

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 76 (1958)
Heft: 39

Artikel: Die Heissluftturbinenanlage mit Naturgasfeuerung in Toyotomi
Autor: Taygun, F. / Frutschi, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-64052>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 22.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Heissluftturbinenanlage mit Naturgasfeuerung in Toyotomi

DK 621.438

Von Dr. sc. techn. F. Taygun und H. Frutschi, Zürich

I. Einleitung

Seit Oktober 1957 steht in Toyotomi, im Norden der Insel Hokkaido (Japan), eine mit Naturgas gefeuerte Heissluftturbinenanlage von 2000 kW im Dienst der dortigen Elektrizitätsversorgung. Die anfallende Naturgasmenge ist verhältnismässig gering und sehr grossen Schwankungen unterworfen. Dieser Umstand macht es notwendig, dass die projektierte Anlage nicht nur einen guten Vollastwirkungsgrad aufweist, sondern auch bei Teillasten wirtschaftlich arbeitet, was durch eine Heissluftturbinenanlage mit geschlossenem Kreislauf bestens gewährleistet wird. Ausserdem ist der Wärmeverbrauch einer solchen Anlage bereits bei Vollast um etwa 15 % geringer als derjenige einer Kondensationsturbinenanlage gleicher Leistung. Aus diesen Gründen beschloss der Bauherr, Hokkaido Denryoku (Hokkaido Elektrizitätsgesellschaft), eine solche Anlage anzuschaffen, Bilder 1 und 6. Sie wurde von der Firma Fuji Denki Seizo K. K. in Tokyo, in Zusammenarbeit mit der Firma Escher Wyss AG., Zürich, als Lizenzgeberin, gebaut. Die Toyotomi-Anlage stellt nicht nur die erste, in industriellem Betrieb stehende Gasturbine Japans dar, sondern ist überhaupt das erste Heissluftturbinen-Kraftwerk der Welt, welches mit einem gasförmigen Brennstoff betrieben wird. In den andern bis dahin gebauten Anlagen werden entweder flüssige oder feste Brennstoffe verfeuert.

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass die Heissluft-Turbinenanlage in Ravensburg mit Kohlenstaubfeuerung bereits 12 000 Betriebsstunden bei 660° C vor der Turbine hinter sich hat¹⁾, ohne dass sich bis jetzt anormale Verschleisserscheinungen gezeigt hätten. Dabei wies diese Anlage im verflossenen Jahr einen Bereitschaftsfaktor von über 98 % auf. Im Juli 1958 konnte ein weiteres Kraftwerk dieser Art mit Torffeuern in Betrieb genommen werden, dessen Heissluftturbine von der Firma John Brown, Clydebank, Schottland, ebenfalls einer Lizenznehmerin von Escher Wyss, gebaut wurde.

¹⁾ SEZ 1957, Nr. 24 u. 25, S. 374 u. 394; siehe auch S. 587 dieses Heftes.

