

Fernwärme aus der Riesenröhre

Von Gerhard Eisenhauer, Leimen *)

Ausgangspunkt für den vom Verfasser beschriebenen Fernwärmehöhre ist das 1985 vom Münchener Stadtrat beschlossene Energie-Konzept. Dieses sieht unter anderem den Ausbau der Fernwärmeleistung von rd. 2000 MW auf etwa 3000 MW bis zum Jahre 2005, die Verbesserung der Emissionssituation in der Innenstadt sowie die umweltfreundliche Verstromung von Kohle, Müll und Gas vor. Von den beiden herausragenden Eckpfeilern zur Umsetzung des Energie-Konzeptes dem neuen Heizkraftwerk München Nord und dem Fernwärmeverbindungstunnel wird nachstehend über Planung und Bau des letzteren berichtet.

Summary of the report:

District Heating from the Giant Pipe

At the end of October 1991, a district heating Compound system was put into operation. The dimensions of this system can only be described in superlatives. It is the longest and greatest part of the compound system which is of great importance for the Munich energy concept published in 1985. The 6500 m long tunnel pipe underruns not only the English Garden and the Kleinhesseloher See (a small lake inside the English Garden), but also the Isar-River and the Isar-Channel, allowing a combination between the following three points:

Heizkraftwerk München Nord, which has recently been constructed and which is equipped with the most modern facilities, the district heating supply node downtown and the heating network Freimann (i.e. city section of Munich).

Two large steam pipelines DN 1100 are necessary to transport 550 MW towards downtown Munich. Additionally, there are two hot-water lines DN 500, that transport 250 MW to the city section of Freimann. Furthermore, several pipes for the exchange of condensate and for collection had to be laid.

Since there was no route for an open trench laying which would bear these and several other pipelines, trenchless laying beneath the »memorial to nature«, i.e. the English Garden, was the only possibility which was environment friendly.

This implied further characteristics such as large expansions with Compensation distances of up to 1200 m and large sections between condensate emptying. The following list gives a summary of the most important masses which were installed:

50 km pipelines
350 t of steel for supports and pipe bearings
1250 welds DN 1100/900
6500 welds in total
80000 m² heat insulation material
160 km cable.

Construction costs:

tunnel and shaft construction 120 mio DM
technical equipment 75 mio DM.

1 Allgemeines

Ende Oktober 1991 wurde in München eine Fernwärme-Verbundleitung in Betrieb genommen, über deren Ausmaß nur in Superlativen berichtet werden kann. Sie ist der längste und größte Teilabschnitt eines Verbundnetzes und im Münchner Energiekonzept von 1985 von zentraler Bedeutung.

Die 6500 m lange Tunnelröhre, die nicht nur den Englischen Garten und den Kleinhesseloher See, sondern auch die Isar und den Isarkanal unterquert, ermög-

licht den Verbund zwischen dem neuerrichteten und mit modernster Technik ausgestatteten Heizkraftwerk München Nord und dem Fernwärme-Versorgungsknoten in der Innenstadt sowie dem Heiznetz Freimann.

Zwei große Dampfleitungen DN 1100 sind nötig, um 550 MW in das Stadtzentrum zu transportieren. Dazu kommen zwei Heißwasserleitungen DN 500, die 200 MW zum Stadtteil Freimann befördern. Weiterhin sind mehrere Kondensataustausch- und Sammelleitungen mitzuführen.

Zur Unterbringung dieser und weiterer Leitungen fand sich keine Trasse für eine Verlegung im offenen Graben. So blieb aus Umweltgründen nur die grabenlose Verlegung unter dem »Naturdenkmal« Englischer Garten. Daraus resultierten weitere Besonderheiten: Sehr große Dehnungen mit Kompensationsabständen von teilweise bis zu 1200 m und großen Abschnitten zwischen den Kondensatentleerungen.

Die nachstehende Auflistung gibt einen Überblick über die eingebauten Massen:

50 km Rohrleitungen
350 t Stahl für Stützen und Rohrlager
1200 Schweißnähte DN 1100/900
6500 Schweißnähte insgesamt
80000 m² Wärmedämmmaterial
160 km Kabel.

Kosten der Baumaßnahme:

Tunnel- und Schachtbau 120 Mio DM
Technische Ausrüstung 75 Mio DM.

2 Münchner Energiekonzept

Die Stadtwerke München versorgen als geschlossenes Verbundunternehmen die Landeshauptstadt mit allen leitungsgebundenen Energien, daneben betreiben sie die Verkehrsbetriebe und die Bäder.

Der Strombedarf von 6454 GWh (1991) wird zu 69 % aus eigener Erzeugung und zu 31 % über Fremdbezug gedeckt. Die Netzhöchstlast betrug 1991 1176 MW. Mit Fernwärme versorgen die Stadtwerke rd. 85 km² Wohn- und Gewerbegebiete, das sind 28 % des gesamten Stadtgebietes überhaupt. Der Anschlußwert liegt bei rd. 2500 MW. Das gesamte Fernwärmegebiet ist in vier Heizwassernetze und ein historisch gewachsenes Dampfnetz aufgeteilt.

1991 wurden aus sechs Heizkraft- bzw. sieben Heizwerken 4555 GWh Fernwärme geliefert bei einer Höchstlast von 1519 MW. In früheren Jahren war es möglich, 92 % der Jahresarbeit in Kraft-Wärme-Kopplung zu erzeugen, ein Wert, der ziemlich nahe an das berechnete Optimum heranreichte. In den letzten

*) Dipl.-Ing. G. Eisenhauer ist Geschäftsführer der GEF Ingenieur Gesellschaft für Energietechnik und Fernwärme mbH, Leimen.

Kapitel 2 wurde freundlicherweise von Dr.-Ing. Siegmund Götzmann, Abteilungsleiter des Fernwärmebereichs der Stadtwerke München, beigezeichnet.

