

Erfahrungen aus der Planung, der Inbetriebnahme und dem ersten Betriebsjahr des GuD-Kraftwerks der Gemeinschaftskraftwerk Tübingen GmbH

Dr.-Ing. **M. Heinisch**, Tübingen, Dipl.-Ing. **R. Trumpf**, Stuttgart

1 Einleitung

Durch das ehemalige Fernheizwerk I (FHW I) der Universität Tübingen wurden sowohl Teile der Universität als auch Teile der Tübinger Innenstadt mit Fernwärme versorgt. Das Heizkraftwerk wurde von der Gemeinschaftskraftwerk Tübingen GmbH (GKT) übernommen, deren Gesellschafter die Stadtwerke Tübingen (SWT) und die Fernwärmegesellschaft Baden-Württemberg (FBW) sind. Die Zuständigkeit für die Betriebsführung liegt bei den SWT.

Das FHW I (s. Anhang 1) ist ein historisches Gebäude aus dem Jahr 1929. Vor dem hier beschriebenen Umbau waren drei Kessel (17 bar/350 °C) mit bivalenter Feuerung (Erdgas/Heizöl EL) aus den Jahren 1962/72 in Betrieb. Im Jahr 1988 wurde ein Dampfturbosatz installiert.

Aufgrund des Alters und der Wirkungsgrade der Anlage war unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten ein Ausbau bzw. eine Modernisierung erforderlich. Aus Untersuchungen im Vorfeld folgte als bestmögliches Konzept eine Erweiterung zu einem Gas- und Dampfturbinen-Heizkraftwerk. Das Versorgungsgebiet für Fernwärme wurde und wird noch erweitert.

2 Zielsetzungen für den Ausbau des FHW I

Eine ganze Reihe von Zielsetzungen waren zu beachten, die nachfolgend unter verschiedenen Gesichtspunkten zusammengefaßt sind:

- Bereitstellung von Fernwärme in Form von Dampf (3,8 bar, 170 °C) und Heißwasser (110 °C) für die Universität, Liegenschaften des Landes und der Stadt sowie privaten Abnehmern. Der erzeugte Strom wird in das Netz der SWT eingespeist.
- Weitere Verwendung möglichst vieler vorhandener Komponenten (Dampfturbosatz, Dampfverteiler, Speisewasserbehälter, Wasseraufbereitung usw.)
- Ausschließliche Nutzung der vorhandenen, denkmalgeschützten Bausubstanz mit möglichst keiner Veränderung der Außenwirkung.
- Berücksichtigung der vorhandenen Umweltbelastung (Schadstoffimmissionen) im Innenstadtbereich sowie der angrenzenden Wohnbebauung am Standort des FHW I (Schallimmissionen)

Die weiteren Gesichtspunkte waren:

a) Strategische Überlegungen

- Berücksichtigung einer mittelfristigen Umstellung von Dampf auf Heißwasser
- Anlagenkonzept (Aufstellungsplanung) mit möglichst „kurzen“ Wegen für Rohrleitungen, Kabeln usw. zwischen den einzelnen Komponenten

b) Umweltschutz

- Optimaler Anteil an Eigenstromerzeugung
- Hohe Wirkungsgrade (max. Ausnutzung der Brennstoffenergie)
- Geringstmögliche Schadstoffemissionen (= ½ TA-Luft) und niedrige Schallemissionen

c) Betriebliche Gesichtspunkte

- Einsatz bewährter Technik
- Hohe Versorgungssicherheit
- Überschaubares Anlagenkonzept
- Einfache Bedienbarkeit
- Gute Zugänglichkeit bei Reparaturen und Instandhaltung
- Schnelle Verfügbarkeit der Dampferzeuger durch ständige Warmhaltung (Dampf-Heizschlangen)

d) Wirtschaftliche Randbedingungen

- Niedrige Investitions- und Betriebskosten
- Hoher Automatisierungsgrad (Betrieb ohne Beaufsichtigung, BoB über 72 h) mit Fernbedienung über die zentrale Leitwarte im Betriebsgebäude der SWT
- Wahlweise Einsatz von Erdgas und Heizöl EL
- Abfahren kurzzeitiger Stromspitzen durch GT-Überlastbetrieb

Manche der Anforderungen sind „gleich gerichtet“ und werden deshalb nur einfach erwähnt, wie z. B. der optimale Anteil an Eigenstromerzeugung, der ebenfalls ein wichtiger wirtschaftlicher Faktor ist.

Die neue Anlage war so auszulegen, daß eine gesicherte Wärmeversorgung auch bei Ausfall der größten Wärmeerzeugungseinheit gewährleistet ist. Weiter waren für den BoB-Betrieb sämtliche Kesselanlagen und die periphere Ausrüstung gemäß TRD 604 [1] auszurüsten. Grundlage für die Auslegung und den Betrieb der Dampferzeuger war die Struktur des Wärmebedarfs (wärmeorientierte Betriebsweise) gemäß der Jahresdauerlinie in Bild 1.

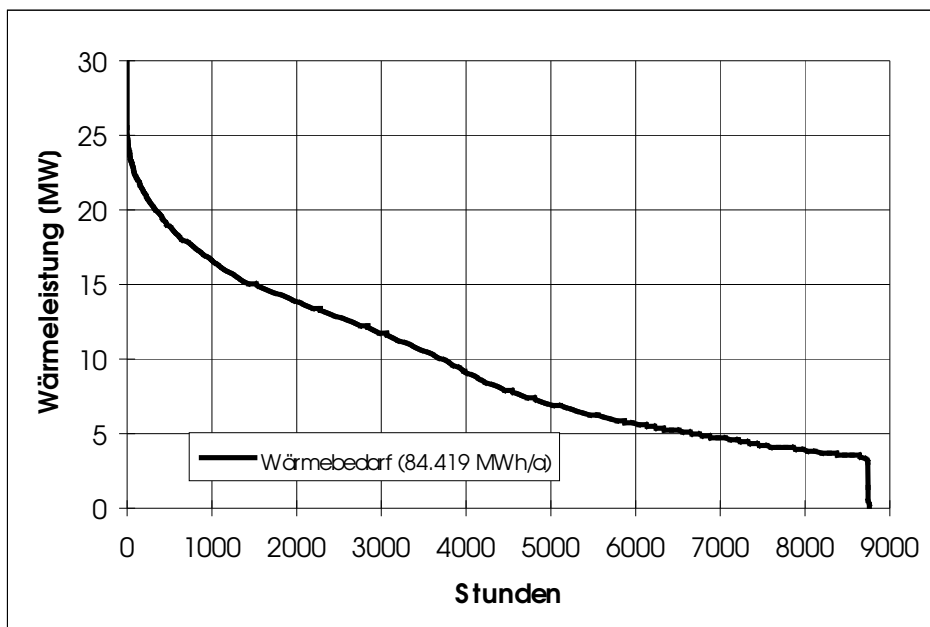


Bild 1: Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs

3 Untersuchte GuD-Konzepte

Im Jahr 1994 wurde die Vorplanung durchgeführt mit dem Ziel, Möglichkeiten zur Sanierung der Kessel und Erweiterung der Eigenstromerzeugung aufzuzeigen. Das Anforderungsprofil entsprach weitgehend den in Kapitel 2 genannten Punkten.

