

# Inhaltsverzeichnis

<b>Autoren</b> .....	xxv
<b>Nomenklatur</b> .....	xxxi
<b>1 Gasturbinentypen – eine Übersicht</b> .....	1
Alexander Wiedermann	
1.1 Betriebsarten und Gasturbinentypen .....	2
1.2 Zur Entwicklung der Gasturbine .....	6
Literaturverzeichnis .....	10
<b>2 Thermodynamische Grundlagen</b> .....	11
Jost Braun	
2.1 Definitionen der verwendeten Größen .....	12
2.1.1 Ideales Gasverhalten .....	12
2.1.2 Unveränderte Stoffeigenschaften im Kreisprozess .....	12
2.1.3 Mittlere Wärmekapazität über Zustandsänderungen .....	13
2.1.4 Thermischer Wirkungsgrad und Prozesswirkungsgrade .....	14
2.1.5 Verdichter- und Turbinenwirkungsgrade .....	15
2.1.6 Mischtemperatur und Mischwirkungsgrade .....	17
2.2 Ideale Vergleichsprozesse .....	19
2.2.1 Carnot-Prozess .....	19
2.2.2 Umsetzung des Carnot-Prozesses mit Gasen .....	20
2.2.3 Offener Joule- (oder Brayton-)Prozess .....	21
2.2.4 Ericsson-Prozess .....	22
2.3 Reale Gasturbinenprozesse .....	23
2.3.1 Einfluss der Hauptverluste auf den Joule-Prozess .....	24
2.3.2 Einfluss von Druckverhältnis und Prozesstemperaturen .....	27
2.3.3 Spezifische Arbeit, Wirkungsgrad und Abgastemperatur .....	29
2.3.4 Prozessbestimmende Komponenten .....	30
2.4 Varianten des offenen Joule-Prozesses zur Prozessverbesserung	35
2.4.1 Einfluss einer Zwischenerhitzung (Reheat) .....	35

2.4.2	Einfluss einer Zwischenkühlung .....	39
2.4.3	Einfluss eines Rekuperators .....	40
2.4.4	Leistungsorientierte Prozessverbesserungen .....	41
2.4.5	Beispiele stationärer Gasturbinen .....	42
	Literaturverzeichnis .....	47
<b>3</b>	<b>GT-Kraftwerke .....</b>	<b>49</b>
	Lothar Balling	
3.1	Historische Entwicklung .....	49
3.2	Frühe Anwendungen .....	50
3.3	Wandel der Kundenstruktur und Marktanforderungen .....	52
3.4	Betriebs- und Wartungskosten .....	55
3.5	GT-Kraftwerke für die Stromerzeugung heute .....	56
3.5.1	Gasturbinen-Kraftwerke (simple cycle) .....	56
3.5.2	Phasenschieberbetrieb .....	58
3.5.3	Anlagen zur Wärme-Kraft-Kopplung .....	58
3.5.4	Gasturbinen für Verbund-/Kombikraftwerke und Repowering ..	58
3.5.5	GuD-Anlagen mit integrierter Vergasung .....	59
3.5.6	Luftspeicher-Kraftwerke („Compressed Air Storage System“ = CAS) .....	60
3.6	Aufbau des GT-Kraftwerkes .....	61
3.6.1	Gasturbine .....	61
3.6.2	Gasturbinen-Hilfssysteme .....	62
3.6.3	Generator, Hochspannungssystem .....	65
3.6.4	Ansaugsystem .....	66
3.6.5	Kupplung .....	68
3.6.6	Abgassystem .....	68
3.6.7	Elektrotechnik .....	68
3.6.8	Leittechnik .....	69
3.6.9	Bautechnik .....	71
3.6.10	Außen- und Nebenanlagen .....	72
3.7	GuD-Kraftwerke .....	72
3.8	Kraftwerkstypen, Konzepte .....	78
3.8.1	Mehrwellenanlagen .....	78
3.8.2	Einwellenanlagen .....	81
3.8.3	Standardisierung und Modularisierung .....	83
3.8.4	Basiskraftwerk mit Optionen .....	85
3.8.5	Reduzierte Abwicklungszeiten .....	86
3.8.6	Konzept einer modernen Testanlage .....	87
3.9	Hauptkomponenten der GuD-Anlagen .....	88
3.9.1	Wasser-Dampf-Kreislauf .....	89
3.9.2	Abhitzedampferzeuger .....	92
3.10	Betrieb der GuD-Anlage .....	92
	Literaturverzeichnis .....	97

