

Simulation stationärer und instationärer Betriebszustände kombinierter Gas- und Dampfturbinenanlagen

von der Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

von
Dipl.-Ing. Thorsten Löhr
aus Wolfenbüttel

Eingereicht am: 25. Februar 1999
Mündliche Prüfung am: 28. 06. 1999
Berichterstatter: Prof. Dr. techn. R. Leithner
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. G. Tsatsaronis
Kommissionsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. E. Schnieder

Braunschweig, 3. März 2000



Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	X
1 Einleitung	1
2 Stationäre und instationäre Simulation	2
2.1 Stand der Technik	2
2.2 ENBIPRO - stationäre Simulation	3
2.2.1 Allgemeine Beschreibung	3
2.2.2 Anwendungen	4
2.3 DYNKE - instationäre Simulation	5
2.3.1 Allgemeine Beschreibung und Anwendung	5
3 Zusammenhang von Berechnungsverfahren	7
3.1 Die Diskretisierung am Beispiel eines Luftvorwärmers	8
3.2 Instationäre Berechnung (2D)	9
3.3 Stationäre Berechnung (1D)	11
3.4 Stationäre Berechnung (0D)	12
4 Modellbildung	14
4.1 Modellierung von Gasturbinenanlagen	14
4.1.1 Brennkammer	16
4.1.2 Eigenschaften des Strömungsmediums	21
4.1.3 Berechnung der Turbokomponenten Verdichter und Gasturbine	22
4.1.3.1 Ähnlichkeit der Betriebspunkte	23

4.1.3.2	Kennfelder	24
4.1.3.3	Bestimmung der vollständigen Austrittszustände	25
4.1.3.4	Verdichter	26
4.1.3.5	Turbine	27
4.1.4	Turbinenkühlluft	28
4.2	Modellbildung von Dampferzeugern	33
4.2.1	Modellierung der Rauchgasseite	33
4.2.1.1	Wärmeübergang an berippten Rohren	34
4.2.1.2	Wärmedurchgangskoeffizient	37
4.2.2	Modellierung der Rohrwand	37
4.2.3	Modellierung der Arbeitsstoffseite	38
4.2.3.1	Rohrmodell	38
4.2.3.2	Wärmeübergang	39
4.2.3.3	Druckverlust	41
4.2.3.4	Druck- und Massenstromiteration	42
4.3	Modellierung der Dampfturbine	43
4.4	Modellierung von Anlagenkomponenten	44
4.4.1	Stromanfang	45
4.4.2	Wärmeaustauscher	46
4.4.3	Abscheider	46
4.4.4	Pauschale Energiezu- und abfuhr	47
4.4.5	Mischstellen und Verzweigungen	47
4.4.6	Drosselstelle/Rohr	47
4.4.7	Niveaugefäß	47
4.5	Regelung	49
4.5.1	Thermodynamische Größen	50
4.5.2	Komponenten	51

6	Das Lösungsverfahren	54
6.1	Koeffizienten	56
6.2	Relaxation und Toleranz	60
7	Beschreibung der Kombianlage RDK 4S	61
7.1	Die Beschreibung des Abhitzedampferzeugers	61
7.1.1	Schaltung der Heizflächen	63
7.1.2	Heizflächen	63
7.1.3	Umwälzungen und Temperaturhaltung	64
7.1.4	Anmerkungen zur Modellierung	65
7.2	Die Regelung des Abhitzedampferzeugers	66
7.2.1	HD-Speisewasser- und Umwälzregelung	67
7.2.2	ND-Speisewasser- und Umwälzregelung	71
7.2.3	Einspritzregelungen	76
7.2.4	Blockregelung	77
7.2.5	Kondensatumwälzregelung	80
7.2.6	Regler	81
8	Simulationsergebnisse	82
8.1	Die stationäre Berechnung (0D)	82
8.2	Die stationäre Berechnung (1D)	83
8.3	Die instationäre Berechnung	86
8.3.1	Lastverminderung von 100 % nach 75%	87
8.3.2	Lastverminderung von 75% nach 50%	91
8.3.3	Laststeigerung von 50% nach 75%	94
8.3.4	Laststeigerung von 75% nach 100%	97
8.3.5	Lastverminderung von 75 % im Zwangsdurchlaufbetrieb nach 50% in den Umwälzbetrieb	101
8.3.6	Laststeigerung von 50 % im Umwälzbetrieb nach 75% in den Zwangsdurchlaufbetrieb	103
8.4	Modellverifizierung von ENBIPRO	107

8.4.1	Das Meßdatenerfassungssystem	109
8.4.2	Erfasste Lastfälle	109
8.4.3	Stationäre Vollast	110
8.4.4	Stationäre Teillast	112
8.4.5	Lastwechsel von 97% nach 70%	113
8.4.6	Lastwechsel von 68% nach 97%	116
8.5	Instationäre Berechnung einschließlich Regelung	119
8.5.1	Lastverminderung von 97% nach 70%	119
8.5.2	Laststeigerung von 68% nach 97%	121
9	Zusammenfassung	127
A	Stoffwerte für die Rohrwände	129
B	Komponenten der Regelungstechnik	130
B.1	Meß-/Anfangsstelle	131
B.2	PTx-Glied	132
B.3	Sprungglied	133
B.4	Funktion	133
B.5	Gradienten-Limitierer	134
B.6	PID-Glied	135
B.7	Limitierer	136
B.8	Schalter mit konstanten Vergleichswerten	137
B.9	Schalter mit variablen Vergleichswerten	138
B.10	Schalter mit variablem Vergleichsbereich	139
B.11	Stoffwertebestimmung für Wasser und Dampf	140
B.12	Kontrollmeldung	141
B.13	Multiplikation/Division	142
B.14	MAX-Funktion	143
B.15	MIN-Funktion	143
B.16	Subtraktion	144
B.17	Addition	144
B.18	Set-Reset-Schalter	145
B.19	Ziel-/Wirkstelle	146
B.20	Beispiel	146

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	IX
C Visualisierung von Prozeßparametern	148
D Weitere Erläuterungen zu ENBIPRO V4.0k	149
D.1 Änderungen zur Version ENBIPRO 1.0	149
D.2 Ein- und Ausgabedaten	149
D.3 Sonstige Hinweise	154
Literaturverzeichnis	155