Bei der Festlegung des Anlagenkonzeptes waren besonders folgende Punkte Gegenstand der Untersuchung:

- Anzahl der Gasturbosätze (**GT**): 1 oder 2
- Art der Abhitzekeessel (**AHK**): Wasserrohrkessel (WRK) oder Großwasser-raumkessel (GWK), jeweils mit oder ohne Zu-satzfeuerung (ZF)
- Art des Dampfturbosatzes (**DT**): Weiterverwendung des vorhandenen DTS, Ein-satz eines zusätzlichen einstufigen oder Ein-satz eines neuen mehrstufigen DTS

Es wurden folgende Konzepte untersucht (Bild 2):

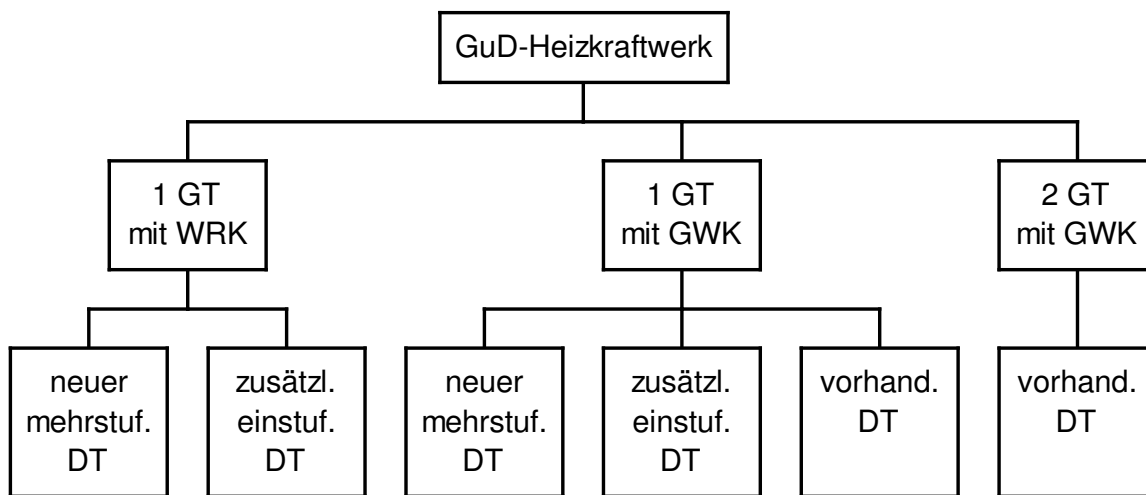


Bild 2: Untersuchte GuD-Konzepte

Bei den Konzepten mit einem GT sollten zwei der vorhandenen Kessel weiter als Spitzen-/Reserveeinheit dienen. Diese Lösungen hätten jedoch einen zusätzlichen Aufwand und ein nicht abschätzbares Risiko bezüglich des Personaleinsatzes (BoB-Betrieb!), den Schnittstellen zwischen alten und neuen Anlagen sowie den langfristigen Kosten für Reparatur und Wartung bedeutet. Aus diesen Gründen und der in Kapitel 2 genannten Ziele wurden durch technische Vergleiche und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen das folgende optimale Konzept ermittelt:

- Demontage und Ersatz sämtlicher Kessel. Aufrechterhaltung der Dampfversorgung während des Umbaus durch eine provisorische Mietkesselanlage.
- Aufstellung von zwei ca. 5 MW Gasturbosätzen mit nachgeschalteten 9 t/h HD-Abhitzekeesseln (22 bar/350 °C) ohne Zusatzfeuerung.

- Abdeckung der Lastspitzen mit einem 17 t/h HD-Dampfkessel (**SLK**: 22 bar/350 °C) und Aufstellung eines 14,5 t/h ND-Dampfkessels (**RK**: 11 bar/185 °C) als Reserveeinheit.
- Betrieb des vorhandenen Dampfturbosatzes mit den Abhitzekeesseln und dem Spitzenlastkessel.
- Einsatz von Dampfspeichern zur Erhöhung der Versorgungssicherheit und der Entkopplung von Strom- und Wärmebedarf (Abdeckung von Stromspitzen und Verlagerung der Stromerzeugung von der Niedertarif- in die Hochtarifzeit). Die Dampfspeicher ermöglichen zudem einen Betrieb der Gasturbinen vorzugsweise in Vollast!
- Einsatz von Heizkondensatoren zur Umformung von Dampf in Heißwasser für das Fernheiznetz Innenstadt (Auslegung auf die gesamte Heizlast im Vorgriff einer späteren Umstellung der Dampfnetze auf Heißwasser).
- Aufstellung von Luftkühlern, um unabhängig vom Wärmebedarf einen Gasturbosatz stromorientiert einsetzen zu können.

Der letztere Punkt war von Bedeutung, da ein Bypass-Schornstein für einen stromorientierten Einsatz der Gasturbinen nicht genehmigungsfähig war.

4 Projektvorbereitung, Baubeschluß und Genehmigung

Zur Vermeidung von Terminverzögerungen nach Baubeschluß wurden vorab zeitkritische Projektabschnitte in Angriff genommen. Ein wesentlicher Vorgang war die Erstellung einer Immissionsprognose. Unmittelbar an den Standort des FHW I grenzt der Österberg (Wohnbebauung ca. 250 m entfernt) an, eine topographische Erhöhung, die den vorhandenen Schornstein um ca. 40 m übersteigt. Da für das Schornsteingutachten (Bestandteil des Genehmigungsantrags) keine geeigneten Klimadaten vorlagen, wurden diese im Verlauf einjähriger Messungen erfaßt. Weitere Vorbereitungen waren der Besuch von Referenzanlagen, Gespräche mit möglichen Lieferanten und die Durchführung detaillierter Berechnungen.

Aufbauend auf der Vorplanung wurde im Herbst 1995 die Entwurfsplanung durchgeführt. Es wurden alle Systeme technisch festgelegt, die Investitionskosten ermittelt und ein Wirtschaftlichkeitsvergleich durchgeführt. Der Planansatz für die Investitionen betrug

27,6 Mio. DM und die Amortisationszeit gegenüber einem Ausbau mit Sattdampfkesseln ohne Kraft-Wärme-Kopplung ca. 8 Jahre.

Der Baubeschluß wurde am 05.12.1995 gefaßt. Die wichtigsten Eckdaten des Terminplanes waren:

- | | | | |
|--------------------------|----------|----------------------------|----------|
| • Demontage Kessel | 15.02.96 | • Beginn Innenausbau | 01.06.96 |
| • Inbetriebnahme RK | 15.10.96 | • Inbetriebnahme SLK | 01.12.96 |
| • Inbetriebnahme GT 1, 2 | 15.12.96 | • Beginn Kraftwerksbetrieb | 01.01.97 |

5 Konzeption und Ausführung

Eine schwierige Aufgabe in der Planungsphase war es, die Hauptkomponenten im ehemaligen Kesselhaus zweckmäßig anzuordnen. Im Anhang 2 ist ein Schnitt dargestellt, der die Anordnung der Kesselanlagen zeigt. In der Hauptebene (Ebene 1) sind der SLK und der RK angeordnet. Über diesen Kesseln wurde in Stahlbauweise eine zweite Ebene (Ebene 2) eingezogen, auf der die AHKs aufgestellt sind. Die Gasturbosätze sind quer zum SLK/RK in der Ebene 1 installiert, wobei die Abgase über senkrecht stehende Schalldämpfer den AHKs zugeführt werden. Für die Einbringung dieser Komponenten wurde der gesamte Dachbereich geöffnet, während der gesamten Bauphase mit einem provisorischen „Winterbaudach“ versehen und anschließend neu gestaltet.

Zentral zwischen SLK/RK und den Gasturbinen ist auf der Ebene 1 die Leitwarte angeordnet. Von hier aus besteht Sichtkontakt zu sämtlichen wichtigen Komponenten und es führen kurze Wege zu den erforderlichen Kontrollstationen.

Den größten Platzbedarf nehmen die Dampfspeicher ein. Sie sind im ehemaligen Kohlelager aufgestellt.

Nachfolgend werden das Gesamtkonzept erläutert und die Hauptkomponenten beschrieben.

5.1 Gesamtkonzept

Im Bild 3 ist das wärmetechnische Schema der Gesamtanlage dargestellt.

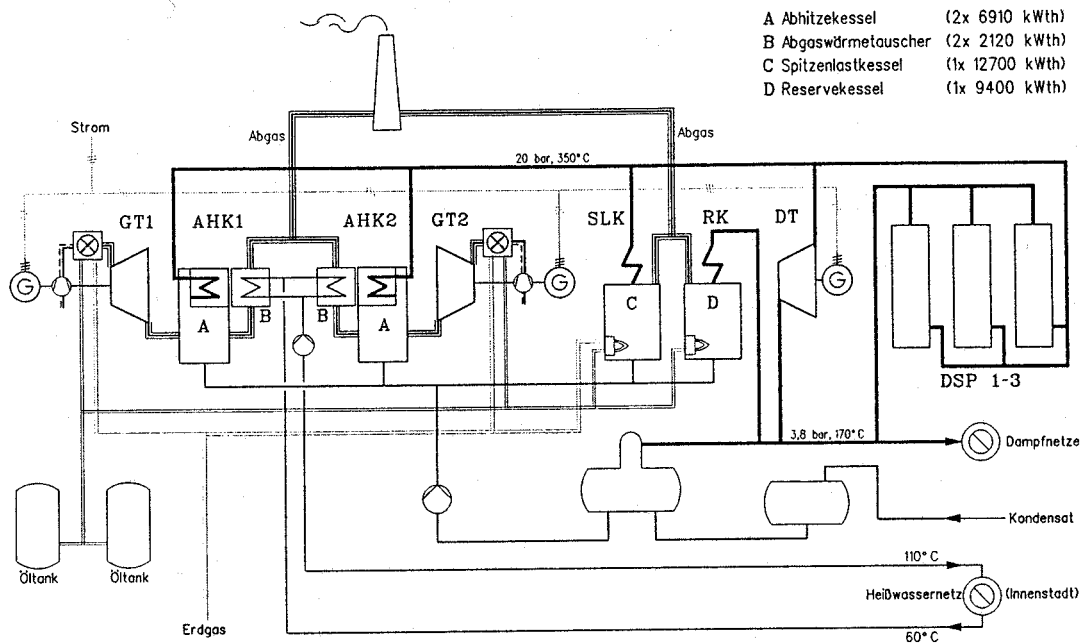


Bild 3: Wärmeschaltbild der Gesamtanlage

Eine Übersicht der Hauptkomponenten, deren Bauart und Leistung geht aus der Tabelle 1 hervor (Werte in Klammer gelten für einen Betrieb mit Heizöl EL).

