

Vorwort des Herausgebers

Zukünftige Technologien für Fahrzeugantriebe sind heute vielfach Gegenstand von Diskussionen, die oft mit großer Leidenschaft geführt werden. Die vorliegende Schriftenreihe des Lehrstuhls für Antriebe in der Fahrzeugtechnik der RPTU Kaiserslautern-Landau möchte objektive, wissenschaftlich fundierte Einblicke in den aktuellen Stand der Forschung und Ausblicke auf zukünftige Entwicklungen im Bereich der Fahrzeugantriebe bieten. Für die schnelle Umsetzung wissenschaftlicher Erkenntnis in praktische Anwendungen sind der Austausch mit anderen Forschern und Entwicklern sowie der erfolgreiche Transfer in die Industrie von besonderer Bedeutung. Neben Vorträgen auf Fachtagungen und Veröffentlichungen in Fachzeitschriften soll hierzu auch diese Schriftenreihe einen Beitrag leisten.

Im Mittelpunkt aktueller Antriebsforschung stehen einerseits besonders schadstoffarme bzw. emissionsfreie Antriebstechnologien und andererseits die Minimierung des CO₂-Ausstoßes über den Produktlebenszyklus. Zukunftsfähige Antriebe müssen beiden Anforderungen gerecht werden. Mit dieser Zielsetzung ergibt sich ein äußerst weiter Lösungsraum für zukünftige Antriebe, der von den gegenwärtig vieldiskutierten batterieelektrischen Antrieben über Brennstoffzellen-elektrische Konzepte bis hin zu verbrennungsmotorischen Lösungen mit regenerativen Kraftstoffen reicht. Noch weitergehende Gestaltungsmöglichkeiten bieten hybride Antriebskonzepte, beispielsweise durch die Kombination des Hauptantriebs mit weiteren elektrischen, hydraulischen oder pneumatischen Speichern und Antriebskomponenten, ggf. auch für Nebenantriebe.

Im Bereich der Antriebsforschung ist sich die Wissenschaft mittlerweile einig, dass es absehbar nicht „die“ eine einzige und universell anwendbare, ideale Antriebslösung für alle Anwendungen geben wird. Vielmehr ist es wichtig, für jede Antriebsaufgabe die jeweils optimale Lösung zu finden, welche einerseits die technischen Anforderungen des anzutreibenden Fahrzeugs bzw. Arbeitsgeräts zufriedenstellend erfüllt und andererseits den minimal möglichen Einfluss auf die Umgebung nimmt – sowohl im Hinblick auf die Schadstoffemissionen als auch hinsichtlich des Ausstoßes klimaschädlicher Gase. Erklärtes Ziel ist hierbei „zero impact“ – die Konzentrationen der potenziell kritischen Spezies im Abgas sollen auf dem Niveau des Hintergrunds bzw. darunter liegen. Bei Verbrennungsmotoren ist hierfür neben einer hochwirksamen Abgasnachbehandlung insbesondere die Vermeidung der Emissionsbildung bereits an der Quelle, also beim Verbrennungsprozess, von zentraler Bedeutung.

Vor diesem Hintergrund beschäftigte sich Herr Müller im Rahmen seiner Promotion mit den Möglichkeiten der Effizienzsteigerung bei sogenannten Dual-Fuel-Brennverfahren, für die verschiedene regenerative (biogene) Kraftstoffe in Verbindung mit konventionellem Dieseldieselkraftstoff zum Einsatz kamen. Zusätzlich wurde eine Minimierung einerseits der Schadstoffemissionen sowie andererseits des (fossilen) Dieselanteils am Gesamtgemisch verfolgt. Die Untersuchungen zeigen, dass es möglich ist, hohe Substitutionsraten von Dieseldieselkraftstoff durch biogene Kraftstoffe zu erzielen und somit bei gleichbleibend hohem Motorwirkungsgrad in erheblichem Umfang fossiles CO₂ einzusparen. Gleichzeitig wurde bei wesentlichen Schadstoffkomponenten

Vorwort des Herausgebers

wie Partikeln und Stickstoffoxiden ein äußerst niedriges Rohemissionsniveau nachgewiesen. Erreicht wurden diese Erfolge durch die systematische Untersuchung der entscheidenden Betriebsparameter und -strategien, wobei neben der getrennten Einbringung der beiden Kraftstoffe auch die gemeinsame Direkteinspritzung nach vorheriger Mischung betrachtet wurde. Darüber hinaus konnte insbesondere die Rolle von Restgas (aus externer Rückführung und interner Rücksaugung) bei der Optimierung der Verbrennung beleuchtet werden. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen seiner sehr umfangreichen Untersuchungen stellt Herr Müller in dieser Arbeit vor.

