
1 Einleitung

1.1 Motivation

„Die Zeiten ändern sich“, ist eine alte Weisheit mit der Aussage, dass sich alles entwickelt. Seit der Industrialisierung ist zusätzlich klar, die Zyklen, in denen sich alles ändert, werden immer kürzer. Zu Beginn der Aufnahme dieses Promotionsprojekts stand die Automobilbranche unter dem Schock der Diesel-Krise. Es wurde klar, ein „Weiter-so“ wird es nicht mehr geben. Die im Truckbereich bereits eingeführten Real-Driving-Emissions (RDE) waren in der Euro-VI Gesetzgebung für den PKW zwar eingebunden, gesellschaftlich aber zuvor nicht relevant. Mit dem neuen medialen Fokus kam die Abgasgesetzgebung als Thema im öffentlichen Diskurs an, und die Politik zog nach. Konformitätsfaktoren wurden deutlich verschärft, und auch ältere Fahrzeuggenerationen mussten nachgerüstet werden. Im weiteren Verlauf trat aber ein neuer Fokus auf, die Klimakrise. Obwohl schon Ende des 19. Jahrhunderts unter Svante Arrhenius zum ersten Mal abgeschätzt, wurde der menschengemachte Beitrag zur Klimaintensivität erst von Charles Keeling 1960 [1] belegt. Auch wenn wissenschaftlich damit lange bekannt, wurden der Bevölkerung erst durch zunehmende Extrem-Wetterereignisse die Folgen wirklich bewusst. Im Jahr 2021 gehört der CO₂-Fußabdruck und dessen Berücksichtigung zum Alltag vieler Menschen und Regierungen. Aus einem nicht mehr möglichen „Weiter-so“ bezüglich der Emissionen ist zum Stand dieser Ausführungen ein „nicht mehr Weiter-so“ bezüglich fossiler Brennstoffe geworden. Dies geht soweit, dass die Atomkraft in vielen Ländern eine Renaissance erfährt. Während die PKW-Industrie sich mehrheitlich auf die Transformation zur Elektromobilität konzentriert, ist dieser Weg auf absehbare Zeit im Transportsektor nicht gangbar. Zusätzlich ist der Transportsektor weiterhin einem Wachstum unterworfen. Eine Prognose des Bundesministeriums für Verkehr und Digitale Infrastruktur rechnet mit einem Anstieg der Verkehrsleistung im Transportsektor von 43 % bis zum Jahr 2030 im Vergleich zum Referenzjahr 2010 [2]. Die Energiedichte flüssiger Kohlenwasserstoff-Kraftstoffe, gefolgt von gasförmigen, bleibt elementar, um sinnvolle Nutzlasten zu ermöglichen. Dem Transportsektor auf CO₂-Neutralität umzuwandeln, ist eine der Hauptherausforderungen. Unter den vielen diskutierten Möglichkeiten hat es die Power-to-X oder E-Fuel Diskussion sogar bis in den Koalitionsvertrag der neuen Bundesregierung unter Beteiligung der Grünen geschafft. All diesen Strategien ist der hohe Primärenergiebedarf gemein, bei momentan noch niedrigen Wirkungsgraden.

Um dann nicht noch einmal im Fahrzeug die Well-to-wheel-Bilanz zusätzlich zu verschlechtern, muss eine Nutzung mit maximal möglichem, hohem Wirkungsgrad gefunden werden. Dies unterstreicht die Aktualität der vorliegenden Arbeit, in der ein Brennverfahren erforscht wird, welches Wirkungsgrade von über 50 % mit der Nutzung von komprimiertem Erdgas (CNG) verbinden soll. Solange hierfür fossile Brennstoffe eingesetzt werden müssen, entstehen bei der Methanverbrennung 25 % geringere CO₂-Emissionen im Vergleich zu Diesel aufgrund der Molekülstruktur. Eine aktuelle Einschätzung des Bundesministeriums für Umwelt geht davon aus, dass bei Nutzfahrzeugen mit Gasmotor bis zum Jahr 2030 die Treibhausgasemissionen um bis zu 30 % gesenkt werden können [3] [2]. Im Power-to-X-Verfahren stellt Methan wiederum, durch den einfachen Molekülaufbau, einen potentiellen Energieträger dar, siehe Ghaib et al. [4].