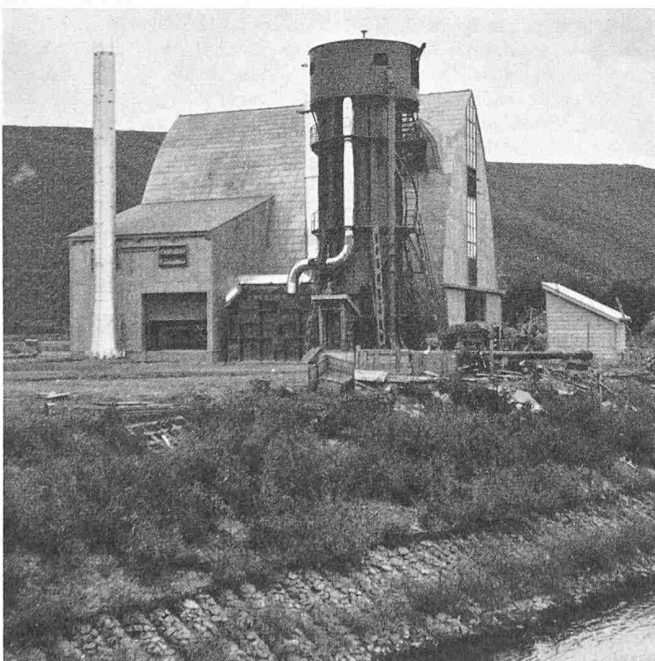


Bild 1. Ansicht des Kraftwerkes Toyotomi, vor dem Gebäude der Lufterhitzer

II. Beschreibung der Anlage

1. Arbeitsprinzip

Bild 2 stellt das Prinzipschema des Kraftwerkes Toyotomi dar. Die aus dem Vorkühler 1 strömende Arbeitsluft (8 ata, 25° C) wird durch einen dreistufigen Radialkompressor 2 mit einer Zwischenkühlung 3 auf 31 ata verdichtet. In der Folge durchströmt die komprimierte Luft den Wärmeaustauscher 4, in welchem sie sich an der aus der Turbine 6 austretenden heissen Luft auf etwa 370° C erwärmt. Anschliessend durchstreicht sie die Rohrschlangen des Lufterhitzers 5, in welchem sie weiter auf 660° C erhitzt wird. Infolge von Strömungsverlusten im Wärmeaustauscher und im Lufterhitzer ist der Druck der Arbeitsluft vor der Turbine etwas niedriger als bei Kompressorausstritt; er beträgt noch 30 ata. In der Turbine 6 expandiert die heisse Druckluft auf 8,2 ata.

Die Turbine treibt mit einer Drehzahl von 13 000 U/min den Kompressor 2 an, wofür rd. $\frac{3}{4}$ ihrer Leistung aufgebraucht werden. Der übrige Teil der Turbinenleistung, 2200 kW, steht zum Antrieb des Generators 8 zur Verfügung, der über das Reduktionsgetriebe 7 angetrieben wird und mit 3000 U/min umläuft. Die mit einer Temperatur von etwa 400° C aus der Turbine austretende Luft durchströmt den Wärmeaustauscher, wobei sie sich bei gleichzeitiger Erwärmung der vom Kompressor kommenden verdichteten Luft auf 150° C abkühlt, um schliesslich im Vorkühler auf 25° C gebracht zu werden.

2. Beschreibung der einzelnen Anlageteile

Die Maschinengruppe ist die selbe wie in der Anlage Ravensburg, die hier bereits beschrieben worden ist¹⁾, Bilder 3 und 7. Der Generator von 2500 kVA mit seiner Erregermaschine wird über ein Planetengetriebe (13 000/3000 U/min), Bauart Stöckicht, angetrieben. Der Drehzahlregler und die Hauptölpumpe sind am Getriebe angebaut. Für die Inbetriebsetzung der Maschinengruppe befindet sich am generatorseitigen Wellenende ein elektrischer Anwurfmotor.

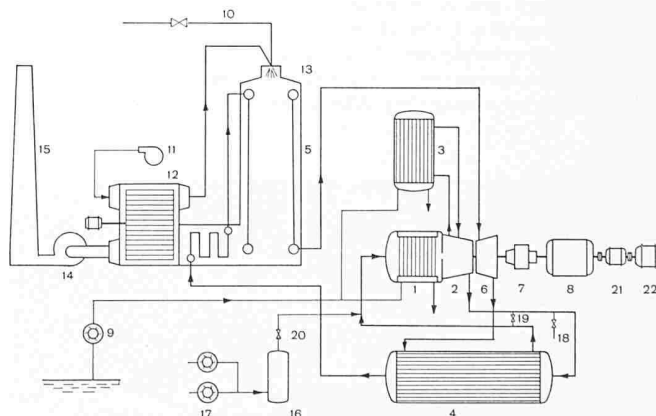


Bild 2. Schema der Anlage Toyotomi

- | | |
|----------------------|--------------------------|
| 1 Vorkühler | 12 Ljungström-Brennluft- |
| 2 Kompressor | vorwärmer |
| 3 Zwischenkühler | 13 Gasbrenner |
| 4 Wärmeaustauscher | 14 Saugzuggebläse |
| 5 Lufterhitzer | 15 Kamin |
| 6 Turbine | 16 Luftspeicher |
| 7 Reduktionsgetriebe | 17 Aufladekompressoren |
| 8 Generator | 18 Auslassventil |
| 9 Kühlwasserpumpe | 19 Bypassventil |
| 10 Brenngaszufuhr | 20 Einlassventil |
| 11 Frischluftgebläse | 21 Erregermaschine |
| | 22 Anwurfmotor |