<b>4</b>	<b>Aeroderivate</b> .....	101
	Alexander Wiedermann	
4.1	Prinzipieller Aufbau .....	101
4.2	Bevorzugte Einsatzgebiete von Aeroderivaten und Industriegasturbinen in Schwerbauweise .....	104
	Literaturverzeichnis .....	108
<b>5</b>	<b>Kraftwerkskomponenten</b> .....	109
5.1	Wellenkupplung .....	109
	Frank Rossig-Kruska	
5.1.1	Allgemeines .....	109
5.1.2	Nichtsichtbare Wellenkupplungen .....	110
5.1.3	Sichtbare Wellenkupplungen .....	112
5.2	Getriebe .....	116
	Thomas Deeg	
5.2.1	Einführung .....	116
5.2.2	Verzahnung .....	116
5.2.3	Lager .....	123
5.2.4	Getriebekonzepte .....	124
5.2.5	Werkstoffe und Wärmebehandlung .....	127
5.2.6	Herstellung von Rotoren und Verzahnungen .....	129
5.2.7	Schmierung und Getriebeverluste .....	130
5.2.8	Betriebsbedingungen und Überwachung .....	132
5.3	Abgasstrecke und Abhitzedampferzeuger in GuD-Anlagen ....	135
	Hans-Gerd Brummel	
5.3.1	Zusammenstellung der abgasführenden Komponenten, Funktionsbeschreibung, Bauformen und Varianten, Stand der Technik .....	135
5.3.2	Abhitzedampferzeuger .....	152
5.3.3	Abhitzedampferzeuger mit Sondereinbauten .....	188
5.3.4	Verhalten der Abgasstrecken/Abhitzedampferzeuger beim Anfahren eines GUD-Blocks mit Abgas-Bypasskaminen	194
5.3.5	Zusammenfassung und Ausblick (Status 2003) .....	198
5.3.6	Neue Entwicklungstendenzen bei der Abgasstrecke und bei Abhitzedampferzeugern (Status 2010) .....	199
5.4	Dampfturbine .....	207
	Andreas Feldmüller	
5.4.1	Einleitung .....	207
5.4.2	Dampfturbinen für Dampfkraftwerke .....	208
5.4.3	Anforderungen an Dampfturbinen für Kombiprozesse mit Gasturbinen .....	208
5.4.4	Bauformen der Dampfturbinen für GuD-Kraftwerke .....	211
5.4.5	Beschaufelung .....	215
5.4.6	Konstruktive Aspekte von Dampfturbinen für GuD-Prozesse ..	218

5.5	Wärmeabfuhrsystem .....	224
	Georg Haberberger und Dieter Blanck	
5.5.1	Komponenten des Kalten Endes .....	224
5.5.2	Einfluss des Kalten Endes auf den Wirkungsgrad .....	225
5.5.3	Kühlverfahren .....	225
5.5.4	Auswahl des Kühlverfahrens .....	241
5.5.5	Niederdruckteilturbine .....	242
5.5.6	Oberflächenkondensator .....	244
5.5.7	Abwärmenutzung .....	248
5.6	Turbogenerator .....	250
	Joachim Böer und Klaus Sedlazeck	
5.6.1	Allgemeines .....	250
5.6.2	Generatorbauarten im mittleren Leistungsbereich .....	259
5.6.3	Generatorerregung, Anfahrmotor- und Phasenschieberbetrieb ..	267
5.6.4	Anforderungen an Generatoren und Prüfungen .....	271
5.6.5	Ausblick .....	276
	Literaturverzeichnis .....	279
<b>6</b>	<b>Grundlagen der Strömungsmaschinen .....</b>	<b>285</b>
	Günther Dibelius	
6.1	Energieumwandlung .....	285
6.1.1	Umwandlungsprinzip .....	285
6.1.2	Auswirkung der Energieumwandlung auf die Strömungsgrößen .....	287
6.1.3	Auswirkung der Energieumwandlung auf die thermodynamischen Größen .....	288
6.1.4	Wirkungsgrade .....	292
6.2	Schaufelgitter .....	294
6.2.1	Lauf- und Leitgitter .....	294
6.2.2	Verzögerungs- und Beschleunigungsgitter .....	295
6.2.3	Verluste in Schaufelgittern .....	296
6.2.4	Gitterauslegung .....	297
6.2.5	Gitterkenngrößen .....	298
6.3	Stufe .....	302
6.3.1	Kombination von Schaufelgittern zu Stufen .....	302
6.3.2	Stufenkenngrößen .....	304
6.3.3	Stufencharakteristiken, Betriebsverhalten von Stufen .....	306
6.4	Maschine .....	307
6.4.1	Beschaufelung .....	308
6.4.2	Schaufellose Strömungsführungen .....	308
6.4.3	Maschinenkenngrößen .....	309
6.4.4	Maschinencharakteristiken, Betriebsverhalten .....	309
6.4.5	Leistungsregelung von Gasturbinen .....	310
	Literaturverzeichnis .....	311

