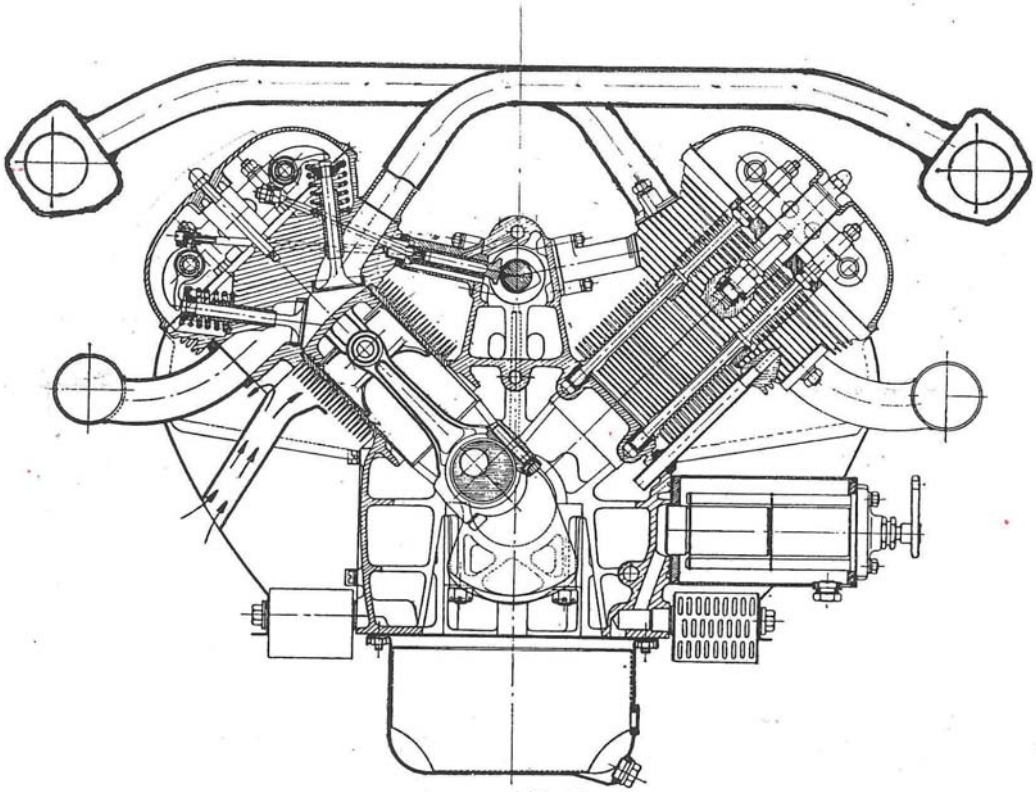
Ladungswechselprozesse bei Verbrennungsmotoren

- Optimierung der Füllungsvorgänge
- Gestaltung der Ansauganlagen

Tomas Rozsas
Robin Vanhaelst



Ladungswechselprozesse bei Verbrennungsmotoren

- Optimierung der Füllungsvorgänge
- Gestaltung der Ansauganlagen

Rozsas, T. Vanhaelst, R.

Berichte aus der Strömungstechnik

Tomas Rozsas,
Robin Vanhaelst

Ladungswechselprozesse bei Verbrennungsmotoren

- Optimierung der Füllungsvorgänge
- Gestaltung der Ansauganlagen

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Dr.-Ing. habil. Tomas Rozsas

Ehem. Fachreferent der Motorenvorentwicklung der Volkswagen AG

Dozent an der TU-Bratislava, HAW Hamburg und Ostfalia, HAW

Prof. Dr.-Ing. habil. Robin Vanhaelst

Professur für Fahrzeugthermodynamik und alternative Antriebe an der Fakultät

für Fahrzeugtechnik, Ostfalia, Hochschule für angewandte Wissenschaften,

Campus Wolfsburg

Copyright Shaker Verlag 2017
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5479-8
ISSN 0945-2230