Kaiserslautern, im Oktober 2023

Michael Günthner

Kurzfassung

In den letzten Jahren ist die Notwendigkeit nachhaltiger Antriebstechnologien in den Fokus der öffentlichen Debatten zum Klimawandel gerückt. Eine mögliche Lösung zur Vermeidung der Nutzung fossiler Energieträger ist die Verwendung regenerativer Kraftstoffe. Dazu gehören z.B. Biokraftstoffe, die sich jedoch häufig nicht zum Einsatz in konventionellen kompressionsgezündeten Diesel-Brennverfahren eignen, die aufgrund ihres typischerweise hohen Wirkungsgrads weite Verbreitung gefunden haben. Zur effizienten Nutzung solcher Kraftstoffe bieten sich Dual-Fuel-Brennverfahren an, die hohe thermodynamische Wirkungsgrade erlauben.

Bei Dual-Fuel-Brennverfahren wird ein Primärkraftstoff durch einen Dieselanteil entzündet, womit eine sehr magere Verbrennung in Kombination mit einem hohen Verdichtungsverhältnis möglich ist. Bei gemischansaugenden Dual-Fuel-Motoren - auch als MPI-Verfahren (multi point injection) bezeichnet - entstehen jedoch erhöhte Emissionen an unverbrannten Kohlenwasserstoffen und Kohlenstoffmonoxid.

In dieser Arbeit werden verschiedene Biokraftstoffe (Biomethan, -propan und -ethanol) hinsichtlich ihrer Eignung für Dual-Fuel-Brennverfahren und ihres Potenzials zur Absenkung des Anteils an fossilem Dieselkraftstoff untersucht. Weiterhin werden die interne und die externe Abgasrückführung (AGR) zur Senkung der Schadstoffemissionen eingesetzt und bewertet. Zusätzlich wird die direkte, betriebspunktvariable Beimischung der Kraftstoffe zum Dieselkraftstoff in einem luftansaugenden Dual-Fuel-Brennverfahren untersucht (DI-Verfahren - direct injection).

Während Biomethan im MPI-Verfahren die höchste Substitutionsrate der drei untersuchten Biokraftstoffe erlaubt (bis zu 91 %), ermöglicht die Kombination aus interner und externer AGR eine Senkung der Stickstoffoxide (bis zu -90 %), des Kohlenstoffmonoxids (bis zu -68 %) und der unverbrannten Kohlenwasserstoffe (bis zu -65 %). Biopropan und Bioethanol sind hinsichtlich der maximalen Substitutionsrate durch Klopfen beschränkt, zeigen im DI-Verfahren jedoch stark reduzierte gasförmige Rohemissionen. Diese entsprechen damit dem typischen, niedrigen Niveau eines Dieselmotors bei gleichzeitig stark reduzierter Rußbildung (bis zu -99 %).

1 Einleitung

Seit dem Beginn der Industrialisierung ist der Verbrauch fossiler Energieträger stark angestiegen. Dies hat zur Folge, dass der darin gebundene Kohlenstoff in Form von Kohlenstoffdioxid (CO_2) freigesetzt wird und in die Atmosphäre gelangt. Letzteres trägt dort zum Treibhauseffekt und damit zum Klimawandel bei [1]. Die nachfolgende Abbildung zeigt den ansteigenden Verlauf der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre nach [2]. Die Verbrennung fossiler Kohlenwasserstoffe hat hieran nach Überzeugung der Wissenschaft wesentlichen Anteil [1, 3].

