

Rainer Golloch

Downsizing bei Verbrennungsmotoren

Rainer Golloch

Downsizing bei Verbrennungsmotoren

Ein wirkungsvolles Konzept zur
Kraftstoffverbrauchssenkung

Mit 220 Abbildungen

Dr.-Ing. habil. Rainer Golloch
MTU Friedrichshafen GmbH
Maybachplatz 1
88045 Friedrichshafen
golloch@t-online.de

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

ISBN 3-540-23883-2 Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk- sendung, der Mikroverfilmung oder Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Da- tenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. Sep- tember 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwi- derhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005
Printed in The Netherlands

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch be- rechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jeder- mann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die ei- genen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzu- zuziehen.

Einbandgestaltung: medionet AG, Berlin
Satz: Digitale Druckvorlage des Autors
Herstellung: medionet AG, Berlin

Vorwort

Der Verbrennungsmotor wird sich aufgrund seiner hohen Leistungsdichte, des zuverlässigen Betriebs und seiner flexiblen Einsatzmöglichkeiten, seines günstigen Emissionsverhaltens und nicht zuletzt durch die bestehende Infrastruktur zur Kraftstoffversorgung auch in den nächsten beiden Jahrzehnten als wichtigste Antriebsquelle für die unterschiedlichsten Anwendungen behaupten können. Die Anforderungen, die zukünftige Verbrennungsmotoren erfüllen müssen, werden jedoch deutlich umfangreicher und erfordern neue Lösungsansätze. Neben der Unterschreitung der gesetzlich vorgegebenen Schadstoffgrenzwerte gewinnt das Thema Kraftstoffverbrauch aufgrund steigender Rohölpreise und hoher Besteuerung zunehmend an Bedeutung.

Ein wirkungsvolles Konzept zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs bei Verbrennungsmotoren stellt das sogenannte Downsizing dar. Die diesem Maßnahmenpaket zu Grunde liegenden Mechanismen sind zwar seit langem bekannt, sie waren jedoch lange Zeit nur sehr eingeschränkt nutzbar. Die weitgehende Ausschöpfung der theoretischen Verbrauchspotenziale durch Downsizing ist eng mit der Entwicklung des Verbrennungsmotors und seiner Subsysteme an sich gekoppelt und erfordert sehr anspruchsvolle und komplexe Technologiebausteine. Eine weitreichende Beschreibung der zu einem Downsizing-Konzept gehörenden Technikbestandteile und Charakteristiken hat es bis dato nicht gegeben und war daher Anlass zur Erstellung dieser Arbeit.

Das vorliegende Buch entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Oberingenieur am Institut für Technische Verbrennung (ITV), Fachbereich Maschinenbau, der Universität Hannover und basiert auf meiner Habilitationsschrift, die ich zur Erlangung der Lehrbefugnis für das Fachgebiet Verbrennungsmotoren angefertigt habe.

Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Günter P. Merker, dem Leiter und Vorstand des Instituts, gilt mein besonderer Dank für die stets angenehme, vertrauensvolle und sehr lehrreiche Zusammenarbeit sowie für die fachliche Begleitung und Begutachtung der Arbeit. Ich danke ihm darüber hinaus für die stetige Förderung und Unterstützung, die mir im Laufe unserer siebenjährigen Zusammenarbeit am Institut für Technische Verbrennung zuteil wurde.

Herzlich danken möchte ich auch Herrn Professor Dr.-Ing. Ulrich Spicher, dem Leiter des Instituts für Kolbenmaschinen der Universität Karlsruhe (TH) sowie Herrn Professor Dr.-Ing. Ulrich Seiffert, Geschäftsführer der WiTech Engineering GmbH, Braunschweig, für das Interesse an der Arbeit und die Mitwirkung als Gutachter im Rahmen des Habilitationsverfahrens.

Allen Kollegen und Mitarbeitern des ITV, die mir bei der Durchführung der Untersuchungen geholfen und zum Gelingen des Buches beigetragen haben, sei ebenfalls gedankt.