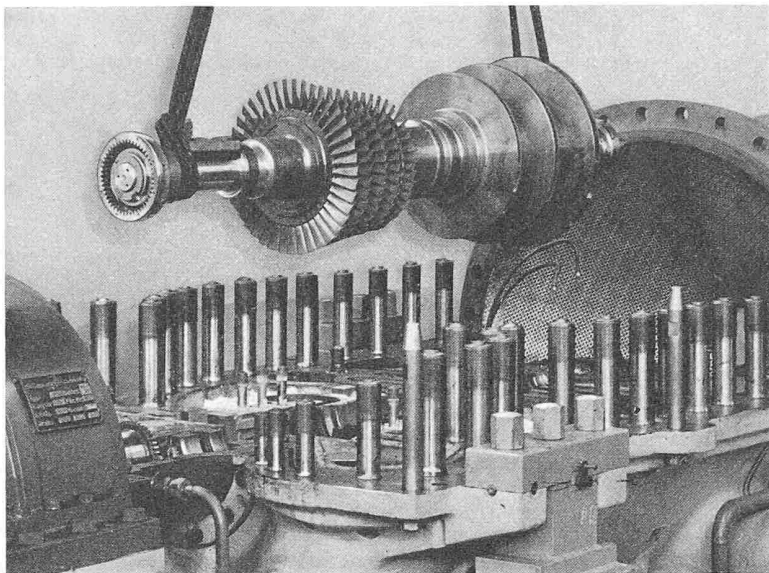


Bild 3. Kompressor-Turbinenrotor, links Turbinenläufer mit fünf Stufen, rechts dreistufiger Radialkompressor. Unten ist das offene Maschinengehäuse mit Reduktionsgetriebe links und Vorkühler rechts sichtbar

Wie für Ravensburg ist auch für Toyotomi ein mit Doppel-Wellbandrippenrohren bestückter Wärmeaustauscher verwendet worden. Diese Bauweise ergibt sehr kleine Abmessungen. Der Zusammenbau des Wärmeaustauschers ist aus Bild 4 ersichtlich.

Vor- und Zwischenkühler für die Luft sind mit normalen, radial berippten Kupferrohren ausgerüstet. Das Kühlwasser durchzieht das Rohrbündel im Kreuz-Gegenstrom zur Kreislauf-Luft, welche die Rippen radial anströmt. Das Kühlwasser wird einem neben der Anlage fliessenden Bach entnommen und von einer Pumpe durch die Kühler gefördert.

Aus Bild 5 geht hervor, dass der Luftherhitzer ähnlich ausgebildet ist wie bei ölgefeuerten Anlagen. Der einzige wesentliche Unterschied liegt in der Ausführung mit Gasbrenner. Die im Wärmeaustauscher auf 370°C vorgewärmte Kreislauf-Luft durchströmt zuerst den horizontal angeordneten Berührungsteil 2 und anschliessend den vertikalen Strahlungsteil 1, wobei sie sich auf 660°C erhitzt. Bei Normalbelastung werden etwa 30 % der zugeführten Wärme im Berührungsteil abgegeben und etwa 70 % im Strahlungsteil.

Das Naturgas wird in einer Tiefe von mehr als 1000 Metern angezapft und nach gründlicher Wasserabscheidung dem Brenner 8 zugeführt. Ein Frischluftgebläse 4 liefert die für die Verbrennung erforderliche Luft. Diese erwärmt sich anschliessend in einem rotierenden Ljungström-Vorwärmer 3 durch teilweise Rückgewinnung der Abwärme der Rauchgase bis auf

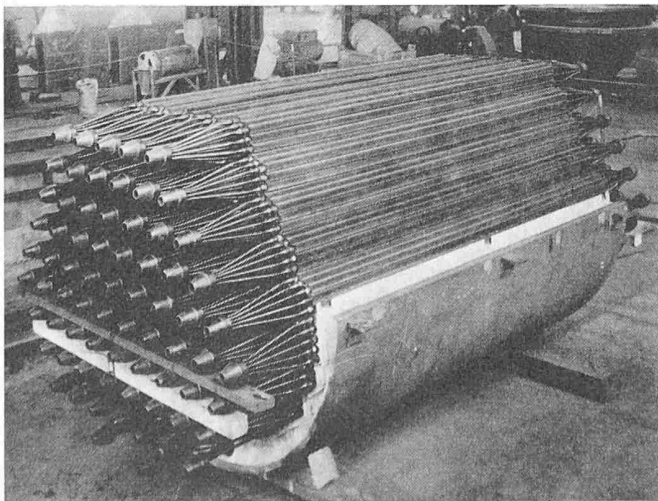


Bild 4. Wärmeaustauscher mit Doppel-Wellbandrippenrohren während des Zusammenbaues

etwa 400°C , worauf sie durch die Leitung 6 der Brennkammer zuströmt. Ein Rauchgasgebläse 5 saugt die Abgase der Brennkammer durch den Berührungsteil und den Ljungström-Vorwärmer ab und drückt sie durch die Leitung 9 in den Schornstein. Durch entsprechendes Einregulieren der beiden Gebläse 4 und 5 wird in der Brennkammer ein geringer Unterdruck aufrecht erhalten. Der Luftherhitzer kann mit minimalem Aufwand auf Oelfeuerung allein oder auf eine Kombination von Oel- und Gasfeuerung umgebaut werden.

