

1	Einführung	1
2	Die Phasen eines Anlagenbauprojekts	7
2.1	Voruntersuchungen (Grundlagenermittlung)	9
2.2	Konzeptphase (Conceptual Engineering)	9
2.3	Entwurfsplanung (Basic Engineering)	10
2.4	Ausführungsplanung („Detailed Engineering“)	12
2.5	Beschaffungsphase (Procurement)	13
2.6	Bau- und Montagephase (Construction)	13
2.7	Inbetriebnahmevorbereitung (Pre-Commissioning)	14
2.8	Inbetriebnahme (Commissioning)	14
2.9	Gewährleistungsphase	15
2.10	Betriebsphase	15
2.11	Zusammenfassung	16
3	Entwicklung eines Maschinenkonzepts	19
3.1	Auswahl der Maschinenbauart für die Prozessgasverdichtung	19
3.1.1	Ventilatoren, Gebläse	22
3.1.2	Turboverdichter	24
3.1.3	Schraubenverdichter für Prozessgase	29
3.1.4	Hubkolbenverdichter	32
3.1.5	Membranverdichter	33
3.1.6	Weitere Verdichtertypen	35
3.2	Betriebsverhalten und Regelung von Turboverdichtern	35
3.2.1	Kennfelder von Turboverdichtern	35
3.2.2	Bypassregelung	36
3.2.3	Saugdrosselregelung	38
3.2.4	Drehzahlregelung	38
3.2.5	Eintrittsleitschaufel-Regelung	39
3.2.6	Nachleitschaufel-Regelung	40

3.3	Betriebsverhalten und Regelung von Hubkolbenverdichtern	40
3.3.1	Saugdrosselregelung	40
3.3.2	Bypass-Regelung	41
3.3.3	Drehzahlregelung	41
3.3.4	Regelung durch Schadraum-Zuschaltung	41
3.3.5	Regelung durch Ventilabschaltung	41
3.3.6	Regelung durch stufenlose Saugventilabhebung	42
3.3.7	Drücke und Temperaturen	42
3.4	Konzepte für die Wellenabdichtung rotierender Maschinen	42
3.4.1	Funktionsprinzipien für Wellenabdichtungen	43
3.4.2	Weiterführende Literatur	48
3.5	Antriebe für Verdichterstränge	49
3.5.1	Industrie-Dampfturbinen	49
3.5.2	Elektrische Antriebe und Generatoren	51
3.5.3	Gasentspannungsturbinen (Expander)	56
3.5.4	Industrie-Gasturbinen	57
3.6	Komponenten der Kraftübertragung	58
3.6.1	Übersetzungsgetriebe	58
3.6.2	Überlagerungsgetriebe	58
3.6.3	Kupplungen	63
3.7	Verfügbarkeitsanforderungen	67
3.8	Budgetkostenanfrage an Maschinenhersteller	68
3.9	Zusammenfassung	69
4	Auswahl potenzieller Maschinenlieferanten	71
4.1	Der Erfahrungsschatz	72
4.2	Auditierung von Maschinenherstellern	73
4.3	Überlegungen zur Kritikalität	76
4.3.1	Kritikalität des verfahrenstechnischen Prozesses	76
4.3.2	Kritikalität der Maschineneinheit	77
4.3.3	Kritikalität der Projektpartner und Lieferanten	77
4.4	Zusammenfassung	78
5	Auswahl des Abwicklungskonzepts	79
5.1	Abwicklungsmodelle	80
5.1.1	Eigenabwicklung	80
5.1.2	Abwicklung mit einem Engineering-Partner	81
5.1.3	Fremdabwicklung	81
5.1.4	Fremdabwicklung mit „Proprietary Equipment“	82
5.2	Angebotsprüfung	83
5.3	Terminüberwachung	86