Bisher hat sich der Gasmotor im LKW-Transportsektor bis auf wenige Ausnahmen noch nicht durchgesetzt. Großmotorische Anwendungen im Schiff, genauso wie kleinere Anwendungen in Gabelstaplern, sind aber am Markt etabliert. Mit über 95 % dominiert der Dieselmotor, den Zulassungszahlen des KBA Stand 2018 nach, den LKW-Sektor [5]. Um den Dieselmotor aber für EURO-VI-fähige Abgaswerte zu ertüchtigen, sind umfangreiche innermotorische Maßnahmen in Kombination mit der Abgasnachbehandlung notwendig. Neben dem Kostenfaktor steht eben genau die Abgasnachbehandlung in der Kritik in der aktuellen Diskussion. Hier setzt die innermotorische Emissionsreduzierung durch Magerbrennverfahren an. Die Grundlagen der unterschiedlichen Magerbrennverfahren sind bekannt. Homogene Kompressionszündungsverfahren (HCCI) sind in Teillastbereichen am Markt verfügbar. Eine Anwendung auf den vollen Lastbereich ist mit einem Dual-Fuel-Verfahren mit geschichteter Reaktivität ebenfalls weit erforscht. Das sogenannte RCCI-Verfahren wird in der Forschung aber meistens mit zwei flüssigen Kraftstoffen realisiert. Um den technischen Aufwand gering zu halten, wird der sogenannte Primärkraftstoff ins Saugrohr eingespritzt und mit einer direkteingespritzten Piloteinspritzung, meist Diesel, durch die Kompression gezündet. Das Resultat sind hohe Wirkungsgrade bei quasi nicht vorhandenen Ruß- und NO_x-Emissionen. Herausfordernd ist aber die Brennverfahrenskontrolle und die Emission von unverbrannten Kohlenwasserstoffen beim HCCI nach Yao et al. [6] und auch im RCCI-Betrieb. Wenn zusätzlich zu den hohen Wirkungsgraden der Primärkraftstoff noch einen CO₂-Vorteil mit sich bringt, wäre ein effektiver Beitrag zum CO₂-Fußabdruck des Transportsektors gefunden. Dieser muss dann noch kontrollierbar wie von Bach in [7] appliziert werden.

1.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Umsetzung und Bewertung eines RCCI-Brennverfahrens. Im Fokus der Untersuchungen soll neben der Analyse der Wirkzusammenhänge nicht nur die Schichtung der Reaktivität des Gemischs im Brennraum sein, sondern explizit auch das Potential einer Schichtung des reaktionsärmeren Grundkraftstoffs CNG im Brennraum. Ausgangsbasis stellt dabei eine Marktanalyse von Pelders et al. [8] dar. In dieser Vorstudie sind Vergleiche unterschiedlicher Erdgas-Brennverfahren und Bohrungsgrößen angefertigt. Zusammengefasst sind die Wirkungsgrad der am Markt verfügbaren Technologien und dem aktuellen Stand der Forschung des niederländischen Instituts TNO, in Abbildung 1-1 miteinander verglichen.

