

Vorwort des Herausgebers

Die Komplexität des verbrennungsmotorischen Antriebes ist seit über 100 Jahren Antrieb für kontinuierliche Aktivitäten im Bereich der Grundlagenforschung sowie der anwendungsorientierten Entwicklung. Die Kombination eines instationären, thermodynamischen Prozesses mit einem chemisch reaktiven und hochturbulenten Gemisch, welches in intensiver Wechselwirkung mit einer Mehrphasenströmung steht, stellt den technologisch anspruchsvollsten Anwendungsfall dar. Gleichzeitig ist das Produkt des Verbrennungsmotors aufgrund seiner vielseitigen Einsetzbarkeit und zahlreicher Produktvorteile für sehr viele Anwendungen annähernd konkurrenzlos. Nun steht der Verbrennungsmotor insbesondere aufgrund der Abgasemissionen im Blickpunkt des öffentlichen Interesses. Vor diesem Hintergrund ist eine weitere und kontinuierliche Verbesserung der Produkteigenschaften des Verbrennungsmotors unabdingbar.

Am Institut für Kolbenmaschinen am Karlsruher Institut für Technologie wird deshalb intensiv an der Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors geforscht. Übergeordnetes Ziel dieser Forschungsaktivitäten ist die Konzentration auf drei Entwicklungsschwerpunkte. Zum einen ist die weitere Reduzierung der Emissionen des Verbrennungsmotors, die bereits im Verlauf der letzten beiden Dekaden um circa zwei Größenordnungen reduziert werden konnten, aufzuführen. Zum zweiten ist die langfristige Umstellung der Kraftstoffe auf eine nachhaltige Basis Ziel der verbrennungsmotorischen Forschungsaktivitäten. Diese Aktivitäten fokussieren gleichzeitig auf eine weitere Wirkungsgradsteigerung des Verbrennungsmotors. Der dritte Entwicklungsschwerpunkt zielt auf eine Systemverbesserung. Motivation ist beispielsweise eine Kostenreduzierung, Systemvereinfachung oder Robustheitssteigerung von technischen Lösungen. Bei den meisten Fragestellungen wird aus dem Dreiklang aus Grundlagenexperiment, Prüfstandversuch und Simulation eine technische Lösung erarbeitet.

Die Arbeit an diesen Entwicklungsschwerpunkten bestimmt die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten des Instituts. Hierbei ist eine gesunde Mischung aus grundlagenorientierter Forschung und anwendungsorientierter Entwicklungsarbeit der Schlüssel für ein erfolgreiches Wirken. In nationalen als auch internationalen Vorhaben sind wir bestrebt, einen wissenschaftlich wertvollen Beitrag zur erfolgreichen Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors beizusteuern. Sowohl Industriekooperationen als auch öffentlich geförderte Forschungsaktivitäten sind hierbei die Grundlage guter universitärer Forschung.

Zur Diskussion der erarbeiteten Ergebnisse und Erkenntnisse dient diese Schriftenreihe, in der die Dissertationen des Instituts für Kolbenmaschinen verfasst sind. In dieser Sammlung sind somit die wesentlichen Ausarbeitungen des Instituts niedergeschrieben. Natürlich werden darüber hinaus auch Publikationen auf Konferenzen und in Fachzeitschriften veröffentlicht. Präsenz in der Fachwelt erarbeiten wir uns zudem durch die Einreichung von Erfindungsmeldungen und dem damit verknüpften Streben nach Patenten. Diese Aktivitäten sind jedoch erst das Resultat von vorgelagerter und erfolgreicher Grundlagenforschung.

Jeder Doktorand am Institut beschäftigt sich mit Fragestellungen von ausgeprägter gesellschaftlicher Relevanz. Insbesondere Nachhaltigkeit und Umweltschutz als Triebfedern des ingenieurwissenschaftlichen Handelns sind die Motivation unserer Aktivität. Gleichzeitig kann er nach Beendigung seiner Promotion mit einer sehr guten Ausbildung in der Industrie oder Forschungslandschaft wichtige Beiträge leisten.

In diesem Exemplar der Schriftenreihe beschäftigt sich Herr Notheis mit der innermotorischen Bildung von Stickstoffdioxid und Formaldehyd bei Magerbrennverfahren mit regenerativen Kraftstoffen. Herr Notheis erweitert hiermit das am Institut entstandene Verständnis zur Stickstoffdioxidbildung am Dieselmotor auf ottomotorische Brennverfahren mit Methan als Kraftstoff als auch auf den Einsatz von Oxygenatkraftstoffen beim Dieselmotor. Zudem erweitert Herr Notheis die Untersuchungen um die Bildung von Formaldehyd.