3. Die Regulierung

Der geschlossene Kreislauf gestattet bekanntlich die Anwendung der sehr wirtschaftlichen Druckpegelregelung. Der Luftdruck vor der Turbine beträgt bei voller Leistung 30 ata, nach der Turbine 8,2 ata. Die Temperatur vor der Turbine wird auf 660°C , vor dem Kompressor auf 25°C gehalten. Unter diesen Bedingungen zirkuliert im geschlossenen Kreislauf ein Luftgewicht von etwa 24 kg/s. Bei Teillast bleiben das Druckverhältnis, die Temperaturen, die Geschwindigkeiten und damit auch der innere Wirkungsgrad unverändert. Lediglich die absoluten Werte der Drücke, das umlaufende Luftgewicht und damit die Leistung der Anlage passen sich der Belastung an. Hieraus ergibt sich ein konstanter innerer Wirkungsgrad des Kreisprozesses über dem ganzen Leistungsbereich.

Um den Druckpegel zu verändern, sind zwei Regulierventile erforderlich. Beide befinden sich in der kalten Zone des Kreislaufs und sind daher leichten Betriebsbedingungen ausgesetzt. Bei steigender Last lässt das Ventil 20, Bild 2, Druckluft aus einem Speicher 16 in den Kreislauf einströmen, wodurch sich der Druckpegel erhöht. Bei sinkender Last öffnet sich das Ventil 18 und lässt Luft entweichen, wodurch sich der Druckpegel senkt. Eine kleine Aufladekompressorengruppe 17 sorgt für ständigen Luftvorrat im Speicher.

Die Anlage Toyotomi arbeitet auf ein grosses Stromnetz. Aus diesem Grunde erfolgen Lastanstiege langsam, und man kann auf einen besondern Lufteinlass in den Hochdruckteil verzichten. Beim niederdruckseitigen Lufteinlass, der sich sehr einfach bauen lässt, muss die aus dem Behälter 16 dem Kreislauf zuströmende Luft zuerst vom Kompressor 2 verdichtet werden, bevor sie in der Turbine Arbeit leisten kann. Daher nimmt die Leistung der Turbogruppe während den ersten 1 bis 2 Sekunden eines Lufteinlasses etwas ab, bevor sich der gewollte Leistungsanstieg einstellt. Im Gegensatz dazu würde ein hochdruck-seitiger Lufteinlass eine augenblickliche Erhöhung der Leistung zur Folge haben, da diese Luft zuerst in der Turbine Arbeit leistet. Wo ein rascher Lastanstieg vorkommen kann, insbesondere wo auf ein kleines Eigennetz gearbeitet wird, wie das z. B. bei der Anlage Ravensburg zeitweise der Fall ist, muss daher die Druckluft auf der Hochdruckseite eingespiessen werden.

Bei schneller Entlastung, wie sie im Grenzfall z. B. durch ungewollte Abschaltung des Generators bei beliebiger Last eintreten kann, löst der Drehzahlregler das Öffnen des Bypassventils 19, Bild 2, aus, wodurch ein Teil der vom Kompressor 2 verdichteten Luft unmittelbar wieder in dessen Saugstutzen gelangt. Dadurch verringert sich das Druckverhältnis und damit das Wärmegefälle der Turbine, und gleichzeitig hat der Kompressor ein grösseres Luftgewicht zu fördern. Das alles bewirkt einen sofortigen Leistungsrückgang.

Diese Entlastungsmethode ist nicht nur sehr wirksam, sondern weist den weiteren Vorteil auf, dass der Luftinhalt des Kreislaufes sich nicht verringert. Es tritt ja keine Luft aus. Man ist daher in der Lage, nach erfolgter Lastabschaltung die Maschinengruppe sofort wieder auf den ursprünglichen Wert zu belasten. In Toyotomi wurden anlässlich der Abnahmeversuche durch die offizielle japanische Behörde Lastabschaltungen bei Klemmenleistung von 500, 1000, 1800 und 2000 kW durchgeführt, wobei nach zwei Minuten jeweils wieder mit den selben Leistungen parallel zum Stromnetz gefahren werden konnte. Diese Zeit hätte noch wesentlich verkürzt werden können, wenn nicht jeweils zuerst die Leerlauf-eigenschaften hätten beobachtet werden müssen. — Ist die