Tabelle 1 Hauptkomponenten und deren Bauart/Leistung
Angabe der Lieferanten in []

Komponente	Abkürzung	Leistung	Typ/Bauart
1. Gasturbosatz 1, 2 [TUMA Turbomach]	GT 1, 2	4,65 MW _{el}	Taurus 60 mit bivalenter Solo-NO _x -Brennkammer für „fliegenden“ Brennstoffwechsel Erdgas/Heizöl EL und DIGICON Gasturbinenkontrollsystem
2. Dampfturbosatz [Kühnle-Kopp-Kausch]	DT	1,00 MW _{el}	einstufige Radialturbine CFR 5G4

<u>3. Abhitzeessel</u> [Standardkessel]	AHK 1, 2	6,91 MW _{th} (6,73 MW _{th})	Rauchrohrkessel ohne Zusatzfeuerung mit Überhitzer und innenliegendem Dampfkühler
	ECO 1, 2 NTWT 1, 2	2,12 MW _{th} (1,63 MW _{th})	Getrennt vom Kesselkörper ist der Economiser mit einem nachgeschalteten Niedertemperaturwärmeaus-tauscher angeordnet.
<u>4. Spitzenlastkessel</u> [Standardkessel]	SLK	12,01 MW _{th} (9,37 MW _{th})	Flammrohr-Rauchrohrkessel mit Überhitzer in der vorderen Wendekammer und bivalenter Feuerung Erdgas/Heizöl EL ("fliegender" Wechsel) sowie nachgeschaltetem Economiser
	ECO	-	
<u>5. Reservekessel</u> [Standardkessel]	RK	8,41 MW _{th}	Flammrohr-Rauchrohrkessel mit Heizöl EL-Feuerung
<u>6. Dampfspeicher</u> [Standardkessel]	DSP 1 - 3	7,51 MW _{th}	3 Ruths-Speicher (stehend) mit jeweils 200 m ³ Nennvolumen

Anmerkungen:

- Die Überhitzer der AHK und des SLK werden jeweils trocken angefahren.
- Die ECOs der AHK und des SLK werden vom Speisewasser gegen die Schwerkraft und im Gegenstrom zum Abgas durchströmt. In den angegebenen Leistungsdaten ist der Anteil der ECOs enthalten.
- Es wurde keine dicht schließende Bypassklappe an den NTWT gefordert, was jedoch eine Mindestwärmeabnahme von jeweils 200 kW erforderte.
- Der Regelbereich für die Feuerungen beim SLK sind 1 : 6 (Erdgas) und 1 : 3 (Heizöl EL) und beim RK 1 : 4 (Heizöl EL).

Sämtliche Dampferzeuger werden von einer „Speisewasserschiene“ aus versorgt, auf die sechs Speisewasserpumpen fördern. Der RK stellt eine komplett selbständige Reserve-

einheit dar und ist direkt auf den ND-Verteiler geschaltet. Die übrigen Dampferzeuger AHKs und SLK speisen auf die HD-Schiene. Von dieser wird der Dampf zunächst über den Dampfturbosatz (DT) zur Stromerzeugung geleitet, bevor er in den ND-Verteiler eingespeist wird. Übersteigt der Dampfverbrauch das Schluckvermögen der DT (18 t/h), so wird dieser Dampf über eine Umformstation direkt in den ND-Verteiler gespeist. Bei Ausfall der DT wird der Dampfdruck über die Umformstation geleitet. Über die Dampfspeicher kann überschüssiger Dampf gespeichert oder zusätzlich benötigter Dampf abgegeben werden.

Vorrangig werden zur Abdeckung des Wärmebedarfs ein bzw. zwei GT/AHKs eingesetzt. Während der Heizperiode können meistens beide Blöcke während Tag und Nacht durchgefahen werden, wobei die Dampfspeicher die Funktion einer Sofortreserve übernehmen. Bei Lastspitzen wird zusätzlich der SLK eingesetzt.

Während der Übergangszeit fährt in der Regel ein GT/AHK-Block durch, während der zweite je nach Strombedarf tagsüber angefahren wird. Die überschüssige Wärme wird eingespeichert und entweder nachts wieder abgegeben oder über Luftkühler abgeführt.

In den Sommermonaten kann wärmeorientiert ein GT/AHK-Block nur tagsüber eingesetzt werden, wobei der überschüssige Dampf eingespeichert wird und den Wärmebedarf während der Nacht abdeckt. Der zweite GT/AHK-Block dient als Ausfallreserve sowie zur Abdeckung von Stromspitzen.

5.2 Gasturbosätze

Die Gasturbinen sind als einwellige Industrieturbinen ausgeführt. Die Minimierung der NO_x -Emissionen erfolgt in „trockenen“, NO_x -armen Brennkammern, d. h. ohne Dampfeindüsung. Die Reinigung der Verbrennungsluft erfolgt mit Pulsfiltern. Das Druckluftsystem zur Abreinigung wurde wegen der Schallemissionen nicht eingebaut, sondern nur zur Nachrüstung vorgesehen.

Für den Betrieb der Gasturbinen ist ein Erdgasvordruck von 12,5 bis 14,5 bar notwendig. Der erforderliche Erdgasdruck konnte durch Änderungen am vorgelagerten Netz bereitgestellt werden. Damit waren keine Verdichter erforderlich. Die Brennstoff-Umschaltung vom Hauptbrennstoff Erdgas auf Heizöl erfolgt automatisch, z. B. bei Abfall des Erdgasdrucks. Die Umschaltung von Heizöl auf Erdgas wird manuell ausgelöst.

Das Turbinenabgas wird über Schalldämpfer den Abhitzekeesseln zugeführt. Es ist kein Abgasbypass vorhanden, d. h. bei Nichtverfügbarkeit eines Abhitzekeessels kann die zugehörige Gasturbine nicht betrieben werden.

5.3 Dampferzeuger

Die Abhitzekeessel wurden als Großwasserraumkessel ohne Zusatzfeuerung ausgeführt. Die Verdampferteile (Kesselkörper) enthalten die Rauchrohre in einem Zug, um die Druckverluste möglichst niedrig zu halten. Zur Minimierung des Abgasverlustes sind Economiser zur Speisewasservorwärmung und Niedertemperaturwärmeaustauscher zur Erwärmung von Fernheizwasser installiert. Bei Heizölbetrieb wird die Abgastemperatur zur Vermeidung von Säuretaupunkt-Unterschreitungen nach unten begrenzt. Hierfür wird auf der Wasser-Eintrittsseite Warmwasser zugemischt.

Beim Spitzenlast- und dem Reservekessel handelt es sich um Einflammrohr-Rauchrohr-Kessel in Dreizug-Bauweise. Der Spitzenlastkessel ist zusätzlich mit einem Economiser und einem Überhitzer ausgerüstet.

5.4 Dampfspeicher

Die Dampfspeicher bestehen aus drei parallel geschalteten Druckbehältern. Eine Nachrüstung auf Heißwasserbetrieb ist möglich.

Die Behälter sind während des Anlagenbetriebs mit gesättigtem Wasser zwischen ca. 4 und ca. 20 bar gefüllt. Zum Laden des Speichers wird Dampf von der HD-Sammelschiene über ein Regelventil eingespeist. Hierdurch erhöht sich der Behälterdruck, die Temperatur und der Füllstand. Der Speicher kann annähernd bis zum HD-Schienendruck beladen werden. Die Entladung erfolgt über ein weiteres Regelventil auf die ND-Schiene.

