können die im Realfahrbetrieb ausgestoßenen Schadstoffemissionen von den im Labor gemessenen Werten abweichen. In den Fokus der öffentlichen Wahrnehmung sind in diesem Zusammenhang insbesondere die NO_x-Emissionen von Dieselmotoren gerückt, nachdem verschiedene Institutionen bei entsprechenden Prüffahrten teilweise gravierende Überschreitungen der NO_x-Grenzwerte im Realfahrbetrieb nachweisen konnten ([36], [37], [1]). Um diesem bekannten Problem

entgegenzuwirken, wurde bereits im Vorfeld der genannten Untersuchungen die Einführung der Euro 6 RDE-Gesetzgebung (*Real Driving Emissions*) geplant. Anders als bisher werden die Fahrzeuge dabei unter realen Fahrbedingungen auf der Straße getestet und zertifiziert, sodass ein sehr weites Spektrum an Fahrsituationen und Randbedingungen abgeprüft werden kann. Die Erfassung der ausgestoßenen Schadstoffe erfolgt mit Hilfe portabler Emissionsmessgeräte (PEMS). Zur Berücksichtigung der PEMS-Messtoleranzen wurden sogenannte Konformitätsfaktoren eingeführt. Die unter Realfahrbedingungen geltenden Emissionsgrenzwerte entsprechen denjenigen des WLTP, multipliziert mit dem jeweils gültigen Konformitätsfaktor. Ab September 2017 (erste Stufe der Euro 6 RDE-Gesetzgebung) beträgt der Konformitätsfaktor $C_F = 2,1$ für die Typzulassung neuer Fahrzeugmodelle. In der zweiten Stufe der Euro 6 RDE-Gesetzgebung (ab Januar 2020) wird dieser Faktor auf $C_F = 1,43$ reduziert. Für die Zulassung neuer Fahrzeuge gelten die genannten Konformitätsfaktoren ab September 2019 bzw. Januar 2021 [32]. Es ist zu erwarten, dass die Einführung der Euro 6 RDE-Gesetzgebung beziehungsweise die Weiterentwicklung heutiger Antriebstechnologien zu einer nachhaltigen Verbesserung der Luftqualität in Großstädten führen wird.

Vor dem Hintergrund von Immissionswertüberschreitungen in Großstädten wurden von der *Europäischen Union* bereits im Jahr 2010 Grenzwerte für Schadstoffkonzentrationen in urbanen Räumen definiert. Demnach darf die städtische Stickstoffdioxid-Konzentration (NO_2) im arithmetischen Jahresmittel nicht höher als $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sein. Darüber hinaus wurde der sogenannte *1-Stundengrenzwert* für NO_2 von derzeit $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ definiert. Dieser Wert darf nicht öfter als 18-mal im Kalenderjahr überschritten werden [88]. Zur kontinuierlichen Überwachung der Luftqualität in urbanen Räumen wurden entsprechende Messstationen errichtet. Eine Messstation mit hohem Bekanntheitsgrad befindet sich am *Neckartor* in der Stuttgarter Innenstadt. Bedingt durch das hohe Verkehrsaufgebot am *Neckartor* und die Positionierung der Messstation, wurden hier vermehrt Überschreitungen der Schadstoffgrenzwerte verzeichnet. Im Jahr 2016 wurde der *1-Stundengrenzwert* für NO_2 am *Stuttgarter Neckartor* insgesamt 35-mal überschritten. Als eine Hauptquelle für die urbane NO_2 -Belastung gelten dieselmotorische Fahrzeugantriebe [107]. Demgegenüber tragen Dieselmotoren jedoch kaum zur urbanen Feinstaubbelastung bei, für die selbige in der öffentlichen Diskussion häufig ebenfalls verantwortlich gemacht werden. Tatsächlich liegt die Partikelemission moderner Dieselfahrzeuge im Bereich der Hintergrundbelastung oder sogar darunter [80], [55]. Folglich gelten die Partikelemissionen moderner Dieselmotoren seit der Einführung des Partikelfilters zu Zeiten der *Euro 4* Abgasnorm als unkritisch [104], während die Reduktion der städtischen NO_2 -Belastung weitere Anstrengungen im Bereich der Dieseleentwicklung erforderlich macht. Eine Minderung der verkehrsbedingten NO_2 -Emissionen auf ein Niveau, welches im Vergleich zur städtischen NO_2 -Belastung aus anderen Quellen vernachlässigbar ist, erscheint langfristig erreichbar zu sein [61].

Die kurz- und mittelfristige Minimierung der NO_2 -Belastung durch Dieselmotoren in urbanen Räumen bei gleichzeitiger Reduktion des CO_2 -Beitrags dieselmotorischer Antriebe zu den globalen Treibhausgasemissionen, um dem Klimawandel und seiner Folgen entgegenzuwirken, ist eine große Herausforderung für die Ingenieure unserer Zeit.

Die vorliegende Arbeit beschreibt technisch mögliche Ansätze, die einen Beitrag zu dieser Zielsetzung darstellen könnten, indem die Emissionscharakteristik moderner Verbrennungsmotoren durch die Verwendung intelligenter (Software-) Funktionen positiv beeinflusst wird. Das vorgestellte Konzept stellt damit eine kurz- bzw. mittelfristig umsetzbare Maßnahme dar, die ohne eine Komponentenanpassung am Motor oder an der Abgasnachbehandlungsanlage realisiert werden könnte.