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort und Zielsetzung

Der Ladungswechsel des Verbrennungsmotors beeinflusst Drehmoment, Leistung, Kraftstoffverbrauch, Abgasqualität und Laufverhalten. Prinzipiell ist der Ladungswechsel so zu gestalten, dass eine möglichst geringe Energie dafür angewendet werden muss und so der Kraftstoffverbrauch sowie der CO_2-Ausstoß reduziert werden können. Dazu sind ein strömungsgünstiger Verlauf der Ansaug- und Auslasswege notwendig. Die strömungsidealen Gestaltungsformen der Saug- und Auslassanlagen können jedoch wegen knappen Einbauraumangebots im Fahrzeug nicht immer voll umgesetzt werden (beispielsweise tiefliegendes Motorhaubendesign, Montagemanagement, crashbedingte Sicherheitsabstände, Motorerschütterungen, Zugang zu den Motorkomponenten u.a.). Die Anpassung des Motors im Fahrzeug führt oft zu Kompromisslösungen und Formkorrekturen der optimalen Ansaugstrecke, die zusätzliche Strömungsverluste verursachen. Das Maximum der Füllung wird in der Regel bei einer Drehzahl erreicht, die mit den Strömungsverlusten und Druckwandlungen im Einlasskanal zusammenhängt. Mit der größten Druckamplitude, die sich in einem günstigen Zeitpunkt am Ventil bildet, wird die höchste Füllung erreicht. Diese Konstellation entsteht durch den Effekt der Druckwellen und wird hauptsächlich mit der Geometrie der Saugrohre beeinflusst, die direkt an die Einlasskanäle angeschlossen sind.

Dieses Buch beschäftigt sich mit der Analyse der Druckwellen und stellt eine Methode vor, die bei der Konzipierung und Optimierung der Ansauganlagen der Fahrzeugmotoren relevant ist (Kapitel 3). Kapitel 4 präsentiert diesbezüglich Beispiele der Auslegungsverfahren sowie die Konstruktion und Erprobung unterschiedlich konzipierter Ansauganlagen unter Berücksichtigung der Einbaubegrenzungen im Fahrzeug. Dasselbe Kapitel behandelt auch die Auswirkungen der Druckwellen in der Abgasanlage auf den Füllungsprozess. Das Funktionsprinzip der Sauganlagen mit variabler Geometrie und variablen Ventilsteuerzeiten erläutert das Kapitel 4 bzw. 5. Beide Systeme ermöglichen die Erweiterung der Drehmomentcharakteristiken im Drehzahlbereich der Motoren. Die Auswirkung der Aufladung auf die Druckwellenbildung wird im Kapitel 6 vorgestellt. Eine gute Gemischqualität und ein effektiver Verbrennungsablauf werden mit einer intensiven Ladungsbewegung im Zylinder gesichert. Die Erzeugung solcher Strömungen erfolgt im Allgemeinen mit Hilfe der sog. tangential- bzw. spiralförmigen Kanälen, die die Frischgase entweder schräg-, gerade-asymmetrisch oder drehend in den Zylinder hineinführen. Mit der Konzipierung und Optimierung derartiger Kanalgestaltungen befasst sich Kapitel 7. Beispiele von diversen Sauganlageausführungen präsentieren die Bilder 156 bis 167. Die vielfältigen optimalen Konzeptionen der relativ langen Saugrohrkonstruktionen sind zu den Einbaumöglichkeiten im Fahrzeug angepasst.

Die kleingedruckten Textpassagen im Buch dienen der Erörterung von jeweiligen Zusammenhängen und Umständen. Der Leser kann sie als erweiterte Klärung- und Nachweissubstanzen verstehen.

