

Gasturbinen für Spitzenlast-Erzeugung

Autor(en): **Bolliger, H.R.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **84 (1966)**

Heft 10

PDF erstellt am: **25.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-68855>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

belle 3 findet. Nimonic 80A zeigt nur schwache Spuren von Korrosion. ATS 105 war stark angegriffen, ATS 101 ebenfalls, jedoch in etwas geringerem Masse. Dagegen war ATS 2 kwv (warmkaltverfestigt) sehr wenig korrodiert. Fluginox 130 wurde auch probiert (die Schaufel ist auf Bild 11 nicht sichtbar), und gab ähnliche Resultate wie ATS 2 kwv. Die Versuchsergebnisse werden gegenwärtig studiert und werden Gegenstand einer späteren Mitteilung sein.

Der Autor legt Wert darauf, Dr. Geiger von Gebr. Sulzer AG, der die Versuche an den korrodierten Schaufeln durchgeführt hat, seine Anerkennung auszudrücken.

Literaturverzeichnis

[1] R. A. Strub und H. Canonica: Recent Development Work on a Single and Split Shaft 3000 kW-Gas Turbine. CIMAC-Kongress, Kopenhagen, 1962. Mitteilung B.2.

- [2] F. Zerlauth: Zwei neue 3000 kW-Gasturbinen. «Technische Rundschau Sulzer», Forschungsheft 1961, S. 54–59.
- [3] E. Aguet und J. von Salis: Three Year's Operating Experience with 7500 kW-Gas Turbine Plants in Belgian Steel Works. ASME-Paper 60-GTP-3, 1960.
- [4] A. Frieder und A. Moser: Bemerkenswerte Inbetriebsetzungen aus dem Arbeitsgebiet der Turbomaschinen. «Technische Rundschau Sulzer» Nr. 2, 1959, S. 95–100.
- [5] F. Zerlauth und J. von Salis: Gasturbinen-Anlagen in Rumänien und Pipeline-Stationen. «Technische Rundschau Sulzer» Nr. 3, 1963, S. 149–154. SBZ 1964, H. 15, S. 263–266.
- [6] F. Dübi: Gasturbinenzentrale Weinfelden der NOK. «Technische Rundschau Sulzer» Nr. 3, 1960, S. 3–17.
- [7] A. L. Jaumotte und N. Masson: La Corrosion à Haute Température des Alliages Réfractaires par le Vanadium en Présence du Sodium. CIMAC-Kongress, Kopenhagen, 1962, Mitteilung B13.

Gasturbinen für Spitzenlast-Erzeugung

Dipl. Ing. H. R. Bolliger, Baden

DK 621.438.081.21

I. Rückblick auf bisherige Betriebserfahrungen mit Gasturbinen konventioneller Bauart für Spitzenlast-Erzeugung

Die erste industrielle Gasturbinengruppe der Welt, welche Brown Boveri in den Jahren 1938/39 für das Kraftwerk «Champ-Bougin» der Services Industrielles de la Ville de Neuchâtel (Schweiz) gebaut hatte, war als Notstrom- und Spitzenlastanlage geplant. Der Einsatz dieser noch heute im Betrieb befindlichen Maschinen erfolgte dann hauptsächlich als Reserve-Einheit oder Notstrom-Spitzenlastgruppe, so dass sich in den 25 Lebensjahren nur eine geringe Betriebsstundenzahl ergab. Bis im Sommer 1965 war die Gruppe 3236 Stunden gelaufen, hat dabei 5947 MWh erzeugt und ist hierfür 984 mal gestartet worden, was einer mittleren Betriebsdauer pro Start von 3,3 Stunden, sowie einer mittleren jährlichen Betriebszeit von nur 132 Stunden entspricht.

Von den bis anfangs 1965 für die Produktion elektrischer Energie im Betrieb befindlichen rd. 130 Brown-Boveri-Gasturbinen des industriellen («Heavy-duty») Typs konventioneller Bauart mit Einheitsleistungen von 1,2 bis 30 MW war jedoch ein grosser Teil zur Erzeugung von Grundlast, sei es dauernd oder im Saison-Betrieb, eingesetzt. Diese Maschinen haben dabei, in ihrer grossen Mehrzahl in jahrelangem Dauerbetrieb stehend, mit Betriebsperioden von 12 000 bis 45 000 Betriebsstunden zwischen den Revisionen, ganz hervorragende Resultate bezüglich Betriebs-Verfügbarkeit und minimaler Unterhaltskosten erzielt [1], [2], [3], [4]. Sie werden in der Regel im Mittel mehrere 100 bis gegen 2000 Stunden pro Start gefahren, wobei Betriebs sicherheits-Faktoren («reliability») von über 99,5% und Betriebsverfügbarkeitsgrade («availability») von über 97%, sowie spezifische mittlere Unterhaltskosten, je nach verwendetem Brennstofftyp, von 0,05 bis 0,5 Mills/kWh (1 Mill. = 1/1000 US\$) erwartet werden dürfen.

Im Gegensatz zu den erwähnten Grundlastanlagen sind, ähnlich wie die eingangs erwähnte Gruppe «Neuchâtel», eine beträchtliche Anzahl von Gasturbinen für zeitweise oder regelmässige Erzeugung von Spitzenlastenergie oder als Notstrom-Aggregate sowohl für Grundlast- als auch für Spitzenlast-Erzeugung aufgestellt worden. Sehr oft kommt auch eine Kombination dieser verschiedenen Verwendungszwecke vor. Solche Maschinen werden in der Regel im Mittel weniger als 24 Stunden pro Start betrieben. Bis Sommer 1965 liegen von 43 solcher Gasturbinenanlagen detaillierte Betriebs-Rapporte vor (siehe Tabelle 1), welche anschliessend nach verschiedenen Gesichtspunkten näher analysiert werden sollen.

1. Beurteilung nach mittlerer Betriebszeit pro Start

Unterscheidet man in dieser Gruppe, die 43 Maschinen umfasst, zwischen solchen für praktisch reinen Spitzenlastbetrieb und solchen für gemischten Spitzenlast- und Notstrombetrieb, so ergibt sich folgende Aufteilung:

a) 25 Maschinen mit weniger als 7 Betriebsstunden pro Start, wovon 12 mit weniger als 4 Stunden pro Start

Diese 25 (12) Maschinen wurden zusammen 30 393 (11 106) mal gestartet und während 175 886 (34 967) Stunden betrieben. Sie weisen also im Mittel 5,8 (3,15) Betriebsstunden pro Start auf. Durchschnittlich ist jede dieser Maschinen 1220 (925) mal gestartet und während 7000 (3150) Stunden betrieben worden. Die kurze Betriebszeit pro Start weist darauf hin, dass in erster Linie die ursprünglich geplante

Funktion der reinen Spitzenlast-Erzeugung, sei es regelmässig über das ganze Jahr, oder aber während bestimmten Saison-Abschnitten, erfüllt wurde, während der Einsatz als Reserve-Grundlast-Einheiten nur ganz ausnahmsweise erfolgte. In einzelnen Fällen fand ein kurzer Einsatz als Notstrom-Spitzenlastgruppen statt, worunter 5 Einheiten mit weniger als 100 h/Jahr betrachtet werden müssen.

