



Eduard Baatz
Gerhard Heidt

**First waste heat power generating plant using the
Organic Rankine Cycle Process
for utilizing residual clinker cooler exhaust air**

Erstes Abwärmekraftwerk nach dem
Organic-Rankine-Cycle-Verfahren
für die Restnutzung der Klinkerkühlerabluft

Erstes Abwärmekraftwerk nach dem Organic-Rankine-Cycle-Verfahren für die Restnutzung der Klinkerkühlerabluft

E. Baatz, G. Heidt, Heidelberg/Germany

ZUSAMMENFASSUNG

Der Einsatz des Organic-Rankine-Cycle-Verfahrens zur Verstromung von Niedertemperaturabwärme in Zementwerken kann aus heutiger Sicht als technisch machbare Alternative zu Stromerzeugungsanlagen mit Wasserdampf gesehen werden. Die Vorteile liegen insbesondere in der einfachen Handhabung, der kompakten Bauweise sowie den höher erzielbaren Wirkungsgraden bei Wärmequellen unter 275°C. Nach den ersten vorliegenden Ergebnissen des Zementwerks Lengfurt kann festgestellt werden, dass sich bei der vorgegebenen Betriebsweise des Klinkerkühlers mit einer Abwärmeleistung der Klinkerkühlerabluft von 14 MW und einer Abgastemperatur von 300°C netto 1,1 MW Strom erzeugen lassen. Durch den Betrieb des Abwärmekraftwerks können zukünftig im Zementwerk Lengfurt der Heidelberger Zement AG bis zu 12% des elektrischen Energiebedarfs gedeckt und damit die energieeinsatzbedingten CO₂-Emissionen des Brennbetriebes um 7 620 t/a reduziert werden. Die gesamten Investitionskosten betragen 7,88 Mio. DM. Davon entfielen 3,99 Mio. DM auf die ORC-Anlage mit Pentankühlkreislauf (Wert inkl. Montage) und der Rest auf Abhitzeessel, Wärmeträgeranlage, Massiv-Bau, Elektrik, Engineering, Inbetriebnahme, restliche Montage und Gebühren. Daraus folgen spezifische Investitionskosten von 7 164 DM/kW netto bzw. 1 034 DM/t CO₂ und Jahr. Über Betriebskosten, Verfügbarkeit und durchschnittliche Effizienz können derzeit noch keine verlässlichen Angaben gemacht werden. Hierzu läuft ein Langzeitforschungsvorhaben.

SUMMARY

The Organic Rankine Cycle Process for generating power from low-temperature waste heat in cement works can now be regarded as a technically feasible alternative to power generating plants using steam. Its particular advantages lie in the simple operation, the compact structure, and the high levels of efficiency which can be achieved with heat sources below 275°C. The initial results available from the Lengfurt cement works indicate that 1.1 MW (net) electrical power can be generated with the given mode of operation of the clinker cooler with a waste heat output of the clinker cooler exhaust air of 14 MW and an exhaust gas temperature of 300°C. In future the operation of the waste heat power generating plant will make it possible to cover up to 12% of the electrical power requirement at the Lengfurt cement works of Heidelberger Zement AG, and in this way reduce the CO₂ emissions from the combustion associated with the generation of power by 7 620 t/a. The total capital costs were 7.88 million DM. 3.99 million DM of this were accounted for by the ORC plant with pentane cooling circuit (this figure includes installation) and the rest by the waste heat boiler, heat transfer plant, solid construction, electrics, design engineering, commissioning, remaining installation, and fees. This results in specific capital costs of 7 164 DM/kW (net), or 1 034 DM/t CO₂ per year. No reliable information is available yet for operating costs, availability and average efficiency for which a long-term research project is currently in progress.

RÉSUMÉ

L'utilisation du procédé Organic-Rankine-Cycle, pour produire de l'électricité avec des chaleurs de sortie basse température en cimenterie peut être considéré, aujourd'hui, comme une alternative techniquement réalisable, par rapport aux centrales à vapeur d'eau. Les avantages se situent surtout dans la simplicité de conduite, dans la configuration constructive compacte ainsi que dans la possibilité d'obtenir des taux de rendement supérieurs avec des sources de chaleur de moins de 275°C. Après les premiers résultats obtenus à la cimenterie Lengfurt, on peut constater qu'avec le mode de fonctionnement prédéfini du refroidisseur de clinker, avec un potentiel de chaleur de sortie de l'air d'exhaure du refroidisseur de clinker, de 14 MW et une température de l'air d'exhaure de 300°C net, on peut produire 1,1 MW d'électricité. Par l'exploitation de la centrale à chaleur de sortie, le besoin d'énergie électrique à la cimenterie Lengfurt de l'Heidelberger Zement AG peut, dans l'avenir, être couvert jusqu'à 12% et les émissions CO₂ du processus de cuisson, dues à l'utilisation d'énergie, peuvent être réduites de 7 620 t/an. L'ensemble des coûts d'investissement s'élève à 7,88 MDM, dont 3,99 MDM pour l'équipement ORC avec un circuit de refroidissement à pentane (valeur qui comprend le montage) et le reste pour la chaudière à chaleur de sortie, l'installation des circuits de chaleur, la construction en dur, l'électricité, l'ingénierie, la mise en service, le montage final et les taxes. Cela donne des coûts d'investissements spécifiques de 7 164 DM/kW net, à savoir 1 034 DM/t CO₂ par an. Sur les coûts de fonctionnement, la disponibilité et le rendement, il n'est pas encore possible, à ce jour, de donner des renseignements fiables. Pour cela est conduit un projet de recherche de longue durée.

RESUMEN

El empleo del procedimiento „Organic-Rankine-Cycle“ en las fábricas de cemento para la transformación del calor residual de baja temperatura en corriente eléctrica puede considerarse actualmente como alternativa técnicamente viable de las instalaciones generadoras de la electricidad, basadas en el vapor de agua. La ventajas residen, especialmente, en la facilidad de manejo, la forma de construcción compacta así como en el mayor grado de eficiencia al tratarse de fuentes de calor inferiores a los 275°C. De

First waste heat power generating plant using the Organic Rankine Cycle Process for utilizing residual clinker cooler exhaust air

Première centrale thermique à chaleur d'exhaure selon le procédé Organic-Rankine-Cycle pour l'utilisation finale de l'air de sortie du refroidisseur de clinker

Primera central eléctrica que funciona según el procedimiento

„Organic-Rankine-Cycle“, para el aprovechamiento del calor residual del enfriador de clínker

acuerdo con los primeros resultados obtenidos en la fábrica de cemento de Lengfurt, se puede constatar que teniendo en cuenta el modo de funcionamiento del enfriador de clínker, con un rendimiento térmico del calor residual del enfriador de clínker de 14 MW y una temperatura de los gases de escape de 300°C, es posible generar 1,1 MW netos de corriente eléctrica. Gracias al funcionamiento de la central eléctrica que aprovecha el calor residual, se podrá cubrir en el futuro, en la fábrica de cemento de Lengfurt, perteneciente a Heidelberger Zement AG, hasta el 12% de la demanda de energía eléctrica, reduciéndose con ello las emisiones de CO₂, debidas al empleo de la energía en el proceso de cocción, en 7620 t/a. El coste total de las inversiones asciende a 7,88 millones de DM, de los que 3,99 millones de DM corresponden a la planta ORC con circuito de enfriamiento a base de pentano (valor con montaje incluido) y el resto, a la caldera de recuperación de calor, el equipo portador térmico, la construcción maciza, el equipo eléctrico, la ingeniería, la puesta en servicio, el montaje de los equipos restantes y las tasas a pagar. De ahí resulta un coste específico de inversión de 7164 DM/kW netos ó 1034 DM/t CO₂ por año. En cuanto a los gastos de explotación, la disponibilidad y la eficiencia media, no se pueden dar aún datos fiables. A este respecto, se están llevando a cabo investigaciones de larga duración.

1. Einleitung

Die Verstromung von Abwärme stellt für die Zementindustrie an sich kein Novum dar. Schaut man in die Geschichte der Zementindustrie, u.a. auch des Zementwerks Lengfurt, so wurden bis zur Einführung der wärmesparenden Wärmetauscher-Technologien in vielen Ofenanlagen die Abgase der Drehöfen direkt in Dampfkraftwerken verstromt. Aufgrund der mit den niedrigen Abgastemperaturen der vier- und mehrstufigen Zyklonwärmetauscher oder Lepolrostanlagen verbundenen erzielbaren schlechten Wirkungsgrade für Dampfprozesse geriet diese Art der Abwärmenutzung in der Zementindustrie wegen fehlender Wirtschaftlichkeit in Vergessenheit. Erst mit der Ölkrise in den 70er Jahren wurde vereinzelt immer wieder versucht, die anfallende Niedertemperaturabwärme der Wärmetauscherabgase und der Kühlerabluft, aber auch die Hochtemperaturabwärme von Bypassgasen neben der üblichen Verwertung zu Trocknungszwecken auch zur Verstromung, zur Gebäudeheizung oder zur Warmwasseraufbereitung zu nutzen. Für die Verstromung der Hochtemperaturabwärme von Bypassgasen sind bis heute noch keine betrieblich sicheren Verfahren entwickelt worden. Hingegen sind für die Wärmetauscher- und Kühlerabluftabgase mehrere Verstromungsanlagen in Japan und Korea errichtet worden. Fünf Gründe waren und sind dafür ausschlaggebend:

- Da die Feuchtigkeit des Rohmaterials unter 5% liegt, bleiben erhebliche Abgasenthalpien ungenutzt.
- Die Abgastemperaturen der Öfen sind mit 350 bis 450°C außergewöhnlich hoch.
- Die durchschnittliche Klinkerkapazität der Zementwerke liegt bei ca. 9000 t/d.
- Die kontinuierliche Stromversorgung gemäß Produktionsplan ist zu akzeptablen Bedingungen nicht restlos gesichert.
- Die Strompreise liegen im Weltvergleich sehr hoch.

