

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung . . . . .	II
Abstract . . . . .	III
Abkürzungsverzeichnis . . . . .	IV
Nomenklatur . . . . .	VI
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
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
<b>2 Umfang der thermodynamischen Untersuchungen</b>	<b>8</b>
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
<b>3 Thermodynamische Grundlagen</b>	<b>17</b>
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 Rauchgassseitiger konvektiver Wärmeübergang . . . . .	21
3.5.2 Wasserdampfseitiger konvektiver Wärmeübergang . . . . .	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
<b>4</b>	<b>Modellierung thermischer Kraftwerke</b>	<b>30</b>
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 Vorstenerung . . . . .	45
4.3.4	Korrektur des Brennstoffmassenstroms . . . . .	46
4.3.5	Führung der Speisewassermenge . . . . .	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
<b>5</b>	<b>Validierung</b>	<b>53</b>
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
<b>6</b>	<b>Bewertung zukünftiger Kraftwerksbeanspruchungen</b>	<b>61</b>
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
<b>7</b>	<b>Restriktionen bei der Flexibilisierung von thermischen Kraftwerken</b>	<b>76</b>
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
<b>8</b>	<b>Optimierungsvorschläge zur Steigerung der Flexibilität</b>	<b>96</b>
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 Umgebungsluft . . . . .	110
8.2.2	Bensonabhitzeessel . . . . .	112
<b>9</b>	<b>Jahreslebensdauerverbrauch der modellierten Kraftwerke</b>	<b>113</b>
9.1	Steinkohlekraftwerk Rostock . . . . .	113
9.2	GuD-Anlage Mainz Wiesbaden . . . . .	116

<b>10 Zusammenfassung</b>	<b>118</b>
10.1 Fazit der Arbeit . . . . .	118
10.2 Ausblick . . . . .	120
<b>Anhang</b>	<b>121</b>
<b>A Literaturverzeichnis</b>	<b>121</b>
<b>B Veröffentlichungen</b>	<b>127</b>
<b>C Abbildungsverzeichnis</b>	<b>129</b>
<b>D Tabellenverzeichnis</b>	<b>134</b>
<b>E Verbrennungsrechnung</b>	<b>135</b>
E.1 Brennstoff Steinkohle . . . . .	135
E.2 Brennstoff Erdgas . . . . .	138
<b>F Stoffdaten und Materialkennwerte</b>	<b>140</b>
F.1 Frischluft und Rauchgas . . . . .	140
F.2 Wasser / Dampf . . . . .	140
F.3 Stähle . . . . .	141
<b>G Weitere Funktionalitäten des Steinkohlekraftwerk-Blockleitsystems</b>	<b>142</b>
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
<b>H Weitere Funktionalitäten des Blockleitsystems der GuD-Anlage</b>	<b>148</b>
H.1 Speisewasserbchälterfüllstands- und Temperaturregelung . . . . .	148
H.2 Einspritzkühlerregelung . . . . .	149
H.3 HD-, MD- und ND-Umleitregelung . . . . .	149
<b>I Bewertungsmaßstäbe für erhöhte Dynamik-Anforderungen</b>	<b>151</b>
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
<b>J Beobachter Modell</b>	<b>160</b>
J.1 Physikalische Modellierung . . . . .	160

J.2 Implementierung der beobachtergestützten Regelung . . . . . 162

Eidesstattliche Erklärung . . . . . 164

Curriculum Vitae . . . . . 165