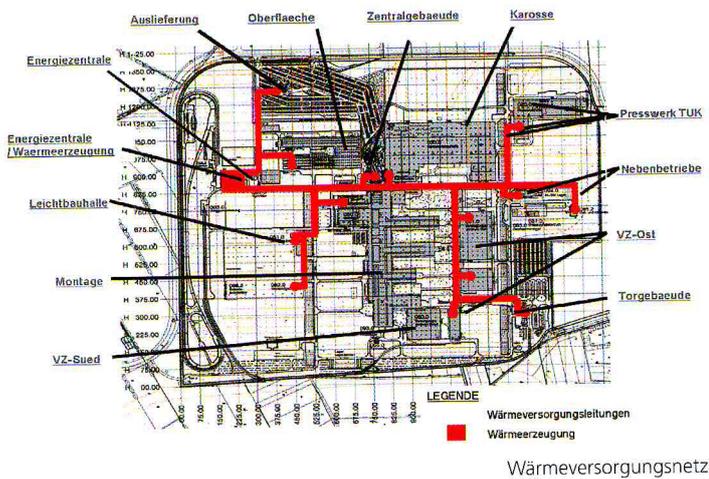
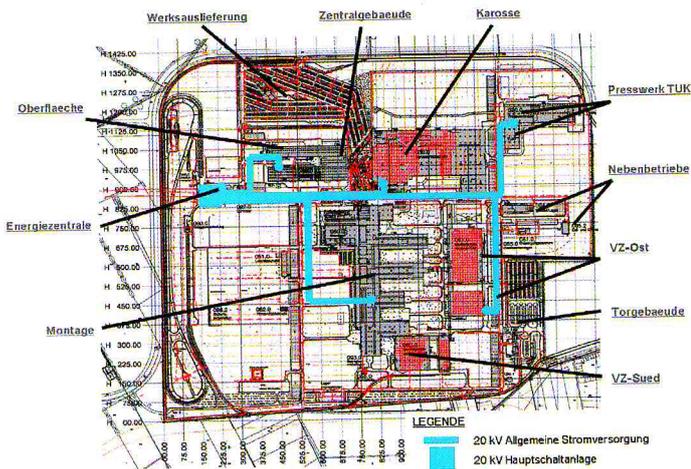


direkt, das heißt, ohne Umformer oder Systemtrennung. Die zentrale Wärmeerzeugung dient sowohl der Gebäudeheizung als auch der Wärmeversorgung für die Produktion. Die Stromversorgung für das Automobilwerk erfolgt ebenfalls zentral über eine 110 kV-Einspeisung und zwei 110/20 kV-Trafos mit nachgeschalteter 20 kV-Hauptschaltanlage. Diese versorgt über ein erdverlegtes 20 kV-Werksnetz die einzelnen Hallen und Gebäude. Die beiden 110/20 kV-Trafos und die nachgeschaltete 20 kV-Hauptschaltanlage befinden sich ebenfalls in der zuvor beschriebenen Energiezentrale.



Wärmeversorgungsnetz



Stromversorgungsnetz

Der Heizwärmebedarf des Werkes setzt sich hauptsächlich aus dem jahreszeitlich schwankenden Gebäudeheizwärmebedarf, dem Wärmebedarf der Warmwasserbereiter für Umkleiden, Duschen und die Kantine sowie dem Produktionswärmebedarf zusammen. Dies bedeutet, dass neben dem jahreszeitlich schwankenden Gebäudewärmebedarf auch ein von den Jahreszeiten unabhängiger Grundwärmebedarf besteht. Der Stromverbrauch des Werkes ist hingegen annähernd jahreszeitenunabhängig. Diese Randbedingungen, ganzjähriger Strom- und Wärmebedarf und zentrale in unmittelbarer Nähe angeordnete Wärmeerzeugung und Stromeinspeisung, sind ideale Voraussetzungen für den Einsatz einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (KWK-Anlage).

