



Kurzbericht zum Forschungsprojekt

HomFree

Untersuchung der HCCI-Verbrennung für
den Einsatz in einem
Freikolbenlineargenerator

Durchgeführt im Auftrag des Ministeriums
für Finanzen und Wirtschaft mit Mitteln der
Landesstiftung Baden-Württemberg



Auftraggeber

Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg
Theodor-Heuss-Straße 4
70174 Stuttgart

Projektleitung

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Fahrzeugkonzepte

Institutsdirektor
Prof. Dr. H. E. Friedrich
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart

Tel.: +49 (0)711/6862-256
Fax : +49 (0)711/6862-258

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Verbrennungstechnik

Projektleiter
Dipl.-Ing. Johannes Haag
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart

Tel.: +49 (0) 711/6862-316
E-Mail: johannes.haag@dlr.de

Projektpartner

Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS)

Dr. Marco Chiodi
Dipl.-Phys. Oliver Mack
Pfaffenwaldring 12
70569 Stuttgart

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Verbrennungstechnik

Prof. Dr. Uwe Riedel
Dr. Nadezhda Slavinskaya
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart

Kurzbericht

Einleitung

Ziel des Forschungsprojektes „HomFree“ ist die Darstellung eines homogenen Selbstzündungsbrennverfahrens (HCCI) in der Verbrennungseinheit des Freikolbenlineargenerators (FKLG). Hierbei soll das Potenzial und die Eignung dieses Brennverfahrens in Kombination mit einem kopfgespülten Zweitakt-Ladungswechsels untersucht werden. Die so entstehende mobile Stromerzeugungseinheit bietet besonders große Potenziale in Bezug auf den erreichbaren Wirkungsgrad bei gleichzeitig geringen Rohemissionen. Die Projektpartner sind das Institut für Fahrzeugkonzepte (IFK-DLR), das Institut für Verbrennungstechnik (IVT-DLR) und das Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS). Die Projektaufgaben gliedern sich in die folgenden Teilbereiche:

- Chemisch-kinetische Modellierung der Selbstzündung und Berechnung von Zündverzugszeiten (IVT-DLR),
- Strömungsmechanische Simulationen (CFD) zur Auslegung der erforderlichen Verbrennungskomponenten und Bestimmung der Betriebsparameter (FKFS),
- Konstruktion und Fertigung der Verbrennungskomponenten, sowie Inbetriebnahme und experimentelle Untersuchungen am Prüfstand (IFK-DLR).

Das Projekt unter der Leitung des Institutes für Fahrzeugkonzepte wurde vom Ministerium für Finanzen und Wirtschaft im Rahmen der Landesstiftung Baden-Württemberg finanziert. Im Zentrum der Untersuchungen steht die Verbrennungseinheit des Freikolbenlineargenerators (FKLG). Der FKLG ist ein am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickeltes, innovatives Motorenkonzept zur direkten Wandlung von chemisch gespeicherter Energie in elektrische Energie. Hierbei entfällt die mechanische Zwangsführung des Kolbens durch eine Pleuellwelle. Stattdessen erfolgen die Steuerung der Pleuelltrajektorie und die Energieauskopplung durch die Integration eines Lineargenerators und einer Pleuellfeder. Daraus ergeben sich neue Freiheitsgrade hinsichtlich der Prozessführung der Verbrennung, da die Betriebsparameter Kompressionsverhältnis und Pleuellvolumen nicht mehr konstruktiv festgelegt werden müssen. Der schematische Aufbau einer Pleuellkolbeneinheit des FKLG ist in Abbildung 1 dargestellt.

Die Pleuellkolbeneinheit oszilliert zwischen dem Brennraum und dem gegenüberliegenden Pleuellraum der Pleuellfeder. Auf der linken Seite ist der Pleuellzylinder mit den für den Pleuellwechsel im Pleuellkopf integrierten Ventilen dargestellt. Durch Einsatz eines elektromagnetischen Pleuelltriebes können die Pleuellsteuerzeiten und

Ventilhubkurven unabhängig von der Kolbenposition definiert werden. Hierdurch gewinnt man ein großes Maß an Flexibilität zur Auslegung des Ladungswechsels.

