
Richard van Basshuysen
Herausgeber

Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direkteinblasung

Ottokraftstoffe, Erdgas, Methan, Wasserstoff

4. überarbeitete und erweiterte Auflage

Ulrich Spicher und 30 Mitautoren

Inhaltsverzeichnis

Teil A Ottomotor mit Benzin-Direkteinspritzung	1
1 Einleitung	3
2 Geschichte der Benzin-Direkteinspritzung	5
Literatur.	27
3 Gemischbildungs- und Verbrennungsverfahren	31
3.1 Grundlagen der Gemischbildung	33
3.1.1 Kraftstoffaufbereitung	35
3.1.2 Strömungsverhalten	38
3.2 Direkteinspritzung mit homogenem Gemisch.	44
3.3 Direkteinspritzung mit geschichtetem Gemisch.	59
3.3.1 Wandgeführte Brennverfahren	62
3.3.2 Luftgeführte Brennverfahren	67
3.3.3 Strahlgeführte Brennverfahren	68
3.4 Zündung und Verbrennung	86
3.5 Benzin-Direkteinspritzung bei homogen kompressionsgezündeter Verbrennung.	105
3.5.1 Thermodynamik	105
3.5.2 Konzepte und Betriebsstrategien bei Benzin-Selbstzündung.	109
3.5.3 Eingriffsmöglichkeiten bei Direkteinspritzung	113
3.5.4 Potenziale hinsichtlich Verbrauch und Schadstoffemission.	114
3.5.5 Akustik	116
3.6 Kombiniertes Diesel-/Otto-Verbrennungsverfahren.	124
Literatur.	127
4 Einspritzsysteme und Systemübersicht	137
4.1 Luftunterstützte Niederdruck-Direkteinspritzung.	138
4.2 Common-Rail-Hochdruck-Direkteinspritzung	141
4.2.1 Hochdruck-Kraftstoffpumpe	145
4.2.2 Rail	150

	4.2.3	Hochdruck-Einspritzventile/Einspritzdüsen	152
	4.2.4	Einspritzstrategien	163
		Literatur.	172
5		Leistung und Drehmoment	175
		Literatur.	185
6		Aufladung	187
	6.1	Mechanische Aufladung.	192
	6.2	Abgasturboaufladung	198
	6.3	Synergien zwischen der Abgasturboaufladung und der Direkteinspritzung bei Ottomotoren	204
	6.4	Hochaufladung durch elektrisch angetriebenen Lader	207
	6.5	Komplexe Aufladesysteme	210
		Literatur.	215
7		Kraftstoffverbrauch	217
		Literatur.	233
8		Downsizing und Downspeeding	235
	8.1	Downsizing	235
	8.2	Downspeeding	240
		Literatur.	242
9		Abgasemissionen und Schadstoffreduzierung	243
	9.1	Schadstoffentstehung beim Motorprozess.	243
	9.2	Gesetzliche Vorschriften	248
	9.3	Schadstoffreduzierung einschließlich Partikel	261
	9.4	Neue Wege zur Schadstoffreduzierung	278
		Literatur.	283
10		Geräuschemissionen	285
	10.1	Gesetzliche Vorschriften	286
	10.2	Verbrennungsgeräusche	287
	10.2.1	Vergleich Gasoline Direct Injection (GDI homogen) mit GDI geschichtet	288
	10.2.2	Einfluss des Drall- und Tumble-Niveaus auf die Verbrennungsanregung	290
	10.2.3	Einfluss der Abgasrückführungsrate (AGR) auf das Verbrennungsgeräusch	291
	10.2.4	Einfluss des Betriebsmodenwechsels.	291
	10.2.5	Optimierung des Leerlaufs im Schichtbetrieb	292
	10.3	Mechanische Geräusche.	293
	10.3.1	Optimierung des Klopfregelsystems	295
	10.3.2	Einfluss des Kraftstoffhochdruckverteilsystems	296