Meiner lieben Frau Audrey, die mich während der Erstellung dieses Buches in jeder Hinsicht unterstützt hat und mir mit viel Geduld und Verständnis zur Seite stand, möchte ich ganz besonders danken. Ihr und unseren beiden Kindern Lisa und Luis ist dieses Buch gewidmet.

Behringen, im Dezember 2004

Rainer Golloch

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	IX
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Energieumsetzung im Verbrennungsmotor	3
2.1 Einzelprozesse motorischer Energiewandlung	3
2.1.1 Energiebilanz und Wirkungsgradkette.....	3
2.1.2 Zündung und Flammenausbreitung	6
2.1.3 Verbrennung	12
2.1.4 Wärmefreisetzung und Wärmetübergang	20
2.1.5 Schadstoffbildung und –reduzierung.....	24
2.1.6 Ladungswechsel und Ladungsbewegung.....	33
2.2 Vergleichsprozesse.....	42
2.2.1 Gleichraum-Prozess.....	45
2.2.2 Seiliger-Prozess	49
2.3 Verlustanalyse	52
2.3.1 Art und Entstehung der Einzelverluste	54
2.3.2 Verlustanalyse von Otto- und Dieselmotoren.....	62
3 Downsizing	67
3.1 Grundlagen.....	67
3.2 Statisches und Dynamisches Downsizing	75
3.2.1 Reduzierung des Motorhubvolumens	75
3.2.2 Mitteldrucksteigerung.....	76
3.2.3 Dynamisches Downsizing durch Zylinderabschaltung.....	78
3.3 Wirkungsmechanismen	82
3.4 Problembereiche hochaufgeladener Motoren	91
3.4.1 Anfahrtdrehmoment und dynamisches Verhalten.....	92
3.4.2 Die Klopfproblematik beim Ottomotor	97
3.4.3 Thermische und mechanische Motorbelastung.....	102
3.4.4 Akustik und Schwingungskomfort	103
3.5 Verbrauchspotenziale	104
3.5.1 Einflussparameter und Verbrauchsszenarien	104
3.5.2 Vergleich unterschiedlicher Motorkonzepte.....	107

3.6 Fahrzeugseitige Betrachtungen	122
3.6.1 Package.....	122
3.6.2 Getriebekonzepte.....	125
3.6.3 Hybride Antriebssysteme.....	134
3.7 Kennwerte heutiger Verbrennungsmotoren.....	138
3.7.1 Pkw-Otto- und –Dieselmotoren.....	139
3.7.2 Dieselmotoren für andere Anwendungen (Nutzdieselmotoren) ...	143
4 Relevante Subsysteme und Prozesse	147
4.1 Aufladung.....	147
4.1.1 Aufladetechnische Grundlagen.....	148
4.1.2 Mechanische Aufladung.....	168
4.1.3 Abgasturboaufladung.....	169
4.1.4 Verfahren zur Hochaufladung	185
4.2 Variabilitäten und Prozesssteuerung	212
4.2.1 Abgasrückführung	212
4.2.2 Variable Ventilsteuerung.....	219
4.2.3 Variable Verdichtung	230
4.3 Gemischaufbereitung und Verbrennung.....	235
4.3.1 Grundlagen	236
4.3.2 Ottomotorische Hochlast-Brennverfahren.....	256
4.3.3 Dieselmotorische Hochlast-Brennverfahren.....	277
4.4 Motormechnik und Wärmehaushalt	288
4.4.1 Mechanische und tribologische Grundlagen.....	290
4.4.2 Beanspruchung und Anpassung der Motorkomponenten.....	305
4.4.3 Nebenaggregate und Wärmehaushalt	317
5 Zusammenfassung und Ausblick.....	323
Literaturverzeichnis.....	327
Sachverzeichnis	341

