

Inhaltsverzeichnis

1	Gasturbinentypen	1
	ALEXANDER WIEDERMANN	
1.1	Zur Entwicklung der Gasturbinauslegung	2
1.2	Aeroderivate für die stationäre Antriebstechnik und Stromerzeugung.	4
1.3	Bevorzugte Einsatzgebiete von Aeroderivaten und Industriegasturbinen in Schwerbauweise	7
2	Thermodynamische Grundlagen	13
	JOST BRAUN	
2.1	Definitionen der verwendeten Größen	14
2.1.1	Ideales Gasverhalten	14
2.1.2	Unveränderte Stoffeigenschaften im Kreisprozess	15
2.1.3	Mittlere Wärmekapazität über Zustandsänderungen	15
2.1.4	Thermischer Wirkungsgrad und Prozesswirkungsgrade.	16
2.1.5	Verdichter- und Turbinenwirkungsgrade	18
2.1.6	Mischtemperatur und Mischwirkungsgrade	20
2.2	Ideale Vergleichsprozesse	22
2.2.1	Carnot-Prozess	22
2.2.2	Umsetzung des Carnot-Prozesses mit Gasen	24
2.2.3	Offener Joule- (oder Brayton-) Prozess	24
2.2.4	Ericsson-Prozess.	26
2.3	Reale Gasturbinenprozesse	27
2.3.1	Einfluss der Hauptverluste auf den Joule-Prozess	27
2.3.2	Einfluss von Druckverhältnis und Prozesstemperaturen.	32
2.3.3	Spezifische Arbeit, Wirkungsgrad und Abgastemperatur	34
2.3.4	Prozessbestimmende Komponenten.	35
2.4	Varianten des offenen Joule-Prozesses zur Prozessverbesserung	40
2.4.1	Einfluss einer Zwischenerhitzung (Reheat)	40

2.4.2	Einfluss einer Zwischenkühlung	45
2.4.3	Einfluss eines Rekuperators	46
2.4.4	Leistungsorientierte Prozessverbesserungen	47
2.4.5	Beispiele stationärer Gasturbinen	48
3	GT-Kraftwerke	53
	LOTHAR BALLING	
3.1	Historische Entwicklung	53
3.2	Frühe Anwendungen	54
3.3	Wandel der Kundenstruktur	57
3.4	Betriebs- und Wartungskosten	59
3.5	GT-Kraftwerke für die Stromerzeugung heute	60
3.5.1	Gasturbinen-Kraftwerke (simple cycle)	60
3.5.2	Phasenschieberbetrieb	62
3.5.3	Anlagen zur Wärme-Kraft-Kopplung	62
3.5.4	Gasturbinen für Verbund-/ Kombikraftwerke und Repowering.	63
3.5.5	GuD-Anlagen mit integrierter Vergasung.	64
3.5.6	Luftspeicher-Kraftwerke („Compressed Air Storage System“ = CAS)	64
3.6	Aufbau des GT-Kraftwerkes	66
3.6.1	Gasturbine	66
3.6.2	Gasturbinen-Hilfssysteme	67
3.6.3	Generator, Hochspannungssystem.	70
3.6.4	Ansaugsystem	71
3.6.5	Kupplung	73
3.6.6	Abgassystem	74
3.6.7	Elektrotechnik.	74
3.6.8	Leittechnik.	74
3.6.9	Bautechnik.	77
3.6.10	Außen- und Nebenanlagen.	78
3.7	GuD-Kraftwerke	78
3.8	Kraftwerkstypen, Konzepte.	83
3.8.1	Mehrwellenanlagen	84
3.8.2	Einwellenanlagen	87
3.8.3	Standardisierung	90
3.8.4	Modularisierung	91
3.8.5	Basiskraftwerk mit Optionen.	92
3.8.6	Reduzierte Abwicklungszeiten	93
3.9	Hauptkomponenten der GuD-Anlagen	94
3.9.1	Wasser-Dampf-Kreislauf	94