<b>7</b>	<b>Verdichter</b>	313
	Reinhard Mönig und Ulrich Waltke	
7.1	Anforderungen an Gasturbinenverdichter	313
7.2	Grundlagen	316
7.3	Verdichterbetrieb	321
7.4	Leistungsbetrieb	325
7.5	Transsonische Verdichterstufen	328
7.6	Subsonische Verdichterstufen	335
7.7	Konzeption von Gasturbinenverdichtern	342
7.8	Auslegung und Betriebsverhalten von Gasturbinenverdichtern	352
7.9	Betrieb von Gasturbinenverdichtern	357
7.9.1	An- und Abfahren von vielstufigen Axialverdichtern	357
7.9.2	Massenstromregelung durch Leitschaufelverstellung	360
7.9.3	Drehzahlbereich und Umgebungsbedingungen	360
7.9.4	Kritische Betriebszustände	363
7.9.5	Experimentelle Erprobung	364
7.9.6	Praxisprobleme und Maßnahmen	365
	Literaturverzeichnis	369
<b>8</b>	<b>Axialturbinen</b>	371
	Herbert F. J. Bals und Konrad Vogeler	
8.1	Grundsätzliches	371
8.2	Auslegungsverfahren	376
8.3	Wahl des Reaktionsgrades	378
8.4	Festlegung des Meridiankanals	380
8.5	Festlegung der Profilhöhenlänge	384
8.6	Profilierung der Schaufeln	386
8.7	Einfluss der Radialspalte	388
8.8	Dreidimensionale Nachrechnung	388
8.9	Lebensdauerbetrachtungen	390
8.10	Betriebsgrenzen	391
8.11	Betriebsverhalten	393
	Literaturverzeichnis	395
<b>9</b>	<b>Grundlagen der Verbrennung in stationären Gasturbinen</b>	397
	Thomas Sattelmayer	
9.1	Aufgaben der Brennkammer	397
9.2	Energie- und Stoffumwandlung in der Brennkammer	399
9.3	Flammentypen	404
9.3.1	Einfluss des Brennstoffs	404
9.3.2	Hauptcharakteristika	406
9.4	Flammenstabilisierung	408
9.5	Ablauf der Reaktion	410
9.6	NO-Bildung	416
9.6.1	Kinetik	416

9.6.2	Diffusionsflamme .....	417
9.6.3	Vormischverfahren .....	418
9.6.4	Fett-Mager-Verbrennung .....	425
9.7	Rußemission .....	426
9.8	Teillastverhalten, Stufungskonzepte und Pilotierung .....	428
9.9	Flammdynamik .....	432
9.9.1	Pulsationen und Stabilisierungsmaßnahmen .....	432
9.9.2	Flammenrückschlag im Vormischbrenner .....	438
9.9.3	Selbstzündung .....	441
9.10	Aufbereitung flüssiger Brennstoffe .....	446
9.11	Zerstäubung .....	446
9.11.1	Tropfenverdampfung und -dispersion .....	448
	Literaturverzeichnis .....	451
<b>10</b>	<b>Technische Verbrennungssysteme .....</b>	<b>453</b>
	Werner Krebs, Jaan Hellat und Adnan Eroglu	
10.1	Anforderungen an technische Verbrennungssysteme .....	453
10.2	Brenner und Brennstoffzugabe .....	456
10.2.1	Hybridbrenner .....	459
10.2.2	EV-Brenner .....	461
10.2.3	SEV-Brenner .....	464
10.2.4	Zugabe von flüssigem Brennstoff .....	466
10.3	Brennkammerbauarten .....	471
10.3.1	Entwicklungshistorie .....	471
10.3.2	Silobrennkammern .....	472
10.3.3	Ringbrennkammern .....	474
10.3.4	Rohrbrennkammern .....	479
10.3.5	Brennkammerwand-Konstruktionsprinzipien und Wandkühlung .....	483
10.4	Thermoakustisch induzierte Brennkammerschwingungen .....	484
	Literaturverzeichnis .....	489
<b>11</b>	<b>Brennstoff, Brennstoffsystem und Fahrkonzept .....</b>	<b>491</b>
	Eberhard Deuker, Jaan Hellat und Wolfgang Kroll	
11.1	Aufgabe des Brennstoffsystems .....	491
11.2	Brennstoffanforderungen .....	491
11.2.1	Anforderungen an den Brennstoff Erdgas .....	492
11.2.2	Anforderungen an den Flüssigbrennstoff Dieselöl .....	495
11.3	Komponenten des Brennstoffsystems .....	497
11.3.1	Ventile .....	497
11.3.2	Rohrleitungen .....	499
11.3.3	Filter .....	499
11.3.4	Druckreduzierstation bzw. Gasverdichter (Erdgas) .....	500
11.3.5	Pumpen (Heizöl) .....	501
11.4	Brennstoffsystem für Erdgas .....	502

