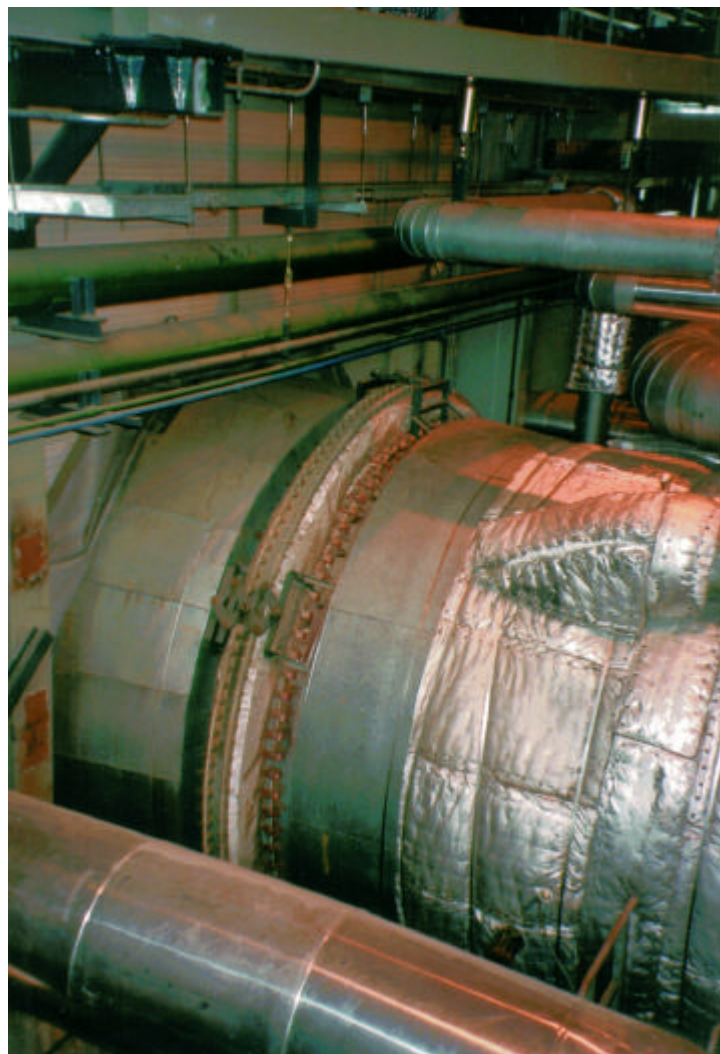


Weichstoffkompensator am GT-Ausgang einer SIEMENS V94.3

Seite 1 von 14

Erstmaliger Einsatz eines Weichstoffkompensators in einer SIEMENS V94.3 GT-Anlage zwischen GT-Ausgang und Diffusor



Kompensatorlieferant: DEKOMTE GmbH
Anlagenlieferant: SIEMENS AG

Auslegung und Montage von Schlüsselkomponenten für Großanlagen erfordern qualifizierte Zusammenarbeit aller Beteiligten (Beispiel: Hochtemperatur-Gasturbine mit nachgeschaltetem Weichstoffkompensator zum Ausgleich von Wärmedehnungen und Setzungen aufgrund besonderer geologischer Verhältnisse)

1. Innovationsanstöße im Hinblick auf eine Anlagen-Ausführung am Beispiel von Groß-Kompensatoren für Gasturbinen

Ausgehend von einem bewährten Produktionsprogramm ist es für qualifizierte und erfolgreiche Unternehmen im Rahmen technischer Diversifikation erstrebenswert, Aufgaben aufzuspüren und zu lösen, die eine Entwicklung zum technisch-wirtschaftlichen Fortschritt darstellen und eine Innovationslücke schließen. Solche Innovationen führen dann zu Komponenten mit hohem Gebrauchswert.

Um das unvermeidliche Risiko bei Entwicklungen zu erkennen und dann möglichst niedrig zu halten, hat DEKOMTE theoretische Betrachtungen, computergestützte Rechengänge, Langzeitversuche und betriebliche Erfahrungen im

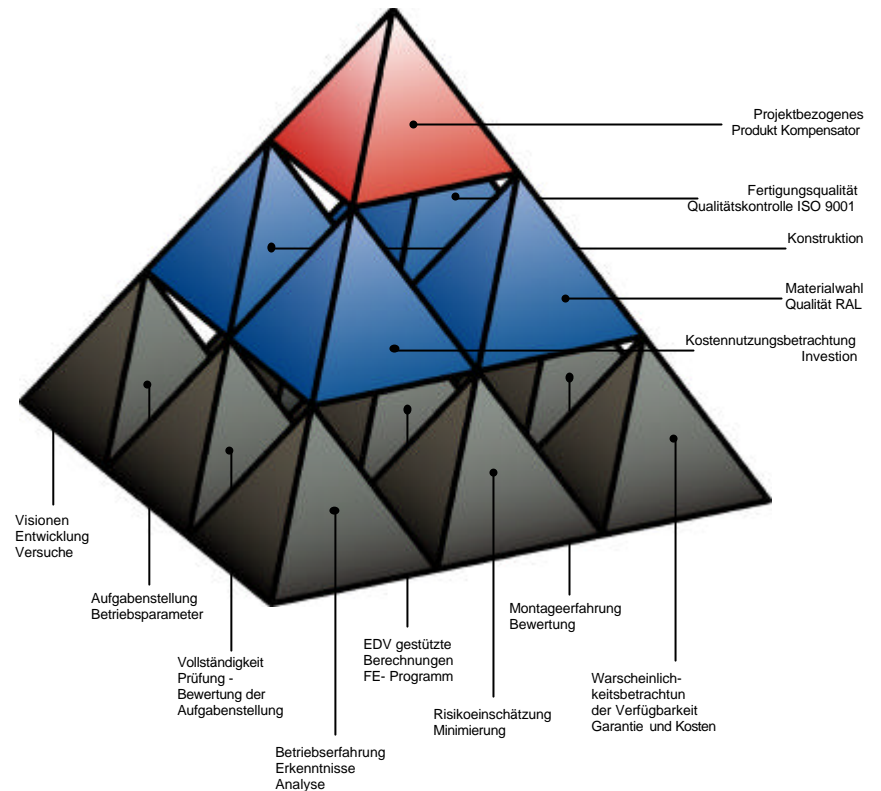


Bild 1 Multidisziplinäre Designentwicklung zum optimierten Produkt

Rahmen einer multidisziplinären Designentwicklung (Bild 1) eingebracht.

2. Beispiel einer Zusammenarbeit zwischen recht verschiedenen Unternehmen (Siemens / DEKOMTE) bei der Ausführung von Groß-Kompensatoren für außerordentliche Beanspruchungen

Die erwähnte Einschätzung von Innovationen beruht auf einer Zusammenarbeit des Unternehmens Siemens KWU, Erlangen und einem Kompensator - Hersteller, der Firma DEKOMTE,

Seligenstadt für die Anlage Puertollano.

Der Anlagenbauer, Siemens KWU, leistete auch für die spezielle Ausführung der benötigten Kompensatoren mit seinen Fachkräften wesentliche Beiträge zur Aufgabenstellung und zu den Lösungsschritten.