In Japan liefern diese Anlagen bei einer mittleren Klinkerkühlerablufttemperatur von 285°C z. B. eine Stromausbeute, die etwa einer spezifischen Stromerzeugung von 32 kWh/t Klinker entspricht, d. h. ca. ein Drittel des insgesamt für die Erzeugung von Portlandzement benötigten elektrischen Energiebedarfs [1]. Gleiche Überlegungen wie in Japan gab es in der deutschen und in der übrigen westeuropäischen Zementindustrie. Heute wird in Deutschland nur noch eine Anlage betrieben [2, 3], die aufgrund der besonderen Rohstoffsituation dieses Werksstandortes eine für die Zementindustrie einmalige günstige Ausgangsposition besitzt und im Verbund mit einem Kraftwerk arbeitet. Bei der Heidelberger Zement AG reichen die ersten Überlegungen, die im Werk Lengfurt nicht genutzte Abwärme zu verstromen, ebenfalls bis in die siebziger Jahre zurück. Erst nähere Untersuchungen, die Niedertemperaturabwärme nach dem so genannten Organic-Rankine-Cycle-Verfahren (ORC-Verfahren) zu verstromen, brachten den Durchbruch.

Dieses Verfahren, das auf den Clausius-Rankine-Prozess zurückgeht, basiert im Wesentlichen darauf, dass anstelle des Treibmediums „Wasserdampf“ ein organisches Treibmedium verwendet wird, das bereits bei deutlich niedrigeren

1. Introduction

The generation of power from waste heat is no novelty for the cement industry. A glance at the history of the cement industry, including that of the Lengfurt cement works, shows that up to the introduction of heat-saving preheater technology the exhaust gas from the rotary kilns in many kiln systems was used directly for power generation in steam power generating plants. However, this type of waste heat utilization sank into oblivion in the cement industry due to lack of economic viability caused by the poor efficiency which could be achieved with the steam process from the low exhaust gas temperatures associated with the four- and multi-stage cyclone preheaters or Lepol grate systems. It was only when the oil crisis occurred in the 70s that isolated attempts were made again to use the low-temperature waste heat obtained from the preheater exhaust gas and the cooler exhaust air, as well as the high temperature waste heat from the bypass systems, not only for the usual utilization for drying purposes but also for generating power, heating buildings, or providing hot water. So far no operationally reliable process has been developed for generating power from the high temperature waste heat from bypass gases. On the other hand several power generating plants have been built in Japan and Korea for preheater exhaust gases and cooler exhaust air. This was, and is, determined by five crucial factors:

- The moisture of the raw material is less than 5%, so considerable exhaust gas enthalpy remains unused.
- The exhaust gas temperatures from the kiln of 350 to 450°C are unusually high.
- The average clinker capacity of the cement works is around 9000 t/d.
- The continuous power supply is not secure enough for the planned production.
- The cost of power is very high compared with world prices.

In Japan these plants, with an average clinker cooler exhaust air temperature of 285°C, give a power output which corresponds approximately to a specific power generation of 32 kWh/t clinker; i. e. about one third of the total electrical power requirement for the production of Portland cement [1]. The same considerations as in Japan also apply in the cement industries in Germany and the rest of Western Europe. In Germany there is still at present only one plant in operation [2, 3] which, because of the particular raw materials situation of this works location, starts from a position which is exceptionally favourable for the cement industry and operates in conjunction with a power generating plant. At Heidelberger Zement AG the first thoughts of generating power at the Lengfurt works from the unused waste heat go back to the 70s. The breakthrough was only achieved by fairly recent investigations into generating power from the low-temperature waste heat by the Organic Rankine Cycle Process (ORC process).

Temperaturen verdampft als Wasser [4–9]. Die Technologie ist in ihren Grundsätzen bei der Kältemaschinen-Technologie bereits seit langem erfolgreich im Einsatz. Die ORC-Technologie wird hauptsächlich zur Verstromung geothermischer Heiquellen angewendet, hauptsächlich in Italien, USA, Neuseeland und Island. Bisher sind in diesem Bereich mehr als 300 Anlagen in Betrieb [10]. Die Nutzung des Verfahrens in einem Zementwerk stellt demgegenüber eine Weltneuheit dar. 1997 hat Heidelberger Zement beschlossen, dieses Verfahren in einer großtechnischen Pilotanlage zu realisieren und eingehend zu testen. Gute Voraussetzung für ein solches Vorhaben bot das Zementwerk Lengfurt, wo die Klinkerkühlerabluft in einem Heißelektrofilter entstaubt wird.

Wegen seines umweltfreundlichen und innovativen Charakters wurde das Vorhaben mit Fördermitteln des Bundes finanziell unterstützt. Die Förderung des Bundes ist für die Errichtung der Anlage und der Durchführung von Versuchen bestimmt. Eine weitere Förderung für die Durchführung einer Langzeituntersuchung für die Dauer von einem Jahr wird durch das Bundesland Bayern gewährt. Mit dem Vorhaben wurden folgende Ziele verfolgt:

- Erzeugung von ca. 1,1 MW netto Elektroenergie aus Niedertemperaturabwärme.
- Sicherung eines Know-how-Vorsprungs in dieser Technologie durch Planung und Betrieb der Anlage.
- Reduktion der strombedingten CO₂-Emissionen durch reduzierten Strombezug aus dem Netz um ca. 7 000 t/a.
- Erlangung einer höheren Flexibilität während der Hochtarif-Zeiten.

2. Anlagenbeschreibung

2.1 Klinkerbrennbetrieb

Die Anlage im Zementwerk Lengfurt wird mit einem vierstufigen Wärmetauscher betrieben. Zur Entlastung von Chloridkreislufen ist ein Chlor-Bypass angeschlossen. Zur Kühlung des Zementklinkers und zur Vorwärmung der Verbrennungsluft ist ein 3-stufiger Kombi-Rostkhler nachgeschaltet. Die Klinkerkühlerabluft, bestehend aus Mittenabluft und Kühlerabluft, wird in einer Mischkammer zusam-

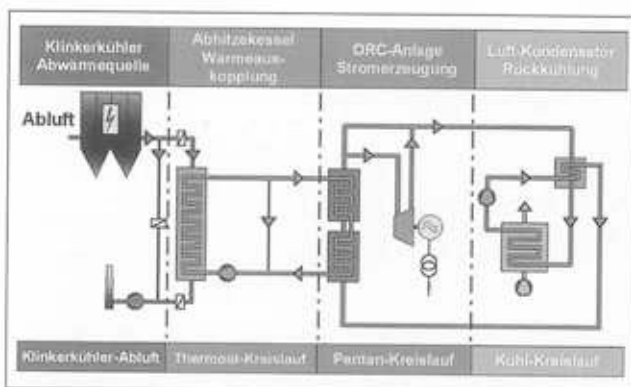


BILD 1: Verstromung von Niedertemperaturabwärme nach dem ORC-Verfahren

FIGURE 1: Generation of power from low temperature waste heat by the ORC process

Klinkerkühler	clinker cooler
Abwärmequelle	waste heat source
Abhitzeessel	waste heat boiler
Wärmeauskopplung	heat recovery
ORC-Anlage	ORC plant
Stromerzeugung	power generation
Luft-Kondensator	air condenser
Rckkhlung	recooling
Abluft	exhaust air
Klinkerkühler-Abluft	clinker cooler exhaust air
Thermoöl-Kreislauf	thermal oil circuit
Pentan-Kreislauf	pentane circuit
Kühl-Kreislauf	cooling circuit

This process, which is derived from the Clausius-Rankine process, is essentially based on the use of an organic motive medium which evaporates at significantly lower temperatures than water [4–9] instead of using steam as the motive medium. The basic principles of the technology have been used successfully for a long time in refrigeration technology. The ORC technology is used mainly for generating power from geothermal heat sources, mainly in Italy, the USA, New Zealand and Iceland. More than 300 plants are already in operation in this sector [10]. On the other hand the use of this process in a cement works is a world first. In 1997 Heidelberger Zement decided to implement this process in an industrial scale pilot plant and to test it thoroughly. The Lengfurt cement works, where the clinker cooler exhaust air is dedusted in a hot electrostatic precipitator, offered favourable conditions for such a project.

Because of its environmentally friendly and innovative character the project was supported financially by the government. The government assistance was intended for the erection of the plant and the implementation of trials. Further assistance for carrying out a long-term investigation for the duration of a year is being provided by the state of Bavaria. The project had the following objectives:

- Generation of approximately 1.1 MW net electrical power from low-temperature waste heat.
- Securing a step forward in the understanding of this technology through design and operation of the plant.
- Reduction of the power-dependent CO₂ emissions by about 7 000 t/a through reduced purchase of power from the power grid.
- Increased flexibility during high tariff periods.

2. Description of the plant

2.1 Clinker burning operation

The plant at the Lengfurt cement works is operated with a four-stage preheater with a chloride bypass to relieve recirculating chloride systems. Downstream there is a 3-stage grate cooler for cooling the cement clinker and preheating the combustion air. The clinker cooler exhaust air, consisting of central exhaust air and cooler exhaust air, is passed to a mixing chamber, submitted to preliminary dedusting, and then dedusted in a hot electrostatic precipitator. The exhaust gases from the preheater plant are used in conjunction with the drying and grinding plant for thermal utilization of the waste heat. Because of the low moisture content of the raw materials there is no possibility of thermal utilization of the exhaust gases from the clinker cooling plant. The energy loss at the Lengfurt works was therefore exceptionally high when compared with the other works belonging to Heidelberger Zement AG.