b) 18 Maschinen mit mehr als 7 und weniger als 24 Betriebsstunden pro Start

Diese 18 Maschinen wurden zusammen 19 697 mal gestartet und während 288 260 h betrieben, d. h. sie weisen im Mittel 14,6 Betriebsstunden pro Start auf. Durchschnittlich ist also jede dieser Maschinen 1090mal gestartet und während 16 000 h betrieben worden. Bei allen diesen Maschinen ist entsprechend der längeren mittleren Betriebszeit pro Start die Funktion als reine Spitzenlast-Maschine in mehr oder weniger starkem Masse durch zeitweiligen Einsatz als Notstrom- oder Saison-Grundlastmaschine ergänzt worden, sei es auf Grund von ursprünglich in dieser Richtung bestehender Pläne, oder aber infolge besonderer Verhältnisse, z. B. unvorhergesehener Ausfall anderer Generatorgruppen, Mangel an hydraulischer Energie infolge abnormaler Trockenheit usw.

Es darf auf die bemerkenswerte Tatsache hingewiesen werden, dass die konventionelle Gasturbine der Brown Boveri-Bauart in allen diesen Fällen in der Lage war, die erwähnte Doppelfunktion ohne Einschränkung der Nutzleistung und ohne wesentliche Beeinträchtigung der Revisions-Intervalle in sehr flexibler Weise zu erfüllen.

Als hervorstechende Beispiele für die unter a) aufgeführten Maschinen sei auf die zwei 30 MW-Gruppen «Edmonton I/II» mit je total 7968 bzw. 4731 Betriebsstunden und 2168 bzw. 1542 Starts hingewiesen. Diese Maschinen waren durchschnittlich nur 3,7 bzw. 3,1 Stunden pro Start im Einsatz und wurden bis Ende 1964 im Mittel während 1330 bzw. 880 Betriebsstunden pro Jahr mit einem Lastfaktor von rd. 80% hauptsächlich als Winter-Spitzenlasteinheiten betrieben.

Ferner sei auch auf die 20 MW-Maschine «El Convento» [4], [5], [6], [7] hingewiesen, welche bis im Sommer 1965 6833 Betriebsstunden bei 2155 Starts erreicht hat. Ungefähr die Hälfte der registrierten Starts wurden für den Anwurf des Generators als Phasenschieber benützt, so dass im eigentlichen Generatorbetrieb durchschnittlich 6,3 h pro Start gefahren wurden. Normalerweise wird diese Gruppe jedoch im Spitzenlastbetrieb während 3 bis 4 h täglich und pro Start eingesetzt. Der höhere Durchschnitt von 6,3 h pro Start ergibt sich aus der gelegentlichen Notwendigkeit, die Gruppe über den ganzen Tag als Reserveeinheit einzusetzen. Die mittlere jährliche Betriebszeit betrug 1030 h, wobei die Maschine durchschnittlich 165 mal für Generatorbetrieb und etwa ebensovielmals für Phasenschieberbetrieb gestartet wurde.

Es seien ferner die beiden Schweröl-gefeuerten Maschinen des Kraftwerkes Beznau der NOK erwähnt, von denen die 13 MW-Gruppe bereits im Jahre 1948 und die 27 MW-Gruppe im Jan. 1949 in Betrieb kam. Diese Maschinen haben somit über 17 bzw. 16 Jahre in Betrieb gestanden und 27 200 bzw. 27 300 Betriebsstunden bei einem mittleren Belastungsfaktor von 86,5% bzw. 81% erreicht, wobei sie mehr als rd. 3600 bzw. 3400 mal gestartet wurden. Dies entspricht einer mittleren Betriebsdauer von rd. 7 Stunden pro Start. Die im jahrelangen Betrieb dieses Schweröl-gefeuerten Kraftwerkes ermittelten spezifischen

Tabelle 1. Betriebsdaten von Brown Boveri-Gasturbinen im Einsatz als Spitzenlast- oder Notstromeinheiten

Anlage (Land)	Betriebsaufnahme	Nominalleistung MW	Brennstoff d)	Totale Anzahl Betriebsstd. h	Starts —	Produzierte Energie MWh	Mittlere Betriebszeit pro Jahr h/a	Betriebszeit pro Start h	Mittlerer Last-Faktor %
Neuchâtel (Schweiz)	Nov. 1939	4	D	3 236	984	5 947	132	3,3	46
Lima I (Peru)	Okt. 1949	10	D	26 780	3391	204 570	1770	8	76
Chimbote (Peru)	Juli 1949	4	D	27 602	1236	30 538	1750	22,3	28
Beznau I	Jan. 1948	13	S	25 200	3600	282 760	1480	7	86,5
Beznau II (Schweiz)	Jan. 1949	27	S	23 700	3400	518 360	1480	7	81,0
Sta. Cruz (Tenerifa-Spanien)	Febr. 1962	4,4	C	10 474	1326	34 638	3500	8	75
Vermilion (Canada) a)	Okt. 1954	6	G	35 081	2130	193 020	3500	16,5	55
Edmonton I	Nov. 1958	30	G	7 968	2168	187 869	1330	3,7	79
Edmonton II (Canada)	Aug. 1959	30	G	4 731	1542	112 633	880	3,1	79
Kindersley I	Jan. 1958	10	G	20 845	1522	148 551	3000	14,7	71,5
Kindersley II (Canada)	April 1958	10	G	19 800	1540	137 499	2950	13,0	69,5
Lethbridge I	Febr. 1958	10	G	28 104	1521	163 857	4070	18,5	58,5
Lethbridge II (Canada)	April 1961	10	G	13 183	865	79 171	3525	15,3	60,0
Vancouver I	Sept. 1959	27	G	536	335	7 927	62	1,6	55
Vancouver II	Sept. 1959	27	G	344	269	4 105	50	1,3	44
Vancouver III	Dez. 1959	27	G	317	284	4 179	57	1,1	49
Vancouver IV (Canada)	Dez. 1959	27	G	345	277	4 406	55	1,25	47,5
Maracaibo (Venezuela)	Sept. 1959	20	G	5 623	537	104 091	1070	10,5	92,5
Vahr I	Dez. 1959	30	S	6 621	1083	133 197	1300	6,1	67
Vahr II (Deutschland)	Dez. 1960	30	S	6 408	1010	129 291	1580	6,3	67
Berlin I	Aug. 1960	30	S	5 412	1355	115 116	1200	4	71
Berlin II	Dez. 1960	30	S	4 498	1201	98 359	1070	3,75	73
Lima II	Okt. 1961	10,7	D	7 709	1554	84 064	2370	5,0	100
Lima III	Jan. 1961	10,7	D	9 144	1690	89 159	2340	5,4	92
Lima IV (Peru)	Nov. 1962	20	D	6 881	1114	121 404	3130	6,2	88
Brest (Frankreich)	Nov. 1962	17,2	S	2 565	497	42 981	3175	5,2	97
El Convento (Venezuela)	Febr. 1962	20	G	6 833	2155	130 080	1030	3,2	95
Livorno I	Jan. 1956	25	S	11 377	1050	238 864	1270	10,4	84,5
Livorno II (Italien)	Aug. 1956	25	S	9 805	850	204 481	1170	11,5	84,0
Oerebro (Schweden)	Dez. 1957	29,6	S	2 387	146	61 179	345	15,4	86,5
Fiumicino (Italien)	April 1957	25	S	6 078	935	121 674	785	6,5	80
Mayaguez I	Juni 1960	20	S	4 820	320	65 755	1070	15,0	68,5
Mayaguez II (Puerto Rico)	Sept. 1960	20	S	1 905	112	22 558	440	17,0	59
Oxelösund (Schweden)	März 1961	29,6	S	169	106	2 400	45	1,6	51,5
Santa Cruz I	Okt. 1957	12	S	8 562	1500	59 100	1380	5,7	57,5
Santa Cruz II (Algerien) b)	Nov. 1957	12	S	7 425	1265	57 200	1220	5,9	64
St. Dizier (Frankreich)	August 1956	5,9	S	4 316	1053	34 392	515	4,1	95,5
Mobil I	Jan. 1957	6,2	D	14 080	917	52 474	1780	15,4	60
Mobil II	April 1957	6,2	D	19 423	1652	67 195	2500	11,7	56
Mobil III	Jan. 1958	6,2	D	22 904	1166	77 292	3300	19,6	54
Mobil IV (Mexico)	Jan. 1963	6,2	D	1 638	386	6 828	820	4,2	67
Moorehead (U. S. A.)	Dez. 1960	7,6	G	578	430	2 858	150	1,35	65
Neusiedl c) (Österreich)	Nov. 1963	13,9	S	4 067	316	54 500	3000	12,9	96,5

