

1 Einleitung und Motivation

Die stetig anhaltende Globalisierung nationaler Unternehmen in Kombination mit kurzen Lieferzeiten, reduzierter Lagerhaltung von Produktionsgütern und dem Verbraucherbedürfnis, Waren jederzeit und überall zur Verfügung zu haben, führen zu einem fortlaufenden Anstieg des individualisierten Güterverkehrs. Im Wesentlichen versteht man hierunter die Verlagerung auf das Straßennetz mittels Lastkraftwagen. Zwar lässt sich der klassische Güterverkehr innerhalb der Europäischen Union in die Einzelsegmente Straßen-, See- und Eisenbahnverkehr aufteilen, dennoch spricht die Entwicklung der letzten 26 Jahre eine eindeutige Sprache. Wohingegen der Eisenbahnverkehr im betrachteten Zeitraum von 1995 bis 2021 eine Änderungsrate von ca. 9,3 % auf 409 Mrd. tkm pro Jahr verzeichnete, wurden auf der Straße zuletzt 1862 Mrd. tkm pro Jahr zurückgelegt, was einer Änderungsrate von 65 % gleichkommt [1]. Aus dieser Entwicklung wird deutlich, dass die tägliche Beförderungsleistung mittels Nutzfahrzeugen zu einer tragenden Säule unserer heutigen Wirtschaft und Lebensweise wurde. Demzufolge verwundert es kaum, dass schwere Nutzfahrzeuge 25 % der Treibhausgasemissionen des europäischen Straßenverkehrs verantworten und mehr als 6 % der gesamten Treibhausgasemissionen in der EU ausmachen [2]. Gleichwohl steht dem kontinuierlichen Bedarf an Gütern ein steigendes Umweltbewusstsein der Gesellschaft gegenüber.

Unter diesem Aspekt ist das Europäische Parlament bestrebt, die geltenden Regularien für Nutzfahrzeuge mit verbrennungsmotorischem Antrieb basierend auf fossilen Energieträgern kontinuierlich zu verschärfen. Neben den gesetzlich limitierten Schadstoffemissionen, welche eindeutig in den geltenden Emissionsregularien aufgeführt sind und sich derzeit in der siebten Revision befinden, rückt der Ausstoß des bei der Verbrennung entstehenden Treibhausgases Kohlenstoffdioxid (CO_2) in den Fokus.

So wurden im Rahmen des Trilogs zwischen der Europäischen Kommission, dem Rat der Europäischen Union und dem Europäischen Parlament im Jahre 2019 die ersten europaweiten CO_2 -Reduzierungsziele für schwere Nutzfahrzeuge (>16 t) beschlossen, welche eine Minderung von 15 % in 2025 und 30 % in 2030 gegenüber dem europäischen Gesamtflottenmittelwert des Bezugszeitraums 01. Juli 2019 bis 30. Juni 2020 vorsahen [3],[4]. Zwischenzeitlich wurden die ursprünglichen Ziele der Folgejahre ab 2025 weiter verschärft, sodass mittlerweile eine Reduktion von 45 % im Jahr 2030, 65 % im Jahr 2035 und 90 % im Jahr 2040 angestrebt wird [5], [6]. Durch eine Kombination aus flottenweiten Zielen, der sukzessiven Verschärfung und finanziellen Strafen bei Nichterreichen der vorgegebenen Ziele werden nun alle Nutzfahrzeughersteller im Rahmen der Verordnung dazu verpflichtet, die durchschnittlichen CO_2 -Emissionen ihrer Flotte stetig zu reduzieren. Die ambitionierten Ziele entsprechen einer Verdrei- bis Vervierfachung der bislang durchschnittlich pro Jahr erreichten Reduktion des Kraftstoffverbrauchs, sodass die Notwendigkeit der Einführung sogenannter Null-Emissions-Technologien gegeben ist.

Neben den neuen CO_2 -Regularien ist die Einführung der verschärften Emissionsgesetzgebung Euro 7 gegen Mitte des Jahres 2029 geplant. Hierbei sieht der erst kürzlich auf europäischer Ebene veröffentlichte Gesetzesentwurf eine starke Reduktion aller bisherigen Emissionsgrenzwerte vor [7]. Dies betrifft ebenso die Grenzwerte in den für schwere Nutzfahrzeuge relevanten Prüfstandszyklen (WHTC/WHSC), wie die im Rahmen von PEMS-Messungen ermittelten Realfahrmissionen (RDE). Die Revision adressiert jedoch nicht nur die bestehenden Grenzwerte, sondern umfasst auch eine Erweiterung der limitierten Spezien und erhöht die Lebensdauer-

anforderung der Konformitätseinhaltung. Bei den erstmalig limitierten Emissionskomponenten handelt es sich im Wesentlichen um Methan (CH_4) und Distickstoffmonoxid (N_2O), auch bekannt unter dem Trivialnamen Lachgas. Zudem ist die Limitierung der Partikelanzahl bis hin zu Größenordnungen von 10 nm hinzugekommen, welche im eigentlichen Sinne nicht als neu begrenzte Komponente zu bezeichnen ist, sondern vielmehr als Erweiterung des Größenspektrums. Die im Entwurf enthaltenen Partikelgrenzwerte vermitteln gegenüber der aktuellen Emissionsgesetzgebung Euro VIe den Eindruck, keiner wirklichen Verschärfung unterzogen worden zu sein. Jedoch ist die Erweiterung der Größenklasse von 23 nm auf 10 nm einer Halbierung des Grenzwertes gleichzusetzen.