Die Dampfspeicher wurden so ausgelegt, daß der Wärmeinhalt bei geringem Wärmebedarf der Verbraucher (Sommerbetrieb) für ca. einen Tag ausreichend bemessen ist.

5.5 Nebenkomponenten

Von der Vielzahl an Nebenkomponenten, wie z. B. der Brennstoffversorgung, Drucklufzeugung oder Druckhaltung etc. ist der Schornstein zu erwähnen. Aus Gründen des Denkmalschutzes mußte für die neuen Anlagenteile der vorhandene Mauerwerksschornstein weiterverwendet werden. In den Schornstein wurden zwei konzentrische Innenröh-

ren aus Edelstahl eingezogen (Durchmesser 950 bzw. 2.000 mm). Das Abgas aus dem Spitzenlast- und dem Reservekessel wird in das innere Rohr eingeleitet, das Gasturbinen-Abgas aus den Abhitzekesseln in das äußere Rohr.

5.6 Elektro- und Leittechnik

Nicht näher eingegangen wird auf die Elektrotechnik, da es sich hier ausschließlich um Standardkomponenten der Spannungsebenen 0,4/20 kV handelt.

Für die Gasturbosätze und Dampferzeuger wurden jeweils eigene leittechnische Einrichtungen vorgesehen (Komponentenleittechnik). Durch die Komponentenleittechnik wurden die komponenten-internen Regelungen und Steuerungen realisiert (z. B. Kessel-Wasserstandsregelung, Frischdampf-Temperaturregelung, Brennersteuerung etc.). Es kamen die jeweiligen Standardsysteme der Komponentenhersteller zum Einsatz. Die Bedienung und Beobachtung erfolgt über konventionelle Elemente an den Schaltschränken.

Zur Realisierung übergeordneter Regelungs- und Steuerungsaufgaben sowie zur Koordination der Komponentenleittechnik wird eine übergeordnete Leittechnik (System ABB) eingesetzt. Sie erfüllt insbesondere folgende Aufgaben:

- übergeordnete Automatisierung (Befehlsgabe an Komponenten, Kesselfolgeschaltung, Speicherbe- und -entladung, Einsatz des Dampfturbosatzes, Regelung der Dampfumformstation, Regelungen und Steuerungen im Bereich Fernwärmeversorgung)
- übergeordnete Bedienung und Beobachtung einschließlich Erstellung von Langzeit-trends, Kurvendarstellungen etc.
- Energiemanagementaufgaben
- zentrale Störmeldeerfassung

Wegen der Auslegung und Ausrüstung der Anlage für einen Betrieb ohne Beaufsichtigung muß die Kesselhauswarte nicht dauernd besetzt sein. Die übergeordnete Bedienung und Beobachtung kann daher nicht nur von der Kesselhauswarte aus, sondern auch von der zentralen Warte der Stadtwerke Tübingen aus erfolgen.

6 Ausschreibung und Vergabe

Die Beschaffung der Anlagenteile erfolgte gemäß der EG-Sektorenrichtlinie [3]. Es kam das Verhandlungsverfahren zum Einsatz. Folgende Komponenten wurden europaweit ausgeschrieben:

- Gasturbosätze
- Abhitzekeessel
- Spitzenlast- und Reservekeessel
- Wärmespeicher
- Rohrleitungen
- Leittechnik

7 Bauphase und Inbetriebnahme

Ungeachtet des engen Terminplanes erfolgte die Bauphase zügig und ohne nennenswerte Unterbrechungen. Die Inbetriebnahmen konnten planmäßig durchgeführt werden.

8 Betriebserfahrungen 1/97 - 6/98

Bis zum 01.01.97 waren die Hauptkomponenten einsatzbereit und der Betrieb mit Kraft-Wärme-Kopplung konnte aufgenommen werden. Das 1. Quartal 1997 war geprägt durch die Fertigstellung ausstehender Restarbeiten (z. B. Verrohrung der Luftkühler und Heizkondensatoren) und dem Probetrieb sowie daraus resultierender Ergänzungen der Leittechnik.

8.1 Probetrieb und Nachbesserungsarbeiten

Bei einem Projekt des hier dargestellten Umfangs fallen während dem Probetrieb eine Vielzahl von Nachbesserungen an. Der Übersicht wegen sind von diesen die Wichtigsten hier im Anhang 6/1 - 5 tabellarisch zusammengestellt.

Gasturbosätze

Termingerecht und ohne weitere Schwierigkeiten erfolgte die Inbetriebnahme der Gasturbinen. Während des anschließenden Probetriebes kam es häufig zu Abschaltungen der Abhitzekeessel bzw. der Gesamtanlage. Ein Fremdstart der Gasturbinen war oftmals nicht möglich und konnte nur durch manuellen Eingriff des Personals vor Ort erfolgen. Als Ursache stellte sich eine zu hohe Lagerreibung des Generators während der Startphase heraus. Durch Anhebung des Lageröldruckes der Generatoren konnte dieses Problem behoben werden.

Nach dem Abschalten der GTS/AHKs zeigten sich während des Probetriebes zu hohe Temperaturen an den Turbinenschaufeln. Üblicherweise erfolgt deren Kühlung über einen Bypass-Schornstein. Da dieser hier nicht vorgesehen war, mußten die Abgasklappen nach den Abhitzeesseln auch im Stillstand geöffnet bleiben. Dies führte zu erhöhten Wärmeverlusten und als Nachbesserungsmaßnahme muß ein Bypass-Schornstein nachgerüstet werden.

Im Genehmigungsverfahren waren keine detaillierten Angaben über Emissionsgrenzwerte während dem An-/Abfahrvorgang vereinbart worden. Aufgrund der kontinuierlichen Überwachung der Abgasemissionen (NO_x , CO) zeigte es sich, daß die Grenzwerte in diesen Betriebsphasen überschritten werden (siehe Bild 4). Durch eine Festlegung der Betriebsabläufe und einen Nachtrag zum Genehmigungsantrag konnte dieser Sachverhalt geklärt werden.

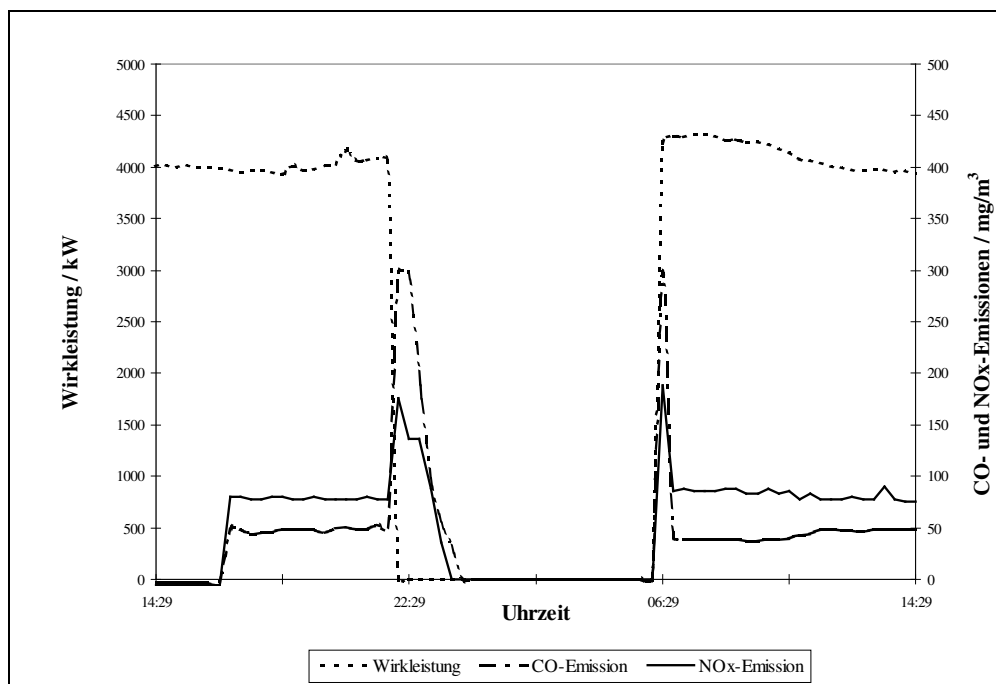


Bild 4: GT-Betrieb, CO und NO_x -Emissionen

An weiteren Maßnahmen stehen die Lieferungen neuer Brennkammern aus, die ein Anfahren mit HEL sowie einen zeitlich begrenzten Betrieb mit 10 % Überlast ermöglichen.

