

# OPTIMIERUNG DES KRAFTWERKSEINSATZES BEI GEKOPPELTER ERZEUGUNG VON ELEKTRISCHER ENERGIE UND FERNWÄRME

D. Kluck, R. Friedrich, A. Voß  
Institut für Kernenergetik und Energiesysteme  
Universität Stuttgart

## 1 PROBLEMSTELLUNG

Zwei wesentliche Bereiche der Planung in der Elektrizitätswirtschaft sind die Anlagenausbauplanung und die Kraftwerkseinsatzplanung. Es ist daher nicht verwunderlich, daß für diese Bereiche schon seit geraumer Zeit EDV-gestützte Planungshilfen in der Praxis im Einsatz sind.

Für Kraftwerkssysteme mit Kraft-Wärme-Kopplung allerdings waren bisher EDV-gestützte Optimierungsmodelle, die eine Gesamtoptimierung der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung vornehmen und die den Anforderungen der betrieblichen Praxis genügen, nicht verfügbar. Dies hängt auch damit zusammen, daß erst in letzter Zeit ausreichend leistungsfähige Computer auf dem Markt kamen, die eine solche Aufgabe mit vertretbaren Kosten und ausreichend niedriger Rechenzeit bewältigen können. Die Anlageneinsatzplanung bei Systemen mit Kraft-Wärme-Kopplung wurde somit bisher ohne bzw. nur partiell mit EDV-Hilfsmitteln durchgeführt, sodaß die Erfahrung des Lastverteilers über die Qualität und damit die Kosten des Anlageneinsatzes entschieden hat. Dabei weisen jedoch gerade Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung einen hohen Komplexitätsgrad bzw. zahlreiche Schaltungsmöglichkeiten auf. Darüberhinaus muß die Erzeugung verschiedener Produkte (Strom, Fernwärme, Prozeßdampf für verschiedene Netze) optimiert werden, sodaß sich diese Aufgabe entsprechend schwierig gestaltet.

Am Institut für Kernenergetik und Energiesysteme der Universität Stuttgart ist ein computergestütztes Planungsinstrumentarium entwickelt worden, das mit Hilfe mathematischer Ansätze die Anlageneinsatzplanung in diesem Bereich verbessern soll.

Ziel dieser Arbeiten, deren Ergebnisse hier vorgestellt werden, ist es, ein rechnergestütztes Optimierungsmodell zu entwickeln, das es dem Lastverteiler eines Kraftwerkssystems mit Kraft-Wärme-Kopplung ermöglicht, die verfügbaren Anlagen so einzusetzen sowie den Bezug und Verkauf von Strom, Fernwärme und Prozeßdampf so zu gestalten, daß die Betriebskosten über den Betrachtungszeitraum (Tag, Woche) minimal werden. Dabei sind sämtliche technischen und sonstigen Restriktionen zu berücksichtigen.

Neben der kurzfristigen Anlageneinsatzoptimierung sollen auch andere Planungsfragen bearbeitet werden können, z. B. der optimale Zubau von Systemkomponenten wie Kraftwerksblöcke oder Anlagen wie Turbinen und Dampferzeugern, oder der kostenoptimale Einsatz von Reserveanlagen bei Ausfall einer Anlage.

Als Optimierungskriterium für die Anlageneinsatzplanung wird die Minimierung der arbeitsabhängigen Kosten zugrundegelegt, jedoch sind auch andere Optimierungskriterien (z. B. Minimierung der Emissionen) möglich. Es handelt sich um eine kurz- bis mittelfristige Einsatzoptimierung, die als Betrachtungszeitraum einen Tag oder eine Woche umfaßt.

## 2 ANFORDERUNGEN AN EIN PLANUNGSINSTRUMENT

Die Anforderungen an ein Programmpaket zur Kraftwerkseinsatzoptimierung leiten sich zum einen aus der Komplexität der Kraftwerkssysteme mit Kraft-Wärme-Kopplung und zum anderen aus den Randbedingungen des Einsatzes bei den Versorgungsunternehmen, insbesondere bei kleinen und mittleren Energieunternehmen, sowie bei Industrieunternehmen, ab. Ausgehend von diesen Anforderungen wurde ein Planungsmodell entwickelt, das durch folgende Merkmale charakterisiert ist:

- Die Betriebskosten der Strom-, Fernwärme- und Prozeßdampferzeugung werden simultan minimiert.

