

Strukturierte Zusammenfassung der Dissertationsschrift

Thema: Analyse und Optimierung des Verbrennungsprozesses von Dual-Fuel-Motoren bei Betrieb mit schwankenden Brenngasqualitäten

Verfasser: Karsten Schleef, Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren, Universität Rostock

Einreichung: 23.03.2023

Zusammenfassung der Arbeit

1 Ausgangssituation

Bedingt durch die variierende chemische Zusammensetzung von LNG (Liquefied Natural Gas) aus unterschiedlichen Erdgasquellen kommt es zu Brenngasqualitätsunterschieden, wenn Schiffe mit Dual-Fuel-Motoren ihren Brennstoff in verschiedenen Häfen bunkern. Bislang schreiben die Motorenhersteller daher einen anzuwendenden Methanzahlbereich für Ihre Aggregate vor. Wenn dieser nicht eingehalten werden kann, muss z.B. bei zu niedriger MZ die abrufbare Motorleistung gedrosselt werden. Die Notwendigkeit dieser Maßnahme liegt in der Klopfanfälligkeit des überwiegend für mittelschnelllaufende Dual-Fuel-Motoren genutzten Brennverfahrens mit äußerer Gemischbildung und Pilotzündung. Weicht das Brenngas weiterhin zu stark von der Grundapplikation des Motors ab, kann es zu Einbußen im Wirkungsgrad oder dem Emissionsverhalten kommen. Diese Effekte sind für den Schiffbetreiber unerwünscht.

In der Vergangenheit erstellte Regelungsansätze, die diese Problematik beseitigen sollen, beruhen auf einer Analyse der Brenngaszusammensetzung und einer hieraus berechneten Methanzahl auf deren Basis dann eine Vorsteuerung einzelner Betriebsparameter des Motors erfolgen kann. Diese Vorgehensweise kann zwar die Auswirkungen einer Brenngasqualitätschwankung auf das Brennverhalten abmildern, setzt aber auch ein hohes Maß an Regelreserven (z.B. des Turboladers oder der Ladeluftkühlung) voraus. Darüber hinaus ist die Messung der Gasqualität mit zusätzlichem technischen und finanziellem Aufwand verbunden. Durch die notwendige Messzeit und Anpassungsdauer für die Vorsteuerung ist dieses Verfahren in der Geschwindigkeit der Gegenmaßnahmen stark limitiert.

2 Zusammenfassung des Regelungskonzeptes

Ziel dieser Arbeit war es daher ein Regelungskonzept für Dual-Fuel-Motoren mit äußerer Gemischbildung zu erstellen, dass in der Lage ist ohne Kenntnis über die tatsächliche Brenngasqualität einen Betrieb mit jedem im maritimen Bereich möglichen LNG zu ermöglichen. Dabei wurden die folgenden Grundannahmen berücksichtigt:

- Abbildung eines Methanzahlbereiches von mindestens 65 bis 105
- Darstellung aller Motorlasten ohne hardwareseitige Anpassungen
- Abbildung des Wirkungsgradoptimums bei jeder Brenngasqualität

- IMO Tier III konformer Betrieb bei jeder Brenngasqualität
- Strikte Vermeidung unzulässig hoher Klopfereignisse

Ausgehend von einer umfangreichen Vermessung des Brennverfahrens in einem weiten Methanzahlbereich wurden zunächst die Wirkmechanismen von möglichen Gegenmaßnahmen isoliert voneinander bewertet. Hierfür stand ein mittelschnelllaufender Einzylinder-Forschungsmotor mit 340 mm Bohrung sowie eine Gasmischstrecke zur Anpassung der Brenngasqualität zur Verfügung. Dabei wurde deutlich, dass nur die mit der Piloteinspritzung verknüpften Parameter eine ausreichende Flexibilität und Geschwindigkeit für die notwendigen Regeleinriffe ermöglichen. Diese Parameter sind:

- Piloteinspritzzeitpunkt
- Piloteinspritzmenge
- Pilot-Raildruck
- Piloteinspritzstrategie

Durch eine anschließende kombinierte Betrachtung der Einzeleffekte wurde erkannt, dass es einen Zusammenhang zwischen der genutzten Pilotmenge, dem Piloteinspritzzeitpunkt, dem Pilot-Raildruck und der Ausprägung klopfender Verbrennungszyklen gibt, wobei das Zusammenspiel dieser Parameter von der genutzten Brenngasqualität abhängig ist. Dabei war zu berücksichtigen, dass es beim Dual-Fuel-Erdgasbrennverfahren im Gegensatz zur klassischen Dieselerverbrennung durch die Anwendung kleiner Pilotmengen infolge der Ausdünnung des Einspritzsprays zu langen Zündverzügen kommt.