11.5	Brennstoffsystem für Heizöl .....	504
11.5.1	Systembeschreibung .....	504
11.5.2	Zusatzeinrichtungen für die Heizölbrenner .....	508
11.6	Fahrweisen .....	509
11.6.1	Erdgas- und Heizölbetrieb .....	509
11.6.2	Brennstoffwechsel .....	515
11.6.3	Lastabwurf .....	517
	Literaturverzeichnis .....	518
<b>12</b>	<b>Vergasung fester und flüssiger Brennstoffe .....</b>	<b>521</b>
	Andreas Heilos, Michael Huth, Jürgen Karg und Jaan Hellat	
12.1	Konzepte für Vergasungskraftwerke .....	521
12.2	Übersicht über bestehende Anlagen .....	526
12.3	Brennstoff und Brennstoffsystem .....	526
12.3.1	Brennstoffcharakterisierung .....	526
12.3.2	Brennstoffsystem .....	531
12.4	Brenner .....	531
12.4.1	Konzepte für Syngas-Verbrennung .....	531
12.4.2	Überblick über Brennerkonzepte verschiedener Hersteller .....	533
	Literaturverzeichnis .....	536
<b>13</b>	<b>Besonderheiten des Betriebs mit Schweröl, Naphtha und Kondensaten .....</b>	<b>539</b>
	Roger Waldinger und Jaan Hellat	
13.1	Anwendungsbereiche von flüssigen Sonderbrennstoffen .....	539
13.1.1	Charakteristische Brennstoffeigenschaften und Bestandteile von flüssigen Sonderbrennstoffen .....	540
13.1.2	Stoffdaten ausgewählter flüssiger Sonderbrennstoffe .....	541
13.2	Schweröl .....	541
13.2.1	Herkunft und Einsatzbereich von Schweröl .....	541
13.2.2	Gasturbinen für den Schweröleinsatz .....	543
13.2.3	Schwerölaufbereitung .....	543
13.2.4	Vermeidung von Hochtemperaturkorrosion .....	544
13.2.5	Emissionen .....	544
13.3	Naphtha und Kondensate .....	545
13.3.1	Eigenschaften von Naphtha und Kondensaten .....	545
13.3.2	Stoffeigenschaften von Naphtha, Kondensaten und Heizöl ....	545
13.3.3	Sicherheitskonzept für Naphtha und Kondensat-Betrieb .....	546
	Literaturverzeichnis .....	547
<b>14</b>	<b>Konstruktion, Berechnung und Fertigung von Verdichterschaukeln .....</b>	<b>549</b>
	Ulf D. Köller und Bernd van den Toorn	
14.1	Konstruktive Ausführung .....	549
14.1.1	Laufschaufeln .....	550
14.1.2	Leitschaufeln .....	554

14.1.3	Verstellbare Leitschaufeln .....	555
14.1.4	Werkstoffauswahl .....	556
14.2	Berechnung .....	557
14.2.1	Statische Festigkeit .....	557
14.2.2	Dynamische Festigkeit .....	560
14.3	Fertigung .....	563
14.3.1	Fertigungsarten .....	563
14.4	Experimentelle Absicherung .....	564
	Literaturverzeichnis .....	565
<b>15</b>	<b>Turbinenbeschaufelung .....</b>	<b>567</b>
	Herbert F. J. Bals und Hans-Thomas Bolms	
15.1	Allgemeine Betrachtungen .....	567
15.2	Leitschaufeln .....	567
15.2.1	Konstruktive Merkmale .....	568
15.2.2	Leitschaufelblatt .....	569
15.2.3	Fußteil .....	571
15.2.4	Kopfteil .....	572
15.2.5	Schnittstellen .....	572
15.3	Laufschaukeln .....	574
15.3.1	Konstruktive Merkmale .....	574
15.3.2	Laufschaukelblatt .....	575
15.3.3	Fußbereich .....	576
15.3.4	Anstreifkante .....	579
15.3.5	Deckband .....	579
15.3.6	Andere Dämpfungselemente .....	580
15.4	Gehäusesegmente .....	580
15.4.1	Konstruktive Merkmale .....	580
15.5	Schädigungsarten .....	581
15.5.1	Kriechschädigung .....	582
15.5.2	Thermische Ermüdung und zyklische Beanspruchung .....	582
15.5.3	Schädigung durch dynamische Beanspruchung .....	583
15.5.4	Schädigung durch Oxidation, Heißgaskorrosion .....	583
15.5.5	Schädigung durch Fremtteile .....	584
15.6	Lebensdauervorhersage .....	584
15.6.1	Statische Beanspruchung aus den Gaskräften .....	585
15.6.2	Statische Beanspruchung aus den Fliehkräften .....	586
15.6.3	Beanspruchung durch thermische Belastung .....	586
15.6.4	Dauerfestigkeit .....	587
15.6.5	Dynamische Beanspruchung aus Gaskräften .....	588
15.7	Werkstoffauswahl .....	589
15.8	Fertigung .....	590
15.8.1	Guss .....	590
15.8.2	Konventionelle Bearbeitung .....	591
15.8.3	Unkonventionelle Bearbeitung .....	591