Nomenklatur

Abkürzungen

ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles
AG	Automatikgetriebe
AGR	Abgasrückführung
AÖ	Ventilsteuerzeit Auslass-Öffnet
AS	Ventilsteuerzeit Auslass-Schließt, Arbeitsspiel
ASG	Automatisiertes Schaltgetriebe
ATL	Abgasturbolader
BDE	Benzin-Direkteinspritzung
CAI	Controlled Auto Ignition
CO	Kohlenmonoxid
COV	Coefficient of Variance
C	Kohlenstoff
CR	Common-Rail (-Einspritzsystem)
CVT	Continuously Variable Transmission
DI	Direct Injection
DISI	Direct Injection Spark Ignition
DKG	Doppelkupplungsgetriebe
DOD	Displacement on Demand
EAT	Electrically Assisted Turbocharger
EB	Einspritzbeginn
EBS	Electric Boosting System
EGR	Emission Gas Recirculation
EHVT	Elektrohydraulischer Ventiltrieb
ELR	European Load Response
EMVT	Elektromechanischer Ventiltrieb

EÖ	Ventilsteuerzeit Einlass-Öffnet
ES	Ventilsteuerzeit Einlass-Schließt
ESC	European Stationary Cycle
ETC	European Transient Cycle
EU	Europäische Union, Elektrisch unterstützt
FAS	Ventilsteuerstrategie Frühes-Auslass-Schließt
FEÖ	Ventilsteuerstrategie Frühes-Einlass-Öffnet
FES	Ventilsteuerstrategie Frühes-Einlass-Schließt
GDI	Gasoline Direct Injection
GGG	Sphäroguss
GGV	Vermiculargraphitguss
GJL	Lamellarer Grauguss
GJV	Vermiculargraphitguss
H	Wasserstoff
HC	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition
HCF	High Cycle Fatigue
HD	Hochdruck
HSG	Handschaftgetriebe
ITZ	Integrale Tumble-Intensität
KSM	Kennfeldstabilisierende Maßnahme
KSG	Kurbelwellen-Starter-Generator
KW	Kurbelwinkel, Kurbelwelle
LCF	Low Cycle Fatigue
LLK	Ladeluftkühler
LTV	Lufttaktventil
LW	Ladungswechsel
LWOT	Oberer Totpunkt im Ladungswechseltakt
MPI	Multi Point Injection
NA	Nebenaggregate, Naturally Aspirated
ND	Niederdruck
NEDC	New European Driving Cycle
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus

Nfz	Nutzfahrzeug
NO _x	Stickoxide
NVH	Noise, Vibration and Harshness
O	Sauerstoff
OEM	Original Equipment Manufacturer
OT	Oberer Totpunkt
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
PFI	Port Fuel Injection
PD	Pumpe-Düse (-Einspritzsystem)
Pkw	Personenkraftwagen
PVD	Physical Vapor Deposition
ROZ	Research Oktanzahl
SAE	Society of Automotive Engineers
SAS	Ventilsteuerstrategie Spätes-Auslass-Schließt
SEÖ	Ventilsteuerstrategie Spätes-Einlass-Öffnet
SES	Ventilsteuerstrategie Spätes-Einlass-Schließt
SG	Startergenerator
SRE	Saugrohreinspritzung
STC	Sequential Turbo Charging
UT	Unterer Totpunkt
UV	Ultraviolett
VB	Verbrennungsbeginn
VCR	Variable Compression Ratio
VNT	Variable Nozzle Turbine
VST	Variable Schieberturbine
VTG	Variable Turbinengeometrie
VÜ	Ventilüberschneidung
VVT	Variable Valve Train
ZAS	Zylinderabschaltung
ZKG	Zylinderkurbelgehäuse
ZOT	Oberer Totpunkt im Verbrennungstakt
ZZP	Zündzeitpunkt