- Durch einen systemtechnischen Modellansatz, der als gemeinsame Kopplung die Dampfmassenströme betrachtet, können Kraftwerkssysteme (Block, Sammelschiene) mit beliebigem Detaillierungsgrad nachgebildet werden. Das bestehende Kraftwerkssystem wird als Wärmeschaltbild abgebildet. Somit entsteht ein Netz aus 'Knoten' (Anlagen wie Kessel, Turbinen) und 'Strängen' (Verbindungen der einzelnen Anlagen), das entsprechend der Kirchhoff'schen Knotengleichungen beschrieben wird.
- Es werden die Daten, die im Betrieb vorliegen (Dampfverbrauchsdiagramm, Kesselkennlinien) direkt verwendet, ohne daß neue Entscheidungsdiagramme oder Tabellen generiert werden müssen.
- Nicht nur die Zusammenhänge des Kraftwerksparks, sondern auch die Übergabestellen, insbesondere in das Fernwärmenetz mit seinen Wärmetauschern, werden abgebildet. Dadurch werden auch Rückwirkungen des Netzes auf das Kraftwerkssystem bei der Optimierung erfaßt.
- Die Optimierung erfolgt nicht für jeden Zeitschritt getrennt, sondern über den gesamten Betrachtungszeitraum. Laständerungsgeschwindigkeiten und Mengenbedingungen werden berücksichtigt.
- Der Betrachtungszeitraum für die Optimierung kann beliebig in 1 bis 60 Zeitschritte aufgeteilt werden, ohne daß Veränderungen in den begleitenden Programmen (z.B. dem Matrixgenerator) vorgenommen werden müssen.
- Das gesamte EDV-Programmsystem ist modulartig aufgebaut. Dadurch können einzelne Progamnteile schnell geändert werden oder durch leistungsfähigere ersetzt werden.

### 3 BESCHREIBUNG DES MODELLANSATZES

Der hier gewählte Modellansatz betrachtet das Kraftwerkssystem ganzheitlich. Ein allgemeines Kraftwerkssystem, wie in Abbildung 1 dargestellt, besteht aus verschiedenen Anlagen (Heizwerke, Kraftwerke, Heizkraftwerke, Kernkraftwerke), Speichern, Wärmetauschern usw., darüberhinaus sind Bezugs- bzw. Verkaufsverträge zu berücksichtigen. Strom und Wärme können dabei durch unterschiedliche Brennstoffe erzeugt werden und sie werden in verschiedene elektrische und thermische Netze eingespeist.

