

Hajo Hoffmann

A Contribution to the Investigation of Internal Diesel Injector Deposits

**SHAKER
VERLAG**

OWI
Öl-Wärme-Institut
An-Institut der **RWTHAACHEN**

“A Contribution to the Investigation of Internal Diesel Injector Deposits”

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik
der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation
vorgelegt von **Dipl.-Ing.**

Hajo Hoffmann

aus Wiesbaden-Sonnenberg

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Herbert Pfeifer
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts

Tag der mündlichen Prüfung: 16.Februar 2018

Berichte aus der Verbrennungstechnik

Band 39

Hajo Hoffmann

**A Contribution to the Investigation
of Internal Diesel Injector Deposits**

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2018)

Copyright Shaker Verlag 2018

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5953-3

ISSN 1430-9629

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Preface

The present work was done during my occupation as a research engineer at OWI Oel-Waerme-Institut within the project „ENIAK“ („Entwicklung eines nichtmotorischen Injektorverkokungsprüfstands für alternative Kraftstoffe“, development of a non-engine diesel injector deposit test method for alternative fuels). This work was funded by the German Federal Ministry of Food, Agriculture and Consumer Protection (BMELV) through the FNR (“Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe”, Agency for Renewable Resources).

I specifically thank Prof. Dr.-Ing. Herbert Pfeifer for the support and mentoring of this PhD-Thesis.

At the same time, I thank Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts for his interest in and feedback on this work and the co-referate.

For the technical discussions around this topic I would like to thank my superior, Dr.-Ing. Klaus Lucka.

I furthermore thank Dr. Roy Hermanns for the discussions on the scientific approach on summarizing my findings and Christopher Francis Andersson, M. Sc. for his insights into the necessary technical English. Additional thanks belongs to Winfried Koch, M. Sc. for technical discussions and Kerstin Art, M. Sc. for valuable feedback regarding consistent layout.

I also would like to thank Dr.-Ing. Klaus Lucka and Mr. David Diarra as managing directors of OWI and TEC4FUELS for their support in the creation of this work and the diverse eclectic tasks provided to me during my time as a research engineer.

I finally thank all of the colleagues at OWI and TEC4FUELS for their support within the ENIAK project, and their willingness to constantly discuss topics regarding deposits within diesel injectors with me.

Aachen, April 2018

Abstract

Internal Diesel Injector Deposits (IDID) are acknowledged to be an important issue with regards to engine durability, customer satisfaction and emissions regulations. The knowledge about IDID, though, is still limited, despite research being done on a broad basis. Until now, only one chemical path leading to one type of IDID, the “sodium soap type”, has been identified. The influence of the general fuel composition on IDID is not fully investigated and understood yet. However, with the continuing fuel diversification the research and effort to obtain this knowledge must be continued in order to avoid the occurrence of IDID. Two technical factors generally agreed upon to be of importance in the occurrence of engine failures due to IDID are increasing temperatures and lower clearings within the injector. Due to current engine development trends with ever increasing injection pressures, these two factors will probably continue to develop into critical areas. The development of test methods to investigate IDID does not proceed as fast as the technological progress in injection technology. While there were many research projects about IDID performed, there was no industrial standard engine test available for the investigations. Instead, numerous investigations were performed using different engines and different testing conditions. A methodological approach to generate a broad data basis is hard to pursue under these conditions.

A solution to this situation might be the use of injector test benches, where complete fuel systems of common rail engines are operated outside an engine and without combustion. Since the injector’s interior does not come into contact with the combustion directly, this is a suitable method to investigate IDID. The present work describes the design and setup of such an injector test bench, the “ENIAK” test bench. This test bench was developed and assembled in the scope of the present work. The test bench was also used to perform several tests investigating IDID. This work furthermore contains a discussion on the aspects influencing the occurrence of IDID. Both measurements performed with the test bench and published data are used for the analysis of IDID.