In dem hier zu behandelnden Fall ergaben sich bei der in Puertollano (Spanien) zu errichtenden Gasturbinenanlage vom Typ V94.3 Besonderheiten aufgrund der unterschiedlichen geologischen Beschaffenheit, da gemäß der gewählten Anlagenkonzeption die Gasturbine und der Diffusor auf zwei voneinander getrennten Fundamenten angeordnet sind. Die dadurch entstehenden unterschiedlichen Setzungen stellen zusätzliche Bewegungen dar, welche zwischen der Gasturbi-

Weichstoffkompensator am GT-Ausgang einer SIEMENS V94.3

ne und dem Diffusor aufgenommen werden müssen. Geologische Gutachten zeigten, daß eine zusätzliche laterale Bewegung von etwa 30mm auftreten kann.

Diese Erkenntnisse wurden erst während der Bauphase gewonnen, so daß keine größeren konstruktiven Änderungen mehr vorgenommen werden konnten. Solche Versetzungen können jedoch von den bisher eingesetzten Metallkompensatoren mit einem technisch vertretbaren Aufwand und konstruktiven Änderungen nicht aufgenommen werden (Bild 2). Andererseits waren die Metallkompensatoren wegen der hohen Gastemperaturen bevorzugt worden.

Die einzige Lösung um die auftretenden Bewegungen zu realisieren, ohne Änderungen an der Anlagenkonzeption vorzunehmen, bestand darin, hochwertige Weichstoffkompensatoren einzusetzen. Der in einem Weichstoffkompensator verwendete Weichstoff erlaubt gegenüber den anderweitig verwendeten Metallen wesentlich größere Dehnungen, und zwar, im Gegensatz zum Metall, in alle Richtungen

Die nun benötigten Spezialkompensatoren großen Durchmessers sollten trotzdem ein einwandfreies Zusammenwirken von Gasturbine und Diffusor langjährig gewähren.

Erst nach eingehenden Beratungen zwischen dem Unternehmen Siemens KWU und dem Zulieferer DEKOMTE konnte die Siemens KWU überzeugt werden, Weichstoffkompensatoren (WK) für den gegebenen Fall zu nutzen. Die wichtigsten Fortschritte für den Weichstoffkompensator waren:

1) Die verbesserte Isolierung der hitzegefährdeten Teile.

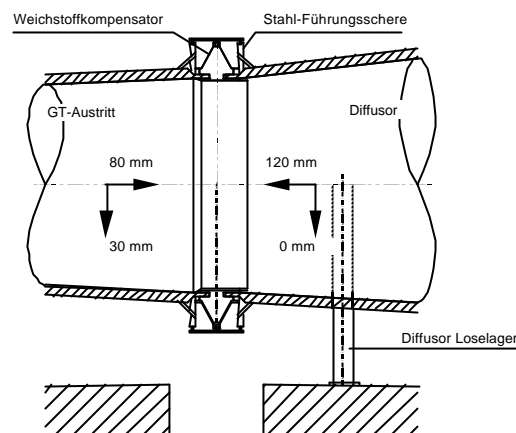


Bild 2 Einsatz des Weichstoffkompensators

2) Die spezielle Ausführung der Isolationspolster, die ein Zersetzen bzw. zerrütten der Isolationsmatten verhindert

3) Drosseln, die schnelle Druckänderungen zwischen Isolationspolster und Balg verhindern.

4) Doppelstegkonstruktion, welche eine größere Zyklenfestigkeit zeigt als eine L-Flansch-Konstruktion, im Zusammenspiel mit einer gesteigerten Wärmeabfuhr im Einspannbereich, insbesondere durch metallische Konvektoren nach einem Schutzrecht der DEKOMTE.

3. Überlegungen zum Austausch der bisher bewährten Groß-Metallkompensatoren gegen einen funktionsgünstigeren Weichstoff-Kompensator bei der Anlage Puertollano aufgrund inzwischen erreichter technischer Fortschritte

Wollte man weiterhin einen Metallkompensator verwenden, hätte man einen aufwendigen, komplizierten und dadurch möglicherweise störanfälligen Justiermechanismus vorsehen müssen, um die prognostizierten Erdsenkungen ohne Überbeanspruchung der Bauteile auszugleichen (Bild 3).

Den Ausweg unter Verwendung bisher ungewöhnlicher Konstruktionselemente zeigte anlässlich einer Vortragsveranstaltung im Hause Siemens KWU, Erlangen, nach Erfahrungen und Vorstellungen des Kompensatorherstellers DEKOMTE der Geschäftsführer Günther de Temple auf. Umwälzendes und richtungsweisendes Kernstück seiner Ausfüh-

Weichstoffkompensator am GT-Ausgang einer SIEMENS V94.3

rungen war der Ersatz des Metallkompensators durch einen Weichstoff- Gewebekompensator (WK). Dieser Vorschlag wurde durch folgende wesentliche Punkte begründet:

1.) Eine verbesserte Kühlmöglichkeit der kritischen Balgeinspannbereiche. Zur Kühlung wird die freie Konfektion der Außenluft verwendet, die an metallischen Flügeln (Konvektoren nach DEKOMTE-Patent) vorbei strömt. Sie leiten die Wärme aus dem besonders hitzegefährdeten Balgeinspannbereich zwischen zwei Flanschen ab.

2.) Die vorgestellte Stahlkonstruktion ist für die Anlage Puertollano (Grundlastanlage mit kleineren Startzyklen und kleineren Belastungstransienten) in der Lage, die auftretenden Thermoschocks über einen Zeitraum von ca. 20 Jahren aufzunehmen.

3.) Die auftretenden axialen und lateralen Bewegungen stellen bei einer Lösung mit Weichstoffkompensatoren keine außergewöhnlichen Anforderungen dar.

4.) Der Referent konnte überzeugend nachweisen, daß neuzeitliche Weichstoffkompensatoren (Bild 4) ungewöhnlich große Erdsetzungen im Rohrsystem der GT- Anlage ohne Schädigung während der angestrebten störungsfreien Betriebszeit (50.000 h) aufnehmen können.

5.) Ohne Kenntnis des akuten Bedarfsfalles in Puertollano hat DEKOMTE bereits seit geraumer Zeit das Verhalten von Weichstoffkompensatoren sorgfältig beobachtet, weil sich deren Verfügbarkeit immer stärker als ausschlaggebend erwies (Bild 1).

Der überraschende Vorschlag von de Temple wurde zunächst skeptisch aufgenommen, war aber speziell auf die Verhältnisse am Standort der GT-Anlage, Puertollano, ausgerichtet.