5.4	Qualitätssicherung	87
5.5	Aufgabenteilung zwischen den Vertragspartnern.	88
5.6	Zusammenfassung	89
6	Maschinenspezifikation im Detail	91
6.1	Anzuwendende Regelwerke.	92
6.1.1	Rechtsvorschriften, behördliche Regelungen.	93
6.1.2	Öffentliche technische Regelwerke, Best Practice.	95
6.1.3	Betreiber- und herstellerspezifische Regelwerke	98
6.1.4	Umgang mit technischen Regelwerken	101
6.2	Technische Spezifikation	103
6.2.1	Allgemeiner Teil.	104
6.2.2	Spezifikation von Verdichtern und Dampfturbinen	106
6.2.3	Spezifikation von Versorgungssystemen für Öl und Sperrgas	110
6.2.4	Spezifikation zugehöriger Apparate.	118
6.2.5	Elektrische Antriebssysteme für Verdichter.	124
6.2.6	Spezifikation von Wellenkupplungen.	127
6.2.7	Spezifikation von Übersetzungsgetrieben	128
6.3	Disziplinübergreifende Detailklärungen	128
6.3.1	Prozess- und Verfahrenstechnik.	129
6.3.2	Thermodynamik und Fluidmechanik.	130
6.3.3	Grundsätzliche Designvorgaben.	135
6.3.4	Werkstoffauswahl und Einsatzgrenzen	136
6.3.5	Mechanik und Rotordynamik bei Turbomaschinen.	137
6.3.6	Massenkräfte und Pulsationen bei oszillierenden Maschinen.	141
6.3.7	Rohrleitungen und Anschlüsse.	142
6.3.8	Aufstellungsplanung	142
6.3.9	Instandhaltungskonzepte	146
6.3.10	Ersatzteilkonzept	147
6.3.11	Schutz vor Lärmbelastungen	151
6.3.12	Prozessleittechnik (PLT)	154
6.3.13	Zustandsüberwachung, Maschinen-Monitoring.	166
6.3.14	Betriebskonzept	171
6.3.15	Gewährleistung und Garantien.	172
6.3.16	Weitere vertragliche Überlegungen	174
6.4	Qualitätssicherung und Qualitätsüberwachung	175
6.4.1	Materialinspektionen und Prüfbescheinigungen	178
6.4.2	Materialinspektion für Gussgehäuse	180
6.4.3	Geschweißte Bauteile.	181
6.4.4	Fertige Gehäuse, Druck- und Dichtheitsprüfung	182

6.4.5	Welle und Läufer	183
6.4.6	Wellenabdichtungen	186
6.4.7	Getriebe und Kupplungen	186
6.4.8	Druckbehälter	187
6.4.9	Hilfs- und Versorgungssysteme	187
6.4.10	Mechanischer und thermodynamischer Werks-Probelauf	188
6.4.11	Testen von Ersatzläufern	190
6.4.12	Testen elektrischer Antriebe	190
6.5	Zusammenfassung	192
7	Vom Angebot zur Bestellung	195
7.1	Anfragen an Hersteller	196
7.2	Inhalt verbindlicher Anfragen und Angebote	197
7.3	Prüfung und Anpassung technischer Angebote	198
7.4	Abwicklung mit den Maschinenherstellern	199
7.4.1	Kommunikationswege	199
7.4.2	Terminplanung	200
7.4.3	Mitzuliefernde Unterlagen und Dokumente	201
7.4.4	Änderungen des Bestellsumfangs und Eskalation	203
7.4.5	Qualitätskontrollen und Abnahmen	204
7.4.6	Weitere Vereinbarungen	205
7.4.7	Serviceleistungen zu Montage und Inbetriebnahme	207
7.5	Erstellung des Angebotsvergleichs und Herstellerauswahl	208
7.6	Anpassung und Fixierung der Bestellspezifikation	208
7.6.1	Technische und kaufmännische Meilensteine	209
7.7	Zusammenfassung	210
8	Abwicklungsphase Teil 1: Detailed Engineering	213
8.1	Bestellung und Auftragsbestätigung	214
8.2	Projektorganisation und Kick-Off-Meeting (KOM)	215
8.2.1	Formaler Teil des KOM	215
8.2.2	Technischer Teil des KOM	216
8.3	Fortschrittsberichte	217
8.4	Terminüberwachung (Expediting)	219
8.5	Dokumentenkontrolle und Zeichnungsprüfung	220
8.5.1	Technische Datenblätter	221
8.5.2	Aufstellungszeichnung und Fundamentplan	222
8.5.3	R&I-Fließbilder	223
8.5.4	Betriebsmittel und rechnerische Nachweise	224
8.5.5	Zeichnungen für den Maschinenstrang	229
8.5.6	Apparate, Druckbehälter und Rohrleitungen	229
8.5.7	Versorgungssysteme	231