Legende: a) Ab 1962 als Grundlastmaschine in «Sturgeon Lake», Canada eingesetzt.

b) Betriebsdaten nur bis Ende 1963 verfügbar.

c) Maschine lief vorher ab Dezember 1958 bis Oktober 1963 mit Erdgas als Saison-Grundlast-Einheit während 19345 h mit einem Lastfaktor von 96,5%. Seit Herbst 1963 Einsatz im Winter-Spitzenlastbetrieb mit Schwerölfuehrung.

d) Brennstoffe: D = Dieselöl, S = Schweröl, C = Rohöl, G = Erdgas.

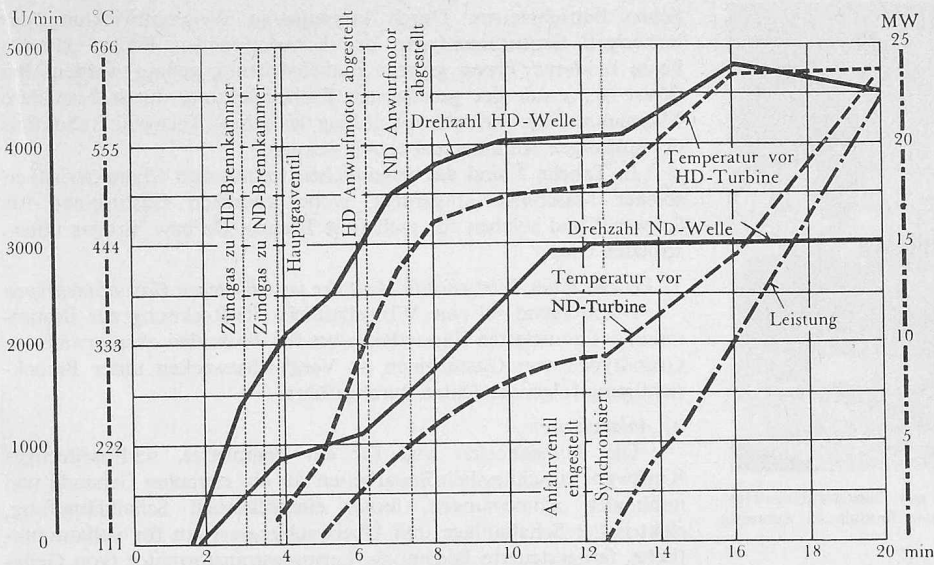


Bild 1. Anfahrtdiagramm bei automatischem Normalstart der Zweiwellengasturbine «El Convento», Caracas (Venezuela) von 22,5 MW

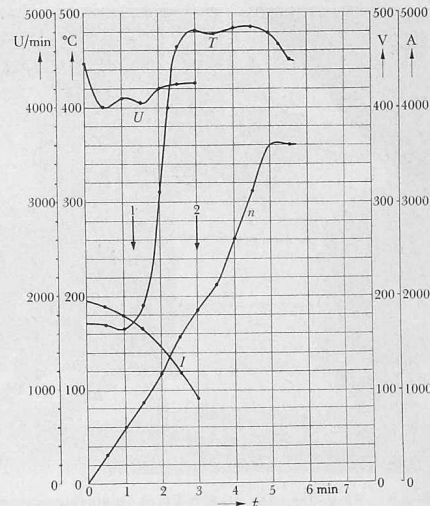


Bild 2. Schnellstart einer 15-MW-Gasturbine

- n Drehzahl der Gruppe in U/min
- T Temperatur vor Gasturbine
- U Primärspannung am Anwurfmotor in V
- I Strom des Anwurfmotors in A
- 1 Zünden der Brennkammer
- 2 Anwurfmotor abgeschaltet

Unterhaltskosten sind mit 0,2 Rp./kWh (= 0,047 Mills/kWh) für die gesamte Anlage bemerkenswert niedrig, wenn man die Qualität des als Brennstoff verwendeten Schweröles [1] sowie die Tatsache berücksichtigt, dass es sich um relativ komplizierte Zweiwellenmaschinen mit doppelter Zwischenkühlung, Zwischenüberhitzung und Verbrennungsluft-Vorwärmung durch Abgaswärme-Ausnützung handelt.

Als bemerkenswerte Beispiele für die unter b) aufgeführten Maschinen erwähnen wir die 10 MW-Maschine «Lima I», welche bis Ende 1964 total 26 780 Betriebsstunden bei 3391 Starts erreicht hat, was einer mittleren Betriebsdauer von 8 h pro Start entspricht. Im Durchschnitt betrug die mittlere jährliche Betriebsdauer 1770 Stunden, bei einem durchschnittlichen Belastungsfaktor von 76%, wofür die Gruppe jährlich im Mittel 222 mal gestartet wurde.

Diese Ende 1949 in Betrieb gesetzte Maschine wurde in den Jahren 1950/51 wegen Mangel an hydraulischer Energie während rd. 4000/3750 h/Jahr bei einem täglichen Einsatz von 8 bis 12 h, im intermittierenden Grundlastbetrieb gefahren. In späteren Jahren folgte je nach der Lage bei den hydraulischen Energie-Reserven ein gemischter Spitzenlast- und Saison-Grundlastbetrieb. Nach Inbetriebsetzung von weiteren drei Gasturbinen im selben Kraftwerk wurde die Maschine etwa seit 1962 nur noch als Reserveeinheit eingesetzt. Es darf besonders auf die bemerkenswert hohe Anzahl von 3391 Starts hingewiesen werden, welche ohne nachteilige Auswirkungen auf die Maschine erreicht wurden.