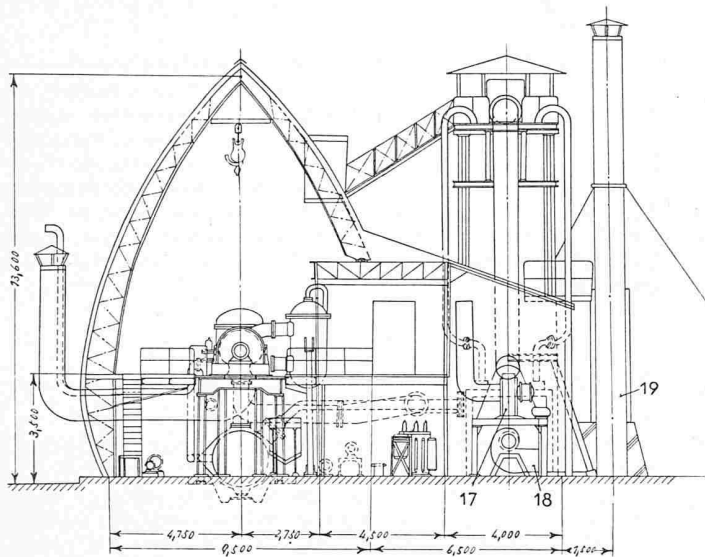


Bild 6. Dispositionsplan der Anlage Toyotomi 1:250

- | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| 1 Turbinenseite der Turbogruppe | 5 Anwurfmotor |
| 2 Kompressorseite der Turbogruppe | 6 Erregermaschine |
| 3 Reduktionsgetriebe | 7 Generatorenkühler |
| 4 Generator | 8 Wärmeaustauscher |
| | 9 Vorkühler |
| | 10 Zwischenkühler |
| | 11 Regulierventile |
| | 12 Aufladekompressoren |
| | 13 Luftspeicher |
| | 14 Schaltwarte |
| | 15 Lufterhitzer |
| | 16 Ljungström-Brennluftvorwärmer |
| | 17 Frischluftgebläse |
| | 18 Saugzuggebläse |
| | 19 Kamin |

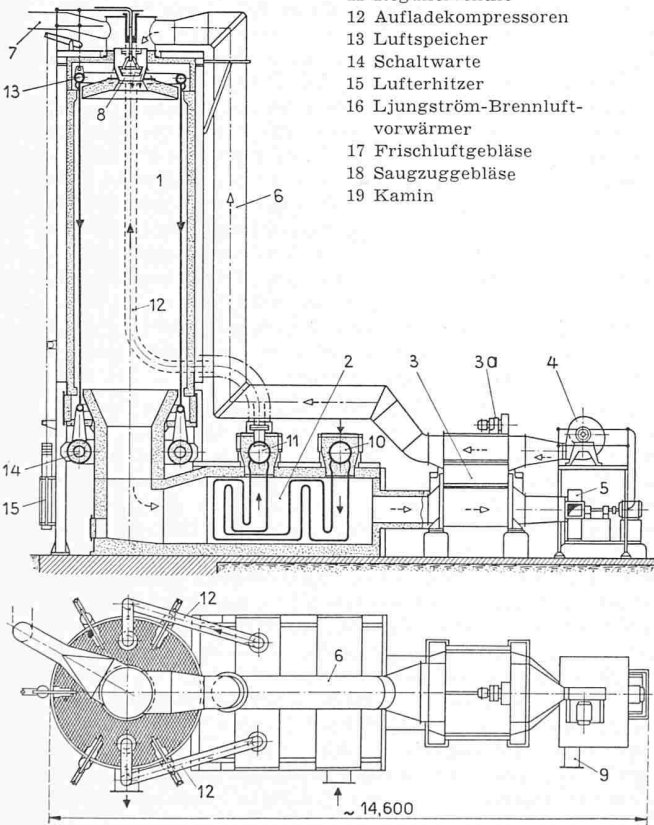
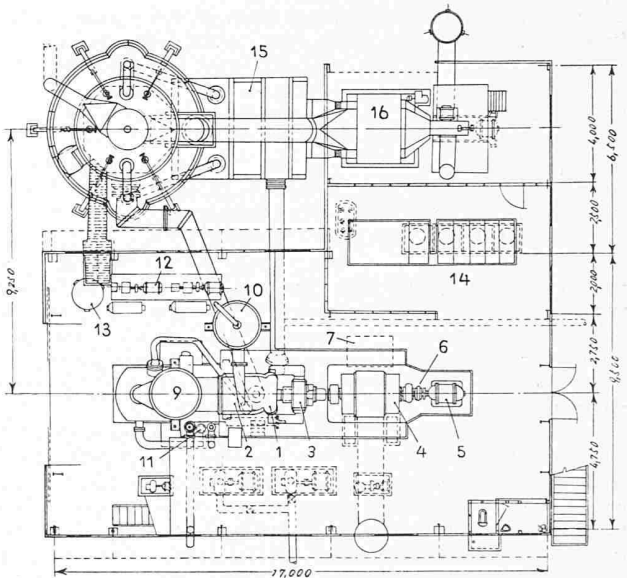
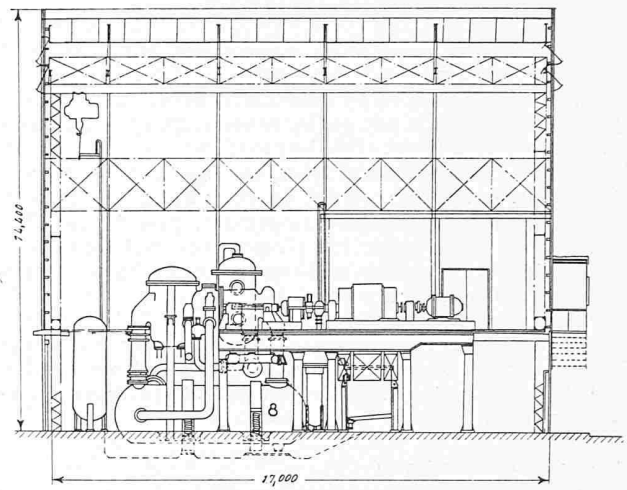