Für den laufenden Betrieb wichtig und unerlässlich ist die Kontrolle der Leistungswerte. Diese werden mehrmals täglich registriert und ausgewertet. Dadurch erhält man Hinweise auf unvorhersehbare Unregelmäßigkeiten sowie eine Kontrolle über den betrieblichen

Zustand. Je nach Betriebs- und Umgebungsbedingungen müssen dann zusätzliche Wartungsarbeiten, wie z. B. das Waschen der Verdichter, durchgeführt werden. Welchen erheblichen Einfluß dies auf die GT-Leistung haben kann, zeigen die Angaben im Anhang 4.

Die GT-Leistung hängt sehr stark von der Lufteintrittstemperatur ab. Weitere Einflußgrößen auf die GT-Stromerzeugung (ohne Lufteintrittstemperatur) jeweils für Betrieb mit Erdgas sind:

- Barometrischer Luftdruck: 4,769 kW/mbar
- Eintrittsdruckverluste: 0,773 kW/mbar
- Austrittsdruckverluste: 0,320 kW/mbar
- Alterung in % der Klemmenleistung > 2 % (Betriebsstunden > 7.000 h)
> 3 % (Betriebsstunden > 25.000 h)
- Abweichung Planwert-Garantiewerte $q_B = 3,357 \text{ kW}_{th}/\text{kW}_{el}$ (Planwert)
(q_B spez. Brennstoffverbrauch und $\eta_{el} = 29,79 \%$
 η_{el} elektrischer Wirkungsgrad) $q_B = 3,456 \text{ kW}_{th}/\text{kW}_{el}$ (Garantiewert)
 $\eta_{el} = 28,94 \%$

Aus den angegebenen Daten folgt, daß von den üblicherweise zugrunde gelegten Plan-daten für einen realistischen Wirtschaftlichkeitsvergleich die Stromerzeugung mit - 3 % Abschlag einkalkuliert werden kann.

Abhitzekessel

Die Konstruktion der separat angeordneten NTWT's/ECO erforderte bereits während der Inbetriebnahme technische Veränderungen (Einschweißen von Querträgern im Bodenbereich). Eine Überdimensionierung der Überhitzer wurde durch das Heraustrennen von Rohrschlangen behoben.

Die Regelung der Dampftemperatur (siehe Schaltschema Anhang 3) erfolgt über einen Dampfkühler und Beimischung von überhitztem Dampf. Die Planung sah eine Auslegung des Überhitzers auf die Anfahrbedingungen der GT (540 °C, 20 bar) vor. In der Ausführung waren jedoch nur die im Abgasstrom gelegenen Rohre auf das geforderte Material (13 CrMo44) ausgelegt. Der Sicherheitstemperaturbegrenzer war entsprechend den Ma-

terialien der übrigen Bauteile auf 395 °C eingestellt und führte daher oftmals beim Anfahren zum Abschalten von GT/AHK. Eine Änderung dieses Sachverhaltes steht noch aus.

Da bereits bei der Planung/Bestellung die Isolierstärke um den Kesselkörper bekannt war, wäre hilfreich gewesen, die Rohrleitungsanschlüsse in entsprechender Distanz vom Kesselkörper entfernt anzuordnen. Als Konsequenz davon hätte sich der Aufwand für die Isolierung erheblich reduziert sowie die Wärmeverluste durch die geschlossenen Isolierfläche erheblich verringert.

Spitzenlast-/Reservekessel

Die Inbetriebnahme von Reserve- und Spitzenlastkessel erfolgte planmäßig. Einen längeren Zeitraum und mehrere Anläufe mußten jedoch zur Einstellung der Kessel- und Brennerregelung in Anspruch genommen werden, um die garantierten Emissionswerte einhalten zu können.

Dampfspeicher

Noch während der Bauphase war unklar, ob man die Dampfspeicher gleichzeitig laden und entladen kann. Um sich nicht unnötig einzuschränken, wurde dieser Betriebszustand mit vorgesehen. Im Nachhinein gab es damit keinerlei Probleme, wohl wegen der großen Bauhöhe der Dampfspeicher und verbunden damit der langen „Wegstrecke“ zwischen Dampfein- und -austritt. Das Bild 5 zeigt einen typischen Tagesgang der Be-/Entladung der Dampfspeicher.

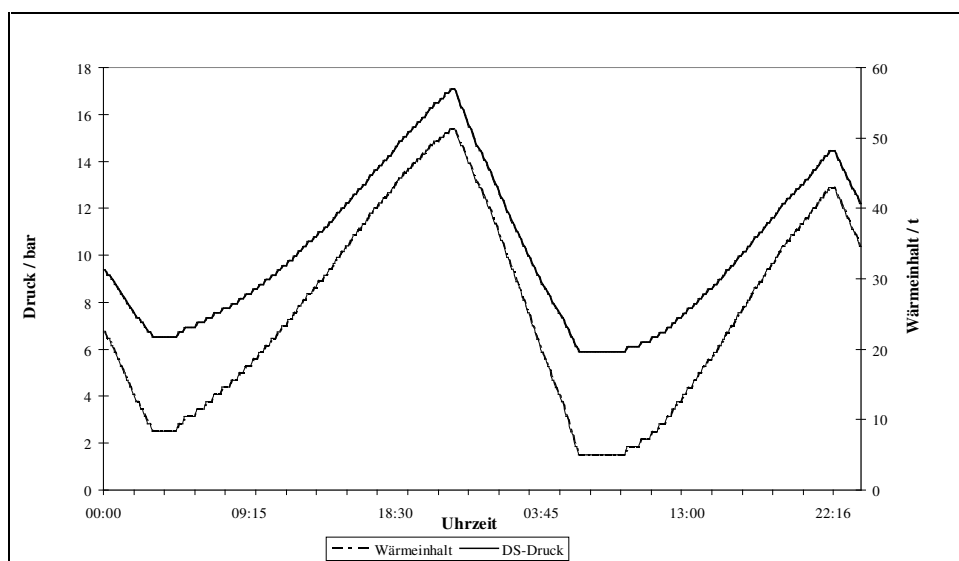


Bild 5: Tagesganglinien der Dampfspeicher Be-/Entladung

Als Meßaufnehmer zur Registrierung des Füllstandes hat sich der Einsatz von Kessel-
elektroden bewährt. Als einziges Problem dabei stellt sich die erforderliche Einbringung
über dem Kopf der Dampfspeicher dar.

Wenig Beachtung wurde den Abdichtungen geschenkt. Grundsätzlich wurde der Rohrlei-
tungsbau mit geschweißten Armaturen und nur an den Anschlußstellen zu den Kompo-
nenten mit Flanschverbindungen ausgeführt. Nachdem sämtliche Dichtungen durch me-
tallfolienbeschichtete, wellverpresste und mit Innenbördel versehenen Dichtungen ersetzt
waren, konnten die aufgetretenen Probleme behoben werden. Schon wegen einer de-
fekten Dichtung müssen die Speicher abgefahren werden, was Kosten in Höhe von 3.000
- 4.000 DM verursacht. Dieser Sachverhalt zeigt deutlich die „wirtschaftliche“ Bedeutung
der Dichtungen in diesem Bereich.

Leittechnik

Für die Leittechnik wurde das System Advant P von ABB eingesetzt. Das FHW I war eine
der ersten Anlagen dieser Art, bei denen Advant P eingesetzt wurde. Erfahrungsgemäß
gibt es in solchen Situationen Anlaufschwierigkeiten, die jedoch im gegebenen Fall rasch
und in enger Kooperation zwischen dem Betreiber und der Projekt-/Entwicklungsabteilung
von ABB gelöst wurden. Das System selbst funktioniert zufriedenstellend und die noch
ausstehenden Restpunkte (siehe Anhang 6/5) werden weiterverfolgt.

Sonstige Komponenten

Erhebliche Schwierigkeiten bereiteten die Schallemissionen des Be- und Entladeventils
der Dampfspeicher. Es wurden Körperschallpegel bis zu 103 dB (A) gemessen. Beide
Ventile sind zwar im Kesselhaus angeordnet, durch die Dampfströmung und Rohrleitun-
gen erfolgte jedoch eine Schallfortleitung in den Außenbereich bis zu den Dampfspei-
chern. Durch folgende Maßnahmen konnte eine Verbesserung erreicht werden:

- Einbau eines Strömungsgleichrichters nach dem Beladeventil
- Schalltechnische Entkopplung sämtlicher Rohrleitungsaufhängungen in den betroffe-
nen Strecken
- Auskleidung der Blechummantelung um die Isolierung mit Antidröhnmatte
- Installation einer Schalldämmhaube um das Entladeventil

8.2 Restarbeiten an den Schnittstellen Alt-/Neuanlagen

Erheblich mehr Probleme als erwartet warfen die Schnittstellen zwischen den vorhandenen Komponenten und der Neuanlage auf. Die Ursachen waren einerseits fehlende technische Dokumentation der Altanlagen, andererseits wurde diesem Bereich aus Zeitgründen auch wenig Beachtung geschenkt, da sie „ohnehin funktionierten“.