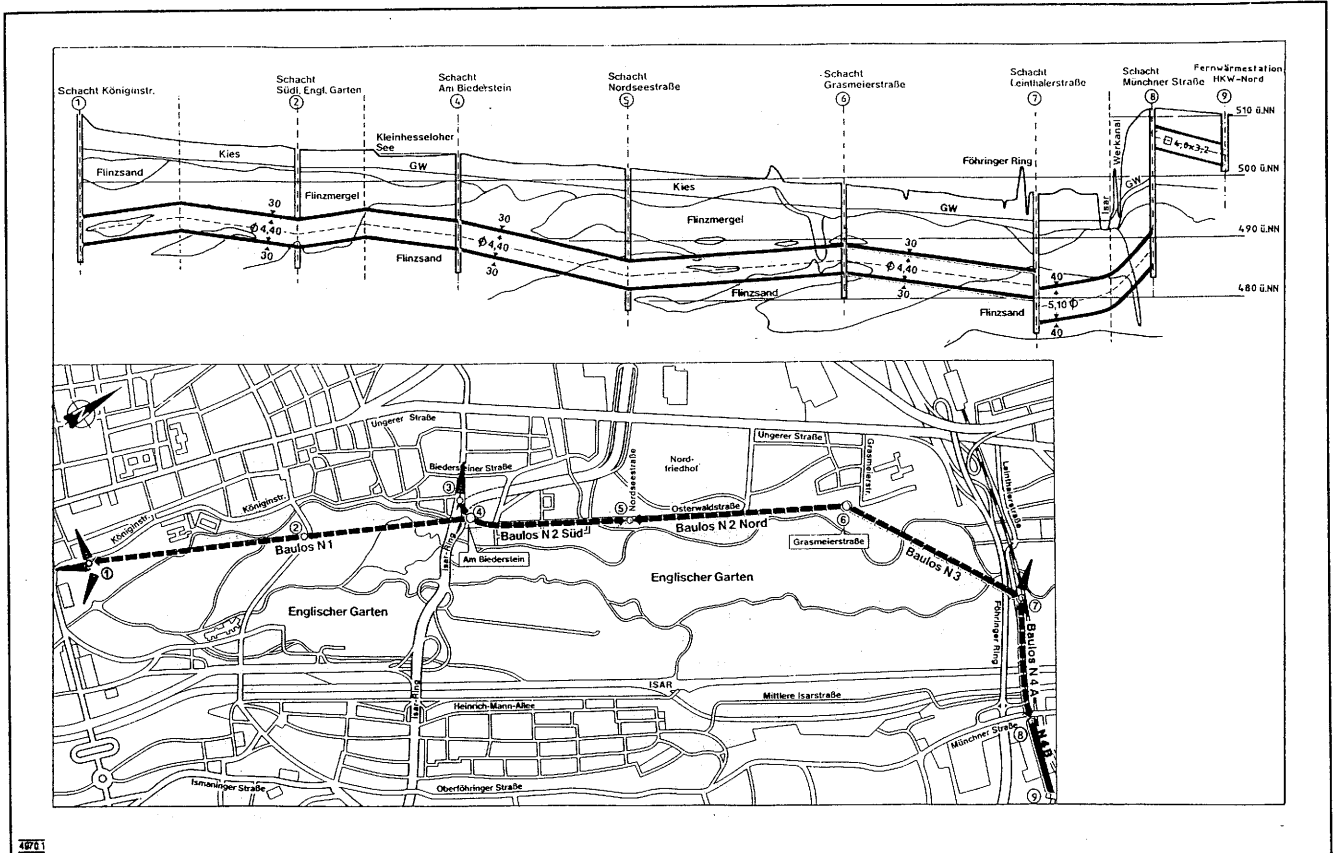


Bild 1. Lage und geologischer Längsschnitt der Fernwärme-Verbundleitung
 1 Zielschacht »Königinstraße«
 2 Zwischenschacht »Südlicher Englischer Garten«
 3 Fördererschacht »Dietlindenstraße«
 4 Startschacht »Am Biederstein«
 5 Zielschacht »Nordseestraße«
 6 Startschacht »Grasmeierstraße«
 7 Start- und Zielschacht »Leinthalstraße«
 8 Zielschacht »Münchner Straße«
 9 Fernwärmestation HKW-Nord
 abgehende Pfeile = Verteilleitungen

Figure 1. Location and geological longitudinal section of the interconnected district heating
 1 Target shaft »Königinstrasse«
 2 Interim shaft »Südlicher Englischer Garten«
 3 Hauling shaft »Dietlindenstrasse«
 4 Start shaft »Am Biederstein«
 5 Target shaft »Nordseestrasse«
 6 Start shaft »Grasmeierstrasse«
 7 Start and target shaft »Leinthalstrasse«
 8 Target shaft »Münchner Strasse«
 9 District heat station CGP Nord
 arrows indicate distribution pipelines

Jahren wurde dieses Optimum durch äußere Umstände, vor allem durch zahlreiche aufgezwungene Änderungen im Kraft- und Heizwerkspark, nicht mehr erreicht. Nach dem Ausbau und Abschluß der unterschiedlichen Ertüchtigungen im Kraftwerkspark sowie der Fertigstellung des Verbundkonzeptes wird dann ein neu einzustellendes Optimum wieder eine Zielvorgabe der Strom- und Fernwärmeerzeugung sein.

Das im Mai 1985 vom Stadtrat beschlossene Energiekonzept enthält im wesentlichen folgende Eckdaten:

-Ausbau der Fernwärmeversorgung von 2000 MW bis zum Jahre 2005 auf 3000 MW,

-Umsetzung der gemäß 13. Bundesimmissionsschutzverordnung vorgegebenen Abgasrichtlinien,
 -verstärkter Einsatz der Kohle aufgrund der Kohleabnahmeverpflichtungen,
 -dadurch bedingt der Ausbau des Heizkraftwerkes Nord als neuen Fernwärmeerzeugungsschwerpunkt neben

dem auf die Abgasrichtlinien umzurüstenden HKW-Süd,

-Ausbau der Müllverbrennungskapazität zur thermischen Entsorgung des Haus- und Gewerbemülls der Stadt München sowie der umliegenden Gemeinden in einer Größenordnung von rd. 650000 t/a sowie der sicheren Entsorgung von Klärschlamm und Klinikmüll,

-Reduzierung der Schadstoffe in den umzurüstenden Kohle- und Müllblöcken auf ein bisher nicht gekanntes Minimum, um die Akzeptanz in der Bevölkerung für die immer noch stadtnah gelegenen Haupterzeugungsschwerpunkte zu erreichen,

-letztendlich der Bau von Fernwärmeverbundleitungen von den neu errichteten oder erweiterten Erzeugungsschwerpunkten zu den Verbrauchernetzen, um auch in Zukunft eine optimale Fernwärmeerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplung zu erreichen.