Machbarkeitsstudie für den wirtschaftlichen Einsatz einer KWK-Anlage

Entscheidend für den wirtschaftlichen Erfolg einer KWK-Anlage ist deren Auslegung und Dimensionierung. Dementsprechend ist vor Beginn einer konkreten Planung eine umfangreiche Machbarkeitsstudie durchgeführt worden mit dem Ziel, die Wirtschaftlichkeit für eine KWK-Anlage zu untersuchen und für dessen Fall die optimierte Auslegung dieser KWK-Anlage festzulegen.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie sind unter anderem folgende Varianten untersucht worden:

- Variante 1: Installation einer KWK-Anlage, bestehend aus einem BHKW-Modul (Gasmotor), Standort Energiezentrale
- Variante 2: Installation einer KWK-Anlage, bestehend aus 2 BHKW-Modulen, Standort Energiezentrale
- Variante 3: Installation einer KWK-Anlage, bestehend aus einer Gasturbine, Standort Energiezentrale
- Variante 4: Analog Variante 1, jedoch ein BHKW-Modul mit größerer Leistung
- Variante 4XL: Analog zu Variante 4, jedoch mit Berücksichtigung des erhöhten Wärmebedarfs bei Werkserweiterung
- Option: Installation einer Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlage (KWKK-Anlage) mit einem BHKW-Modul und einer Absorptionskältemaschine

Als Basis für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen dienen umfangreiche Messwerte aus den ersten beiden Betriebsjahren des Werkes hinsichtlich Wärmeverbräuchen und Wärmeerzeugung sowie Stromverbräuchen. Aus diesen Messwerten, den abgeschätzten zusätzlichen Verbräuchen für die vorgesehenen und beschlossenen Werkserweiterungen, sowie unter Berücksichtigung der vorgegebenen Energieeinsparmaßnahmen sind Jahreskurven für die Strom- und Wärmeverbräuche auf Basis von Stundenmittelwerten ermittelt worden. Diese Stundenmittelwerte sind Grundlage für die nachgeschalteten Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen. Unter anderem sind folgende Vorgaben zu erfüllen:

- Für die Wirtschaftlichkeit der KWK-Anlage müssen nicht nur die Rahmenbedingungen der VDI 2067, sondern auch die weitaus höheren Anforderungen in Bezug auf Amortisationszeiten des Auftraggebers erfüllt werden.
- Die Kraft-Wärme-Kopplungsanlage muss innerhalb der vorhandenen Gebäudehülle der Energiezentrale untergebracht werden, ohne die vorgesehenen Erweiterungen einzuschränken.
- Die Implementierung der Kraft-Wärme-Kopplungsanlage muss bei laufendem Betrieb ohne Unterbrechung der Wärmeversorgung erfolgen.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie sind für die zuvor beschriebenen Varianten folgende Untersuchungen durchgeführt worden:

- Entwicklung eines technischen Konzeptes für die einzelnen Varianten unter Berücksichtigung des Bestandes und der hydraulischen, MSR-technischen und elektrotechnischen Einbindung in den Bestand

- Ermittlung der Investitionskosten
- Ermittlung der laufenden Kosten (Wartungs-, Instandhaltungs-, Betriebskosten, staatliche bzw. gesetzliche Vergünstigungen)
- Trenddarstellung der laufenden jährlichen Kosten unter Berücksichtigung von Energiepreissensitivitäten
- Berücksichtigung der geplanten zukünftigen Ausbaustufen für das BMW Werk
- Berücksichtigung von vorgesehenen Energieeinsparmaßnahmen des Werkes

Als Ergebnis dieser Untersuchungen hat sich ergeben, dass die für die zuvor beschriebene Variante 4 XL unter den gegebenen Randbedingungen die wirtschaftlichste Variante darstellt und auch die kritischen Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit von Seiten des Auftraggebers erfüllt. Die zur weitergehenden Planung und Ausführung freigegebene Variante basiert auf folgenden Grundparametern:

- KWK-Anlage mit einem Modul als Gasverbrennungsmotor
- Modulgröße: zirka 3100 kW_{elektr}
- Modulgröße: zirka 3100 kW_{therm}
- 2. Abgaswärmetauscher (Brennwert-Abgaswärmetauscher) zur erhöhten Auskopplung von Wärmeenergie und damit eine Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades der Kraft-Wärme-Kopplungsanlage stromgeführte Variante ist wirtschaftlicher als wärmegeführte Betriebsweise
- Auskopplung der über den Generator gewonnenen elektrischen Energie auf Hochspannungsebene (3 kV) und Einspeisung über einen Blocktransformator in die 20 kV Hauptschaltanlage