Die Untersuchungen finden an mehreren Einzylinderaggregaten mit kombiniertem Einsatz von Abgasmesstechnik, wie einer AMA4000, einem FTIR sowie einem Quantenkaskadenlaser statt. Die Untersuchungen wurden zudem beim Gasmotor um 0D/1D-Simulationen mit Reaktionskinetik ergänzt.

Im ersten Teil der Arbeit beschäftigt sich Herr Notheis mit dem Magergasmotor. Dabei werden zuerst Einzelparameteruntersuchungen am Einzylinderaggregat durchgeführt. Diese werden anschließend mit statistischer Versuchsplanung (DoEs) ergänzt. Herr Notheis variiert in der ersten DoE zum einen die thermodynamischen Größen wie Luftverhältnis, Ladelufttemperatur AGR-Rate sowie Feuchte bei unterschiedlichen Zündzeitpunkten. Neben den Wechselwirkungen der unterschiedlichen Emissionen werden damit auch Wege zur gezielten Einflussnahme von Herrn Notheis dargestellt. In der zweiten DoE wird von Herrn Notheis der Bereich im Kennfeld mit niedriger Drehzahl und niedriger Last untersucht. Dieser Teil ist durch seine geringen Abgastemperaturen herausfordernd. Gerade in diesem Bereich ist das von Herrn Notheis aufgebaute Verständnis zur Bildung von Stickstoffdioxid und Vermeidung von Formaldehyd von großer Bedeutung.

0D-1D-Berechnungen mit Reaktionskinetik runden die Untersuchungen am Magergasmotor ab. Dabei zeigt Herr Notheis die wichtigsten Bildungswege von Stickstoffdioxid und Formaldehyd am Magergasmotor auf. Vor allem Nachreaktionen im Brennraum durch Vermischungen von unverbrannten mit bereits verbrannten zeigen sich als größte Emissionsquelle für Stickstoffdioxid als auch Formaldehyd am Magergasmotor.

Im zweiten Teil der Arbeit beschäftigt sich Herr Notheis mit Oxygenatkraftstoffen am Dieselmotor. Dazu werden drei unterschiedliche Oxygenatkraftstoffe als auch Mischungen mit Diesel untersucht. Untersuchungen mit Vor- und Nacheinspritzungen ergänzen die am Magergasmotor erstellten Bildungswege. Des Weiteren fährt Herr Notheis Bereiche mit den Oxygenatkraftstoffen an, die beim Dieselmotor aufgrund von zu hohen Partikelemissionen nicht weiter untersucht werden können.

Die Arbeit von Herrn Notheis stellt somit eine wichtige Grundlagenuntersuchung zur Emissionsentstehung von ottomotorischen als auch dieselmotorischen Brennverfahren da.

Karlsruhe im März 2024

Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch

1 Einleitung

Mit dem Ziel des Pariser Klimaabkommens [1], die Erderwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Niveau auf 1,5 °C zu beschränken, müssen Kohlenstoffdioxid-Emissionen (CO₂) aus nicht regenerativ erzeugten Quellen in den kommenden Jahrzehnten auf null reduziert werden. Da der Verbrennungsmotor in den kommenden Jahren in vielen Anwendungsfeldern aufgrund der hohen Energiedichte des Kraftstoffes und der Möglichkeit der schnellen Nachfüllung des Kraftstofftankes, anderen Technologien überlegen sein wird, muss zum Erreichen der CO₂-Neutralität der Kraftstoff synthetisch und klimaneutral zu Verfügung gestellt werden. Im Weiteren bietet die Mischung von synthetischem Kraftstoff mit konventionellem erdölbasiertem Kraftstoff die Möglichkeit, auch bei Bestandsmotoren den CO₂-Fußabdruck der Fahrzeuge zu reduzieren [2].

Als Mittel zur CO₂-Reduktion kann zum einen der Weg über Erdgas als Kraftstoff, welcher durch seinen hohen gebundenen Wasserstoffanteil direkt die CO₂-Emissionen um 20 % – 25 % im Vergleich zum konventionellen Diesel senkt, betrachtet werden. Bei Gasmotoren können zusätzlich die CO₂-Emissionen mit der Zumischung von synthetischem Methan (CH₄) oder Wasserstoff (H₂) zum Erdgas weiter reduziert werden. Zum anderen können zur CO₂-Reduktion synthetische, flüssige Dieseleratzkraftstoffe eingesetzt werden. Als vielversprechende Dieseleratzkraftstoffe gelten dabei Oxygenatkraftstoffe. Dies sind Kraftstoffe mit gebundenen Sauerstoffatomen. Neben der CO₂-Neutralität muss auch die Reduktion von anderen Emissionen immer weiter vorangetrieben werden, um die Luftqualität in den Städten unabhängig von kommenden Emissionsnormen stetig zu verbessern. Deshalb muss auch für die zukünftigen Kraftstoffe Grundlagenwissen bezüglich der innermotorischen Emissionsbildung geschaffen werden. Dies ist das Ziel dieser Arbeit. Dabei liegt der Fokus dieser Arbeit auf der innermotorischen Bildung von Stickstoffdioxid (NO₂) sowie Formaldehyd (HCHO).