Der Ausbau des HKW-Nord bzw. die Nachrüstung der Rauchgasreinigungsanlage im HKW-Süd wurden bereits in den Jahren 1987 bis 1991 abgeschlossen.

3 Anforderungen und Betriebsdaten

Bild 1 gibt in Lage und Höhe den Trassenverlauf der Fernwärmeverbundleitung zwischen dem Heizkraftwerk Nord und dem Versorgungsknotenpunkt zur Innenstadt am Schacht 1, Königinstraße, wieder. Außerdem ist aus diesem Bild die Bauloseinteilung und die

Anordnung der Schachtbauwerke zu entnehmen. Entsprechend der Aufgabenstellung waren

- maximal 550 MW Dampf zur Innenstadt zu transportieren,
- maximal 200 MW Heißwasser vom HKW Nord bis zum Schacht 7 zu befördern (von dort wird der weitere Transport bis zum Heiznetz Freimann in einer gesonderten Trasse vorgenommen),
- der Rücktransport der in der Innenstadt anfallenden Kondensatmengen zum HKW Nord bzw. zur Verteilung zu den einzelnen Einspeisestellen sicherzustellen sowie

-für die übliche Kondensatableitung und Entwässerung zu sorgen.

Entsprechend den vorstehend geschilderten Verteilungsaufgaben wurden die Rohrleitungen und die Rohrdurchmesser zugeordnet. *Tafel 1* gibt darüber Auskunft.

Die Auslegungsdaten für die einzelnen Mediumrohrleitungen sind in *Tafel 2* wiedergegeben.

4 Trassenfindung und Genehmigung

Die Aufgabe, für das zuvor umrissene Leitungspaket eine Trasse zu finden, schien zunächst unlösbar.

Ein Glücksfall war der Englische Garten, der sich vom Endpunkt am Schacht 1 bis fast zum HKW Nord erstreckt.

Zwar wurden zunächst eine Reihe von Trassenvarianten, fächerförmig vom HKW Nord ausgehend, untersucht, letztlich war jedoch aus Gründen großer wirtschaftlicher und technischer Aufwendungen und mangelnder Genehmigungsfähigkeit für andere Trassen nur eine Verbindung durch den Englischen Garten als realistisch anzusehen. Da der Englische Garten eine weltweit bekannte Parkanlage ist, die nicht nur von den Münchnern, sondern auch von vielen Touristen besucht wird, war eine offene Bauweise oder eine oberirdische Verlegung unvorstellbar. Andererseits war durch den Eigentümer, den Freistaat Bayern, vertreten durch die Bayerische Schlösser- und Seenverwaltung, erklärt worden, daß einer unterirdischen Verlegung einschließlich der notwendigen Schachtbauwerke zugestimmt werden könnte. Voraussetzung war jedoch, daß durch Zufahrten zu den Vortriebs- bzw. Einbringöffnungen (Schachtbauwerke)

Tafel 1. Rohrdurchmesser
Table 1. Pipe diameter

Nr. in Bild 2	Leitungen	Baulos N 1 DN	Baulos N 2 + N 3 DN	Baulos N 4 DN
1	Dampf	1 x 1100 1 x 900	2 x 1100	2 x 1100
2	Heißwasser	-	-	2 x 500
3	Kondensat-Austausch	3 x 250	3 x 300	3 x 300
4	Kondensat-Sammel	-	2 x 65	-

Tafel 2. Auslegungsdaten
Table 2. Design specifications

		Mediumrohrleitungen			
		Dampf	Heißwasser	Sammelkondensat	Austauschkondensat
Temperatur	°C	200	200	120	70
Betriebsdruck	bar Ü	8	32	8	12
Nennndruck	PN	16	40	10	16
Dehnungswert	mm/m	2,5	2,5	1,35	0,8

und damit verbundenen Baustelleneinrichtungsplätzen so gut wie keine Bereiche des Englischen Gartens in Anspruch genommen werden. Unter Berücksichtigung vorstehender Forderungen entwickelte sich sodann die endgültige Trassenführung wie sie aus *Bild 1* zu entnehmen ist.

Nach langwierigem Verlauf der Genehmigungsphase konnte im Herbst 1988 mit den konkreten Planungen begonnen werden.

5 Planungskonzept

5.1 Technische Ausrüstung

Die GEF Ingenieurgesellschaft für Energietechnik und Fernwärme mbH aus Leimen, verantwortlich für die Planung und Projektleitung der gesamten Technischen Ausrüstung, hatte sich zur Aufgabe gesetzt, aus den unterschiedlichen Anforderungen jeweils eine optimale wirtschaftliche Lösung zu erarbeiten.

5.1.1 Bauwerksauslegung und Sicherheitsaspekte

Die Größe der Tunnelquerschnitte wird in erster Linie durch die Bestückung mit den im Kapitel 3 aufgeführten Mediumrohrleitungen bestimmt. Weitere Anforderungen an den Platzbedarf kommen hinzu. So z.B. der freie Durchgangsquerschnitt, Freiraum für Rohrtransporte im Reparaturfall, Raum für eine eventuelle künftige Unterbringung von Rohrleitungen und nicht zuletzt für Kabelpools.

Bild 2 zeigt die zwei Tunnelquerschnitte und den Beton-U-Kanal, wie sie

in den einzelnen Abschnitten verwirklicht wurden.

Die erforderliche Größe der Schachtbauwerke ergibt sich einerseits aus dem für die Unterbringung der Rohre, Armaturen, Kompensatoren, Kondensatbehälter und -pumpen, Lüftungsanlagen, Schaltschränke usw. notwendigen Raum und andererseits aus dem Platzbedarf für das Einbringen der Vortriebsmaschine sowie der sonstigen Vortriebs- und Abbaueinrichtungen. Die Tiefe der Schachtbauwerke richtet sich nach der gewählten Trassentiefe.