Aus Sicht der europäischen Gesetzgeber fungieren die Limitierung des Treibhausgasausstoßes CO_2 und die Einführung der Emissionsstufe Euro 7 neben dem eigentlichen Klimaschutzaspekt als Beschleunigungsfaktor hin zum CO_2 -neutralen Transport und als Treiber neuer Innovationen im Nutzfahrzeugsektor. Leider müssen in diesem Zusammenhang sowohl technologische Barrieren gelöst, als auch gesamtwirtschaftliche Aspekte, wie die anfallenden Transportkosten zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit oder aber die zur Verfügung stehende Infrastruktur, berücksichtigt werden, um einen reibungslosen Übergang zum Transport der Zukunft zu gewährleisten. Die angestrebte Transformation bedarf folglich finanzieller Ressourcen und Zeit. Unter diesen Gesichtspunkten ist auch in naher Zukunft der Dieselmotor als primäre Antriebstechnologie im schweren Nutzfahrzeugsegment nicht wegzudenken und bedingt eine kontinuierliche Weiterentwicklung effizienter und umweltfreundlicher Verbrennungsmotoren. Die Nutzfahrzeughersteller stehen nun der Herausforderung gegenüber, die bevorstehende Emissionsverschärfung bei zeitgleicher Absenkung des CO_2 -Ausstoßes zu realisieren. Somit verlagert sich bei der Brennverfahrensoptimierung die reine Wirkungsgradbetrachtung hin zum Zusammenspiel zwischen Kraftstoffverbrauch und Emissionsverhalten. Besonders im Hinblick der Partikelanzahl können marginale Änderungen des Brennverfahrens eine große Auswirkung auf die Verteilung haben. Folglich liegt der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit auf der Betrachtung der resultierenden Rußeigenschaften bei Variation der verschiedenen Geometrieparameter der Einspritzdüse. Diese wurden stellvertretend als Optimierungsgröße des Brennverfahrens herangezogen und ermöglichen zeitgleich eine Aussage über etwaige Bauteiltoleranzbetrachtungen und Lebensdauereffekte. Ziel dieser Arbeit ist nicht nur ein ganzheitliches Verständnis der Partikelemissionen zu gewinnen, sondern auch etwaige Entstehungsgebiete im Brennraum zu benennen. Um dies zu ermöglichen, wird die experimentelle thermodynamische Untersuchung um eine optische Versuchskampagne erweitert.

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt aufgebaut. Kapitel zwei widmet sich sowohl den ausgewählten Grundlagen der Dieseltechnologie als auch den Grundlagen der optischen Verbrennungsdiagnostik mit Fokus auf der pyrometrischen Temperaturmessung auf Basis des Plank'schen Strahlungsgesetzes. Im darauffolgenden Kapitel werden der experimentelle Versuchsaufbau und die angewandte Messtechnik sowie Analysemethodik näher erläutert. Neben der konstruktiven Umsetzung der minimalinvasiven optischen Zugänglichkeit beschäftigt sich dieses Kapitel schwerpunktmäßig mit allen sondermesstechnischen Umfängen und der Berechnungsmethodik der Zweifarbenpyrometrie. Daran anschließend thematisiert Kapitel vier die Versuchsmethodik und die notwendigen Voruntersuchungen zur Legitimierung des optischen Aufbauzustandes. Hierbei werden sowohl experimentelle Untersuchungen als auch simulative Umfänge gegenübergestellt. Um ein besseres Verständnis über die Verlässlichkeit der generierten Ergebnisse zu erhalten, befasst sich dieses Kapitel ebenso mit einer Sensitivitätsanalyse der optischen Messkette. Gegenstand des fünften Kapitels ist die Gegenüberstellung der experimentellen Ergebnisse und die Interpretation der relevanten Partikelkenngrößen. Abschließend ist in Kapitel sechs eine Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse zu finden.

2 Ausgewählte theoretische Grundlagen

2.1 Grundlagen der Dieseltechnologie

2.1.1 Historische Entwicklungsschritte des Dieselmotors

Die Geburtsstunde des Dieselmotors lässt sich auf den 28. Februar 1892 datieren, als der Erfinder Rudolf Diesel sein Patent beim kaiserlichen Patentamt Berlin anmeldete. Zum Zeitpunkt der Erteilung des Deutschen Reichspatent (DRP) Nr. 67207 auf „Arbeitsverfahren und Ausführungsart für Verbrennungskraftmaschinen“ konnte noch niemand die bevorstehende Erfolgsgeschichte des Dieselmotors vorhersehen [8]. Fernab von mobilen Anwendungen lag zunächst das Hauptaugenmerk des Maschinenbaupioniers auf der Revolutionierung von Wärmekraftmaschinen, welche zur damaligen Zeit als Hauptantriebsquellen industrieller Anlagen dienten und weitestgehend als Dampfmaschinen mit einem nur mäßigen Wirkungsgrad ausgeführt wurden. Dabei war Rudolf Diesel stets bestrebt, eine mögliche Annäherung des realen Arbeitsprozesses an den vom französischen Physiker Sadi Carnot im Jahre 1824 postulierten idealen Kreisprozess zu finden [9]. Im Mittelpunkt seiner Konzeptstudien stand die direkte Umwandlung der im Brennstoff enthaltenen Energie ohne die bisher zwischengeschaltete Dampfherzeugung. Dabei greift Rudolf Diesel auf das von Christian Reithmann (1873) erfundene und vielmehr Nikolaus Otto (1877) zugesprochene Viertakt-Verfahren zurück [10–12]. Hieraus ergeben sich die in seiner Patentschrift formulierten und für den Dieselprozess charakteristischen Merkmale. Der Arbeitsprozess des idealisierten Dieselmotors unterteilt sich demnach in vier Prozessschritte, beginnend mit einer vom Arbeitskolben im Zylinder initiierten Verdichtung von reiner Luft, welche zum Anstieg der Gastemperatur weit über der für die Brennstoffzündung notwendigen Zündtemperatur liegt. Im oberen Umlenkpunkt startet die allmähliche Brennstoffzufuhr, sodass die stattfindende Verbrennung durch die Kolbenabwärtsbewegung und die hiermit verbundene Expansion ohne wesentliche Druck- und Temperaturerhöhung ablaufen kann. Nach Abschluss der Brennstoffzufuhr kommt es zur finalen Expansion der im Zylinder befindlichen Gasmasse [8].