2.2 Waste heat power generating plant

The waste heat power generating plant itself consists essentially of four sub-systems shown in Fig. 1. The area marked in blue shows the existing clinker cooler with the clinker cooler exhaust air as the waste heat source. The area marked in red shows the waste heat boiler with the thermal oil circuit with which the waste heat is recovered from the clinker cooler exhaust air flow. The area marked in violet shows the ORC system with the pentane circuit, the turbines and the generator in which the power is generated. Finally, the area marked in green shows the air condenser plant which is used for recooling the pentane circuit.

The situation at the clinker cooler before the installation of the power generating plant is shown in Fig. 2. The clinker cooler exhaust air flow laden with clinker dust is cleaned in a hot electrostatic precipitator before it passes into the atmosphere via the chimney. Over 70 % of the heat picked

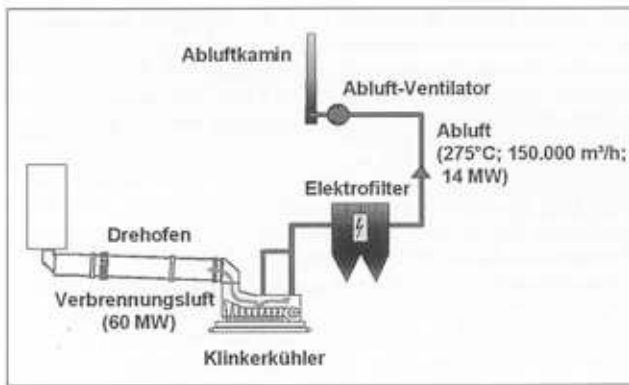


BILD 2: Klinkerkühler/Abwärmequelle

FIGURE 2: Clinker cooler/waste heat source

Abluftkamin	exhaust air chimney
Abluft-Ventilator	exhaust air fan
Elektrofilter	electrostatic precipitator
Drehofen	rotary kiln
Verbrennungsluft	combustion air

mengeführt, vorentstaubt und anschließend in einem Heißelektrofilter entstaubt. Die Abgase der Wärmetauschanlage werden zur thermischen Nutzung der Abwärme im Verbund mit den Mahltrocknungsanlagen betrieben. Wegen der niedrigen Feuchtigkeit der Rohstoffe bestehen für die anfallenden Abgase der Klinkerkühleranlage keine thermischen Verwertungsmöglichkeiten. Aus diesem Grund war der Energieverlust im Werk Lengfurt im Vergleich zu anderen Werken der Heidelberger Zement AG außergewöhnlich groß.

2.2 Abwärmekraftwerk

Das Abwärmekraftwerk selbst besteht im Wesentlichen aus vier in Bild 1 dargestellten Teilanlagen. Der blau markierte Bereich zeigt den bestehenden Klinkerkühler mit der Klinkerkühler-Abluft als Abwärmequelle. Der rot markierte Bereich zeigt den Abhitzekegel mit dem Thermoöl-Kreislauf, mit dem die Abwärme aus dem Klinkerkühler-Abluftstrom ausgekoppelt wird. Der violett markierte Bereich zeigt die ORC-Anlage mit dem Pentan-Kreislauf, der Turbine und dem Generator, in dem Strom erzeugt wird. Und schließlich zeigt der grün markierte Bereich die Luft-Kondensator-Anlage, die der Rückkühlung des Pentan-Kreislaufes dient.

Auf Bild 2 ist die Situation am Klinkerkühler vor der Installation der Stromerzeugungsanlage dargestellt. Der mit Klinkerstaub beladene Klinkerkühler-Abluftstrom wird, bevor er über den Kamin in die Atmosphäre abgegeben wird, in einem Heiß-Elektrofilter gereinigt. Über 70 % der von der Kühlluft aufgenommenen Wärme mit einem Wärmeinhalt von ca. 60 MW werden dem Ofensystem für den Brennprozess zugeführt und damit energetisch zurückgewonnen. Die restliche Kühlluft verfügt mit einem Abgasvolumenstrom von 150 000 m³/h (i.N.) und einer Abgastemperatur von 275 °C noch über eine Wärmeleistung von ca. 14 MW.

2.3 Abhitzekegel- und Wärmeträgerölanlage

Zur Auskopplung des Wärmestroms werden die Heizflächen des Abhitzekegels mit einem Wärmeträgeröl beaufschlagt. Dadurch wird die zum Wärmeträgerölmassenstrom im Gegenstrom geführte Kühlerabluft von 275 °C auf ca. 125 °C abgekühlt und das Wärmeträgeröl bei einer Vorlauftemperatur von 85 °C auf ca. 230 °C aufgeheizt. Die aufgenommene Wärme wird im Zwangsumlauf über eine Umwälzpumpe zur ORC-Anlage gefördert. Vor der ORC-Anlage regelt ein Dreiwegeventil den zum Pentan-Verdampfer zugeführten Wärmestrom oder leitet diesen zum Wärmeträgeröl-Bypass um. Die Wärmeträgerölanlage wird als geschlossene Anlage mit einem stickstoffüberlagerten Ausdehnungsraum gefahren. Die Anlage (Bild 3) besteht im Wesentlichen aus:

up by the cooling air, with a heat content of about 60 MW, is supplied to the kiln system for the burning process and its energy is recovered. The remaining cooling air with an exhaust gas volume flow of 150 000 m³/h (stp) and an exhaust gas temperature of 275 °C still has a heat output of about 14 MW.

2.3 Waste heat boiler and heat transfer oil plant

A heat transfer oil is brought into contact with the heating surfaces of the waste heat boiler to recover the heat flow. This cools the clinker exhaust air, which passes counter-current to the heat transfer oil mass flow, from 275 °C to about 125 °C, and the heat transfer oil with an input temperature of 85 °C is heated to about 230 °C. The absorbed heat is supplied to the ORC plant by a recirculating pump in forced circulation. A three-way valve before the ORC plant controls the heat flow supplied to the pentane evaporator or diverts it to the heat transfer oil bypass. The heat transfer oil plant is operated as a closed system with a nitrogen-shielded expansion chamber. The plant (Fig. 3) consists essentially of:

- waste heat boiler,
- exhaust air bypass,
- heat transfer oil plant,
- and heat transfer medium.

The waste heat boiler is a conventional shell-and-tube heat exchanger. It was dimensioned on the assumption, among other things, that the existing cooler exhaust air fan would continue to operate without modification. The convection heating surfaces of the waste heat boiler consist of four smooth tube bundles which are inserted into a gas-tight waffle-plate housing. All the tubes are aligned, with continuous channels between them on the exhaust air side. The lateral pitch is 54 mm and the longitudinal pitch 50 mm. The convection surfaces are dimensioned so that the net total heating area still comes to 2 730 m² even if the smooth tubes are coated with clinker dust on the approach flow side.

A fouling reserve of 310 m² is also included for possible coating of the tube bundles with clinker dust on the approach flow side. The air flows through the waste heat boiler from top to bottom. The individual tube bundles are connected in counter-current. The waste heat boiler is designed statically for a maximum temperature of 450 °C. It is suspended in a steel frame and can therefore expand without stress when the temperature changes. The flue gas duct and connecting pieces at the boiler inlet and outlet consist of gas-tight welded steel sheet and the necessary expansion joints. Inspection covers and access doors are provided at appropriate points for inspection.

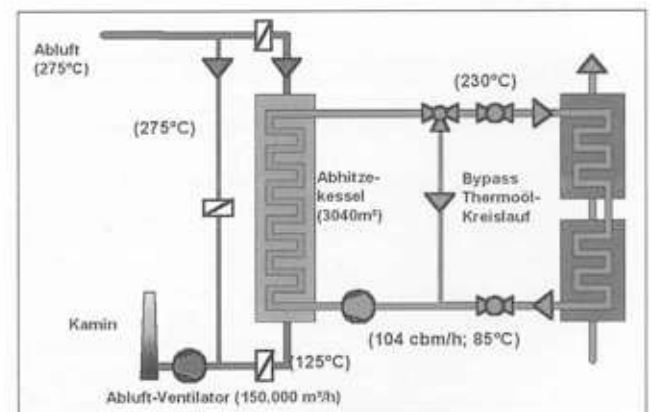


BILD 3: Abhitzekegel/Wärmeauskopplung

FIGURE 3: Waste heat boiler/recovery of heat

Bypass Thermoöl-Kreislauf thermal oil circuit bypass

dem Abhitzekeessel,
dem Abluft-Bypass,
der Wärmeträgeröl-Anlage,
und dem Wärmeträgermedium.

Beim Abhitzekeessel handelt es sich um einen konventionellen Röhrenwärmetauscher. Die Dimensionierung des Abhitzekeessels erfolgte u. a. unter der Voraussetzung, dass das vorhandene Kühlerabluft-Gebläse ohne Umrüstung weiter betrieben werden sollte. Die Konvektionsheizflächen des Abhitzekeessels bestehen aus vier Glattrohrbündeln, die in einem gasdichtem Kassettenblechgehäuse eingeschoben sind. Sämtliche Rohre sind fluchtend mit durchgehenden abluftseitigen Gassen angeordnet. Die Querteilung beträgt 54 mm und die Längsteilung 50 mm. Die Konvektionsflächen sind so bemessen, dass die Netto-Gesamtheizfläche selbst bei einer Belegung der Glattrohre auf der Anströmseite mit Klinkerstaub immer noch 2730 m² beträgt.

Für eine eventuelle Belegung der Rohrbündel auf der Anströmseite mit Klinkerstaub wurde zusätzlich eine Schmutzreserve von 310 m² berücksichtigt. Die luftseitige Durchströmung des Abhitzekeessels erfolgt von oben nach unten. Die einzelnen Rohrbündel sind im Gegenstrom geschaltet. Der Abhitzekeessel ist statisch für eine maximale Temperatur von 450 °C ausgelegt. Er ist in ein Stahlgerüst eingehängt und kann sich damit spannungsfrei bei Temperaturwechsel dehnen. Rauchgaskanal und Anschlussstücke am Kesseleintritt und -austritt bestehen aus gasdicht verschweißtem Stahlblech sowie den erforderlichen Kompensatoren. Für die Inspektion der Heizflächen sowie die Wartung der Kesselanlage und Rauchkanäle sind an den entsprechenden Stellen Schauluken und Einsteigetüren vorgesehen.