Besondere Beachtung war auch der Einhaltung von Sicherheitsregeln bei der Festlegung der Tunnel- und Schachtgrößen zu schenken. In mehreren Gesprächen mit der Berufsgenossenschaft, dem Gewerbeaufsichtsamt und der Branddirektion unter Einbeziehung des Sicherheitsauftragten der Stadtwerke München wurden folgende Maßnahmen festgelegt:

a) Die Länge der Tunnelstrecken zwischen zwei Schachtbauwerken sollte 1200 m nicht wesentlich überschreiten, sodaß die längsten Fluchtwege bis zu einem Notausstieg jeweils maximal 600 m betragen. Die Rettungswege und Fluchtrichtungen werden mit einem nachleuchtenden Leitliniensystem gekennzeichnet

b) Von Hand zu führende bewegliche Transportwagen sollten als Rettungs- und als Materialwagen eingesetzt werden. Sie

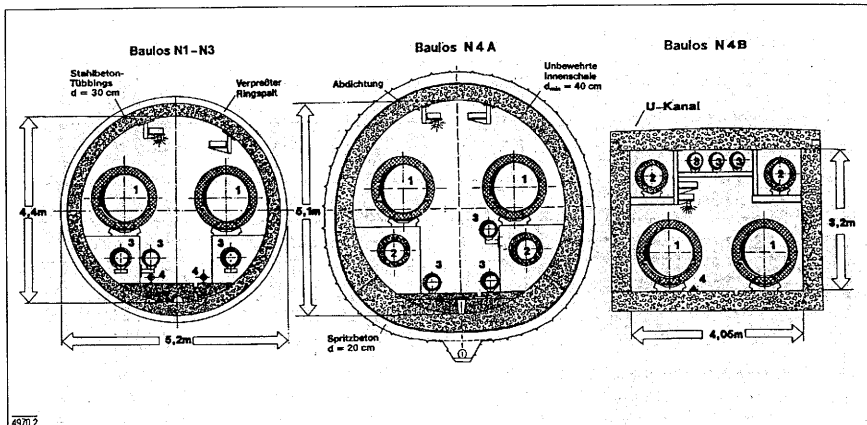


Bild 2. Querschnitte

dürfen nicht breiter als 500 mm sein und werden seitlich durch eine außerhalb des Gehbereichs angeordnete Rinne geführt. Diese Rinne dient gleichzeitig als Wasserablauftrinne.

c) In allen Schächten ist der Treppenaufgang vom übrigen Schachtbereich durch Blechverkleidung und selbstschließende Türen dampfdicht abzutrennen.

d) Die Schachtöffnungen sind so zu bemessen, daß neben der Personaleinstiegsöffnung eine genügend große Schachtdeckung vorhanden ist, über die Rettungstragen transportiert werden können.

Beide Schachtdeckungen müssen mit federmechanischer Öffnungshilfe ausgestattet sein und sowohl von außen als auch von innen geöffnet werden können.

e) Hinsichtlich der Belüftung der Tunnel und Schächte war ein täglicher Luftwechsel gefordert, der durch entsprechende Zuschaltung von Lüftungsgeräten bei Arbeiten im Tunnel auf einen Luftwechsel innerhalb von zwei Stunden erhöht werden sollte.

f) Die Umgebungstemperaturen im Tunnel und in den Schachtbauwerken soll auf maximal 45 °C begrenzt werden.

g) Im Tunnelbereich sind Leuchtstofflampen so anzuordnen, daß über dem Gang in 0,2 m Höhe eine Nennbeleuchtungsstärke von 20 lx erreicht wird.

5.1.2 Belüftung

Entsprechend der Forderung des Sicherheitsbeauftragten, die maximal auftretende Umgebungstemperatur in Tunnel und Schächten auf 45 °C zu begrenzen, wurde eine Wärmebilanz erstellt, die bei Außentemperaturen von +25 °C und dem Betrieb einer Dampfleitung, sowie bei Außentemperaturen von +10 und -10 °C und dem Betrieb zweier Dampfleitungen die sich einstellenden Umgebungstemperaturen ausweist.

Figure 2. Cross-sections

Das Ergebnis der Untersuchung zeigt:
-daß die Belüftung mit Naturumluft an der Leistungsgrenze liegt,
-daß die Einwirkung unterschiedlicher Sonneneinstrahlung und Temperaturen an verschiedenen Schachtöffnungen nicht kalkulierbar ist,

-daß die Belüftung mit Naturumluft sehr große Ein- und Austrittsöffnungen von rd. 16 m² an den Schachtbauwerken erfordert, die im Bereich des Englischen Garten nicht unterzubringen sind.

Durch den Einbau von Lüftungsaggregaten reduzieren sich zwar die ausreichenden Ein- und Austrittsöffnungen auf rd. 2 m². Dabei würden dann allerdings hohe Austrittsgeschwindigkeiten auftreten. Zur Vermeidung derselben und für die Möglichkeit, einen Teil der Belüftung im Naturzug zu schaffen, wurden mehrere 2-m²-Öffnungen um die Schachtbauwerke gruppiert.

Die maximal notwendige Zuluftmenge ergibt sich aus der Berechnung mit +10 °C Außentemperatur und dem Betrieb zweier Dampfleitungen entsprechend Tafel 3.

Tafel 3. Lüftungsleistung
Table 3. Air condition capacity

	Zuluftmenge m ³ /h	Antriebsleistung kW
Schacht 2/5/7	70000	30
Schacht 9	20500	11

Die anderen Schächte sind in bezug auf die Belüftung Abluftschächte.

Um zu vermeiden, daß in der kalten Jahreszeit Zuluft mit Temperaturen unter 0 °C in die Schächte eingeblasen wird, werden die mit Temperaturen unter 0 °C einströmenden Luftmengen über ein Heizregister mit Dampf vorgewärmt.

Durch Forderungen des Umweltschutzamtes war vorgegeben, daß der von den Schächten ausgehende Schallpegel am Tag 50 dB(A) und bei Nacht 35 dB(A) nicht überschreiten darf. Entsprechend war die Schalldämmung der Lüftungsanlagen auszuliegen.

In den Schächten 2 bis 7 wird für die Schaltschrankräume, die mit einer Blechverkleidung abgeschottet sind, eine von der Schachtbelüftung unabhängige Belüftung sowie eine zusätzliche Kältemaschine installiert. Die Abluft aus dem Schaltraum wird in allen Fällen über, durch Jalousien verschließbare Öffnungen, in den Schachtraum gedrückt.