1.1. Schadstoffbildung und Abgasnachbehandlung bei Pkw-Dieselmotoren

Mehr als 120 Jahre nach seiner Erfindung hat der Dieselmotor einen technischen Reifegrad erreicht, der nur von wenigen Maschinen übertroffen wird. Während in der Vergangenheit häufig der Wunsch

nach höheren Nennleistungen oder verbesserter Fahrdynamik ausschlaggebend für die Einführung neuer Technologien war, hat sich der Entwicklungsfokus in den letzten Jahren in Richtung der Minimierung von Schadstoffemissionen und Kraftstoffverbrauch verschoben. Eine treibende Kraft für die Entwicklung neuer Technologien sind daher die stetig strenger werdenden Schadstoffgrenzwerte. Beispielhaft seien an dieser Stelle die flächendeckende Einführung des Dieselpartikelfilters (DPF) und die Abgasrückführung (AGR) zur innermotorischen NO_x -Minderung im Pkw-Segment genannt. Eine besondere Herausforderung bei der Entwicklung emissionsmindernder Verfahren stellt dabei der Umgang mit Zielkonflikten dar, da die Reduktion einer einzelnen Abgaskomponente im Allgemeinen die Erhöhung einer anderen Abgaskomponente bewirkt. Die grundlegenden Mechanismen der NO_x -Bildung und die Wirkungsweise innermotorischer NO_x -Minderungsverfahren sowie die daraus resultierenden Wechselwirkungen bei der Entstehung anderer Abgaskomponenten (insbesondere CO_2) sind in den nachfolgenden Abschnitten zusammengefasst. Weiterhin wird ein Überblick über moderne Katalysatorsysteme gegeben, die zur außer-motorischen NO_x -Reduktion bei modernen Dieselmotoren eingesetzt werden. Neben der grundlegenden Funktionsweise werden dabei insbesondere die Leistungsgrenzen und Schwächen einzelner Systeme diskutiert. Essentiell für die Wirkung aller Katalysatorsysteme ist das schnelle Erreichen der katalysator- und emissionspezifischen Light-Off Temperatur, ab der eine effektive Emissionskonvertierung stattfinden kann. Einzelne Maßnahmen, die eine Erhöhung der Abgastemperatur bzw. der Abgasenthalpie unterstützen, werden ebenfalls beschrieben. Anschließend wird die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit sowie die Abgrenzung vom heutigen Stand der Technik erläutert. Die Beschreibung des verwendeten Versuchsträgers und der prinzipiellen Vorgehensweise bei der Durchführung dieser Arbeit bilden das Ende dieses Kapitels.

1.1.1. Kraftstoffverbrauch und Kohlenstoffdioxid-Emission

Kohlenstoffdioxid (CO_2) ist ein Produkt jedes Verbrennungsprozesses, an dem kohlenstoffhaltige Edukte beteiligt sind. Während der Verbrennung reagieren die im Dieselmotorkraftstoff enthaltenen Kohlenwasserstoffketten mit dem aus der Umgebungsluft stammenden Sauerstoff zu CO_2 . Maßnahmen, die eine Abnahme des spezifischen Kraftstoffverbrauchs bewirken, reduzieren daher zeitgleich auch die motorischen CO_2 -Emissionen. Ohne konstruktive Änderungen am Fahrzeug und dem Dieselmotor vorzunehmen, können der Kraftstoffverbrauch bzw. die motorischen CO_2 -Emissionen in einem bestimmten Motorbetriebspunkt durch einen verbrauchsoptimierten Betrieb der Nebenaggregate oder durch Steigerung des thermischen Motorwirkungsgrades (η_{th}) reduziert werden. Theoretische Maßnahmen zur Steigerung des thermischen Wirkungsgrades können anhand des *Seiliger-Prozesses*, der als thermodynamischer Vergleichsprozess schnell-laufender Dieselmotoren gilt, abgeleitet werden. Der *Seiliger-Prozess* (Abb. 1.1) zeichnet sich durch eine isochore und eine isobare Verbrennungsphase aus, die in Analogie zum realen Dieselmotor den vorgemischten bzw. den diffusionskontrollierten Teil der Verbrennung repräsentieren.

Der thermische Wirkungsgrad entspricht dem Quotienten aus der effektiv genutzten und der insgesamt zugeführten Wärmemenge (Gl. 1.1). Beide Wärmemengen können als Flächen im *Temperatur-Entropie-Diagramm* (T - s -Diagramm) visualisiert werden.

$$\eta_{th} = \frac{Q_{zu} - Q_{ab}}{Q_{zu}} \quad (1.1)$$

Gemäß Gl. 1.2 kann dabei gezeigt werden, dass isochore Wärmefreisetzen im T - s -Diagramm stets steiler verlaufen als isobare Wärmefreisetzen. Dieser Unterschied wird zusätzlich verstärkt, da sich die Steigungen der Isochoren und Isobaren proportional zur Temperatur des Arbeitsmediums verhalten. Ein

steigender Anteil der isochoren Wärmefreisetzung bewirkt daher bei konstantem Q_{zu} eine Abnahme von Q_{ab} und damit eine Erhöhung des thermischen Wirkungsgrades nach Gl. 1.1 (rechte Seite in Abb. 1.1).

$$\left(\frac{dT}{ds}\right)_{V=konst.} = \frac{T}{c_V} > \left(\frac{dT}{ds}\right)_{p=konst.} = \frac{T}{c_p} = \frac{T}{R_s + c_V}, \quad R_s > 0 \quad (1.2)$$