8.5.8	Instrumentierung und Maschinensteuerung	231
8.5.9	Weitere Dokumente	232
8.6	Besprechungs-Meilensteine	233
8.6.1	Konstruktionsbesprechung (Design-Review-Meeting)	233
8.6.2	Sicherheitsbetrachtung (Safety-Review-Meeting)	234
8.6.3	Pre-Inspection-Meeting (PIM)	237
8.7	Zusammenfassung	240
9	Abwicklungsphase Teil 2: Fertigung und Inspektion	241
9.1	Terminüberwachung (Expediting)	242
9.2	Dokumentenprüfung	242
9.2.1	Lateralschwingungen und Laufstabilität	243
9.2.2	Torsionsschwingungen	245
9.2.3	Pulsationsstudie	246
9.2.4	Fundament- und Stützenbelastungen	247
9.2.5	Steuerung und Regelung	248
9.3	Qualitätsüberwachung	250
9.3.1	Material- und Bauteilprüfungen	251
9.4	Fertigungskontrollen	255
9.4.1	Hydrostatischer Test drucktragender Komponenten	255
9.4.2	Leckagetest drucktragender Komponenten	256
9.4.3	Visuelle Inspektion	257
9.4.4	Reparaturen an drucktragenden Guss-Komponenten	258
9.4.5	Auswuchten von Rotorkomponenten und Rotoren	259
9.4.6	Überdrehzahltest	261
9.4.7	Run-out-Test	261
9.4.8	Maßprüfung	262
9.4.9	Spielekontrolle (Einbautest)	262
9.4.10	Nullmessungen für Rohrbündel-Wärmeübertrager	264
9.4.11	Öl- und fettfreie Montage	264
9.5	Funktionstests und Probeläufe	265
9.5.1	Mechanischer Probelauf	265
9.5.2	Thermodynamischer Probelauf	266
9.5.3	Mechanische Nachkontrolle (Post-Test-Inspection)	268
9.5.4	Weitere Funktionstests	270
9.5.5	Testen elektrischer und elektronischer Systeme	272
9.5.6	Endmontage der Maschineneinheit	273
9.5.7	Endkontrolle und Transportvorbereitung	273
9.6	Betriebs- und Instandhaltungsanleitung	275
9.7	Ersatzteillisten	278
9.8	Enddokumentation	279
9.9	Montagevorbereitung	280