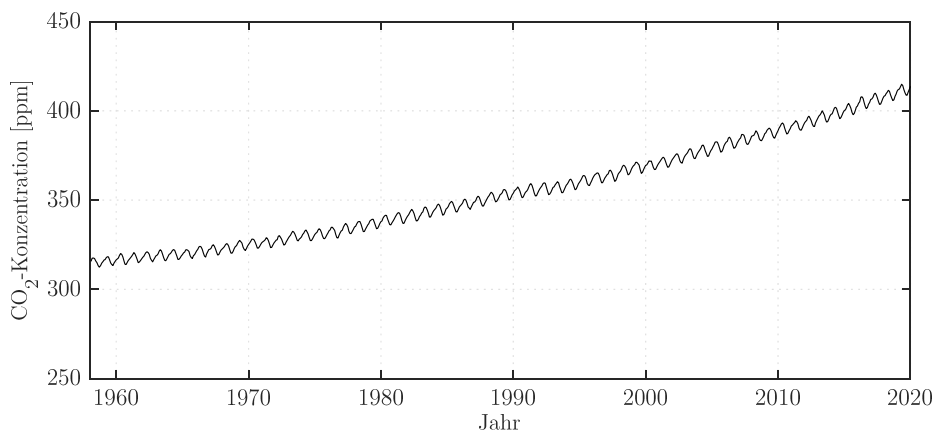


Abbildung 1.1: Verlauf der atmosphärischen CO_2 Konzentration zwischen 1958 und 2020 nach [2]

Neben Kohlenstoffdioxid zählen Methan (CH_4), Distickstoffoxid (N_2O - auch Lachgas genannt), fluorierte Kohlenwasserstoffverbindungen (FCKW) und Schwefelhexafluorid (SF_6) nach dem Kyoto-Protokoll zu den Treibhausgasen [4]. Die Klimawirksamkeit dieser Treibhausgase wird mit dem sogenannten „Global Warming Potential“ (GWP) auf den Wert von Kohlenstoffdioxid bezogen und für verschiedene Zeitfenster angegeben (20, 100, 500 Jahre) [1]. Die Berechnung auf 100 Jahre wurde verbindlich als Standard festgelegt. Hier besitzt Methan somit ein Treibhauspotenzial (GWP_{100}) von 25 [5] mit einer Verweildauer in der Atmosphäre von 10 Jahren, bevor es zu Kohlenstoffdioxid und Wasser oxidiert wird [6]. In Abbildung 1.2 sind beispielhaft die mit den Treibhauspotenzialen der Einzelkomponenten berechneten Treibhausgasemissionen für Deutschland im Jahr 2020 als CO_2 -Äquivalent dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Großteil der Emissionen mit 87.73 % auf Kohlenstoffdioxid entfällt, gefolgt von Methan mit 6.73 %. Von den Gesamtemissionen sind dabei zu 20.2 % auf den Transportsektor zurückzuführen [7]. Im Pariser Klimaabkommen [8] wird eine Begrenzung der Erderwärmung auf deutlich unter 2°C – mit einem Idealziel von 1.5°C – gegenüber der vorindustriellen Zeit gefordert. Um das 2°C -Ziel zu erreichen, darf ein Grenzwert von voraussichtlich 450 ppm CO_2 in der Erdatmosphäre nicht überschritten werden [9]. Somit muss der Ausstoß an Kohlenstoffdioxid aus fossilen Quellen sehr schnell und stark reduziert werden, um unter-

1 Einleitung

halb dieses Grenzwerts zu bleiben. Als Alternative für fossile Brennstoffe bieten sich regenerative Energieträger an, bei deren Verwendung im Idealfall nur so viel CO_2 freigesetzt wird, wie zuvor bei der Erzeugung der Atmosphäre entzogen wurde.

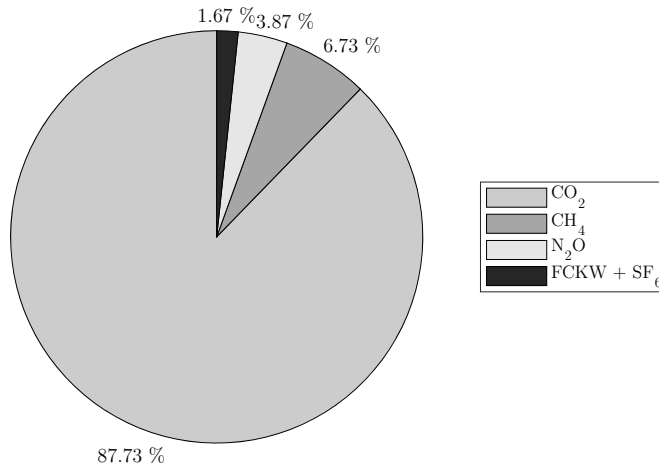


Abbildung 1.2: Treibhausgasemissionen in CO_2 -Äquivalent für Deutschland 2020 (ohne Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft) [nach 7]