Von der Genehmigung des Patents bis zum erfolgreichen Abnahmeprobelauf des ersten Versuchsmotors waren die Jahre von technischen Herausforderungen geprägt. Der von Rudolf Diesel gewünschte Spitzendruck von 250 *atm* war zum damaligen Zeitpunkt aus Sicht der zur Verfügung stehenden Materialien und der hiermit verbundenen Bauteilfestigkeit reine Utopie. Zudem musste auch noch die Frage des zu verwendenden Brennstoffs und seine Einbringung unter hohen Spitzendrücken geklärt werden. Nach anfänglichen Schwierigkeiten erhielt schlussendlich der Dieselmotor 1897 das Prädikat der wirtschaftlichsten Wärmekraftmaschine mit einem Wirkungsgrad von 26,2 %. Der Grundstein für Rudolf Diesels Schlüsseltechnologie in der Antriebstechnik war gelegt [13, 14].

Zunächst beschränkte sich das Einsatzgebiet des Dieselmotors aufgrund seines hohen Eigengewichts, bedingt durch die notwendige Bauteilfestigkeit und die benötigten Nebenaggregate für die Drucklufteinblasung des Brennstoffs, auf rein stationäre Anwendungen. Im Fokus der Entwicklung stand nun die Optimierung des Leistungsgewichts und im Wesentlichen die Verbesserung der Einspritztechnik, was durch die Erfindung des Vorkammer-Verbrennungsverfahrens und die Direkteinspritzung gelang. Nachdem sich die Dieseltechnologie im Bereich maritimer

Anwendungen und im Schienenverkehr beweisen konnte, wurde erst 30 Jahre nach der Präsentation des ersten Lastkraftwagens 1924 der Dieselmotor als Nutzfahrzeugantrieb vorgestellt [15]. Die dreißiger Jahre waren geprägt durch Verbesserungsmaßnahmen mechanischer Aufladesysteme und Abgasturboladern (ATL). Aufgrund der hohen Geräuschentwicklung war ein Einsatz der Direkteinspritzung aus Gründen des Komforts im Personenkraftwagen nicht wirklich denkbar. Vorerst wurde die Direkteinspritzung in den Fünffzignern des vorhergehenden Jahrhunderts als Standard für Nutzfahrzeugmotoren festgelegt. Neben weiteren Maßnahmen zur Leistungssteigerung rückte gegen Ende des 20. Jahrhunderts die Optimierung des Kraftstoffverbrauchs und die Reduzierung der emittierten Schadstoffe in den Vordergrund. Zum festen Bestandteil des Dieselmotors gehörte nun das elektronische Motormanagement und eine nachgelagerte Abgasnachbehandlung bestehend aus einem Oxidationskatalysator und einem Dieselpartikelfilter (DPF). Zusätzlich bediente man sich der variablen Turbinengeometrie und Abgasrückführungskonzepten (AGR). Ebenfalls lieferte die kontinuierliche Weiterentwicklung der Einspritztechnik auf Einspritzdrücke von bis zu 2000 *bar* und die Markteinführung der Common-Rail-Technologie einen maßgeblichen Beitrag. Seit 2005 zählte die selektive katalytische Reduktion (SCR) zu den wichtigsten Maßnahmen zur Einhaltung der gesetzlichen Stickoxidgrenzwerte im Nutzfahrzeugsegment. Heutzutage werden technologische Meilensteine wie ein optimiertes Thermomanagement, eine Nieder-/Hochdruckabgasrückführung, ein variabler Ventiltrieb und Mehrfacheinspritzungen in Bezug auf den Dieselmotor als selbstverständlich angesehen [16, 17].

Die sukzessive Weiterentwicklung hat das Diesellaggregat zu einem hochkomplexen Technologieprodukt heranwachsen lassen, welches zum festen Bestandteil unserer gegenwärtigen Wirtschaft sowie Gesellschaft wurde. Zwar wurde jüngst die Kritik gegenüber dem schon über 125 Jahre alten Antriebskonzept immer lauter, was nicht zuletzt auf die inakzeptable Missachtung der bestehenden Gesetzgebung einiger Wirtschaftsfunktionäre zurückzuführen ist, doch gibt es derzeit keine vergleichbare Alternative in Bezug auf Wirtschaftlichkeit, Langlebigkeit und Effizienz.

2.1.2 Dieselmotorische Gemischbildung und Verbrennung

Die Umwandlung der im Brennstoff chemisch gebundenen Energie in mechanische Arbeit wird durch die exotherme, sich selbsterhaltende Oxidation von Kohlenwasserstoffen ermöglicht. Im Allgemeinen wird die hierbei ablaufende chemische Reaktion als Verbrennung bezeichnet [18]. Damit solch eine Reaktion initiiert werden kann, muss neben einem ausreichenden Energieniveau der vorhandenen Moleküle ebenso eine gewisse Gleichverteilung und Konzentration der Reaktionspartner sichergestellt werden. Dies führt zu einer direkten Abhängigkeit der Zündgrenze von der Gemischtemperatur und der lokal vorherrschenden Zusammensetzung.