Im Zuge von Nachbesserungsmaßnahmen wurden die Speisewasserbehälter saniert und leittechnisch komplett in das System von ABB integriert. Ein größerer Schaden entstand durch defekte Filterkerzen in den Kationenaustauschern der Wasseraufbereitung. In Folge dessen wurde Levatit ausgetragen, was zu Schäden an den Speisewasserpumpen führte. Das ausgetragene Material sammelte sich hauptsächlich in den Speisewasserbehältern an, die aus diesem Grund stillgelegt und ausgeräumt werden mußten.

8.3 Betrieb des sanierten Heizkraftwerkes

Infolge der kurzen Bauzeit waren im 1. Halbjahr 1997 neben den Nachbesserungen verschiedenste Restarbeiten zur Fertigstellung des Umbaus erforderlich. Gleichzeitig wurde das Betriebspersonal in die Bedienung der einzelnen Komponenten eingewiesen und mit der Betriebsführung durch die übergeordnete Leittechnik vertraut gemacht.

Die Funktionalität des Kraftwerksbetriebes erfüllt die gestellten Anforderungen und es traten weder nennenswerte Betriebsunterbrechungen bei der Wärmeversorgung noch innerbetriebliche Störungen auf. Die Häufigkeit der GT-Starts (siehe Tabelle 3) sowie die Energiebilanzen (siehe Anhang 5) zeigen den Übergang vom Probetrieb (häufige, kurzzeitige Störungen) im 1. Halbjahr 1997 zum regulären Kraftwerksbetrieb.

Tabelle 2: Starthäufigkeiten der Gasturbinen (Summe Starts von GT 1, 2) im Zeitraum 1/97 - 6/98

Zeitraum	Monat	1	2	3	4	5	6
		7	8	9	10	11	12
1. Halbjahr 1997		88	67	85	61	75	67
2. Halbjahr 1997		66	49	57	57	21	12
1. Halbjahr 1998		2	36	51	31	38	44

8.4 Optimierung des Kraftwerksbetriebes

Das Ziel von Optimierungsmaßnahmen zur weiteren Verbesserung des Kraftwerkbetriebes beinhaltet folgende Punkte:

- Minimierung der Laufzeiten von SLK/RK und damit Erhöhung des Kraft-Wärme-Kopplungsbetriebes mit Gasturbinen
- Optimierung der Wartungsintervalle an den Gasturbinen bezüglich Reinigung der Luftfilter und der Verdichter (Erhöhung der GT-Leistung)
- Anschluß weiterer Abnehmer an das Fernwärmenetz insbesondere im Bereich Heißwasser (NT-Abwärme) zur Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades
- Organisation der Ersatzteilkhaltung, um die Ausfallzeiten von Gasturbinen/Abhitze-kesseln zu minimieren

9 Zusammenfassung

Innerhalb von einem Jahr wurden im Fernheizwerk I des GKT die vorhandenen Kesselanlagen ersetzt durch zwei KWK-Blöcke mit jeweils einem $4,6 \text{ MW}_{el}$ Gasturbosatz und nachgeschaltetem 9 MW_{th} Abhitzeessel. Zur Abdeckung von Lastspitzen beim Wärmebedarf wurde ein Spitzenlastkessel installiert und als Ausfallreserve ein Reservekessel vorgesehen.

Ein Großteil der Fernwärmekunden (Kliniken) fordert eine hohe Versorgungssicherheit. Um diese Anforderung zu erfüllen, wurden Dampfspeicher eingebaut, die zudem eine Entkopplung von Wärme- und Stromerzeugung ermöglichen. Dadurch erhöht sich die Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebes, da die Gasturbinen mit Vollast und überwiegend während der Strom-Hochtarifzeit eingesetzt werden können.

Die drei wichtigsten Zielsetzungen bei Durchführung eines Projektes - Investitionskosten, Funktionalität und Termine - wurden eingehalten. Nach erfolgreicher Inbetriebnahme und dem Probetrieb zeigte auch der „Alltagsbetrieb“, daß die mit dem Ausbau verbundenen Erwartungen erfüllt wurden. Eine wichtige Voraussetzung dafür war die Durchführung der Planung aus einer Kooperationsgemeinschaft von Betreiber und Planungsbüro.

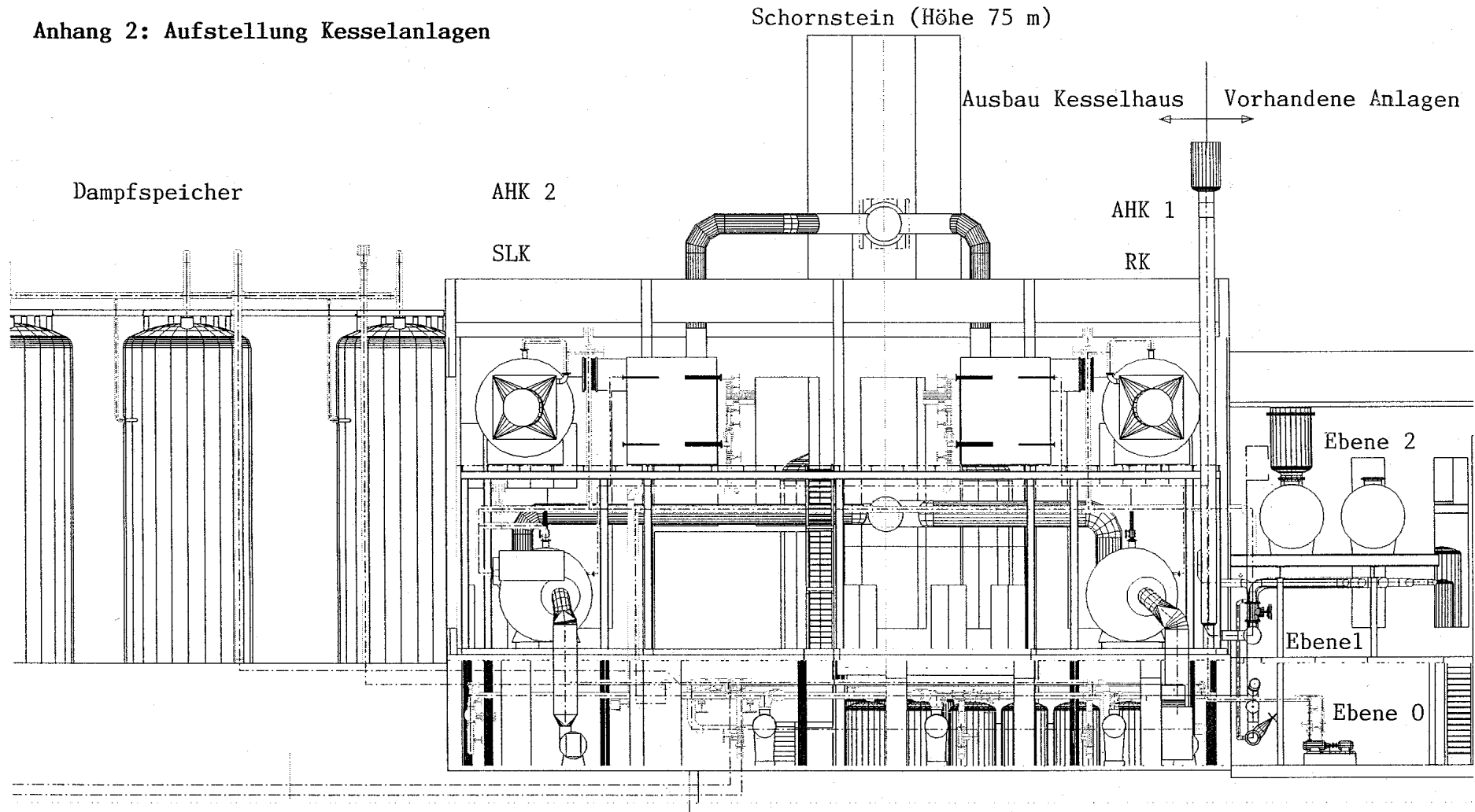
10 Literatur

- [1] Technische Regeln für Dampfkessel (TRD): TRD 604, Betrieb von Dampfkesselanlagen mit Dampferzeugern der Gruppe IV ohne ständige Beaufsichtigung. März 1996
- [2] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft) vom 27. Februar 1986
- [3] Richtlinie 93/38/EWG des Rates vom 14. Juni 1993 (EG-Sektorenrichtlinie)