Gasturbinen dieser Bauart werden in der Regel aus dem kalten Zustand heraus in 8 bis 15 Minuten auf Synchrondrehzahl und in weiteren 5 bis 10 Minuten auf Vollast angefahren, Bild 1. In Notfällen kann die Dauer des Startvorganges je nach Maschinentyp auf weniger als die Hälfte obiger Zahlen reduziert werden, Bild 2.

2. Beurteilung nach den jährlichen Betriebsstunden:

Die Analyse der Betriebsdaten der in Tabelle 1 aufgeführten Beispiele ergibt unter Berücksichtigung der mittleren jährlichen Betriebsdauer folgendes Bild:

9 Maschinen mit	0– 500 Stunden pro Jahr
17 Maschinen mit	500–1500 Stunden pro Jahr
7 Maschinen mit	1500–2500 Stunden pro Jahr
10 Maschinen mit	mehr als 2500 Stunden pro Jahr

3. Beurteilung nach verwendeten Brennstoffen:

Brennstoff	Anzahl Maschinen	Anzahl Starts	Betriebsstunden	Betriebsstunden pro Start
Schweröl	18	18 999	135 315	7,1
Dieselöl	10	14 090	135 397	9,6
Erdgas	14	15 565	144 288	9,3
Rohöl	1	1 326	10 474	8

4. Beurteilung nach Anzahl Starts:

Eine Aufteilung nach Start-Häufigkeit zeigt folgendes:
3 Maschinen mit mehr als 3000 Starts

- 3 Maschinen mit mehr als 2000 Starts
- 8 Maschinen mit mehr als 1500 Starts
- 11 Maschinen mit mehr als 1000 Starts
- 6 Maschinen mit mehr als 500 Starts
- 12 Maschinen mit 100 bis 500 Starts

Die Erfahrung von Brown Boveri beruht also auf einer beträchtlichen Anzahl von Maschinen, welche bis jetzt schon bemerkenswert hohe Startzahlen erreicht haben, z. B. total 25 Maschinen mit mehr als 1000 Starts.

Die erfolgreiche Bewältigung der geschilderten mannigfachen Betriebsprogramme durch eine grosse Anzahl von Maschinen beweist die vorzügliche Eignung der industriellen Gasturbinen konventioneller Bauart für den Spitzenlastbetrieb, insbesondere in solchen Fällen, bei denen die Maschine öfters zur Erzeugung von Grundlastenergie, sei dies saisonmässig bedingt, oder aber nur in Notfällen, eingesetzt werden muss. Durch die vollständige Automatisierung und die Möglichkeit der Fernsteuerung, wie sie von Brown Boveri erstmals im Jahre 1958 bei der 20 MW-Anlage El Convento erfolgreich verwirklicht wurde [7], [10], konnte der Forderung eines möglichst ökonomischen Spitzenlastbetriebes bei minimalem Personalaufwand zusätzlich entsprochen werden.

II. Neuere Entwicklungen

Aufbauend auf den vielseitigen Erfahrungen, welche Brown Boveri in den letzten Jahren mit konventionellen Gasturbinen im Einsatz als Spitzenlastmaschinen gewinnen konnte, sind in letzter Zeit Gasturbinentypen moderner Bauart für grössere Einheitsleistungen entwickelt worden, welche den steigenden Anforderungen, die heute an Spitzenlastanlagen gestellt werden, sowohl bezüglich Leistungsgrösse und technischen Charakteristiken, als auch bezüglich geringeren Anlagekosten in vermehrtem Masse gerecht werden. Im Hinblick auf die verlangten Anwendungszwecke sind dabei zwei verschiedene Richtungen verfolgt worden, welche wie folgt charakterisiert werden können:

1. Gasturbinen für extrem kurze Anfahrzeit und geringste Anlagekosten

Es handelt sich hier um Maschinen, die sich für relativ kurze jährliche Betriebszeiten bei reinem Spitzenlastbetrieb und im Einsatz als Notstrom-Reserveeinheiten eignen. Die Forderung nach minimaler Startzeit von 2 bis 3 Minuten von «Kalt» auf «Vollast» lässt sich bei Verwendung von Flugzeugtriebwerken als Treibgaserzeuger für nachgeschaltete Expansionsturbinen konventioneller Bauart verwirklichen [8]. Erste Betriebserfahrungen mit solchen neuartigen Gasturbinen gewann Brown Boveri mit vier 10 MW-Einheiten, welche 1964/65 in Puerto Rico in Betrieb gesetzt wurden, Bild 3. Drei weitere ähnliche Einheiten derselben Grundkonzeption befinden sich vor der Ablieferung und zwei grössere Einheiten mit je 2 Düsentriebwerken pro Expansionsturbine für eine Einheitsleistung von 21 MW sind Ende 1965 von der Puerto Rico Water Resources Authority (P.R.W.R.A.), Puerto Rico, in Auftrag gegeben worden. Brown Boveri

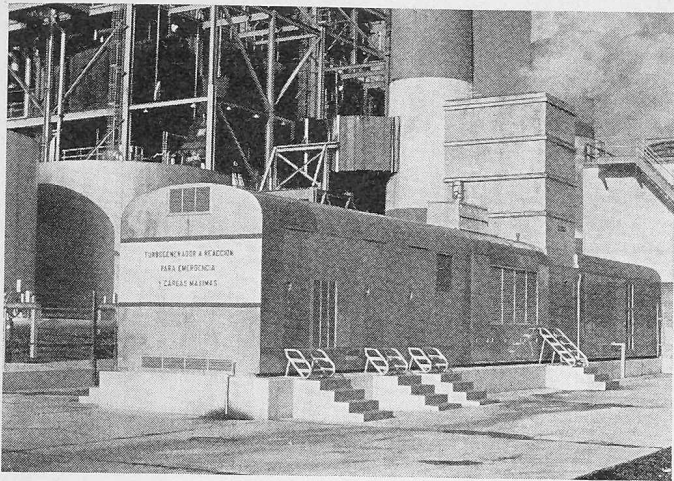


Bild 3. Eine der vier 10-MW-Block-Gasturbinengruppen mit Flugzeug-Düsentriebwerken als Treibgaserzeuger, bei der Puerto Rico Water Resources Authority (P. R. W. R. A.), Puerto Rico

Mannheim baut ausserdem für das Kraftwerk Emden der Nordwestdeutschen Kraftwerke AG (NWK), Hamburg, eine 52 MW-Spitzenlastgruppe mit vier Flugzeugtriebwerken, von welchen je zwei eine Expansionsturbine beaufschlagen. Die zwei gekoppelten Turbinen treiben einen Turbogenerator von 55 MVA, $\cos \varphi = 0,85$.