Es entsteht also ein geschlossener Kohlenstoffdioxidkreislauf, wodurch die Konzentration in der Atmosphäre nicht weiter ansteigt. In diese Kategorie fallen Biokraftstoffe der ersten, zweiten und dritten Generation [10]. Während Biokraftstoffe der ersten Generation in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen und deshalb in der öffentlichen Debatte kritisiert werden [11–13], wird dieser Konflikt bei Biokraftstoffen der zweiten und dritten Generation aufgelöst [14, 15]. Biokraftstoffe der zweiten Generation, zu deren Erzeugung organische Abfälle wie z.B. Altholz und Stroh zum Einsatz kommen, werden bereits in Demo- und Pilotanlagen mit steigenden Kapazitäten hergestellt [16, 17], allerdings befinden sich die Biokraftstoffe der dritten Generation auf Basis von Algen noch in der Phase der Erforschung [18]. Für alle Biokraftstoffe muss jedoch bei der Erzeugung die gesamte Prozesskette betrachtet werden. So sind diese Energieträger nur klimaneutral, wenn der An- und Abbau der Biomasse, deren Transport sowie die weitere Verarbeitung und Verteilung unter der Nutzung nachhaltiger Energiequellen geschehen. Dies ist aktuell noch nicht der Fall, so dass noch nicht von einer kompletten CO_2 -Neutralität ausgegangen werden kann [19], was auch in der Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen der Europäischen Union durch die Definition von Treibhausgas-Minderungsquoten für die jeweiligen Kraftstoffe Beachtung findet [20]. Die sogenannten „E-Fuels“, also synthetische, aus elektrischer Energie erzeugte Kraftstoffe, fallen ebenfalls in die Kategorie nachhaltiger Energieträger [21], sofern die eingesetzte Energie aus regenerativen Quellen stammt. Jeder dieser nachhaltigen Energieträger bietet die Möglichkeit, fossile Kraftstoffe unter Beibehaltung der existierenden Versorgungsinfrastruktur zu ersetzen und damit auch die bereits im Einsatz befindlichen Fahrzeuge zu defossilisieren. Zusätzlich sind sie auch in Anwendungen einsetzbar, die nach aktuellem Stand der

Technik nicht oder nur schwer durch eine vollständige Elektrifizierung abzudecken sind. Hierzu gehören zum Beispiel der Fern- und Schwerlastverkehr [22, 23] sowie die Luft- [24, 25] und Schifffahrt [26–29].

2 Stand der Technik

In der vorliegenden Arbeit werden verschiedene Biokraftstoffe in einem auf Dual-Fuel-Brennverfahren umgerüsteten Dieselmotor aktueller Bauart untersucht. Daher beschäftigt sich dieses Kapitel mit den Grundlagen und dem Entwicklungsstand der Diesel- und der Dual-Fuel-Verbrennung. Da das vorgestellte Dual-Fuel-Brennverfahren im Fall der MPI-Einbringung eine Mischform aus einer Diffusionsverbrennung (schematisch in Abbildung 2.1 dargestellt) und einer Flammenfrontverbrennung (Abbildung 2.2) ist, wird auch das Ottobrennverfahren kurz erläutert.