Bild 5. Lufterhitzer, rd. 1:180

- | | |
|---|---|
| 1 Strahlungsteil | 9 Rauchgasaustritt zum Kamin |
| 2 Berührungsteil | 10 Betriebsluftaustrittverteiler zu 2 |
| 3 Ljungström-Luftvorwärmer | 11 Betriebsluftaustrittssammler zu 2 |
| 3a Getriebe mit Motor zum Antrieb von 3 | 12 Druckluftleitung von 11 zu 13 |
| 4 Frischluftgebläse | 13 Druckluftverteiler zu 1 |
| 5 Rauchgasgebläse | 14 Druckluftsammler zu 1 |
| 6 Frischluftleitung | 15 Gegengewichte zur Entlastung der Lufterhitzerrohre im Strahlungsteil |
| 7 Naturgaseintritt | |
| 8 Gasbrenner | |

Maschine einmal parallel geschaltet, so kann — voller Kreislaufinhalt vorausgesetzt — die Leistung innerhalb eines Bruchteils einer Sekunde von Leerlauf auf Vollast gebracht werden. Dasselbe gilt auch für eine entsprechende Entlastung.



III. Betrieb

1. Inbetriebsetzung

Zuerst werden die Hilfsmaschinen in Betrieb genommen, d. h. Kühlwasserpumpe, Hilfsölpumpe, Aufladekompressoren, Saugzug- und Frischluftgebläse sowie der Elektromotor des rotierenden Ljungströmvorwärmers. Nachdem der Luftdruck im geschlossenen Kreislauf auf 1,2 ata gestiegen ist, wird der Anwurfmotor angelassen und die Maschinengruppe mit etwa $\frac{1}{4}$ der normalen Drehzahl angetrieben. Hierauf öffnet man wenig das Naturgasreguliertventil des Brenners, wobei gleichzeitig eine elektrische Zündung stattfindet. Auf diese Weise heizt sich der Kreislauf bei verringerter Drehzahl und dementsprechend verringerter Kreislaufmenge auf. Gleichzeitig mit der Erwärmung der Luft vor der Turbine nimmt die Leistung des Anwurfmotors ab, da die Drehzahl vorerst noch nicht gesteigert wird. Sobald vor der Turbine etwa 400 bis 420° C erreicht sind, kann der Anwurfmotor wieder voll ausgelastet werden, wodurch sich die Maschinengruppe rasch auf die Nenn Drehzahl beschleunigt. Gleichzeitig wird das Naturgasventil stärker geöffnet, um das mit der Drehzahl anwachsende sekundliche Kreislaufgewicht auf 420° C zu halten. Nun kann der Anwurfmotor ausgeschaltet werden, und die Gruppe dreht im Leerlauf.

Nach Einschaltung der Erregermaschine wird der Generator auf Spannung gefahren. Mit Hilfe der Drehzahlverstellung, welche die auf das Bypassventil wirkende Regulierung beeinflusst, wird die Gruppe synchronisiert und auf das Netz geschaltet. Nach weiterem Temperaturanstieg auf 660° C vor der Turbine kann durch entsprechendes Einregulieren des Druckpegels jede beliebige Leistung bis Vollast eingestellt werden.

2. Betrieb

Der Betrieb regelt sich vollkommen automatisch auf konstante Leistung. Der Druckpegel wird zu diesem Zweck auf dem eingestellten Wert konstant gehalten, und die Naturgasmenge stellt sich auf gleichbleibende Temperatur vor der Turbine ($\pm 5^\circ\text{C}$) ein. Die Regulierung der Verbrennungsluftmenge geschieht nach Massgabe des CO_2 -Gehaltes der Rauchgase. Ausserdem werden Saugzug und Frischluftgebläse ständig derart aufeinander abgestimmt, dass in der Brennkammer ein Unterdruck von einigen mm WS herrscht. Dadurch wird das Austreten von Gasen durch Ritzen im Mauerwerk des Lufterhitzers verhindert.