5.1.3 Dampf-Kondensat-Konzept

Wie in Kapitel 3 bereits angedeutet, ist die neue Verbundleitung in das bestehende Gesamtsystem der Münchner Fernwärmeverorgung einzubinden. Das bedeutet, daß bei örtlich je nach Lastzeit unterschiedlichen Einspeisungen, besonders für den Kondensatrückfluß, ein funktionierendes Kondensat-Austauschsystem geschaffen werden muß.

Eingedenk dieser Voraussetzung wurde nachfolgend erläutertes Dampf-Kondensat-Konzept entwickelt.

In den Schächten 1, 2, 4, 5, 7 und 9 werden Kondensatbehälter aufgestellt, die einerseits das Anfahrkondensat und andererseits das während des Betriebes anfallende Kondensat aufnehmen. Den Höhenverlauf der Leitungen entsprechend ergeben sich in den Schächten 3, 6 und 8 Hochpunkte.

Mit den zusätzlich zu den vorgenannten in der Hälfte der Strecke zwischen zwei Schachtbauwerken angeordneten Kondensatstationen ergibt sich, daß die längsten zu entwässernden Dampfleitungsabschnitte 600 m betragen.

Die neben den Kondensatbehältern aufgestellten Pumpen drücken das Kondensat abhängig vom Wasserstand wahlweise in eine der drei, durch die Steuer- und Leittechnik des Gesamtsystems vorgegebene und ausgewählte Kondensataustauschleitung.

Die Armaturen in den Kondensataustauschleitungen sind ebenso wie in den zu den Austauschleitungen führenden Pumpendruckleitungen mit Motoren ausgerüstet, die fernsteuerbar sind. Handbetätigung vor Ort ist zusätzlich möglich.

Die Kondensatbehälter sind entsprechend den anfallenden Kondensatmengen und unter Beachtung des in den einzelnen Schächten zur Verfügung stehenden Platzes so optimiert, daß das zur Verfügung stehende Puffervolumen das Einlaufen von Kondensat in den Behälter über einen Zeitraum von mindestens fünf Stunden zuläßt. D.h. im Falle eines Stromausfalles werden die Dampfleitungen innerhalb der Pufferzeiten zunächst weiterbetrieben. Sollten die Pufferzeiten für ein Aktivieren des Stromes nicht ausreichen, sind mit entsprechendem Vorlauf zunächst eine und schließlich beide Dampfleitungen außer Betrieb zu nehmen. Die Ansteuerung der Armaturen wird durch ein Signal über einen getrennten Stromkreis vorgenommen.

Als Absperrorgane sind für die Dampfleitungen elektromotorisch angetriebene Klappen mit einer Umföhrung und für die Kondensatentleerungen Schieber vorgesehen.

5.1.4 Entwässerungskonzept

Aufgrund der Vorkehrungen die hinsichtlich der Qualität und der Verarbeitung des einzusetzenden Stahlrohrmaterials getroffen wurden, ist das Auftreten eines plötzlichen Lecks größeren Ausmaßes im genannten Abschnitt zwischen HKW Nord und Schacht 1 auszuschließen. Kleinere Undichtigkeiten an den Mediumrohrleitungen können gezielt abgedichtet und wo nötig zu gegebener Zeit repariert werden.

Bei Leckagen an Tunnel- oder Kanalwänden wird eindringendes Wasser über die Ablaufrinne zum nächstgelegenen Schacht geleitet.

In allen Schächten sind zwei Abwasserpumpen zur Ableitung von im Pumpensumpf sich ansammelnden Wasser installiert. Der Schwimmerschalter der Reservepumpen ist jeweils höher eingestellt, so daß diese Pumpen je nach Wasseranfall zugeschaltet werden. Beim Anspringen der zweiten Pumpe geht gleichzeitig eine Meldung an die Warte.

Die Pumpen fördern das sich im Pumpensumpf ansammelnde Wasser in das in der Nähe der Schachtbauwerke liegende Abwassersystem.

5.1.5 Anwendungstechnik

In Anbetracht der Größe und der Anforderungen des Projektes sind die im

Tunnel und im Betonkanal unterzubringenden Mediumrohrleitungen mit allen dazugehörigen Einbauteilen besonders sorgfältig zu bemessen.

Von vornherein war klar, daß bei den sehr großen Stahlrohrdurchmessern der Dampfleitungen eine Festigkeitsprüfung mit Wasser nach der Verlegung nicht in Frage kommt. Deshalb wurde in der Materialspezifikation gefordert, daß jede auf die Baustelle gelieferte Rohrstange im Werk einer Wasserdruckprobe von 50 bar unterzogen wird. Dies ist unabhängig von der Art der Bescheinigung über Materialprüfungen nach DIN 1626 vom Hersteller ohne Mehrkosten einforderbar. Mit dem im vorliegenden Fall vorgeschriebenen Abnahmeprüfzeugnis nach DIN 500 49-3.1 B wird die Schweißnaht im Zuge der Fertigstellung zerstörungsfrei geprüft. Über die an der Baustelle durchgeführten Prüfungsmaßnahmen wird weiter unten berichtet.

Sämtliche Rohre, auch die für die Kondensatleitungen, wurden als geschweißte Rohre jedoch mindestens mit der Wandstärke der nahtlosen Rohre bemessen.

Für die Kondensatleitungen wurde untersucht, ob das Einbringen komplett geschäumter Systeme z.B. von Wickelfalzrohren, Vorteile bringen würde. Die hierfür angestellten Feldversuche legten jedoch Probleme, die beim Einschieben über Rollenlager entstehen, offen, so daß die konventionelle Verlegemethode (Stahlrohre in die Tunnelröhre einschieben und nachträglich wärmedämmen) zur Anwendung kam.

5.1.5.1 Kompensation und Rohrlagerung

Den Entscheidungen zum Einsatz bestimmter Anlagenkomponenten gingen jeweils alternative Untersuchungen und Kostenvergleiche voraus.

Diese Vorgehensweise wurde auch für die Bestimmung der Rohrleitungskompensation und die Art der Rohrunterstützungen praktiziert.