The main result of this is the identification of each technical, chemical, and physical aspects being important for the occurrence of injector malfunctions caused by IDID. The technical aspects include the thermal distribution within the injector as a factor in the formation of IDID, and the resilience of the injector as a whole system against

malfunctions due to the presence of IDID. It was furthermore shown, that chemical aspects are of key importance as well. The same injector type was operated under the same conditions both with a base fuel and with a fuel which was doped with an agent promoting the formation of metal carboxylates (“sodium soaps”). The injectors operated with the doped fuel showed significantly more signs of malfunction due to IDID. Regarding the physical aspects, the temperature was identified to be the most important aspect. It was shown that the increasing rail pressure also has a direct influence on chemical reactions. However, the most important influence is the resulting temperature increase.

The discussion concludes with an assessment of the developed test bench and test method. This assessment includes both benefits and drawbacks in the use of injector test benches compared to engine tests generally and for the “ENIAK” test bench specifically. The main drawback is the lack of the combustion as an indirect albeit easy measurable indicator for the injector’s proper function. The main benefit is the ability of setting repeatable test conditions for the injector without the need of these conditions to suit engine combustion and without the combustion influencing these conditions in return. The secondary benefit is the low demand of the test bench on the local infrastructure and the low fuel consumption.

Kurzfassung

Ablagerungen im Injektorinneren von Common Rail Injektoren (IDID, Internal Diesel Injector Deposits) werden allgemein als ein wichtiger Faktor hinsichtlich Motorlebensdauer, Kundenzufriedenheit und der Einhaltung von Emissionsvorschriften angesehen. Das Wissen über und Verständnis von IDID ist jedoch, trotz umfangreicher Forschungsanstrengungen, nach wie vor begrenzt. Bislang wurde nur ein chemischer Bildungspfad, der zur Bildung der so genannten „Natriumseifen-IDID“ führt, vollständig identifiziert und nachvollzogen. Der Einfluss der Kraftstoffzusammensetzung ist hingegen noch nicht umfassend untersucht und verstanden worden. In Hinblick auf die aktuell fortschreitende Kraftstoffdiversifikation dürfte die Erlangung dieses noch fehlenden Verständnisses jedoch ein wichtiger Faktor in der Vermeidung des Auftretens von IDID werden. Zwei technische Faktoren, die allgemein als wichtig im Auftreten von durch IDID verursachten Betriebsstörungen angesehen werden, sind geringe Spaltmaße und steigende Temperaturen im Injektorinneren. Diese werden sich zukünftig durch die fortschreitende Motorentwicklung hin zu weiter steigenden Einspritzdrücken voraussichtlich dementsprechend ebenfalls weiter in kritische Bereiche hinein entwickeln. Die Entwicklung von Testmethoden zur Untersuchung von IDID schreitet langsamer voran als der technische Fortschritt in der Einspritztechnologie. Viele Forschungsprojekte hinsichtlich IDID wurden durchgeführt während kein standard-Motortest verfügbar war. In der Folge wurde eine Vielzahl von Forschungsprojekten unter Verwendung unterschiedlicher Motoren und unterschiedlicher Versuchsbedingungen durchgeführt. Einen methodischen Ansatz zur Generierung einer breiten Datenbasis zu verfolgen ist unter diesen Bedingungen schwer realisierbar.

Eine Lösung dieser Situation könnte der Einsatz von Injektorprüfständen sein, bei denen der komplette kraftstoffführende Strang eines Common Rail Aggregats außerhalb des Motors ohne Verbrennung betrieben wird. Da das Injektorinnere nicht in direktem Kontakt mit der Verbrennung steht, ist dies eine geeignete Methode zur Untersuchung von IDID. Die vorliegende Arbeit beschreibt die Auslegung und die Charakteristika eines solchen Prüfstands, des so genannten „ENIAK“-Prüfstands. Der Prüfstand wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und aufgebaut.