Für den Fall einer erforderlichen Stillsetzung des Abhitzekeessels bei laufendem Ofenbetrieb oder für die Ableitung eines Teilstroms bei überschüssiger Abwärme kann die Klinkerkühlerabluft über den alten Saugzug im Bypassbetrieb am Abhitzekeessel vorbei direkt zum Klinkerkühlerabluftgebläse geführt werden. Zur Absperrung und Regelung der Abluftströme sind vor und nach dem Abhitzekeessel so-



BILD 4: Abhitzekeesselanlage mit Anschluss an das Heißelektrofilter
FIGURE 4: Waste heat boiler plant with connection to hot electrostatic precipitator

tion of the heating surfaces and maintenance of the boiler plant and flue gas ducts.

The clinker cooler exhaust air can be supplied directly to the clinker cooler exhaust air fan via the old induced draft system, bypassing the waste heat boiler, if the waste heat boiler has to be shut down while the kiln is in operation or to divert part of the flow if there is excess waste heat. Electrically driven louvre dampers are installed before and after the waste heat boiler and in the bypass duct to shut off and control the exhaust air flows.

The heat transfer oil plant consists essentially of:

- thermal oil reservoir as the filling and supply container for the thermal oil, including refilling/emptying pumps (content: 20 m³, designed in accordance with DIN 4754),
- thermal oil expansion container with level control as a pressure-maintaining system, designed as a pressure vessel, including protection against lack of oil (content: 1 m³, designed in accordance with DIN 4754),
- nitrogen shielding equipment for protection against oxidation and penetration of water vapour from the atmosphere in the area of the oil reservoir and the overflow container,
- heat transfer oil pumps and pipeline system; designed for safety reasons as a double-pump group.

Other special design features for the thermal oil circuit are:

- use of fittings tested for suitability in accordance with GGG 40.3,
- use of fittings with leak-free bellows seals,
- use of pumps with maximum working temperature of 350 °C,
- use of graphite-based seals.

The following criteria were considered when selecting the heat transfer oil:

- use of a heat transfer oil which does not contain halogens,
- high thermal resistance, in order to minimize formation of residue in the system and ensure a long service life,
- low operating viscosity, in order to minimize pipeline losses and ensure high heat transfer values which enable the system to heat up rapidly.

Mobiltherm 594 heat transfer oil was chosen for the reasons given. The total charge is 25 m³ (Fig. 4).

2.4 The ORC plant

The ORC plant consists essentially of the pentane evaporator and preheater, the turbines, the generator and the motive medium. The heat transfer oil, preheated in the waste heat boiler to 230 °C, is fed to the downstream ORC plant - first to a pentane evaporator and then to a pentane preheater. Here the liquid pentane with an input temperature of 57 °C is heated to 162 °C and evaporated. As it passes through the pentane evaporator and preheater the heat transfer oil is cooled down to 85 °C and fed back to the waste heat boiler by the heat transfer oil pump.

The pentane evaporator and preheater each consists of a U-tube heat exchanger with horizontal tube bundles complying with the TEMA "C" standard. The tube unit has single pass welding with St 37 steel tubes which end in tube plates, and is supported by cross baffles and internal fittings. The casing is a cylindrical steel container made of St 37. The relative thermal expansion between shell and tube bundle is offset by a special steel expansion joint located at the outlet from the casing. The heat

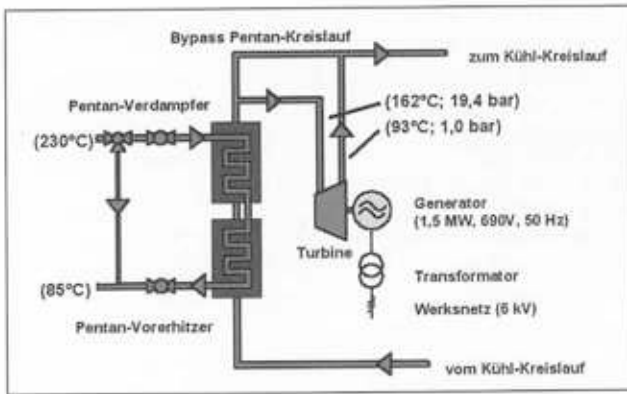


BILD 5: ORC-Anlage/Stromerzeugung

FIGURE 5: ORC plant/power generation

Bypass Pentan-Kreislauf	pentane circuit bypass
zum Kühl-Kreislauf	to cooling circuit
Pentan-Verdampfer	pentane evaporator
Pentan-Vorwärmer	pentane preheater
Generator	generator
Turbine	turbine
Transformator	transformer
Werksnetz	works power supply
vom Kühl-Kreislauf	from cooling circuit

wie im Bypasskanal elektrisch angetriebene Jalousienklappen installiert.

Die Wärmeträgerölanlage besteht im Wesentlichen aus:

- Thermo-Öl-Sammelbehälter als Füll- und Ablassbehälter für das Thermo-Öl einschließlich Nachfüll-/Entleerpumpen (Inhalt: 20 m³, Ausführung gemäß DIN 4754),
- Thermo-Öl-Ausdehnungsbehälter mit Niveauregulierung als Druckhaltesystem, ausgelegt als Druckbehälter einschließlich Ölmangelsicherung (Inhalt: 1 m³, Ausführung gemäß DIN 4754),
- Stickstoff-Überlagerungseinrichtung zum Schutz gegen Oxidation und Eindringen von Wasserdampf aus der Atmosphäre im Bereich des Ölsammelbehälters und des Überlaufbehälters,
- Wärmeträger-Öl-Pumpen und Rohrleitungssystem; aus Sicherheitsgründen als Doppel-Pumpengruppe ausgeführt.

Sonstige konstruktive Besonderheiten im Bereich des Thermoölkreislaufes sind:

- Verwendung eignungsgeprüfter Armaturen gemäß GGG 40.3,
- Verwendung von Armaturen mit leckagefreien Faltenbalgabdichtungen,
- Verwendung von Pumpen mit einer maximalen Einsatztemperatur von 350 °C,
- Verwendung von Dichtungen auf Grafitbasis.

Bei der Auswahl des Wärmeträgeröles wurde auf folgende Kriterien geachtet:

- Verwendung eines nicht halogenhaltigen Wärmeträgeröles,
- hohe thermische Beständigkeit, um Rückstandsbildungen im System zu minimieren und eine lange Lebensdauer zu gewährleisten,
- niedrige Betriebsviskosität, um Rohrleitungsverluste zu minimieren und hohe Wärmeübertragungswerte zu gewährleisten, die ein schnelles Aufheizen des Systems ermöglichen.

Aus den aufgeführten Gründen fiel die Auswahl auf das Wärmeträgeröl Mobiltherm 594. Die Gesamtfüllung beträgt 25 m³ (Bild 4).

2.4 Die ORC-Anlage

Die ORC-Anlage besteht im Wesentlichen aus dem Pentan-Verdampfer und -Vorwärmer, den Turbinen, dem Genera-

transfer oil flows through the tube bundle, while the pentane flows in the heat exchanger container. An expansion vessel is connected to the pentane evaporator to achieve optimum energy yield and to regulate the level of liquid pentane. A continuous level control system with automatic warning is installed to ensure that the pentane level does not drop below the critical minimum filling level (Fig. 5).

The pentane vapour at 162 °C which is precompressed to 19.4 bar drives a 2-stage turbine with a nominal rating of 1.5 MW. The pentane leaves the turbine at a temperature of 93 °C and a pressure of 1.03 bar. A conventional alternating current generator is connected to the turbine. The thermal efficiency is about 14%. The turbine is specially designed for operation with organic media and operates by the pulse method. The inlet valves are designed for high turbine efficiency and permit a high degree of variability of the turbine operation with fluctuating load. Adjustment of the turbine output at constant speed is achieved by regulating the flow of pentane vapour entering the turbine by controlling the pressure in the pentane evaporator. The plain bearings of the turbine and the turbine shaft are lubricated with a pressurized oil lubrication system. The oil-lubricated parts of the turbine are isolated by a separate circuit so that no lubricating oil can enter the pentane cycle, and the lubrication oil is fed to the bearings and shaft seal under controlled pressure.