Auslegungsparameter für den Weichstoffkompensator	
Temperatur	
max. Temperatur	620 °C
Betriebstemperatur	580 °C
Druck	
Überdruck	+ 7000 Pa
Unterdruck	- 5000 Pa
Strömungsgeschwindigkeit	Grundlast ≈ 125 m/s
Medium	
	Rauchgas
Abmessungen	
Innendurchmesser	4273 mm
Länge max.	1360 mm (kalt) + 40 mm Paßlänge
Material (Stahlteile)	
	1.4541 oder 1.4878 DIN 17440
Bewegungen	
Axiale	= 200 mm (Stauchung)
Laterale	= 30 mm (Setzung in 30 Jahren)
Lastwechsel	
	10000 mit Sicherheitsfaktor 2 = 20000 in 30 Jahren
Isolierung	
	Anschließende Komponenten nur mit Außenisolierung

Bild 3 Auslegungsparameter für GT-Kompensator

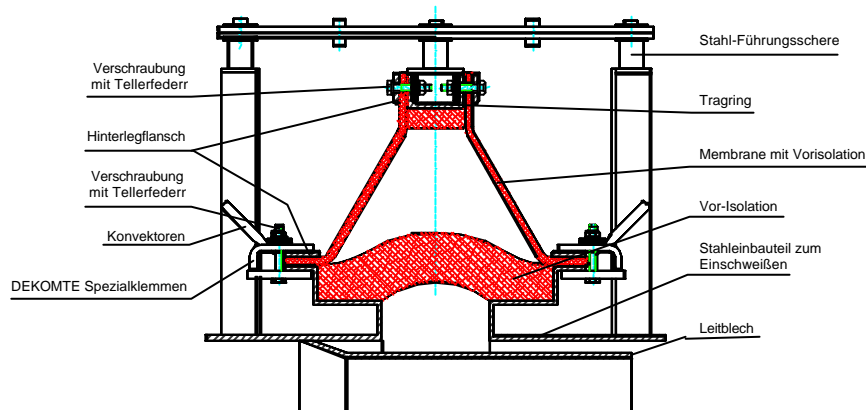


Bild 4 DEKOMTE-Membrankompensator

Als Ergebnis der Vortragsveranstaltung hat sich Siemens KWU entschlossen, für die Anlage Puertollano den Neubau des Kompensatorschnittes im Rohr- und Kanalsystem dem Unternehmen DEKOMTE zu übertragen.

Bild 3 Auslegungsparameter für GT-Kompensator

Weichstoffkompensator am GT-Ausgang einer SIEMENS V94.3

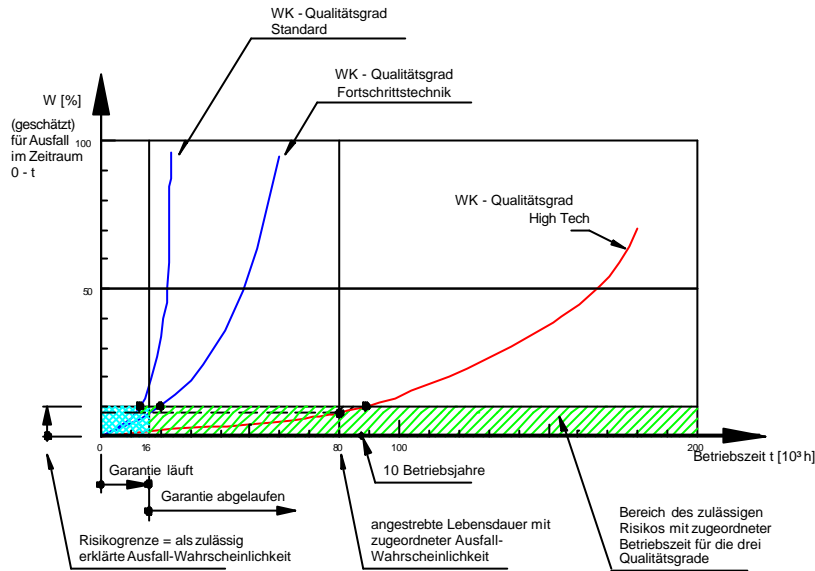


Bild 5 Schätz- Wahrscheinlichkeitskurve

deutig vorgegeben werden. Diese Situation war für DEKOMTE nicht ungewöhnlich und wurde bereits früher zum Anlaß genommen, anfallende Beobachtungen und langzeitige Erfahrungen für qualifizierte Schätzungen zu verwenden, und zwar für unerwartet verschärfte Betriebsbeanspruchungen über eine Betriebszeit von etwa 90.000 Std. Solche Aufzeichnungen liegen neuerdings auch in Form von Schätz-Wahrscheinlichkeitskurve (%) vor (Bild 5). Sie bedeuten, im Vergleich zu den bisherigen Annahmen, eine Konstruktionsgrundlage erhöhter Zuverlässigkeit. Solche grafischen Darstellungen konnten in den letzten Jahren durch sorgsame Beobachtung bereits beachtlich verbessert werden. Die Methode der Schätz-Wahrscheinlichkeitskurve (%) bewirkt eine systematisch verbesserte Annäherung an die Realität, weil das Soll- und Ist- geschehen mit dem eindeutig persönlich dokumentiertem vorangegangenen Geschehen einschließlich möglicher Fehler laufend verglichen werden kann.

4. Aufgabenverteilung zwischen Besteller und Zulieferer zur Optimierung der beabsichtigten Vorgehensweise, gestützt auf ein-gebrachte Erfahrungen beider Partner

Die Besonderheit für die Anlage Puertollano lag darin, daß innerhalb von Siemens GT- Anlagen weltweit erstmalig ein Weichstoffkompensator eingebaut werden sollte. Dabei wurde eine Abgastemperatur hinter der GT bis 650°C zugrunde gelegt in Verbindung mit systeminhärenten Thermoschocks. Neben diesen thermischen Belastungen treten außergewöhnliche mechanische Belastung durch die Strömungsverhältnisse auf.

Bei Vollast treten Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 130m/s auf. Diese maximalen Geschwindigkeiten werden am äußeren Rand des Kanalquerschnittes gemessen,

folglich in dem Bereich, in dem sich der Kompensator befindet. Zusätzlich zu den weitgehend gesicherten Betriebsparametern sollte auch mit Zusatzbeanspruchungen gerechnet werden. Diese konnten nicht ein-

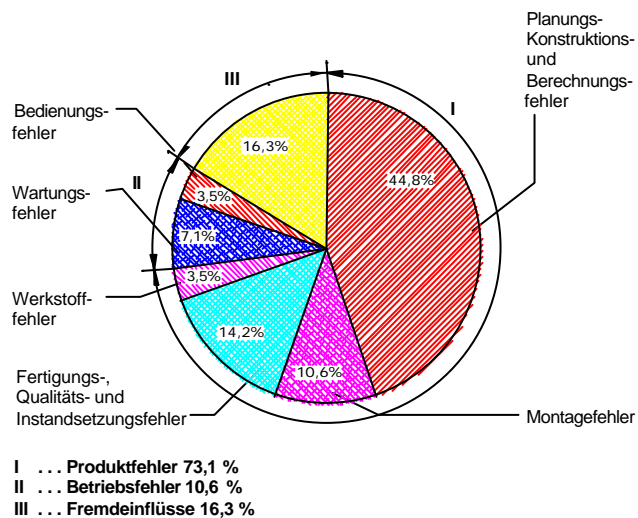


Bild 6 Verteilung der primären Schadensursachen an Industriegasturbinen in der Montage-, Garantie-, und Maschinenversicherung.

Weichstoffkompensator am GT-Ausgang einer SIEMENS V94.3

Die Verfügbarkeit von Weichstoffkompensatoren hängt erfahrungsgemäß auch von der Präzision der Montagearbeiten ab; denn diese erzeugen höhere Dehnspannungen. Dadurch wird das Dehnvermögen nach Größe der Bewegung und nach deren Richtung erheblich eingeschränkt. Den Nutzwert mit vielgestaltigen Kompensatoren aus sehr unterschiedlichen Materialien verdeutlicht eine von dem Maschinenversicherer Allianz herausgegebene Grafik unter Berücksichtigung der Montagekosten (Bild 6).