Im ersten Schritt wurde die optimale Lage der Rohrleitungen im Tunnel und im Betonkanal unter Berücksichtigung des Platzbedarfes, der Sicherheits- und der betrieblichen Anforderungen definiert. Die Leitungen mit den größten Ausmaßen (Dampfleitungen DN 900 bis 1100) werden in etwa auf Höhe der Mittellinie der Tunnelröhre, d.h. an der Stelle des größten Lichtmaßes angeordnet. Gleichzeitig muß die Auflagestelle so hoch angeordnet sein, daß unter den Dampfleitungen noch Platz für Kondensatleitungen ist. Die Anbringung der Kondensatleitungen unter den Dampfleitungen gewährleistet gleichzeitig den problemlosen Abfluß des Kondensates aus der Dampfleitung.

An der Seite neben den Unterstützungssockeln ist jeweils noch Freiraum für die spätere Verlegung zusätzlicher Leitungen gegeben.

Als nächstes fiel die Entscheidung über die Art der Rohrlagerung zugunsten von Rollenlagern aus. Auch hier waren es mehrere Punkte, die für diese Entscheidung sprachen. Der wesentlichste ist die Reduzierung der Reibkräfte und damit der Herabsetzung von Festpunktkräften durch die mit Edelstahllachsen und PTFE-Verbundlagern ausgestatteten Rollen. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit große Dehnwege mit einfachen, kompakten Rohrabstützungen zu überbrücken.

Da ein Rollenlager jeweils aus zwei V-förmig angeordneten Rollen besteht, werden damit gleichzeitig Führungseigenschaften übernommen, so daß bei langen geraden Abschnitten auf zusätzliche Führungslager verzichtet werden kann. Diese Führungseigenschaften wurden für die einzelnen Abschnitte nachgewiesen, wobei sich außer für die geraden auch für einen Abschnitt mit einem Radius von 10 000 m keine Notwendigkeit für zusätzliche Führungslager ergaben. Lediglich für einen Abschnitt mit einem Radius von 2000 m wurden zusätzlich Führungen, die sich über Rollen an der seitlichen Tunnelwand abstützen, eingebaut.

Mit den als Abbesicherung wirkenden, vom Rohrsattel über die Rolle greifenden Bügeln, die an jedem dritten Lager vorgesehen wurden, werden ebenfalls Führungseigenschaften übernommen.

Nicht zu übersehen ist, daß sich mit der Wahl von Rollenlagern ein nicht unerheblicher Vorteil für den Montageablauf ergibt, da über die vorab plazierte Rollen die Stahlrohre eingeschoben werden können.

Zur Bestimmung der Stützabstände der Rohrleitungen liegt einerseits der Wunsch vor, möglichst große Stützabstände zur Reduzierung von Auflagerkosten zu erreichen und andererseits dem technisch machbaren und dem praktisch sinnvollen Rechnung zu tragen.

Mit einem von GEF entwickelten Rechenprogramm wurden die Stützweitenberechnungen für die verschiedenen Nennweiten durchgeführt. Dabei wird die Art des Rohrlagers, der Abstand zwischen Mitte Rohr und Unterkante Lager unter Einbeziehung des Reibfaktors und die Querschnittsabplattung des Rohres an der Lagerstelle berücksichtigt.

Das Ergebnis wurde dann so optimiert, daß mit einem Stützabstand von 15 m auch für die Kondensatleitungen der gleiche Stützabstand wie für die Dampfleitungen angesetzt werden konnte.

Tafel 4. Abhängigkeit
Table 4. Dependence

Alternativen	Rolle am Rohr	Rolle auf Sockel
1. mehrere Axialkompensatoren mit Δ bis maximal 600 mm	kurze Beton- bzw. Stahlsockel	kürzere Rohrsättel
	mehrere Festpunkte mit kleiner FP-Kraft	
2. Angularkompensatoren nur in den Schächten Δ maximal 1580 mm	Beton- bzw. Stahlsockel mit unterschiedlich großen Längen	kurze Sockel Rohrsättel mit teilweise großen Längen
	nur 1 Festpunkt mit hoher Belastung	

In einem weiteren Bearbeitungsschritt galt es zu bestimmen, wie die auftretenden Dehnungen kompensiert und wie die Auflagekonstruktionen für die Rohrleitungen aussehen sollten.

Zur Aufnahme der Rohrleitungsdehnung galt es, Angularkompensatoren, die lediglich in den Schachtbauwerken angeordnet werden, mit mehreren Axialkompensatoren entlang der Tunnelabschnitte zu vergleichen.

Hinsichtlich der Rohrlagerung war eine Alternative eine am Rohr befestigte Rolle, die auf der Unterlage läuft, während bei der anderen Alternative sich das Rohr über Rohrsättel auf der an der Auflagekonstruktion befestigten Rolle abstützt. Außerdem war zwischen Beton- und Profilstahlunterlage zu unterscheiden.

Daraus ergeben sich die in *Tafel 4* dargestellten Abhängigkeiten.

Die Untersuchungen ergaben zwei deutliche Ergebnisse:

1. Die Alternative, die Dehnungsaufnahme über Angularkompensatoren vorzunehmen, war wesentlich preisgünstiger. Dabei ist zu bedenken, daß die Schachtbauwerke nicht wegen der Kompensationsschleifen gebaut werden müssen, sondern aus anderen Gründen notwendig sind, so daß lediglich der Preis für die Kompensatoren und die verbindenden Rohrleitungen in die Betrachtung mit eingeht.

2. Die Lösung mit Betonsockeln gegenüber Stahlprofilen als Auflage stellte sich als deutlich kostengünstiger dar.

Entsprechend den vorstehenden Ergebnissen wurde dann bei der weiteren Planung verfahren. D.h., daß jeweils in der Tunnelmitte ein Festpunkt angeordnet wurde und die Ausdehnung der Rohre in die Schächte stattfindet. Zur Aufnahme der relativ hohen Kräfte von maximal ± 500 kN je Dampfleitung und maximal ± 85 kN je Kondensatleitung auf die Festpunkte, wurden an den in Frage kommenden Stellen Ankerplatten zwischen die Tübbing einbetoniert.

Eine von der üblichen Vorgehensweise abweichende Handhabung wurde bei der Auslegung der Kompensatoren für die Dampfleitungen angewandt.