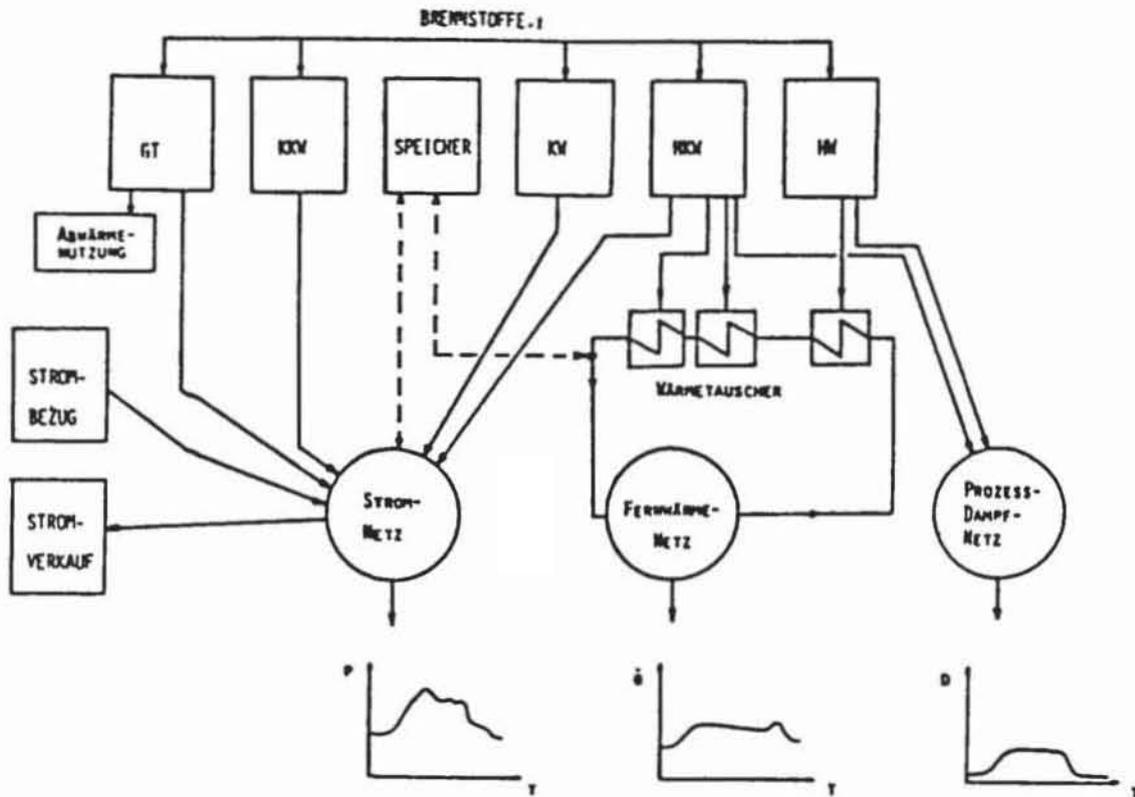


Abb. 1: Kraftwerkssystem mit Kraft-Wärme-Kopplung

Ein Kraftwerk als Teil des Kraftwerkssystems wird durch einzelne Systemelemente dargestellt, z. B. durch

- Dampferzeuger
- Turbinen (Entnahme-, Gegendruck-)
- Sammelschiene
- Reduzierstation
- Wärmetauscher als Bindeglied zwischen Kraftwerk und Fernwärmenetz

Abb. 2 zeigt als Beispiel die Abbildung eines Heizkraftwerkes durch diese Systemelemente sowie deren Verbindungen.

Die Systemelemente werden im Modell durch ihr physikalisch-technisches Verhalten (z. B. durch Kennlinien, Dampfverbräuche usw.) beschrieben. Ihre mathematische Abbildung erfolgt zunächst

unabhängig vom Planungshorizont und der mit dem Programm zu beantwortenden Fragestellung in Form linearer Gleichungen. Die Linearisierung ermöglicht den Einsatz leistungsfähiger Optimierungsalgorithmen und erzwingt eine vereinfachte aber schematisierte Darstellung der vielen Systemelemente eines Kraftwerkssystems. Nicht lineare Zusammenhänge werden durch stückweise Linearisierung ebenfalls berücksichtigt.