Als Ziel für zukünftige Motoren gilt es, die gesamten Stickoxidemissionen (NO_x) bis zum Ausscheiden an die Umgebungsluft vollständig oder soweit als technisch möglich zu reduzieren. Moderne Magerbrennverfahren kommen zur Reduktion dieser NO_x-Emissionen ohne den Einsatz eines SCR-Katalysators (engl.: SCR = selective catalytic reduction) nicht aus. Gerade bei niedrigen Temperaturen ist für die optimale Umwandlung im SCR-Katalysator ein NO₂-zu-NO_x-Verhältnis von 50 % anzustreben [3]. Da das motorische Abgas nur einen geringen Anteil NO₂ beinhaltet [4, 5], wird NO₂ für dieses Verhältnis hauptsächlich im Oxydationskatalysator aus Stickstoffmonoxid (NO) und Restsauerstoff (O₂) gebildet [6]. Da aufgrund des Thermomanagements und schnelleren Aufheizens die SCR-Katalysatoren zukünftig immer näher an den Motor verbaut werden, kann die Erhöhung des innermotorischen Anteiles von NO₂ einen wichtigen Beitrag für zukünftige Emissionsziele leisten. Daneben kann NO₂ die Oxidation von Ruß und weiteren Spezies wie beispielsweise HCHO im Katalysator begünstigen.

HCHO ist als kanzerogen eingestuft [7] und wird bei Betriebstemperatur nahezu vollständig im Oxydationskatalysator reduziert. Durch den anteiligen Schwefel im Kraftstoff bei Gasmotoren und der damit verbundenen eintretenden Alterung des Katalysators ist die Oxidation von HCHO über den Produktlebenszyklus herausfordernd [8]. Auch beim

Dieselmotor steigen unter dem Einsatz von Oxygenatkraftstoffen, allen voran Oxymethylether (OME), welches aus Formaldehydverbindungen besteht, die HCHO-Emissionen an [9, 10].

Diese Arbeit basiert auf den Vorarbeiten rund um die NO₂-Bildung bei konventionellen Dieselmotoren von Rößler et al. [11] und baut das daraus erlangte Wissen auf synthetische Kraftstoffe aus. Neben NO₂ wird bei den hier verwendeten Kraftstoffen gezielt auch HCHO betrachtet. Daneben sollen auch alle anderen Emissionen mit in die Bewertung einfließen. Die Ziele dieser Arbeit können wie folgt zusammengefasst werden:

- Erweiterung des Verständnisses der innermotorischen NO₂- und HCHO-Bildung. Dabei wird der Fokus auf erneuerbare CO₂-neutrale Kraftstoffe gelegt.
- Charakterisierung der NO₂- und HCHO-Bildungswege und des Einflusses von motorischen Einflussgrößen.
- Beim Magergasmotor:
 - Übertragung der Erkenntnisse aus dem Dieselmotor [11] auf den Ottomotor.
 - Charakterisierung der ottomotorischen Einflussgrößen.
 - Aufzeigen der möglichen Wechselwirkungen zwischen NO₂ und HCHO.
- Beim Dieselmotor mit Oxygenatkraftstoffen:
 - Bestimmung des Einflusses von Sauerstoff im Kraftstoff auf die NO₂-Bildung.
 - Charakterisierung des Einflusses der Kraftstoffe auf die HCHO-Bildung.

Dabei werden motorische Untersuchungen sowohl am ottomotorischen Gasmotor als auch am Dieselmotor mit unterschiedlichen Einflussparametern durchgeführt. Des Weiteren wird beim Magergasmotor, um die Emissionsbildung im Motor zu beschreiben, ein 0D/1D-Motormodell mit Reaktionskinetik aufgebaut.

Die Arbeit wurde im Rahmen zweier Projekte der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V. (FVV) zusammen mit dem Projektpartner Institut für physikalische Chemie (IPC) durchgeführt. Das IPC unterstützt die Projekte und auch diese Arbeit mit reaktionskinetischen Untersuchungen, Charakterisierung von Bildungswegen sowie den Aufbau und die Untersuchung geeigneter Reaktionsmechanismen.