In Anbetracht der großen Nennweiten und der sehr großen aufzunehmenden Dehnungen war es ratsam, die Festlegung der Kompensatoren nicht nach dem Nenndruck, sondern nach den Betriebsdaten vorzunehmen. So wurde die Bestellung beim Hersteller nach den Auslegungsdaten 8 bar und 200 °C vorgenommen. Die Festlegung nach PN 16 hätte demgegenüber eine reduzierte Dehnungsaufnahme und höhere Kosten zur Folge gehabt.

Als Konsequenz der Entscheidung für Betonsockel wurde festgelegt, nach Abschluß der Vortriebsarbeiten eine Betonsole in den Tunnelboden einzubringen.

Der Vergleich, bei dem untersucht wurde, ob die Anordnung der Rollenlager am Rohr mit unterschiedlicher Sockellänge oder die Anordnung der Rollenlager auf dem Betonsockel mit variierender Rohrsattellänge preisgünstiger ist, ergab zunächst keine eindeutige Priorität. Deshalb wurde diese Variante in die Ausschreibung mit aufgenommen und die Entscheidung über den Einsatz nach Vorliegen der Angebotspreise gefällt.

Danach stellte sich als kostengünstigste und auch für den Bauablauf praktikabelste Lösung die Variante mit der auf einem immer gleich langen Betonsockel befestigten Rolle und unterschiedlich langen Rohrsätteln dar.

5.1.5.2 Wärmedämmung

Es steht außer Zweifel, daß die Wärmedämmung für Fernwärme-Transportleitungen einen nicht unbeträchtlichen Anteil an den Gesamtkosten darstellt. Zur Optimierung der Herstell- und Betriebskosten wurde daher die Ermittlung der wirtschaftlichen Dämmdicke mit einem Rechnungsprogramm durchgeführt.

Für die Fernwärme-Verbundleitung waren außerdem die Aufwendungen bei der Montage zu beachten. Da das Anbringen der Dämmmaterialien in den Tunnelröhren nur an den fertig verlegten Mediumrohren in Frage kam, waren aus Transport- und Montagegründen Dämmschalen für die Dampfleitungen nicht einsetzbar.

Der Ausschreibung zugrunde gelegt wurden nachstehende Dämmkombi-

nationen für die jeweils unter Ansatz einer Mediumtemperatur von 185 °C, einer Umgebungstemperatur von 45 °C und einer Ummantelung mit Aluminiumblech folgende Wärmeverlustwerte ermittelt wurden:

1. Drahtnetzmatte mit metallischen Abstandshaltern rd. 190 W/m
2. Drahtnetzmatte mit Lamellenmattenring als Abstandshalter rd. 170 W/m
3. Lamellenmatte rd. 162 W/m

Im Feldversuch und im Laboratorium wurde die Druckfestigkeit und Wirksamkeit der in Position 2 genannten Dämmkombination überprüft.

Das Ergebnis gab zusammen mit den Wärmeverlustwerten den Ausschlag, daß für die Dampfleitungen, trotz etwas höherem Preis, die Entscheidung zugunsten des Einsatzes von Lamellenmatten fiel.

Die Lamellenmatten bestehen aus druckfesten Platten mit senkrecht stehenden Mineralfasern. Die Matten werden auf den Rohrdurchmesser zugeschnitten angeliefert und haben gemäß AGI-Arbeitsblatt Q 132, Grenzkurve 2, eine Wärmeleitzahl von mindestens 0,044 W/mK (FWI 12/92, S.667-669).

Für die Kondensatleitungen wurden Wärmedämmschalen eingesetzt.

5.2 Tiefbau

Die Probleme, die sich aus den geologischen Besonderheiten für die Planung und Ausführung ergaben, werden hier nicht weiter behandelt. Auf die Planung und Ausführung des tiefbautechnischen Gewerkes wird nur vom Grundsatz eingegangen. Im Detail ist diese Thematik bereits in [1] behandelt worden.

5.2.1 Schachtbauwerke

Das Konzept sieht vor, die Schachtbauwerke als Start- und Zielpunkte für die Vortriebsmaßnahmen anzuordnen. Ihre Abmessungen müssen so sein, daß alle Maschinen und Geräte, die zu den Arbeiten benötigt werden, einschließlich der erforderlichen Hilfsgerüste und -treppen, eingebracht, bzw. die Vortriebsmaschinen am anderen Ende des Tunnels wieder geborgen werden können.

Das Konstruktionsprinzip ist für alle Schachtbauwerke gleich. Als Primärauskleidung wurden überschnittene Bohrpfähle von 90 bez. 120 cm Durchmesser mit anschließender 60 cm dicker wasserdichter Ortbetonschale vorgesehen.

5.2.2 Vortriebstechnik

Die Arbeitsweise für den Vortrieb wurde für den Abschnitt N1 bis N3 gegenüber dem Abschnitt N4 A unterschiedlich betrachtet. Für den Abschnitt N1 bis N3

wurde mit zwei Schildvortriebsmaschinen mit einem Ausbruchdurchmesser von 5,20 m gearbeitet. Zur Auskleidung waren wasserdichte Stahlbetontübbinge einzubringen.

Da der Querschnitt im Abschnitt N4 A größer als der der anderen Abschnitte, gleichzeitig die Streckenlänge mit 670 m aber relativ kurz ist, ergab sich hierfür kein wirtschaftlicher Einsatz einer Vortriebsmaschine. Stattdessen war beabsichtigt, dieses Tunnelstück in Spritzbetonbauweise unter Druckluft zu erstellen.

5.3 Planfertigung

5.3.1 Baupläne

Wie bereits an anderer Stelle erläutert, wurden die Vorgaben für die notwendige Größe der Tunnelröhren durch die einzubauenden Rohrleitungen und die Sicherheitsanforderungen vorgegeben. Für die Schachtbauwerke ergaben sich die notwendigen Abmaße aus dem Platzbedarf für die einzubringenden Vortriebsmaschinen und Abbaugeräte sowie für die Belegung mit Behältern, Pumpen, Rohrleitungen, Elektroinstallation usw. Im Stadium der Erstellung der Baupläne waren bereits die entsprechenden Angaben von Seiten der technischen Ausrüstung eingeflossen, um Ankerplatten und Fundamente an den richtigen Stellen zu platzieren.

Während die Rohbaupläne durch den Planer gefertigt wurden, lag die Erstellung der Schal-, Bohr- und Verbau- sowie sonstiger Detailpläne bei den ausführenden Unternehmen, da auf diese Weise die unternehmensspezifischen Erfahrungen und Vorschläge einfließen konnten.

