

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Zielsetzung	1
2	Untersuchung der motorsportspezifischen Randbedingungen	3
2.1	Reglement der FIA WEC für die Saison 2012.....	4
2.2	Technische Daten des Audi R18 e-tron quattro für die Saison 2012	6
2.3	Betriebszustände und Rennrundenanalyse	8
3	Systeme zur Energierecuperation in der Rennsportanwendung; Stand der Technik.....	13
3.1	Bremsenergierückgewinnung	15
3.1.1	Grundlagen	16
3.1.2	Systemkomponenten.....	18
3.1.3	Ausgeführte Systeme	19
3.2	Abgasenergierückgewinnung	22
3.2.1	Grundlagen	22
3.2.2	Direkte Wärmenutzung	25
3.2.3	Dampfstrahl- und Adsorptionskälteprozess.....	25
3.2.4	Thermoelektrischer Generator	27
3.2.5	Clausius-Rankine Prozess	28
3.2.6	Joule-Brayton Prozess.....	30
3.2.7	Turbocompound-Verfahren	31
4	Identifikation des Zielsystems zur Abgasenergierückgewinnung in der Rennsportanwendung.....	35
4.1	Definition der Bewertungskriterien	35
4.2	Detaillierte Bestimmung der Abgasenthalpie	36
4.2.1	Erarbeitung einer Methode zur Abgastemperaturbestimmung	37
4.2.2	Abgastemperaturverlauf über eine Rennrunde.....	39
4.3	Potentialanalyse der Systeme	40
4.3.1	Thermoelektrischer Generator	40
4.3.2	Clausius-Rankine Prozess	41
4.3.3	Joule-Brayton Prozess	43
4.3.4	Turbocompound-Verfahren	45
4.4	Evaluation der verschiedenen Systeme.....	49

5	Modellbildung und Simulation des Turbocompound-Verfahrens.....	51
5.1	Thermodynamische und strömungsmechanische Grundlagen	51
5.1.1	Verbrennungsmotor.....	52
5.1.2	Abgasturbolader.....	56
5.2	Modellbildung.....	67
5.2.1	Gesamtantriebsstrang.....	68
5.2.2	Verbrennungsmotor mit variablem elektrischen Turbolader (VET).....	70
5.3	Validierung des Simulationsmodells.....	71
5.3.1	Stationärer Betrieb.....	71
5.3.2	Dynamischer Betrieb.....	72
5.4	Ergebnisse der Simulation	73
5.4.1	Verbrennungsmotor.....	74
5.4.2	Variabler elektrischer Turbolader.....	76
5.5	Sensitivitätsanalyse	81
5.5.1	Variation der elektrischen Nutzleistung.....	81
5.5.2	Variation des Turbinenwirkungsgrades.....	83
5.5.3	Transienter Ladedruckaufbau.....	85
5.5.4	Variation der elektrischen Unterstützung des Turboladers.....	87
5.6	Gesamtpotential des Turbocompound-Verfahrens.....	90
6	Komponentenentwicklung des Turbocompound-Verfahrens.....	93
6.1	Anordnung der elektrischen Maschine	93
6.2	Konstruktiver Aufbau.....	95
6.2.1	Lagerung und Schmierung.....	98
6.2.2	Kühlkonzept.....	98
6.3	Elektrische Komponenten	100
6.3.1	Motor-Generator-Einheit (MGU-H)	100
6.3.2	Leistungselektronik (CU-H).....	103
6.4	Sicherheitskonzept	104
7	Versuchsergebnisse des Turbocompound-Verfahrens	105
7.1	Untersuchung am Heißgasprüfstand	105
7.2	Stationäre Untersuchung des Gesamtsystems	108
7.2.1	Versuchsaufbau und Messtechnik	108
7.2.2	Versuchsübersicht	109
7.2.3	Auswirkung auf den Verbrennungsmotor	110
7.2.4	Auswirkung auf den variablen elektrischen Turbolader	125

7.2.5	Variation der elektrischen Rekuperationsleistung	127
7.2.6	Variation der elektrischen Unterstützung des Turboladers	128
7.2.7	Gesamtpotential zur Effizienzsteigerung.....	131
7.3	Dynamische Untersuchung des Gesamtsystems	136
8	Differenzierte Ergebnisdarstellung des Turbocompound-Verfahrens.....	141
8.1	Druckverlaufsanalyse.....	141
8.2	Verlustteilung.....	142
8.3	Energiebilanz.....	144
8.4	Exergiebilanz.....	146
8.5	Gegenüberstellung der Energie- und Exergiebilanz	149
9	Zusammenfassung und Ausblick	151
10	Literaturverzeichnis.....	155
11	Anhang	165