15.8.4	Beschichtung .....	592
15.8.5	Weitere Fertigungsschritte .....	593
15.9	Reparatur .....	593
<b>16</b>	<b>Sekundärluftsystem .....</b>	<b>595</b>
	Arnd W. Reichert	
16.1	Grundlagen .....	595
16.1.1	Abgrenzungen und Definitionen .....	596
16.1.2	Einfluss des Sekundärluftsystems auf die Eckdaten des Kreisprozesses .....	597
16.1.3	Für das Sekundärluftsystem relevante Zustandsänderungen in Verdichter und Turbine .....	598
16.1.4	Strömungsphänomene in Radseitenräumen; Heißgaseinzug ...	599
16.1.5	Strömungsphänomene in rotierenden Kavitäten .....	602
16.2	Auslegung des Sekundärluftsystems .....	603
16.2.1	Anforderungen an die Kühlluftversorgung von Turbinenschaufeln .....	603
16.2.2	Anforderungen an das Sperrluftsystem .....	603
16.2.3	Relevante Betriebszustände .....	604
16.2.4	Führung der Sekundärluft zur Turbine .....	604
16.2.5	Lage der Entnahmestellen .....	605
16.2.6	Dichtungstechnologien .....	605
	Literaturverzeichnis .....	607
<b>17</b>	<b>Turbinenschaufel – Kühlung .....</b>	<b>609</b>
	Bernhard Weigand	
17.1	Einführung .....	609
17.2	Bauformen gekühlter Gasturbinenschaufeln .....	611
17.3	Der externe Wärmeübergang .....	612
17.4	Interne Wärmeübertragung .....	617
17.4.1	Prallkühlung .....	617
17.4.2	Pins .....	618
17.4.3	Rippen .....	620
17.4.4	Krümmen (180°-Umlenkungen) .....	624
17.4.5	Einfluss der Rotation .....	626
17.4.6	Dampfkühlung .....	626
17.5	Kühlungsauslegung von Schaufeln .....	627
17.5.1	Konzeptionelle Auslegung (1D) .....	628
17.5.2	Auslegung der Kühlung (2D/q3D) .....	631
17.5.3	Tests/3D-Rechnungen/-Anpassungen .....	632
17.6	Ausblick .....	633
	Literaturverzeichnis .....	634

<b>18</b>	<b>Läuferbauformen</b> .....	637
	Joachim Schulte, Michael Müller und Manfred Janssen	
18.1	Einleitung .....	637
18.2	Anforderungen an den Läufer .....	638
18.3	Läuferbauformen .....	639
18.4	Ausgeführte Maschinen .....	640
18.4.1	Rotor in Scheibenbauweise mit zentralem Zuganker .....	640
18.4.2	Rotor in Scheibenbauweise mit dezentralen Zugankern .....	643
18.4.3	Rotor in geschweißter Ausführung .....	644
18.4.4	Variationen der klassischen Läuferbauarten .....	646
18.5	Zusammenfassung .....	647
	Literaturverzeichnis .....	648
<b>19</b>	<b>Statische und dynamische Auslegung des Turbinenläufers</b> .....	649
	Ekkehard Maldfeld und Michael Müller	
19.1	Auslegungsziele und Lastfälle für den Turbinenläufer .....	649
19.2	Festigkeitsnachweise .....	651
19.2.1	Statische Auslegung .....	652
19.2.2	Dynamische Auslegung .....	672
19.3	Zusammenwirken der Auslegungsverfahren am Beispiel der mittleren Hohlwelle .....	676
19.4	Werkstoffaspekte für die Rotorauslegung .....	678
19.5	Zusammenfassung .....	679
	Literaturverzeichnis .....	680
<b>20</b>	<b>Gehäuse und Leitzug</b> .....	683
	Ekkehard Maldfeld und Michael Müller	
20.1	Einleitung .....	683
20.2	Konstruktiver Aufbau .....	684
20.3	Auslegungsziel, Anforderungen und Lastfälle für Gehäusekomponenten .....	691
20.4	Festigkeitsnachweise .....	692
20.4.1	Allgemeine Vorgehensweise .....	692
20.4.2	Flächenpressungen .....	697
20.4.3	Schrauben .....	697
20.4.4	Auslegung von Teilfugenflanschen .....	699
20.4.5	Schweißverbindungen .....	701
20.4.6	Dynamische Auslegung .....	702
20.5	Zusammenfassung .....	703
	Literaturverzeichnis .....	703
<b>21</b>	<b>Spalte</b> .....	705
	Arnd W. Reichert	
21.1	Grundlagen .....	705
21.1.1	Einfluss der Spalte auf die Eckdaten des Kreisprozesses .....	705
21.1.2	Anteile von Spalten .....	706

- 21.2 Spaltauslegung ..... 707
- 21.3 Gestaltung von spaltbestimmenden Bauteilen ..... 709
  - 21.3.1 Einfluss von Rotorbauformen und Kühlkonzepten ..... 709
  - 21.3.2 Gestaltung der Statorbauteile, Justiervorrichtungen ..... 710
  - 21.3.3 Berücksichtigung von Verschiebungstrajektoren,  
Einlaufschichten ..... 710
  - 21.3.4 Anstreifkanten ..... 711
  - 21.3.5 Aktive Methoden ..... 711
- Literaturverzeichnis ..... 712
- 22 Lagerung – Grundlagen und konstruktive Gestaltung ..... 713**
  - Stefan Verstege und Frank Böckel
  - 22.1 Einführung ..... 713
  - 22.2 Grundlagen ..... 713
    - 22.2.1 Strömungsmechanische Grundlagen ..... 715
    - 22.2.2 Lagertypen, Lagerbauformen ..... 719
    - 22.2.3 Auslegungskriterien, Betriebsparameter ..... 724
    - 22.2.4 Berechnungsverfahren ..... 725
    - 22.2.5 Lagerwerkstoffe ..... 730
  - 22.3 GT-Lagerung, konstruktiver Aufbau ..... 732
    - 22.3.1 Lagerungskonzept der GT ..... 732
    - 22.3.2 Radiallager ..... 732
    - 22.3.3 Axiallager ..... 733
  - Literaturverzeichnis ..... 735
- 23 Keramische Komponenten ..... 737**
  - Holger Grote, Christine Taut, Wolfgang Kollenberg und Uwe Rettig
  - 23.1 Hintergrund und Einsatzbereich ..... 737
  - 23.2 Vorteile und Risiken feuerfestkeramischer  
Brennkammerauskleidungen ..... 740
  - 23.3 Keramische Komponenten im Einsatz: keramische Hitzeschilde ..... 740
    - 23.3.1 Anforderungen an keramische Hitzeschilde ..... 740
    - 23.3.2 Modellierung des Betriebsverhaltens von Feuerfestkeramik ... 741
    - 23.3.3 Konstruktion ..... 742
    - 23.3.4 Werkstoffeigenschaften ..... 744
    - 23.3.5 Betriebserfahrungen – Versagensmechanismen ..... 748
  - 23.4 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung ..... 753
  - Literaturverzeichnis ..... 754
- 24 Korrosion und Beschichtungen ..... 755**
  - Norbert Czech
  - 24.1 Korrosion im Verdichterbereich ..... 756
    - 24.1.1 Korrosive Ablagerungen ..... 756
    - 24.1.2 Beschichtungen ..... 758
    - 24.1.3 Einsatz alternativer Schaufelwerkstoffe ..... 758
  - 24.2 Korrosion im Heißgasbereich ..... 758