Wirkungsgradoptimal wäre demnach eine unendlich schnelle, vollständige Umsetzung des Kraftstoffs im oberen Totpunkt (OT). Da der Verbrennungsprozess bei einem realen Dieselmotor nicht unendlich schnell abläuft und darüber hinaus die Wandwärmeverluste bei steigender Verbrennungstemperatur zunehmen, hat sich in der Praxis eine Verbrennungsschwerpunktlage von ca. 8 °KW n. OT als wirkungsgradoptimal erwiesen [102]. Die Verbrennungsschwerpunktlage (MFB50) entspricht dem Zeitpunkt, an dem 50 % des eingespritzten Kraftstoffs umgesetzt wurden und kann aus dem Heizverlauf des Motors berechnet werden. Wie im nachfolgenden Abschnitt erläutert, steht die wirkungsgradoptimale Gestaltung der dieselmotorischen Verbrennung jedoch häufig im Widerspruch zu anderen Entwicklungszielen. Das verbliebene

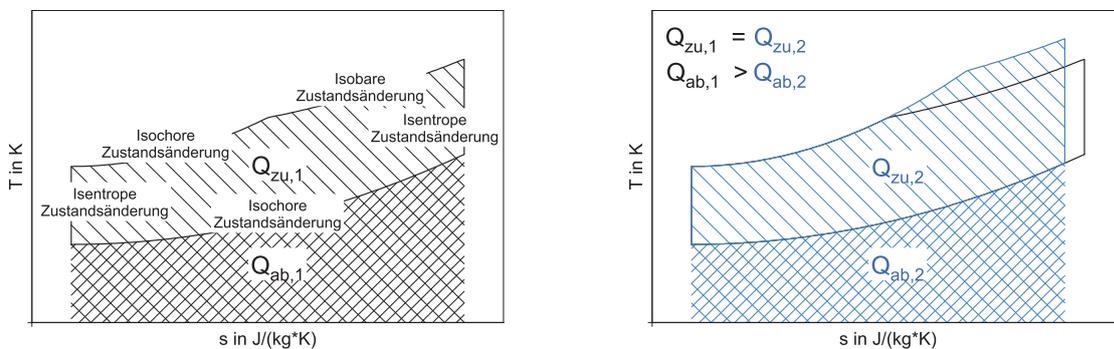


Abbildung 1.1.: Seiliger-Prozess im T-s-Diagramm

CO₂-Reduktionspotenzial verbrennungsmotorischer Antriebe durch eine optimierte Prozessführung ist erwartungsgemäß eher gering. Eine signifikante Minderung des verkehrsbedingten CO₂-Ausstoßes könnte hingegen bspw. durch die flächendeckende Verwendung regenerativ hergestellter Kraftstoffe (*reFuels*) erzielt werden [105], [54].

1.1.2. Innermotorische Stickoxidbildung und -minderung

Der Begriff Stickoxide (NO_x) umfasst allgemein die Schadstoffkomponenten Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO₂) sowie Distickstoffmonoxid (N₂O), Distickstofftrioxid (N₂O₃) und Distickstoffpentoxid (N₂O₅). Im Falle der dieselmotorischen Verbrennung entstehen innermotorisch jedoch nur die Komponenten NO und NO₂ in nennenswerter Menge [59]. Die Bildung von (thermischem) NO wird im Allgemeinen durch den erweiterten *Zeldovich-Mechanismus* beschrieben (Gl. 1.3 - Gl. 1.5).



Dieser Mechanismus umfasst die ursprünglich von *Zeldovich* entdeckte Kettenreaktion, welche die Bildung von NO aus atomarem Sauerstoff und molekularem Stickstoff bzw. atomarem Stickstoff und molekularem Sauerstoff beinhaltet (Gl. 1.3 und Gl. 1.4) [119]. Gl. 1.5 beschreibt die Bildung von NO aus atomarem Stickstoff und einer Hydroxygruppe (OH) und wurde später von *Lavoie et al.* ergänzt [64]. Insbesondere in nahezu stöchiometrischen oder unterstöchiometrischen Brennraumzonen entsteht

ein signifikanter NO-Beitrag über Gl. 1.5. Alle Reaktionen, die im *erweiterten Zeldovich-Mechanismus* zusammengefasst sind, entsprechen Gleichgewichtsreaktionen. Aufgrund der instationären motorischen Prozessführung, werden die zugehörigen Gleichgewichtskonzentrationen der beteiligten Spezies im Allgemeinen jedoch nicht erreicht, sodass die tatsächlichen NO-Konzentrationen in der Anfangsphase der Verbrennung unterhalb derer liegen, die sich bei chemischem Gleichgewicht einstellen würden. Demgegenüber findet bei Temperaturen unterhalb von 2000 K keine signifikante Rückbildung von NO mehr statt, sodass die NO-Konzentrationen am Ende des Verbrennungsprozesses zumeist oberhalb der Gleichgewichtskonzentrationen »eingefroren« werden [59]. Aufgrund der starken N₂-Dreifachbindung weist insbesondere die erste Reaktion (Gl. 1.3) eine hohe Aktivierungsenergie auf, sodass diese Reaktion erst bei hohen Temperaturen ausreichend schnell abläuft und daher den geschwindigkeitsbestimmenden Teil des *erweiterten Zeldovich-Mechanismus* darstellt [113].