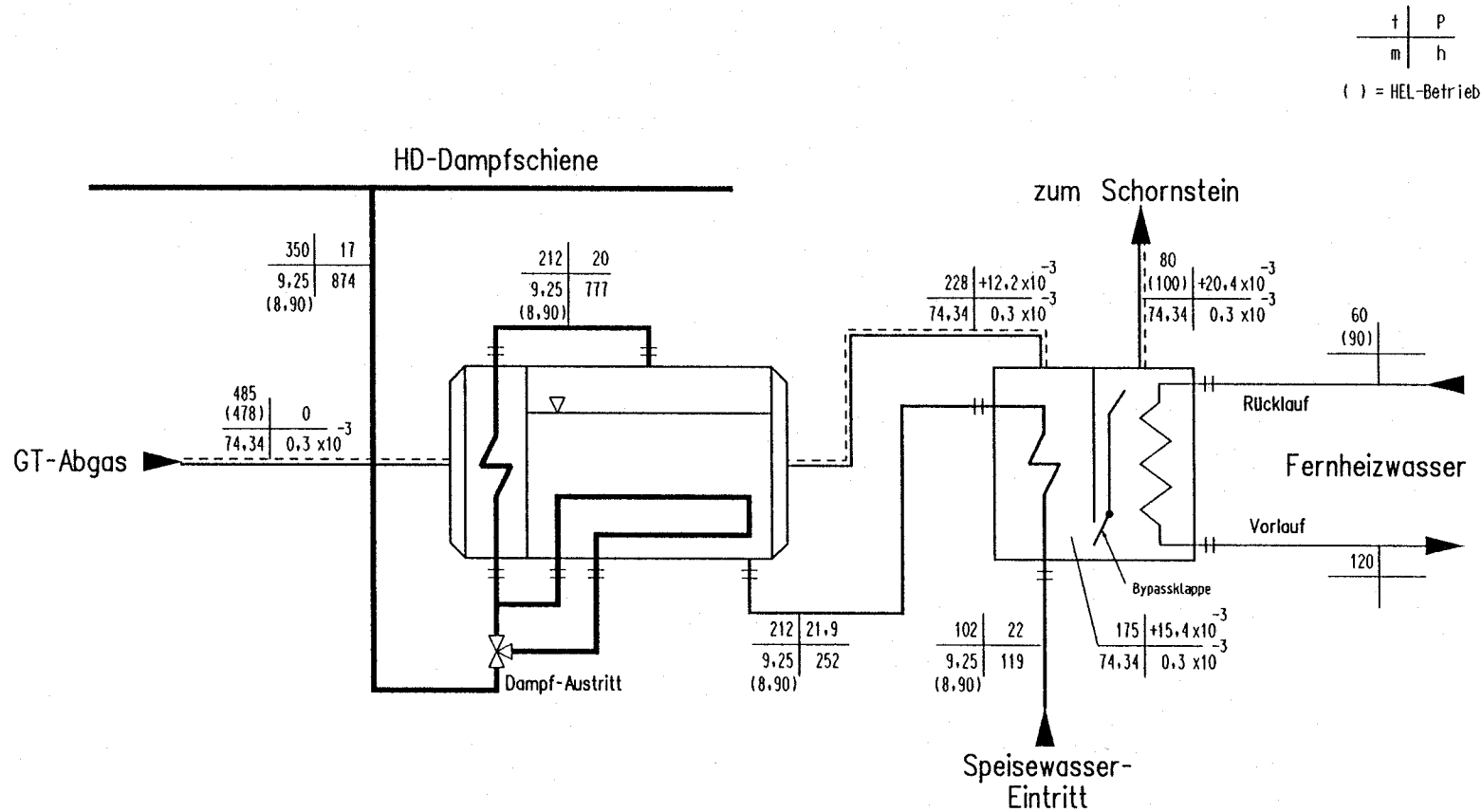


Anhang 1: Fernheizwerk I der Gemeinschaftskraftwerk Tübingen GmbH

Anhang 2: Aufstellung Kesselanlagen



Anhang 3: Schaltschema der Abhitzeekessel [Zustandsdaten der Massenströme t (°C), p (bar), m (t/h), h (MWh/t)]



Komponente	Überhitzer	Verdampfer	ECO	NTWT	Summe	
					mit NTWT	ohne NTWT
Leistung, Erdgasbetrieb (kW)	890	4840	1180	2120	9030	6910
Leistung, HEL-Betrieb (kW)	865	4710	1150	1630	8355	6725
Wirkungsgrad, Erdgasbetrieb (%)	-	-	-	-	85,27	65,25
Wirkungsgrad, HEL-Betrieb (%)	-	-	-	-	80,80	65,04

Anhang 4: Betriebsdaten der Gasturbinen GT 1, 2 jeweils vor und nach dem Waschen des Verdichters (Feb. 1998)

Position	Einheit	Planansatz	GT 1		GT 2	
			13.2	16.2	4.2	5.2
Verdichterwäsche			Vor	Nach	Vor	Nach
<u>Pos. 1: Meßwerte</u>						
P_{KL} (Istwert)	kW	-	4.406	4.325	4.687	4.905
T_a	°C	-	2	17	0	- 2
P_H	mbar	975	(975)	(975)	(975)	(975)
ΔP_e	mbar	100	125	133	153	104
ΔP_a	mbar	250	350	350	355	355
<u>Pos. 2: Angaben Turbomach</u>						
P_{KI}	kW	-	4.950	4.436	5.019	5.078
Korrekturen bzgl.						
P_H	kW	-	(+ 0)	(+ 0)	(+ 0)	(+ 0)
ΔP_e	kW	-	- 20	- 25	- 3	- 3
ΔP_a	kW	-	- 33	- 32	- 34	-34
F_{alt}	kW	-	- 87	- 78	- 88	- 89
Summe	kW	-	- 140	- 135	- 125	- 126
<u>Pos. 3: (Sollwert)</u>	kW		4.810	4.301	4.894	4.952
<u>Pos. 1 - Pos. 3</u>	kW		- 404	+ 24	- 207	- 47

Bezeichnungen:

P_{KL} = Klemmenleistung

T_a = Lufteintrittstemperatur

P_H = Luftdruck

ΔP_e = Druckverluste am Zuluftfilter

ΔP_a = Druckverluste am Abgassystem (Schalldämpfer, Abhitzeessel etc.)

F_{alt} = Alterungsfaktor

Anhang 5: Energiebilanzen Halbjahre 1/97, 2/97 und 1/98**(Abkürzung: GT für Gasturbine, K für Kessel)**

Position	Einheiten	1/97	2/97	1/98
1. Brennstoffeinsatz Q				
Q: GT, Erdgas	MWh (%)	71.480 (83,22)	66.270 (90,32)	81.940 (93,69)
Q: GT, Heizöl EL	MWh (%)	5.797 (6,75)	1.019 (1,39)	2.328 (2,66)
Q: K Erdgas	MWh (%)	5.951 (6,93)	5.469 (7,45)	2.328 (2,66)
Q: K Heizöl EL	MWh (%)	2.666 (3,10)	612 (0,84)	865 (0,99)
Q: Summe	MWh (%)	85.894(100,00)	73.370 (100,00)	87.461 (100,00)
2. Stromerzeugung A				
A: GT	MWh (%)	21.121 (24,59)	19.252 (26,24)	24.567 (28,09)
A: DT	MWh (%)	462 (0,54)	1.336 (1,82)	2.009 (2,30)
A: Summe	MWh (%)	21.583 (25,13)	20.588 (28,06)	26.576 (30,39)
3. Nutzwärme				
	MWh (%)	42.075 (48,98)	37.660 (51,33)	42.962 (49,12)
4. Wirkungsgrade η				
η : Strom	%	25,13	28,06	30,39
η : Gesamt	%	74,11	79,39	79,51
5. Eigenkraftbedarf				
	MWh (%)	789 (0,92)	673 (0,92)	659 (0,75)