Er wurde zur Durchführung mehrerer Versuchsreihen über IDID genutzt. Die Arbeit enthält ferner eine Diskussion der Einflüsse auf die Bildung von IDID. Hierfür werden sowohl Messungen, die an dem Prüfstand durchgeführt wurden, als auch veröffent-

lichte Daten verwendet. Wesentliches Ergebnis dieser Diskussion ist die Erkenntnis, dass sowohl technische, als auch chemische, als auch physikalische Einflüsse gleichermaßen wichtig für das Auftreten von Funktionsstörungen des Injektors durch IDID sind. Die technischen Aspekte beinhalten sowohl die sich einstellende Temperaturverteilung im Injektor als auch die bauartabhängige Widerstandsfähigkeit des Injektors gegen die Auswirkungen von IDID. Ferner wurde gezeigt, dass chemische Aspekte ebenfalls eine wichtige Rolle spielen. Der gleiche Injektortyp wurde unter den gleichen Versuchsbedingungen sowohl mit einem Basiskraftstoff als auch mit einem Zusatz, der die Bildung von Metallcarboxylaten („Natriumseifen“) begünstigt, betrieben. Die Injektoren, die mit dem Zusatz betrieben wurden, wiesen deutliche ausgeprägtere Zeichen von durch IDID verursachte Funktionsstörungen auf. Hinsichtlich der physikalischen Aspekte wurde die Temperatur als wichtigster Faktor identifiziert. Es wurde gezeigt, dass auch der Druckanstieg einen direkten Einfluss auf die Bildung innerer Ablagerungen hat, der weitaus wichtigere Faktor jedoch die resultierende Temperaturerhöhung ist.

Die Arbeit schließt mit einer Bewertung des Prüfstands und der zugehörigen Prüfmethode ab. Diese Bewertung beinhaltet sowohl die Vor- als auch die Nachteile von Injektorprüfständen allgemein und speziell des EINAK Prüfstands gegenüber Motorentests. Der wesentliche Vorteil ist die Möglichkeit, dem Injektor, reproduzierbare Versuchsbedingungen aufzuprägen, ohne dass diese Bedingungen zwingend eine motorische Verbrennung ermöglichen müssen oder von der Verbrennung unkontrolliert beeinflusst werden. Ein weiterer Vorteil sind die geringen Anforderungen des Prüfstands an die lokale Infrastruktur und der geringe Kraftstoffbedarf. Der wesentliche Nachteil ist die Absenz der motorischen Verbrennung als indirekter, aber einfach zu messender Indikator für die Injektorfunktion

Symbols and Abbreviations	vii
Symbols	vii
Abbreviations.....	vii
1 Introduction.....	1
1.1 General Situation	1
1.2 Problem Description and Motivation	3
1.3 Description of the Scope of this Work	5
2 State of the Art.....	7
2.1 Injection Technology	7
2.2 External Diesel Injector Deposits	11
2.3 Internal Diesel Injector Deposits: Physical-Chemical Aspects	13
2.4 General Influences on Deposit Formation	19
2.5 Engine Tests.....	23
2.6 Non-Engine Injector Test Benches.....	30
3 Test Setup and Test Bench Design	35
3.1 Common Rail System	37
3.2 Design of the Injection Vessel.....	37
3.3 Test Bench Infrastructure.....	38
3.4 Flow Chart and Function of the Test Bench	39
3.5 Location of the Temperature Measurements and their Description.....	41
3.6 Accuracy of the Set Points and the Measurements	43
3.7 Test Cycle.....	47
3.8 Measurement Program	49
4 Test Plan and Methodology of the Evaluation of the Test Results.....	51
4.1 Test Campaigns.....	51
4.2 Analysis of the injector's function	52
4.3 Evaluation of Injection Rate Measurements: General Considerations	55
4.4 Evaluation of the Injection Rate Measurements within this Work.....	55
5 Test Results and Discussion.....	57
5.1 Internal Diesel Injector Deposits: General Technical Aspects.....	57
5.2 Heat Distribution in the Injector	64
5.3 Assessment of the Test Bench and the Test Method	76
5.4 Limits of the Test Bench and Suggested Improvements of the Test Method	82
6 Summary and Conclusion.....	91
Appendix	95
A1: Estimation of the Fuel Heating due to the Actuation of the Solenoid Valve	95
A2: Logged raw data of the set values.....	97

A3: Overview Tests and Results.....	98
A4: Flow Rate Measurements (performed externally).....	99
Literature.....	129
Curriculum Vitae.....	143