NO₂ ist ein Edukt bei der Bildung von Salpetriger Säure (HNO₂) bzw. Salpetersäure (HNO₃), die bei hohen Konzentrationen eine Schädigung der menschlichen Atmungsorgane bewirken können. Im Zusammenspiel mit einem Abgasnachbehandlungssystem (AGN) können höhere NO₂-Konzentrationen im Abgas hingegen durchaus vorteilhaft sein. Beispielhaft sei an dieser Stelle die passive Rußreduktion (CRT-Effekt) und die Steigerung der Konvertierungseffizienz von SCR-Katalysatoren bei niedrigen Katalysatortemperaturen (vgl. Abschnitt 1.1.3.2) genannt. *Rößler et al.* konnten durch umfangreiche Reaktionsflussanalysen zeigen, dass rohmotorisches NO₂ stets aus NO gebildet wird [91]. Als wesentliche Reaktionen geben die Autoren die Oxidation von NO mit Peroxyradikalen an (Gl. 1.6).



Dabei entspricht R einem Kohlenwasserstoffmolekül oder einem Wasserstoffatom. Das Verhältnis von NO₂- zu NO_x-Emission kann bspw. durch eine Erhöhung der AGR-Rate oder durch eine Erhöhung des Luft-Kraftstoffverhältnisses gesteigert werden [90].

Neben hohen (lokalen) Brennraumtemperaturen ist insbesondere die Anwesenheit von Sauerstoff eine wesentliche Voraussetzung für die Entstehung von NO_x. Daher bewirken alle Maßnahmen, die zu einer Reduktion der Brennraumspitztemperatur oder der Sauerstoffkonzentration im Zylinder führen, eine Abnahme der NO_x-Konzentration im Abgas.

Eine Möglichkeit die Verbrennungsspitzen­temperatur abzusenken, ist die Spätverstellung des Einspritz­beginns, sodass aufgrund der fortschreitenden Expansion ein flacherer Anstieg und ein generell niedrigeres Niveau des Brennraumdrucks bzw. der Brennraumtemperatur vorliegt. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass in Folge der abnehmenden Gemischdichte auch die Qualität der Gemischaufbereitung sinkt, was zu einer Erhöhung der CO₂-Emissionen führt.

Die Abgasrückführung (AGR) ist eine Maßnahme, die heute flächendeckend bei Pkw-Dieselmotoren zur simultanen Reduktion der Zylinderspitzen­temperatur sowie der Sauerstoffkonzentration der Zylinderfüllung eingesetzt wird. Dabei wird der angesaugten Umgebungsluft bereits verbranntes Abgas beigemischt, das dreiatomige Moleküle wie CO₂ und H₂O enthält. Diese zeichnen sich gegenüber den in der Frischluft enthaltenen Dimeren durch eine höhere Wärmekapazität aus und bewirken dadurch eine Reduzierung der Verbrennungsspitzen­temperatur. Das bei gleicher Ladungsmasse reduzierte Sauerstoffangebot bewirkt außerdem eine verringerte NO-Bildungsrate. Im Allgemeinen werden sowohl die verdichtete Frischluft als auch das rückgeführte Abgas gekühlt, da durch das resultierende niedrigere Temperaturniveau die AGR-Verträglichkeit und die Zylinderfüllung erhöht werden. Letztere bewirkt, dass die während der Verbrennung freigesetzte Wärme von einer größeren Gasmasse aufgenommen wird und die Brennraumspitzen­temperatur infolgedessen sinkt. Gegenüber der klassischen Hochdruck-AGR, bei der das rückgeführte Abgas vor der Turbine entnommen wird, erlaubt der Einsatz einer Niederdruck-AGR-Strecke, dass der komplette Abgasmassenstrom über die Turbine geleitet wird. Dies ermöglicht im Allgemeinen einen effizienteren Betrieb des Turboladers sowie eine generelle Entspannung des CO₂-NO_x-Zielkonflikts

gegenüber der reinen Hochdruck-AGR in Folge geringerer Ladungswechselverluste und eines niedrigeren Temperaturniveaus der Frischladung [81].

Die prinzipiellen Wirkrichtungen der genannten und weiterer Maßnahmen auf ausgewählte Zielgrößen sind in Tab. 1.1 zusammengefasst. Darin symbolisiert (+) eine Verbesserung¹ der entsprechenden Zielgröße, während (-) einer Verschlechterung entspricht. Im Falle einer geringen Wirkung auf die jeweilige Zielgröße oder der Absenz einer eindeutigen Wirkrichtung ist der zugehörige Matrixeintrag mit (0) gekennzeichnet. Auf der Zielgrößenseite werden neben den spezifischen NO_x- und CO₂-Emissionen auch die rohmotorischen Partikel-Emissionen (PM) und die Abgastemperatur im Auslasskrümmer (T3) bewertet. Die entsprechenden Daten sind aus verschiedenen Quellen zusammengetragen (vgl. *Guzzella & Onder* [47], *Krüger & Schaller* [59]).