Bei der Aufstellung des Hochleistungs kompensators fielen Aufgaben für den Erbauer Siemens und den Kompensator-Lieferer DEKOMTE an. Es erforderte intensive Zusammenarbeit, um zu einer technisch-wirtschaftlich optimalen Lösung zu gelangen. Welche Aufgaben sich im einzelnen ergaben, läßt sich aus einer Übersicht der von DEKOMTE gelieferten Kompensatoranteile und Dienstleistungen ableiten.

Die bei DEKOMTE vorliegende Erfahrung wurde durch rechnerische, computergestützte Nachweise bestätigt.

4.1 Temperatur und Spannungsanalyse mit Hilfe einer FEM- Berechnung

Anhand der Auslegungsdaten

(Bild 3) und den Anfahrkurven (Bild 7) wurde eine Temperatur- und Spannungsanalyse durchgeführt. Das Bild 8 zeigt die verschiedenen Knotentemperaturen im Laufe der Zeit. Es zeigt sich, daß die Temperatur in dem Einspannbereich, aufgrund der Funktion der Konvektoren immer deutlich unter 200°C liegt. Diese geringe Temperatur im Einspannbereich garantiert eine hohe Sicherheitsreserve für die Dichtlagen des Kompensators. Desweiteren baut sich zwischen den Punkten 3 und 6 keine große Temperaturdifferenz auf, so daß keine allzugroßen Thermospannungen entstehen können.

Die Bilder 9 - 14 zeigen die Temperaturfelder und Spannungen bei verschiedenen Zeitpunkten. Die Bewertung der ermittelten Spannung mittels des Low Cycle Diagramms (Bild 15) ergab, daß ca. 7000 Zyklen zulässig sind.

Als Besonderheit wurde ferner eine DEKOMTE - Schätz-Wahrscheinlichkeitskurve (Bild 5) zur Versagenswahrscheinlichkeit im langjährigen Betrieb verwendet.

Daraus waren die Verfügbarkeiten besser als nach bisher aufgestellten Unterlagen zu bewerten; ferner konnte durch eine Kosten-Nutzen-Betrachtung mit Bezug zur Kurven-

darstellung die gewählte Konstruktion aus technisch- wirtschaftlicher Sicht als weitgehend optimal bestätigt werden (Bild 16).

Im Hinblick auf die Zuverlässigkeit des pionierhaften Weichstoffkompensators wurde auch eine neuere Arbeit von B. de Temple (Gestützte Weichstoff- Kompensatoren für das Dampfturbinen- Kombi- Block- Kraftwerk) ausgewertet, ferner eine Abhandlung in der Zeitschrift VGB- Kraftwerkstechnik:

"Funktionstüchtige Weichstoff- Kompensatoren für Gasturbinenanlagen", verfaßt von Angehörigen der DEKOMTE. Zusätzlich stand die umfangreiche DEKOMTE - Gewebekompensatoren - Fachliteratur - Sammlung zur Verfügung.

Diese befaßt sich ausführlich mit der multidisziplinären Designentwicklung zum optimierten Produkt (Bild 1). Zwecks gesicherter Verfügbarkeit beschränken sich die theoretischen Betrachtungen nicht auf die normalen Betriebsbedingungen; vielmehr konnten aufgrund von praktischen Erfahrungen über etliche Jahre auch die qualitativ- und quantitativen weitgehend unbekannt Strömungs- Druckeinflüsse berücksichtigt werden. Ferner ließen sich Turbulenzen aufspüren, die kritische Schwingungen bis zu Resonanzschwingungen erwarten

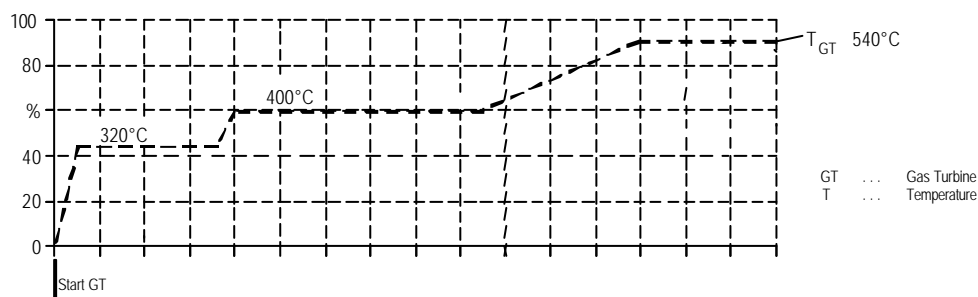


Bild 7 Anfahrkurve für GT-Betrieb mit Erdgas

Weichstoffkompensator am GT-Ausgang einer SIEMENS V94.3

ließen. Praxisnahe Berichte zu repräsentativen Strömungsversuchen aus vorangegangenen Projekten zeigen dies (Bild 17 – 20 zeigen Beispiele).