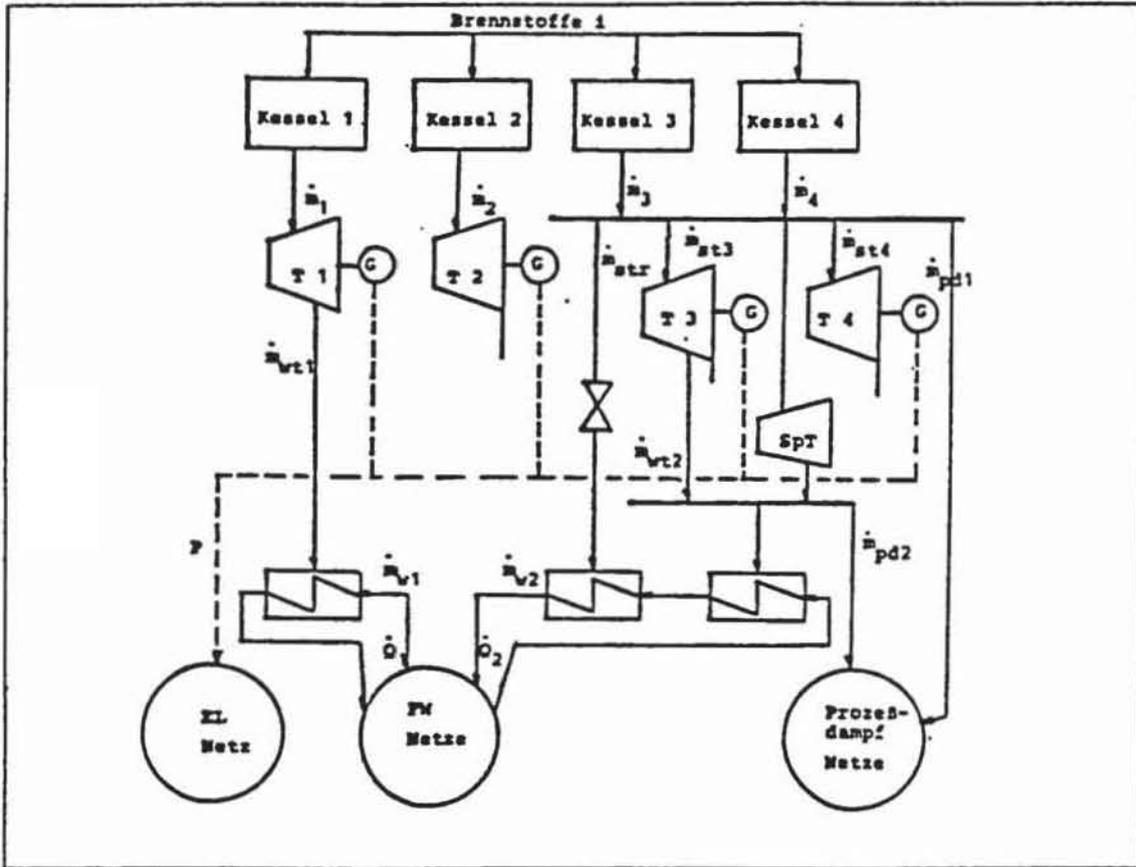


Abb. 2: Konventionelles Kraftwerk

Als Beispiel zeigt Abb. 3 das lineare Gleichungssystem zur Beschreibung der Wärmeauskopplung in das Fernwärmenetz.

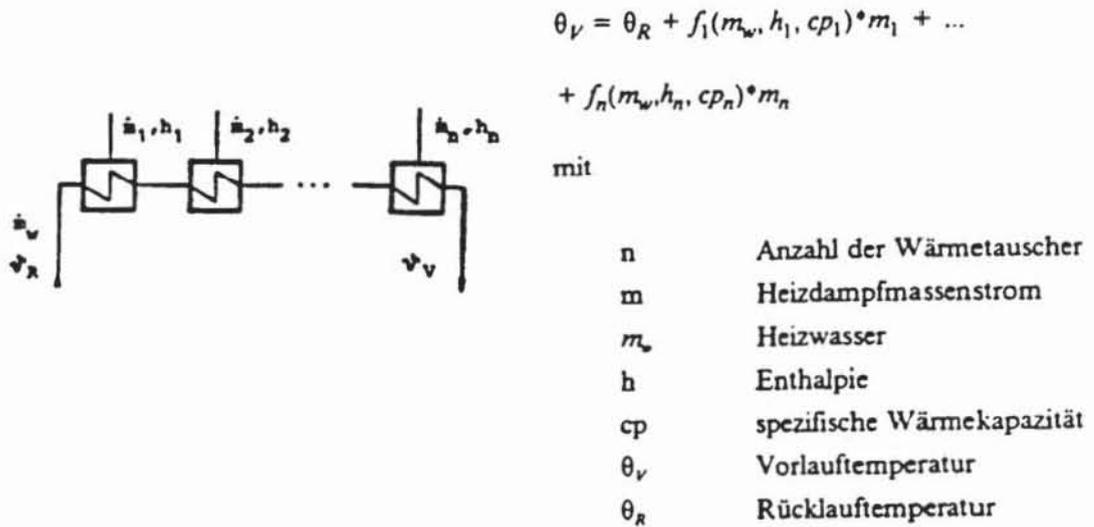


Abb. 3: Mathematische Beschreibung einer Wärmetauscherkaskade.