24.2.1	Randbedingungen .....	758
24.2.2	Brennstoffe .....	759
24.2.3	Korrosionsmechanismen .....	762
24.2.4	Korrosionsmindernde Maßnahmen .....	766
24.2.5	Korrosionsbeständige Werkstoffe .....	767
24.2.6	Schutzschichten für den Heißgasbereich .....	768
24.3	Wärmedämmschichten .....	772
24.3.1	Beschichtungsverfahren .....	773
24.3.2	Anwendungsbeispiele .....	775
24.3.3	Versagensmechanismen .....	779
24.3.4	Ausblick .....	783
	Literaturverzeichnis .....	783
<b>25</b>	<b>Hochtemperatur-Schaufelwerkstoffe .....</b>	<b>785</b>
	Christina Berger und Hermann W. Grünling	
25.1	Einführung und Geschichte .....	785
25.2	Bauteilanforderungen (Beanspruchungen, Werkstoffeigenschaften) .....	791
25.3	Fe-Basiswerkstoffe .....	793
25.4	Co-Basiswerkstoffe .....	795
25.5	Ni-Basiswerkstoffe .....	797
25.6	Werkstoffeigenschaften .....	808
	Literaturverzeichnis .....	823
<b>26</b>	<b>Normung .....</b>	<b>829</b>
	Bernard Becker	
26.1	Allgemeine Hinweise .....	829
26.2	Bauweise und Entwicklung .....	831
26.2.1	Schwachstellen vermeiden .....	831
26.2.2	Bauteilspezifische Auslegungskriterien .....	832
26.3	Erprobung, Betrieb und Anwendungen .....	833
	Literaturverzeichnis .....	834
<b>27</b>	<b>Montage .....</b>	<b>837</b>
	Willi Paschmann	
27.1	Montageplanung .....	838
27.1.1	Technische Planung .....	839
27.1.2	Terminplanung .....	839
27.1.3	Personalplanung .....	839
27.1.4	Planung der Baustellenorganisation .....	840
27.1.5	Planung der Baustellenlogistik .....	840
27.2	Montagedurchführung .....	840
27.2.1	Montagehandbuch (erection manual) .....	840
27.2.2	Montageschritte (vereinfacht) .....	841
27.2.3	Montageabschluss .....	841

<b>28 Ausrichten des Wellenstrangs</b> .....	843
Willi Paschmann	
28.1 Begriffe .....	843
28.2 Ausrichtmethoden .....	844
28.2.1 Axial-Radial-Verfahren oder AR-Methode .....	844
28.2.2 Doppel-Radial-Verfahren oder DR-Methode .....	844
28.2.3 Doppel-Axial-Verfahren oder DA-Methode .....	846
28.3 Werkzeuge und Vorrichtungen .....	847
28.4 Vorausrichtung des Wellenstrangs .....	847
28.5 Endausrichtung des Wellenstrangs am Beispiel eines Turbosatzes SGT5-4000F .....	847
28.6 Kuppeln des Wellenstrangs, Dokumentation .....	851
Literaturverzeichnis .....	852
<b>29 Inbetriebsetzung</b> .....	853
Michael Wegen	
29.1 Einleitung .....	853
29.2 Inbetriebsetzungsplanung .....	853
29.2.1 Technische IBS-Planung .....	853
29.2.2 Dokumentation .....	854
29.2.3 Personalplanung .....	855
29.3 Inbetriebsetzungsablauf .....	857
29.3.1 Voraussetzungen für die IBS .....	858
29.3.2 IBS-Phasen .....	858
29.3.3 Probebetrieb .....	862
29.4 Inbetriebsetzung nach einer Servicemaßnahme .....	863
Literaturverzeichnis .....	865
<b>30 Maschinendynamik</b> .....	867
Peter Wutsdorff	
30.1 Schwingungsmessungen .....	867
30.1.1 Lagergehäuseschwingungsmessung .....	868
30.1.2 Wellenschwingungsmessung .....	870
30.1.3 Phasenmessung .....	871
30.1.4 Hinweise zur praktischen Durchführung von Betriebsschwingungsmessungen .....	872
30.2 Kritische Drehzahlen .....	872
30.3 Kinetisches Verhalten der Gleitlager .....	875
30.4 Untersuchungen an der äußeren Lagerabstützung .....	876
30.5 Einfluss des Kupplungszustands .....	879
30.6 Leistungsabhängige Schwingungen .....	881
30.6.1 Getriebemaschinen .....	882
30.6.2 Lastabhängige Schwingungen an Generatoren .....	883
30.6.3 Mediumbedingte Schwingungen .....	884
30.7 Anstreifprobleme und thermische Unwuchten .....	885

