

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Stand der Wissenschaft . . . . .	3
1.2 Zielsetzung der Arbeit und Vorgehensweise . . . . .	6
<b>2 Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1 Abgasturbolader . . . . .	9
2.1.1 Aufladung von Verbrennungsmotoren . . . . .	9
2.1.2 Aufbau und Funktionsweise . . . . .	15
2.1.3 Grundlagen und Kennfelddarstellung . . . . .	20
2.2 Numerische Strömungsmechanik . . . . .	28
2.2.1 Lösungsprozess . . . . .	28
2.2.2 Kontinuumsmechanische Erhaltungsgleichungen . . . . .	28
2.2.3 Turbulenzmodellierung . . . . .	31
<b>3 Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>33</b>
3.1 Prüfstands Aufbau und verwendete Messtechnik . . . . .	33
3.2 Messprogramm und Versuchsdurchführung . . . . .	38
3.3 Stationäre Messungen . . . . .	44
3.3.1 Verdichter . . . . .	45
3.3.2 Turbine . . . . .	46
3.3.3 Mechanische Verlustleistung . . . . .	49
3.4 Experimentelle Analyse des Instationärverhaltens . . . . .	50
3.4.1 Trägheit der Messgrößen . . . . .	50
3.4.2 Analyse des Druckaufbaus . . . . .	54
3.4.3 Instationärer Verlauf der Messgrößen . . . . .	58
3.4.4 Vergleich des Beschleunigungsverhaltens . . . . .	60

---

<b>4</b>	<b>Numerische Untersuchungen</b>	<b>63</b>
4.1	Stationäre Simulationen . . . . .	63
4.1.1	Modellaufbau und Einstellungen . . . . .	63
4.1.2	Verdichter . . . . .	64
4.1.3	Turbine . . . . .	68
4.1.4	Mechanische Verlustleistung . . . . .	72
4.2	Entwicklung der transienten Simulationsmethodik . . . . .	74
4.2.1	Druck-Randbedingung nach dem Verdichter . . . . .	75
4.2.1.1	Vorgabe des gemessenen Druckverlaufs . . . . .	75
4.2.1.2	Einfluss der Messtoleranz . . . . .	78
4.2.1.3	Einfluss des realen Volumens nach dem Verdichter . . . . .	79
4.2.2	Massenstrom-Randbedingung nach dem Verdichter . . . . .	84
4.2.2.1	Berechnete Massenstromverläufe . . . . .	84
4.2.2.2	Verlängerte Verdichternachlaufstrecke . . . . .	86
4.2.3	Festlegung der weiteren Vorgehensweise . . . . .	88
4.2.4	Einflussgrößen auf den berechneten Drehzahlgradienten . . . . .	89
4.2.4.1	Reduzierung der Zeitschrittweite . . . . .	90
4.2.4.2	Turboladerdrehzahl . . . . .	91
4.2.4.3	Turbinenleistung . . . . .	91
4.2.4.4	Mechanische Verlustleistung der Lagerung . . . . .	95
4.2.4.5	Massenträgheitsmoment des Laufzeugs . . . . .	98
4.2.5	Anwendung auf weitere Lastsprünge . . . . .	100
4.2.6	Zeitliche Verzögerung der Drucksignale . . . . .	103
4.3	Numerische Analyse des Instationärverhaltens . . . . .	109
4.3.1	Turbinen- und Verdichterleistung . . . . .	109
4.3.2	Innere Wirkungsgrade . . . . .	111
4.3.3	Axialkräfte und Axialschub . . . . .	119
4.4	Fazit . . . . .	123
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>127</b>
	<b>Literatur</b>	<b>129</b>
<b>A</b>	<b>Nomenklatur der Auswertestellen</b>	<b>139</b>

---

<b>B Grundlagen</b>	<b>140</b>
B.1 Thermodynamische Grundlagen . . . . .	140
B.1.1 Erster und Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .	140
B.1.2 Spezifische Wärmekapazitäten . . . . .	141
B.1.3 Divergenz der Isobaren im h-s-Diagramm . . . . .	142
<b>C Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>143</b>
C.1 Prüfstandsaufbau . . . . .	143
C.1.1 Reproduzierbarkeit der instationären Messungen . . . . .	143
C.2 Messprogramm . . . . .	144
C.2.1 Lage der Lastsprünge im Verdichterkennfeld . . . . .	144
C.3 Stationäre Messungen von Turbolader 2 . . . . .	145
C.3.1 Verdichter . . . . .	145
C.3.2 Turbine . . . . .	145
C.3.3 Mechanische Verlustleistung . . . . .	148
C.4 Analyse des Instationärverhaltens . . . . .	148
C.4.1 Trägheit der Messgrößen . . . . .	148
C.4.2 Instationärer Verlauf der Messgrößen . . . . .	150
C.4.3 Vergleich Beschleunigungsverhalten . . . . .	151
<b>D Numerische Untersuchungen</b>	<b>152</b>
D.1 Stationäre Simulationen . . . . .	152
D.1.1 Verdichterkennfelder des Vergleichsladers . . . . .	152
D.1.2 Turbinenkennfelder des Vergleichsladers . . . . .	152
D.1.3 Verhältnis Verlustmoment zu Verdichterdrehmoment . . . . .	154
D.1.4 Auswirkungen auf die inneren Wirkungsgrade . . . . .	155
D.1.5 Verlustmoment Vergleichslader . . . . .	155
D.1.6 Mechanischer Wirkungsgrad . . . . .	157
D.2 Entwicklung der transienten Simulationsmethodik . . . . .	157
D.2.1 Berechnung des Verdichtermassenstroms . . . . .	157
D.2.2 Anwendung auf weitere Lastsprünge . . . . .	159
D.2.3 Zeitliche Verzögerung der Drucksignale . . . . .	159
D.3 Analyse des Instationärverhaltens . . . . .	161
D.3.1 Verdichtermassenstrom . . . . .	161

---

D.3.2	Trägheit der Simulationsgrößen . . . . .	162
D.3.3	Zeitlicher Verlauf der inneren Turbinenwirkungsgrade . . . . .	163
D.3.4	Kennzahl zur Bewertung der Strömungsrichtung . . . . .	164
D.3.5	Zeitlicher Verlauf der Totaldruckverhältnisse . . . . .	165
D.3.6	Strömungsausprägung im Verdichterrad . . . . .	167
D.3.7	Zusammensetzung der Axialkraft . . . . .	167