Ist das Kraftwerkssystem mit seinen Elementen durch ein solches Modell beschrieben, so können die Optimierungsrechnungen erfolgen. Dazu werden, unter Beachtung der Randbedingungen, die Variablenwerte berechnet, bei denen eine vorzugebende Zielfunktion, die die Betriebskosten beschreibt, minimal wird.

Eine solche Zielfunktion zeigt Abb. 4. Berücksichtigt sind u.a. die Brennstoffkosten der Dampferzeugung in den Kesseln, die Bezugskosten für elektrische Energie, die Bezugskosten für thermische Energie, die Anfahrkosten für die Dampferzeuger und Turbinen und die Kosten für den laufenden Betrieb (Laständerungen, Verschleiß) einzelner Systemelemente, insbesondere bei Dampferzeugern und Turbinen.

Die Berücksichtigung von Anfahrkosten ist nur durch einen gemischt-ganzzahligen Ansatz möglich. Dies führt bei der Bestimmung des Optimums zu einem erhöhten Rechenaufwand, der gegen den Gewinn an Genauigkeit abgewogen werden muß.

$$KG = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N1} Q_{j,t}(m_F) + \sum_{j=1}^{N2} P_{j,t} + \sum_{j=1}^{N3} Q_{w,j,t} + \sum_{j=1}^{N4} K_{Anf,j,t} * S_{j,t} + \sum_{j=1}^{N5} K_{Tu,j,t}(m_d) + \sum_{j=1}^{N6} K_{Ke,j,t}(m_F)$$

mit

KG	Betriebskosten über den gesamten Zeithorizont $t = 1$ bis $T$
$Q_j$	Brennstoffkosten je Kessel $j$
$P_j$	Bezugskosten der elektrischen Energie
$Q_w$	Bezugskosten für Wärme
$K_{Anf}$	Anfahrkosten je Kessel, Turbine $j$
$K_{Tu}$	Kosten für den Betrieb der Turbine $j$ als Funktion der Aktivität
$K_{Ke}$	Kosten für den Betrieb des Kessels $j$ als Funktion der Aktivität
$S_i$	Schaltvariable, $S \in \{0,1\}$
$m_D$	Dampfdurchsatz der Turbine $j$
$m_F$	Frischdampferzeugung
N	Anzahl

Abb. 4: Die Zielfunktion

#### 4 ERGEBNISSE

Mit dem zuvor vorgestellten Modellansatz wurde das Kraftwerkssystem der Technischen Werke der Stadt Stuttgart AG abgebildet und verschiedene Optimierungsrechnungen durchgeführt. Der abgebildete Kraftwerkspark verfügt über 2 konventionelle Kraftwerke (darunter ein Sammelschienenkraftwerk) mit insgesamt 13 Kesseln und 10 Turbinen, mehreren Beteiligungen an Kernkraftwerken, Strombezüge und Speichieranlagen. Dieses Kraftwerkssystem versorgt ein Stromnetz, 6 Fernwärmenetze und 3 Prozessdampfnetze. Als Eingangsinformationen für die Optimierung dienen die Verfügbarkeit der Anlagen, Brennstoffpreise, Bezugsbedingungen sowie die Tagesganglinien der verschiedenen Netze in Schrittweiten von einer Stunde. Das Optimierungsproblem wird in Form einer Entscheidungsmatrix mit einem Umfang von 2000 mal 2000 Feldern aufgebaut und gelöst. Der detaillierte Modellansatz ermöglicht eine umfangreiche Lösungsermittlung unter Einhaltung der wichtigsten technischen Restriktionen. Als Ergebnis erhält man den Fahrplan der einzelnen Systemelemente zur kostenminimalen Versorgung der elektrischen und thermischen Netze.