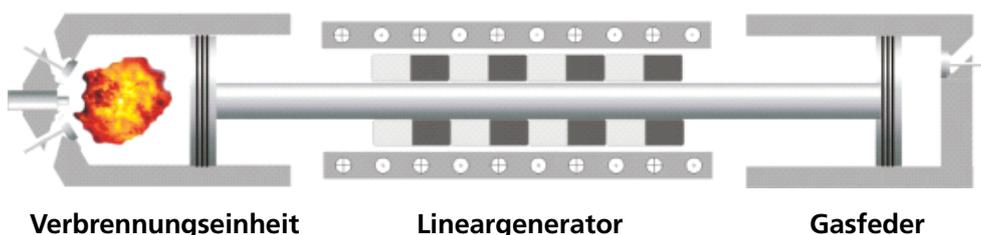


Abbildung 1: Schema des FKLK Konzeptes

Der Lineargenerator wandelt die kinetische Energie aus der Bewegung der Kolbeneinheit mit hohem Wirkungsgrad in elektrische Energie. Die Gasfeder dient der Zwischenspeicherung der Energie aus dem Verbrennungsprozess und bewirkt die Rückstellung des Kolbens in den oberen Totpunkt der Verbrennung.

In der untersuchten Ausführung des Motorenkonzeptes wird ein Zweitakt-Verfahren mit einer sogenannten Kopfumkehrspülung kombiniert. Bei Zweitakt-Motoren erreicht der Ladungswechselprozess typischerweise nicht die Effektivität eines Viertakt-Verfahrens mit Ausschleibe- und Ansaugtakt. In der Folge verbleiben heiße Verbrennungsgase im Brennraum, welche mit der einströmenden Frischluft vermischt werden. Dieses sogenannte Restgas ist für fremdgezündete Brennverfahren nur in begrenztem Maße von Vorteil. Für Brennverfahren mit homogener Selbstzündung sind hingegen größere Mengen Restgas erwünscht und tragen zur Stabilisierung des Verbrennungsprozesses bei.

Das hohe Potenzial von homogenen Selbstzündungsbrennverfahren (Homogeneous Charge Compression Ignition - HCCI) zur Darstellung eines verbrennungsmotorischen Betriebes mit hohem Wirkungsgrad und geringen Rohemissionen wurde durch zahlreiche Untersuchungen an konventionellen Motoren hinreichend belegt. Bei diesem Brennverfahren wird ein stark mit Luft oder Restgas verdünntes Kraftstoff-Luft-Gemisch im Zylinder bis zur Selbstzündung verdichtet. Üblicherweise werden dabei Abgase nach dem Verbrennungsprozess zurückgehalten beziehungsweise extern rückgeführt, und dem nachfolgenden Verbrennungszyklus zugeführt. Man spricht dabei auch von interner bzw. externer Abgasrückführung (AGR). Da im Gegensatz zum fremdgezündeten Betrieb kein direkt triggerbares Ereignis zur Steuerung der Verbrennungslage vorhanden ist, liegt eine wesentliche Herausforderung bei der Umsetzung von HCCI Verfahren in der Steuerbarkeit und Kontrolle des Verbrennungsprozesses. Durch die zusätzlichen Freiheitsgrade des FKLK Konzeptes wie variables Verdichtungsverhältnis, variabler Hub und Kolbenflugkurve ist es naheliegend den HCCI Verbrennungsprozess in dieser Anordnung zu untersuchen und die zusätzlichen Steuerungsmöglichkeiten zu nutzen.

Entwicklungsmethodik

Die methodische Vorgehensweise zur Realisierung eines HCCI Brennverfahrens in der FKLG Verbrennungseinheit basiert auf der Kombination von numerischer Simulation und experimentellen Untersuchungen. In einem ersten Schritt wurden hierzu chemisch-kinetische Modellrechnungen und 3-D CFD Simulationen der innermotorischen Prozesse durchgeführt. Diese wurden mit der Zielsetzung einer simulativen Auslegung der erforderlichen Verbrennungskomponenten (Zylinderkopf, Kolben) und der Bestimmung von HCCI Betriebsparametern erstellt. Nach erfolgreichem Abschluss dieser Arbeiten wurden sowohl die neue Zylinderkopf- als auch die Kolbengeometrie konstruktiv weiterentwickelt und gefertigt. In einem abschließenden Schritt folgten die Untersuchungen am FKLG Prüfstand und eine Validierung der Simulationsmodelle anhand von Messdaten. Nachfolgend wird auf die Entwicklungsarbeiten in den einzelnen Phasen eingegangen und die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt.

