

Richard van Basshuysen (Hrsg.)

# **Ottomotor mit Direkteinspritzung**

**Verfahren, Systeme,  
Entwicklung, Potenzial**

Mit 399 Abbildungen

Ulrich Spicher  
und 21 Mitautoren

ATZ/MTZ-Fachbuch



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	1
<b>2</b>	<b>Geschichte der Benzin-Direkteinspritzung</b> .....	3
<b>3</b>	<b>Gemischbildungs- und Verbrennungsverfahren</b> .....	29
3.1	Grundlagen der Gemischbildung .....	31
3.1.1	Kraftstoffaufbereitung .....	32
3.1.2	Strömungsverhalten .....	36
3.2	Direkteinspritzung mit homogenem Gemisch .....	43
3.3	Direkteinspritzung mit geschichtetem Gemisch .....	52
3.3.1	Wandgeführte Brennverfahren .....	55
3.3.2	Luftgeführte Brennverfahren .....	60
3.3.3	Strahlgeführte Brennverfahren .....	62
3.4	Zündung und Verbrennung .....	74
3.5	Benzin-Direkteinspritzung bei homogen kompressionsgezündeter Verbrennung .....	89
3.5.1	Thermodynamik .....	89
3.5.2	Konzepte und Betriebsstrategien bei Benzin-Selbstzündung .....	93
3.5.3	Eingriffsmöglichkeiten bei Direkteinspritzung .....	97
3.5.4	Potenziale hinsichtlich Verbrauch und Schadstoffemission .....	98
3.5.5	Akustik .....	100
3.6	Kombiniertes Diesel-/Otto-Verbrennungsverfahren .....	108
<b>4</b>	<b>Einspritzsysteme und Systemübersicht</b> .....	117
4.1	Luftunterstützte Niederdruck-Direkteinspritzung .....	118
4.2	Common-Rail-Hochdruck-Direkteinspritzung .....	121
4.2.1	Hochdruck-Kraftstoffpumpe .....	124
4.2.2	Rail .....	129
4.2.3	Hochdruck-Einspritzventile/Einspritzdüsen .....	131
4.2.4	Einspritzstrategien .....	143
<b>5</b>	<b>Leistung und Drehmoment</b> .....	151
<b>6</b>	<b>Aufladung</b> .....	161
6.1	Mechanische Aufladung .....	164
6.2	Abgasturboaufladung .....	170
6.3	Synergien zwischen Abgasturboaufladung und der Direkteinspritzung bei Ottomotoren .....	176
6.4	Hochaufladung durch elektrisch angetriebenen Lader .....	179
6.5	Komplexe Aufladesysteme .....	182

<b>7 Kraftstoffverbrauch</b> .....	189
<b>8 Downsizing und Downspeeding</b> .....	205
8.1 Downsizing .....	205
8.2 Downspeeding .....	209
<b>9 Abgasemissionen und Schadstoffreduzierung</b> .....	213
9.1 Schadstoffentstehung beim Motorprozess .....	213
9.2 Gesetzliche Vorschriften .....	218
9.3 Schadstoffreduzierung einschließlich Partikel .....	228
<b>10 Geräuschemissionen</b> .....	243
10.1 Gesetzliche Vorschriften .....	243
10.2 Verbrennungsgeräusche .....	245
10.2.1 Vergleich Gasoline Direct Injection (GDI homogen) mit GDI geschichtet .....	246
10.2.2 Einfluss des Drall- und Tumble-Niveaus auf die Verbrennungs- anregung .....	247
10.2.3 Einfluss der Abgasrückführungsrate (AGR) auf das Verbrennungs- geräusch .....	249
10.2.4 Einfluss des Betriebsmodenwechsels .....	249
10.2.5 Optimierung des Leerlaufs im Schichtbetrieb .....	250
10.2.6 Akustik-Aspekte von GDI-Downsizing-Konzepten .....	251
10.2.7 Einfluss der Kraftstoffqualität auf die Akustik .....	253
10.3 Mechanische Geräusche .....	254
10.3.1 Optimierung des Klopfregelsystems .....	255
10.3.2 Einfluss des Kraftstoffhochdruckverteilsystems .....	257
<b>11 Einflüsse der Benzin-Direkteinspritzung auf weitere Motor-Einzelsysteme</b> ..	261
11.1 Zündsysteme .....	261
11.1.1 Funkenzündsysteme .....	261
11.1.2 Laserzündung .....	272
11.1.3 Mikrowellenzündung .....	276
11.2 Kolben .....	277
11.2.1 Werkstoffe .....	278
11.2.2 Herstellverfahren .....	281
11.2.3 Gestaltung und Bauteilfestigkeit .....	282
11.3 Ventile, Ventilsitzringe, Ventilführungen .....	287
11.3.1 Ventile und Ventilsitzringe .....	287
11.3.2 Ablagerungen auf Einlassventilen bei der Benzin-Direkteinspritzung .....	289
11.3.3 Ventilführungen .....	290
11.3.4 Leichtbauventile .....	291