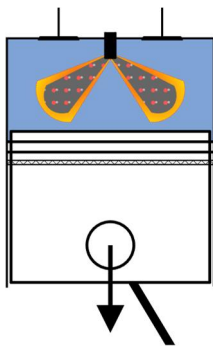


Abbildung 2.1: Diffusionsverbrennung

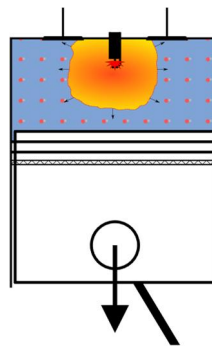


Abbildung 2.2: Flammenfrontverbrennung

2.1 Dieselmotorenverfahren

Bei Dieselmotoren wird ein heterogenes Luft-Kraftstoff-Gemisch verbrannt. Dies bedeutet, dass der Kraftstoff nicht gleichmäßig (homogen) im Brennraum verteilt ist, sondern in einem Bereich konzentriert vorliegt. Bei modernen Dieselmotoren mit Direkteinspritzung ist dies in unmittelbarer Nähe der Einspritzdüse der Fall. Durch die hohen Temperaturen, die bei der Kompression der Luft im Zylinder entstehen, entzündet sich der Kraftstoff während des Einspritzvorgangs nach einer gewissen Totzeit, auch Zündverzug genannt, selbstständig (Selbstzündung). Nach der Entflammung verbrennt der Kraftstoff in einer Diffusionsverbrennung. Der Name leitet sich von dem Diffusionsvorgang der Luft (und damit auch des Sauerstoffs) in die Flamme her, welcher durch die Konzentrationsunterschiede außer- und innerhalb des brennenden Kraftstoffstrahls entsteht. Aus diesem Grund herrschen im Bereich der Brennzonen lokal unterschiedliche Luft-Kraftstoff-Verhältnisse zwischen $\lambda \approx 0$ (reiner Kraftstoff) und $\lambda \approx \infty$ (reine Luft). Eine Beschleunigung der Durchmischung zwischen Kraftstoff und Luft kann sowohl von der Kraftstoffseite her erfolgen als auch von der Luftseite. Ersteres beruht auf der kinetischen Energie des Kraftstoffstrahls, welche durch den Einspritzdruck bestimmt wird, in Kombination mit Kavitations- und Turbulenzerscheinungen durch die Geometrie der Spritzlöcher. Auf diese Weise wird der Kraftstoff zu mikrofeinen Tröpfchen zerstäubt und

durch deren hohe Gesamtoberfläche die Verdampfung beschleunigt [30, S. 96-98]. Abbildung 2.3 zeigt den Zerfall des Dieselstrahls nach [31, S. 10]. Beginnend im Düsenloch (oberer Teil der Abbildung) bis unmittelbar nach dem Austritt kommt es zum sogenannten Primärzerfall, bei dem der Kraftstoffstrahl in Ligamente und Tropfen aufgebrochen wird. Diese werden im daran anschließenden Sekundärzerfall durch aerodynamische Kräfte der Umgebung in kleinere Tröpfchen zerlegt [32, S. 154-155].

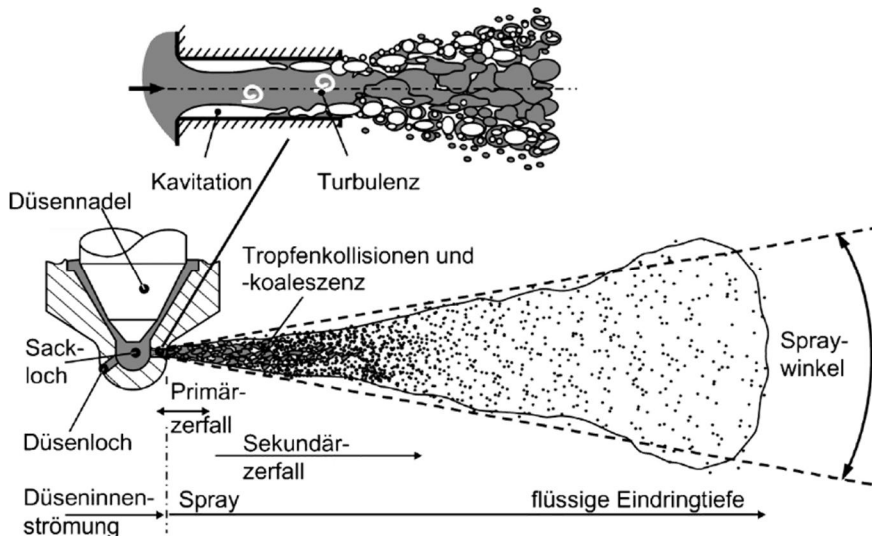


Abbildung 2.3: Primär- und Sekundärzerfall des Dieselstrahls [32, S. 154]

Als luftseitige Maßnahme wird oft eine Drallströmung um die Hochachse des Zylinders genutzt, welche durch die Gestaltung der Einlasskanäle erzeugt wird. Diese sorgt dafür, dass der Flamme Sauerstoff zugeführt wird und somit fette Phasen in der Verbrennung reduziert werden, was wiederum die Rußbildung verringert. Des Weiteren führt die Rotationsbewegung der Luft zu einem weiteren Aufbrechen des Kraftstoffstrahls [30, S. 94-95].