Ergebnisse der Forschungsarbeiten

Die Einleitung der Selbstzündung wird bei HCCI Brennverfahren wesentlich von chemisch-kinetischen Prozessen bestimmt. Der Zündvorgang erfolgt, wenn das Gemisch aus Kraftstoff, Luft und rückgeführten Verbrennungsgasen hinreichend lange auf einem hinreichend hohen Temperaturniveau gehalten wird. Die Zündung wird somit weitestgehend durch die Temperatur im Zylinder sowie die zugehörige Zündverzugszeit der Gasmischung bestimmt. Zur korrekten simulativen Abbildung dieser Prozesse wurde ein Ansatz gewählt, der die Berechnung der Zündverzugszeiten mit Hilfe eines detaillierten Reaktionsmodells am IVT-DLR vorsieht. Die Ergebnisse dieser Berechnungen fließen in das 3-D CFD Modell des FKFS ein, so dass eine große Effizienz hinsichtlich der Simulationszeit erreicht wird und trotzdem eine verlässliche Vorhersage von Zündort und Zündzeitpunkt erfolgt.

Als erste Maßnahme wurden verschiedene Modellkraftstoffe miteinander verglichen. Es zeigte sich, dass für die Fragestellungen dieses Projekts ein einziger repräsentativ ausgewählter Kohlenwasserstoff anstatt eines Gemischs aus vielen Kohlenwasserstoffen für die Simulationen eingesetzt werden kann. Folglich wurde n-Heptan als Modellkraftstoff für die kinetischen Berechnungen ausgewählt. Zur Auswahl eines geeigneten reaktionskinetischen Mechanismus wurden verschiedene am Institut für Verbrennungstechnik vorhandene Reaktionsmechanismen miteinander verglichen. Das institutseigene chemisch-kinetische Modell deckt den untersuchten Parameterbereich am besten ab und wurde deshalb für die Berechnungen ausgewählt. Dieser Mechanismus beschreibt die $n\text{-C}_7\text{H}_{16}$ Verbrennung mit 782 Reaktionen und 114 chemischen Spezies. Damit kann sowohl die Zündverzugszeit als auch die laminare Flammgeschwindigkeit innerhalb eines Temperaturbereichs von $T_0 = 670 - 1400$ K, eines Druckbereichs von $p_0 = 1 - 55$ bar und eines Äquivalenzverhältnisses von $\phi = 0,5 - 2,0$ bestimmt werden. Zur Berechnung von Zündverzugszeiten für einen weiten Temperatur- und Druckbereich bei entsprechendem Abgasrückführraten wurde ein Reaktormodell entwickelt. Dieses Modell

kombiniert zwei perfekt rückmischende Reaktoren mit einem Kolbenstrom-Reaktor und kann somit Gemische aus verdampftem Kraftstoff, Luft und rückgemischtem Abgas ideal abbilden.

Die mit diesen Modellen durchgeführten Untersuchungen zeigen einen deutlichen Einfluss der Abgasrückführung auf die Zündverzugszeit. Bei Temperaturen über 700 K führt die Erhöhung der AGR zu einer Verzögerung des Zündvorganges. Dies entspricht einer Erhöhung der Zündverzugszeit um einen Faktor von 1,2 bis 1,4. Bei Temperaturen unter 700 K bewirkt die Abgasrückführung hingegen eine Beschleunigung des Zündprozesses und damit eine verringerte Zündverzugszeit. In Bezug auf den Vergleichsfall ohne Abgasrückführung reduzierte sich die Zündverzugszeit um einen Faktor von 1,1 bis 1,5. Während der Einfluss des Kraftstoff-Luft-Verhältnisses eher gering ausfällt, hat das Druckniveau im gesamten untersuchten Temperaturbereich große Auswirkungen auf das Verhalten der Zündverzugszeit. Die erzielten Resultate wurden in Tabellenform aufbereitet und zur Integration in das CFD Modell bereitgestellt.