Normalerweise passt der Maschinist die Leistung der anfallenden Gasmenge an, um diese vollständig auszunützen. Es ist aber auch möglich, die Anlage als Spitzen-Kraftwerk zu betreiben. In diesem Fall regelt sich die Leistung nach der Netzfrequenz.

3. Ausserbetriebsetzung

Soll die Anlage abgestellt werden, so senkt man den Druckpegel und die Temperatur so weit, bis sozusagen keine Leistung mehr erzeugt wird; dann stellt man die Naturgaszufuhr ab und trennt den Generator vom Netz. Durch Öffnen des Bypassventils wird die Maschine stillgesetzt. Um den heissen Turbinenrotor vor Verkrümmung zu schützen, schaltet man eine Wellendrehvorrichtung ein. Auch die automatisch eingesprungene Hilfsölpumpe bleibt noch einige Zeit in Betrieb, um die mit Weissmetall ausgegossenen Turbinenlagereisen zu kühlen, solange der Turbinenrotor noch heiss ist.

Im Gefahrenfall kann der «Schnellschluss» von Hand oder automatisch ausgelöst werden. Er bewirkt ein sofortiges Öffnen des Bypassventils und des Auslassventils sowie das Absperren der Naturgaszufuhr zum Lufterhitzer. Dadurch wird nicht nur die Maschinengruppe stillgelegt, sondern auch das Kreislaufsystem vom Druck entlastet. Anschliessend muss auch in diesem Fall die Wellendrehvorrichtung in Betrieb genommen werden.

Der Schnellschluss wird automatisch ausgelöst bei: Ueberdrehzahl, bei axialer Verschiebung des Turbinenrotors infolge Störung am Spurlager, bei zu tiefem Lageröldruck, bei zu hoher Lagertemperatur sowie bei zu hoher Lufttemperatur vor der Turbine. In den beiden letztgenannten Fällen geht ein Warnsignal voraus. Gleichzeitig mit der Öffnung der beiden Ventile wird auch der Generator vom Netz getrennt.

IV. Schlussbemerkungen

Die bisherigen Erfahrungen mit dem Betrieb der Anlage Toyotomi haben gezeigt, dass das gesteckte Hauptziel — bestmögliche Ausnutzung der mit starken Schwankungen anfallenden Naturgasmenge — voll und ganz erreicht wurde. Darüber hinaus zeigt sich der Betrieb dieser Heissluftturbineanlage höchst einfach und übersichtlich.

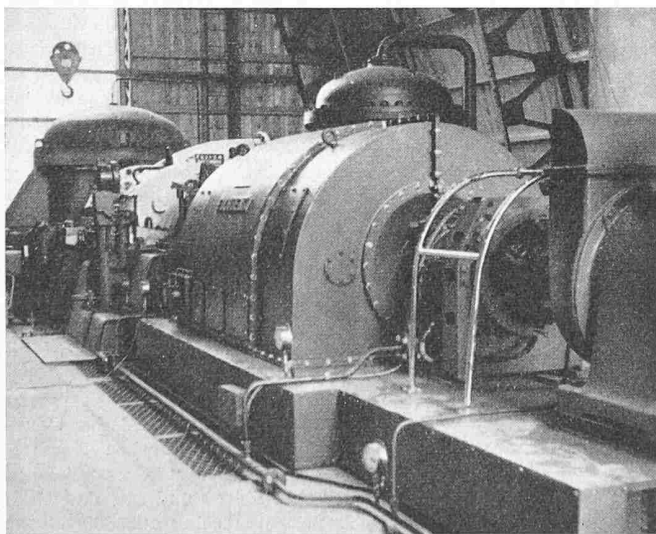


Bild 7. Ansicht der Maschinengruppe. Im Vordergrund (nur teilweise sichtbar), Erregermaschine, Generator, anschliessend Kompressor-Turbine mit Vorkühler im Hintergrund

Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass es sich bei der Anlage Toyotomi um ein reines Kraftwerk handelt. Es wird also keine Abwärme zu Heizzwecken verwendet, obwohl solche ohne die geringste Wirkungsgradeinbusse in Form von Heisswasser (z. B. 80°C) abgegeben werden könnte. In Toyotomi befindet sich ein Badehotel, welches zur Aufwärmung des Badewassers Naturgas verwendet. Ausserdem heizt im Winter die ganze Ortschaft mit diesem wertvollen Gas. Diese Heizaufgaben könnten sehr wohl durch das heisse Kühlwasser gelöst werden.