Es musste eine Führungsgröße für die Erstellung eines Regelungskonzeptes entwickelt werden, die in der Lage ist eine Veränderung der Brenngasqualität zu detektieren und hieraus geeignete Gegenmaßnahmen abzuleiten. Entsprechend der Anforderung ohne eine tatsächliche Messung der Gaszusammensetzung auszukommen und möglichst auf bereits an Marinemotoren vorhandene Messtechnik zurückzugreifen, wurde der Brennraumdruckverlauf auf seine Eignung hierfür untersucht. Die zu bestätigende Hypothese für das zu erstellende Regelungskonzept lautete daher:

- Die notwendigen Informationen zur Bewertung des Motorbetriebsverhaltens in Abhängigkeit der Brenngasqualität sind innerhalb des Zylinderdruckverlaufes enthalten.

Daher schloss sich in einem nächsten Schritt die detaillierte thermodynamische Analyse hinsichtlich des Auftretens von Verbrennungsanomalien wie Klopfen, Ringing oder Zündaussetzern der aufgenommenen Versuchsdaten an. Als Ergebnis dieses Prozesses wurden die nachfolgend aufgeführten Parameter als wesentlich erkannt:

- x_K	-	Anteil klopfender Zyklen
- x_R	-	Anteil ringender Zyklen
- KI	$\text{bar}^2 \cdot \text{°KW}$	Klopfintensität
- ϕ_{Rmax}	°KW	Lage des maximalen Druckanstiegsgradienten
- $\text{Var}K_{pmi}$	%	Variationskoeffizient des p_{mi}
- $\text{Var}K_{p \text{ zyl max}}$	%	Variationskoeffizient des $p_{\text{zyl max}}$

Um eine Aussage hinsichtlich der Trendrichtung einer Brenngasqualitätsveränderung treffen zu können, werden die während des Motorbetriebes erfassten Zyklen in die Kategorien „regulär“, „ringend“ und „klopfend“ eingeteilt. Anhand des jeweiligen Anteils kann bereits eine erste Aussage über den Betriebszustand getroffen werden, welche jedoch durch die weiteren genutzten Parameter plausibilisiert werden muss. Daher wurde ein Motorbetriebsindex (MBI)

definiert. Der MBI-Wert wird während des Motorbetriebes direkt auf dem Motorsteuergerät auf Basis einer vereinfachten thermodynamischen Analyse gebildet und steht somit direkt für Regelungszwecke zur Verfügung. Die Eignung des MBI-Wertes als Führungsgröße für ein Regelungskonzept zur Anpassung des Brennverfahrens an auftretende Qualitätsschwankungen konnte in abschließenden Motorversuchen bestätigt werden. Hierbei wurde der zuvor definierte LNG-Qualitätsbereich bewusst über- und unterschritten, um die Wirkzusammenhänge bis in Grenzbereiche hinein zu erproben. Das Regelungskonzept beinhaltet die nachfolgenden Kernpunkte:

- Eine exakte Kenntnis der Brenngasqualität ist nicht erforderlich.
- Die Zylinderdruckdaten enthalten alle notwendigen Informationen für die Bildung einer Führungsgröße.
- Die Beeinflussung der mit der Piloteinspritzung verbundenen Parameter ist ausreichend um das Betriebsverhalten von Dual-Fuel-Motoren an sich ändernde Brenngasqualitäten anzupassen.
- Die während des Motorbetriebes zur Verfügung stehende Rechenzeit zwischen zwei Verbrennungszyklen ist ausreichend, um das Regelungskonzept auf einem Motorsteuergerät abzubilden.
- Zur Erreichung höchster Wirkungsgrade ist die Vorgabe des Piloteinspritzzeitpunktes über einen Schwerpunktlagenregler anstelle einer Festwertvorgabe notwendig.
- In Abhängigkeit der Brenngasqualität ergibt sich dabei ein optimales Verhältnis aus genutzter Pilotkraftstoffmenge und dem Abstand der Piloteinspritzung gegenüber dem Brennbeginn, bzw. der Schwerpunktlage der Verbrennung.
- Das entwickelte Regelungskonzept bietet eine große Robustheit gegenüber Brenngasqualitätsschwankungen.

Durch die Anwendung des Regelungskonzeptes auf Basis eines Motorbetriebsindex ist es somit möglich, das Brennverhalten auf die jeweils aktuell anliegende Brenngasqualität anzupassen. Dabei konnte insbesondere festgestellt werden, dass die erhöhten Pilotkraftstoffmengen durch die Einspritzung in einem geeigneten Abstand vor dem Brennbeginn, bzw. in Relation zur Schwerpunktlage der Verbrennung, nicht zu erhöhten Stickoxidemissionen führen. Das Regelungskonzept kann daher auch genutzt werden, um des Brennverhalten hinsichtlich des Niveaus der Abgasemissionen zu optimieren.