3.9.2	Abhitzedampferzeuger	98
3.10	Betrieb der GuD-Anlage	98
4	Kraftwerkskomponenten	105
	FRANK ROSSIG-KRUSKA, THOMAS DEEG, HANS-GERD BRUMMEL, ANDREAS FELDMÜLLER, JOACHIM BÖER	
4.1	Wellenkupplung.	105
	FRANK ROSSIG-KRUSKA	
4.1.1	Allgemeines	105
4.1.2	Nichtschaltbare Wellenkupplungen	106
4.1.2.1	Stahl-Lamellenkupplungen.	106
4.1.2.2	Membrankupplungen.	107
4.1.2.3	Zahnkupplungen	108
4.1.3	Schaltbare Wellenkupplungen	109
4.2	Getriebe	113
	THOMAS DEEG	
4.2.1	Einführung	113
4.2.2	Verzahnung	113
4.2.2.1	Auslegung der Getriebeverzahnung	114
4.2.2.2	Modifikationen an der Verzahnung	116
4.2.2.3	Einfach- und Doppelschrägverzahnung.	120
4.2.3	Lager	121
4.2.4	Getriebekonzepte	122
4.2.4.1	Parallelwellengetriebe.	122
4.2.4.2	Umlaufgetriebe	124
4.2.5	Werkstoffe und Wärmebehandlung	125
4.2.5.1	Rotoren aus Einsatzstahl	125
4.2.5.2	Qualitätssicherungsmaßnahmen.	127
4.2.6	Herstellung von Rotoren und Verzahnungen	128
4.2.7	Schmierung und Getriebeverluste	129
4.2.7.1	Druckschmierung und Ölqualität	129
4.2.7.2	Ölmengen und Getriebeverluste	130
4.2.7.3	Maßnahmen zur Verminderung der Getriebeverluste	130
4.2.8	Betriebsbedingungen und Überwachung	131
4.2.8.1	Betriebsbedingungen	131
4.2.8.2	Überwachung und Inspektionen.	133
4.3	Abgasstrecke und Abhitzedampferzeuger in GuD-Anlagen	135
	HANS-GERD BRUMMEL	
4.3.1	Zusammenstellung der abgasführenden Komponenten, Funktionsbeschreibung, Bauformen und Varianten, Stand der Technik.	136

4.3.1.1	Unterteilung der Abgasstrecke	137
4.3.2	Abhitzedampferzeuger	153
4.3.2.1	Funktion des Abhitzedampferzeugers, Heizflächencharakterisierung, Kriterien der wärmetechnischen Auslegung	155
4.3.2.2	Heizflächencharakterisierung	163
4.3.2.3	AHDE-Bauarten.	178
4.3.3	Abhitzedampferzeuger mit Sondereinbauten	193
4.3.3.1	Abgasreinigungseinrichtungen.	193
4.3.3.2	Zusatzfeuerungen	195
4.3.3.3	Fernwärme- und Prozessdampfaukopplung	198
4.3.4	Verhalten der Abgasstrecken / Abhitzedampferzeuger beim Anfahren eines GuD-Blocks mit Abgas-Bypasskaminen	199
4.3.5	Zusammenfassung und Ausblick.	204
4.4	Dampfturbine	207
	ANDREAS FELDMÜLLER	
4.4.1	Einleitung	207
4.4.2	Dampfturbinen für Dampfkraftwerke.	208
4.4.3	Anforderungen an Dampfturbinen für Kombiprozesse mit Gasturbinen	208
4.4.4	Bauformen der Dampfturbinen für GuD-Kraftwerke	211
4.4.4.1	Dampfturbinen mit einer Niederdruckflut und Einwellenanlagen	211
4.4.4.2	Dampfturbinen mit zwei Niederdruckfluten und Mehrwellenanlagen	214
4.4.4.3	Dampfturbinen mit Getriebe	215
4.4.5	Beschaufelung	216
4.4.5.1	Endstufen der Niederdruckbeschaufelung	216
4.4.5.2	Hoch- und Mitteldruckbeschaufelung	217
4.4.6	Konstruktive Aspekte von Dampfturbinen für GuD-Prozesse	218
4.4.6.1	Hochdruckteilturbine.	219
4.4.6.2	Mitteldruckteilturbine	219
4.4.6.3	Niederdruckteilturbine	222
4.4.6.4	Lagerung.	223
4.4.6.5	Sperrdampf- und Wrasensystem	223
4.5	Turbogenerator	225
	JOACHIM BÖER	
4.5.1	Allgemeines	225
4.5.1.1	Wirkungsweise des Generators.	225
4.5.1.2	Konstruktiver Aufbau des Generators	227

4.5.1.3	Leistungsbestimmende Parameter des Generators	232
4.5.1.4	Wirk-, Blind- und Scheinleistung des Generators	233
4.5.1.5	Elektrische Belastungsgrenzen des Generators	234
4.5.2	Generatorbauarten im mittleren Leistungsbereich	235
4.5.2.1	Luftgekühlte Generatoren	238
4.5.2.2	Wasserstoffgekühlte Generatoren	239
4.5.3	Generatorerregung, Anfahrmotor- und Phasenschieberbetrieb .	244
4.5.3.1	Statische Erregung	245
4.5.3.2	Bürstenlose Erregung mit rotierenden Gleichrichtern	245
4.5.3.3	Generator-Anfahrmotorbetrieb	248
4.5.3.4	Generator-Phasenschieberbetrieb	249
4.5.4	Anforderungen an Generatoren und Prüfungen	249
4.5.4.1	Überblick über Generatornormen	250
4.5.4.2	Mechanische Auswirkung elektrischer Störfälle auf den Generator	251
4.5.4.3	Leistungsbereiche und Wärmeklassen des GT-Generators . . .	253
4.5.5	Ausblick	255
4.5.5.1	Generatoren mit supraleitender Feldwicklung	255
4.5.5.2	Generatoren mit direkter Netzspannung	256
4.5.5.3	Generatoren mit frei wählbarer Ständerspannung	257
5	Grundlagen der Strömungsmaschinen	259
	GÜNTHER DIBELIUS	
5.1	Energieumwandlung	259
5.1.1	Umwandlungsprinzip	259
5.1.2	Auswirkung der Energieumwandlung auf die Strömungsgrößen	261
5.1.3	Auswirkung der Energieumwandlung auf die thermodynamischen Größen	262
5.1.4	Wirkungsgrade	265
5.2	Schaufelgitter	267
5.2.1	Lauf- und Leitgitter	267
5.2.2	Verzögerungs- und Beschleunigungsgitter	268
5.2.3	Verluste in Schaufelgittern	269
5.2.4	Gitterauslegung	271
5.2.5	Gitterkenngrößen	272
5.3	Stufe	276
5.3.1	Kombination von Schaufelgittern zu Stufen	276
5.3.2	Stufenkenngrößen	278
5.3.3	Stufencharakteristiken, Betriebsverhalten von Stufen	280
5.4	Maschine	281