Die Untergrundbahn in Budapest

DK 625.42

Der Entwurf für die nach modernsten Grundsätzen projektierte Untergrundbahn für die Stadt von 1,7 Millionen Einwohnern, der im wesentlichen ein Netz von radialen Linien vorsieht, ging von der sorgfältigen Verkehrszählung von 1949 aus. Man entschloss sich zu einer tiefen Lage der Linienführung, um vom Oberflächenverkehr sowie von der Ueberbauung unabhängig zu bleiben, und nahm tiefe Lage der Haltestellen und die höheren Baukosten in Kauf. Da hier 8 bis 12 m mächtige, Grundwasser führende Aluvial-Schotter der Donau tertiären Ton mit Rissen und Sandlinsen überlagern, musste für die Ausführung der Tunnel weitgehend Schildvortrieb unter Druckluft vorgesehen und hierzu die Tiefenlage so gewählt werden, dass die luftdichte Ueberdeckung durch Ton gewährleistet war. Diese tiefe Lage ergibt für eine Haltestelle Baukosten, die denen von 1 km doppelspurigem Tunnel entsprechen; dies veranlasste, den Abstand der Haltestellen auf 1,17 km anzusetzen. Die Höchstgeschwindigkeit der Züge ist zu 70 km/h vorgesehen bei kleinstem Krümmungsradius von 400 m und grösster Steigung von 22 ‰. Sechs Triebwagen zu 19 m Länge, je 240 Personen fassend, sollen einen Zug bilden. Das automatische Signalsystem soll eine Folge von 34 Zügen je Stunde regeln, entsprechend 50 000 Personen in der Stunde in einer Richtung. Für jedes Gleis ist eine gesonderte Tunnelröhre von 5 m Innendurchmesser angeordnet. In den Haltestellen sind diese Röhren auf einer Länge von 120 m auf 8 m erweitert; sie enthalten den 4 m breiten Bahnsteig und liegen in einem Axabstand von 22,6 m; Querstollen führen zu der Mittellöhre von 8 m Durchmesser, durch welche man zur Rolltreppe gelangt.

Der Bau der tiefliegenden Strecken begann mit den vertikalen Zugangsschächten, die als zylindrische Druckluft-Senkkasten von 5 m Durchmesser seitlich des Bahntunnels an den Haltestellen und in der Mitte der Zwischenstrecke etwas über 20 m tief abgesenkt wurden. Von der Sohle eines Schachtes führte ein Zugangsstollen zu den bergmännisch ausgebrochenen Schildmontage-Kammern; stationsseitig mussten drei Schilde von 8,5 m Durchmesser montiert werden, streckenseitig zwei Schilde von 5,5 m. Die Absenkung der tiefen Zylinder machte zunächst wegen des geringen Gewichtes bei grosser Mantelreibung Mühe. Diese Schwierigkeit wurde überwunden, als man die Aussenwand über der Arbeitskammer mit einer 10 cm zurückspringenden Stufe versah und den bei der Absenkung sich dadurch bildenden Hohlraum mit einer thixotropen Flüssigkeit¹⁾ füllte, die schmierte und schwer genug war, um durch ihren hydrostatischen Druck den Baugrund zu stützen. 1 m³ dieser Flüssigkeit enthielt 120 kg Bentonit, 80 kg Baryt, 500 kg Ton und 720 l Wasser, womit sich ein spezifisches Gewicht von 1,42 t/m³ ergibt. Die Mantelreibung im sandigen Kies konnte durch diese Massnahme von 1,8 bis 2 t/m² auf 0,4 bis 0,5 t/m² herabgesetzt werden. Deutlich trat hierbei der Anstieg der Schneidenlast in Erscheinung, was bei der Bemessung der Schneiden im Auge zu halten ist.

Für die bergmännisch vorgetriebenen Verbindungsstollen von 6,4 m Durchmesser wurde in weichen, lockeren Böden die Kernbauweise angewandt: 1. Vortriebsstollen im Kämpfer; 2. Schachtabteufung im Widerlager und Betonierung; 3. Scheitel-

¹⁾ Ein Kolloid wird als thixotrop bezeichnet, wenn es die Eigenschaft besitzt, durch mechanische Einwirkung eine Aenderung der Kohäsion der Teilchen zu erleiden und vom Zustand eines Gels in eine Flüssigkeit überzugehen. Zur Ruhe gekommen, geht der Stoff wieder in die kolloidale Form über. Im Gel bilden die festen Teilchen ein Gitterwerk, in welchem die Flüssigkeit gefangen ist; im flüssigen Zustand schweben die Teilchen frei in der Flüssigkeit (thixis = Berührung, tropos = Wendung).