11.4	Luftansaugsysteme moderner Ottomotoren .....	292
11.4.1	Thermodynamik des Ansaugsystems .....	293
11.4.2	Saugrohre für selbst ansaugende Motoren .....	296
11.4.3	Saugrohre aufgeladener Ottomotoren .....	298
11.4.4	Saugrohre aufgeladener Ottomotoren mit Direkteinspritzung .....	299
11.5	Kurbelgehäuseentlüftung .....	301
11.6	Lufttaktventil .....	306
11.6.1	Technologiebeschreibung .....	307
11.6.2	Bauprinzip und Randbedingungen .....	308
11.6.3	Thermodynamisches Potenzial .....	309
11.7	Tankentlüftung .....	318
11.8	Zuheizmaßnahmen für den Fahrzeuginnenraum .....	322
11.8.1	Einleitung .....	322
11.8.2	Zuheizerausführungen .....	322
11.8.3	Elektrischer PTC-Zuheizer luftseitig .....	323
11.8.4	Elektrischer Kühlwasserheizer .....	326
11.8.5	Brennstoffzuheizer .....	327
11.8.6	Visco-Heizer .....	329
11.8.7	Abgaswärme-Zuheizer .....	330
11.8.8	Zusammenfassung und Ausblick .....	331
<b>12</b>	<b>Benzin-Direkteinspritzung im elektrischen Hybridverbund .....</b>	<b>335</b>
12.1	Einleitung .....	335
12.2	Hybridantriebe für Pkw .....	337
<b>13</b>	<b>Betriebsstoffe .....</b>	<b>349</b>
13.1	Ottokraftstoffe .....	349
13.1.1	Einleitung .....	349
13.1.2	Allgemeine Grundlagen .....	349
13.1.3	Ottokraftstoffkomponenten und Ottokraftstoffaufmischung .....	352
13.1.4	Anforderungen an Ottokraftstoffe und ihre praktische Bedeutung ...	353
13.1.5	Kraftstoffeinflüsse auf die Abgasemissionen .....	358
13.1.6	Ottokraftstoffe mit Bioanteil: Bio-Ethanol und Ethyl-Tertiär-Buthyl-Ether (ETBE) .....	359
13.2	Schmierstoffe für Ottomotoren .....	361
13.2.1	Schmierstoffarten .....	361
13.2.2	Aufgaben des Motoröls .....	361
13.2.3	Anforderungen an das Motoröl .....	362
13.2.4	Aufbau von Motorölen .....	362
13.2.5	Viskosität .....	363
13.2.6	Grundöle .....	365
13.2.7	Additive .....	367
13.2.8	Leistungsklassen von Motorölen .....	369
13.2.9	Betriebsstoffvorschriften der Pkw-Hersteller .....	373
13.2.10	Ausblick .....	373

<b>14 Motorkonzepte</b> .....	375
14.1 Serienkonzepte .....	375
14.1.1 Geschichte .....	375
14.1.2 Konzepte mit Schichtladung: wand- und luftgeführte Brennverfahren .....	377
14.1.3 Konzepte mit homogenem Gemisch .....	384
14.1.4 Konzepte mit Aufladung .....	387
14.1.5 Konzepte mit Schichtladung: strahlgeführte Brennverfahren .....	391
14.2 Konzepte für den Motorsport und Impulse für die Serienentwicklung .....	396
14.2.1 Einleitung .....	396
14.2.2 Benzin-Direkteinspritzung im Rennsport .....	397
14.2.3 V8 Biturbo mit Direkteinspritzung für das 24-h-Rennen von Le Mans .....	398
14.2.4 Übertragung auf einen 2 l Serienmotor mit Direkteinspritzung und Turboaufladung .....	403
14.2.5 Gegenüberstellung der Motoren mit Direkteinspritzung für den Rennsport und für die Serie .....	405
14.2.6 Zusammenfassung und Ausblick .....	406
14.3 Zweitakt-Ottomotoren mit Direkteinspritzung .....	406
14.3.1 Einleitung .....	406
14.3.2 Historie .....	407
14.3.3 Serienkonzepte .....	411
14.3.4 Anwendungen und Ausblick .....	415
<b>15 Benzin-Direkteinspritzung in den Märkten der Triade</b> .....	423
15.1 Einleitung .....	423
15.2 Die Märkte der Triade .....	423
15.3 Ausblick .....	425
<b>16 Ausblick</b> .....	427
<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	433