Als Erkenntnis ergibt sich, dass die stromgeführte Betriebsweise unter den vorgegebenen Rahmenbedingungen wirtschaftlicher ist als eine wärmegeführte Betriebsweise. Darüberhinaus ist der Einsatz einer Turbine aufgrund der erforderlichen Modulgröße unwirtschaftlich. Der Einsatz einer Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlage (KWKK-Anlage) ist unter gegebenen Randbedingungen nicht wirtschaftlich bzw. weniger wirtschaftlich als die ausgewählte Präferenzvariante.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für einen zweiten Abgaswärmetauscher

Die zusätzlich nutzbare Energiemenge beim Brennwertbetrieb einer Feuerungsanlage ergibt sich daraus, dass die Kondensationswärme des bei der Verbrennung entstehenden Wasserdampfes als Wärmeenergie genutzt wird. Diese Wärmeenergie entspricht der Kondensationswärme, die freigesetzt wird, wenn der Heizungsrücklauf in die Wärmeerzeugung ausreichend niedrige Temperaturen, die unterhalb der Abgastaupunkttemperatur liegen, besitzt. Die Menge an pro Zeiteinheit kondensierendem Wasser, d.h., die Größe der zusätzlich nutzbaren Energiemenge ist eine Funktion der Abgastemperatur, aber auch des Luftüberschusses des Verbrennungsvorgangs (s. Diagramm 1).

Diagramm 1 zeigt, dass bei einem gasbefeuerten Brennwertkessel mit einem Luftüberschuss von drei Prozent ($\lambda = 1,14$) ab einer Abgastemperatur von zirka 60 – 55°C zusätzlich latente Kondensationswärme aus dem Abgas gewonnen werden kann. Bei einer KWK-Anlage, die mit dem zurzeit dem Stand der Technik entspre-

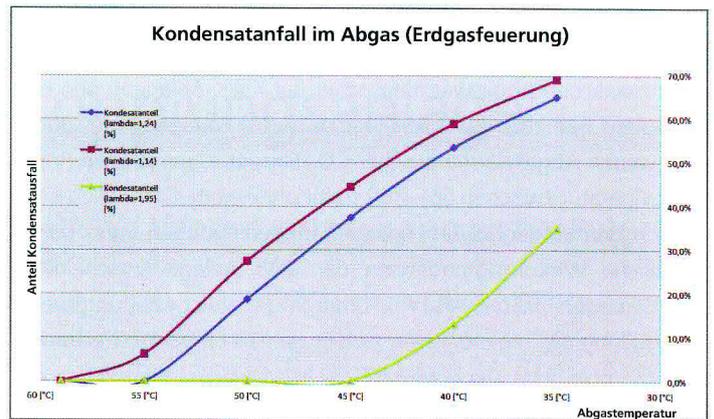


Diagramm 1: Kondensatanfall im Abgas einer Erdgasfeuerungsanlage

chenden LEANOX-Verfahren arbeitet ($\lambda = 1,9$), funktioniert dieser Prozess jedoch erst unterhalb einer Abgastemperatur von ca. 45 °C.

Da sich jedoch die zusätzlich nutzbare Abgasenergie sowohl aus latenter als auch sensibler Wärme zusammensetzt, muss auch letztere bei der Gesamtbetrachtung mit berücksichtigt werden. Bei einer erdgasbefeuerten Kesselanlage überwiegt bei weitem der latente Anteil, bei der KWK-Anlage ist der sensible Anteil aufgrund des hohen Luftüberschusses und der vergleichsweise höheren Abgasaustrittstemperatur gegenüber einem Kessel hinter dem ersten Abgaswärmetauscher nicht zu vernachlässigen. In nachfolgendem Diagramm 2 sind die unterschiedlichen Wärmerückgewinnungspotentiale durch den Einbau eines zusätzlichen Abgaswärmetauschers bei der KWK-Anlage und der Kesselanlage vergleichend gegenübergestellt. Bei dieser Gegenüberstellung ist man davon ausgegangen, dass das KWK-Modul im Vorrangbetrieb vor der Kesselanlage betrieben wird und somit die Vollbenutzungsstunden der KWK-Anlage bei zirka 7.000 Stunden und die der Gesamtkesselanlage bei zirka 1.300 Stunden liegen. Die angenommenen Abgaseintrittstemperaturen in den zusätzlichen Abgaswärmetauschern sind bei beiden Befeuersystemen mit 100 °C abgenommen worden. Die Feuerungsleistung der Kesselanlage liegt bei 45 MW, die Heizleistung der KWK-Anlage ohne den zusätzlichen Abgaswärmetauscher bei 3,1 MW. Berücksichtigt man bei einer Wirtschaftlichkeitsuntersuchung