Im Bezug auf die dieselmotorische Verbrennung wird die zur Zündung notwendige Reaktionsenergie durch die hohe Kompression der Zylinderladung und die hieraus entstehende Druck- und Temperaturerhöhung bereitgestellt. Bei direkteinspritzenden Nutzfahrzeugdieselmotoren werden Verdichtungsverhältnisse (ϵ) von bis zu 24 erreicht [19], wodurch sich der Kompressionsenddruck auf ca. 65 *bar* und die Kompressionsendtemperatur auf ca. 1100 *K* im Schleppbetrieb beläuft. Im Gegensatz zum ottomotorischen Brennverfahren, welches sich einer zusätzlichen Zündvorrichtung bedient, spricht man in diesem Zusammenhang von einer Selbstzündung. Die Einbringung der notwendigen Reaktionspartner in Form von Dieselkraftstoff erfolgt direkt in den Brennraum. Hierbei wird der flüssige Kraftstoff unter hohem Druck (bis zu 2700 *bar* [16]) durch eine Düse eingespritzt und in ein Spray, welches sich aus unterschiedlichen Tropfengrößen zusammensetzt, zerstäubt. Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, lässt sich eine theoretische Unterteilung der Einspritzung in die Zerfallsregime primärer und sekundärer Tropfenzerfall vornehmen. Der Primärzerfall wird durch die im Düsenloch auftretende Implosion von Kavitationsbläschen und

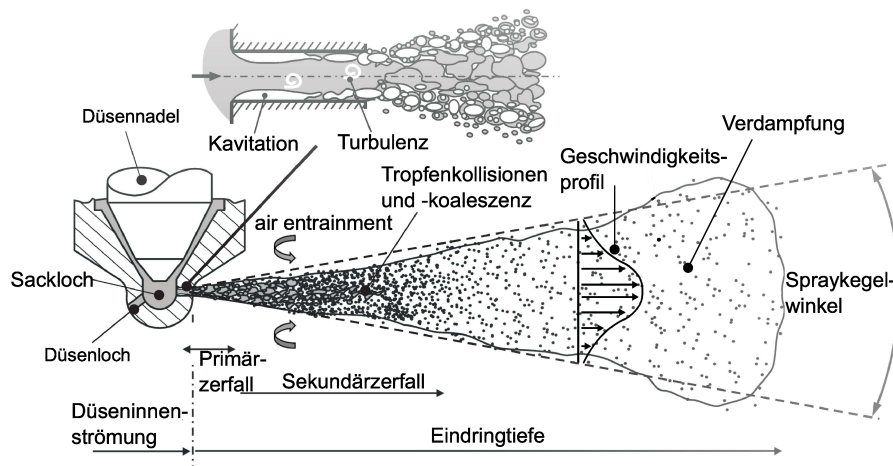


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der dieselmotorischen Gemischaufbereitung, modifiziert nach [20]

strömungsbedingte Turbulenzen dominiert [21–23]. Es findet ein erstes Aufspalten und Zersetzen des Kraftstoffstrahls in sogenannte Ligamente statt. Dabei wird die Ausprägung der hydrodynamischen Kavitation nicht nur durch den dynamischen Druckabfall innerhalb des Düsenlochs sondern auch durch die geometrischen Düseneigenschaften bestimmt [24]. Die genaue Bedeutung der hydroerosiven Verrundung (HE), der Konizität (K_{SL}), des hydraulischen Durchflusses (HD) und des Höhenwinkels (Ψ) werden in Kapitel 2.1.4 näher erläutert. Im weiteren Verlauf wirken auf die Oberfläche der ausgebildeten Ligamente aerodynamische Kräfte, die sich aufgrund der vorherrschenden Relativgeschwindigkeit zwischen der flüssigen und gasförmigen Phase ausprägen. Dabei kommt es zur schwingungsbehafteten Anregung der Teilchenoberfläche, welche zu sogenannten kurzwelligen Kelvin-Helmholtz- und langwelligen Rayleigh-Instabilitäten führt [21]. Somit hängt der sekundäre Tropfenzerfall im Wesentlichen von der Tropfengröße, der Oberflächenspannung und der resultierenden Relativgeschwindigkeit ab. Für eine detaillierte Unterteilung der sekundären Zerfallsmechanismen wird auf die experimentellen Untersuchungen nach Pilch und Erdmann verwiesen [25]. In Form von Tropfenkollisionen und -koagulationen kommt es neben den auftretenden Zerfallsmechanismen ebenfalls zu Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Kraftstofftröpfchen innerhalb des Kraftstoffsprays.

Während der Ansteuerung des Einspritzventils überlagern sich die beschriebenen Wirkmechanismen. Dies bedeutet, dass sich eine inhomogene Verteilung der Tropfengrößen und des Geschwindigkeitsprofils über der Einspritzkeule ergibt. Die fortlaufende Förderung von flüssigem Kraftstoff sorgt für die Ausbildung eines Strahlkerns bestehend aus den impulsbehafteten Ligamenten und Tropfen. Die sich im Randbereich befindlichen Tröpfchen werden durch die angreifenden aerodynamischen Kräfte verlangsamt, abgelenkt und durch nachfolgende schnellere Tropfen aus der Strahlmitte verdrängt. Je weiter sich die Tröpfchen von dem Düsenaustritt und der Strahlmitte entfernen, desto geringer ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Es kommt zur Auffächerung der Strahlkeule und nach kurzer Zeit zur Bildung einer stabilen Spraylänge, der sogenannten flüssigen Strahleindringtiefe (vgl. Abb. 2.1). Für die kontinuierliche Luftbeimischung, dem sogenannten „air entrainment“, sorgt der auftretende Impulsaustausch zwischen den Kraftstofftröpfchen und der Gasphase. Hierdurch wird nicht nur die für die Verbrennung wichtige Luft-Kraftstoff-Vermischung sondern auch die ebenso relevante Verdampfung gefördert. Die benötigte Verdampfungszeit hängt von der Umgebungstemperatur, den Kraftstoffeigenschaften sowie dem Oberflächen-Volumen-Verhältnis des entstandenen Kraftstoffsprays ab. Die beschriebenen Prozesse bilden die Grundlage für den sich anschließenden Zündprozess und die ablaufende Verbrennung.