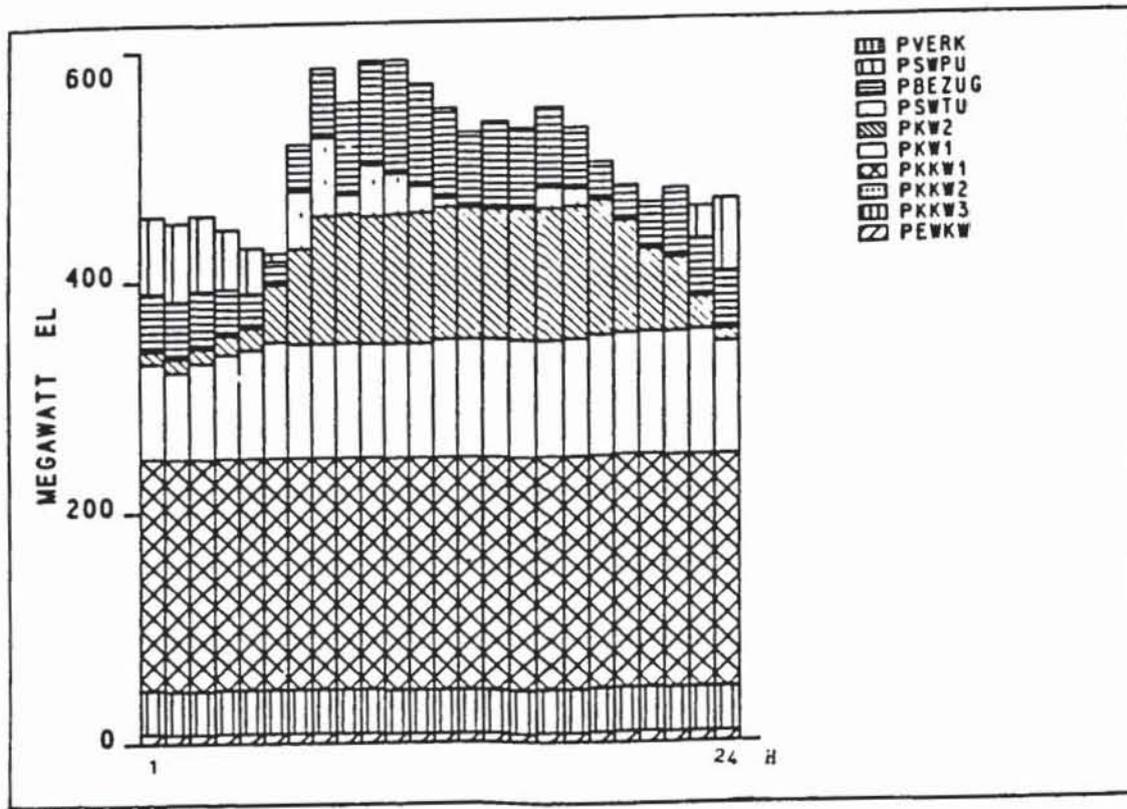


Abb. 5: Elektrische Lastdeckung nach Erzeugungsort (Kraftwerk bzw. Bezug)

In Abbildung 5 ist beispielhaft die kostenoptimale Deckung der elektrischen Last für einen ausgewählten Tag durch die verfügbaren Kraftwerke und durch Inanspruchnahme eines Bezugsvertrages dargestellt. Die Kernkraftwerke (PKKW1, PKKW3) und die Laufwasserkraftwerke (PEWKW) werden dabei über den Tag konstant eingesetzt, während die Leistung der konventionellen Kraftwerke (PKW1, PKW2) entsprechend dem Verlauf der Tagesganglinie geregelt wird. Wie bei einer optimalen Fahrweise zu erwarten, füllt das Pumpspeicherwerk in den Nachtstunden das Lasttal durch Pumpbetrieb (PSWPU) auf und fährt tagsüber die Stromspitzen (PSWTU) ab. Dargestellt ist zudem der Strombezug (PBEZUG), ein Stromverkauf (PVERK) findet nicht statt.

Die Fahrweise des konventionellen Kraftwerks (PKW1) wird in Abbildung 6 sichtbar. Von diesem Kraftwerk aus werden drei Fernwärmenetze gespeist. Hier wird die Einsatzweise der Dampferzeuger zur Deckung der Nachfrage an elektrischer Energie (Anteil an Gesamtdeckung) und der thermischen Energie (Wärmeauskopplung für drei Fernwärmenetze)sichtbar. Dabei werden die Kessel 3, 5 und 7

Strich gefahren, während der Kessel 6 den Regelbetrieb übernimmt.