Maßnahme	Wirkung			
	NO _x	CO ₂	PM	T3
Spätverstellung des Einspritzbeginns	+	-	-	+
Hochdruck-AGR (ungekühlt)	+	-	-	+
Hochdruck-AGR (gekühlt)	+	-	-	+
Niederdruck-AGR (gekühlt)	+	0	-	+
Erhöhung des Ladedrucks (bei konst. Luftmasse)	+	-	0	-
Erhöhung des Einspritzdrucks	0	+	+	0
Piloteinspritzung	0	0	-	0
Frühe Nacheinspritzung	+	-	+	+

Tabelle 1.1.: Motorische Maßnahmen und deren Wirkung auf ausgewählte Emissionsspezies sowie die Abgastemperatur von Dieselmotoren

Tab. 1.1 verdeutlicht, dass bei der Optimierung dieselmotorischer Antriebe im Allgemeinen ein Zielkonflikt bei der simultanen Reduktion der CO₂- und NO_x-Emissionen besteht. Weiterhin existiert der als *Ruß-NO_x-Schere* bekannte Zielkonflikt zwischen der simultanen Minderung der rohmotorischen Partikel- und NO_x-Emissionen. Dies bedeutet, dass die Minderung einzelner dieselmotorischer Abgaskomponenten stets mit einer Erhöhung anderer Abgaskomponenten einhergeht. Die Gewichtung der verschiedenen Optimierungsziele orientiert sich im Allgemeinen an der Gesetzgebung. Entsprechende Sollwerte für die jeweiligen Motorstellglieder werden von Applikationsingenieuren definiert und in datenbasierten Strukturen (Kennfelder, Kennlinien, usw.) auf dem Motorsteuergerät gespeichert.

1.1.3. Außermotorische Stickoxidminderung

1.1.3.1. Stickoxidminderung mit Hilfe von Speicherkatalysatoren

Eine weitverbreitete Technologie zur außermotorischen NO_x-Reduktion sind *NO_x-Speicherkatalysatoren* (NSC). Dieser Katalysatortyp zeichnet sich insbesondere durch den periodischen Wechsel zwischen NO_x-Einspeicherphasen und Regenerationsphasen aus. Im überstöchiometrischen Motorbetrieb (Einspeicherphase) erfolgt die chemisch reversible Bindung von NO₂ an Bariumoxid unter Bildung von Bariumnitrat gemäß Gl. 1.7 und Gl. 1.8 [63].

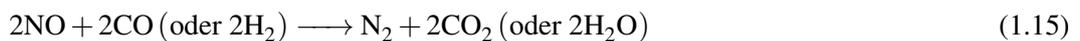
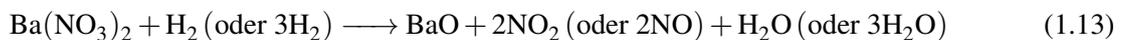
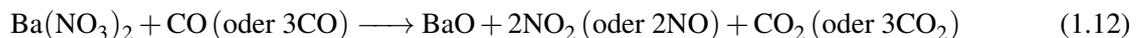


¹Im Falle der Abgastemperatur T3 wird an dieser Stelle eine Erhöhung als vorteilhaft angesehen.

Darüber hinaus entsteht in einer CO₂-haltigen Atmosphäre Bariumcarbonat (BaCO₃), welches die Einspeicherung von NO₂ gemäß Gl. 1.9, bzw. die Einspeicherung von NO nach Gl. 1.10 ermöglicht [65].



Die Speicherkapazität eines NSC hängt in hohem Maße von der aktuellen Katalysatortemperatur ab. Typischerweise beginnt die NO_x-Einspeicherung schon bei verhältnismäßig niedrigen Katalysatortemperaturen. Bei hohen Katalysatortemperaturen findet dagegen keine wesentliche Einspeicherung von NO_x mehr statt. Die Einspeichereffizienz wird entscheidend durch die Verfügbarkeit freier Speicherplätze und damit implizit durch die aktuelle NO_x-Beladung des NSC sowie die aktuelle Katalysatortemperatur und die Raumgeschwindigkeit (SV) des Abgases bestimmt. Während der Regenerationphasen erfolgt eine Ausspeicherung der an Barium gebundenen NO_x-Moleküle gemäß Gl. 1.12 und Gl. 1.13. Anschließend werden selbige in unterstöchiometrischer Atmosphäre durch Oxidation von CO bzw. molekularem Wasserstoff (H₂) stufenweise reduziert (Gl. 1.14 und Gl. 1.15) [63].



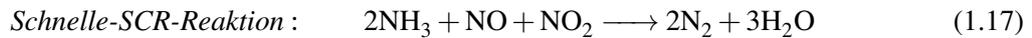
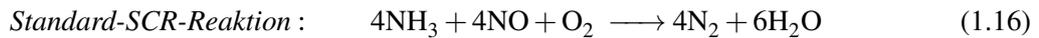
Die Entscheidung, ob eine NSC-Regeneration vom Motorsteuergerät (ECU) angefordert wird, hängt im Allgemeinen vom aktuellen Systemzustand des Motors bzw. des NSC ab. Typische Einflussgrößen sind die aktuelle NO_x-Beladung des NSC, die aktuelle Katalysatortemperatur und/oder der aktuelle Motorbetriebspunkt. Letzterer ist von Bedeutung, da ein unterstöchiometrischer Motorbetrieb aufgrund von Komponentenlimitierungen nicht im kompletten Motorkennfeld möglich ist. Darüber hinaus eignen sich bestimmte Kennfeldbereiche besser zur Regeneration des NSC als andere, da in diesen Bereichen die NSC-Entladung besonders effizient durchgeführt werden kann oder der Mehrverbrauch in Folge des ineffizienteren Fettbetriebs geringer ist. Maßnahmen, die zur Erzielung eines unterstöchiometrischen Motorbetriebs eingesetzt werden, sind beispielsweise das Androsseln des Motors oder die Zuschaltung einer nur teilweise drehmomentbildenden Nacheinspritzung (PoI2). Die gezielte und ergebnisorientierte Steuerung der entsprechenden Aktoren während der NSC-Regeneration erfolgt unter Verwendung einer aktiven λ-Regelung. Eine Regeneration dauert typischerweise wenige Sekunden. Dabei wird neben NO_x auch O₂ ausgespeichert. Die Regeneration wird abgebrochen, wenn die Freigabebedingungen zur sicheren Durchführung der Regeneration nicht mehr erfüllt sind (z.B. schneller Wechsel des Motorbetriebspunktes) oder die Regeneration erfolgreich abgeschlossen wurde. Letztere wird vom Motorsteuergerät erkannt, indem eine nach dem NSC positionierte λ-Sonde die Zusammensetzung des Abgases kontinuierlich überwacht. Sobald kein O₂ aus dem NSC mehr ausgespeichert wird, detektiert diese λ-Sonde einen Übergang von stöchiometrischer zu unterstöchiometrischer Abgaszusammensetzung (*Fettgasdurchbruch*), der von der Motorsteuerung als erfolgreicher Abschluss der NSC-Regeneration interpretiert wird.