Zündverzug

Die Zeitspanne zwischen dem Einspritzbeginn und dem Beginn der Zündung wird durch den Zündverzug beschrieben [26]. Eine Unterteilung des Zündverzugs in einen chemischen und physikalischen Anteil lässt sich vornehmen, wobei es zur zeitlichen Überlagerung beider Anteile kommt [27]. Mit dem physikalischen Zündverzug werden die Gemischbildungsprozesse bis zur Verdampfung beschrieben. Das Vorhandensein von Sauerstoff und verdampftem Kraftstoff führt nach Erreichen der benötigten Reaktionstemperatur zur Formierung erster Vorläuferradikale. Nach Warnatz et al. [28] lassen sich die einleitenden Zündreaktionen durch die Ketteneinleitung Gl. 2.1 und die Kettenfortpflanzung Gl. 2.2 darstellen.



An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Kettenfortpflanzung sich in Abhängigkeit der vorliegenden Temperaturbereiche in weitere Verzweigungsreaktionen untergliedert. Für eine detaillierte Ausführung wird auf Warnatz et al. [28] verwiesen.

Durch eine stabile Fortpflanzung der vereinzelt ablaufenden Zündreaktionen wird der Brennbeginn initiiert. In diesem Fall müssen die Kettenverzweigungsreaktionen gegenüber den Kettenabbruchreaktionen vermehrt stattfinden. Die benötigte Zeitspanne für den Ablauf der chemischen Reaktionen definiert den chemischen Zündverzug. Hieran anschließend beginnen die drei Phasen der dieselmotorischen Verbrennung, welche sich aus der vorgemischten, der diffusionskontrollierten und der kinetischkontrollierten Verbrennung zusammensetzen.

Vorgemischte Verbrennung

Während der Zündverzugszeit kommt es teilweise zur homogenen Aufbereitung des eingebrachten Kraftstoffes, welcher durch die einsetzenden Zündreaktionen schlagartig umgesetzt wird. Die hohe Reaktionsgeschwindigkeit führt zu einem schnellen Anstieg des im Brennraum vorherrschenden Druck- und Temperaturniveaus. Umgangssprachlich wird das durch den hohen Druckgradienten ($dp/d\varphi$) entstehende Geräusch als „Dieselnageln“ bezeichnet [26]. Ebenfalls führen die auftretenden hohen Brennraumspitzentemperaturen ($> 2000\text{ K}$) zum Aufbrechen der N_2 -Dreifachbindung und somit zur ersten thermischen Stickoxidbildung (vgl. Kapitel 2.1.3) [20]. Wie in Abbildung 2.2 gezeigt, kann eine eindeutige Zuordnung der ersten Phase sowohl im Zylinderdrucksignal (p_{zyl}) als auch in der zugehörigen freigesetzten Wärmemenge ($\dot{q}$) stattfinden. Dabei setzt sich Phase 1 aus dem Zündverzug und der vorgemischten Verbrennung zusammen. Maßnahmen zur Verbesserung des Geräuschkomforts beruhen auf der Reduzierung des vorgemischten Anteils. Dies kann einerseits durch Verstellung des Einspritzzeitpunktes in Richtung späterer Zeitpunkte geschehen. Andererseits bietet sich die Möglichkeit der Vorkonditionierung des Brennraums mittels einer Kleinstmengeneinspritzung vorgelagert zur Haupteinspritzung [16]. Aufgrund des geringfügigen absoluten Masseanteils findet eine schnelle Umsetzung der sogenannten Voreinspritzung statt. Dies ist direkt mit einem zusätzlichen Druck- und Temperaturanstieg gekoppelt, sodass der physikalische und chemische Zündverzug verkürzt wird.

Diffusionskontrollierte Verbrennung

In Phase 2 kommt es zur nicht-vorgemischten Hauptverbrennung, auch als diffusions- bzw. mischungskontrollierte Verbrennung bezeichnet. Durch die zuvor stattgefundene vorgemischte Verbrennung ist das teilhomogenisierte und zündfähige Gemisch im Außenbereich der Spraykeule nahezu vollständig umgesetzt. Im Spraykern resultieren hierdurch Temperaturen zwischen $1600\text{--}1700\text{ K}$ [29], welche unter Sauerstoffmangel die partielle Oxidation eingebrachter Kohlenwasserstoffe fördern. Teilverbrannte Zwischenprodukte diffundieren aus dem Inneren des Kraftstoffstrahls in den Außenbereich, wobei es zur Ausbildung einer dünnen diffusiven Reaktionszone, der