Als Brennstoff solcher Anlagen kann ausser Flugzeugtreibstoff (Kerosen) auch Erdgas oder hochwertiges Dieselöl benützt werden, falls bestimmte von den Triebwerksfabrikanten gestellte Anforderungen bezüglich Schwefelgehalt, Aschengehalt und Aschenzusammensetzung erfüllt werden. Auch das sogenannte «Schwerbenzin» (LVN) kann verwendet werden.

Ausser den Kapital-, Personal- und Brennstoffkosten solcher Anlagen wird deren Wirtschaftlichkeit weitgehend durch die Kosten der vorgeschriebenen periodischen Revisionen der Triebwerke diktiert. Ausserdem sind die Kosten des Schmierölverbrauches des Flugzeugtriebwerkes, sowie die zur Einhaltung gewisser Betriebsprogramme unumgänglichen Beschaffungskosten (Kauf oder Miete) von Reserve-Triebwerken zu beachten. Die Total-Revision eines Flugzeugtriebwerkes, welche im Herstellerwerk oder in einer qualifizierten Revisionswerkstätte einer Fluggesellschaft vorgenommen werden muss, kostet einschliesslich Hin- und Rücktransport grössenordnungsmässig 120 000 sFr. und bedingt einen Betriebsausfall des betreffenden Triebwerkes von 6 bis 8 Wochen, je nach Zeitaufwand für Transport, Zoll-Formalitäten usw.

Solche «Jet-Expander»-Gasturbinen lassen sich durch Verwendung von Triebwerken der verschiedenen bekannten Fabrikanten bis zu grossen Einheitsleistungen in verhältnismässig einfacher Weise kombinieren, je nachdem 1, 2 oder 4 Triebwerke auf eine Expansionsturbine geschaltet werden. Auf Tabelle 2 sind die technischen Daten je einer typischen Kombination von 2 bzw. 4 Triebwerken mit einer Expansionsturbine einander gegenübergestellt. (Die Leistungsdaten gelten für eine Ansaug-Lufttemperatur von 15°C, einen Luftdruck von 1,033 ata, sowie unter der Annahme, dass kein Druckverlust auf Ansaugseite sowie im Abgaskamin zu berücksichtigen sind):

2. Industrielle Gasturbinen konventioneller Bauart

Die Maschinen dieser Gruppe eignen sich für gemischten Spitzenlast- und Notstrom-Grundlastbetrieb bei kurzen bis mittleren jähr-

Tabelle 2. Hauptdaten typischer Kombinationen von Triebwerken mit Expansionsturbinen

Leistungsklasse	MW	25	50
Anzahl Triebwerke	-	2	4
Nennleistung an den Generatorklemmen	MW	26,5	54
Thermischer Wirkungsgrad an den Generatorklemmen ¹⁾	%	26,8	27,0
Betriebsdauer zwischen Triebwerksrevisionen (TBO) bei 1000 Starts	h	1500	1500
Anfahrzeit «Kalt - Vollast»	Minuten	2-3	2-3
Spezifische Unterhaltskosten ²⁾	Rp./kWh	0,75	0,75

¹⁾ Bezogen auf den unteren Heizwert des Brennstoffes.

²⁾ Einschliesslich Schmierölverbrauch des Düsentriebwerkes.

lichen Betriebszeiten. Durch konsequente Weiterentwicklung der bisherigen Gasturbinentypen der konventionellen Bauart können heute moderne Typen grosser Einheitsleistung gebaut werden. Bei ihnen ist, ausser der gesteigerten Einheitsleistung durch besondere Massnahmen zur wirksamen Kühlung der heissen Teile eine Reduktion der zulässigen Anfahrzeiten erzielt worden.

In Tabelle 3 sind die wesentlichen technischen Charakteristiken solcher Maschinen aufgeführt, wobei zwischen Gasturbinen für Schweröl und solchen für aschefreie Brennstoffe bzw. Erdgas unterschieden wird.

3. Vergleich der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Gasturbinentypen

Nachfolgend sei eine Wirtschaftlichkeits-Rechnung zur Bestimmung des günstigsten Einsatzbereiches für die beiden oben erwähnten Grundtypen von Gasturbinen zu Vergleichszwecken unter Berücksichtigung folgender Daten durchgeführt:

a) Anlagekosten A

Die Anlagekosten sind für ein komplettes, schlüsselfertiges Kraftwerk einschliesslich Bauarbeiten für ein einfaches Gebäude von minimalen Abmessungen, ferner einschliesslich Schalldämpfung, elektrischer Schaltanlage und Überwachungssystem für vollautomatische, ferngesteuerte Bedienung, Leistungstransformator (von Generator- auf Freileitungsspannung), Hochspannungsschalter für Freileitungsabgänge und interne Hilfsbetriebsanspeisung bestimmt worden. Ausserdem sind eingeschlossen die Anlagekosten für Brennstoff-Lagertanks und Kühlwasserversorgungseinrichtungen sowie die gesamten Kraftwerksplanungskosten. Dagegen sind die Unkosten für Baulandbeschaffung, Bauzinsen, Untersuchung der Bodenbeschaffenheit, Finanzierung, Baubewilligungen, Steuern und allgemeine Bauherrenkosten nicht inbegriffen.

Die spezifischen Anlagekosten pro installierte kW sind auf die Nettoleistungen des Kraftwerkes, d. h. auf die Hochspannungsklemmen des Leistungs-Transformators bezogen. Alle Kraftwerks-internen Verluste und der Hilfsbetriebs-Leistungsbedarf sind also abgezogen worden. Für die Varianten mit Jet-Aggregaten sind alternativ (in Klammern) auch die entsprechenden Werte bei Beschaffung eines Reserve-Triebwerkes pro Maschinengruppe mit eingerechnet.

Da die absoluten Anlagekosten (sFr./kW) von Gasturbinenkraftwerken in sehr starkem Ausmass von den jeweiligen örtlichen Bedingungen (Umgebungsluft-Temperatur, Aufstellungshöhe über Meer, Grad der verlangten Schalldämpfung) sowie dem vom Bauherrn gewünschten Aufwand für das Kraftwerksgebäude (bzw. der Möglichkeit der Verwendung einer Freiluftverschalung) abhängen und ausserdem in diesem Zusammenhang nur der relative Vergleich der Wirtschaftlichkeit der einen mit der anderen Gasturbinenart interessiert, sind in Tabelle 4 die Anlagekosten als relative Prozentwerte, bezogen auf den spezifischen Preis der schweröl-gefeuerten 26 MW-Gasturbinen, Type 13S-650, angegeben.

