

Inhaltsverzeichnis

Autoren	xxv
Nomenklatur	xxxi
1 Gasturbinentypen – eine Übersicht	1
Alexander Wiedermann	
1.1 Betriebsarten und Gasturbinentypen	2
1.2 Zur Entwicklung der Gasturbine	6
Literaturverzeichnis	10
2 Thermodynamische Grundlagen	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
3	GT-Kraftwerke	49
	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

4 Aeroderivate	101
Alexander Wiedermann	
4.1 Prinzipieller Aufbau	101
4.2 Bevorzugte Einsatzgebiete von Aeroderivaten und Industriegasturbinen in Schwerbauweise	104
Literaturverzeichnis	108
5 Kraftwerkskomponenten	109
5.1 Wellenkupplung	109
Frank Rossig-Kruska	
5.1.1 Allgemeines	109
5.1.2 Nichtschaltbare Wellenkupplungen	110
5.1.3 Schaltbare 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	Abwärmennutzung	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
6	Grundlagen der Strömungsmaschinen	285
	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	Beschaukelung	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

7	Verdichter	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
8	Axialturbinen	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 Profilsehnenlänge	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
9	Grundlagen der Verbrennung in stationären Gasturbinen	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	Flammendynamik	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
10	Technische Verbrennungssysteme	453
	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
11	Brennstoff, Brennstoffsystem und Fahrkonzept	491
	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	Brennstoffsysteem 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
12	Vergasung fester und flüssiger Brennstoffe	521
	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 Brennstoffsysteem	526
12.3.1	Brennstoffcharakterisierung	526
12.3.2	Brennstoffsysteem	531
12.4	Brenner	531
12.4.1	Konzepte für Syngas-Verbrennung	531
12.4.2	Überblick über Brennerkonzepte verschiedener Hersteller	533
	Literaturverzeichnis	536
13	Besonderheiten des Betriebs mit Schweröl, Naphtha und Kondensaten	539
	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
14	Konstruktion, Berechnung und Fertigung von Verdichterschaufeln	549
	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
15	Turbinenbeschaukelung	567
	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	Laufschaufeln	574
15.3.1	Konstruktive Merkmale	574
15.3.2	Laufschaufelblatt	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 Fremdteile	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
16	Sekundärluftsystem	595
	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 Kühlung versorgung 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
17	Turbinenschaufel – Kühlung	609
	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	Krümmer (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

18 Läuferbauformen	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
19 Statische und dynamische Auslegung des Turbinenläufers	649
Ekkehard Malfeld 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
20 Gehäuse und Leitzeug	683
Ekkehard Malfeld 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 Teilstufenflanschen	699
20.4.5 Schweißverbindungen	701
20.4.6 Dynamische Auslegung	702
20.5 Zusammenfassung	703
Literaturverzeichnis	703
21 Spalte	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 Verschiebungstrajektorien, 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	Korrasive 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	Wärmedämmenschichten	772
24.3.1	Beschichtungsverfahren	773
24.3.2	Anwendungsbeispiele	775
24.3.3	Versagensmechanismen	779
24.3.4	Ausblick	783
	Literaturverzeichnis	783
25	Hochtemperatur-Schaufelwerkstoffe	785
	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
26	Normung	829
	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
27	Montage	837
	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

28 Ausrichten des Wellenstrangs	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
29 Inbetriebsetzung	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 Probetrieb	862
29.4 Inbetriebsetzung nach einer Servicemaßnahme	863
Literaturverzeichnis	865
30 Maschinendynamik	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
31	Abnahmemessungen	899
	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
32	Systematik der Erprobung	923
	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
33	Versuchsmesstechnik	935
	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
34	Stationäres Betriebsverhalten	967
	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
35	Automatisierungstechnik	987
	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
36	Ferndiagnose von Kraftwerks-Gasturbinenanlagen	1015
	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-Laufschaufel- 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
37	Betriebsdatenanalyse	1047
	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
38	Wartung, Inspektionen und Ersatzteilkonzepte	1063
	Gerhard Bohrenkämper	
38.1	Einleitung	1063
38.2	Wartungsmaßnahme Verdichterwäsche, Verdichterverschmutzung	1064
38.3	Heißteilverschleiß 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	Heißteilinspektion und Revision	1074
38.4.4	Ersatzteile und reparierte Teile	1077
38.5	Instandhaltungsmanagement und langfristige Serviceverträge ..	1078
	Literaturverzeichnis	1080
39	Modernisierungen im Gasturbinenservice	1083
	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
	Sachverzeichnis	1101