5.3.2 Verlegepläne für Rohrbau

Auf der Basis der vom Tiefbau vorgegebenen Pläne über die Tunnelabschnitte zwischen zwei Schächten wurden Rohrverlegepläne erstellt. Diese Pläne enthalten für jeden Auflage-Betonsockel die Art und Anordnung der einzelnen Rohrlager, die Länge der Rohrsättel und die Auflager- und Festpunktbelastungen. Weiterhin sind auf den Plänen Systemzeichnungen über Gestaltung und Zuordnung der Anfahrentwässerungen und der automatischen Kondensatstationen sowie Detailzeichnungen über verschiedene Einbauteile zu finden. Diese Pläne entstanden wie Rohrleitungs- und Sy-

stemschemata auf der CAD - Anlage von GEF-Leimen.

Für die Bestückung der Schachtbauwerke mußten alle in Frage kommenden Gewerke detailliert aufeinander abgestimmt werden. Das begann bei der Aufstellung der Kondensatbehälter und -pumpen über die Anordnung der Rohrleitungen mit Zubehör, den sehr platzintensiven Lüftungsanlagen bis hin zu der Installation der Elektro-, Meß-, Regel- und Leittechnikanlagen und der Aufstellung der Schaltschränke. Nicht zu vergessen die aufwendigen Anteile von Bühnen und Treppen und die zweckmäßige Zuordnung zu Fluchtwegen, Notausstiegen und Montageöffnungen.

Für alle Einbauteile, wie Kondensatbehälter, Verteiler, Unterstützungen usw., hatte der Planer Werkstattzeichnungen zu fertigen.

5.3.3 Termine

Als Beginn der Tiefbauarbeiten war Juli 1989 angesetzt. Nach Forderung der Stadtwerke war die Inbetriebnahme für Herbst 1992 vorgesehen.

Anfang 1990 waren die ersten Schachtbauwerke soweit fertig, daß mit den Vortriebsarbeiten begonnen werden konnte. Der Tunnelabschnitt N3 wurde im Januar 1991 als erstes für die technische Ausrüstung freigegeben, so daß ab diesem Zeitpunkt mit der Rohrmontage begonnen werden konnte.

In den weiteren Abschnitten konnte die Rohrmontage wie folgt beginnen:

Abchnitt N1	Mai 1991
Abchnitt N2	Juli 1991
Abchnitt N4 A	Juli 1991
Abchnitt N4 B	Dezember 1991

Um von vornherein den Rahmen für die Abwicklung der Arbeiten innerhalb des genannten Zeitraumes vorzugeben und Abstimmungsproblemen zwischen den Gewerken vorzubeugen, wurden vom Planer Terminpläne ausgearbeitet, die den zeitlich aufeinander abgestimmten Ablauf der einzelnen Gewerksmontagen wiedergeben.

Dabei war klar, daß die Vielzahl der ineinander übergreifenden Gewerke und die von unterschiedlichen Standorten ausgehenden unterschiedlichen Montagerichtungen einen einfachen Balkenplan als Terminplan nicht zulassen würden. Es wurden deshalb Terminpläne erstellt, aus denen die Aneinanderreihung der einzelnen Arbeitsschritte zugeordnet zu dem jeweiligen Einbauort und Einbautag sowie die Montagerichtung zu entnehmen ist. Auf der Grundlage der Terminpläne wurden nicht nur die absoluten Endtermine, sondern auch die Termine einzelner Gewerke pönalisiert, von denen die Fortsetzung der Arbeit weiterer Gewerke abhängig war.

6 Bauausführung

6.1 Schachtbauwerkserstellung

Voraussetzung für das Auffahren der Tunnelstrecken ist die weitgehende Fertigstellung der Startschächte. Daher begannen die Tiefbauarbeiten mit der Erstellung dieser Schachtbauwerke. Als erstes wurden die Bohrpfähle mit Durchmessern von 90 und 120 cm in Angriff genommen. Der anschließende Aushub fand im Schutze einer inneren und äußeren Wasserhaltung statt. Die Auskleidung geschah mit einer 60 cm dicken Ortbetonschale. Zur Herstellung der wasserundurchlässigen Innenschale wurde eine Kletterschalung eingesetzt.

Die Zielschächte wurden dann parallel zu den Vortriebsarbeiten erstellt.

6.2 Tunnelbau

Die Vortriebsarbeiten wurden jeweils vom Schacht 4 in Richtung Schacht 1 sowie vom Schacht 6 in Richtung Schacht 4 und vom Schacht 6 in Richtung Schacht 7 vorgenommen.

Vor dem Einsetzen der Vortriebsmaschinen wurden vom Schacht 4 und vom Schacht 6 aus jeweils 20 m lange Stollen in Spritzbetonweise als Startkaverne angelegt. Aufgrund der hydrogeologischen Verhältnisse kam nur eine Vortriebsmaschine mit Trockenförderung und Drucklufthaltung zur Anwendung.

Für den Vortrieb waren Pressen mit einer Gesamtpreßkraft von 10 x 2000 kN installiert. Als Vortriebsleistung wurden bis zu 35 m /Tag bzw. 480 m/Monat erreicht.

Die Tunnel sind mit wasserdichtem Stahlbetontübbings, deren Fugen umlaufend abgedichtet werden, ausgekleidet.

Der Abschnitt N4 A wurde in Spritzbetonbauweise unter Druckluft aufgefahren. Mit Beendigung der Ausbauarbeiten wurde die Druckluft abgelassen und der Tunnel geräumt. Nach Einleitung verschiedener Maßnahmen zur Dichtheit des Bauwerkes wurde die Betonauskleidung in zwei Abschnitten eingebracht. Zunächst wurde die Tunnelsohle mit einer Sohlschalung betoniert und danach das Gewölbe mit einer frei tragenden Gewölbeschalung in den Beton gepumpt.

Den Abschluß der Arbeiten in den Tunnel bildete das Schalen und Betonieren der Auflager-Betonsockel und das Einbringen des Sohlenbetons.

6.3 Technische Ausrüstung der Tunnel und Schächte

Die Überlegungen, die zum Einbringen von Rohrleitungen in Tunnel und