Eine entscheidende Schwäche von NSC-Katalysatoren ist die geringe Einspeichereffizienz bei höheren Katalysatortemperaturen und Raumgeschwindigkeiten. Ungünstige Betriebsbedingungen können daher ein vollständiges Ausbleiben der NO_x-Einspeicherung bewirken [78].

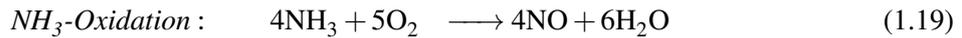
1.1.3.2. Stickoxidminderung nach dem SCR-Verfahren

Ein Verfahren, das die NO_x-Reduktion in einer überstöchiometrischen Atmosphäre ermöglicht, ist die *selektive katalytische Reduktion* (SCR). Dabei wird NO_x durch Reaktion mit Ammoniak (NH₃) selektiv zu N₂ und H₂O reduziert. Die entsprechenden Bruttoreaktionen werden aufgrund ihrer Geschwindigkeit

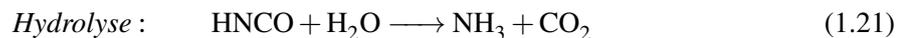
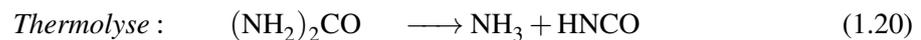
bzw. der beteiligten Spezies als *Standard-SCR-Reaktion* (Gl. 1.16), *schnelle SCR-Reaktion* (Gl. 1.17) und *NO₂-SCR-Reaktion* (Gl. 1.18) bezeichnet [57].



Bei hohen Katalysatortemperaturen, die beispielsweise im Hochlastbetrieb des Motors oder während der DPF-Regeneration auftreten, oxidiert NH₃ gemäß Gl. 1.19 und limitiert dadurch die erreichbare SCR-Effizienz.



Die *schnelle SCR-Reaktion* (Gl. 1.17) erfordert die Anwesenheit von NO₂ im Abgas und trägt entscheidend zur Verbesserung des SCR-Wirkungsgrades bei niedrigeren Katalysatortemperaturen bei, während ihre Bedeutung bei höheren Katalysatortemperaturen (300 - 350 °C) stetig abnimmt [57]. Auch die NH₃-Speicherfähigkeit von SCR-Katalysatoren fällt mit steigender Temperatur. Die Konvertierungseffizienz dieses Katalysatortyps wird daher maßgeblich durch die Katalysatortemperatur, das NO₂-zu-NO_x-Verhältnis am Katalysatoreintritt, der Verfügbarkeit von NH₃ sowie der Verweilzeit der NO_x-Moleküle im Katalysator beeinflusst. Da das Mitführen von NH₃ aus Sicherheitsgründen kritisch ist, wird das benötigte NH₃ direkt im Fahrzeug aus einer Harnstoffwasserlösung (HWL) erzeugt. Dabei wird HWL unter Bildung von gasförmigem NH₃ und Isocyanäure (HNCO) zunächst thermisch zersetzt (*Thermolyse*). Während der nachfolgenden *Hydrolyse* reagieren HNCO-Moleküle mit H₂O zu NH₃ und CO₂ [56].



Da die Zersetzung von HWL verhältnismäßig langsam erfolgt, kann ein Teil des flüssigen Reduktionsmittels auf die Katalysatoroberfläche treffen. Dies führt zu ungewollten Effekten wie der Bildung von Ablagerungen (z.B. Melamin-Komplexe) bei niedrigen Oberflächentemperaturen, welche die Konvertierungseffizienz des Katalysators verringern [33]. Diese Effekte gilt es durch konstruktive Maßnahmen sowie eine geeignete HWL-Dosierstrategie zu vermeiden.