Anhang 6/1: Tabelle mit Betriebserfahrungen

Sachverhalt	Konsequenz/Ursache	Behebung
Gasturbosätze		
1. Mangelnde Abstimmung über Prozeßablauf und Signalaustausch GT-AHK	hoher Koordinationsaufwand	
2. Keine Infos über erforderliche Fremdleistungen	u. U. Terminverzug	kurzfristige Organisation zus. Fremdpersonals
3. Lufttemperatur im Container zu hoch	Warnmeldung	zusätzliche Belüftung im GT-Stillstand
4. Verbrennungslufttemperatur > Außenlufttemperatur	verringerte Klemmenleistung (Falschluf über Ölkühler und undichte Dachdurchführungen angesaugt)	Abdichtung der Deckendurchführungen
5. NO ₂ -Anteil im Abgas > 10 %	NO ₂ -NO Konverter für Emissionsmeßgerät notwendig	Einbau eines NO ₂ -NO Konverters
6. Belüftung der GTs im Stillstand nicht gewährleistet	Abgasklappe nach AHK muß geöffnet bleiben (Wärmeverluste)	Nachrüstung Bypass zum AHK
7. Spez. Brennstoffverbrauch in best. Betriebsweise zu hoch	erhöhter Brennstoffverbrauch	Pönale
8. Fernstart häufig nicht möglich	manueller Eingriff vor Ort erforderlich/Losbrechmoment Generator zu hoch	Anhebung des Öldruckes für das Generatorlager
9. Schalldämmhauben der GT-Container erfüllen nicht die Garantiewerte	erhöhter Schallpegel im Kesselhaus	noch offen
10. Start mit HEL noch nicht möglich	erhöhte Anforderungen an Erdgasmanagement bzw. Durchfahren mit HEL	neue Brennerdüsen
11. Überlastbetrieb noch nicht möglich	Abfahren von Stromspitzen nicht möglich	neue Brennerdüsen

Anhang 6/2: Tabelle mit Betriebserfahrungen

Sachverhalt	Konsequenz/Ursache	Behebung
Abhitzekessel		
1. Sicherheitstemperaturwächter mit zu hohem Toleranzbereich angeboten	vorzeitige Abschaltung der Gesamtanlage	Einsatz höherwertiger Fabrikate
2. NTWTs nachträglich auf 140 °C ausgelegt (ursprünglich 120 °C)	Luftkühler konnten kleiner dimensioniert werden	Änderung des Genehmigungsantrages
3. Diffusor vor Schalldämpfer fehlte	bei Ausschreibung nicht berücksichtigt	Änderung der Aufstellungsplanung
4. Lastangaben zu spät erfolgt	Überarbeitung der Statik	Bohrpfahlgründung
5. Überhitzer zu groß dimensioniert	Abschaltung über STB	Abtrennen von Rohrschlangen
6. Anschlüsse zu nahe am Kesselkörper	hoher Aufwand bei Isolierung, erhöhte Wärmeverluste	keine Änderung möglich
7. Armaturen falscher Druckstufe eingebaut	Beanstandung TÜV; kein zugelassener Betrieb	Auswechslung der Armaturen
8. Externe Absalzregelung	ständige Absalzverluste	Umbau auf interne Absalzregelung (Leitfähigkeitssonde im Kessel)
9. Bodenblech des ECO/NTWT wölbte sich	Bypassklappe blockiert	Einschweißen zusätzlicher Träger
10. Überhitzer nicht wie gefordert ausgelegt (trockenes Anfahren bei 540 °C nicht möglich)	Ansprechen des STB beim Hochfahren von GT/AHK führt zum Ausfall der Anlage	noch offen

Anhang 6/3: Tabelle mit Betriebserfahrungen

Sachverhalt	Konsequenz/Ursache	Behebung
Spitzenlast-/Reservekessel		
1. Brennstoffmengenregelung durch Dampfmengenregelung ersetzt	erhöhter Planungsaufwand	Änderung der Planung
2. Dampfschläge in Absalz- und Abschlammlleitungen	defekte Aufhängungen/Rohrleitungen	nachträglicher Einbau von Entspannertöpfen
3. Ansteuerung der Abschlämmventile „Kessel EIN“	erhöhte Abschlämmverluste	Ansteuerung über „Flamme EIN“
4. NW Voralarm verbunden mit „Störung Feuerung“	Alarm führt zur Kesselabschaltung	„Entflechtung“ der Signalkette für Alarme und Störungen
5. Häufige Kesselstörung durch Gasdichtekontrolle	Bei Kesselabschaltung Gasdichtekontrolle nicht auf „Null“ gesetzt	Softwareänderung
6. Leistungsabfall Speisewasserpumpen	Korrosion infolge schlechter Speisewasserqualität (pH ca. 8,2 und O ₂ > 0,02 mg/l	Austausch sämtlicher Speisewasserpumpen
7. „Schlagende“ Rohrleitungen im Bereich Speisewasserregelventil SLK	Druckstöße durch Regelung Speisewasser-ventil und Überströmventil Speisewasserpumpen	Reinigung der Überströmventile an den Speisewasserpumpen und Ersatz des Speisewasserregelventils
8. Speisewasserpumpen zu klein ausgelegt	eine Speisewasserpumpe läuft ständig auf Hand	noch offen

Anhang 6/4: Tabelle mit Betriebserfahrungen

Sachverhalt	Konsequenz/Ursache	Behebung
Dampfspeicher		
1. Häufiger Ausfall der Kesselfüllstandselektroden	eingeschränkter automatischer Betrieb	Außerbetriebnahme und Ersatz
2. Ungeeignete Dichtungen eingebaut	Abfahren der Dampfspeicher (Druckentlastung)	Austausch der Dichtungen
3. Armaturen falsch eingebaut	lt. Hersteller Druckseite über Kegel und Entlastungskegel notwendig	Umbau
4. Bei Ausfall Stromversorgung Absperrventile nicht bedienbar	Gefährdungspotential	Umrüstung auf pneumatische Antriebe
5. Defekte Ventilantriebe	Wartungsanleitung nicht beachtet	Abschmieren der Ventile in regelmäßigen Abständen
Rohrleitungen inkl. Heizkondensatoren, Ölversorgung, Luftkühler, Dampfumformstation		
1. Ein-/Auslaufstrecken für Meßblenden zu gering	vorhandene, begrenzte Räumlichkeiten	keine Möglichkeit
2. Abschlußkappen bei Montage Ölleitungen nicht entfernt	Ausfall Gesamtanlage bei Umschaltung Gas-Öl	Versicherung
3. Ölpumpe zu spät geliefert	Überschreitung Gasbezugsleistung	-
4. Luftkühler erreichen Leistungsgarantie nicht	Abwärme bei stromorientierter Fahrweise nicht wie geplant abzuführen	noch offen
5. Auslegung Sicherheitsventile der Heiko's auf max. Wärmeleistung/Betrieb und nicht auf Auslegungsleistung	Dimensionierung auf DN32/50 anstatt DN 150/250	

Anhang 6/5: Tabelle mit Betriebserfahrungen

Sachverhalt	Konsequenz/Ursache	Behebung
Leittechnik		
1. Anzahl Signale zu gering eingeschätzt	-	zusätzlicher Hardware/Softwareaufwand
2. Keine Schnittstelle für Impulseingänge	-	wenn erforderlich D/A Wandler
3. Probleme mit Protokoll RK512/RS 3964 R	zusätzlicher Koordinierungsaufwand	Übergang auf MODE-Bus
4. Hohe Schallpegel (103 dBA) bei Be-/Entladeventil	Strömungsgeräusche bei bestimmten Ventilstellungen	Einbau von Strömungsgleichrichtern, schalltechn. Entkopplung sämtl. Rohrleitungen an Aufhängungen, Antidröhnmatte auf Blechummantelung der Isolierung
5. Rechnerabstürze (MMI)	keine Bedienung durch Operator möglich	System neu starten (gelöst durch neue Release)
6. Bedienung Meldefolgeregister unbefriedigend	Page-down über 500 Seiten	noch offen
7. Konzept für Meldungen/Störungsquittierung fehlt	erhöhter Bedienaufwand	noch offen
8. Erstellung von Excel Reports nicht möglich	zusätzlicher Personalaufwand für Auswertung von Ergebnissen	noch offen
9. „Datenfriedhöfe“ uninteressanter Meldungen	erhöhter Bedienaufwand	Änderung der Software
10. Katalogisierung von Störmeldungen nicht möglich	zusätzlicher Personalaufwand für Auswertung und Störmeldungen	noch offen
11. Schulungen unbefriedigend	hohe Anforderungen an die „Autodidaktik“ des Personals	bessere Schulungen