Die Simulation eines Zweitaktmotors mit Tellerventilen zur Steuerung des Ladungswechsels stellt besondere Anforderungen an die Modellierungsumgebung von strömungsmechanischen Berechnungswerkzeugen. Demzufolge musste das 3D CFD Softwarepaket *Quicksim* des FKFS an die Gegebenheiten der FKLG Verbrennungseinheit angepasst werden. Das daran anknüpfende Arbeitspaket umfasste zunächst die Simulation eines bestehenden Versuchsträgers, da hierfür experimentelle Messdaten zur Verfügung standen und somit eine Kalibration des CFD Modells ermöglicht wurde. Im Zuge dieser Untersuchungen wurde deutlich, dass eine erweiterte Simulationsdomäne einschließlich Einlass- und Auslassstrecke notwendig ist, um unabhängig von den Randbedingungen für verschiedene Geometrie-Konzepte vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Nach Abschluss dieser Kalibrationsphase wurde in Absprache mit den Projektpartnern ein erstes Zylinderkopfkonzep (Variante 1) mit zwei Einlass- und einem Auslassventil simulativ untersucht. Dabei wurden verschiedene Strategien zur Steuerung des Ladungswechsels überprüft, um zündfähige Bedingungen im Brennraum zu generieren. Am besten konnten HCCI Bedingungen durch einen Doppelhub des Einlassventiles erreicht werden. Dabei wird während der Expansionsphase das Einlassventil mit einem geringen Vorhub geöffnet, so dass Verbrennungsgase in der Einlassstecke vorgelagert werden. Beim anschließenden Haupthub gelangen diese Verbrennungsgase zusammen mit der Frischluft wieder in den Brennraum. Auf Basis dieses Grundkonzeptes wurden zahlreiche Simulationen zur Auslegung der Ventilsteuerzeiten durchgeführt, um definierte Restgasmengen im Brennraum zu erhalten. Anhand der Simulationsergebnisse konnte gezeigt werden, dass mit dieser Zylinderkopfgometrie und einem frühen Öffnen des Einlassventiles die erforderlichen hohen AGR Raten erreicht werden können und somit ein homogener Selbstzündungsbetrieb möglich ist.

Nach Diskussion dieser Ergebnisse unter den Projektpartnern wurde entschieden, die erarbeitete Geometrie konstruktiv weiterzuentwickeln und zu fertigen. Im Zuge der

Neukonstruktion des Zylinderkopfes wurde auch die Benzindirekteinspritzung grundlegend überarbeitet. Dementsprechend wurden im Anschluss CFD Simulationen zur Optimierung der Gemischbildung durchgeführt. Als Zielgrößen wurden dabei die Homogenisierung und die Leistungsabgabe bei verschiedenen Einspritzstrategien betrachtet. Als Ergebnis dieser Untersuchungen konnten konkrete Aussagen getroffen werden, welche Injektoreigenschaften günstig für die Gemischbildung im HCCI Betrieb sind. Dabei wurde die Kombination aus Sechslloch-Injektor mit einem Spraywinkel von 60° und reduziertem Einspritzdruck als die beste Konfiguration ermittelt.

Nach der grundsätzlichen Konzeption der Zylinderkopfgeometrie und der Erstellung von Flächenmodellen zur simulativen Untersuchung, erfolgt die Auskonstruktion der ausgewählten Zylinderkopfvariante am Institut für Fahrzeugkonzepte. Die wesentliche Herausforderung bestand dabei in der Integration aller erforderlichen Einzelbauteile wie Drucksensoren, Zünd- und Einspritzkomponenten in den begrenzten Bauraum. Gleichzeitig musste bei der Auslegung berücksichtigt werden, dass ein ausreichender Kühlwassermantel realisiert werden kann, um die Bauteilkühlung möglichst effizient zu gestalten. Gemeinsam mit Spezialisten aus der Aluminiumgusstechnik konnte eine gute konstruktive Lösung gefunden werden, die auch den kombinierten Fertigungsprozess von Sandgussverfahren und spanender Nachbearbeitung berücksichtigt. Parallel dazu wurde eine neue Kolbengeometrie entworfen, die an die geometrischen Gegebenheiten des entwickelten Zylinderkopfdaches angepasst ist. Sowohl Zylinderkopf als auch Kolbenkomponenten wurden entsprechend der Vorgaben gefertigt und konnten am Prüfstand erfolgreich in Betrieb genommen werden.