Weichstoffkompensator am GT-Ausgang einer SIEMENS V94.3

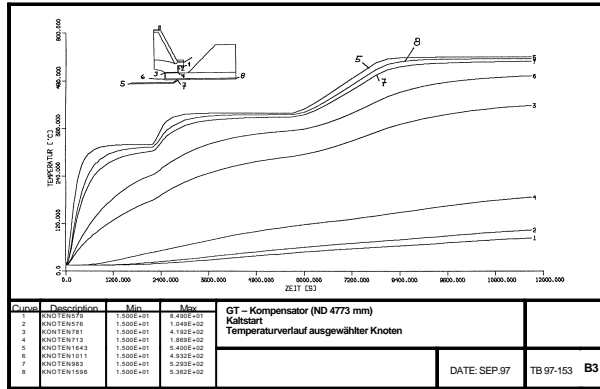


Bild 8 Knotentemperaturen von Strukturpunkten

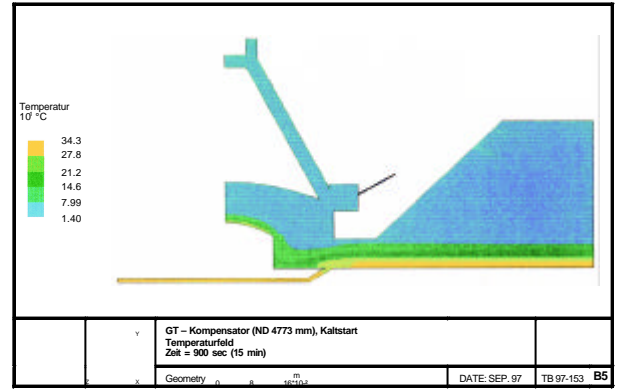


Bild 9 Temperaturfeld bei T=15min

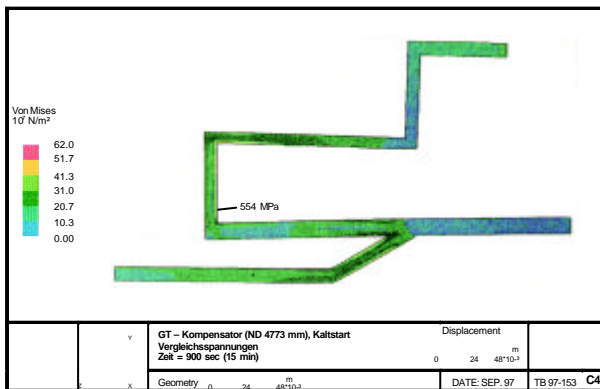


Bild 10 Vergleichsspannungen bei T=15min

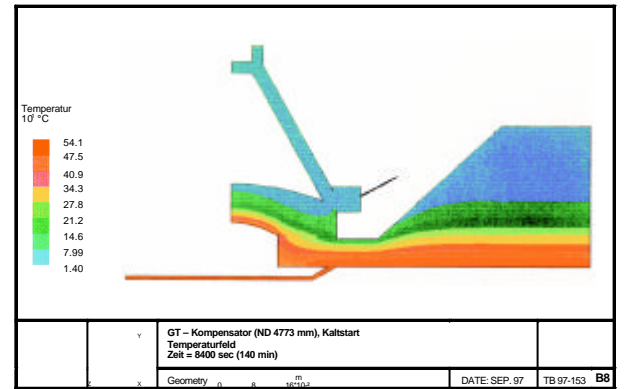


Bild 11 Temperaturfeld bei T=140min

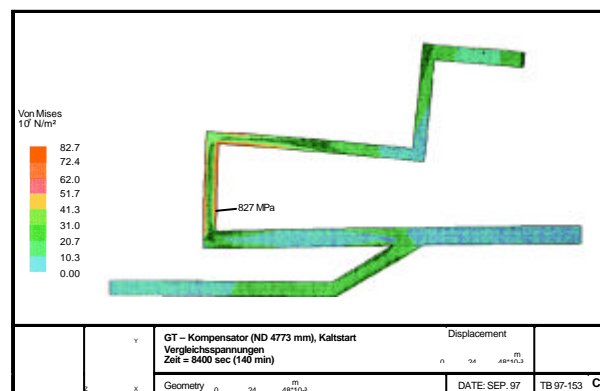


Bild 12 Vergleichsspannungen bei T=140min

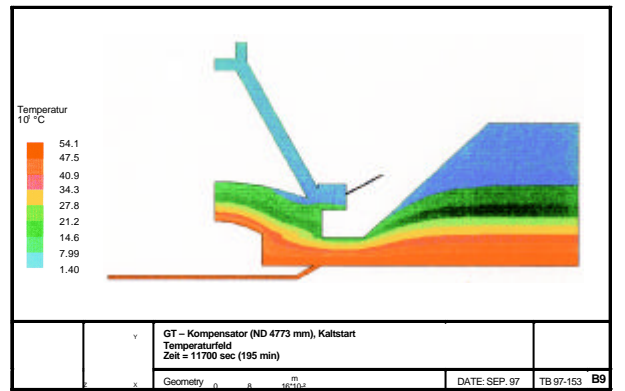


Bild 13 Temperaturfeld bei T=195min

Weichstoffkompensator am GT-Ausgang einer SIEMENS V94.3

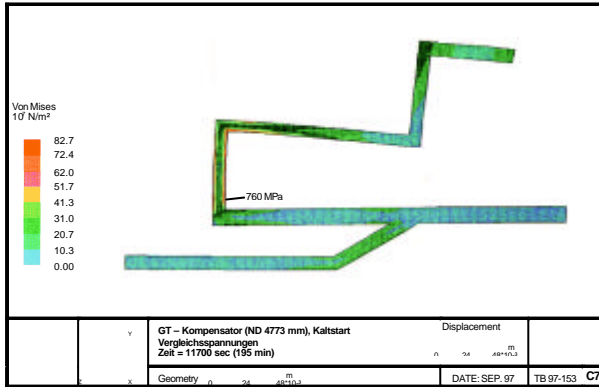


Bild 14 Vergleichsspannungen bei T=195min

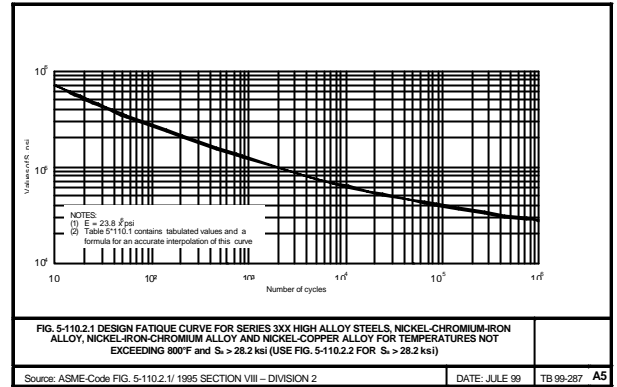


Bild 15 Low cycle Diagramm

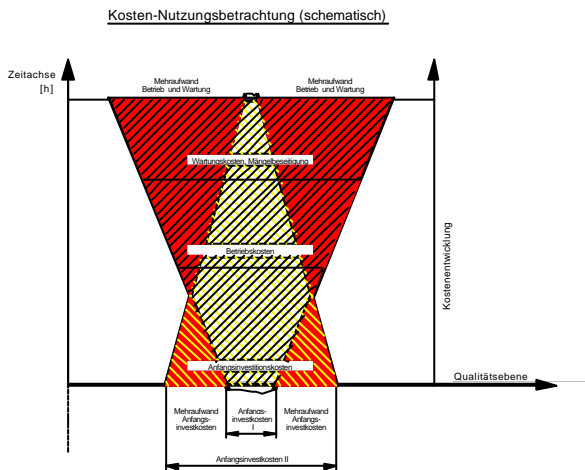


Bild 16 Kosten- Nutzenbetrachtung

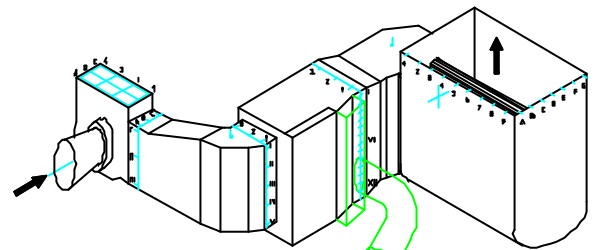


Bild 17 Aufbau einer ausgewählten Gasturbinenanlage

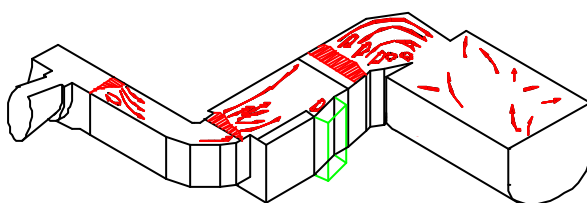


Bild 18 Strömungsdarstellung, Schnitt durch die Gasturbinenanlage

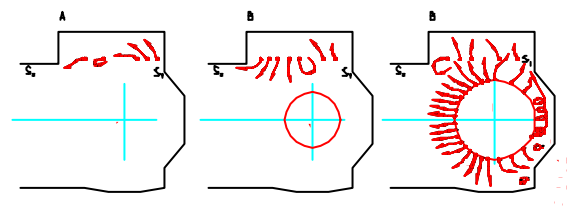


Bild 19 Strömungsdarstellung, Schnitt durch die Gasturbinenanlage

Weichstoffkompensator am GT-Ausgang einer SIEMENS V94.3

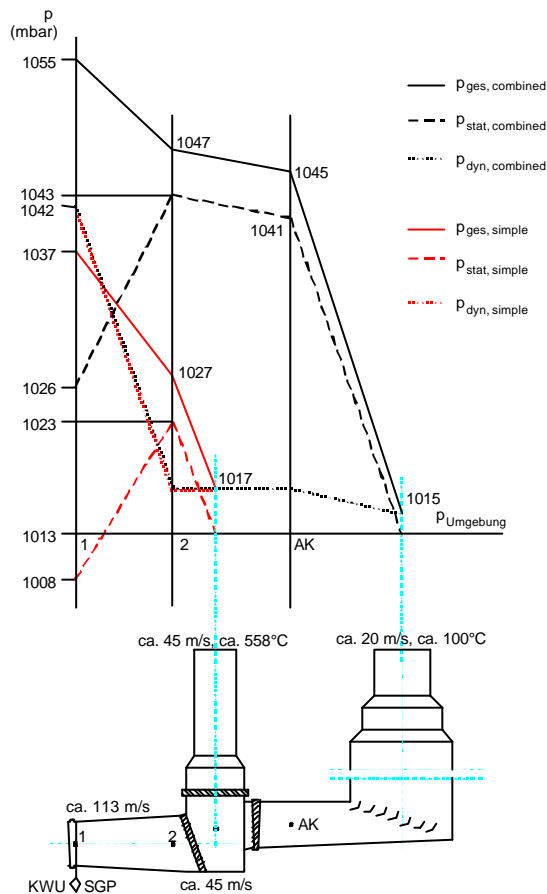


Bild 20 Druckverlauf Abgasstrecke

5. Kritische Betrachtungen zu einzelnen erfolgsentscheidenden technischen Einheiten im Hinblick auf erhöhte Beanspruchungen der benötigten Groß- Kompensatoren

Der Einbau eines Kompensators bewirkt eine örtliche Erweiterung des gasleitenden Querschnittes. Dadurch können für den Betrieb und für die Haltbarkeit der Leitungen schädliche Einflüsse auftreten. Um solche weitgehend zu unterbinden, werden die Hohlquerschnitte im

Bereich des Kompensators gewissermaßen durch Kanalverlängerungen überbrückt. Derartige strömungsleitende Elemente werden als Leitbleche bezeichnet. Um sie zweckmäßig auszulegen, muß man mit den möglichen Beanspruchungen und Auswirkungen gut vertraut sein. Erst aufgrund der vorangegangenen Ausführungen zum Druckverhalten war es möglich, einen Spezial - Membrankompensator für die beschriebene GT-Anlage zu optimieren. Dabei mußte berücksichtigt werden, daß der Druck innerhalb der Anlage zum gleichen Zeitpunkt örtlich erheblich unterschiedlich sein kann und sich

auch nach dem Betriebszustand der Gasturbinenanlage richtet. Der Weichstoffkompensator befand sich im Nachlauf der Gasströmung. Im Fall der Gasturbinen in Puertollano erwiesen sich folgende Umstände als bedeutsam:

5.1 Leitblecherregung

In GT-Anlagen werden durch Schwingungen Schäden verursacht, insbesondere Brüche. Schwingungen können einerseits durch periodische Strömungsphänomene, wie Wirbelablösungen, erregt werden, andererseits wirken sich auch stationäre Ungleichmäßigkeiten in der Absolutströmung als periodische Erregung aus. Die Nachlaufströmung hinter den Laufhauben der Gasturbine ("Nachlaufdellen") wirkt als periodische Erregung auf das Leitblech. Bei einer festen Drehzahl können den durch die Relativbewegung der Laufschaufel verursachten Erregungsmöglichkeiten bestimmte Frequenzen zugeordnet werden. Bei variabler Drehzahl und auch beim An- und Abfahren der Gasturbine sind die Frequenzbereiche für die Erregung von Einfluß.

