

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	II
Abstract	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
Nomenklatur	VI
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Problemdarstellung	1
1.2 Untersuchung des zukünftigen Kraftwerkseinsatzes	3
1.2.1 Methodik der Kraftwerkseinsatzplanung	3
1.2.2 Erwartete Veränderung des Kraftwerkseinsatzes	4
1.2.3 Neue Anforderungen an thermische Kraftwerke	5
1.3 Fazit	6
1.4 Ableitung der Aufgabenstellung	6
1.5 Gliederung der Arbeit	7
2 Umfang der thermodynamischen Untersuchungen	8
2.1 Untersuchte Kraftwerke	8
2.2 Steinkohle-Kraftwerk Rostock	8
2.3 GuD-Anlage Mainz Wiesbaden	11
2.4 Überblick über die thermodynamische Modellierung	14
2.5 Fokus der Untersuchungen	16
2.6 Fazit	16
3 Thermodynamische Grundlagen	17
3.1 Erhaltungsgleichungen als Grundlage der Modellbildung	17
3.2 Bilanzgleichungen für durchströmte Komponenten	18
3.2.1 Massenbilanz	18
3.2.2 Energiebilanz	19
3.2.3 Impulsbilanz	19
3.3 Bilanzgleichungen für geschlossene Systeme	20
3.4 Wärmeleitung	20
3.5 Konvektion	21
3.5.1 Rauchgasscitiger konvektiver Wärmetübergang	21
3.5.2 Wasserdampfscitiger konvektiver Wärmetübergang	24
3.6 Wärmestrahlung	24
3.6.1 Emissionsgrad	25
3.6.2 Absorptionsgrad	26
3.7 Druckverlust	27

3.7.1	Druckverlust in Rohren und Armaturen	27
3.7.2	Druckverlust von in Strömungsrichtung orientierten Einbauten	27
3.7.3	Druckverlust von Rohrbündeln quer zur Strömungsrichtung	27
3.8	Vereinfachungen & Annahmen	28
3.8.1	Räumliche Auflösung des Wandwärmeübergangs	28
3.8.2	Kleine Volumina	28
3.8.3	Vernachlässigung von Verbindungsrohren	29
3.8.4	Mindestmassenstrom	29
3.8.5	Reines Wasser	29
3.9	Fazit	29
4	Modellierung thermischer Kraftwerke	30
4.1	Überblick und Struktur der Gesamtmodelle	30
4.2	Basismodelle	31
4.2.1	Kohlemühlen	31
4.2.2	Brennkammer	33
4.2.3	Heizflächen	34
4.2.4	Zweiphasenbehälter	37
4.2.5	Turbinen	40
4.2.6	Pumpen, Lüfter und Verdichter	42
4.3	Blockleitsystem Kraftwerk Rostock	43
4.3.1	Überblick über das abgebildete Blockleitsystem	43
4.3.2	Konzept der modellgestützten Blockregelung	44
4.3.3	Blockführung und Vorsteuerung	45
4.3.4	Korrektur des Brennstoffmassenstroms	46
4.3.5	Führung der Speisewassermengen	47
4.4	Blockleitsystem der GuD-Anlage Mainz Wiesbaden	49
4.4.1	Leistungs- und Brennstoffregelung Gasturbine	49
4.4.2	Abgastemperaturregelung	50
4.4.3	Dreikomponentenregelung	51
4.5	Fazit	52
5	Validierung	53
5.1	Kraftwerk Rostock	53
5.1.1	Betrachtetes Szenario und Randbedingungen	53
5.1.2	Dampfdrücke und Massenströme	54
5.1.3	Dampftemperaturen	54
5.1.4	Generatorleistung	55
5.2	GuD-Anlage Mainz Wiesbaden	56
5.2.1	Beschreibung des Szenarios und Randbedingungen	56
5.2.2	Gasturbine	56
5.2.3	Dampfdrücke und Massenströme	58
5.2.4	Naturumlauf	59