5.4.1	Beschaufelung	282
5.4.2	Schaufellose Strömungsführungen	283
5.4.3	Maschinenkenngrößen	283
5.4.4	Maschinencharakteristiken, Betriebsverhalten	284
5.4.5	Leistungsregelung von Gasturbinen	285
6	Verdichter	287
	WOLFGANG KAPPIS, ULRICH WALTKE	
6.1	Funktionsmerkmale des Gasturbinenverdichters.	287
6.1.1	Bausteine eines Gasturbinenverdichters.	288
6.1.2	Zusammenwirken mit anderen Gasturbinenkomponenten . . .	294
6.1.3	Leistungsdaten eines Gasturbinenverdichters.	294
6.2	Auslegung von mehrstufigen Axialverdichtern	299
6.2.1	Aerodynamische Grundlagen	299
6.2.2	Kenngrößen von Gasturbinenverdichtern.	304
6.2.3	Schaufelgitter-Grundlagen	308
6.2.3.1	Charakteristische geometrische Größen.	308
6.2.3.2	Charakteristische aerodynamische Größen	312
6.2.3.3	Profilfamilien	313
6.2.3.4	Grundlagen zum Gitterwirkungsgrad	314
6.2.3.5	Grundlagen zur Gitterumlenkung	315
6.2.3.6	Arbeitsbereich eines Schaufelgitters	316
6.2.3.7	Schaufelgitteraerodynamik.	317
6.2.4	Auslegung von Gasturbinenverdichtern.	319
6.2.5	Aerodynamische Berechnungsverfahren	326
6.2.5.1	0-dimensionale Berechnungsverfahren	326
6.2.5.2	1-dimensionale Berechnungsverfahren	327
6.2.5.3	2-dimensionale Berechnungsverfahren	328
6.2.5.4	3-dimensionale Berechnungsverfahren	333
6.2.6	Instationäre und 3-dimensionale Strömungseffekte	335
6.2.6.1	Rotating Stall / Rotierender Strömungsabriss.	335
6.2.6.2	Pumpen / Pumpstoß	337
6.2.6.3	Wandzonenprofilierung / Endbends.	339
6.2.6.4	Clocking	341
6.3	Betriebsverhalten und Betriebsgrenzen	343
6.3.1	An- und Abfahren von vielstufigen Axialverdichtern.	343
6.3.2	Massenstromregelung durch Leitschaufelverstellung.	346
6.3.3	Drehzahlbereich und Umgebungsbedingungen	347
6.3.4	Kritische Betriebszustände	349
6.4	Experimentelle Erprobung	350
6.4.1	Aerodynamisches Verhalten	350

6.4.2	Schaufelschwingungen	351
6.5	Praxisprobleme und Maßnahmen	352
6.5.1	Verdichterverschmutzung und -reinigung	352
6.5.2	Alterung	353
6.5.3	Verdichtervereisung.	354
6.5.4	Beschädigung durch Anstreifen und Fremdkörpereinschläge . .	355
6.5.5	Verdichterpumpen	356
7	Axialturbinen	357
	HERBERT F. J. BALS	
7.1	Grundsätzliches	357
7.2	Auslegungsverfahren	362
7.3	Wahl des Reaktionsgrades	364
7.4	Festlegung des Meridiankanals.	365
7.5	Festlegung der Profilsehnenlänge	369
7.6	Profilierung der Schaufeln	370
7.7	Rotor-Stator-Wechselwirkung	373
7.8	Einfluss der Radialspalte	374
7.9	Dreidimensionale Nachrechnung	375
7.10	Lebensdauerbetrachtungen.	377
7.11	Betriebsgrenzen	378
7.12	Turbinenkennfeld	380
7.13	Experimentelle Erprobung	382
8	Grundlagen der Verbrennung in stationären Gasturbinen . .	385
	THOMAS SATTELMAYER	
8.1	Aufgaben der Brennkammer	385
8.2	Energie- und Stoffumwandlung in der Brennkammer.	387
8.3	Flammentypen	393
8.3.1	Einfluss des Brennstoffs.	393
8.3.2	Hauptcharakteristika	395
8.4	Flammenstabilisierung	397
8.5	Ablauf der Reaktion.	400
8.6	NO-Bildung	406
8.6.1	Kinetik	406
8.6.2	Diffusionsflamme (nicht vorgemischte Flamme).	408
8.6.3	Vormischverfahren	409
8.6.4	Fett-Mager-Verbrennung.	416
8.7	Rußemission.	417
8.8	Teillastverhalten, Stufungskonzepte und Pilotierung.	420
8.9	Flammdynamik.	425