The individual operating stages of the ORC plant are shown in the temperature-entropy diagram in Fig. 6:

- stage 1-2: evaporation
- stage 2-3: expansion
- stage 3-4: desaturation
- stage 4-5: condensation
- stage 5-6: pressurization
- stage 6-1: preheating

Under the given turbine operating conditions the generator can generate 1.3 MW power (gross) with an alternating voltage of 690 V and a frequency of 50 Hz. The generator is connected to the turbine in a modular assembly. A conventional asynchronous generator is used which is synchronized with the works mains power supply. The current generated is transformed to a voltage of 6 kV in a transformer and fed directly into the works network, so it has no effect on the supply network. In fact, the starting up and stopping of the plant act like the switching on and off of a large drive. About 0.2 MW are taken by the drives for the pentane pump, the fans for the air con-

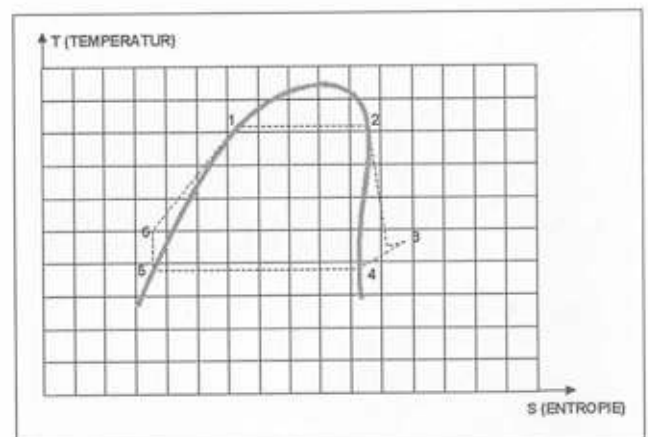


BILD 6: T-S-Diagramm des ORC-Prozesses

FIGURE 6: Temperature-entropy diagram for the ORC process

Temperatur	temperature
Entropie	entropy

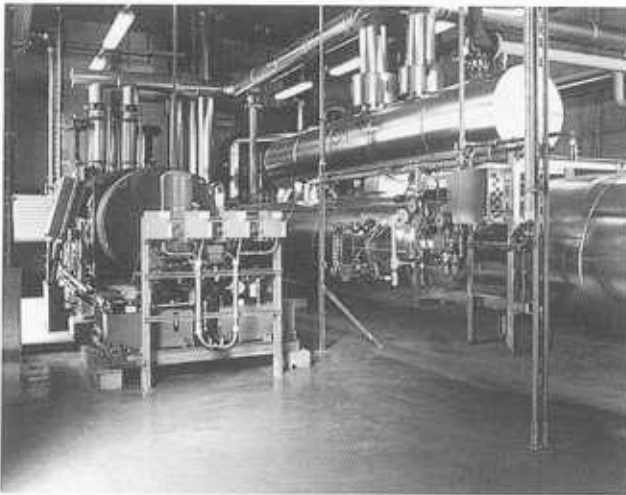


BILD 7: Generator (links) und Pentan-Verdampfer (rechts)
 FIGURE 7: Generator (left) and pentane evaporator (right)

tor sowie dem Treibmedium. Das im Abhitzeessel auf 230 °C vorgewärmte Wärmeträger-Öl wird in der nachgeschalteten ORC-Anlage zuerst einem Pentan-Verdampfer und dann einem Pentan-Vorerhitzer zugeführt. Hier wird das flüssige Pentan im Gegenstrom mit einer Vorlauf-temperatur von 57 °C auf 162 °C erhitzt und verdampft. Das Wärmeträger-Öl wird beim Durchlauf durch den Pentan-Verdampfer und -Vorerhitzer auf 85 °C heruntergekühlt und über die Wärmeträgeröl-Pumpe erneut dem Abhitzeessel zugeführt.

Der Pentan-Verdampfer und -Vorerhitzer bestehen aus je einem U-Röhrenwärmetauscher mit horizontaler Anordnung der Rohrbündel nach TEMA „C“ Standard. Die Rohreinheit verfügt über eine Einlagenschweißung mit Stahlrohren aus St 37, die in Rauchrohrwänden enden, und von Umlenksegmenten und Einbauten getragen wird. Das Gehäuse besteht aus einem zylindrischen Stahlbehälter aus St 37. Die relative thermische Ausdehnung zwischen Mantel und Rohrbündeln wird durch einen am Ausgang des Gehäuses angeordneten Edelstahlkompensator kompensiert. Das Wärmeträger-Öl fließt durch die Rohrbündel, während das Pentan in den Wärmetauscherbehälter fließt. Für eine optimale Energieausbeute und zur Regulierung des Niveaus des flüssigen Pentans ist am Pentan-Verdampfer ein Ausgleichsgefäß angeschlossen. Um das Absinken des Pentanfüllstandes unter den kritischen Mindestfüllstand zu überwachen, ist eine kontinuierliche Füllstandsregelung mit automatischer Warnung installiert (Bild 5).

Mit dem 162 °C heißen und auf 19,4 bar vorgespannten Pentandampf wird eine 2-stufige Turbine mit einer Nennleistung von 1,5 MW angetrieben. Das Pentan verlässt die Turbine mit einer Temperatur von 93 °C und einem Druck von 1,03 bar. An die Turbine ist ein konventioneller Wechselstrom-Generator angekuppelt. Der thermische Wirkungsgrad beträgt ca. 14 %. Die Turbine ist speziell für den Betrieb mit organischen Medien ausgelegt und arbeitet nach dem Impulsverfahren. Die Einlassventile sind für einen hohen Wirkungsgrad der Turbinen konstruiert und ermöglichen eine hohe Variabilität des Turbinenbetriebs bei Lastwechsel. Die Anpassung der Turbinenleistung bei gleich bleibender Drehzahl erfolgt über Regelung der Durchflussmenge des in die Turbine eintretenden Pentandampfes, indem der Druck im Pentan-Verdampfer geregelt wird. Sowohl die Gleitlager der Turbine als auch die Turbinenwelle werden über eine Öldruckschmierung geschmiert. Damit kein Schmieröl in den Pentankreislauf gelangen kann, sind die ölgeschmierten Teile der Turbine durch einen Sperrkreislauf getrennt, und das Schmieröl wird den Lagern und der Wellenabdichtung unter geregelterm Druck zugeführt.

denser, and the thermal oil pump, so overall a net power generation of about 1.1 MW can be assumed (Fig. 7). An important element of the ORC cycle process and the thermal oil system from the physical, chemical, physiological and ecological aspects is the motive medium used, namely pentane. Compared with other possible motive media, such as ammonia, halogenated hydrocarbons and hydrocarbons, it is characterized by its favourable thermodynamic properties while at the same time taking into account the aspects of explosion protection and protection of the environment and workplace. The low vaporization point and the high vapour pressures give the ORC process a higher thermal efficiency than steam. The quantity used is about 6 m³. In the cooling circuit connected to the turbine the pentane at 93 °C is cooled further in 2 stages to 57 °C and recycled to the pentane preheater with the pentane pressurizing pump. The cooling from 93 °C to 60 °C in the first stage takes place in a recooler. The cold side of the recooler is fed with pentane which has been cooled from 60 °C to 29 °C in the second stage in an air condenser (Figs. 8 and 9).

For safety reasons the air condenser plant is designed so that if there is a safety stoppage of the turbine or generator the entire heat absorbed by the pentane cycle can be discharged safely with a maximum temperature of 205 °C and a maximum ambient temperature of 40 °C. The heat transfer surfaces of the air condenser consist of tube bundles which are located in a plane at right angles to the direction of flow. For space reasons the air condenser was installed on the roof of the ORC building. The cooling tubes are made of St 37, with flanged aluminium cooling fins. After being cooled the condensed pentane flows under gravity through a filter to the pentane pressurizing pump which transfers the pentane to the recooler. The pentane flow is controlled by the liquid level in the pentane evaporator. The condensation pressure can be kept constant by switching on and off the fans at the air condenser.

The ORC plant, including the cooling circuit, was supplied by ORMAT Industries LTD, Israel, and the waste heat boiler and heat transfer oil system were supplied by HTT Hoch-Temperatur-Technik of Herford.

3. Safety design and monitoring

The entire plant was designed for unmanned operation and is monitored from the central control room through visual displays with operating and control elements.

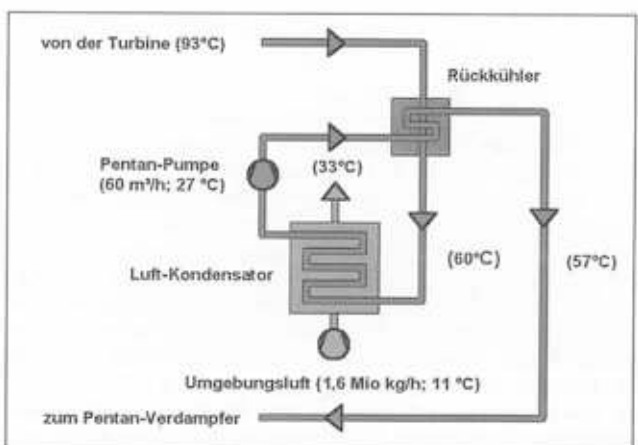


BILD 8: Luft-Kondensator/Kühl-Kreislauf

FIGURE 8: Air condenser/cooling circuit

von der Turbine	from the turbine
Rückkühler	recooler
Luft-Kondensator	air condenser
Umgebungs-luft	ambient air
zum Pentan-Verdampfer	to pentane evaporator



BILD 9: ORC-Gebäude und Luft-Kondensatoranlage
FIGURE 9: ORC building and air condenser plant

In Bild 6 sind die einzelnen Arbeitsschritte der ORC-Anlage im T-S-Diagramm dargestellt:

- Schritt 1-2: Verdampfung
- Schritt 2-3: Expansion
- Schritt 3-4: Entsättigung
- Schritt 4-5: Kondensation
- Schritt 5-6: Druckerhöhung
- Schritt 6-1: Vorwärmung.

Unter den genannten Betriebsbedingungen der Turbine können vom Generator brutto 1,3 MW Strom mit einer Wechselspannung von 690 V und einer Frequenz von 50 Hz erzeugt werden. Der Generator ist im modularen Aufbau mit den Turbinen verbunden. Verwendet wird ein konventioneller Asynchron-Generator, der mit dem Werks-Stromnetz synchronisiert ist. Der erzeugte Strom wird über einen Transformator auf eine Spannung von 6 kV umgespannt und direkt in das Werksnetz abgeben und hat damit keinen Einfluss auf das Einspeisernetz. De facto wirkt sich das An- und Abfahren der Anlage wie das Ein- bzw. Abschalten eines Großantriebes aus. Von den Antrieben für die Pentan-Pumpe, die Ventilatoren des Luft-Kondensators und die Thermoöl-Pumpe, werden ca. 0,2 MW aufgenommen, sodass insgesamt von einer Netto-Stromerzeugung von ca. 1,1 MW auszugehen ist (Bild 7).