Die dosierte HWL-Menge berechnet sich aus einer Überlagerung verschiedener Regel- und Korrekturfunktionen. Eine zentrale Bedeutung innerhalb der SCR-Dosierstrategie wird dabei üblicherweise der Füllstandsregelung beigemessen, die den aktuellen NH₃-Füllstand des SCR-Katalysators auf einen Nominalwert einregelt. Dieser Nominalwert ist im Allgemeinen eine Funktion der Katalysatortemperatur, des Abgasmassenstroms und des Alterungszustands des SCR. Darüber hinaus wird die HWL-Dosierung basierend auf dem aktuellen SCR-Wirkungsgrad, dem NO_x-Massenstrom vor dem SCR-Katalysator und einem Stöchiometriefaktor f_{Stoich} , der das aktuelle NO₂-zu-NO_x-Verhältnis im Abgas berücksichtigt, vorgesteuert. Die Dosierstrategie reagiert daher unmittelbar auf ein geändertes NO_x-Rohemissionsniveau und passt die dosierte HWL-Menge entsprechend an. Weitere Regel- und Korrekturfunktionen werden ergänzt, um Modell- bzw. Sensorungenauigkeiten oder Drift-Phänomene zu kompensieren.

Auch die SCR-Technologie liefert einen CO₂-Beitrag in Folge der Hydrolysereaktion (Gl. 1.21) im Fahrzeug sowie durch die Herstellung, Aufbereitung und Bereitstellung von HWL. *Dittler et al.* beziffern die CO₂-Emissionen von Dieselkraftstoff und HWL in einer *Well-to-Wheel*-Betrachtung mit 3.24 kg/l (Diesel) bzw. 1.03 kg/l (HWL) [23]. Der wesentliche CO₂-Beitrag von HWL entfällt dabei auf dessen Herstellungsprozess.

1.1.4. Temperatur-Management

Um nach einem Kaltstart des Motors schnellstmöglich ausreichend hohe NO_x -Konvertierungseffizienzen zu erreichen, erfordern SCR-basierte Abgassysteme die Verwendung effizienter Maßnahmen zur gezielten Erhöhung der Katalysatortemperatur. Wesentliche Anforderungen an ein effektives Temperatur-Management wurden beispielsweise von *Naber et al.* formuliert [77]:

- Schnelle Erhöhung der Katalysatortemperatur nach Motorstart.
- Keine unzulässigen Anstiege der Rohemissionen (NO_x , HC, CO).
- Halten der Katalysatortemperatur (z.B. in Schubphasen).

Maßnahmen, die zur Erhöhung der Katalysatortemperatur geeignet sind, reichen von rein motorischen Maßnahmen, über die gezielte Betriebspunktverschiebung des Motors im Rahmen einer Hybridbetriebsstrategie oder einer kontrolliert erhöhten Lastaufnahme der Nebenaggregate, bis hin zur Verwendung elektrischer Heizelemente im Abgassystem. Eine wesentliche Herausforderung besteht dabei in der Koordination dieser temperaturerhöhenden Maßnahmen, sodass die Temperatur des Abgassystems stets ausreichend hoch ist, während unverhältnismäßige Eingriffe nach Möglichkeit vermieden werden, da die Erhöhung der Abgastemperatur bzw. der Abgasenthalpie im Allgemeinen eine Zunahme der CO_2 -Emission bewirkt. Darüber hinaus muss beachtet werden, dass eine Maximierung der Abgastemperatur nicht zwangsläufig zu einer Maximierung der Abgasenthalpie führt. Im Falle des Versuchsträgers, der im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurde (zwei AGR-Kreisläufe), bewirkt beispielsweise die Reduktion des gekühlten Niederdruck-AGR-Massenstroms zugunsten einer Erhöhung des ungekühlten Hochdruck-AGR-Massenstroms zwar einen beachtlichen Temperaturhub (Abnahme der Zylinderfüllung), aufgrund des kleineren Abgasmassenstroms jedoch nicht zwangsläufig auch eine Zunahme der Abgasenthalpie. In welchen Situationen die Fokussierung einer Abgastemperaturerhöhung gegenüber einer Abgasenthalpieerhöhung vorzuziehen ist, wurde am Rande der vorliegenden Arbeit untersucht (vgl. Anhang D). Dabei konnte gezeigt werden, dass der Abgasmassenstrom und damit die *Temperatur-Enthalpie-Balance* vorteilhafterweise in Abhängigkeit der Temperaturdifferenzen zwischen dem strömenden Abgas und den Katalysatoren bzw. den Katalysatoren untereinander gesteuert wird.

Die prinzipiellen Wirkrichtungen ausgewählter innermotorischer Maßnahmen bezüglich der Abgastemperatur im Auslasskrümmer (T_3) sind in Tab. 1.1 zusammengefasst. Nach Erreichen der HC-Light-Off Temperatur des NSC bzw. des alternativ verbauten *Dieseloxidationskatalysators* (DOC) kann zusätzlich eine späte (d.h. nicht-drehmomentbildende) Einspritzmenge (PoI1) verwendet werden, um die Katalysatortemperatur mittels exothermer HC-Oxidation weiter zu erhöhen. Die Temperaturerhöhung der Abgasanlage durch die chemisch gebundene Energie des eingespritzten Kraftstoffs erfolgt in diesem Fall äußerst effizient. Gleichwohl stellt die exotherme HC-Konvertierung eine Konkurrenzreaktion zur NO_2 -Bildung innerhalb des Oxidationskatalysators dar. Im NO_2 -sensitiven Bereich des nachgelagerten SCR-Katalysators muss daher durch geeignete Software- und Applikationsmaßnahmen stets zwischen einer Erhöhung der Katalysatortemperatur mittels exothermer HC-Konvertierung und einer Verbesserung des NO_2 -zu- NO_x -Verhältnisses abgewogen werden.