Hinsichtlich der Verbrennung unterscheidet man beim Dieselfahren drei charakteristische Phasen, siehe Abbildung 2.4. Nach Einspritzbeginn vermischt sich zunächst der Kraftstoff mit der Luft im Brennraum, ohne sich bereits zu entzünden. Nach der Zündverzugszeit, die sowohl von der Zündwilligkeit des Kraftstoffs (Cetanzahl) als auch von den Randbedingungen hinsichtlich Druck und Temperatur abhängig ist, entflammt der in dieser Zeit aufbereitete (d.h. hinreichend mit Luft vermischte) Kraftstoffanteil und verbrennt schlagartig, was meist zu hohen Druckanstiegsgradienten führt und deshalb auch akustisch wahrnehmbar ist. Das entstehende Geräusch wird als „Dieselnageln“ bezeichnet. Zur Absenkung des Zündverzugs – und der damit verbundenen Abmilderung dieses Geräuschs – können eine oder mehrere Voreinspritzungen eingebracht werden. Dabei wird eine geringe Kraftstoffmenge in den Brennraum eingespritzt, welche nach der Zündverzugszeit verbrennt und so für einen geringen Druckanstieg sorgt. Dieser Druckanstieg erzeugt eine globale Temperaturerhöhung im Brennraum.

Zusätzlich entsteht ein lokaler Hochtemperaturbereich, auf welchen das Gemisch der Haupteinspritzung trifft und so dessen Zündverzug reduziert wird [32, S. 157]. Nach dieser initialen vorgemischten Verbrennung findet die eigentliche Diffusionsverbrennung statt, deren erster Abschnitt („Phase 2“ in der Abbildung), in welchem der Großteil der Energie freigesetzt wird und auch die in Kapitel 4.2 beschriebenen Schadstoffe entstehen, als „Hauptverbrennung“ bezeichnet wird. In „Phase 3“, der sogenannten Nachverbrennung, wird der nach dem Schließen der Injektornadel noch vorhandene Kraftstoff umgesetzt und es findet eine teilweise Nachoxidation der bei der Verbrennung entstandenen Rußemissionen statt.

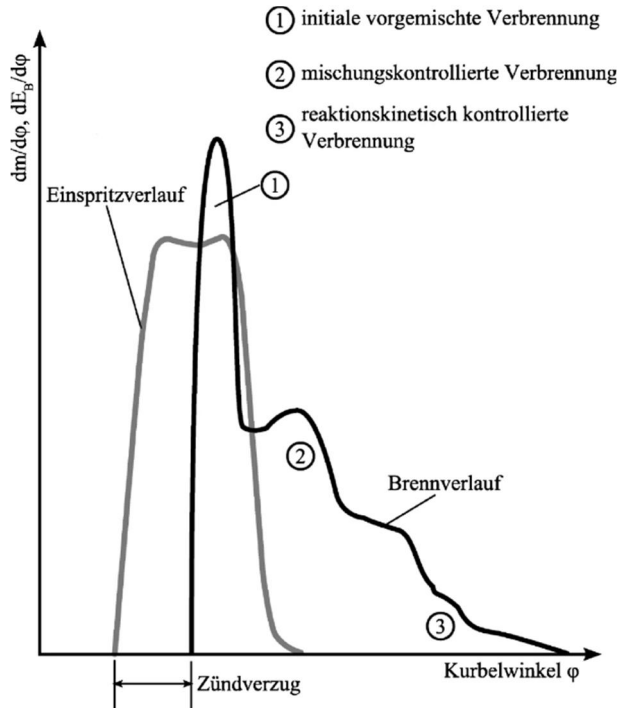


Abbildung 2.4: Phasen der Dieselerverbrennung [32, S. 156]

Zur Anhebung der Abgastemperatur können der Hauptverbrennung noch weitere Einspritzvorgänge nachgelagert werden, z.B. für die schnellere Aufheizung der Komponenten (z.B. Katalysatoren) der Abgasnachbehandlung. In modernen Dieselmotoren wird für die Einspritzung ein Common-Rail-System benutzt, welches mehrere Einspritzungen pro Verbrennungstakt ermöglicht.