8.9.1	Pulsationen und Stabilisierungsmaßnahmen	425
8.9.2	Flammenrückschlag im Vormischbrenner	431
8.9.3	Selbstzündung	434
8.10	Aufbereitung flüssiger Brennstoffe	440
8.10.1	Zerstäubung	440
8.10.2	Tropfenverdampfung und -dispersion	442
9	Technische Verbrennungssysteme	447
	WERNER KREBS, JAAN HELLAT, ADNAN EROGLU	
9.1	Anforderungen an technische Verbrennungssysteme	447
9.2	Brenner und Brennstoffzugabe	451
9.2.1	Hybridbrenner	454
9.2.2	EV-Brenner	456
9.2.3	SEV-Brenner	459
9.2.4	Zugabe von flüssigem Brennstoff	461
9.3	Brennkammerbauarten	466
9.3.1	Entwicklungshistorie	466
9.3.2	Silobrennkammern	467
9.3.3	Ringbrennkammern	470
9.3.4	Rohrbrennkammern	475
9.3.5	Brennkammerwand-Konstruktionsprinzipien und Wandkühlung	480
9.4	Thermoakustisch induzierte Brennkammerschwingungen . . .	481
10	Brennstoff, Brennstoffsystem und Fahrkonzept	487
	EBERHARD DEUKER, JAAN HELLAT, WOLFGANG KROLL	
10.1	Aufgabe des Brennstoffsystems	487
10.2	Brennstoffanforderungen	488
10.2.1	Anforderungen an den Brennstoff Erdgas	488
10.2.2	Anforderungen an den Flüssigbrennstoff Dieselöl	491
10.3	Komponenten des Brennstoffsystems	493
10.3.1	Ventile	493
10.3.2	Rohrleitungen	495
10.3.3	Filter	496
10.3.4	Druckreduzierstation bzw. Gasverdichter (Erdgas)	496
10.3.5	Pumpen (Heizöl)	497
10.4	Brennstoffsystem für Erdgas	499
10.5	Brennstoffsystem für Heizöl	501
10.5.1	Systembeschreibung	501
10.5.2	Zusatzeinrichtungen für die Heizölbrenner	505
10.6	Fahrweisen	506

10.6.1	Erdgas- und Heizölbetrieb	506
10.6.2	Brennstoffwechsel	512
10.6.3	Lastabwurf	514
11	Kohle- und Teervergasung.	517
	MICHAEL HUTH, JAAN HELLAT	
11.1	Konzepte für Vergasungskraftwerke	517
11.2	Übersicht über bestehende Anlagen	521
11.3	Auslegung von Brenner und Brennstoffsystem	521
12	Besonderheiten des Betriebs mit Schweröl, Naphtha und Kondensaten.	529
	ROGER WALDINGER, JAAN HELLAT	
12.1	Anwendungsbereiche von flüssigen Sonderbrennstoffen	529
12.1.1	Charakteristische Brennstoffeigenschaften und Bestandteile von flüssigen Sonderbrennstoffen	531
12.1.2	Stoffdaten ausgewählter flüssiger Sonderbrennstoffe.	531
12.2	Schweröl	532
12.2.1	Herkunft und Einsatzbereich von Schweröl.	532
12.2.2	Gasturbinen für den Schweröleinsatz	532
12.2.3	Schwerölaufbereitung.	534
12.2.4	Vermeidung von Hochtemperaturkorrosion	534
12.2.5	Emissionen	535
12.3	Naphtha und Kondensate	535
12.3.1	Eigenschaften von Naphtha und Kondensaten	535
12.3	Stoffeigenschaften von Naphtha, Kondensaten und Heizöl . . .	536
12.3.2	Sicherheitskonzept für Naphtha und Kondensat-Betrieb	537
13	Konstruktion, Berechnung und Fertigung von Verdichterschaukeln	539
	ULF D. KÖLLER, BERND VAN DEN TOORN	
13.1	Konstruktive Ausführung.	539
13.1.1	Laufschaufeln	540
13.1.1.1	Axialnuten	542
13.1.1.2	Umfangsnuten.	544
13.1.2	Leitschaufeln.	544
13.1.3	Verstellbare Leitschaufeln.	545
13.1.4	Werkstoffauswahl	547
13.2	Berechnung	547
13.2.1	Statische Festigkeit	548
13.2.2	Dynamische Festigkeit	550