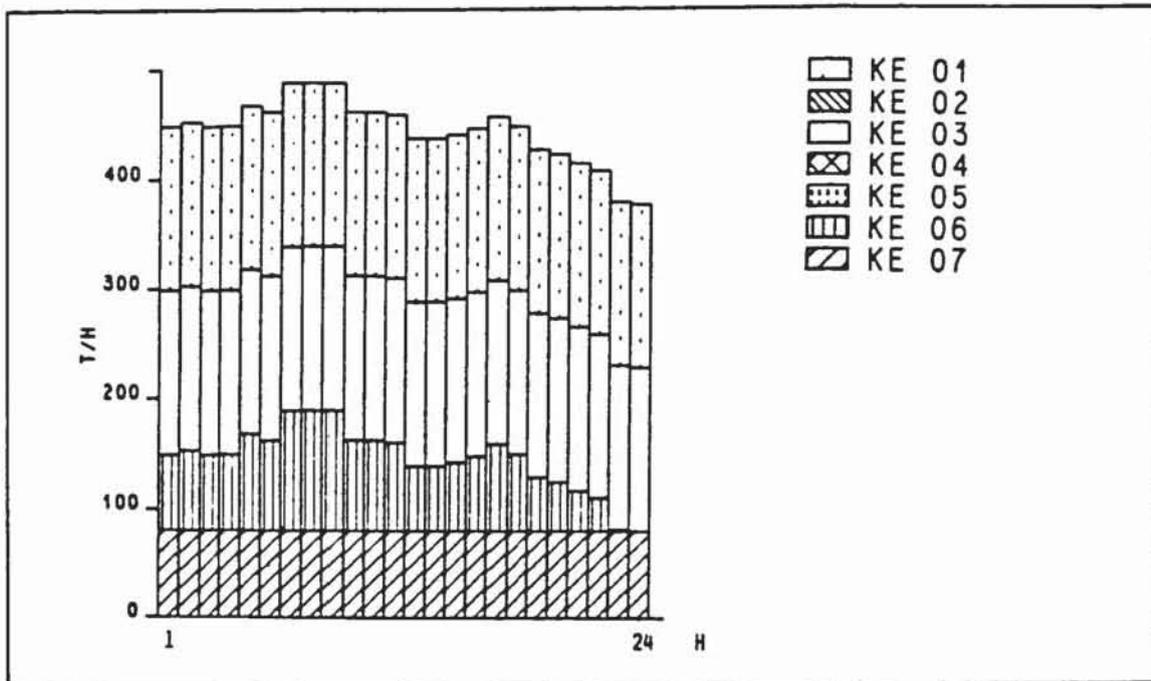


Abb. 6: Frischdampferzeugung im Kraftwerk PKW1 (KE=Kessel)

Die optimale Wärmeauskopplung in eines der drei Fernwärmenetze wird in Abbildung 7 dargestellt. Zur Wärmeauskopplung stehen 4 Wärmetauscher zur Verfügung, von denen 2 betrieben werden, um den Wärmebedarf zu decken. Der Wärmetauscher (WT) 4/5 bar wird mit Entnahmedampf beaufschlagt, der andere Wärmetauscher entnimmt Heizdampf aus einer Sammelschiene (0,9 bar). In den Tagstunden, in denen die Stromerzeugung höher ist, kann mehr Entnahmedampf wirtschaftlich bereitgestellt werden und somit der WT 4/5 bar versorgt werden. In den Nachtstunden nimmt dieser WT die Leistung zurück, da durch den verminderten Strombedarf in der Nacht auch die Entnahmedampfmengen zurückgehen. Daher muß dann der Heizdampf von der 0,9 bar-Schiene verstärkt eingesetzt werden. Der Dampf auf dieser Sammelschiene kann verschiedene Quellen haben. Der insgesamt ausgekoppelte Heizdampf, gewichtet mit der Enthalpie des Dampfes, gibt die Lastganglinie für dieses Heiznetz wieder.

Die berechneten Ergebnisse wurden für verschiedene Tage mit der tatsächlichen, ohne Nutzung dieses Instrumentariums ermittelten Fahrweise der Anlagen verglichen. Dabei zeigte sich, daß Einsparungen im Prozentbereich durch ein solches Instrument möglich sind.