Formelzeichen

A	Faktor [-], Fläche [m^2]
B	Faktor [-]
b_e	spezifischer, effektiver Kraftstoffverbrauch [g/kWh]
b_i	spezifischer, indizierter Kraftstoffverbrauch [g/kWh]
c	Kohlenstoff-Massenanteil eines Brennstoffes [-], absolute Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
c_m	mittlere Kolbengeschwindigkeit [m/s], Meridiankomponente der Absolutgeschwindigkeit [m/s]
c_p	spezifische, isobare Wärmekapazität [kJ/kgK]
c_v	spezifische, isochore Wärmekapazität [kJ/kgK]
c_u	Umfangskomponente der Absolutgeschwindigkeit [m/s]
c_W	Luftwiderstandsbeiwert [-]
d	Durchmesser [m]
D	Bohrung [m]
F	Kraft [N]
F_M	Massenkraft [N]
F_{Gas}	Gaskraft [N]
h	spezifische Enthalpie des Abgases [kJ/kg], Schmierstalthöhe [m] Wasserstoff-Massenanteil eines Brennstoffes [-]
h^+	spezifische Totalenthalpie [kJ/kg]
H_G	Gemischheizwert [kJ/m^3]
H_u	Unterer Heizwert [kJ/kg]
i	Anzahl der Arbeitsspiele pro Kurbelwellenumdrehung [-] Übersetzungsverhältnis [-]
j_{ij}	Spezifische Dissipationsenergie [
K	Faktor [-], Stoffkonstante [-]
l_p	Pleuellänge [m]
L_{min}	Mindestluftbedarf [-]
M	Molmasse [kg/kmol], Drehmoment [Nm]
m	Masse [kg]
\dot{m}	Massenstrom [kg/s]

n	Motordrehzahl [1/min], Stoffmenge [mol]
o	Sauerstoff-Massenanteil eines Brennstoffes [-]
P	Leistung [kW]
P_e	Effektive Leistung [kW]
P_i	Innere oder indizierte Leistung [kW]
P_R	Reibleistung bzw. mechanisch bedingter Leistungsverlust [kW]
P_{reib}	Verlustleistung durch Motorreibung [kW]
P_v	Leistung des Vergleichsprozesses [kW]
p	Druck [bar]
p^+	Totaldruck [bar]
p_{me}	effektiver Mitteldruck [bar]
p_{mi}	indizierter Mitteldruck [bar]
p_{mr}	Reibmitteldruck [bar]
p_{max}	Maximaler Zylinderdruck oder Zünddruck [bar]
q	spezifische Wärme [kJ/kg]
q^*	dimensionslose Wärmezufuhr [-]
Q	Wärme [kJ]
Q_B	durch Verbrennung eines Brennstoffes freigesetzte Wärme [kJ]
Q_H	Heizwärme [kJ]
Q_{hydr}	Hydraulischer Durchfluss einer Einspritzdüse [cm ³] (Einspritzdruck 100 bar, Zeitdauer 30 s)
Q_W	Wandwärme [kJ]
r	Radius [m]
R	spezifische Gaskonstante [kJ/kgK]
R_{3z}	Grundrautiefe [μm]
s	spezifische Entropie [kJ/kgK], Hub [m]
t	Zeit [s]
T	Thermodynamische Temperatur [K]
u	spezifische innere Energie [kJ/kg], Messunsicherheit [-] Umfangskomponente der Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
U	innere Energie [kJ]
v	spezifisches Volumen [m ³ /kg], Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
V	Volumen [m ³]

\dot{V}	Volumenstrom [m^3/s]
V_c	Kompressionsvolumen [m^3]
V_h	Zylinderhubvolumen [m^3]
V_H	Motorhubvolumen [m^3]
w	Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
W	Arbeit [kJ]
w_t	spezifische technische Arbeit [kJ/kg]
x	Kolbenweg [m], Anzahl der C-Atome eines Brennstoffes [-], Raumkoordinate
x_A	Abgasgehalt [-]
x_{AGR}	Abgasrückführrate [-]
y	Kolbenweg [m], Anzahl der H-Atome eines Brennstoffes [-], Raumkoordinate
z	Zylinderzahl [-], Anzahl der O-Atome eines Brennstoffes [-], Raumkoordinate