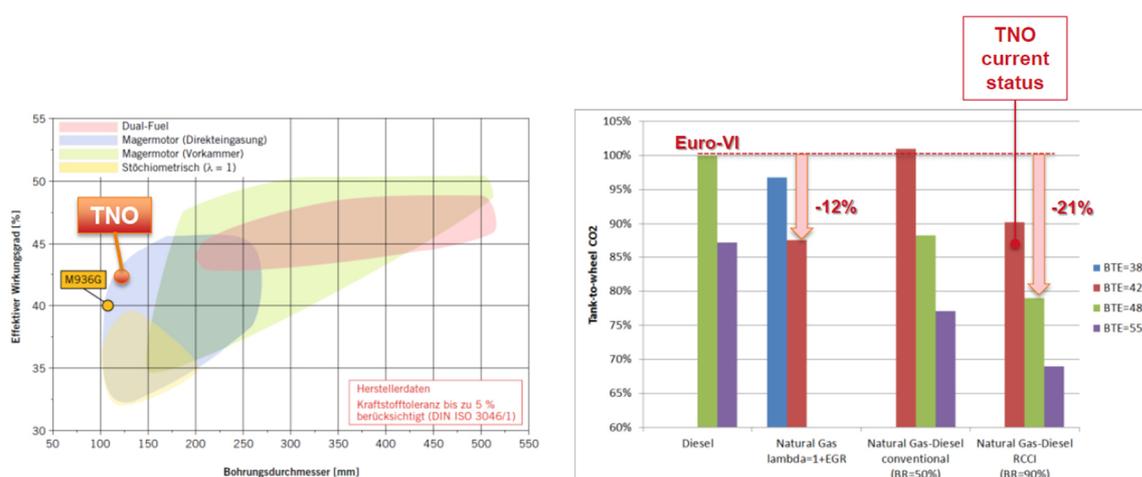


Abbildung 1-1: links: Marktanalyse und Forschungsstand von CNG Brennverfahren, rechts: CO₂-Reduktion durch Wirkungsgradverbesserung bei CNG-Brennverfahren, [8]

Im relevanten Bereich des Bohrungsdurchmessers wird der M936G als Gasmotoren-Referenz mit 40 % effektivem Wirkungsgrad aufgeführt. Der Stand der gasmotorischen RCCI-Forschung bei TNO ist mit 42 % angegeben. Bessere Wirkungsgrade werden nur mit größeren Bohrungsdurchmessern realisiert. Im rechten Teil der Grafik ist die potentielle CO₂-Reduktion im Vergleich zur Dieselbasis je nach Wirkungsgrad gezeigt. Trotz eines 10 % schlechteren Wirkungsgrades reduziert ein CNG-Lambda-1-Verfahren schon die CO₂-Emission. Die TNO RCCI-Referenz senkt mit 42 % Wirkungsgrad diese schon um 10 %. Der für RCCI-Verfahren realistische Wert von 48 % Wirkungsgrad sorgt bereits für eine Reduktion um 21 %. Dieser Weg soll in der vorliegenden Ausfertigung beschriftet werden. Als realistische Bezugswerte werden die in der EPA Class 8 stehenden Grenzwerte von 617 g/kWh CO₂ angewandt, siehe Heidt et al. [9]. Zusätzlich muss der CH₄-Schlupf minimal gehalten werden. Zielwert ist hier der EURO-VI Grenzwert von 0,5 g/kWh CH₄. Diese Anforderungen sollen mit den RCCI-Eigenschaften der

sehr niedrigen Ruß- und NO_x-Rohemissionen verbunden werden. Unter Einhaltung aller Randbedingungen sollen die Wirkzusammenhänge im RCCI-Betrieb mit CNG/Diesel unter direkter Einspritzung beider Kraftstoffe identifiziert und analysiert werden. Hieraus werden zielgerichtet Prüf- und Betriebsstrategien abgeleitet, anhand derer eine Datenbasis für einen stabilen RCCI-Betrieb geschaffen wird. Diese wird den Forschungspartnern und der Fachwelt in Form der im Anhang genannten Veröffentlichungen und Vorträge und dieser Dissertation zugänglich gemacht.

2 Grundlagen der Dual-Fuel-Verbrennung

2.1 Einordnung der Brennverfahren

Grundlegend wurden die Brennverfahren in einer Hubkolbenmaschine zum Ende des 19. Jh in zwei Pfaden entwickelt: Einmal das von Rudolf Diesel entwickelte direkteinblasende Dieselverfahren mit einer heterogenen inneren Gemischbildung und Kompressionszündung. Zum anderen das nach Nicolaus August Otto benannte, im Viertaktprinzip arbeitende Brennverfahren mit außermotorischer Gemischbildung und externer Zündquelle.