13.3	Fertigung.	554
13.3.1	Fertigungsarten	554
13.4	Experimentelle Absicherung	555
14	Turbinenbeschaufelung	557
	HERBERT F. J. BALS	
14.1	Allgemeine Betrachtungen	557
14.2	Leitschaukeln.	557
14.2.1	Konstruktive Merkmale.	557
14.2.2	Leitschaukelblatt.	559
14.2.3	Fußteil	561
14.2.4	Kopfteil.	562
14.3	Laufschaufeln	562
14.3.1	Konstruktive Merkmale.	562
14.3.2	Laufschaufelblatt	564
14.3.3	Fußbereich.	566
14.3.4	Anstreifkante	572
14.3.5	Deckband	572
14.3.6	Andere Dämpfungselemente.	573
14.4	Schädigungsarten	574
14.4.1	Kriechschädigung	574
14.4.2	Thermische Ermüdung und zyklische Beanspruchung	574
14.4.3	Schädigung durch dynamische Beanspruchungen	576
14.4.4	Schädigung durch Oxidation, Heißgaskorrosion	577
14.4.5	Schädigung durch Fremdteile	577
14.5	Festigkeit.	577
14.5.1	Statische Beanspruchung aus den Gaskräften.	578
14.5.2	Statische Beanspruchung aus den Fliehkräften	578
14.5.3	Beanspruchung durch Behinderung der thermischen Dehnung	579
14.5.4	Dynamische Beanspruchung aus den Gaskräften.	580
14.6	Werkstoffauswahl	583
14.7	Fertigung.	584
15	Sekundärluftsystem	587
	ARND W. REICHERT	
15.1	Grundlagen	587
15.1.1	Abgrenzungen und Definitionen	588
15.1.2	Einfluss des Sekundärluftsystems auf die Eckdaten des Kreisprozesses	589

15.1.3	Für das Sekundärluftsystem relevante Zustandsänderungen in Verdichter und Turbine	591
15.1.4	Strömungsphänomene in Radseitenräumen; Heißgaseinzug . .	592
15.1.5	Strömungsphänomene in rotierenden Kavitäten	595
15.2	Auslegung des Sekundärluftsystems	596
15.2.1	Anforderungen an die Kühlluftversorgung von Turbinenschaufeln	596
15.2.2	Anforderungen an das Sperrluftsystem	596
15.2.3	Relevante Betriebszustände.	596
15.2.4	Führung der Sekundärluft zur Turbine	597
15.2.5	Lage der Entnahmestellen	598
15.2.6	Dichtungstechnologien	598
16	Turbinenschaufelkühlung.	601
	BERNHARD WEIGAND	
16.1	Einführung	601
16.2	Bauformen gekühlter Gasturbinenschaufeln	603
16.3	Externer Wärmeübergang	604
16.4	Interne Wärmeübertragung	609
16.4.1	Prallkühlung.	609
16.4.2	Pins.	611
16.4.3	Rippen	612
16.4.4	Krümmen (180°-Umlenkungen)	615
16.4.5	Einfluss der Rotation	617
16.5	Kühlungsauslegung von Schaufeln	617
16.5.1	Konzeptionelle Auslegung (1D)	618
16.5.2	Auslegung der Kühlung (2D)	621
16.5.3	Tests, Nachrechnung (3D)	622
16.6	Ausblick	623
17	Läuferbauformen.	625
	JOACHIM SCHULTE, MICHAEL MÜLLER, MANFRED JANSSEN	
17.1	Einleitung	625
17.2	Anforderungen an den Läufer	626
17.3	Läuferbauformen	627
17.4	Ausgeführte Maschinen.	629
17.4.1	Rotor in Scheibenbauweise mit zentralem Zuganker.	629
17.4.2	Rotor in Scheibenbauweise mit dezentralen Zugankern	631
17.4.3	Rotor in geschweißter Ausführung.	633
17.4.4	Variationen der klassischen Läuferbauarten	635
17.5	Zusammenfassung	636

18	Statische und dynamische Auslegung des Läufers	639
	Ekkehard Maldfeld, Michael Müller	
18.1	Auslegungsziele und Lastfälle für den Läufer	639
18.2.1	Statische Auslegung	642
18.2.1.1	Mechanische und thermische Beanspruchung von Rotorbauteilen.	643
18.2.1.2	Bewertung mit zeitunabhängigen Spannungsgrenzwerten . . .	653
18.2.1.3	Bewertung mit zeitabhängigen Spannungsgrenzwerten	654
18.2.1.4	Bewertung anhand der Anrisslastwechselzahl	657
18.2.1.5	Bewertung mittels Bruchmechaniknachweis	658
18.2.2	Dynamische Auslegung.	663
18.2.2.1	Biegeschwingungen im Normalbetrieb und bei Schaufelverlust	663
18.2.2.2	Torsionsbeanspruchung im Normalbetrieb und bei elektrischen Störfällen	664
18.2.2.3	Biegewechselspannungen durch Eigengewicht und Betriebseinflüsse.	666
18.3	Zusammenwirken der Auslegungsverfahren am Beispiel der mittleren Hohlwelle.	667
18.4	Werkstoffaspekte für die Rotorauslegung	668
18.5	Zusammenfassung	671
19	Gehäuse und Leitzug	673
	Ekkehard Maldfeld, Michael Müller	
19.1	Einleitung	673
19.2	Konstruktiver Aufbau.	674
19.3	Auslegungsziel, Anforderungen und Lastfälle für Gehäusekomponenten	681
19.4	Festigkeitsnachweise	682
19.4.1	Allgemeine Vorgehensweise	682
19.4.2	Flächenpressungen	686
19.4.3	Schrauben	687
19.4.3.1	Flanschverschraubungen	687
19.4.4	Dynamische Auslegung.	688
19.5	Zusammenfassung	690
20	Spalte	691
	Arnd W. Reichert	
20.1	Grundlagen	691
20.1.1	Einfluss der Spalte auf die Eckdaten des Kreisprozesses	691
20.1.2	Anteile von Spalten	692