Ein wichtiges Element der ORC-Kreisprozesse und Thermoölanlagen in physikalischer, chemischer, physiologischer und ökologischer sowie ökonomischer Hinsicht ist das einzusetzende Treibmedium Pentan. Es zeichnet sich im Vergleich zu anderen in Frage kommenden Treibmedien wie Ammoniak, halogenierten Kohlenwasserstoffen und Kohlenwasserstoffen durch seine günstigen thermodynamischen Eigenschaften unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Aspekte des Umwelt-, Arbeitsplatz- und Ex-Schutzes aus. Gegenüber der Verwendung von Wasserdampf bewirken der niedrige Verdampfungspunkt und die hohen Dampfdrücke einen höheren thermischen Wirkungsgrad des ORC-Verfahrens. Die Einsatzmenge beträgt ca. 6 m³. In dem sich an die Turbine anschließenden Kühlkreislauf wird das 93 °C heiße Pentan in 2 Stufen wieder auf 57 °C heruntergekühlt und mit der Pentandruckerhöhungspumpe in den Kreislauf zum Pentan-Vorerhitzer wieder zugeführt. In der ersten Stufe erfolgt die Kühlung von 93 °C auf 60 °C in einem Rückkühler. Der Rückkühler wird dabei auf der Kaltseite mit dem in der zweiten Stufe in einem Luftkondensator von 60 °C auf 29 °C gekühlten Pentan beaufschlagt (Bilder 8 und 9).

Starting and stopping take place automatically. A safety scheme complying with the authorization conditions and the preliminary trials by the TÜV-Würzburg was developed which ensures safe, non-hazardous operation at all times.

The safety concept for the waste heat boiler plant and the heat transfer oil circuit is based primarily on monitoring the heat transfer oil temperature and the clinker cooler exhaust air temperature so that the heat supply from the clinker cooler exhaust air can be shut off safely. This ensures safe operation of the thermal oil below the film temperature of 280 °C and protection of the waste heat boiler from 400 °C. Other safety devices in the heat transfer oil plant area are:

- oil tray with leakage warning device
- flow monitoring
- expansion container
- level safety system
- inert gas shielding
- overpressure safety system.

In the ORC plant the safety scheme is based on monitoring the pentane pressure so that the heat input through the heat transfer oil circuit can be shut off safely, which ensures safe operation in the saturated vapour range. To measure the pressure reliably the measurement is carried out by a component-tested measuring device. The pentane evaporator is operated in the saturated vapour range with slight superheating of 10 to 20 °C. The plant is therefore designed for a maximum operating pressure of 32 bar. All the valves located in the pentane circuit which are relevant to safety are pneumatically actuated and the electrical drives are connected to the emergency power supply for the kiln plant.

Particular attention was paid to the following codes of practice for the electrical design and equipment:

- Explosion protection code (Ex-RL/Zone 2)
- Electrical equipment for areas subject to explosion hazards VDE 0165/Zone 2
- Heat transfer systems with organic heat transfer media VDI 3033
- Heat transfer systems with organic heat transfer media UVV VGB 64, Appendix 3
- Heat transfer systems with organic heat transfer media DIN 4754
- Electrical equipment for combustion systems DIN/VDE 0116.

Particular mention should be made of the fact that the exchange of signals with the drives take place in both directions with floating contacts and is fail-safe. Design-tested parts and separate hardware interlock systems complying with the requirements of DIN/VDE 113 and DIN/VDE 116 are used for the safety shutdowns.

A manufacturing audit in accordance with ISO 9001 was also carried out, among other things, during the safety acceptance by the TÜV-Würzburg. The testing essentially covered the fabrication, material and welding certificates; all pressurized parts were also submitted to component acceptance and pressure testing.

4. Capital costs

The total expenditure for the erection of the waste heat power generating plant came to about 7.88 million DM. The specific capital costs relative to the net plant output of 1.1 MW are therefore 7164 DM/kW_{net}. A breakdown of the requisite capital investment is shown in Table 1.

Aus Sicherheitsgründen ist die Luftkondensator-Anlage so ausgelegt, dass im Falle einer Sicherheitsabschaltung der Turbine oder des Generators die gesamte vom Pentan-Kreislauf aufgenommene Wärme mit einer maximalen Temperatur von 205 °C und bei einer maximalen Umgebungstemperatur von 40 °C sicher abgeführt werden kann. Die Wärmeübertragungsflächen des Luftkondensators bestehen aus Rohrbündeln, die in einer Ebene quer zur Durchströmungsrichtung angeordnet sind. Aus Platzgründen wurde der Luft-Kondensator auf das Dach des ORC-Gebäudes installiert. Die Kühlrohre sind aus St 37 ausgeführt, auf die Kühlrippen aus Aluminium angeflanscht sind. Das kondensierte Pentan fließt nach Abkühlung durch die Schwerkraft über einen Filter der Pentandruckerhöhungspumpe zu, die das Pentan dem Rückkühler zuführt. Der Pentanvolumenstrom wird über den Flüssigkeitsstand des Pentan-Verdampfers geregelt. Der Kondensationsdruck kann durch Zu- und Abschalten der Ventilatoren am Luftkondensator konstant gehalten werden.

Die ORC-Anlage einschließlich des Kühlkreislaufs wurden von der Firma ORMAT Industries LTD, Israel, und der Abhitzekeessel sowie die Wärmeträgerölanlage von der Firma HTT Hoch-Temperatur-Technik, Herford, geliefert.

3. Sicherheitstechnische Auslegung und Überwachung

Die gesamte Anlage wurde für einen mannslosen Betrieb konzipiert und wird über Bildschaltbilder mit Bedien- und Kontrollelementen aus dem zentralen Leitstand überwacht. Start und Stopp erfolgen automatisch. Gemäß den Auflagen der Genehmigung und der Vorprüfungen durch den TÜV-Würzburg wurde ein Sicherheitskonzept aufgebaut, das einen sicheren und gefahrlosen Betrieb dauerhaft gewährleistet.

Bei der Abhitzekeesselanlage und dem Wärmeträgeröl-Kreislauf basiert das Sicherheitskonzept in erster Linie auf der Überwachung der Wärmeträgeröl-Temperatur und der Klinkerkühler-Ablufttemperatur zur sicheren Abschaltung der Wärmezufuhr über die Klinkerkühler-Abluft, die einen sicheren Betrieb des Thermoöls unter der Filmtemperatur von 280 °C sowie den Schutz des Abhitzekeessels von 400 °C gewährleistet. Weitere Sicherheitsvorrichtungen im Bereich der Wärmeträgerölanlage sind:

- Ölwanne mit Leckagewarngerät
- Strömungsüberwachung
- Ausdehnungsbehälter
- Niveausicherung
- Inertgasüberlagerung
- Überdrucksicherung.

Bei der ORC-Anlage basiert das Sicherheitskonzept auf der Überwachung des Pentandrucks und der sicheren Abschaltung des Wärmeeintrags über den Wärmeträgerölkreislauf, die einen sicheren Betrieb im Satttdampfbereich gewährleisten. Um den Druck sicher zu erfassen erfolgt die Messung über eine bauteilgeprüfte Messvorrichtung. Der Pentan-Verdampfer wird im Satttdampfbereich mit geringfügiger Überhitzung von 10 bis 20 °C betrieben. Daraus resultierend ist das System für einen maximalen Betriebsdruck von 32 bar ausgelegt. Darüber hinaus sind alle im Pentankreislauf liegenden sicherheitsrelevanten Ventile pneumatisch angesteuert und die elektrischen Antriebe an die Notstromversorgung der Ofenanlage angeschlossen.

Die elektrotechnische Ausführung und Ausrüstung erfolgte insbesondere unter Beachtung folgender Regelwerke:

- Explosionsschutzrichtlinie (Ex-RL/Zone 2)
- Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche VDE 0165/Zone 2
- Wärmeübertragungsanlagen mit organischen Wärmeträgern VDI 3033
- Wärmeübertragungsanlagen mit organischen Wärmeträgern UVV VGB 64, Anhang 3

TABELLE 1: Investitionen für die ORC-Anlage
TABLE 1: Capital investment for the ORC plant

Investition für/capital investment for	Kosten/cost [DM]
Abhitzekeessel und Wärmeträgerölanlage*) waste heat boiler and heat transfer oil plant*)	1 930 000
ORC-Anlage und Pentan-Kühlkreislauf*) ORC plant and pentane cooling circuit*)	3 993 000
Fundamente und Massivbau foundations and solid construction	610 000
Elektrotechnische Installationen*) electrical installations*)	680 000
Engineering inklusive Anlagenversuche design engineering, incl. plant trials	589 000
Gebühren/fees	78 000
Gesamt/total	7 880 000

*) Werte inklusive Montage/figures include installation

5. Test results

Three individual trials, each over a period of 12 hours, were carried out from 10.08 to 12.08.1999 as part of the test programme specified with the Berlin Environmental Authority. For each trial day the heat transfer oil flow was varied under constant kiln operating conditions in order to run the power generating plant in different output ranges (Table 2).

During the trial period the kiln system was run at an average output of 2 953 t/d with uniform kiln operation. Cyclic fluctuations in the clinker discharge, which led to slight fluctuations in the clinker exhaust air volume flow and exhaust air temperatures, lay within the normal range and had no detrimental effect on the operating behaviour. Only on 11.8.99 from 11:40 to 13:40 hours was clinker held back by the rotary kiln over a fairly long period. This reduced the recovered heat output from 9 600 kW to below 6 500 kW, and hence the net power generation from the ORC plant from 1 179 kW to 530 kW. This shows that the power generating plant can be operated without problem over a very wide output range (Fig. 10).