Die motorischen Untersuchungen des Gasmotors stammen aus dem Projekt FVV 1301 „NO₂/HCHO beim Magergasmotor“ [12]. Die Untersuchungen am Dieselmotor stammen aus dem Projekt FVV 1359 „NO₂ mit Diesel-E-Fuels“ [13].

2 Grundlagen der Stickstoffdioxid- und Formaldehydbildung

2.1 Grundlagen der motorischen Verbrennung

Die Grundlagen der motorischen Verbrennung bilden das Fundament des in dieser Arbeit gezeigten Wissens. In diesem Abschnitt werden somit die wichtigsten Eigenschaften des in dieser Arbeit verwendeten 4-Takt-Brennverfahrens hinsichtlich Einflussgrößen und Emissionsentstehung wiedergegeben.

2.1.1 Vorgemischte ottomotorische Erdgasmagerverbrennung - Einflussgrößen und Emissionsentstehung

Bei der vorgemischten ottomotorischen Verbrennung wird ein Kraftstoffluftgemisch fremd-gezündet mit Bildung einer Flammenfront verbrannt. Die Zündung erfolgt mit einem geeigneten Zündsystem, für gewöhnlich einer Zündkerze, im Brennraum. Beginnt die Zündung durch Einspritzung eines anderen Kraftstoffes mit erhöhter Zündwilligkeit, beispielsweise Diesel, wird von einem Dual-Fuel-Brennverfahren mit einer Zündöleinspritzung gesprochen. Die Flamme breitet sich dann sphärisch beeinflusst durch das Strömungs- und Temperaturfeld im Brennraum bis zum Erreichen der Zylinderwände und des Kolbens aus. An den Bauteilen kommt es aufgrund der relativ kalten Bauteile zur Löschung der Flamme durch sogenanntes Quenching. Die Flammenfrontgeschwindigkeit setzt sich aus der Geschwindigkeit des turbulenten Strömungsfeldes und der laminaren Brenngeschwindigkeit des Kraftstoffluftgemisches zusammen. Die Turbulenz sowie die laminare Brenngeschwindigkeit beeinflussen des Weiteren die Struktur der Flammenfront. Diese Abhängigkeit kann mithilfe des Borghi-Diagrammes (benannt nach Erstautor Borghi [14], erweitert in weiteren Werken anderer Autoren [15, 16]) bestimmt werden¹.

Die Beeinflussung des Verbrennungsvorganges durch verschiedene Parameter wird in dieser Arbeit auf den Einfluss auf die Zündwilligkeit und der Brenngeschwindigkeit /-dauer des Kraftstoffluftgemisches beschränkt. Eine hohe Zündwilligkeit des Kraftstoffluftgemisches begünstigt den Entflammungsvorgang und verringert den Löschabstand zur Brennraumgrenze. Ottomotorische Brennverfahren sind in ihrer Zündwilligkeit des Kraftstoffluftgemisches durch unkontrollierte motorschädigende Selbstzündungen wie Klopfen (Selbstzündung im Endgasbereich) oder Vorentflammungen/Glühzündungen (Selbstzündung vor der Zündung) beschränkt. Eine Erhöhung der Brenngeschwindigkeit führt zu höheren Brennraumtemperaturen sowie höheren maximalen Drücken und Druckgradienten (bauteilschädigend). Bei einem früheren Ende der Verbrennung kommt es im Gegensatz dazu

¹ In dieser Arbeit wird auf weitere Erklärungen zum Diagramm und der unterschiedlichen Flammenfronten verzichtet, diese können beispielsweise aus Warnatz et al. [17] entnommen werden.

zu einer geringen Flammen-Wand-Fläche und somit zu einer Reduktion der durch Quenching entstehenden Emissionen.

Im Weiteren wird der Einfluss der in dieser Arbeit untersuchten Motorparameter auf diese beiden Parameter näher beschrieben. Die untersuchten Parameter werden eingeteilt in Eigenschaften des Kraftstoffes, der Ladung, der Zündung und in allgemeine Eigenschaften des Motors.

Kraftstoffe unterscheiden sich voneinander in ihrer molekularen Struktur. Dadurch verändert sich die Zündwilligkeit und die laminare Brenngeschwindigkeit der Kraftstoffe. Bei Kohlenwasserstoffen (HCs) erhöht sich die Zündwilligkeit je langkettiger und unverzweigter das Molekül ist [17]. Der Einfluss unterschiedlicher Kettenlängen auf die laminare Brenngeschwindigkeit ist vergleichsweise gering [17]. Der in dieser Arbeit bei der vorgemischten Verbrennung hauptsächlich eingesetzte Kraftstoff Methan (CH_4) besitzt aufgrund seiner geringen molekularen Größe eine vergleichsweise geringe Zündwilligkeit. Bei den längeren Kohlenwasserstoffen, vor allem auch beim Wasserstoff, ist die Zündwilligkeit erhöht. Wasserstoff hat im Gegensatz zu Kohlenwasserstoffen eine erhöhte laminare Brenngeschwindigkeit.