sogenannten Diffusionsflamme, kommt. Die Geschwindigkeit der Reaktionskinetik ist nun direkt an die langsamer ablaufenden Mischungsvorgänge von Luft und Kraftstoff gekoppelt, hieraus resultieren moderate Brennraten. Durch das „air entrainment“ wird dem Strahl kontinuierlich heiße Luft sowie Verbrennungsprodukte zugeführt. Die fortlaufende Einspritzung und die hiermit verbundene Gemischaufbereitung (Tropfenzerfall, Vermischung und Verdampfung) sorgen für eine fette Gemischzone, gefolgt von einer kraftstoffreichhaltigen vorgemischten Zone im Inneren der Spraykeule. Aufgrund des besagten unterstöchiometrischen Kernbereichs und Temperaturen über 1600 K kommt es nicht nur zur Bildung von unverbranntem Kohlenwasserstoff (HC) und Kohlenmonoxid (CO) sondern auch zur vermehrten Rußproduktion. Entlang der Strahlachse steigt die Rußkonzentration mit zunehmender Entfernung vom Düsenlochaustritt, gegenläufig hierzu sinkt diese in Richtung der diffusiven Zone. Diese verfügt aufgrund der umgebenden Gasphase über den notwendigen Sauerstoff für die Oxidation der entstandenen Rußpartikel. Bei Temperaturen über 2700 K und überstöchiometrischen Bedingungen tritt die verstärkte Stickoxidbildung (NO_x) in den Außenbereichen der Diffusionsflamme ein. Die für diffusive Flammen charakteristische Bildung und Oxidation von Ruß ermöglicht eine genauere optische Analyse auf Basis der Strahlungseigenschaften der entstehenden Rußteilchen. Dieses Phänomen ist essenziell für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen und wird in Kapitel 2.2 ausführlich thematisiert.

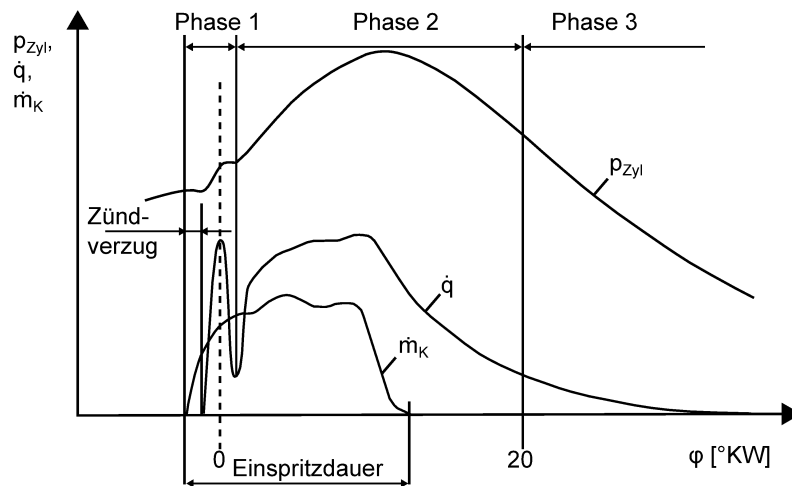


Abbildung 2.2: Phasen der dieselmotorischen Verbrennung, modifiziert nach [20]

In Abbildung 2.3 wird noch einmal die diffusive Verbrennung eines Dieselsprays sowie die sich ausprägenden Bereiche durch Untersuchungen von Dec [30] veranschaulicht.

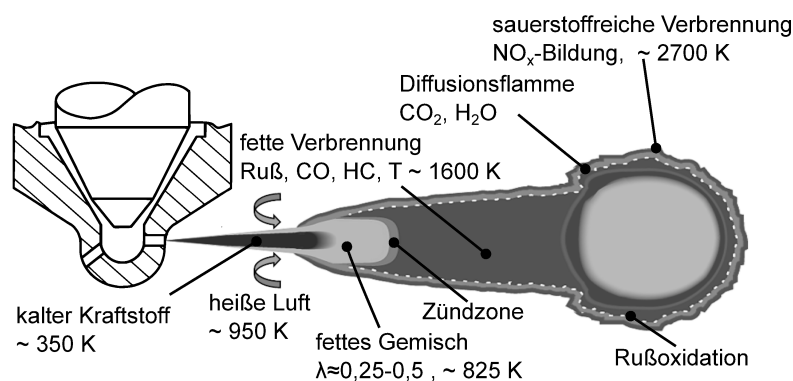


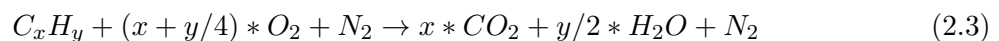
Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Diffusionsverbrennung eines Dieselsprays, modifiziert nach [20] und [30]

Kinetischkontrollierte Verbrennung

Das Ende der Einspritzung und die fortlaufende Expansion des Zylindervolumens führen zu einem sinkenden Druck- und Temperaturniveau, wodurch die Reaktionsgeschwindigkeit der chemischen Prozesse gegenüber den Mischungsvorgängen stark verzögert wird. Die Brenngeschwindigkeit der diffusiven Flamme wird zunehmend durch die Reaktionskinetik kontrolliert, sodass man in diesem Zusammenhang auch von der kinetischkontrollierten Verbrennung spricht. Bis zu diesem Zeitpunkt entstandene Zwischenprodukte der unvollständigen Verbrennung werden allmählich oxidiert. Speziell die während der Nachverbrennung stattfindende Rußoxidation sorgt für einen Abbau der Rußmasse von etwa 95 % der zuvor gebildeten Rußmasse [16]. Die weitere Abkühlung des Brennraums führt zu einer Verlangsamung der ablaufenden Oxidationsvorgänge, bis diese schlussendlich zum Erliegen kommen.

2.1.3 Emissionsentstehung

Bei der vollständigen stöchiometrischen Verbrennung von Kohlenwasserstoffverbindungen entstehen die beiden Produkte Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) [31].