1.2. Motivation und Ziel der Arbeit

Wie in den vorherigen Kapiteln gezeigt wurde, besteht bei Dieselmotoren ein ausgeprägter Zielkonflikt zwischen der Minimierung von NO_x -Emissionen einerseits und CO_2 -Emissionen andererseits. Dieser Zielkonflikt spiegelt sich sowohl bei der Emissionierung des Motors, als auch bei der Wahl der Betriebsstrategie eines Fahrzeugs wieder. Geeignete Maßnahmen zur Minderung der NO_x -Endrohremission eines Fahrzeugs sind beispielsweise:

- Innermotorische Maßnahmen (Erhöhung der AGR-Rate, Spritzwinkelspätverstellung, usw.)
- Verkürzung der Intervalle zwischen zwei aufeinanderfolgenden NSC-Regenerationen (sofern ein NSC vorhanden ist).
- Maßnahmen zur Erhöhung der Katalysatortemperatur.

Der zusätzliche CO_2 -Beitrag, der mit jeder der genannten Maßnahmen einhergeht, wird entscheidend durch das individuelle Fahrverhalten des Fahrers und das gefahrene Streckenprofil beeinflusst. Beispielhaft wird im Folgenden der zusätzliche CO_2 -Beitrag betrachtet, der aufgebracht werden muss, um 1 g NO_x , das in einen NSC eingespeichert wurde, zu konvertieren. In Abb. 1.2 ist der EWMA-gefilterte (*Exponentially Weighted Moving Average*) Verlauf des Kostenfaktors $\delta_{\text{CO}_2, \text{NSCRgn}}$ (vgl. Gl. 3.10), der den CO_2 -Beitrag einer jeden NSC-Regeneration quantifiziert, für zwei verschiedene Messfahrten dargestellt. Betrachtet werden dabei zwei unterschiedliche Fahrer bzw. Fahrertypen. Das zurückgelegte Streckenprofil besteht aus Stadt-, Überland- und Autobahnanteilen im Stuttgarter Umland und ist bei beiden Messfahrten komplett identisch. Die Grafik verdeutlicht, dass im Falle von »Fahrer 1« ein wesentlich höherer CO_2 -Betrag aufzuwenden ist, um 1 g eingespeichertes NO_x zu konvertieren, als im Falle von »Fahrer 2«. In der Spitze beträgt diese Abweichung etwa 25 % (bezogen auf »Fahrer 1«). Im Umkehrschluss bedeutet dies: Durch eine Anpassung der Emissionscharakteristik derart, dass im Falle von »Fahrer 2« die NO_x -Rohemission auf Kosten eines höheren Kraftstoffverbrauchs abgesenkt und im Gegenzug der NSC seltener regeneriert würde, könnte mutmaßlich einen CO_2 -Vorteil bei gleicher oder sogar niedrigerer NO_x -Endrohremission resultieren. Unterschiede in der Wirksamkeit der einzelnen NO_x -mindernden Maßnahmen, wie anhand

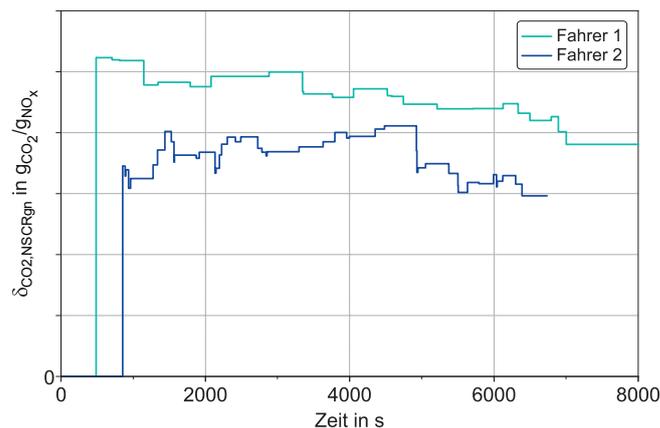


Abbildung 1.2.: Spezifischer CO_2 -Aufwand pro NSC-Reg. für zwei verschiedene Fahrer

der NSC-Regeneration gezeigt, ergeben sich insbesondere dadurch, dass der Motor je nach Fahrertyp und aktuellem Streckenprofil in unterschiedlichen Kennfeldbereichen betrieben wird. In Abhängigkeit des betrachteten Kennfeldbereichs unterscheidet sich demnach der zusätzliche CO_2 -Beitrag, der notwendig ist, um einen NSC zu regenerieren oder alternativ die Abgastemperatur im Rahmen einer Aufwärmstrategie um einen bestimmten Betrag zu erhöhen bzw. den rohmotorischen NO_x -Ausstoß um einen bestimmten Betrag zu reduzieren.

Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung einer Software-Funktion zur CO_2 -optimalen Koordination ausgewählter NO_x -mindernder Maßnahmen unter Realfahrbedingungen. Diese Koordination erfolgt individuell für jeden Fahrertyp bzw. für jedes Streckenprofil während einer Fahrt und soll zur Verbesserung der Fahrzeugemissionscharakteristik beitragen. Neben einer sicheren Einhaltung der NO_x -Emissionsgrenzwerte soll insbesondere ein sehr niedriges NO_x -Niveau in urbanen Lebensräumen sichergestellt werden. Wenn es die Fahrbedingungen und der aktuelle Systemzustand von Motor und AGN zulassen, wird hingegen der CO_2 -Ausstoß des Fahrzeugs reduziert. Das entwickelte Funktionskonzept stellt damit