Die Zylinderladung kann durch Erhöhung der Luftmasse im Vergleich zur Kraftstoffmasse und damit einer Erhöhung des relativen Luftverhältnisses λ (Abmagerung), durch Einbringung von zurückgeführten Abgasen (AGR) und durch die Einbringung von Wasserdampf in seiner Zusammensetzung verändert werden. Prinzipiell gilt, dass eine Erhöhung der Ladung zu einer Erhöhung des Inertgases (in der Verbrennung nicht verwendete Masse) führt. Diese zusätzliche Masse verringert die Zündwilligkeit sowie die Brenngeschwindigkeit. Des Weiteren führt die zusätzliche Masse zu einer Verringerung der Temperatur. Im Vergleich zur reinen Erhöhung der Luftmasse erhöht sich durch Einbringen von AGR sowie von Wasserdampf der Anteil von dreiatomigen Molekülen (Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O)) in der Zylinderladung, welche die Wärmekapazität des Gases zusätzlich erhöhen und somit die Temperatur als auch die Zündwilligkeit weiter verringern. Durch eine Veränderung der Ladungstemperatur kann im Weiteren die Dichte der Ladung verändert werden. Höhere Temperaturen führen zu einer höheren Zündwilligkeit und höheren Brenngeschwindigkeiten.

Das Zündsystem sowie der Zündzeitpunkt haben einen großen Einfluss auf die Verbrennung. Mit modernen Zündsystemen (Vorkammerkerze oder Zündöleinspritzung) lässt sich die Ladung weiter erhöhen, da konventionelle Zündsysteme bei einer zu hohen Zündwilligkeit an ihre Zündgrenzen kommen. Auch begünstigt die schnellere (Vorkammer und Zündöleinspritzung) oder im Brennraum gehäufte (Zündöleinspritzung) Initialisierung der Flamme die Brenngeschwindigkeit. Eine Veränderung des Zündzeitpunktes ist eine der wichtigsten Einstellgrößen in ottomotorischen Brennverfahren. Durch eine Spätstellung des Zündzeitpunktes vom Verbrauchsoptimum kann durch die Abwärtsbewegung des Kolbens die Verbrennungstemperatur deutlich abgesenkt werden. Durch die verschleppte Verbrennung sinkt der Wirkungsgrad bei steigenden Abgastemperaturen.

Allgemeine motorische Größen wie die Drehzahl und Last führen zu einem veränderten Wärmeeintrag in die Bauteile. Mit einer Erhöhung der Leistung (Erhöhung der Drehzahl und/oder der Last) kommt es zu erhöhten Bauteiltemperaturen und höheren Abgastemperaturen. Auch veränderte Kühlmitteltemperaturen beeinflussen die Bauteiltemperaturen. Die Motorgestaltung beeinflusst des Weiteren stark das Strömungsfeld und somit die

Flammengeschwindigkeit als auch die Wandinteraktionen der Flamme. Eine Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses führt zu höheren Spitzentemperaturen, aber auch zu einer schnelleren und höheren Reduktion der Temperatur während der Expansion.

Die unterschiedlichen Motorparameter haben auch unterschiedlichen Einfluss auf das Emissionsverhalten. Generell kann davon ausgegangen werden, dass alles was die Temperatur reduziert zu reduzierten NO_x -Konzentrationen führt. Auf die Bildung der NO_x -Emissionen wird in Kapitel 2.2 näher eingegangen. Diese Senkung der Temperatur führt des Weiteren zu einer Vergrößerung der Quenchingfläche und somit zur Erhöhung von unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HCs – primär beim Gasmotor CH_4) als auch von Kohlenmonoxid (CO) [18]. Der aus der Literatur bekannte Einfluss auf die Bildung von HCHO wird in Kapitel 2.3 näher erläutert. Unverbranntes Kraftstoffluftgemisch, welches im Feuersteg-Bereich oder in anderen Schadvolumina verbleibt, vermischt sich sowohl während der Expansion als auch während dem Ausschleiben der Ladung mit dem zuvor verbrannten Kraftstoffluftgemisch. Das Ausströmen und Vermischen des unverbrannten Kraftstoffluftgemisches mit dem verbrannten Gas im Brennraum ist exemplarisch nach Heywood [19] in Abbildung 2.1 aufgetragen.