10.4	Akustikaspekte von GDI-Downsizing-Konzepten	298
10.4.1	Vergleich leistungsgleicher Aggregate	298
10.4.2	Akustik des Otto-DI-Downsizing im Vergleich	299
10.4.3	Akustik von Aufladesystemen	302
10.4.4	Einfluss der Kraftstoffqualität auf die Akustik	304
10.4.5	Aktive Gestaltung der Geräuschqualität	305
10.5	Akustik des CNG-betriebenen Ottomotors	306
	Literatur.	310
11	Einflüsse der Benzin-Direkteinspritzung auf weitere Motor-	
	Einzelsysteme	313
11.1	Zündsysteme	313
11.1.1	Funkenzündsysteme	314
11.1.2	Laserzündung.	323
11.1.3	Mikrowellenzündung.	329
11.1.4	Hochfrequenzzündung (Korona-Zündung).	330
11.2	Kolben	333
11.2.1	Werkstoffe	334
11.2.2	Herstellverfahren	336
11.2.3	Gestaltung und Bauteilfestigkeit	338
11.3	Ventile, Ventilsitzringe und Ventilführungen	342
11.3.1	Ventile und Ventilsitzringe	342
11.3.2	Ablagerungen auf Einlassventilen bei der Benzin-	
	Direkteinspritzung	345
11.3.3	Ventilführungen	346
11.3.4	Leichtbauventile	346
11.4	Saugrohre	347
11.4.1	Saugrohre für normal ansaugende Ottomotoren	348
11.4.2	Saugrohre für aufgeladene Ottomotoren	350
11.4.3	Entwicklungsziele heute und in der Zukunft	351
11.5	Kurbelgehäuseentlüftung	353
11.6	Tankentlüftung	359
11.7	Zuheizmaßnahmen für den Fahrzeuginnenraum	362
11.7.1	Einleitung.	362
11.7.2	Zuheizerausführungen	362
11.7.3	Elektrischer PTC-Zuheizer luftseitig.	363
11.7.4	Elektrischer Kühlwasserheizer	366
11.7.5	Brennstoffzuheizer	368
11.7.6	Visco-Heizer	369
11.7.7	Abgaswärme-Zuheizer	370
11.7.8	Zusammenfassung und Ausblick	371
	Literatur.	372

12	Benzin-Direkteinspritzung im elektrischen Hybridverbund	377
	12.1 Einleitung	377
	12.2 Hybridantriebe für Pkw	379
	Literatur	385
13	Betriebsstoffe	387
	13.1 Ottokraftstoffe	387
	13.1.1 Einleitung	387
	13.1.2 Allgemeine Grundlagen	387
	13.1.3 Ottokraftstoffkomponenten und Ottokraftstoffaufmischung	390
	13.1.4 Anforderungen an Ottokraftstoffe und ihre praktische Bedeutung	391
	13.1.5 Kraftstoffeinflüsse auf die Abgasemissionen	397
	13.1.6 Ottokraftstoffe mit Bioanteil: Bio-Ethanol und Ethyl-Tertiär-Buthyl-Ether (ETBE)	399
	13.2 Schmierstoffe für Ottomotoren	401
	13.2.1 Schmierstoffarten	401
	13.2.2 Aufgaben des Motoröls	402
	13.2.3 Anforderungen an das Motoröl	402
	13.2.4 Aufbau von Motorölen	403
	13.2.5 Viskosität	403
	13.2.6 Grundöle	406
	13.2.7 Additive	407
	13.2.8 Leistungsklassen von Motorölen	409
	13.2.9 Betriebsstoffvorschriften der Pkw-Hersteller	412
	13.2.10 Ausblick	414
	Literatur	414
14	Motorkonzepte	415
	14.1 Serienkonzepte	415
	14.1.1 Geschichte	415
	14.1.2 Konzepte mit Schichtladung: wand- und luftgeführte Brennverfahren	417
	14.1.3 Konzepte mit Schichtladung: strahlgeführte Brennverfahren	424
	14.1.4 Konzepte mit homogenem Gemisch ohne Aufladung	434
	14.1.5 Konzepte mit homogenem Gemisch und Aufladung	438
	14.2 Konzepte für den Motorsport und Impulse für die Serienentwicklung	463
	14.2.1 Einleitung	463
	14.2.2 Benzin-Direkteinspritzung im Rennsport	464
	14.2.3 V8 Biturbo mit Direkteinspritzung für das 24-h-Rennen von Le Mans	465
	14.2.4 Übertragung auf einen Serienmotor mit Direkteinspritzung und Turboaufladung	469