Tabelle 3. Hauptdaten industrieller Gasturbinen von Brown Boveri

Brennstoff	Schweröl		Aschefreie Destillate oder Erdgas		
	25	50	35	60	
Leistungsklasse	MW	25	50	35	60
Typenbezeichnung		13S-650	13S/10-650/650	13S-780	13S/10-780/650
Anzahl Wellen		1	2	1	2
Zwischenkühlung	}	nein	ja	nein	ja
Zwischenerhitzung					
Turbineneintritts-temperatur	°C	650	650/650	780	780/650
Nennleistung (Generatorklemmen)	MW	27,5	49,5	36	58
Therm. Wirkungsgrad an Generatorklemmen	%	21,8	23,7	23,8	25,5
Empfohlene Betriebsdauer zwischen Generalrevisionen ¹⁾	h	8000	8000	8000 bis 16 000	8000 bis 16 000
Anfahrzeit «kalt - Vollast»					
— normal	Min.	8	10	8	10
— Notfall	Min.	6	8	6	8
Spez. Unterhaltskosten	Rp./kWh	0,18	0,20	0,04	0,06

¹⁾ Bei mittlerer Betriebsdauer unter <8 h/Start

b) Kapitalkosten

Entsprechend einer Amortisationsdauer von 15 Jahren bei 6% jährlicher Verzinsung wird mit einem Kapitalkostenfaktor von 10,3% p. a. gerechnet. Zusätzlich werden mit 1,7% p. a. die diversen Unkosten für Versicherung, Steuern und sonstigen Abgaben berücksichtigt. Damit wird der totale Kapitalkosten-Faktor $k = 12\%$ p. a.

c) Betriebs-Personalkosten

Da für sämtliche betrachteten Maschinentypen eine vollautomatisierte Betriebsüberwachung vorgesehen ist, kann für alle Varianten Einmann-Bedienung vorausgesetzt werden, so dass für den vorliegenden Vergleich kein Unterschied in den Personalkosten zu berücksichtigen ist.

d) Brennstoffpreise

Da die Brennstoffpreise je nach Aufstellungsland stark verschieden sind, wird mit folgenden Bereichen gerechnet:

- Kerosen 12 bis 16 sFr./10⁶ kcal
- Dieselöl 9 bis 12 sFr./10⁶ kcal
- Schweröl (einschliesslich Additiv) 5 bis 9 sFr./10⁶ kcal
- Erdgas 3 bis 8 sFr./10⁶ kcal

Die unteren Grenzwerte gelten für Erdöl- bzw. Erdgasproduzierende Länder, wobei aber z. B. aus Gründen eines staatlichen Preisschutzes für Kohle oder andere Brennstoffe sehr grosse Abweichungen bis an die obere angegebene Grenze auftreten können.

Die ermittelten variablen Betriebskosten sind in Bild 4 dargestellt; in welchem die relativen spezifischen Anlagekosten über den spezifischen beweglichen Kosten (Brennstoff- und Unterhaltskosten) aufgetragen sind, wobei die eingezeichnete Geraden-Schar nach bekannter Weise [9] die jeweils optimalen Kombinationen von Anlagekosten und beweglichen Kosten für bestimmte, als Parameter (entsprechend der Neigung der Geraden) angegebenen jährlichen Betriebsstundenzahlen (h/a) darstellen, nach der Formel

$$h = -k \frac{\Delta A}{\Delta C}$$

Dabei bedeutet h die jährliche Betriebsstundenzahl, k die Kapitalkosten (12% in unserem Fall), A die spezifischen Anlagekosten und C die variablen Kosten (Brennstoff und Unterhalt). Für jeden Maschinentyp sind jeweils die Bereiche der beweglichen Kosten für die verschiedenen in Frage kommenden Brennstoffe eingezeichnet. Um zwei verschiedene Anlagen vergleichen zu können, sind die entsprechenden Punkte im Diagramm durch eine Gerade zu verbinden, deren Neigung diejenige Stundenzahl angibt, bei welcher die beiden Anlagen wirtschaftlich gleichwertig sind. Dies sei an Hand eines Beispiels erläutert.

Beispiel: Es soll eine 27 MW-Einwellen-Schweröl-Maschine konventioneller Bauart mit Brennstoff zu 6 sFr./10⁶ kcal (Schweröl) mit einer 26 MW-Jet-Expander-Gruppe, mit Brennstoff zu 10 sFr./10⁶ kcal (Dieselöl) verglichen werden. Die wirtschaftliche Äquivalenz wird bei rd. 1500 Betriebsstunden pro Jahr erreicht.

(Würde noch ein Reserve-Jet mitgerechnet, so wäre die Jet-Expandergruppe nur bis zu etwa 1200 h/Jahr wirtschaftlich günstiger.)

Diese Vergleichsmethode hat in der gezeigten Darstellung nur qualitativen Charakter und müsste für konkrete Projekte von Fall zu Fall genau überprüft werden, wobei jeweils den folgenden Gesichtspunkten besondere Aufmerksamkeit zu widmen wäre:

- a) Effektive Brennstoffkosten einschliesslich allfällige Kosten für Brennstoff-Aufbereitung, Additive, Zoll, Gebühren usw.
- b) Tatsächliche Verwendbarkeit der vorgesehenen Brennstoffarten für die jeweiligen Maschinentypen (z. B. Verwendbarkeit von verfügbarem Dieselöl für Jet-Triebwerke oder von Schweröl für konventionelle Gasturbinen unter Berücksichtigung der Brennstoff-Vorschriften des Triebwerks- bzw. Gasturbinenfabrikanten).

Tabelle 4. Spezifische Anlagekosten von Brown Boveri-Gasturbinenkraftwerken

Gasturbinenart Brennstoff	Jet Expander		konventionelle Bauart			
	Erdgas/Leichtöl/Kerosen	Erdgas/Leichtöl/Kerosen	Schweröl	Erdgas/Leichtöl	Schweröl	Erdgas/Leichtöl
Netto-Einheitsleistung MW	26,2	53,5	27,2	48,6	35,7	57,2
Typenbezeichnung	2-Jet	4-Jet	13S-650	13S/10-650/650	13S-780	13S/10-780/650
Spez. Wärmeverbrauch kcal/kWh	3240	3220	4080	3710	3625	3415
Spez. Anlagekosten (sFr./kW) %	61,5	55,3	100	94,5	88	84,5
(inkl. Reservejet)	(70,0)	(59,5)	—	—	—	—

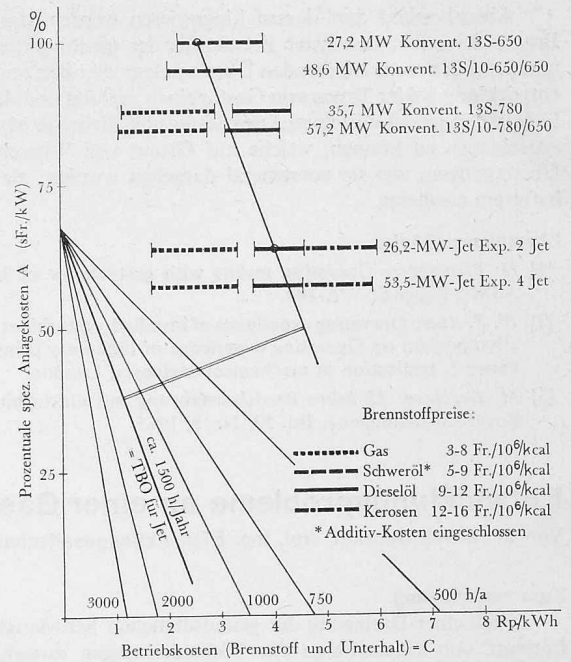


Bild 4. Diagramm zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von Spitzenlast-Gasturbinenanlagen

barem Dieselöl für Jet-Triebwerke oder von Schweröl für konventionelle Gasturbinen unter Berücksichtigung der Brennstoff-Vorschriften des Triebwerks- bzw. Gasturbinenfabrikanten).