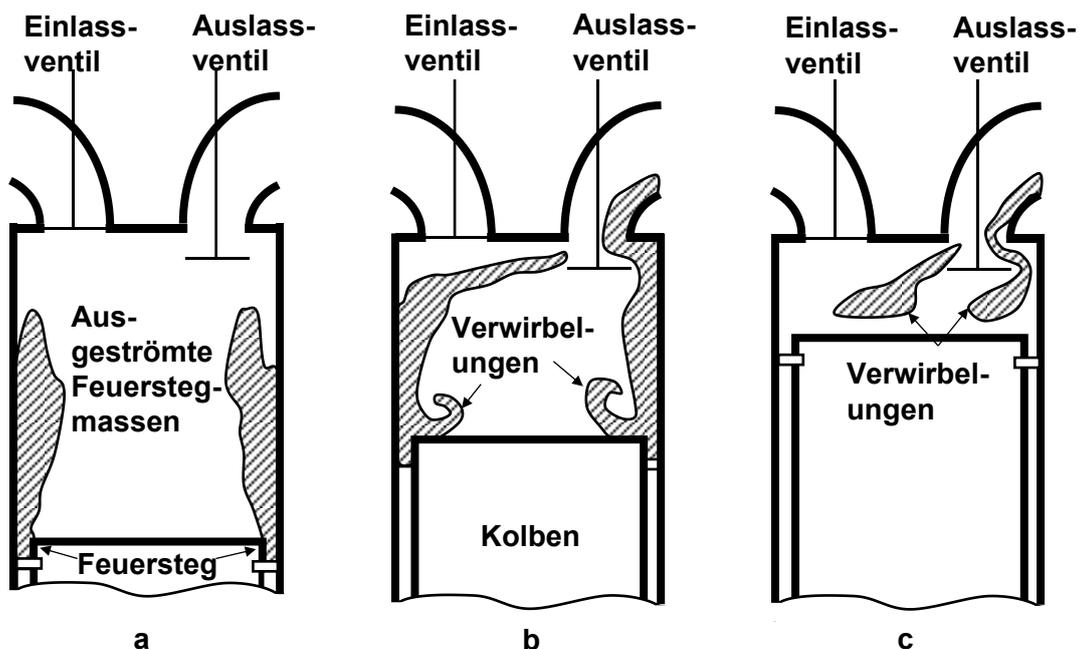


Abbildung 2.1: Ausströmungen aus dem Feuersteg bei einer vorgemischten Verbrennung; a: Nachdem das Auslassventil öffnet; b: Während des Ausschleibens; c: Kurz vor Ende des Ausschleibens (nach [19])

Die Partikelbildung bei einem vorgemischten magerbetriebenen Gasmotor kann aufgrund des fehlenden Flüssiganteiles des Kraftstoffes und der damit einhergehenden fehlenden Ansammlung von Kraftstoff an Bauteilen, bei der es durch die diffusiven Verbrennung zur Partikelbildung kommt [20, 21], als vernachlässigbar betrachtet werden.

2.1.2 Dieselmotorische Verbrennung – Einflussgrößen und Emissionsentstehung

Bei der dieselmotorischen Verbrennung entzündet sich der Kraftstoff selbst im Brennraum. Die Einspritzung des Kraftstoffes erfolgt kurz vor Ende des Kompressions-Taktes. Die Selbstzündung des Kraftstoffes erfolgt meist noch während des Einspritzvorganges. Die dieselmotorische Verbrennung verändert sich somit über die Einspritzzeit. Daher wird die dieselmotorische Verbrennung in drei Phasen unterteilt, wobei die Übergänge fließend sind. Die erste Phase ist die Zeit von Einspritzbeginn bis zur Zündung und Entflammung des bis dahin aufbereiteten zündfähigen Kraftstoffluftgemisches. Dies ist die vorgemischte Verbrennung mit dem Zündverzug (Zeit zwischen Einspritzung und Entflammung). Die Energieumsetzung ist schlagartig, was zu hohen Druckgradienten und Zonen hoher Temperaturen im Brennraum führt. Für den Wirkungsgrad ist diese schnelle Umsetzung positiv. Die Bauteilbelastungen, Geräuschemissionen sowie Stickoxide sind in dieser Phase dagegen erhöht. Die zweiten Phase, die Verbrennung des Kraftstoffes während der Einspritzung in Spraykeulen, ist die diffusive Verbrennung. Die Umsatzrate hängt von der Durchmischungsrate dieser Spraykeulen mit der Zylinderladung ab. Es ist somit eine Mischungskontrollierte inhomogene Verbrennung. In dieser inhomogenen Verbrennung findet sich das komplette Spektrum von λ in Bereichen von reinem Kraftstoff bis zu Bereichen ohne Kraftstoff wieder. Nach der Einspritzung beginnt die kinetisch kontrollierte Phase (dritte Phase). Diese Phase wird von der Kinetik der langsamen Reaktionen bestimmt. Es kommt zur Vermischung von fetten Bereichen mit mageren Bereichen und zur Oxidation der Zwischenprodukte der Verbrennung wie beispielsweise CO und den Partikeln.

