

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.

Die Reduzierung des Wandwärmeübergangsverlust stellt besonders im Nutzfahrzeugbereich, in dem der Fokus auf den Gesamtkosten der Kunden (total costs of ownership) und damit unter anderem auf dem motorischen Verbrauch liegt, einen wichtigen Aspekt bei der Entwicklung neuer Motorgenerationen dar. Daher eröffnet eine detaillierte Untersuchung der Oberflächentemperaturen und Wärmestromdichten im Brennraum, neben dem wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn, auch vertriebstechnische und somit wirtschaftliche Potenziale für ein Unternehmen.

In diesem Exemplar der Schriftenreihe untersucht Herr Hennes den Wandwärmeübergang im Brennraum eines modernen Nutzfahrzeugdieselmotors bei niedrigen Betriebslasten. Die detaillierten messtechnischen Untersuchungen am Einzylinder-

Forschungsmotor der Daimler Truck AG, bei dem erstmalig ein Strahl-geführtes Kolbenmuldenbrennverfahren eingesetzt wurde, geben Einblick in die bisher unbekanntten Verhältnisse an Kolben und Zylinderkopf. Vergleiche mit anerkannten Modellen zur Vorhersage der Wandwärmeübergänge für dieselmotorische Verbrennungen zeigen deutliche und systematische Unterschiede zu den vorgestellten Messergebnissen.

Im zweiten Teil der Arbeit liegt daher das Augenmerk auf der Anpassung des Wandwärmeübergangsmodell nach Hohenberg. Dazu werden zwei mathematische Ansätze vorgestellt, mit deren Hilfe eine Faktorisierung zur Angleichung des etablierten Modells an die Messresultate durchgeführt wird. Auf Basis der zuvor durchgeführten Messreihen werden polynome Parameterfunktionen in Abhängigkeit von Prüfstandsseitig bestimmten Kenngrößen ermittelt, die die ausgewählten Ansätze eindeutig beschreiben.

Die abschließenden Vergleiche zwischen den angeglichenen Ergebnissen, den ursprünglichen Modellergebnissen und den messtechnisch bestimmten Resultaten zeigen, dass die beiden Ansätze gute Anpassungen im für die Verbrennung relevanten Bereich um den oberen Totpunkt liefern.

Karlsruhe im Mai 2024

Prof. Dr. sc-techn. Thomas Koch

1 Einleitung

Vermutlich ebenso lange wie der Verbrennungsmotor existiert, ist man bestrebt, diesen durch eine Verlustreduzierung weiter zu verbessern. Prinzipbedingt stellt der Verbrennungsmotor eine Wärmekraftmaschine dar, bei der im Regelbetrieb eine Temperaturdifferenz zwischen Arbeitsmedium und Umgebung vorliegt. Bereits mit seiner vorerst rein theoretischen Patentschrift „Arbeitsverfahren und Ausführungsart für Verbrennungskraftmaschinen“ schlug Rudolf Diesel¹ 1892 ein Verfahren vor, das eine deutliche Steigerung des Wirkungsgrades im Vergleich mit den damals kohlebefeueten Dampfmaschinen darstellte. Basierend auf der von Carnot² formulierten Idee einer isothermen Expansion, bei der ein Volumen bei konstanter Temperatur expandiert, dabei Wärme aufnimmt und Arbeit abgibt, zielte er auf eine langsame Verbrennungsphase mit gleichbleibender Temperatur. Dies sollte durch ein selbstzündendes Gas bei hohen Verdichtungsverhältnissen zu einem Wirkungsgrad von 58%, bei einem errechneten Spitzendruck von 253 bar, führen. [1]

Zur damaligen Zeit unvorstellbar, ist auch heute ein innermotorischer Wirkungsgrad von jenseits der 50% kaum realisierbar und Spitzendrücke von 250 bar werden erst seit kurzem, mehr als 100 Jahre später, in modernen Nutzfahrzeugmotoren serienmäßig erreicht [2, 3]. Bei der Realisierung seiner Idee musste Diesel seine Ansprüche an eine Verbrennungskraftmaschine deutlich reduzieren und damit Wirkungsgrad einbußen im Vergleich zu seiner ursprünglichen Formulierung hinnehmen. Nachdem es ihm schließlich gelang, einen Motor in Betrieb zu nehmen, der den Wirkungsgrad der Dampfmaschinen übertraf, waren er und auch noch viele nachfolgende Genera-