Griechische Buchstaben

α	Wärmeübergangskoeffizient [$\text{W/m}^2\text{K}$]
β	Winkel [$^\circ$]
γ_{DS}	Downsizing-Grad
δ	Geschwindigkeitsfunktion
δ_A	Aufladegrad [-]
Δ	Differenz
$\Delta\eta$	Wirkungsgraddifferenz [-]
ε	Verdichtungsverhältnis (geometrische Verdichtung) [-]
ε_φ	Entspannungsgrad [-]
ζ	Spreizung
η	Wirkungsgrad [-], dynamische Viskosität [Ns/m^2]
η_e	effektiver Wirkungsgrad [-]
η_g	Gütegrad [-]
η_i	innerer Wirkungsgrad [-]
η_m	mechanischer Wirkungsgrad [-]

η_v	Wirkungsgrad des Vergleichsprozesses [-]
κ	Isentropenexponent [-]
λ	Luftverhältnis [-]
λ_a	Luftaufwand [-]
λ_l	Liefergrad [-]
μ	Faktor [-], Durchflusszahl [-], Coulomb'scher Reibbeiwert [-]
ξ_{OV}	Oberfläche-Volumen-Verhältnis des Brennraumes [-]
ξ_v	Anteil isochor zugeführter Wärme [-]
π_T	Turbinendruckverhältnis [-]
π_V	Verdichterdruckverhältnis [-]
ρ	Dichte [kg/m ³]
σ	Standardabweichung [-]
φ	Kurbelwinkel [°KW]
ψ	Ausflussfunktion
ω	Kreisfrequenz [1/s]

Indizes

<i>A</i>	Abgas, Antrieb, Austritt
<i>ab</i>	abgeführt
<i>AS</i>	Arbeitsspiel
<i>aus</i>	austretend
<i>B</i>	Brennstoff
<i>Bb</i>	Blow-by
<i>bez</i>	bezogen
<i>DS</i>	Downsizing
<i>e</i>	effektiv
<i>E</i>	Eintritt
<i>ein</i>	eintretend
<i>F, Fr</i>	Frisch
<i>G</i>	Gemisch
<i>ges</i>	gesamt
<i>GG</i>	Gegengewicht

<i>GRG</i>	Gleichraumgrad
<i>HD</i>	Hochdruck
<i>HL</i>	Hauptlager
<i>hydr</i>	hydraulisch, hydrodynamisch
<i>HZ</i>	Hubzapfen
<i>i</i>	inneres, indiziert
<i>K</i>	Kolben, Kühlung
<i>Konv.</i>	Konvektion
<i>KP</i>	Kraftstoffpumpe
<i>krit</i>	kritisch
<i>L</i>	Luft, Ladung
<i>LW</i>	Ladungswechsel
<i>m</i>	mittleres, Meridian
<i>min</i>	minimal
<i>M</i>	Massen
<i>NA</i>	Nebenaggregate
<i>ND</i>	Niederdruck
<i>Nenn</i>	Nennpunkt
<i>osz</i>	oszillierend
<i>P</i>	Pleuel
<i>PL</i>	Pleuellager
<i>r</i>	real
<i>red</i>	reduziert
<i>R</i>	Radial
<i>RG</i>	Restgas
<i>rot</i>	rotierend
<i>s</i>	isentrop
<i>Spül</i>	Spülend, Spül-
<i>St</i>	Strahlung
<i>T</i>	Turbine, Tangential
<i>tats</i>	tatsächlich
<i>th</i>	theoretisch, thermisch
<i>u</i>	unverbrannt, unvollständig, Umfang

<i>U</i>	Umgebung
<i>v</i>	verbrannt, isochor
<i>V</i>	Verdichter, Vergleichsprozess, Verbrennung
<i>VG</i>	Verbrennungsgas
<i>W</i>	Wand
<i>W_w</i>	Wandwärme
<i>zu</i>	zugeführt
<i>Zyl</i>	Zylinder