

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen XII

1	Einleitung und kurze Geschichte der Aufladung	1
2	Grundlagen und Ziel der Aufladung	6
2.1	Zusammenhang von Zylinderladung und Zylinderarbeit sowie von Ladungsmassenstrom und Motorleistung	6
2.1.1	Zusammenhang von Zylinderladung und Zylinderarbeit	6
2.1.2	Zusammenhang von Ladungsmassenstrom und Motorleistung	7
2.2	Einfluss der Ladeluftkühlung	9
2.3	Begriffsbestimmung und Aufladeverfahrensüberblick	10
2.4	Aufladung mittels gasdynamischer Effekte	10
2.4.1	Schwingsaugrohr-Aufladung	10
2.4.2	Resonanzaufladung	12
2.5	Aufladung mittels Aufladeaggregaten	14
2.5.1	Lader-Druck-Volumenstrom-Kennfeld	14
2.5.2	Verdrängerlader	15
2.5.3	Strömungslader	16
2.6	Zusammenwirken von Lader und Verbrennungskraftmaschine	18
2.6.1	Druck-Volumenstrom-Kennfeld des Kolbenmotors	18
2.6.2	Zusammenwirken von Zwei- und Viertaktmotoren mit verschiedenen Ladern	21
3	Thermodynamik der Aufladung	24
3.1	Berechnung der Lader- und Turbinenleistung	24
3.2	Energiebilanz des Arbeitsprozesses aufgeladener Motoren	25
3.2.1	Motor-Hochdruckprozess	25
3.2.2	Gaswechselschleifen-Niederdruckprozesse	25
3.2.3	Abgasenergienutzung	26
3.3	Aufladung als Mittel zur Wirkungsgradsteigerung	27
3.3.1	Kennzahlen zur Beschreibung der Ladungswechsel- und Motorwirkungsgrade	27
3.3.2	Beeinflussung des Motorgesamtwirkungsgrades durch Aufladung	31
3.4	Einfluss der Aufladung auf Abgasemissionen	32
3.4.1	Ottomotor	34
3.4.2	Dieselmotor	34
3.4.3	Abgasnachbehandlungsverfahren	35
3.5	Thermische und mechanische Beanspruchung der Verbrennungskraftmaschine im Aufladebetrieb	35

3.5.1	Thermische Beanspruchungen	35
3.5.2	Mechanische Beanspruchungen	36
3.6	Modellierung und rechnergestützte Simulation aufgeladener Motoren	37
3.6.1	Einführung in numerische Prozesssimulation	37
3.6.2	Kreisprozesssimulation des aufgeladenen Motors	38
3.6.3	Numerische dreidimensionale Simulation von Strömungsvorgängen	49
3.6.4	Numerische Simulation des aufgeladenen Motors im Verbund mit Verbrauchersystem	50
4	Mechanische Aufladung	52
4.1	Einsatzgebiete der mechanischen Aufladung	52
4.2	Energiebilanz der mechanischen Aufladung	53
4.3	Regelungsmöglichkeiten des Förderstromes mechanischer Lader	54
4.3.1	Viertaktmotoren	54
4.3.2	Zweitaktmotoren	56
4.4	Bauformen und Systematik mechanisch angetriebener Verdichter	56
4.4.1	Verdrängerlader	56
4.4.2	Strömungslader	60
5	Abgasturboaufladung	61
5.1	Ziele und Einsatzgebiete der Abgasturboaufladung	61
5.2	Strömungstechnische Grundlagen der Turboladerkomponenten	61
5.2.1	Energieumsetzung in Strömungsmaschinen	61
5.2.2	Verdichter	62
5.2.3	Turbinen	66
5.3	Energiebilanz des Aufladesystems	75
5.4	Anpassung des Turboladers	76
5.4.1	Abgasenergienutzungsmöglichkeiten und resultierende Auspuffsystemgestaltung	76
5.4.2	Turbinenauslegung und -regelung	83
5.4.3	Verdichterauslegung und -regelung	91
5.5	Dimensionierung und Optimierung der Gasführungs- und Aufladekomponenten mittels Kreisprozess- und CFD-Simulationen	94
5.5.1	Auslegungskriterien	94
5.5.2	Beispiele zur numerischen Simulation von Motoren mit Abgasturboaufladung	98
5.5.3	Verifikation der Simulation	101
6	Besondere Arbeitsverfahren mit Nutzung der Abgasturboaufladung	107
6.1	Zweistufige Aufladung	107
6.2	Geregelte zweistufige Aufladung	108
6.3	Registeraufladung	109
6.3.1	Einstufige Registeraufladung	110
6.3.2	Zweistufige Registeraufladung	112
6.4	Turbokühlung und Millerverfahren	115
6.4.1	Turbokühlung	115
6.4.2	Millerverfahren	116