14.2.5	Zusammenfassung und Ausblick	469
14.3	Zweitakt-Ottomotoren mit Direkteinspritzung	470
14.3.1	Einleitung.	470
14.3.2	Historie	470
14.3.3	Serienkonzepte	475
14.3.4	Anwendungen und Ausblick	478
	Literatur.	484
15	Marktentwicklung der Benzin-Direkteinspritzung	489
15.1	Einleitung	489
15.2	Entwicklung in den Märkten der Triade.	489
15.3	Zukünftige Entwicklung der Benzin-Direkteinspritzung	492
16	Ausblick	493
16.1	Benzin-Direkteinspritzung	493
	Literatur.	511
Teil B Ottomotor mit Gas-Direkteinblasung		513
17	Direkteinblasung von gasförmigen Kraftstoffen	515
17.1	Einleitung	515
17.1.1	Historie	515
17.1.2	Stand der Technik	517
17.2	Anwendung von gasförmigen Kraftstoffen im Verbrennungsmotor.	520
17.2.1	Wasserstoff	520
17.2.2	Erdgas	521
17.2.3	Mögliche Gemischbildungskonzepte	523
17.2.4	Injektoren für die Direkteinblasung von gasförmigen Kraftstoffen.	526
17.3	Wasserstoff-Direkteinblasung.	534
17.3.1	Einfluss des Einblasezeitpunktes	535
17.3.2	Visualisierung der Verbrennung	537
17.3.3	Ladungsschichtung	540
17.3.4	Verbrennungssteuerung.	542
17.3.5	Wasserstoff-Verbrennung mit Selbstzündung.	544
17.3.6	Zusammenfassung	546
17.4	Erdgas-Direkteinblasung	547
17.4.1	Allgemeines – Potentiale im Vergleich zur Saugrohreinblasung	547
17.4.2	Systembeschreibung für Erdgas-Direkteinblasung	549
17.4.3	Einblasestrategien	551
17.4.4	Zusammenfassung und Ausblick	562
17.5	LPG-Direkteinspritzung.	563

17.6 Erdgas-Diesel-Dual-Fuel-Brennverfahren mit Direkteinblasung	565
17.6.1 Experimentelle Ergebnisse	566
Literatur.	568
Teil C Methan-Benzin Zweistoffverbrennung	573
18 Ottomotoren mit einer Methan-Benzin Zweistoffverbrennung	575
18.1 Einleitung	575
18.2 Emissionen bei der Benzin- und Erdgasverbrennung	579
18.2.1 Methan-Emissionen	579
18.2.2 Methanschlupf	581
18.3 Benzin-Erdgas-Zweistoffverbrennung an einem PKW-Motor	585
18.3.1 Versuchsmotor für die Zweistoffverbrennung in einem PKW-Motor	586
18.3.2 Aufbau der verwendeten Kraftstoffsysteme	588
18.3.3 Teillastuntersuchung	590
18.3.4 Vollastuntersuchung	595
18.4 Benzin-Erdgas-Zweistoffverbrennung in einem NFZ-Motor	597
18.4.1 Anpassungsmaßnahmen zum Umbau eines NFZ- Dieselmotors zu einem NFZ-Ottomotors.	600
18.4.2 NFZ-Ottomotor mit Saugrohr-Benzineinspritzung und Saugrohr-Erdgaseinblasung	605
18.5 Zusammenfassung und Ausblick	609
Literatur.	609
Sachverzeichnis	611