During the trials the clinker cooler was operated with a significantly higher exhaust air flow of 183 574 m³/h (stp) and higher exhaust gas temperatures than when the design was carried out. In order not to exceed the maximum

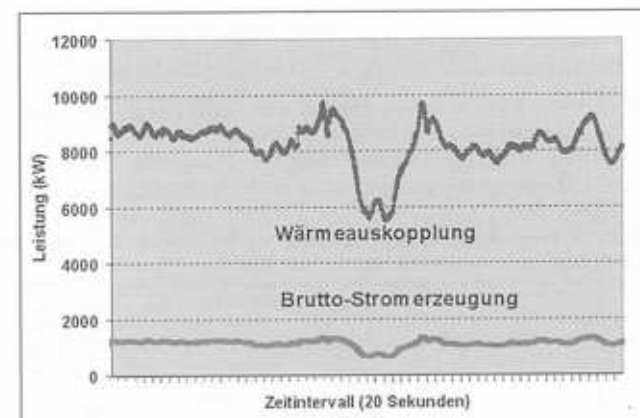


BILD 10: Verlauf der Brutto-Stromerzeugung und der Wärmeauskopplung

FIGURE 10: Behaviour pattern of gross power generation and heat recovery

Leistung	power
Zeitintervall (20 Sekunden)	time interval (20 seconds)
Wärmeauskopplung	heat recovery
Brutto-Stromerzeugung	gross power generation

- Wärmeübertragungsanlagen mit organischen Wärmeträgern DIN 4754
- Elektrische Ausrüstung von Feuerungsanlagen DIN/VDE 0116.

Besonders darauf hinzuweisen ist, dass der Signalaustausch zu den Antrieben in beide Richtungen mit potenzialfreien Kontakten erfolgt und drahtbruchsicher ausgeführt wurde. Die Sicherheitsabschaltungen erfolgen darüber hinaus mit bauartgeprüften Teilen und mit separater Hardware, Verriegelung nach den Vorschriften der DIN/VDE 113 und DIN/VDE 116.

Im Rahmen der sicherheitstechnischen Abnahme durch den TÜV-Würzburg erfolgte u.a. zusätzlich eine Auditierung der Fertigung nach ISO 9001. Geprüft wurden im Wesentlichen die Fertigung, Werkstoff- und Schweißzeugnisse; des Weiteren erfolgten eine Bauteilabnahme und Druckprüfungen aller Druck tragenden Teile.

4. Investitionskosten

Der Gesamtaufwand für die Errichtung des Abwärmekraftwerks beläuft sich auf insgesamt ca. 7,88 Mio. DM. Damit betragen die spezifischen Investitionen bezogen auf die Nettoanlagenleistung von 1,1 MW 7 164 DM/ kW_{netto}. Eine Aufschlüsselung der erforderlichen Investitionen ist in **Tabelle 1** ersichtlich.

5. Versuchsergebnisse

Im Rahmen des mit dem Umweltbundesamt Berlin festgelegten Versuchsprogramms wurden vom 10.8. bis zum 12.8.1999 drei Einzelversuche über einen Zeitraum von je 12 Stunden durchgeführt. Für jeden Versuchstag wurde bei gleich bleibenden Betriebsbedingungen der Ofenanlage die Wärmeträgeröl-Durchflussmenge variiert, um die Stromerzeugungsanlage mit unterschiedlichen Leistungsbereichen zu fahren (**Tabelle 2**).

Die Ofenanlage wurde während des Versuchszeitraums mit einer durchschnittlichen Leistung von 2953 t/d bei gleichmäßigem Ofengang betrieben. Zyklische Schwankungen im Klinkeraustrag, die zu leichten Schwankungen des Klinkerabluft-Volumenstromes und Abluft-Temperaturen führten, lagen im üblichen Bereich und hatten keinen negativen Einfluss auf das Betriebsverhalten. Lediglich am 11.8.99 von 11:40 bis 13:40 Uhr wurde vom Drehofen über einen längeren Zeitraum Klinker zurückgehalten. Hierdurch sank die ausgekoppelte Wärmeleistung von 9600 kW auf unter 6500 kW ab und damit die Netto-Stromerzeugung der ORC-Anlage von 1179 kW auf 530 kW. Dieses Ereignis zeigt, dass die Stromerzeugungs-Anlage über einen sehr breiten Leistungsbereich problemlos betrieben werden kann (**Bild 10**).

Der Klinkerkühler wurde während der Versuche gegenüber der Situation zum Zeitpunkt der Auslegung mit einem deutlich höheren Abluftvolumenstrom von 183 574 m³/h (i. N.) und mit höheren Abgastemperaturen betrieben. Um die auf

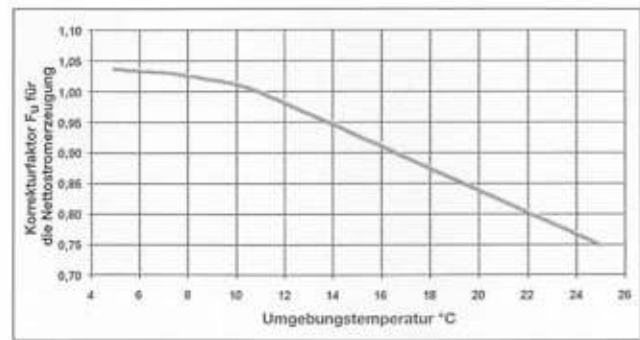


BILD 11: Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Nettoerzeugung bei einer Wärmeträgeröleintrittstemperatur von 230 °C

FIGURE 11: Influence of the ambient temperature on the net power generating capacity at a heat transfer oil inlet temperature of 230 °C

Korrekturfaktor F_u für die Nettoerzeugung
Umgebungstemperatur

correction factor F_u for net power generation
ambient temperature

temperature limit of the heat transfer oil of 240°C about 23 % (41 909 m³/h (stp)) of the available heat flow was diverted around the waste heat boiler plant by the bypass. 141 195 m³/h (stp) with a thermal capacity of 14.10 MW were supplied to the waste heat boiler. This meant that on average the recovered heat capacity lay near the design point (**Table 3**). Under these operating conditions the average gross power generation from the ORC plant during the trial period was 1119 kW. The power provided for operating the auxiliary equipment for the ORC plant (pentane pump, fans for the air condenser, turbine bearing lubrication system) was 164 kW and the net power generation was 955 kW.

If the deviations from the design points of the higher ambient temperature of 8 °C and of the heat transfer oil mass flow of 5.2 t/h and of the lower heat transfer oil inlet temperature of 3 °C are taken into account then, using a total correction factor of 0.85 and the measurement tolerance to be taken into account of a total of 3 %, this gives a net average power generating output of 1155 kW. The effect of the ambient temperature on the results from the power generating plant can be seen from the correction curve (**Fig. 11**). If other consumers, such as heat transfer oil pump, ORC building ventilation system and the approximately 3 % losses for the 6 kV transformer, totaling 82 kW, are taken into account this gives an achievable net power generation of 1073 kW (**Table 4**).

The theoretically maximum achievable nominal output of the ORC plant of 1500 kW is achieved for a recoverable heat capacity of about 9.6 MW. This means that an effective net power generating capacity of about 1214 kW is possible with the waste heat power generating plant (**Table 5**). The output ranges covered by the ORC plant

TABELLE 2: Versuchsreihen unter Variation der Wärmeträgeröl-Durchflussmengen
TABLE 2: Trial series while varying the heat transfer oil flow rates

Versuch trial	Versuchszeitraum trial period	Wärmeträgeröldurchflussmenge heat transfer oil flow rate	ausgekoppelter Wärmestrom recovered heat flow	Netto-Stromerzeugung ORC-Anlage net power generation ORC plant
	[Datum/date]	[t/h]	[MW]	[MW]
1. Versuch/1 st trial	10.8.99	88,62	8,71	1,202
2. Versuch/2 nd trial	11.8.99	93,50	8,09	1,067
3. Versuch/3 rd trial	12.8.99	87,10	8,40	1,100
Durchschnitt/average	10.8. bis 12.8.99	89,77	8,40	1,122
Zielwert/target value		84,60	8,20	1,130

TABELLE 3: Vergleich der Auslegungsdaten und erzielte Versuchsergebnisse
TABLE 3: Comparison of design data and test results achieved

	Maßeinheit units	Auslegung design	Versuche tests
Abhitzekessel/waste heat boiler			
Abluft-Volumenstrom/exhaust air flow	m ³ /h (i. N.)	150 000	141 195
Abluft- Eintrittstemperatur/exhaust air inlet temperature	°C	275	301
Abluft- Austrittstemperatur/exhaust air outlet temperature	°C	125	132
Anstehender Abwärmestrom/available waste heat flow	MW	14	14,1
Wärmeträgerölanlage/heat transfer oil plant			
Wärmeträgeröldurchsatz/heat transfer oil throughput	t/h	84,6	89,8
Thermoöl-Eintrittstemperatur/thermal oil inlet temperature	°C	85	87
Thermoöl-Austrittstemperatur/thermal oil outlet temperature	°C	230	229
Ausgekoppelter Wärmestrom/recovered heat flow	MW	8,2	8,4
ORC-Anlage/ORC plant			
Massenstrom Treibmedium/mass flow, motive medium	t/h	60	56,8
Pentantemperatur vor Turbine/pentane temperature before turbine	°C	162	167
Temperatur nach Turbine/temperature after turbine	°C	93	111
Pentantemperatur vor Pentan-Vorwärmer pentane temperature before pentane preheater	°C	57	69
Druck vor Turbine/pressure before turbine	bar	19,4	18,7
Druck nach Turbine/pressure after turbine	bar	1,03	1,44
Brutto-Stromerzeugung/gross power generation	MW	1,15	1,12
Kühlkreislauf/cooling circuit			
Umgebungstemperatur/ambient temperature	°C	11	19
Pentantemperatur nach Luftkondensator pentane temperature after air condenser	°C	29	27
Kühlluftmassenstrom/cooling air mass flow	kg/h	1,7 million	1,7 million

max. 240 °C limitierte Temperatur des Wärmeträgeröles nicht zu überschreiten, wurde ca. 23 % (41 909 m³/h (i. N.)) des zur Verfügung stehenden Wärmestromes über den Bypass an der Abhitzekesselanlage abgeleitet. Zum Abhitzekessel wurden 141 195 m³/h (i. N.) mit einer Wärmeleistung von 14,10 MW geführt. Damit lag im Mittel die ausgekoppelte Wärmeleistung im Bereich des Auslegungspunktes (Tabelle 3). Unter den aufgeführten Betriebsbedingungen betrug die durchschnittliche Brutto-Stromerzeugung der ORC-Anlage während des Versuchszeitraums 1 119 kW. Die bereit gestellte Leistung für den Betrieb der Nebenaggregate der ORC-Anlage (Pentan-Pumpe, Ventilatoren des Luftkondensators und der Turbinen-Lagerschmierung) betrug 164 kW und die Netto-Stromerzeugung 955 kW.