2.2 Ottobrennverfahren

Auch beim Ottobrennverfahren gibt es Sonderformen, die mit einem heterogenen Luft-Kraftstoff-Gemisch arbeiten. Diese bilden inzwischen jedoch eher die Ausnahme und die Verbrennung eines homogenen Luft-Kraftstoff-Gemischs ist die Regel. Hierbei liegt im Brennraum zum Start der Verbrennung an jeder Stelle nahezu das gleiche Luft-Kraftstoff-Verhältnis vor (d.h. $\lambda_{\text{lokal}} = \lambda_{\text{global}}$). Die Gemischbildung erfolgt je nach Motor durch Kraftstoffeinspritzung

bereits im Saugrohr (Multi Point Injection, MPI) oder erst im Brennraum (Direct Injection, DI). In beiden Fällen liegt bei Verbrennungsbeginn ein homogenes Gemisch vor, welches durch eine Zündkerze fremdgezündet und in einer Flammenfront verbrannt wird. Dies bedeutet, dass sich eine Flamme vom Zündort aus in alle Richtungen durch den Brennraum bewegt.

Bei einer irregulären Verbrennung (ausgelöst z.B. durch zu hohe Drücke und Temperaturen im Brennraum) kann es hingegen zu einem Verbrennungsstart vor der eigentlichen Zündung kommen, was als Vorentflammung bezeichnet wird. Auch nach dem Zündzeitpunkt sind solche ungewollten Phänomene möglich. Hierbei kann es durch die Druckwelle, welche durch den Brennraum läuft und eine höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit als die Flammenfront besitzt, zur Zündung in Bereichen kommen, die noch nicht von der Flamme erfasst wurden. Dies wird als Klopfen bezeichnet. In beiden Fällen entstehen hohe Verbrennungsdrücke, die zu Schäden im Brennraum führen können. Die Fähigkeit eines Kraftstoffs, dieser Selbstzündung zu widerstehen, wird als Klopfestigkeit bezeichnet und durch die Oktanzahl bzw. Methanzahl quantifiziert. Abbildung 2.5 zeigt diese Verbrennungsphänomene im Vergleich zur normalen Verbrennung und zur unbefeuerten Schleppdruckkurve.

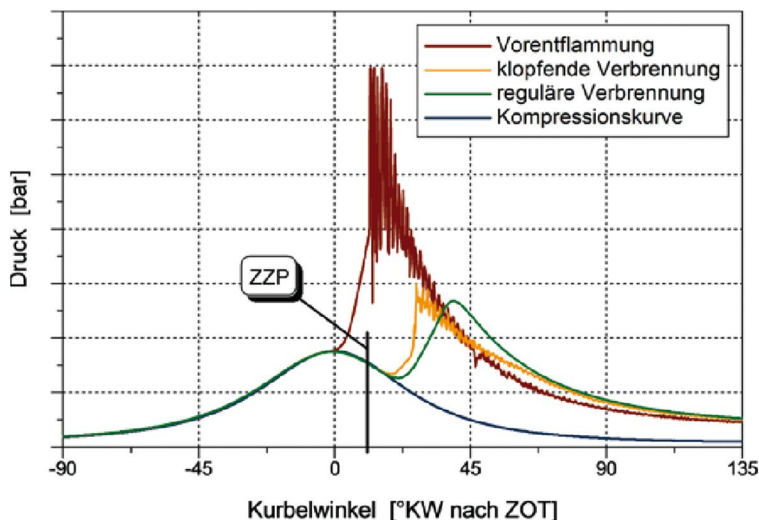


Abbildung 2.5: Formen der Verbrennung im Ottobrennverfahren: reguläre Verbrennung und Anomalien [33]