5.2.5 Dampftemperaturen	59
5.2.6 Generatorleistung der Gas- und Dampfturbine	60
5.3 Fazit	60
6 Bewertung zukünftiger Kraftwerksbeanspruchungen	61
6.1 Grundbeanspruchungen infolge Lastanforderung	61
6.2 Steinkohle-Kraftwerk Rostock	62
6.2.1 Referenzszenario bei heutiger Laständerungsgeschwindigkeit	62
6.2.2 Szenario erhöhter Lastgradient	66
6.3 GuD-Anlage Mainz Wiesbaden	69
6.3.1 Referenzszenario bei heutiger Laständerungsgeschwindigkeit	69
6.3.2 Szenario erhöhter Lastgradient	72
6.4 Fazit	74
7 Restriktionen bei der Flexibilisierung von thermischen Kraftwerken	76
7.1 Steinkohlekraftwerke	76
7.1.1 Erhöhung des Lastgradienten	76
7.1.2 Absenkung der Mindestlast	78
7.1.3 Weitere Restriktionen bei der Flexibilisierung	87
7.2 GuD-Anlagen	88
7.2.1 Erhöhung des Lastgradienten	88
7.2.2 Absenkung Mindestlast	90
7.3 Fazit	95
8 Optimierungsvorschläge zur Steigerung der Flexibilität	96
8.1 Steinkohle-Kraftwerk Rostock	96
8.1.1 Asymmetrischer Lastgradient	96
8.1.2 Berücksichtigung Mühlendynamik für Speisewassermenge	97
8.1.3 Kohlenstaubmassenstrommessung	98
8.1.4 Beobachtergestützte Einspritzkühlerregelung	98
8.1.5 Szenario Kraftwerk mit optimierter Leittechnik	102
8.1.6 Innenberippter Verdampfer	107
8.1.7 Indirekte Steinkohle-Staubfeuerung	108
8.1.8 Mehrsträngigkeit	109
8.1.9 Drehzahlregelung großer Verbraucher	109
8.2 GuD-Anlage Mainz Wiesbaden	110
8.2.1 Vorwärmung der Umgangsluft	110
8.2.2 Bensonabhitzeckessel	112
9 Jahreslebensdauerverbrauch der modellierten Kraftwerke	113
9.1 Steinkohlekraftwerk Rostock	113
9.2 GuD-Anlage Mainz Wiesbaden	116

10 Zusammenfassung	118
10.1 Fazit der Arbeit	118
10.2 Ausblick	120
Anhang	121
A Literaturverzeichnis	121
B Veröffentlichungen	127
C Abbildungsverzeichnis	129
D Tabellenverzeichnis	134
E Verbrennungsrechnung	135
E.1 Brennstoff Steinkohle	135
E.2 Brennstoff Erdgas	138
F Stoffdaten und Materialkennwerte	140
F.1 Frischluft und Rauchgas	140
F.2 Wasser / Dampf	140
F.3 Stähle	141
G Weitere Funktionalitäten des Steinkohlekraftwerk-Blockleitsystems	142
G.1 Regelung der Kohlemühlen	142
G.2 Regelung der Frischluftmenge	142
G.3 Einspritzkühlerregelung	143
G.4 Regelung des Umwälzmassenstroms	144
G.5 Regelung der Turbinenumleitstationen	145
H Weitere Funktionalitäten des Blockleitsystems der GuD-Anlage	148
H.1 Speisewasserbehälterfüllstands- und Temperaturregelung	148
H.2 Einspritzkühlerregelung	149
H.3 HD-, MD- und ND-Umleitregelung	149
I Bewertungsmaßstäbe für erhöhte Dynamik-Anforderungen	151
I.1 Instationäre Lochrandspannungen entsprechend TRD 301	151
I.2 Klassierung der Lastzyklen	153
I.3 Lebensdauerverbrauch infolge TRD 301 und 508	155
I.4 Rissfortschrittsrate nach FKM-Richtlinie	156
I.5 Belastung der Turbinenwellen	158
J Beobachter Modell	160
J.1 Physikalische Modellierung	160

J.2 Implementierung der beobachtergestützten Regelung	162
Eidesstattliche Erklärung	164
Curriculum Vitae	165