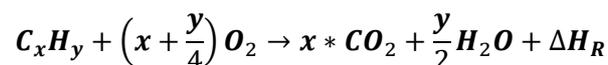
Bis heute werden die meisten Verbrennungsmotoren nach diesen zwei Verfahren kategorisiert und stellen, wenn man die 2-Takt-Verfahren jeweils mit dazu zählt, den Großteil der produzierten Motoren weltweit. Durch die Weiterentwicklung der Einspritztechnik verschwimmen heute die Grenzen, und es entstehen neue Möglichkeiten für Brennverfahren zwischen beiden Kategorien. Im Ottomotor entsteht durch die Direkteinspritzung die Chance einer Schichtung und Entdrosselung. Dieselmotorisch kann hingegen durch Homogenisierung des Gemischs versucht werden, die typischen Probleme, respektive Ruß und NO_x zu eliminieren und weiterhin selbst zu zünden. Dasselbe Prinzip kann aber auch in einem Ottomotor mit angepasster Verdichtung etabliert werden. Im unteren Lastbereich kann die Selbstzündung aber noch von einer externen Zündquelle unterstützt werden. Gemein haben homogen vorgemischte, kompressionsgezündete Magerbrennverfahren, dass sie die Vorteile aus beiden Welten vereinen, hohe thermische Wirkungsgrade bei niedrigen Abgasrohmissionen. In der dieselmotorischen Anwendung wird für diese Brennverfahren der von Thring in [10] eingeführte Begriff der Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) genutzt. Durch das vor dem Selbstzündungszeitpunkt homogen vorliegende Diesel-Luft-Gemisch, welches durch eine frühe Einspritzung realisiert wird, fallen die fetten und mageren Zonen im Brennraum weg. Die Verbrennungstemperaturspitzen sind niedriger und somit entsteht weniger NO_x , während parallel kein Ruß in fetten Spraybereichen entstehen kann. Durch den Wegfall des extern festgelegten Zündevents mit bekanntem Brennverzögerung oder des Einspritzevents mit um den Oberen Totpunkt herum kurzen Zündverzögerungszeiten wird die Kontrolle der Verfahren aber deutlich komplizierter. „Den strukturmolekularen Kraftstoffeigenschaften sowie der Druck- und Temperaturhistorie der Zylinderladung kommt hierbei durch den reaktionskinetisch kontrollierten Verbrennungsablauf die entscheidende Rolle zu.“ [7]. Das „Reactivity Controlled Compression Ignition“ oder RCCI-Verfahren kann als eine Erweiterung des HCCI-Verfahrens angesehen werden.

Durch Ladungsschichtung wird die Reaktivität im Brennraum lokal und gezielt eingestellt. Bei weiterhin hoher Homogenisierung des Dieselsprays entstehen Zonen mit geringfügig niedrigerem λ als in der restlichen Zylinderladung. Namensprägend für diese geschichtete Version sind Kokjohn und Reitz in [11] und [12]. Beide nutzen die Schichtung in einem Dual-Fuel-Verfahren. Der niedrigreaktive Kraftstoff wird mit der Haupteinspritzung meist ins Saugrohr eingebracht und bildet die homogene Hauptladung. Der homogenisierte, reaktive Kraftstoff wird als Pilot direkt eingespritzt. Theoretisch kann das RCCI-Verfahren aber auch monovalent mit einer vollständig homogenen und mageren Diesel-Hauptladung und einer nachgelagerten, geschichteten Diesel-Piloteinspritzung realisiert werden.

Um die grundlegenden Einflussgrößen auf das Brennverfahren zu verstehen, gilt es zuerst die wichtigsten Vorgänge bei einem homogenen Selbstzündungs-Brennverfahren zu verstehen.

2.2 Reaktionsmechanismen der Kohlenwasserstoff Verbrennung

Die Brutto-Reaktionsgleichung der Verbrennung eines Kohlenwasserstoffs sagt nur aus, dass bei der exothermen Reaktion eines Kohlenwasserstoffs mit Sauerstoff, CO_2 und H_2O entstehen.



Reaktion 1

Die Reaktion läuft aber über sehr viele Teilschritte ab, die Elementarreaktionen, welche durch Westbrook [13] in Experimenten und Modellierungen tiefergehend beschrieben werden. Erschwerend kommt die Zusammensetzung der Kraftstoffe hinzu, welche ein Gemisch aus unterschiedlichen Kohlenwasserstoffen sind. Dies gilt in der vorliegenden Arbeit hauptsächlich für den Diesel, aber auch das komprimierte Erdgas ist kein reines CH_4 . Vielmehr finden sich im Erdgas zwischen 8-10 % höherwertige Kohlenwasserstoffe. Als Vergleichsstoff wird für Diesel Cetan und für das Erdgas Methan genutzt. Westbrook charakterisiert in [13] die Elementarreaktionen nach der Art des Prozessfortschritts. Anhand seiner Ausführungen werden diese hier beschrieben. In der Ketteneinleitungsreaktion werden Radikale gebildet. Hier am Beispiel Propan nach der Reaktionsgleichung:



Reaktion 2