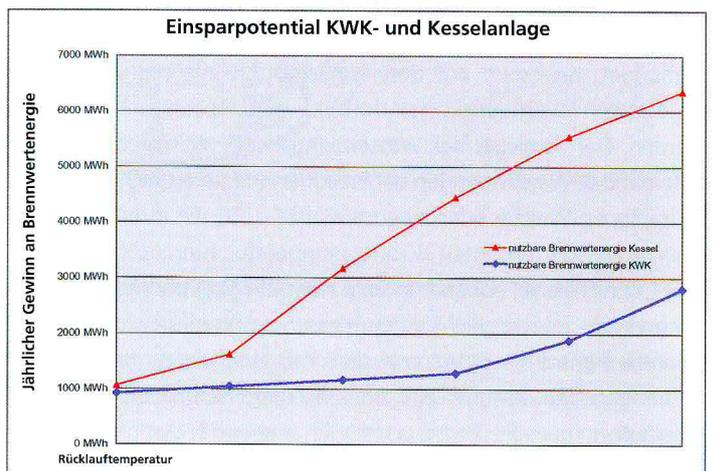
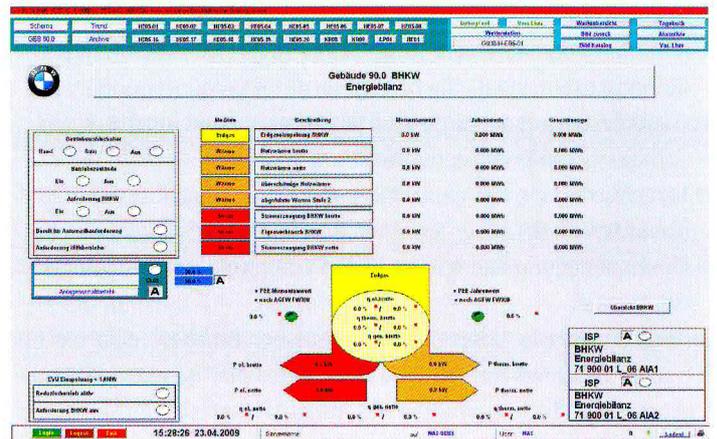


Diagramm 2: Wärmerückgewinnungspotentiale – Abgaswärmetauscher

unter den beschriebenen Randbedingungen sowohl die latenten als auch die sensiblen Wärmeenergiegewinne, ergibt sich eine Amortisation für den zusätzlichen Abgaswärmetauscher der KWK-Anlage in den ersten beiden Betriebsjahren. Auch ist zu berücksichtigen, dass durch den zweiten Abgaswärmetauscher CO₂-Einsparungen je nach Rücklauftemperatur zwischen 50 – 100 t/Jahr ohne weiteres möglich sind. Je nach den vorgegebenen Anlagenrandbedingungen kann dieser zusätzliche Wirkungsgradgewinn der KWK-Anlage entscheidend dazu beitragen, die teilweise für Förderprogramme beziehungsweise zur Erfüllung des regenerativen Anteils gemäß EEWärmeG erforderliche 50-prozentige Deckungsrate der Wärmeenergieerzeugung durch die KWK-Anlage vom Gesamtwärmebedarf zu erreichen.