5.2 Leitblechresonanz

Leitbleche werden zu Schwingungen mit großer Amplitude angeregt, wenn die Erregung in der Nähe einer Eigenfrequenz liegt. Ihren verschiedenen Schwingungsformen entsprechend haben Leitbleche viele Eigenfrequenzen. Die durch Schwingungen verursachte Wechselbeanspruchung wächst proportional zur Schwingungsamplitude. Um sie gering zu halten, sind die zu den niedrigen Ordnungen der Biegeschwingungen gehörenden Resonanzen, durch Einwirken auf die Erregungsquellen oder durch die Auslegung des Leitbleches zu ver-

Weichstoffkompensator am GT-Ausgang einer SIEMENS V94.3

meiden. Sie können für Leitbleche bei starrer Einspannung ohne Wirkung eines Zentrifugalfeldes wie für einseitig eingespannte Stäbe berechnet werden. Jedoch liegen sie infolge der schwer zu erfassenden Elastizität der Einspannung oft tiefer. Über die Einspannung können auch Schwingungen des Abgaskanals übertragen werden (Koppelschwingungen).

5.3 Leitblech-Schwingungen der Kontinua

Ein massebehaftetes Kontinuum hat unendlich viele Eigenfrequenzen. Als Bewegungsgleichung erhält man aus den dynamischen Grundgesetzen partielle Differentialgleichungen. Die Befriedigung der Randbedingungen liefert Transzendente und Eigenwertgleichungen. Für Näherungslösungen geht man vom Rayleighschen Quotienten und vom Ritzschen Verfahren aus. Auf diesem Gebiet konnte das Unternehmen Siemens KWU einen wesentlichen technischen Beitrag leisten.

5.4 Biegeschwingungen von Stäben (Bild 21)

Bild 20 verdeutlicht in Anlehnung an die einschlägige Literatur, mit welchen Druckverhältnissen im Combined cycle (GUD- Betrieb) und Simple cycle (Bypass- Betrieb) zu rechnen ist.

Eine zusätzliche Extrem-Funktionsforderung an den Weichstoffkompensator lag darin, daß die an der Einbaustelle herrschende Strömungsgeschwindigkeit den dreifachen Wert gegenüber den "normalen" Geschwindigkeiten in der Abgasstrecke haben kann, so daß die Druckschwankungen durch Strömungsablösung ebenfalls von 9 mbar auf ca. 27 mbar ansteigen.

Die Überlagerung dieser Druckschwankung mit dem statischen Druck an der Einbaustelle zeigt demzufolge:

- Simple cycle
-5 mbar statisch,
+29 mbar dynamisch
- Combined cycle
+13 mbar statisch,
+29 mbar dynamisch

d.h. es können Situationen, wie im Bild 22 dargestellt, auftreten. Darüber hinaus beurteilt der qualifizierte Weichstoffkompensator - Hersteller mit Bezug zur technischen Auslegung eines Kompensators mit hoher Lebenszeit bzw. Verfügbarkeitsgrad folgende Betriebsdrücke und Druckfunktionen.

- die Drücke während des Anfahrens, das ist der Anfahrdruck über die Zeit,
- den stationären Druck während des Voll und Teillastbetriebs,
- die Drücke während des Abfahrens; das ist der Abfahrdruck über die Zeit,
- die Drücke beim Schließen und Öffnen von Schiebern oder Klappen zum Schalten von Bypass auf Abhitzkessel und umgekehrt,
- plötzlich auftretende Drücke und Druckschläge bei schnellem Schließen von Klappen oder Steckscheibenschieber,
- die Druckänderungen, die durch Anfahrfehler auftreten können und es dabei zu schlagartigen Verpuffungen kommt,
- die Begrenzungen der Strömungsgeschwindigkeiten in den Abgaskanälen.