6.5	Turbocompound-Verfahren	118
6.5.1	Mechanische Rückspeisung in den Motor	119
6.5.2	Elektrische Energierückgewinnung	123
6.6	Kombinierte Auflade- und Aufladesonderverfahren	124
6.6.1	Differential-Verbundaufladung	124
6.6.2	Mechanische Zusatzaufladung	125
6.6.3	Unterstützte Abgasturboaufladung	126
6.6.4	Comprex-Druckwellenaufladeverfahren	128
6.6.5	Hyperbar-Aufladeverfahren	130
6.6.6	Auslegung kombinierter Aufladeverfahren mittels thermodynamischer Kreisprozesssimulationen	131
7	Betriebsverhalten aufgeladener Motoren	135
7.1	Lastaufnahme und Beschleunigungsverhalten	135
7.2	Drehmomentverhalten und Drehmomentenverlauf	136
7.3	Höhenverhalten aufgeladener Motoren	137
7.4	Stationär- und Großmotoren	139
7.4.1	Generatorbetrieb	140
7.4.2	Propellerbetrieb	141
7.4.3	Beschleunigungshilfen	142
7.4.4	Besondere Probleme bei Aufladung von Zweitaktmotoren	143
7.5	Instationärbetrieb eines Schiffsmotors mit Registeraufladung	144
8	Betriebsverhalten aufgeladener Motoren im Fahrzeugeinsatz	146
8.1	Anforderungen im Personenwageneinsatz	146
8.2	Anforderungen im Nutzfahrzeugeinsatz	147
8.3	Sonstige Fahrzeugeinsätze	148
8.4	Instationärverhalten des abgasturboaufgeladenen Motors	148
8.4.1	Personenwageneinsatz	150
8.4.2	Nutzfahrzeugeinsatz	152
8.5	Abgasturboladerauslegung für Fahrzeugeinsatz	153
8.5.1	Stationärauslegung	153
8.5.2	Instationärauslegung	156
8.5.3	Numerische Simulation des Betriebsverhaltens des Motors im Zusammenwirken mit Fahrzeuggesamtsystem	161
8.6	Sonderprobleme aufgeladener Otto-Benzin- und -Gasmotoren	161
8.6.1	Klopfende Verbrennung	161
8.6.2	Probleme der Quantitätsregelung	164
9	Laderregeleingriffe und Regelungsphilosophien für Starrgeometrie- und VTG-Lader	165
9.1	Grundsatzprobleme der Abgasturboladerregelung	165
9.2	Starrgeometrie-Abgasturbolader	166
9.2.1	Regelungseingriffsmöglichkeiten für stationäre Betriebszustände	166
9.2.2	Transient-Regelungsstrategien	169
9.2.3	Teillast- und Emissionsregelgrößen und Regelungseingriffe	173
9.3	Abgasturbolader mit variabler Turbineneintrittsgeometrie	176

9.3.1	Generelle Regelungsmöglichkeiten und -strategien für Lader	176
9.3.2	Regeleingriffe zur Verbesserung des Stationärverhaltens	177
9.3.3	Regeleingriffe zur Verbesserung des Instationärverhaltens	178
9.3.4	Regelondereingriffe zur Erhöhung der Motorbremsleistung	181
9.3.5	Sonderprobleme bei aufgeladenen Otto-Benzin- und Gasmotoren	182
9.3.6	Schematischer Aufbau leistungsfähiger elektronischer Waste-Gate- und VTG-Regelsysteme	182
9.3.7	Bewertung von VTG-Regelstrategien mittels numerischer Simulationsmodelle	185
10	Messtechnische Erfassung der Betriebsdaten aufgeladener Motoren am Motorprüfstand	188
10.1	Messstellenplan	189
10.2	Motormoment	190
10.3	Motordrehzahl	191
10.4	Turboladerdrehzahl	191
10.5	Motorluftmassenstrom	192
10.6	Brennstoffmassenstrom	193
10.7	Motor-Blow-By	193
10.8	Druck- und Temperaturdaten	193
10.9	Emissionswerte	195
11	Mechanik von Aufladegeräten	198
11.1	Verdrängerlader	198
11.1.1	Gehäuse und Rotoren: Dichtung und Kühlung	198
11.1.2	Lagerung und Schmierung	199
11.2	Abgasturbolader	199
11.2.1	Kleinlader	199
11.2.1.1	Gehäuse: Aufbau, Kühlung und Dichtung	199
11.2.1.2	Laufzeug: Materialauswahl und -beanspruchung	202
11.2.1.3	Lagerung, Schmierung und Wellendynamik	203
11.2.1.4	Fertigung	205
11.2.2	Großlader	206
11.2.2.1	Aufbau, Gehäuse, Kühlung, Dichtung	207
11.2.2.2	Laufzeug	210
11.2.2.3	Fertigung	211
12	Ladeluftkühler und Ladeluftkühlsysteme	212
12.1	Grundlagen und Kennzahlen	212
12.2	Ladeluftkühlerbauarten	213
12.2.1	Wassergekühlte Ladeluftkühler	215
12.2.2	Luft-Luft-Ladeluftkühler	216
12.2.3	Ganzaluminium-Ladeluftkühler	216
12.3	Ladeluftkühlsysteme	217
13	Aussichten und Weiterentwicklung der Aufladung	219
13.1	Status und Perspektiven der Aufladetechniken	219
13.2	Weiterentwicklungstrends der einzelnen Aufladesysteme	219

13.2.1	Mechanische Lader	219
13.2.2	Abgasturbolader	220
13.2.3	Aufladesysteme und -kombinationen	222
13.3	Zusammenfassung	225
14	Beispiele ausgeführter Auflademotoren	227
14.1	Aufgeladene Ottomotoren	227
14.2	Pkw-Dieselmotoren	236
14.3	Nfz-Dieselmotoren	244
14.4	Flugmotoren	248
14.5	Hochleistungs-Schnellläufer (Lokomotiv- und Bootsmotoren)	249
14.6	Mittelschnellläufer (Gas- und Schwerölbetrieb)	250
14.7	Langsamläufer (Stationär- und Schiffs-Größtmotoren)	252
	Anhang	257
	Literatur	261
	Namen- und Sachverzeichnis	267