Jedoch führen vorherrschende Reaktionsbedingungen beim realen Verbrennungsprozess zur unvollkommenen Verbrennung, wodurch es neben den Hauptprodukten zur Bildung von Schadstoffen wie unverbranntem Kohlenwasserstoff, Kohlenstoffmonoxid, Stickoxid und Partikelemissionen kommt. Zwar unterscheiden sich die einzelnen Schadstoffkomponenten grundlegend in den Bildungsmechanismen sowie -bedingungen, jedoch führt die Direkteinspritzung und kurze Gemischbildungszeit der dieselmotorischen Verbrennung zur Ausbildung heterogener Gemischzonen im Brennraum, wodurch die Entstehung ermöglicht wird. Wohingegen die unverbrannten Kohlenwasserstoff- und Kohlenmonoxidemissionen prinzipbedingt beim Dieselmotor eine untergeordnete Rolle spielen, stellt das gegenläufige Verhalten der beiden Schadstoffe NO_x und Ruß eine besondere Herausforderung bei der Reduzierung mittels innermotorischer Maßnahmen dar. Die Grenzwerte der für Mensch und Umwelt schädlichen Schadstoffemissionen werden durch den Gesetzgeber in den stetig verschärften Emissionsrichtlinien vorgegeben (vgl. [4]). Neben den Maximalkonzentrationen der aufgeführten Schadstoffe ist in der aktuellen Emissionsvorschrift ein zusätzlicher Grenzwert für die Anzahl der ausgestoßenen Partikel enthalten, weshalb im Zuge dieser Arbeit nicht nur die Partikelmasse sondern auch die Größenverteilung sowie deren Anzahl aufgezeigt wird. Für eine ganzheitliche Betrachtung wird in den folgenden Abschnitten auf die Entstehung der vier genannten Schadstoffe eingegangen, wobei der thematische Fokus auf den innermotorischen Rußenstehungs- und Oxidationsprozessen liegt.

Unverbrannte Kohlenwasserstoffe

Eine Folge der unvollständigen Oxidation von Kraftstoff sind unverbrannte Kohlenwasserstoffe. Diese sind nicht nur auf extrem magere Bereiche der Flammenaußenzone, sehr fette Gebiete im Strahlkern, Anlagerungen an den Brennraumwänden oder Totvolumina der Einspritzdüsen zurückzuführen, sondern auch auf die Desorption aus dem Ölfilm [31]. Die wohl bedeutendste Quelle für direkteinspritzende Dieselmotoren ist das Restvolumen der Sacklochdüse. Eine zunehmende Bedeutung wird den mageren Randbereichen nur im Leerlauf- und Niedriglastbetrieb zugeschrieben [27].

HC -Emissionen wirken auf den menschlichen Organismus narkotisierend und können Reizungen der Schleimhäute hervorrufen. Überdies weisen diverse Bestandteile eine kanzerogene Wirkung

auf [32]. In Ballungszentren tragen unverbrannte Kohlenwasserstoffe wesentlich zur „Smog“-Bildung bei und reagieren in der Atmosphäre mit NO_x unter Einwirkung von UV-Strahlung zu bodennahem Ozon (O_3) [33]. Prinzipiell ist der Rohemissionsausstoß von unverbrannten Kohlenwasserstoffen bei heutigen Dieselmotoren sehr gering und über die Nachschaltung eines Oxidationskatalysators effektiv beherrschbar.

Kohlenstoffmonoxid

In direkter Analogie zu den unverbrannten Kohlenwasserstoffen bildet sich Kohlenstoffmonoxid ebenfalls als Resultat der unvollständigen Verbrennung [34]. Bedingt durch fehlende Reaktionspartner steigt die CO -Konzentration in unterstöchiometrischen Gebieten an [27], [35]. Die Oxidation von CO zu CO_2 mit dem bevorzugten Oxidationspartner OH -Radikal benötigt nur eine niedrige Aktivierungsenergie [36], wodurch eine nach der Umsetzung stattfindende Nachoxidation einen Großteil der entstandenen CO -Emissionen reduziert [26].

Gegenüber Sauerstoff (O_2) besitzt Kohlenstoffmonoxid eine vielfach verstärkte Neigung sich mit Hämoglobin zu binden, weshalb schon eine geringe Konzentration in der Atemluft zum Ersticken führen kann. Da CO -Emissionen farb-, geschmack- und geruchlos sind, können sie durch den Menschen nicht direkt wahrgenommen werden [37].

Stickoxide

Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO_2) und Distickstoffoxid (N_2O) werden unter dem Begriff der Stickoxide (NO_x) zusammengefasst, wobei bei der motorischen Verbrennung Stickstoffmonoxid den größten Anteil ausmacht. Die Bildungsmechanismen der Stickoxidemissionen lassen sich im Wesentlichen in das durch Zeldovich beschriebene thermische NO , das nach dem Fenimore-/ N_2O -Mechanismus entstehende prompte NO und das Brennstoff- NO unterteilen. Erstmals von Zeldovich 1946 [38] beschrieben und durch Lavoie et al. [39] erweitert, kann die Entstehung von thermischen NO mittels dreier Elementargleichungen (Gl. 2.4, 2.5, 2.6) angegeben werden.