Ein Verständnis zu dem Druckverhalten ist ein wertvoller Beitrag, insbesondere für den Umstand, einen Spezial- Membrankompensator, wie für die Anlage Puertollano konzipiert, optimieren zu können.

Die Schwierigkeit liegt zum einen darin, daß der Druck im Abgaskanal nicht unbedingt gleich dem Druck am Einbauort des Membrankompensators ist und zum anderen daran, daß der Druck stark vom Betriebszustand der Gasturbinen-Anlage abhängt.

Um einen Spezial- Weichstoffkompensator in einer GT- Anlage sicher betreiben zu können, muß der alleine vom inneren Aufbau und von der Flexibilität des Weichstoffkompensators abhängige Fülldruck vom Anlagenplaner oder -betreiber gewährleistet sein.

Nur die stationäre Aufrechterhaltung des Fülldruckes in allen Betriebszuständen ermöglicht es, den Weichstoffkompensator zu kühlen und in der beabsichtigten Weise zu verformen.

(Auszug aus der Veröffentlichung "Gestützte Weichstoff- Kompensatoren für Gas- Dampfturbinen-Kombi- Block- Kraftwerke" von Prof. B. de Temple).

Weichstoffkompensator am GT-Ausgang einer SIEMENS V94.3

Biegeschwingungen von Stäben

Die Differentialgleichung lautet

$$r \cdot A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -\rho(x,t) \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[E y \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right]$$

bzw. für freie Schwingungen und konstantem Querschnitt

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -c^2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4}, \text{ mit } c^2 = \frac{E \cdot I_y}{r \cdot A} \quad (1)$$

Der Produktansatz von Bernoulli $w(x, t) = X(x) \cdot T(t)$ eingesetzt in Gleichung (1) liefert

$$X T = -c^2 X^{(4)} T \text{ bzw. } T = -c^2 \frac{X^{(4)}}{X} = -w^2, d.h. X^{(4)} = \left(\frac{w^2}{c^2} \right) \cdot X = 0$$

Mit $T = \left(\frac{w^2}{c^2} \right)^t$ lautet die Lösung

$$w(x,t) = A \sin(\omega t + b) \left[C_1 \cos\left(\frac{Ix}{l}\right) + C_2 \sin\left(\frac{Ix}{l}\right) + C_3 \cosh\left(\frac{Ix}{l}\right) + C_4 \sinh\left(\frac{Ix}{l}\right) \right] \quad (2)$$

Für das Leitblech nach Bild 1 lautet die Randbedingungen $X(0)=0, X'(0)=0, X''(0)=0, X'''(0)=0$. Damit folgt aus der Gleichung (2) die Eigenwertgleichung

$$\cosh j \cos j = -1$$

mit den Eigenwerten $I_1 = 1,875, I_2 = 4,694, I_3 = 7,855, \dots, I_i = \left(i - \frac{1}{2} \right) \cdot p$.



Bild 2 Biegeschwingung von einem Leitblech

Bild 2 Querschnitt eines Leitblechs

Nimmt man zum Beispiel die grundlegende Schwingungsform erhält man

$$f_1 = \frac{c}{2 \cdot p} \left(\frac{1,875}{l} \right)^2 = \frac{3,515}{2 \cdot p} \sqrt{\frac{E \cdot I}{r \cdot A \cdot l^4}} \quad (3)$$

Mit a) $I =$ Flächenmoment 2. Grades

$$I = \frac{p(D^4 - d^4)}{64}$$

Mit Außendurchmesser $D = 4,19 \text{ m}$ und dem Innendurchmesser $d = 4,17 \text{ m}$ gilt

$$I = \frac{p [4,19^4 - 4,17^4]}{64} = 0,2868 \text{ m}^4$$

Bild 21 Biegeschwingungen von Stäben

b) $E =$ Elastizitätsmodul, $E = f(\text{Stahl, Temperatur})$ siehe Tabelle 1

	20°C	200°C	400°C	600°C
ferritische Stähle	211	196	177	127
austenitische Stähle	196	186	174	157

Tabelle 1 Statistisch bestimmter Elastizitätsmodul verschiedener Stähle

Das Leitblech soll aus 1.4541 gefertigt werden. Nach DIN 17440 zählt dieses Material zu den austenitischen Stählen. Das Elastizitätsmodul für 580°C erhält man nach linearer Interpretation:

$$E(580^\circ\text{C}) = 127 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} + \frac{174 \text{ kN}}{400^\circ\text{C} - 600^\circ\text{C}} - 157 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \cdot (580^\circ\text{C} - 600^\circ\text{C}) = 1587 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$$

c) Die Masse m des Leitblechs berechnet sich zu

$$m = r \cdot A \cdot l$$

$$\text{Mit } r = 7,85 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}, l = 900 \text{ mm} \text{ und } A = \frac{p}{4}(D^2 - d^2) = \frac{p}{4}[(4,19 \text{ m})^2 - (4,17 \text{ m})^2] = 0,13 \text{ m}^2$$

$$m = 7,85 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \cdot 0,13 \text{ m}^2 \cdot 900 \text{ mm} = 92551,5 \text{ kg}$$

Somit folgt:

$$f_1 = \frac{3,515}{2 \cdot p} \sqrt{\frac{1587 \text{ kN} \cdot 0,2868 \text{ m}^4}{\text{mm}^2 \cdot 92551,5 \text{ kg} \cdot (0,9 \text{ m})^3}}$$

$$f_1 = \frac{3,515}{2 \cdot p} \sqrt{\frac{1587 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot 0,2868 \text{ m}^4}{\text{s}^2 \cdot (10^{-3})^3 \text{ m}^3 \cdot 92551,5 \text{ kg} \cdot (0,9 \text{ m})^3}}$$

$$f_1 = \frac{3,515}{2 \cdot p} \sqrt{6,746 \cdot 10^4 \frac{1}{\text{s}^2}}$$

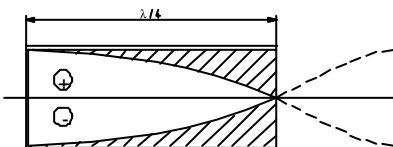
Für die weiteren Oberschwingungen lässt sich berechnen:

Oberschwingung	Eigenwert - λ	Eigenfrequenz
f_1	1,875	4,596 Hz
f_2	4,694	28,802 Hz
f_3	7,855	80,656 Hz
f_4	10,996	158,056 Hz
f_5	14,137	261,251 Hz
f_6	17,279	390,283 Hz

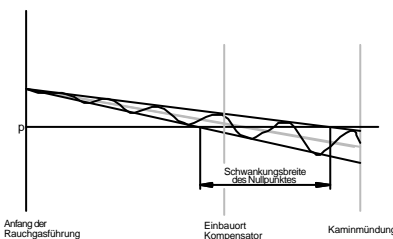
Tabelle 2 Niedrige Ordnungen der Biegeschwingungen

Pulsation

Neben dem örtlich und zeitlich schwankende statischen Druck, der hauptsächlich aus dem Eingangsdruck sowie aus der örtlich und zeitlich nach Betrag und Richtung veränderlichen Strömungsgeschwindigkeit resultiert, ist für den auf ein Bauteil wirkenden Gesamtdruck auch eine den statischen Druck überlagernde periodische Komponente ausschlaggebend. Solche Druckpulsationen können entstehen, wenn periodische Anregungen vorliegen. Sollten diese evtl. durch Resonanzüberhöhungen verstärkt werden, bilden sich sogenannte stehende Wellen aus. Beispiel für die Erzeugung einer stehenden Welle ist der $\lambda/4$ - Resonator. Die Länge dieses einseitig geschlossenen Rohres beträgt $\frac{1}{4}$ der Wellenlänge der Resonanzfrequenz oder ein ungerades Vielfaches davon.