Unterschiedliche Motorparameter beeinflussen die jeweilige Dauer und den Umsatzanteil dieser Phasen. Die Motorparameter können sich durch ihren entgegengesetzten Einfluss teilweise gegenseitig kompensieren. Des Weiteren beeinflussen die einzelnen Parameter die globalen als auch lokalen Temperaturen im Brennraum. Äquivalent wie im Vorkapitel bei der ottomotorischen Verbrennung wird hier nur der Einfluss der verschiedenen Parameter, welche in dieser Arbeit variiert werden, bei der dieselmotorischen Verbrennung betrachtet. Dies umfasst Parameter der Einspritzung, der Ladung, des Kraftstoffes und der Einfluss von Drehzahl und Last.

Die Einstellparameter der Einspritzung umfassen den Einspritzzeitpunkt und den Einspritzdruck. Daneben kann die Verbrennung auch mit Voreinspritzungen als auch Nachspritzungen beeinflusst werden. Mit dem Einspritzzeitpunkt kann in bestimmten Bereichen der Anteil von vorgemischter Verbrennung zu der diffusiven Verbrennung variiert werden. Frühere Einspritzungen finden bei niedrigeren Temperaturen statt, womit der Zündverzug sich erhöht und somit der Anteil der vorgemischten Verbrennung steigt. Bei einer Erhöhung des Einspritzdruckes kommt es zu einer Erhöhung des vorgemischten Anteiles aufgrund des größeren Masseeintrages während der Zeit des Zündverzuges. Die kompensierende Reduktion des Zündverzuges aufgrund eines beschleunigten Sprayaufbruches ist geringfügiger. Des Weiteren verkürzt sich die Einspritzdauer und es erhöht sich somit die Umsatzrate äquivalent mit der Erhöhung des Einspritzdruckes. Durch Verringerung des Tropfendurchmessers bei erhöhtem Einspritzdruck verbessert sich die Durchmischung. Mit einer Voreinspritzung kann mit einer geringen Masse der Zündverzug herabgesetzt werden und dadurch eine Reduktion der vorgemischten Verbrennung her-

beigeführt werden. Eine Nacheinspritzung beeinflusst durch die zusätzliche Energie und Erhöhung der Temperatur die kinetisch kontrollierte Verbrennung.

Äquivalent wie beim Ottomotor kann die Ladung durch eine Erhöhung der Luftmasse als auch durch das Einbringen der AGR beeinflusst werden. Durch die Inhomogenität des dieselmotorischen Verbrennung wird die Verbrennung durch die zusätzliche Luftmasse ab einem gewissen Niveau oberhalb der Rauchgrenze (Erläuterung im späteren Teil dieses Kapitels) nur geringfügig durch Erhöhung des Zylinderdruckes und leichte Verschiebung des λ -Spektrums beeinflusst. Das Einbringen von AGR senkt dahingehend sowohl die Temperatur lokal als auch global deutlich ab. Es kommt mit der AGR zur einer Erhöhung des Zündverzuges. Der Druckanstieg der vorgemischten Verbrennung wird aber durch die zusätzliche Masse gedämpft.

Der Kraftstoff beeinflusst durch seine Zündwilligkeit aber auch durch seinen Heizwert die Verbrennung. Eine Erhöhung der Zündwilligkeit, welche mit der Cetanzahl charakterisiert wird, verringert den Zündverzug. Eine Verringerung des Heizwertes, wie bei oxygenen Kraftstoffen aufgrund der Bindung von Sauerstoff unausweichlich, verlängert die Dauer der Einspritzung und vor allem des diffusiven Anteiles der Verbrennung.

Höhere Lasten bedeuten eine größere Menge an eingespritztem Kraftstoff und somit lange diffusive Anteile bei der Verbrennung. Bei niedrigeren Lasten erhöht sich verhältnismäßig immer der vorgemischte Anteil der Verbrennung. Mit der Erhöhung der Drehzahl verlängert sich der Kurbelweg bei gleicher Zeit. Somit passieren zeitbasierte Vorgänge wie der Zündverzug als auch die Einspritzdauer in einem längeren Kurbelweg bei erhöhter Drehzahl.