Realisierungsphase

Aufbauend auf den Empfehlungen der Machbarkeitsstudie ist das in der Studie ausgearbeitete Konzept im Entwurf ausgeplant worden. Die im Rahmen der Entwurfsbearbeitung erstellte Kostenberechnung hat die in der Machbarkeitsstudie angenommenen Investitionskosten bestätigt, sodass nach Abschluss der Entwurfsphase in die Ausführungsplanung, Ausschreibung und Auftragsvergabe übergegangen werden konnte. Die Ausschreibung erfolgte in Einzelgewerken, das KWK-Modul einschließlich der zugehörigen Randkomponenten wie Abgasführung, Kühlwasser- und Heizungspumpen, Frischöl- und Altölwirtschaft, Steuerschränke sowie die komplette Abgasführung mit zweitem Abgaswärmetauscher ist hingegen direkt beim Modulhersteller bestellt worden. Die ausführende Rohrleitungsfirma hat die Verrohrung beziehungsweise den Einbau der beigestellten Komponenten wie Pumpen und Ventile durchgeführt. Die Realisierungsphase ist in einem unter Berücksichtigung der Lieferfristen und der Umbauarbeiten bei laufendem Betrieb anspruchsvollen Terminrahmen umgesetzt worden. Die Entwurfsplanung begann Ende 2007, das BHKW-Modul wurde Ende 2008 geliefert. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass im Rahmen der Realisierungsphase für die KWK-Anlagen neben der Baugenehmigung auch eine Genehmigung nach Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) beantragt werden musste. Die Gesamtinbetriebnahme und Abnahme der Anlage erfolgte zu Beginn des 2. Quartals 2009. Mit Projektabschluss und Schlussrechnungslegung sind die im Kostenbudget, basierend auf den Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen, angesetzten Investitionskosten um zirka zehn Prozent unterschritten worden. Der Abgleich der Wassermengen der Wärmeverbraucherseite mit den Wassermengen der Erzeugerseite findet nicht über eine hydraulische Weiche oder einen Speicher statt, die in der Regel zu einer ungewollt erhöhten Rücklauftemperatur führt, sondern über eine „kontrollierte“ Überströmung zwischen Vor- und Rücklauf mit integriertem in zwei Richtungen messenden Volumenstrommesser. Über die Signale dieses Volumenstrommessgerätes werden die Wassermengen der Erzeugerseite über die Regelventile der Erzeugerkreisläufe denen der Verbraucherseite angepasst. Das System wird permanent so abgeglichen, dass über den Bypass keine Wassermengen strömen. Somit wird neben der Verhinderung einer Rücklauf-



Energiebilanzierung

temperaturerhöhung im umgekehrten Falle auch eine ungewollte Reduzierung der Vorlauftemperatur durch beigemischtetes Rücklaufwasser ausgeschlossen. Somit kann eine maximale Temperaturpreizung im Wärmenetz garantiert werden und folglich die Netzpumpen energieoptimiert betrieben werden. Die gesamte Erweiterung der Wärmeenergieerzeugungsanlage ist auf die vorhandene Gebäudeleittechnik (GLT) aufgeschaltet. Es werden umfangreiche GLT-Bilder erzeugt, die eine permanente Kontrolle und Überwachung der Kraftwärmekopplungsanlage ermöglichen.

Es sind drei automatische Betriebsweisen der KWK-Anlage vorgesehen:

- wärmegeführte Betriebsweise
- stromgeführte Betriebsweise
- strom-/wärmegeführte Betriebsweise über einen frei einstellbaren Teillastbetriebszustand, ab dem die Anlage in einen stromgeführten Betrieb umschaltet.

Die GLT-Bilder bzw. der Anlagenbetrieb zeigten ein umfangreiches Messkonzept, sodass permanent alle wichtigen Betriebsverbrauchsdaten und Energiewerte verfügbar sind und hieraus sowohl der momentane Nachweis der Hochenergieeffizienz gemäß AGFW 307 als auch der über das Jahr kumulierte Nachweis abgerufen werden können. Auch alle wichtigen Energiekennwerte wie Gasverbrauch, Wärmeauskopplung der KWK-Anlage, abgeführte Wärmemengen über die Notkühler, Energiemenge des zweiten Abgaswärmetauschers, erzeugte Strommenge, Eigenverbrauch an Strom sowohl des KWK-Moduls und der zugehörigen MSR-Technik als auch der Nebenkosten wie Be- und Entlüftung können permanent über die GLT überwacht und über Trends dargestellt werden.

Auf einen zusätzlichen Puffer wärmeseitig ist bei der Konzeption der Kraftwärmekopplungsanlage verzichtet worden. Hierdurch sind Investitionskosten seitens der Anlagentechnik eingespart worden sowie zusätzliche Kosten durch den Wegfall des Platzbedarfs für diese Pufferspeicher. Stattdessen wird im Schwachlastbetrieb des KWK-Moduls das gesamte Wärmenetz als Puffer genutzt.

DR.-ING. GERNOT HEIT IST GESCHÄFTSFÜHRENDE GESELLSCHAFTER BEI WPW INGENIEURE GMBH, SAARBRÜCKEN.
 DIPL.-ING. SVEN WAPPLER IST PROJEKTLEITER FÜR DIE ERRICHTUNG DER KRAFTWÄRME-KOPPLUNGS-ANLAGE AM STANDORT LEIPZIG, BMW AG, WERK LEIPZIG, GEBÄUDEPLANUNG UND ENERGIEVERSORGUNG.