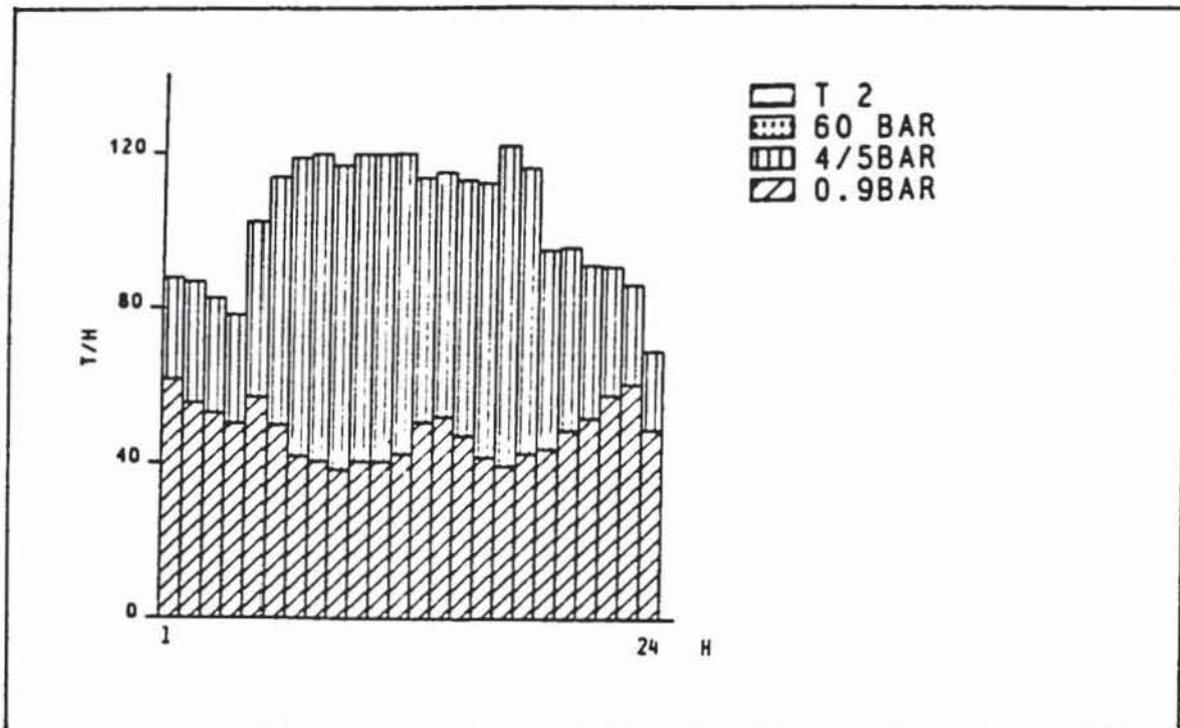


Abb. 7: Wärmeauskopplung in ein Heiznetz.

Die Ergebnisse der Testphase haben gezeigt, daß der Anlageneinsatz komplexer Kraftwerkssysteme, insbesondere mit Kraft-Wärme-Kopplung, mit dem entwickelten Ansatz praxisgerecht optimiert werden kann.

Weiterentwicklungen des Instrumentariums, die derzeit durchgeführt werden, betreffen die Behandlung der Prognoseunsicherheit bei den Lastganglinien, die als Eingangsgröße für die Optimierung von großer Bedeutung sind. Desweiteren wird eine Erweiterung des Planungszeitraums bis auf 1 Jahr entwickelt.

Dabei wird ein Jahr durch charakteristische Tage, die entsprechend ihrer Anzahl gewichtet werden, abgebildet. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Erstellung einer umfangreichen Bedieneroberfläche, um die Akzeptanz zur Einführung computergestützter Planungsinstrumente zu verbessern. Darüberhinaus wird die Erhöhung des Detaillierungsgrades für bestimmte Systemelemente, z. B. Dampferzeuger, angestrebt, um auch Kombiblöcke entsprechend ihrer betrieblichen Einsatzweise abbilden zu können.