c) Benützungsdigramm über ein volles Normal-Betriebsjahr in Beziehung zu den empfohlenen Revisions-Intervallen. Saison-Betrieb z. B. als Winter-Spitzenlastanlage würde gestatten, bei einer Jet-Expander-Gasturbine ohne Reservetriebwerk auszukommen, da die vorgeschriebenen Triebwerks-Revisionen und die damit verbundene Betriebs-Ausfallzeit von 1½ bis 2 Monaten in die Stillstandszeit der Maschine im Sommer verlegt werden könnte.

d) Anzahl der Starts pro Betriebsjahr, bzw. pro Betriebseinsatz, welche unter Umständen einen Einfluss auf die vorgeschriebenen Revisions-Intervalle und damit auf die Unterhaltskosten haben können, insbesondere bei den Flugzeugtriebwerken.

e) Allfällige Notwendigkeit von Zwei-Brennstoffbetrieb (Umschaltung von gasförmigen auf flüssigen Brennstoff während des Betriebes), welche Bedingung vorläufig nur mit der Gasturbine konventioneller Bauart erfüllt werden kann.

f) Erforderliche Startgeschwindigkeit. Die Forderung nach sehr kurzer Anfahrdauer, z. B. in Fällen, wo die Gasturbine als Ersatz für «Spinning-Reserve»-Einheiten dienen soll, kann möglicherweise die Verwendung einer Jet-Expandergruppe notwendig machen, selbst wenn die rein wirtschaftlichen Überlegungen diese Lösung nicht als günstiger erscheinen lassen.

g) Wahrscheinlichkeit, dass unvorhergesehener Dauerbetrieb während längeren Perioden geleistet werden muss, z. B. wegen Havarien an anderen Maschinen, wegen Ausfall hydraulischer Grundlastmaschinen infolge extremer Trockenheit, bei grösseren Umbauarbeiten im Verteil- und Übertragungsnetz usw. Die Erfahrung zeigt, dass in der Mehrheit der Fälle die geplante Einsatzzeit von Spitzenlastanlagen in der Folge wesentlich überschritten wurde. In solchen Fällen ist die konventionelle Gasturbine vorteilhafter, da sie bezüglich Revisions-Programmierung erheblich flexibler und mit geringen Unterhaltskosten eingesetzt werden kann.

Allgemein lässt sich sagen, dass die Jet-Expander-Gasturbine sich eher für kürzere jährliche Betriebszeiten von 0 bis z. B. 1500 h/Jahr insbesondere dort am besten eignet, wo kürzeste Anfahrzeiten gefordert werden. Die Grenze der wirtschaftlichen jährlichen Betriebsstundenzahl hängt in erster Linie und in sehr ausgeprägtem Masse von den Preisen der verfügbaren Brennstoffe ab. Steht relativ billiges Schweröl zur Verfügung und muss andererseits für den Jet-Expander wegen der Qualität (Aschengehalt) des erhältlichen Normal-Dieselöls mit einem teureren Spezial-Dieselöl oder sogar mit Kerosen als für Düsentriebwerke zulässigen Brennstoff gerechnet werden, so kann die Grenze der Wirtschaftlichkeit um die 500 bis 750 h/Jahr liegen.

Abschliessend darf darauf hingewiesen werden, dass die Firma Brown Boveri in bewusster Erkenntnis der geschilderten Umstände und der sich daraus ergebenden Überlegungen den Bau und die Weiterentwicklung beider Typen von Gasturbinen verfolgt und deshalb in der Lage ist, in jedem einzelnen Anwendungsfall diejenige Maschinentype vorzuschlagen zu können, welche auf Grund von Wirtschaftlichkeits-Überlegungen, wie sie vorstehend dargelegt wurden, als am vorteilhaftesten erscheint.

Literaturverzeichnis:

- [1] H. Pfenninger: Operating results with gasturbines of large output. ASME Paper 62-WA-188.
- [2] W. P. Auer: Operating experience of installed gasturbines presented at «Symposium on Operating experience of high-duty prime movers» – Paper 7. Institution of mechanical engineers, London.
- [3] M. Derclaye: 25 Jahre Betriebserfahrung mit Gasturbinen. «Brown Boveri-Mitteilungen», Bd. 52, Nr. 3, 1965.
- [4] H. R. Bolliger: 15 Years of Gasturbine Operation in Venezuela's Industry and Utilities. ASME Paper presented at 1966, ASME Gasturbine Conference, Zürich.
- [5] O. H. Pfersdorff: Considerations for Gasturbines and their Initial operating experiences at El Convento. ASME Paper No. 60 – GTP-4.
- [6] O. H. Pfersdorff: Operating Experiences and Data of two 20 000-kW Gasturbines at El Convento. ASME Paper No. 63 – AHGT-8.
- [7] J. Hognestad: Operational Experience with an automatically controlled Gasturbine plant in Venezuela. «Brown Boveri-Review», Vol. 46, No. 7, July 1959.
- [8] H. R. Bolliger: Die Verwendung von Flugzeug-Düsenantrieben zur Energieerzeugung. «Brown Boveri-Mitteilungen», Bd. 52, Nr. 3, 1965.
- [9] H. Pfenninger: Wirtschaftliche Betrachtungen zur Erzeugung von Energiespitzen durch Gasturbinen und Betriebserfahrungen mit dem Spitzenkraftwerk Beznau der NOK. Sonderdruck Nr. 1a/2022.
- [10] H. Pfenninger: Automatisch arbeitende Gasturbinenanlagen. «Brown Boveri-Mitteilungen», Bd. 51, Nr. 3/1964, S. 131–144.

Entwicklungsprobleme an einer Gasturbine für Leistungen von 10 bis 30 PS

Von Dr. Ulrich Oprecht, dipl. Ing. ETH, Aktiengesellschaft Adolph Saurer, Arbon

DK 621.438.081.12

Zusammenfassung

Nach einer Darlegung der grundsätzlichen Schwierigkeiten beim Entwurf von Gasturbinen für Wellenleistungen zwischen 10 und 30 PS werden die Konstruktionsprinzipien für eine 15-PS-Maschine erläutert. Von den verschiedenen Schwierigkeiten, welche bei der Entwicklung dieser Maschine zu überwinden waren, erwies sich die Behebung der Rotorschwingungen am langwierigsten. Gleichzeitige Untersuchungen auf einer Gross-Rechenanlage und an einer Reihe von schrittweise abgeänderten Wellen-Lagersystemen führte auf die einfache und betriebssichere Lösung der hydrodynamisch gedämpften Lagerabstützung des Turbinenrotors. Praktische Erfahrungen mit der Maschine konnten bis heute gewonnen werden als Kaltstart-Ausrüstung schwerer Militärfahrzeuge und als Hilfsgerät für Reise-Strahlflugzeuge.