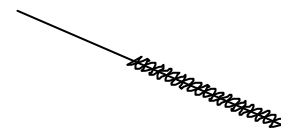
Druckverlauf in einem $\lambda/4$ - Resonator



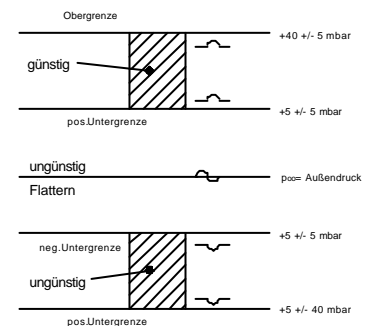
Schwingungsbreite der Drücke am Kompensator

Bild 22 Pulsation

Diese zeitlich konstanten Druckverhältnisse können aber, wie beschrieben, noch durch Wechseldruck-Komponente von Amplitude überlagert



Zusätzliche Überlagerung durch Druckpulsationen



Druckverhältnisse am Kompensator bei verschiedenen Statischen Drücken mit Überlagerter Druckpulsation von +/- 5 mbar

Weichstoffkompensator am GT-Ausgang einer SIEMENS V94.3

6. Auswertung der bisherigen Betriebszeit

DEKOMTE führte im Juni 1999 eine Zustandsanalyse vor Ort durch. Der Weichstoffkompensator wurde einer optischen Prüfung und einer Temperaturmessung an ausgewählten Stellen unterzogen. (Bild 23).

Als Anmerkung zu den ausgewählten Meßpunkten sei soviel gesagt, daß nicht überall die Zugänglichkeit zur Durchführung einer gesicherten Messung gegeben war.

Wie erwartet, hat der Gewebekompensator trotz widriger Betriebsverhältnisse, die außerhalb der Auslegungskriterien lagen, seine Funktion störungsfrei erfüllt.

Die im Rahmen der Auftragsvergabe erhaltene Aufgabenstellung "Überwachung und Messungen im Rahmen der Garantiezeit und Auswertung und vergleichende Analyse Theorie mit Praxis" haben die vor Ort gemessenen Werte erwartungsgemäß zu den Ergebnissen geführt, die den theoretischen Annahmen und rechnerischen Aussagen entsprechen. (Bild 8)

Zwecks hoher Aussagefähigkeit wurden die erforderlichen Messungen auf einen außergewöhnlich großen Zeitraum von ca. 3 Jahren verteilt.

Die Anlage wurde 1996 in Betrieb genommen. Seitdem sind mit den Spezial- Weichstoffkompensator etwa 19.580 äquivalent Std. ohne Beanstandungen gefahren worden.

Äquivalente Betriebsstunden ergeben sich:

$$T_{lauf} = 10.326 \text{ h}$$

$$T_{dyn} = 4.628 \text{ h (340 Starts)}$$

$$T_{äquiv. \cdot lauf} = T_{lauf} + 2 \cdot T_{dyn}$$

$$\approx 19.580 \text{ h}$$

Demnach kann der Metall-Kompensator zwischen Gasturbine und Diffusor für Anlagen mit ähnlichen Verhältnissen wie bei Puertollano durch einen Weichstoffkompensator ersetzt werden. Er bietet nicht nur den Vorteil einer kostengünstigeren Investition, sondern übertrifft den Metallkompensator auch in der Widerstandsfähigkeit unter den sehr problematischen Betriebsverhältnissen.

Die erreichte Betriebsbewährung läßt sicher darauf schließen, daß die Weichstoffkompensatoren ihre Funktion auch in ähnlichen Gasturbinenanlagen, ohne Sonderbeanspruchungen, erfüllen. Solche Weichstoffkompensatoren sind störungsfrei zehn Jahre und mehr im Betrieb und wurden dann routinemäßig ausgebaut (Ausfall-Wahrscheinlichkeitskurve Bild 5). In Bild 16 ist der Kosten-Nutzen-Effekt dargestellt für die Verwendung von Weichstoffkompensator anstelle von Metall-Kompensatoren. Grundsätzlich gilt die Darstellung auch für andere Abgassysteme mit Kompensationselementen.

7. Nachwort

DEKOMTE weiß es zu schätzen, einen derart verständigen, sachkundigen und unternehmungsfreudigen Partner für ein so anspruchsvolles Vorhaben gefunden zu haben, das für einen unverzichtbaren, starken Wirtschaftszweig richtungweisend sein könnte.

DEKOMTE bedankt sich für das entgegen gebrachte Vertrauen in die Leistungsfähigkeit und Handlungsweise des Unternehmens.

Verfasser: Günther de Temple

© by Günther de Temple

Die Kopie, Abschrift oder sonstige Vervielfältigung, auch mit elektronischen Hilfsmitteln, die Verbreitung solcher Kopien, Abschriften oder sonstiger Vervielfältigungen, sowie die Umgestaltung dieses Werkes oder einer Kopie, Abschrift oder sonstiger Vervielfältigung oder einzelner Auszüge daraus ist nur mit ausdrücklicher schriftlicher Genehmigung des Urhebers erlaubt. Zuwiderhandlungen werden mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder

Meßprotokoll Temperaturen im Betrieb									
Temperaturmessung GT-Seite									
	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	0°	
T ₁		48		38		46			
T ₂		65		58		75			
T ₃				102					
T ₄		73		97		71			
T ₅		70		91		75			
T ₆		77		84		81			
T ₇		65		65		61			
T ₈		152		197		155			
Temperaturmessung Diffusorseite									
	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	0°	
T ₁		48		47		51		61	
T ₂		65		69		66		70	
T ₃				92		97			
T ₄		78		90		78		99	
T ₅		78		86		76		103	
T ₆		88		102		79		122	
T ₇		64		79		69		111	
T ₈		152		194		168		154	
Allgemeines									
Datum	Namen		Zeit		Ort				
23.06.99	Herr Schneider Herr Hausmann		9:00 - 10:30 Uhr		Puertollano, Span.				

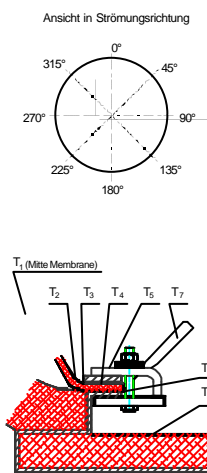


Bild 23 Meßprotokoll

Weichstoffkompensator am GT-Ausgang einer SIEMENS V94.3

Geldstrafe bedroht und können zivilrechtliche Folgen haben.