Berücksichtigt man gegenüber den Auslegungspunkten die Abweichungen der höheren Umgebungstemperatur von 8 °C und des Wärmeträgerölmassenstromes von 5,2 t/h und der niedrigeren Wärmeträgeröleintrittstemperatur von 3 °C, so ergibt sich unter Anwendung eines Korrekturfaktors von insgesamt 0,85 sowie der zu berücksichtigenden Messtoleranzen in Höhe von insgesamt 3 % eine erzielte Netto-Stromerzeugungsleistung im Mittel von 1 155 kW.

Welchen Einfluss die Umgebungstemperatur auf das Ergebnis der Stromerzeugungs-Anlage hat, ist aus der Korrekturkurve zu ersehen (Bild 11). Berücksichtigt man weiterhin sonstige Verbraucher wie Wärmeträgeröl-Pumpe, ORC-Gebäuderaumbelüftung sowie die ca. 3 % Verluste für den 6-kV-Transformator von zusammen 82 kW, so ergibt sich eine effektiv erzielbare Netto-Stromerzeugung von 1 073 kW (Tabelle 4).

during the trials are illustrated in Fig. 12. Results on the long-term behaviour of this plant will be available at the earliest at the end of 2000 after completion of the long-term trial. The effects of the operational fluctuations of the kiln operation on the fluctuating load behaviour of the turbine and the possible increased wear on the mechanical control equipment devices will be of particular

TABELLE 4: Stromerzeugung bezogen auf Auslegungsdaten
TABLE 4: Power generation relative to design data

Brutto-Stromerzeugung gross power generation	1 119 kW
Leistungsaufnahme ORC-Nebenaggregate power consumption, ORC auxiliary units	-164 kW
Netto-Stromerzeugung net power generation	955 kW
Gutschrift aus Korrektur auf Auslegungspunkt credit from correction to design point	+167 kW
Netto-Stromerzeugung bezogen auf den Auslegungspunkt net power generation relative to design point	1 155 kW
Leistungsaufnahme Wärmeträgeröl-Pumpe power consumption, heat transfer oil pump	-35 kW
Leistungsaufnahme ORC-Gebäudebelüftung power consumption, ORC building ventilation	-13 kW
Leistungsaufnahme 6-kV-Transformatorverluste power consumption, 6 kV transformer losses	-34 kW
Effektive Netto-Stromerzeugung effective net power generation	1 073 kW

TABELLE 5: Maximal mögliche Stromerzeugung bezogen auf die ausgelegte Umgebungstemperatur von 11 °C
TABLE 5: Maximum possible power generation relative to the design ambient temperature of 11 °C

Brutto-Stromerzeugung = Nennleistung gross power generation = nominal output	1 500 kW
Leistungsaufnahme ORC-Nebenaggregate power consumption, ORC auxiliary units	200 kW
Netto-Stromerzeugung net power generation	1 300 kW
Sonstige Verbraucher other consumers	86 kW
Effektive Netto-Stromerzeugung effective net power generation	1 214 kW

Die theoretisch maximal erzielbare Nennleistung der ORC-Anlage von 1 500 kW wird bei einer auskoppelbaren Wärmeleistung von ca. 9,6 MW erreicht. Damit ist eine effektive Nettostromerzeugungsleistung von ca. 1 214 kW mit dem Abwärmekraftwerk möglich (Tabelle 5). Die während der Versuche von der ORC-Anlage durchfahrenen Leistungsbe- reiche sind in Bild 12 veranschaulicht. Ergebnisse über das Langzeitverhalten dieser Anlage werden frühestens Ende 2000 nach Abschluss des Langzeitversuches vorliegen. Bei dieser Langzeitbetrachtung werden insbesondere die Aus- wirkungen der betrieblichen Schwankungen des Ofenbetriebs auf das Wechsellastverhalten der Turbine und den möglichen erhöhten Verschleiß an den mechanischen Regel- einrichtungen von besonderem Interesse sein. Bei einer ge- planten Verfügbarkeit der ORC-Anlage von 98 %, könnten im Werk Lengfurt, bei gleicher Betriebsweise der Ofenan- lage und bei einem derzeitigen Strombedarf von ca. 74 000 MW, zukünftig mit der ORC-Anlage ca. 7 465 MW Strom pro Jahr erzeugt und damit der Strombezug um ca. 10 % reduziert werden. Mit einem spezifischen CO₂-Emis- sionsfaktor von netto 1,07 t CO₂/MWh [11] folgt damit ei- ne Reduktion der energieeinsatzbedingten CO₂-Emissionen von 7 620 t CO₂/a. Dies entspricht einem spezifischen Auf- wand von 1 034 DM/t CO₂ und Jahr.

Literaturverzeichnis/Literature

- [1] H. S. Erhard, A. Scheuer: Brenntechnik und Wärmewirt- schaft. ZKG INTERNATIONAL 46 (1993) No. 12, pp. 743-754.
- [2] Rohrbach Zement geht neue Wege bei der Wärmenutzung. Dampfkessel in den Zyklonvorwärmer integriert. KHD Cem- ent News No. 8, September 1996.
- [3] B. Gericke, O. Hansen: Integrierte Abwärmenutzung in Zementwerken. ZKG INTERNATIONAL 52 (1999) No. 10, pp. 550-563.
- [4] F. Steimle: Zur Thermodynamik der Prozesse mit Expan- sionsmaschinen. VDI-Berichte No. 377, Antriebsenergie aus Abwärme, Tagung Köln 1980, pp. 1-4.
- [5] W. Scholten: Arbeitsmedien. VDI-Berichte No. 377, An- triebsenergie aus Abwärme, Tagung Köln 1980, pp. 5-11.

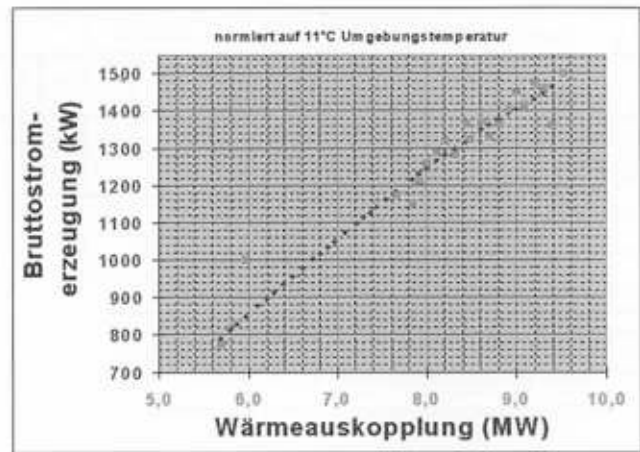


BILD 12: Bruttostromerzeugung

FIGURE 12: Gross power generation

normiert auf 11 °C
Umgebungstemperatur

normalized to an ambient
temperature of 11 °C

interest in this long-term examination. With a planned availability of the ORC plant of 98 % it will be possible to generate about 7 465 MW power in the ORC plant at the Lengfurt works per year with the same mode of op- eration of the kiln plant and with the present power re- quirement of about 74 000 MW, which will reduce the im- ported power by about 10 %. With a net specific CO₂ emis- sion factor of 1.07 t CO₂/MWh [11] this entails a reduc- tion of the CO₂ emissions caused by the use of energy of 7 620 t CO₂/a, corresponding to a specific expenditure of 1 034 DM/t CO₂ per year.

- [6] W. Maier: Nutzung industrieller Abwärme durch den ORC- Prozess. VDI-Berichte No. 377, Antriebsenergie aus Abwär- me, Köln Tagung Energie, Tagung Köln 1980, pp. 13-16.
- [7] G. Gneuss: Arbeitsmedien im praktischen Einsatz mit Ex- pansionsmaschinen. VDI-Berichte No. 377, Antriebsenergie aus Abwärme, Tagung Köln 1980, pp. 19-30.
- [8] H. P. Corneille und S. Haaf: Übersicht von ausgeführten ORC-Anlagen. VDI-Berichte No. 377, Antriebsenergie aus Abwärme, Tagung Köln 1980, pp. 31-40.
- [9] P. Randrup Christensen und G. Westermann: Abwär- menutzung mit zwei 600 kW Schrauben-Expansionsmaschi- nen im ORC. VDI-Berichte No. 377, Antriebsenergie aus Ab- wärme, Tagung Köln 1980, pp. 49-57.
- [10] H. Legmann, Yavne: Organischer Umweg, Stromerzeugung aus industrieller Abwärme. Energie 37, 1985 No. 9, pp. 90-92.
- [11] VDZ-Monitoring-Bericht 1998: Verminderung der CO₂-Emis- sionen, Beitrag der deutschen Zementindustrie, Verein Deut- scher Zementwerke e. V. Düsseldorf, Juli 1998.