20.2	Spaltauslegung.	693
20.3	Gestaltung von spaltbestimmenden Bauteilen	696
20.3.1	Einfluss von Rotorbauformen und Kühlkonzepten	696
20.3.2	Gestaltung der Statorbauteile, Justiervorrichtungen	696
20.3.3	Berücksichtigung von Verschiebungstrajektorien, Einlaufschichten.	697
20.3.4	Anstreifkanten.	698
21	Lagerung-Grundlagen und konstruktive Gestaltung.	699
	STEFAN VERSTEGE, FRANK BÖCKEL	
21.1	Einführung	699
21.2	Grundlagen	699
21.2.1	Strömungsmechanische Grundlagen	701
21.2.1.1	Viskosität von Schmierstoffen	701
21.2.1.2	Strömungsvorgänge im Schmierpalt	702
21.2.2	Lagertypen, Lagerbauformen	706
21.2.2.1	Hydrodynamische Axialgleitlager	706
21.2.2.2	Hydrodynamische Radialgleitlager	707
21.2.2.3	Drucköhlentlastung, hydrostatische Anhebung	710
21.2.3	Auslegungskriterien, Betriebsparameter.	711
21.2.3.1	Statische Lagerkenngrößen.	711
21.2.3.2	Dynamische Lagerkenngrößen.	711
21.2.4	Berechnungsverfahren	713
21.2.4.1	Berechnungsbeispiel	714
21.2.5	Lagerwerkstoffe	717
21.3	GT-Lagerung, konstruktiver Aufbau.	719
21.3.1	Lagerungskonzept der GT	719
21.3.2	Radiallager.	720
21.3.2.1	Mehrflächenlager	720
21.3.2.2	Radial-Kippsegmentlager.	720
21.3.3	Axiallager	721
22	Keramische Komponenten	725
	CHRISTINE TAUT, WOLFGANG KOLLENBERG, UWE RETTIG	
22.1	Hintergrund und Einsatzbereich.	725
22.2	Vorteile und Risiken feuerfestkeramischer Brennkammerauskleidungen.	727
22.3	Keramische Komponenten im Einsatz: keramische Hitzeschilde	728
22.3.1	Anforderungen an keramische Hitzeschilde	728

22.3.2	Modellierung des Betriebsverhaltens von Feuerfestkeramik	729
22.3.3	Konstruktion	729
22.3.4	Werkstoffeigenschaften	731
22.4.4	Betriebserfahrungen – Versagensmechanismen.	738
22.4	Schlussfolgerungen und Zusammenfassung	742
23	Korrosion und Beschichtungen.	745
	NORBERT CZECH	
23.1	Nass-Korrosion im Verdichterbereich	746
23.1.1	Korrosive Ablagerungen	746
23.1.2	Beschichtungen	748
23.1.3	Einsatz alternativer Schaufelwerkstoffe	748
23.2	Korrosion im Heißgasbereich	749
23.2.1	Randbedingungen.	749
23.2.2	Brennstoffe.	750
23.2.3	Korrosionsmechanismen	753
23.2.4	Korrosionsmindernde Maßnahmen	757
23.2.5	Korrosionsbeständige Werkstoffe	759
23.2.6	Schutzschichten für den Heißgasbereich	760
23.3	Wärmedämmschichten.	765
23.3.1	Beschichtungsverfahren	765
23.3.2	Anwendungsbeispiele.	767
23.3.3	Versagensmechanismen.	772
23.3.4	Ausblick	775
24	Hochtemperatur-Schaufelwerkstoffe	777
	CHRISTINA BERGER, HERMANN W. GRÜNLING	
24.1	Einführung, Geschichte.	777
24.2	Bauteilanforderungen (Beanspruchungen, Werkstoffeigenschaften)	779
24.3	Fe-Basiswerkstoffe.	781
24.4	Co-Basiswerkstoffe	784
24.5	Ni-Basiswerkstoffe	789
24.6	Werkstoffeigenschaften	801
25	Normung	817
	BERNARD BECKER	
25.1	Allgemeine Hinweise	817
25.2	Bauweise und Entwicklung.	820
25.2.1	Schwachstellen vermeiden	820