Auch bei der dieselmotorischen Verbrennung gilt, dass das Emissionsverhalten maßgeblich von den Einstellparametern abhängt. Die beiden wichtigsten Emissionen beim Dieselmotor sind NO_x und Ruß. In den meisten Fällen bedeutet eine Reduktion der einen Emissions-Art die Erhöhung der anderen. Dies wird Ruß-NO_x-Schere genannt. Da beim Dieselmotor im Brennraum aber immer das gesamte λ -Spektrum vorhanden ist, sind auch alle Emissionen immer im Abgas vorhanden. NO_x bildet sich in der vorgemischten Verbrennung als auch am Rande der Strahlkeule bei leichtem Luftüberschuss und hohen Temperaturen (genauere Bildung wird im folgenden Kapitel näher aufgezeigt). Ruß als auch CO bilden sich im fetten Bereich in der Strahlkeule. Ruß, CO wie auch übrig gebliebene HC-Emissionen werden in der kinetisch kontrollierten Phase bei Luftüberschuss weitestgehend oxidiert. Dies bedeutet, dass ein Dieselmotor immer mit einem gewissen Luftüberschuss betrieben werden muss, da ansonsten die Ruß- und CO-Emissionen im Abgas deutlich ansteigen. Dies wird Rauchgrenze genannt. Bei den Oxygenatkraftstoffen ändert sich dieses Verhalten durch die Bindung von Sauerstoff. Der Einfluss von Sauerstoff wird detailliert in Kapitel 2.3.5 erläutert.

2.2 Quellen der innermotorischen Bildungswege von NO₂– Stand der Technik

Dieser Abschnitt befasst sich mit den Quellen der innermotorischen NO₂-Bildung. Dabei werden zuerst die chemischen Bildungswege anhand der wichtigsten Reaktionen auf-

gezeigt. Anschließend werden die Bildungswege und -Orte der NO₂-Bildung im Verbrennungsmotor aus der Literatur vorgestellt. Der Abschnitt endet mit den wichtigsten bekannten motorischen Einflussgrößen auf die NO₂-Bildung für Diesel- sowie Gasmotoren.

2.2.1 Chemische Bildungswege von Stickstoffmonoxid und -dioxid

Die chemischen Bildungswege der innermotorischen NO₂-Bildung, welche aus der Literatur bekannt sind, werden hier kurz vorgestellt. Da NO₂ sich immer aus NO bildet, wird in diesem Abschnitt zuerst auf die Bildung von NO eingegangen. Darauf folgend werden die Reaktionen und Rückreaktionen zwischen NO₂ und NO aufgezeigt.

2.2.1.1 Bildung von Stickstoffmonoxid

Die Bildung von Stickstoffmonoxid (NO) findet laut der Literatur [17, 22] über drei unterschiedliche Prozesse statt:

- Bildung von Luftstickstoff bei hohen Temperaturen (thermisches NO).
- Bildung von Luftstickstoff bei niedrigeren Temperaturen über dem Prompten-NO Reaktionsmechanismus und über die Bildung aus N₂O.
- Bildung aus kraftstoffgebundenem Stickstoff.

Der Hauptbestandteil des motorischen Abgases bildet für gewöhnlich das thermische NO, welches auch als Zeldovich-NO [23] bekannt ist. Zum jetzigen Stand der Technik findet der erweiterte Zeldovich-Mechanismus Verwendung bei dem die von Zeldovich postulierte Zweischrittreaktion in den 1970iger Jahren von Lavoie et al. [24] zu einer Dreischrittreaktion erweitert wurde. Der erweiterte Zeldovich-Mechanismus wird wie folgt beschrieben:



Dabei benötigt Reaktion (I) aufgrund der Trennung der Stickstoffdreifachbindung hohe Aktivierungsenergien und somit hohen Temperaturen, die für den Namen thermisches NO verantwortlich sind [17]. Des Weiteren ist Reaktion (I) aufgrund der geringen Reaktionsgeschwindigkeit die geschwindigkeitsbestimmende Reaktion des Mechanismus [17]. Durch die zusätzliche Temperaturabhängigkeit des Geschwindigkeitskoeffizienten [17–19] von der Reaktion (I) ist die Bildung sehr sensitiv auf Temperaturänderungen. Generell wird thermisches NO in Verbrennungsmotoren aufgrund der benötigten Zeit und der geringen Flammendicke nach der Flamme im heißen verbrannten Abgas gebildet [18, 19]. Wichtig ist bei der Betrachtung der Bildung von NO, dass das chemische Gleichgewicht im Verbrennungsmotor aufgrund der zu kurzen Zeit nicht erreicht wird [17, 18]. Dies gilt zum