30.8	Axialschwingungen .....	889
30.9	Instabilitätsschwingungen .....	890
30.10	Auswuchten .....	892
30.11	Ausblick .....	896
	Literaturverzeichnis .....	898
<b>31</b>	<b>Abnahmemessungen .....</b>	<b>899</b>
	Klaus Werner	
31.1	Zielsetzung .....	899
31.2	Grundlagen, Normen .....	899
31.3	Vorbereitung .....	900
31.3.1	Gespräche, Prozeduren, Festlegungen .....	901
31.3.2	Messinstallation .....	901
31.3.3	Messgrößen .....	903
31.4	Durchführung .....	903
31.4.1	Koordination .....	903
31.4.2	Betriebszustand .....	905
31.4.3	Dauer .....	906
31.4.4	Schwankungen .....	906
31.5	Wesentliche Messgrößen .....	906
31.5.1	Leistung .....	906
31.5.2	Brennstoff .....	907
31.5.3	Abgastemperatur .....	908
31.6	Auswertung .....	908
31.6.1	Ansaugmassenstrom und Turbineneintrittstemperatur .....	908
31.6.2	Umrechnung .....	909
31.6.3	Ein-/Mehrwellenanordnung .....	911
31.6.4	Solo-/Kombibetrieb .....	911
31.6.5	Fehlerbetrachtung .....	911
31.6.6	Bericht .....	913
	Literaturverzeichnis .....	922
<b>32</b>	<b>Systematik der Erprobung .....</b>	<b>923</b>
	Olaf König und Christof Lechner	
32.1	Einführung .....	923
32.1.1	Komponentenversuchsstand .....	924
32.1.2	Erprobung im Kraftwerk .....	927
32.1.3	Erprobung im Prüffeld .....	929
32.2	Strategie der Erprobung .....	933
	Literaturverzeichnis .....	933
<b>33</b>	<b>Versuchsmesstechnik .....</b>	<b>935</b>
	Stefan L.F. Frank und Frank Woditschka	
33.1	Radialspaltmessungen .....	935
33.2	Temperaturmessungen .....	938
33.2.1	Thermoelemente .....	938

33.2.2	Thermofarben .....	940
33.2.3	Optische Pyrometrie .....	940
33.3	Verbrennungsmessungen .....	944
33.3.1	Rauchgasanalyse .....	944
33.3.2	Flammenbeobachtung .....	945
33.4	Schaufelschwingungsmessungen .....	946
33.4.1	Schaufelschwingungen .....	947
33.4.2	Stillstandsuntersuchungen .....	948
33.4.3	Betriebsmessungen .....	951
33.4.4	Berührende Messverfahren .....	951
33.4.5	Datenerfassung und Auswertung .....	958
33.4.6	Berührungslose Verfahren .....	961
	Literaturverzeichnis .....	964
<b>34</b>	<b>Stationäres Betriebsverhalten .....</b>	<b>967</b>
	Andreas Bauer und Stefan Rofka	
34.1	Grundlagen .....	968
34.2	Abweichung vom Referenzzustand .....	969
34.3	Teillastverhalten .....	973
34.3.1	Verstellung von Verdichterleitreihen .....	974
34.3.2	Absenkung der Turbineneintrittstemperatur .....	976
34.3.3	Methoden zur Leistungssteigerung .....	977
34.4	Einfluss des Brennstoffes .....	980
34.5	Spezielle Betriebsfälle .....	983
34.5.1	Frequenzabweichung .....	983
34.5.2	Verschmutzung und Vereisung der Verdichterbeschaufelung .....	984
34.5.3	Alterung .....	985
	Literaturverzeichnis .....	986
<b>35</b>	<b>Automatisierungstechnik .....</b>	<b>987</b>
	Olaf Drobner und Andreas Pahl	
35.1	Turbinen- und Generatorregelung .....	988
35.1.1	Einfluss der Regelungen im Gasturbinenbetrieb .....	988
35.1.2	Struktur der Regelungen .....	992
35.1.3	Stellantriebe .....	996
35.2	Steuerung des Gasturbosatzes und dessen Hilfssysteme .....	997
35.2.1	Gliederung der Steuerungsfunktionen .....	997
35.2.2	Zusammenwirken der Steuerungsfunktionen im Gasturbinenbetrieb .....	999
35.3	Turbinenschutz .....	1003
35.3.1	Grundsätzliche Anforderungen an Schutzeinrichtungen .....	1004
35.3.2	Wichtige Schutzeinrichtungen für Gasturbinen .....	1007
35.3.3	Projektierung von Schutzeinrichtungen .....	1010