25.2.2	Bauteilspezifische Auslegungskriterien	820
25.3	Erprobung, Betrieb und Anwendungen	821
26	Montage	823
	W. PASCHMANN	
26.1	Montageplanung	825
26.1.1	Technische Planung	825
26.1.2	Terminplanung	825
26.1.3	Personalplanung.	826
26.1.4	Planung der Baustellenorganisation	826
26.1.5	Planung der Baustellenlogistik.	826
26.2	Montagedurchführung	827
26.2.1	Montagehandbuch (erection manual).	827
26.2.2	Montageschritte (vereinfacht)	827
26.2.3	Montageabschluss.	828
27	Ausrichten des Wellenstrangs.	829
	W. PASCHMANN	
27.1	Begriffe.	829
27.2	Ausrichtmethoden	830
27.2.1	Axial-Radial-Verfahren oder AR-Methode	830
27.2.2	Doppel-Radial-Verfahren oder DR-Methode.	831
27.2.3	Doppel-Axial-Verfahren oder DA-Methode	832
27.3	Werkzeuge und Vorrichtungen.	833
27.4	Vorausrichtung des Wellenstrangs.	833
27.5	Endausrichtung des Wellenstrangs am Beispiel eines Turbosatzes V94.3A	834
27.6	Kuppeln des Wellenstrangs, Dokumentation	838
28	Inbetriebsetzung	839
	M. WEGEN	
28.1	Vorbemerkungen	839
28.2	Inbetriebsetzungsplanung	839
28.2.1	Technische IBS-Planung	839
28.2.2	Dokumentation	840
28.2.3	Personalplanung.	840
28.3	Inbetriebsetzungsablauf	841
28.3.1	Voraussetzungen für die IBS	841
28.3.2	IBS-Phasen.	842
28.3.3	Probetrieb.	845
28.4	Inbetriebsetzung nach Revision	845

29	Maschinendynamik	847
	PETER WUTSDORFF	
29.1	Schwingungsmessungen	847
29.1.1	Lagergehäuse-Schwingungsmessung	848
29.1.2	Wellenschwingungsmessung	850
29.1.3	Phasenmessung	851
29.1.4	Hinweise zur praktischen Durchführung von Betriebsschwingungsmessungen	852
29.2	Kritische Drehzahlen	852
29.3	Kinetisches Verhalten der Gleitlager	855
29.4	Untersuchungen an der äußeren Lagerabstützung	857
29.5	Einfluss des Kupplungszustands	859
29.6	Leistungsabhängige Schwingungen	861
29.6.1	Getriebemaschinen	862
29.6.2	Lastabhängige Schwingungen an Generatoren	863
29.6.3	Mediumbedingte Schwingungen.	863
29.7	Anstreifprobleme und thermische Unwuchten	865
29.8	Axialschwingungen	869
29.9	Instabilitätsschwingungen	870
29.10	Auswuchten	872
29.11	Ausblick	878
30	Abnahmemessungen	879
	KLAUS WERNER	
30.1	Zielsetzung.	879
30.2	Grundlagen, Normen	879
30.3	Vorbereitung.	880
30.3.1	Gespräche, Prozeduren, Festlegungen	881
30.3.2	Messinstallation	881
30.3.3	Messgrößen	882
30.4	Durchführung.	885
30.4.1	Koordination	885
30.4.2	Betriebszustand	885
30.4.3	Dauer.	886
30.4.4	Schwankungen	886
30.5	Wesentliche Messgrößen	887
30.5.1	Leistung	887
30.5.2	Brennstoff	887
30.5.3	Abgastemperatur	888
30.6	Auswertung	889
30.6.1	Ansaugmassenstrom und Turbineneintrittstemperatur	889

30.6.2	Umrechnung.	890
30.6.3	Ein-/Mehrwellenanordnung	890
30.6.4	Solo-/Kombibetrieb.	890
30.6.5	Fehlerbetrachtung.	891
30.6.6	Bericht	892
31	Systematik der Erprobung.	893
	CHRISTOF LECHNER	
31.1	Einführung	893
31.2.1	Komponentenversuchsstand	894
31.2.2	Erprobung im Kraftwerk	899
31.2.3	Erprobung im Prüffeld	900
31.3	Strategie der Erprobung	904
32	Versuchsmesstechnik	905
	STEFAN L. F. FRANK, DAVID REGNERY	
32.1	Radialspalmessungen	905
32.2	Temperatur-Messungen	909
32.3	Verbrennungsmessungen.	914
32.4	Schaufelschwingungsmessungen.	918
32.4.1	Schaufelschwingungen	918
32.4.2	Fertigungsbegleitende Messungen	920
32.4.3	Stillstandsuntersuchungen	920
32.4.4	Betriebsmessungen	923
32.4.4.1	Messverfahren	924
32.4.4.2	DMS-Technik und -Installation	924
32.4.4.3	Leitungsführung und Signalübertragung	928
32.4.4.4	Datenerfassung und Analyse	931
32.4.4.5	Berührungslose Verfahren	934
33	Stationäres Betriebsverhalten.	939
	ANDREAS BAUER, STEFAN ROPKA	
33.1	Grundlagen	940
33.2	Abweichung vom Referenzzustand	942
33.3	Teillastverhalten	946
33.3.1	Verstellung von Verdichterleitreihen.	946
33.3.2	Absenkung der Turbineneintrittstemperatur	949
33.3.3	Methoden zur Leistungssteigerung	950
33.4	Einfluss des Brennstoffes	953
33.5	Spezielle Betriebsfälle	956
33.5.1	Frequenzabweichung	956