¹ Rudolf Christian Karl Diesel: 1858 – 1913, deutscher Ingenieur

² Nicolas Leonard Sadi Carnot: 1796 – 1832, französischer Physiker (*Theorie der thermodynamischen Prozesse*)

tionen an Motorenentwicklern bis heute damit beschäftigt den Wirkungsgrad weiter zu steigern. In den letzten Jahren gewannen der Kraftstoffverbrauch, neben dem wirtschaftlichen Einflussfaktor, vermehrt auch im Sinne von globaler Ressourcenschonung und die motorischen Emissionen zunehmend an Bedeutung. Nach dem sogenannten „ökologischen Imperativ“ sollte es jedermanns Ziel sein, technische Weiterentwicklungen so zu vollführen, dass auch kommende Generationen unter denselben Umständen leben können. Hans Jonas prägte diesen Begriff 1979 in seinem Buch „Prinzip der Verantwortung“. Für den Wandel und die Weiterentwicklung der Technik bedarf es einer gesellschaftlichen Moral, die gleichsam Kants³ „kategorischem Imperativ“ einem ethischen Grundprinzip folgt:

„Handle so, dass die Wirkungen deiner Handlung verträglich sind mit der Permanenz echten menschlichen Lebens auf Erden.“ [4]

Für den Verbrennungsmotor angewandt bedeutet dies, dass eine Entwicklung zukünftiger Motoren stets im Hinblick auf Verbrauch und Emissionswerte zu beurteilen ist. Auf der einen Seite sind daher die Auflagen durch die Gesetzgebungen der verschiedenen Marktregionen zu erfüllen, auf der anderen Seite sollte der technische Fortschritt aus moralischer Sicht nicht auf Kosten nachfolgender Generationen und deren globalen Ressourcen betrieben werden. Dennoch bleiben der wirtschaftliche Aspekt und damit verbunden auch das Gewicht des Aggregats, gerade im NFZ-Bereich, entscheidende Entwicklungsfaktoren. Zunehmend spielen außerdem auch „ideologische Aspekte“, z.B. bei der Elektrifizierung von Antriebsaggregaten, bei der Ausrichtung des technischen Fortschritts eine Rolle.

In der hier vorgestellten Ausarbeitung mit dem wissenschaftlichen Schwerpunkt der Untersuchung des Wandwärmeeübergangs im Brennraum eines modernen Nutzfahrzeugdieselmotors während der Verbrennung liegt die Betrachtung hauptsächlich auf den Oberflächentemperaturen und Wärmestromdichten im Brennraum. Dabei wird vor allem der Frage nachgegangen, wie der Wärmeübergangskoeffizient für das untersuchte Motorenaggregat mit Einspritzratenformung und drallbehafteten Brennverfahren beschrieben werden kann. Diese Arbeit im Bereich der verbren-

³ Immanuel Kant: 1724 – 1804, deutscher Philosoph der Aufklärung

nungsmotorischen Thermodynamik reiht sich an eine jahrzehntelange Untersuchungshistorie, u.a. der Herren Eichelberg (1939, [5]), Woschni (1965, [6]), Hohenberg (1980, [7]) und Bargende (1991, [8]), ein. Dem Autor ist nicht bekannt, dass die hier dargestellten Untersuchungen des Wandwärmeübergangs bereits zuvor bei einem Motor mit den später genannten Spezifikationen besonders hinsichtlich des verwendeten Brennverfahrens durchgeführt wurden. Demnach dient die Beschreibung für diesen Fall zum einen der genaueren thermodynamischen Analyse und nachfolgender Optimierung dieser Motorengruppe. Zum anderen können die gewonnenen Messdaten zudem als Randbedingungen für einen besseren Abgleich simulativer Untersuchungen genutzt werden. Grundlage für die Ausführungen ist das Wissen und das daraus resultierende Verständnis über die komplexen Bedingungen im Brennraum und an den Oberflächen der Bewandungen. Im Besonderen zählt dazu das Wissen über das heterogene Temperaturfeld und die motorischen Kühlstrategien, die es beeinflussen. Interessant sind daher die im Folgenden vorgestellten Resultate der Oberflächentemperatur- und Wärmestromdichtenverläufe an den brennraumbegrenzenden Bauteilen Kolben und Zylinderkopf, sowie die ermittelten Parameterfunktionen zur Anpassung eines bekannten und vielfach verwendeten Wärmeübergangsmodells. Die Ergebnisse zeigen zudem wie diese Parameterfunktionen aus den Versuchswerten ermittelt werden können.

Für das Forschungsfeld stellt diese Studie eine Erweiterung des Wissensstandes über die herrschenden Temperatur- und Wärmeübergangsverhältnisse im Brennraum eines modernen, dieselmotorischen Nutzfahrzeugantriebs durch die experimentellen Untersuchungen dar. Derartige Messungen an einem aufgeladenem Euro VI Schwerlastmotor mit hohen Abgasrückführaten, innermotorischen Spitzendrücken von 250 bar, Einspritzdrücken von bis zu 2500 bar und einem strahlgeführten Stufenmuldenbrennverfahren erweitern zudem den Nutzen für simulative Betrachtungen. Darauf aufbauend können zukünftige Untersuchungen, besonders jene mit erweiterten Variationen der motorischen Parameter, zusätzliche Verbesserungen hinsichtlich der Anpassung bekannter Wärmeübergangsmodelle zur Motivation haben.