9.10	Erfahrungen	281
9.11	Zusammenfassung	282
10	Maschinenmontage	285
10.1	Verantwortlichkeiten	286
10.2	Qualitätssichernde Elemente	287
10.2.1	Montage-Checkliste (ITP)	287
10.2.2	Klärungs- und Mängelliste	288
10.2.3	Tagesprotokolle	291
10.2.4	Montagebesprechung	292
10.3	Warenannahme und Lagerung	293
10.4	Fundamentvorbereitung	294
10.5	Maschinenplatzierung und Grobausrichtung	295
10.6	Montage von Behältern und Versorgungsanlagen	297
10.7	Maschinenstrang-Feinausrichtung	297
10.8	Rohrleitungsinstallation	299
10.9	Entlüftungen, Entwässerungen, Sicherheitsarmaturen	302
10.10	Isolierung und Begleitbeheizung	302
10.10.1	Berührungsschutz	302
10.10.2	Isolierung von Rohrleitungen und Apparaten	302
10.10.3	Isolierung von Dampfturbinen	303
10.11	Elektroinstallation, Instrumentierung	304
10.12	Schallschutz und Luftfilter	305
10.12.1	Schallschutzhauben und Luftfilter	305
10.12.2	Rohreinbauten	306
10.13	Begehbarkeit	307
10.14	Versorgungssysteme	308
10.14.1	Ölversorgungssysteme	308
10.14.2	Sperrgassysteme	310
10.14.3	Andere Versorgungssysteme	311
10.15	Weitere Funktionstests	311
10.15.1	Motor-Solo-Run	311
10.15.2	Drehvorrichtungen	312
10.15.3	Turbine-Solo-Run	312
10.16	Kupplungsmontage	312
10.17	Mechanische Fertigstellung	313
10.18	Erfahrungen	313
10.19	Zusammenfassung	314
11	Erst-Inbetriebnahme	317
11.1	Kalt-Inbetriebnahme (Pre-Commissioning)	318
11.1.1	Personalschulung	318
11.1.2	Hubkolbenverdichter	319

11.1.3	Turbo- und Schraubenverdichter	319
11.1.4	Ausblasen von Frischdampfleitungen	320
11.1.5	EG-Konformitätserklärung	320
11.2	Anzeige der Betriebsbereitschaft	321
11.3	Vorbereitungsarbeiten für Start-Up	322
11.4	Heiß-Inbetriebnahme (Commissioning)	324
11.5	Garantieläufe	327
11.6	Abnahme und Restpunkte	328
11.7	Zusammenfassung	328
12	Betrieb und Instandhaltung	331
12.1	Instandhaltungsstrategie	331
12.2	Der laufende Maschinenstrang	333
12.3	Maschinenüberwachung	334
12.3.1	Messwerte der Maschinenüberwachung	334
12.3.2	Zustandsüberwachungssysteme	335
12.4	Wartung & Inspektion	337
12.4.1	Auswertung von Maschinenschwingungen	337
12.4.2	Maßnahmen im laufenden Betrieb	338
12.4.3	Maßnahmen im Stillstand	339
12.5	Revisionen am Maschinenstrang	340
12.5.1	Technische Revisionsplanung	341
12.5.2	Revisionsmanagement	344
12.5.3	Ersatzteilverhaltung	345
12.5.4	Materialien und Werkzeuge	346
12.5.5	Vorbereitende Maßnahmen für die Revision	346
12.5.6	Zerlegen und Reinigen	347
12.5.7	Inspektion	347
12.5.8	Reparaturen und Nacharbeiten	348
12.5.9	Überwachungsbedürftige Anlagenteile	348
12.5.10	Verbesserungsmaßnahmen	349
12.5.11	Wieder-Zusammenbau	349
12.5.12	Wieder-Inbetriebnahme	350
12.5.13	Dokumentation	350
12.6	Fragestellungen zu Garantie und Gewährleistung	351
12.7	Kapazitätserweiterungen und „Revamp“	351
12.8	Zusammenfassung	354
13	Anhang	355
13.1	Thermodynamische Berechnung von Turboverdichter-Stufen	355
13.1.1	Thermodynamik des Verdichtungsvorgangs	356
13.1.2	Thermodynamische Kennwerte	359
13.1.3	Berechnungs-Erfahrungen	361

13.1.4	Weitere Fragestellungen	362
13.1.5	Dimensionslose Kennzahlen von Radialverdichtern	362
13.2	Abkürzungsverzeichnis	364
13.2.1	Allgemeine Abkürzungen	364
13.2.2	Einheiten und Formelzeichen	367
13.3	Glossar	368
Sachwortverzeichnis		383