In diesem Zusammenhang spricht man auch von dem erweiterten Zeldovich-Mechanismus, welcher auf der Aufspaltung der N_2 -Dreifachbindung des molekularen Stickstoffs basiert. Die hierfür benötigte Aktivierungsenergie kann erst bei ausreichend hohen Temperaturen oberhalb von ca. 2200 K zur Verfügung gestellt werden. Sofern die Versorgung mit molekularem Sauerstoff sichergestellt ist und eine ausreichende Verweilzeit zur Verfügung steht, weist die Bildung von thermischen NO ein exponentielles Temperaturverhalten auf. Bis zu 95 % der beim Verbrennungsprozess entstehenden Stickoxide werden auf die hinter der Flammenfront („post-flame“) ablaufende thermische Stickoxidbildung zurückgeführt [40], [41].

Der weitestgehend temperaturunabhängige NO -Bildungsmechanismus, welcher innerhalb der Flammenfront abläuft, wurde erstmals von Fenimore im Jahre 1971 beschrieben [42]. Sich ausbildende CH -Radikale reagieren mit dem in der Verbrennungsluft enthaltenen Stickstoff zu Blausäure (HCN) und atomarem Stickstoff (Gl. 2.7).



Daran anschließend kommt es zur Oxidation der Blausäure, welche zu prompten NO weiterreagiert [43]. Insgesamt beläuft sich der prozentuale Anteil von prompten NO zwischen 5 % bis 20 % des gesamten Stickoxidausstoßes [44]. Ebenfalls als prompte Reaktion kann die Bildung

von NO über den N_2O -Mechanismus angesehen werden, welcher vorzugsweise in überstöchiometrischen Gebieten und bei niedrigen Temperaturen auftritt [45]. Dabei kommt es nicht zur direkten Bildung von NO , sondern durch die Stabilisierung der trimolekularen Reaktion mittels des Stoßpartners M entsteht zunächst das Zwischenprodukt Lachgas (N_2O) (Gl. 2.8) [46]. Als Folgereaktion reagiert Distickstoffoxid mit atomarem Sauerstoff bzw. Wasserstoff zu NO (Gl. 2.5, 2.10) [45], [47].



Der noch fehlende Brennstoff- NO -Reaktionsmechanismus ist durch die Freisetzung von im Kraftstoff gebundenem NO gegeben. Üblicherweise sind die Stickstoff-Anteile der im Straßenverkehr zum Einsatz kommenden Kraftstoffe äußerst gering, wodurch der Bildung von Brennstoff- NO keine große Relevanz zugeordnet wird.

Die Auswirkungen der einzelnen Stickoxidverbindungen und deren Wahrnehmung ist stark divergierend. Während Stickstoffmonoxid ein farb- und geruchloses Gas ist, kann NO_2 mit einem stechenden Geruch und rot-brauner Färbung wahrgenommen werden. In der Atmosphäre wird NO nach einer Verweilzeit von wenigen Stunden bis zwei Tagen zu NO_2 aufoxidiert, welches maßgeblich die troposphärische Ozonproduktion bestimmt [48]. Sowohl NO als auch NO_2 können die Lungenfunktion stark beeinträchtigen, jedoch ist dies stets konzentrationsabhängig [49]. Im jährlichen Bericht zur Luftqualität [50] der europäischen Umweltagentur (EEA) werden sowohl die Jahresmittelwertkonzentration der Mitgliedstaaten als auch die verlorenen Lebensjahre der Population aufgrund des attributionellen Risikos von NO_x -Exposition angegeben. Dabei basiert der Grenzwert auf einem Richtwert der WHO [51] und einem in der Wissenschaft kontrovers diskutierten „Health risks of air pollution in Europe (HRAPIE)“ Projekts [52]. Die Zuverlässigkeit der epidemiologischen Rechenansätze ist stark umstritten. Welche Rolle hierbei der Dieselmotor einnimmt, spaltet gleichermaßen sowohl die wissenschaftliche als auch öffentliche Meinung und ist Gegenstand der fortwährenden „Diesel-Debatte“.

Ruß

Schon zu einem frühen Zeitpunkt wurden in medizinischen Studien und Kohortenstudien die negativen Auswirkungen von Partikeln auf die Umwelt, insbesondere die menschliche Gesundheit, aufgezeigt [53–58]. Chronische Atemwegserkrankungen, Herz-Kreislaufkrankungen, Entzündungen von Lungengewebe bis hin zur Ausbildung von Tumoren können eine Folge von Exposition mit Feinstaub sein [59, 60]. Dabei wurde bewiesen, dass nicht nur die Lungengängigkeit, welche in direktem Zusammenhang mit der Partikelgröße steht, sondern auch die strukturelle Zusammensetzung sowie die Konzentration eine maßgebliche Rolle spielt. Besonders kleine Partikel ($< 1 \mu m$) dringen mühelos über den Nasenrachenraum in das menschliche Bronchialsystem bis hin zu den Alveolen vor. Zusätzlich nehmen die körpereigenen Reinigungsmechanismen mit abnehmender Partikelgröße ab, sodass ultrafeine Partikel eine sehr hohe Verweilzeit in der Lunge aufweisen. Je länger die Fremdkörper in Kontakt mit den Lungenbläschen stehen, desto höher ist das Risiko der Diffusion in den Blutkreislauf und die weitere Übertragung auf die inneren Organe [61]. Hierdurch wird das Herzinfarkt- und Schlaganfallrisiko zusätzlich gesteigert [62]. Wie einleitend erwähnt, begrenzt die Emissionsgesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge seit Einführung der Abgasnorm Euro VI neben der ausgestoßenen Partikelmasse auch die Partikelanzahl. Durch diese zusätzliche Beschränkung wird verstärkt auf die äußerst negativen gesundheitlichen Folgen von lungengängigen Kleinstpartikeln eingegangen, welche nur einen geringen Anteil der ausgestoßenen Partikelmasse ausmachen und somit bei einer reinen Massenbetrachtung vernach-