Ein wichtiger Meilenstein im Hinblick auf den Projektfortschritt war die Umsetzung der numerisch entwickelten Betriebsstrategie am Motorenprüfstand des Institutes für Fahrzeugkonzepte. Dabei wurde insbesondere der transiente Betrieb mit einer Umschaltung von fremdgezündeten auf HCCI-Betrieb untersucht. Hierzu erfolgte in einem ersten Schritt die grundlegende Überarbeitung der Steuerung des elektromagnetischen Ventiltriebes. In Zusammenarbeit mit dem Hersteller konnte die Funktionalität der Steuerung deutlich erweitert werden. Die wesentliche Herausforderung bestand dabei in der aktiven Umstellung der Ventilhubkurven im laufenden Betrieb, um den erforderliche Vorhub des Einlassventiles darstellen zu können. Weiterhin wurde eine Überwachung implementiert, die sowohl Ladedruck als auch Einspritzzeitpunkt und Einspritzdauer anpasst, sobald die Ventilhubkurven auf HCCI Betrieb umgestellt werden. Die Zündanlage wird gleichermaßen von dieser Überwachung deaktiviert. Alle experimentellen Untersuchungen im HomFree Projekt erfolgten am Verbrennungsprüfstand des FKLG. Dieser Prüfstand zeichnet sich durch ein zusätzliches hydraulisches Aktorsystem aus, so dass zu Entwicklungszwecken auch ohne Gasfeder und Lineargenerator Untersuchungen durchgeführt werden können.

Nach Überarbeitung der Ventilsteuerung konnte die simulativ entwickelte HCCI Betriebsstrategie am Prüfstand realisiert werden. Hervorzuheben ist dabei die realistische Vorhersage der Betriebsparameter durch die CFD Simulationen des FKFS. Hierdurch

wurden die Messungen am Prüfstand deutlich unterstützt, da ein stabiler HCCI Betriebspunkt mit diesen Parametern auch experimentell möglich war. Auch die am IFK-DLR entwickelte Steuerungsstrategie zur Umschaltung in den HCCI Betrieb ließ sich erfolgreich darstellen. Abbildung 2 zeigt eine CAD Darstellung des FKLG Prüfstandes einschließlich der Verbrennungskomponenten.

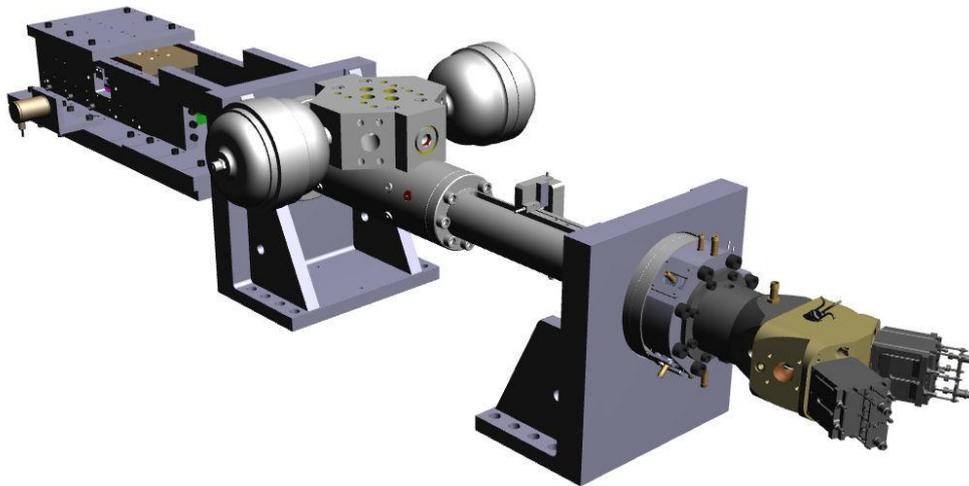


Abbildung 2: CAD Modell des FKLG Prüfstandes

Zusammenfassung

Zusammenfassend konnte im Rahmen des HomFree-Projektes nachgewiesen werden, dass ein homogener Selbstzündungsbetrieb mit den entwickelten Komponenten des Verbrennungsprüfstandes dargestellt werden kann. Die Betriebsstrategie mit einem frühen Öffnen des Einlassventiles und einem geringen Vorhub zeigt dabei eine Möglichkeit auf, die rückgeführte Abgasmenge kontrolliert einzustellen, um damit einen stabilen HCCI Betriebspunkt zu ermöglichen. Darüber hinaus konnte auch der transiente Betrieb mit Umstellung von Fremdzündung auf homogene Selbstzündung demonstriert werden. In Anbetracht der erzielten Ergebnisse kann die instituts- und einrichtungsübergreifende Zusammenarbeit im Rahmen des HomFree Projektes folglich als äußerst erfolgreich bezeichnet werden.