2.3 HCCI-Brennverfahren

Zusätzlich zur Zündung per Zündkerze oder durch einen Einspritzstrahl existiert noch das Verfahren der homogenen Kompressionszündung (HCCI, Homogeneous Charge Compression Ignition), welches auf der Selbstzündung des verdichteten Luft-Kraftstoff-Gemischs beruht. Hierfür ist auch der Begriff Raumzündung gebräuchlich, da sich der Kraftstoff im gesamten Brennraum nahezu gleichzeitig entzündet. Bei HCCI handelt es sich um ein sogenanntes „Niedertemperaturbrennverfahren“. Dies bedeutet, dass die lokale Temperatur während der Verbrennung (meist) unter der Stickstoffoxid-Bildungstemperatur liegt, bei einem Luft-Kraft-

stoff-Verhältnis oberhalb der Rußgrenze. Abbildung 2.6 zeigt diesen Zusammenhang beispielhaft für Dieselkraftstoff nach Kamimoto und Bay [34]. Das dort verwendete Äquivalenzverhältnis Φ entspricht dem Kehrwert des Luftverhältnisses λ . Es ist zu erkennen, dass HCCI niedrige Schadstoffrohmissionen verspricht. Durch die Entkopplung der Entflammung von einer gut steuerbaren Zündung durch einen Funken entstehen jedoch Herausforderungen bezüglich der Kontrollierbarkeit des Zündzeitpunkts und der Druckgradienten der Verbrennung.

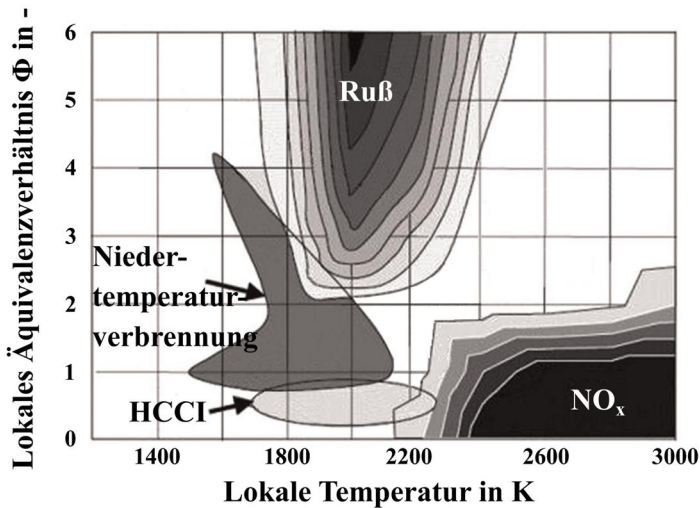


Abbildung 2.6: Ruß- und NO_x -Entstehung von Dieselkraftstoff in Abhängigkeit von lokaler Temperatur und lokalem Äquivalenzverhältnis: Einordnung HCCI und Niedertemperaturverbrennung [nach 34]

Erstmals vorgestellt wurde dieses Brennverfahren 1979 durch Onishi et al. [35] unter dem Namen „Active Thermo-Atmosphere Combustion (ATAC)“ bzw. Noguchi et al. [36] als „Toyota-Soken (TS)“. In beiden Fällen war eine Anwendung in Zweitaktmotoren untersucht worden, während Najt et al. [37] 1983 entsprechende Versuche unter dem Namen „Compression-Ignited Homogeneous Charge Combustion (CIHCC)“ in einem Viertaktmotor durchführten um Erkenntnisse über die zugrunde liegenden Verbrennungsmechanismen zu erlangen. 1989 untersuchte Thring [38] den Einfluss von HCCI auf den indizierten Wirkungsgrad. Es wurden im Vergleich zur Fremdzündung niedrigere Kraftstoffverbräuche beobachtet, welche im Bereich von Dieselmotoren lagen, und die Vorteile hoher AGR-Raten sowie hoher Ladungstemperatur verdeutlicht. Seither beschäftigen sich eine Vielzahl von Forschungsvorhaben mit einer Erweiterung des Betriebsbereichs des HCCI-Brennverfahrens, sowohl mit konventionellen, fossilen Kraftstoffen [39–41] als auch mit alternativen Energieträgern [42–44]. Mit dem Skyactive X-Motor setzt Mazda 2019 eine als SPCCI (Spark Controlled Compression Ignition) bezeichnete Abwandlung erstmals in Serie ein. Hier erfolgt die Zündung des homogenen mageren Grundgemischs durch die Entflammung eines lokal fetteren Gemischs an der Zündkerze, welche zu einem Druckanstieg im Brennraum führt und damit den restlichen Kraftstoff zur Selbstzündung bringt. Das lokal fette Gemisch wird durch eine gezielte Einspritzung einer kleinen