35.4	Einsatz und Projektierung moderner Leittechniksysteme für die Gasturbinenautomatisierung .....	1010
	Literaturverzeichnis .....	1012
<b>36</b>	<b>Ferndiagnose von Kraftwerks-Gasturbinenanlagen .....</b>	<b>1015</b>
	Hans-Gerd Brummel	
36.1	Einleitung .....	1015
36.2	Strategie der Ferndiagnose .....	1016
36.2.1	Mess- und Analysetechnik vor Ort .....	1020
36.2.2	Datenakquisition für die Ferndiagnose .....	1021
36.2.3	Datenfernübertragung .....	1022
36.2.4	Empfang der Daten beim Hersteller .....	1023
36.2.5	Datenanalyse .....	1023
36.2.6	Zentrale Speicherung der Daten und Diagnoseergebnisse .....	1034
36.2.7	Erstellung und Verteilung von Diagnoseberichten .....	1035
36.2.8	Automatisierter Diagnoseprozess .....	1035
36.2.9	Kommunikation mit dem Kunden bei Feststellung einer Anlagenstörung .....	1036
36.3	Maschinendiagnose durch innovative Messtechnik .....	1037
36.3.1	Anforderungen an ein Online-Laufschaukel- Überwachungssystem .....	1038
36.3.2	Technische Lösung und Entwicklungsspezifikation .....	1040
36.3.3	Infrarotbilder .....	1041
36.3.4	Stand der Entwicklung .....	1043
36.4	Zusammenfassung und Ausblick .....	1044
	Literaturverzeichnis .....	1046
<b>37</b>	<b>Betriebsdatenanalyse .....</b>	<b>1047</b>
	Ayhan Inceoglu und Christopher Steinwachs	
37.1	Einführung .....	1047
37.2	Datenbasis .....	1048
37.2.1	Ereignisse .....	1048
37.2.2	Befunde .....	1049
37.2.3	Gasturbinenlebenslauf .....	1053
37.3	Verfügbarkeitskennzahlen .....	1054
37.3.1	Allgemeines .....	1054
37.3.2	Definitionen der Formelgrößen .....	1054
37.3.3	Zuverlässigkeit V3/RF .....	1055
37.3.4	Verfügbarkeit V7/AF .....	1056
37.3.5	Zwangsausfallkennzahl V11/FOR .....	1057
37.3.6	Zeitausnutzung V17/SF .....	1057
37.3.7	Startzuverlässigkeit V18/SR .....	1057
37.4	Risikoabschätzung von Zuverlässigkeitsgarantiewerten .....	1058
37.4.1	Ausgangsbedingungen .....	1058
37.4.2	Generierung einer Lernkurve .....	1058

37.4.3	Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Zuverlässigkeitswerten (V3) auf Basis der Lernkurven .....	1059
37.5	Abhängigkeiten der Kennzahlen .....	1060
	Literaturverzeichnis .....	1062
<b>38</b>	<b>Wartung, Inspektionen und Ersatzteilkonzepte .....</b>	<b>1063</b>
	Gerhard Bohrenkämper	
38.1	Einleitung .....	1063
38.2	Wartungsmaßnahme Verdichterwäsche, Verdichterverschmutzung .....	1064
38.3	Heißeilverschleiß und Kriterien für die Bemessung der Inspektionsintervalle .....	1068
38.4	Instandhaltungsprogramm .....	1072
38.4.1	Instandhaltungsgerechte Gasturbinenkonstruktion .....	1072
38.4.2	Inspektionsumfang und Inspektionsintervall .....	1073
38.4.3	Heißeilinspektion und Revision .....	1074
38.4.4	Ersatzteile und reparierte Teile .....	1077
38.5	Instandhaltungsmanagement und langfristige Serviceverträge ..	1078
	Literaturverzeichnis .....	1080
<b>39</b>	<b>Modernisierungen im Gasturbinenservice .....</b>	<b>1083</b>
	Gerhard Bohrenkämper	
39.1	Ältere Gasturbinenanlagen im Wettbewerb .....	1083
39.2	Modernisierungsthemen .....	1084
39.2.1	Uprate-Optionen .....	1084
39.2.2	Reduktion von Schadstoffemissionen .....	1090
39.2.3	Erweiterung des Verbrennungs- und Brennstoffsystems .....	1092
39.2.4	Verbesserte Betriebsführung .....	1093
39.2.5	Optimierte und reduzierte Instandhaltung .....	1094
39.2.6	Kraftwerksrehabilitation mit Modernisierungen .....	1095
39.3	Lebensdauerbeurteilung von Bauteilen .....	1096
39.4	Zusammenfassung und Ausblick .....	1097
	Literaturverzeichnis .....	1098
	<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>1101</b>