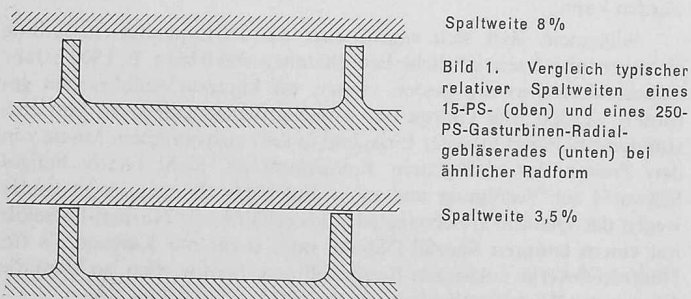
1. Einleitung

Die Entwicklung von Gasturbinen im Leistungsbereich unter 50 PS wurde verschiedentlich versucht. Beispielsweise hatte die Austin Motor Company vor einiger Zeit eine 30-PS-Maschine im Versuch, welche auf Grund einer englischen Regierungs-Spezifikation gebaut worden war [1]. Die Curtiss Wright Corp. stellte am Pariser Luftfahrt-Salon 1959 eine Kleinturbine zum Antrieb eines 7,5-kVA-Generators aus, die auf einem amerikanischen Patent der zwei Schweizer Ritz und Dreher beruhte [2]. Soweit dem Autor jedoch bekannt ist, kam diese Maschine nie über das Versuchsstadium hinaus. Seit einigen Jahren wurden verschiedene Gasturbinen zum Anlassen grosser Strahltriebwerke entwickelt; erwähnt seien die Fabrikate von Microturbo, Solar, AEI, Rotax und Airesearch. Diese Turbinenanlasser sind für die kurzzeitige Abgabe von etwa 100 PS bestimmt. Im Dauerbetrieb ist eine Belastung mit etwa 50 PS möglich; da sie jedoch als Anlasser zur Erzeugung eines grossen Momentes bei relativ kleiner Drehzahl vorgesehen sind, ist ihr Leistungsgewicht bei dieser verringerten Leistung verhältnismässig schlecht.

Mit Beginn der sechziger Jahre entstand nun ein wachsendes Interesse für Leichtgewicht-Gasturbinen als Hilfsantriebe in Reise- und grosse Militärfahrzeuge. Die folgenden Ausführungen beschreiben Entwicklung und Konstruktion einer Kleingasturbine im Leistungsbereich von 10 bis 30 PS, welche unterdessen in die Vorserien-Fabrikation genommen werden konnte.

2. Konstruktionsprobleme

Die Erzeugung von 10 bis 30 PS in einer Gasturbine für Abgabe von Wellenleistung verlangt bei Verwendung bester, bewährter, hoch-



warmfester Materialien und bei Beschränkung auf Druckverhältnisse unter etwa 6:1 einen Luftdurchsatz von 0,1 bis 0,35 kg/s. Unter Voraussetzung gut aufeinander abgestimmter Werte für Betriebsdrehzahl, Schaufelhöhe, Schaufel- und Scheibenbeanspruchung und Durchtrittsgeschwindigkeiten durch die Schaufelung ergeben sich Reynoldszahlen, welche immer noch mindestens eine Grössenordnung unter den gebräuchlichen Werten liegen. Die Zunahme der Reibungsverluste mit sinkender Reynoldszahl [3] bis [6] scheint daher die Verwendung axialer Schaufelungen auszuschliessen, zum mindesten für den Kompressor.

Radial durchströmte Schaufelräder reagieren bekanntlich schwächer auf eine Senkung der Reynoldszahl, da die benetzten Schaufellängen in Strömungsrichtung immer verhältnismässig lang sind und damit eine Entwicklung turbulenter Reibungsschichten begünstigt wird. Die Strömung durch eine radiale Schaufelung ist aber verhältnismässig stark gekrümmt und mit Sekundärströmungen durchsetzt. Zudem sind die Schaufeln speziell am Radumfang sehr kurz gegenüber der Schaufelteilung, womit Spaltverluste an Einfluss gewinnen. Besonders bei sehr kleinen Rädern sind diese Spaltverluste ausgeprägt, da die absolute Weite des Spaltes, bedingt durch Lager- und Fabrikationstoleranzen, nicht beliebig verkleinert werden kann. Bild 1 veranschaulicht typische bezogene Spaltweiten eines Gasturbinen-Radialgebläses von 15 PS bzw. von 250 PS. Der Einfluss der Spaltweite auf den Stufen-Wirkungsgrad ist noch nicht eindeutig abgeklärt [7], [8], [9], eine Vergrösserung der Spaltweite von 2 auf 10% scheint aber den Stufenwirkungsgrad in gleichem Masse zu senken wie eine 100fache Verringerung der Reynoldszahl [7], [8], [10]. Es werden daher im besten Fall für Radialgebläse und Radialturbinen isentrope Stufenwirkungsgrade, bezogen auf Gesamtdruck- und Temperaturänderung vom Eintritt zum Austritt, von 75 bis 80% erwartet für Stufendruckverhältnisse von etwa 3:1 bei den oben erwähnten Durchsätzen.

Da die Umfangsgeschwindigkeit zur Verarbeitung eines gewählten Druckverhältnisses und zugehöriger Enthalpieänderung in erster Näherung eine Konstante ist, verändert sich die Drehzahl des Rotors umgekehrt proportional zu seinen Abmessungen. Je kleiner ein Rad ist, um so schneller muss es drehen. Unwuchtkräfte gehen mit dem Quadrat der Drehzahl für eine gegebene Rest-Exzentrizität der Rotormasse. Ein kleiner Rotor muss daher auf eine viel engere Rest-Exzentrizität gewuchtet werden als beispielsweise ein 300-PS-Rotor. Bild 2 zeigt das Verhältnis der Unwuchtkraft zum Rotorgewicht in Abhängigkeit von Drehzahl und Rest-Exzentrizität. Auswuchtmaschinen, welche auf Schwerpunkts-Verschiebungen von 10^{-4} mm ansprechen, sind unerlässlich. Solch extrem kleine Werte lassen sich mit Sicherheit nur bei einer Wuchtung des montierten, in seinen Lagern laufenden Rotors erzielen. Ein weiteres Problem, das sich aus der hohen Drehzahl einer Kleinst-Gasturbine ergibt, ist die Beschaffung betriebssicherer Lager. Glücklicherweise weist der Bau von Kreiseln ähnliche Probleme auf, und hierfür brauchbare Wälzlager werden industriell gefertigt.

Drehzahlbereiche von Flugzeuggeneratoren, welche einzig einigermaßen interessante, einer Kleingasturbine vergleichbare Gewichte aufweisen, liegen zwischen 4000 und 12000 U/min. Wechselstromgeneratoren für 400 Hz, 24000 U/min weisen vielversprechende Lei-