33.5.2	Verschmutzung und Vereisung der Verdichterbeschaufelung . .	958
33.5.3	Alterung	958
34	Automatisierungstechnik	961
	OLAF DROBNER, ANDREAS PAHL	
34.1	Turbinen- und Generatorregelung.	962
34.1.1	Einfluss der Regelungen im Gasturbinenbetrieb	963
34.1.2	Struktur der Regelungen	967
34.1.2.1	Anfahrsteuerung	969
34.1.2.2	Drehzahl- und Leistungsregelung	969
34.1.2.3	Turbinentemperaturregelung	970
34.1.2.4	Elektrische Generatorregelung	971
34.1.2.5	Sonstige Regelkreise.	971
34.1.3	Stellantriebe	972
34.2	Steuerung des Gasturbosatzes und dessen Hilfssysteme	972
34.2.1	Gliederung der Steuerungsfunktionen	972
34.2.2	Zusammenwirken der Steuerungsfunktionen im Gasturbinenbetrieb	974
34.2.2.1	Steuerung des Anfahrens	974
34.2.2.2	Steuerung des Abfahrens	976
34.2.2.3	Steuerung von Umschaltvorgängen	977
34.2.2.4	Steuerung der Hilfssysteme.	978
34.3	Turbinenschutz	979
34.3.1	Grundsätzliche Anforderungen an Schutzeinrichtungen	980
34.3.2	Wichtige Schutzeinrichtungen für Gasturbinen	983
34.3.2.1	Überdrehzahlschutz.	983
34.3.2.2	Flammenüberwachung	984
34.3.2.3	Turbinentemperaturschutz.	985
34.3.2.4	Brandschutz	985
34.3.2.5	Weitere Schutzeinrichtungen.	986
34.3.3	Projektierung von Schutzeinrichtungen.	986
34.4	Einsatz und Projektierung moderner Leittechniksysteme für die Gasturbinenautomatisierung	987
35	Betriebsdatenanalyse	991
	GOTTFRIED ADAM	
35.1	Einführung	991
35.2	Datenbasis	992
35.2.1	Ereignisse	992
35.2.2	Befunde	995
35.2.3	Gasturbinenlebenslauf	997

35.3	Verfügbarkeitskennzahlen	998
35.3.1	Allgemeines	998
35.3.2	Definitionen der Formelgrößen	999
35.3.3	Zuverlässigkeit V3/RF.	1000
35.3.4	Verfügbarkeit V7/AF	1000
35.3.5	Zwangsausfallkennzahl V11/FOR	1001
35.3.6	Zeitausnutzung V17/SF.	1002
35.3.7	Startzuverlässigkeit V18/SR	1002
35.4	Statistische Schwankungen von Kennzahlen	1003
35.5	Abhängigkeiten der Kennzahlen	1006
36	Wartung, Inspektionen und Ersatzteilkonzepte	1009
	GERHARD BOHRENKÄMPER	
36.1	Einleitung	1009
36.2	Wartungsmaßnahme Verdichterwäsche.	1010
36.3	Heißteilverschleiß und Kriterien für die Bemessung der Inspektionsintervalle	1014
36.4	Instandhaltungsprogramm.	1018
36.4.1	Instandhaltungsgerechte Gasturbinenkonstruktion	1018
36.4.2	Inspektionsumfang und Inspektionsintervall.	1021
36.4.3	Heißteilinspektion und Revision.	1022
36.4.4	Ersatzteile und reparierte Teile.	1025
36.5	Instandhaltungsmanagement und langfristige Serviceverträge	1026
37	Modernisierungen im Gasturbinenservice	1029
	GERHARD BOHRENKÄMPER	
37.1	Ältere Gasturbinenanlagen im Wettbewerb	1029
37.2	Modernisierungsthemen	1030
37.2.1	Uprate-Optionen	1030
37.2.2	Reduktion von Schadstoffemissionen	1038
37.2.3	Erweiterung des Verbrennungs- und Brennstoffsystems.	1039
37.2.4	Verbesserte Betriebsführung	1041
37.2.5	Optimierte und reduzierte Instandhaltung	1042
37.2.6	Kraftwerksrehabilitation mit Modernisierungen	1043
37.3	Lebensdauerbeurteilung von Bauteilen	1044
37.4	Zusammenfassung und Ausblick.	1045
	Literaturverzeichnis	1047
	Index	1079