Die in mehreren Jahrzehnten erfolgreich laufenden Vorlesungen über die Ladungswechselvorgänge von Verbrennungsmotoren an den Hochschulen für angewandte Wissenschaften in Hamburg und Wolfsburg haben uns ermutigt, dass Vorlesungsmanuskript zu erweitern und dieses als Buch herauszugeben. Das Buch wendet sich in erster Linie an Motoringenieure und interessierende Studenten, die über die vielfältigen Probleme der Ladungswechsel unterrichtet werden wollen. Das Buch befasst sich nicht mit den präzisen Berechnungen der Strömungsvorgänge im gesamten Rohrsystem, sondern mit der strategischen Konzipierung der Sauganlagen. Die bedeutungsvollen Saugrohrdimensionen werden hier mit einer relativ einfachen Methode annähernd an das Optimum rasch ermittelt. Das Verfahren wurde nach genauer Druckwellenanalyse in den Saugrohren zusammengestellt und erprobt. Im Mittelpunkt steht dabei die Gesamtoptimierung, d.h. eine sinnvolle Balance zwischen Minimierung der Strömungsverluste und Einbautauglichkeit der Anlage im Fahrzeug (Package).

Herzlichen Dank möchten wir Herrn Dipl.-Ing. Bernhard Emmel und Judit Rozsas aussprechen, die das Manuskript gelesen haben. Sie haben nicht nur Fehler korrigiert, sondern uns auch einige Hinweise auf eine bessere Darstellung gegeben, wobei das Schreiben in Reinschrift in den Händen von Judit Rozsas lag. Die digitale Ausführung der Zeichnungsvorlagen und das Schreiben der Gleichungen danken wir Herrn Silas Gitt, Herrn Stewen Pleines, Herrn Lukas Ahlbrecht und Herrn Jannes Schmidt. Schließlich haben wir dem Shaker Verlag für wichtige Anhaltspunkte in der Realisierung und für die Ausgestaltung des Buches zu danken.

Wolfsburg, September 2017

Rozsas, Tomas
Vanhaelst, Robin

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG 1

2 ZUSAMMENHANG ZWISCHEN FRISCHGASFÜLLUNG UND DREHMOMENT 2

3 FÜLLUNGS- UND ENTLEERUNGSPROZESSE 7

3.1 Entstehung, Bewegung und Wirkung der Druckwellen 8

3.1.1 Einlassvorgang, Druckwellenbildung 8

3.1.2 Auslassvorgang, Druckwellenbildung 39

4 LADUNGSWECHSELVORGÄNGE BEI MEHRZYLINDERMOTOREN 46

4.1 Ansauganlagen 46

4.1.1 Auslegungsbeispiele der Ansauganlagen 62

4.1.2 Entwurf einer Ansauganlage 64

4.2 Beeinflussung der Füllungsprozesse durch die Abgasanlage 84

4.3 Variable Ansauganlagen 92

4.3.1 Längeschaltung der Schwingrohre 92

4.3.2 Querschnittschaltung der Schwingrohre 101

4.3.3 Gruppenschaltung der Schwingrohre 108

5 VARIABLE VENTILSTEUERUNG 112

6 AUFLADUNG 123

7 LADUNGSBEWEGUNG 137

7.1 Entstehung der Ladungsbewegung im Zylinder 137

7.2 Messmethoden zur Bestimmung der Drallzahl 158

7.2.1 Tippelmann Strömungsprüfstand 158

7.2.2 Drallmessungen mit einem Schaufelrad 160

7.2.3 Definition der Ventildurchflusszahlen 162

7.2.4 Drallmessungen mit PIV 163

7.2.5 Das Prinzip von Teilchengeschwindigkeiten (PIV) 163

7.2.6 Drallmessungen an einem optisch zugänglichen Motor 164

7.3 Analyse und Optimierung der Drallströmung bei DI Dieselmotoren **168**
7.3.1 Beeinflussung der Drallströmung durch eine Drallklappe 168
7.3.2 Einfluss der Kolbenbodengeometrie auf den Drall im Zylinder 173
7.3.3 Einfluss einer Drallphase am Ventilsitz 175

ANHANG **180**

FORMELZEICHEN **195**

LITERATURVERZEICHNIS **207**

ABBILDUNGSVERZEICHNIS **221**