3 Entwicklungspotenzial des Regelungskonzeptes

Das erstellte Regelungskonzept konnte auf dem für diese Arbeit verwendeten Versuchsträger im Rahmen der durchgeführten Motorexperimente seinen Nutzen unter Beweis stellen. Auf Basis der erzielten Ergebnisse kann angenommen werden, dass ein Übertrag auf andere Motorbaugrößen und auch andere Primärkraftstoffe und deren Gemische (z.B. synLNG, Ammoniak, Propan, Wasserstoff) möglich ist. Das Konzept ist daher im August 2022 unter dem Titel „Verfahren zum Regeln eines Zweistoffmotors sowie Zweistoffmotor“ beim Deutschen Patent- und Markenamt unter der Nr. 10 2022 121 793.0 zum Patent angemeldet worden. In anschließenden Entwicklungsschritten sollten weiterhin die folgenden Punkte berücksichtigt werden:

- Durchführung einer Sensitivitätsanalyse der Parametrierung der Schwellwerte zur Kategorisierung der Verbrennungszyklen (regulär, klopfend, ringend) und der Wichtungsfaktoren und Kalibrierkonstanten des MBI-Rechners

- Überprüfung der Anwendbarkeit des Regelungskonzeptes mit anderen Pilotinjektor-technologien und -einbaupositionen
- Analyse des Einflusses des Pilot-Raildruckes
- Erweiterung des Versuchsraumes auf Mehrfachpiloteinspritzstrategien zur Verbrennungsführung
- Vorsteuerung des Ansteuerbeginnes der Piloteinspritzung bei einer Anpassung der Pilotansteuerdauer basierend auf dem MBI-Wert, um die beobachtete Verschiebung der Verbrennungsschwerpunktlage zu vermeiden
- Nachweis der Anwendbarkeit auf anderen Motorbaugrößen, insbesondere anderen Bohrungsdurchmessern, um den Einfluss der Länge der Brennwege zu analysieren
- Analyse des Regelungskonzeptes bei transientem Motorbetrieb und noch dynamischen Wechseln der Brenngasqualität
- Überprüfung des Regelungskonzeptes an einer Vollmotoranwendung
- Untersuchung der Anwendbarkeit des Regelungskonzeptes:
 - Für die Erstellung einer wirkungsgrad- oder emissionsoptimalen Applikation an Vollmotoranwendungen
 - Zur Optimierung der Betriebskosten in Abhängigkeit der Brenngas- und Pilotkraftstoffkosten
 - Für die Erstellung einer intervallgesteuert durchgeführten Routine zur Bewertung der Brenngasqualität (z.B. nach Bunkervorgängen)

4 Fazit

Die vorliegende Arbeit beschreibt das Brennverhalten eines, mit einer Bohrung von 340 mm repräsentativen, mittelschnelllaufenden Dual-Fuel-Marinemotors im Anwendungsbereich der weltweit auftretenden LNG-Qualitäten. Es konnte gezeigt werden, dass die genaue Kenntnis der Methanzahl des verwendeten Brenngases nicht für die Kontrolle des Verbrennungsprozesses entscheidend ist. Vielmehr ist es ausreichend die Trendrichtung Gasqualitätsveränderung aus dem Brennverhalten abzuleiten. Die hierfür notwendigen Informationen konnten aus dem indizierten Zylinderdruckverlauf abgeleitet werden. Auf Grundlage der aufgenommenen Versuchsdaten war es so möglich ein Regelungskonzept zu entwickeln, dass in der Lage ist eine sich verändernde Brenngasqualität in einem ersten Schritt zu erkennen, um anschließend geeignete Gegenmaßnahmen einzuleiten. Hierbei konnte ein Zusammenhang zwischen der eingesetzten Brenngasqualität auf der einen und den verwendeten Pilotkraftstoffparametern auf der anderen Seite hergestellt werden. Durch eine geeignete Kombination von Pilotmenge und Einspritzzeitpunkt konnten die Grenzbereiche der klopfenden Verbrennung und einsetzender Zündaussetzer teilweise verschoben und der nutzbare Betriebsbereich somit vergrößert werden. Gleichzeitig verhalten sich die Anpassungen der Piloteinspritzung dabei stickoxidneutral und können sogar zur Wirkungsgradsteigerung beitragen. Gegenüber anderen Motorbauarten, wie bspw. monovalenten Großgasmotoren mit Zündkerze, besteht somit ein erheblicher Vorteil in Bezug auf die Regelungsmöglichkeiten bei Veränderung der Brenngasqualität oder dem Wechsel auf einen anderen gasförmigen Primärkraftstoff. Diese Kraftstoffflexibilität ist insbesondere im Zusammenhang mit einer dynamischen Entwicklung des Kraftstoffmarktes während der Maritimen Energiewende von Vorteil.