

Hans-Peter Tietz¹⁾

Institut für Städtebau
und Landesplanung
Universität Karlsruhe
Kaiserstraße 12
7500 Karlsruhe 1

AUSBAUSTRATEGIEN FÜR
FERNWÄRMENETZE

INHALT	Seite
1 Fernwärme als leitungsgebundenes Infrastruktursystem	26
2 Problemstellung	28
3 Energie-Versorgungs-Algorithmus (E-V-A)	30
3.1 Ermittlung des Entscheidungsoperators	
3.2 Handlungsanweisung	
3.3 Berechnung der Wärmetransportkosten	
3.4 Arbeitsschritte des Energie-Versorgungs-Algorithmus	
3.5 Darstellung der Ergebnisse des E-V-A	
3.6 Darstellung des Gesamtverfahrens	
4 Anwendungsbeispiel KARLSRUHE-OST	41
4.1 Untersuchungsgebiet	
4.2 Disponibler Wärmebedarf	
4.3 Szenarien für die Entwicklung des Wärmebedarfs	
5 Ergebnisse des E-V-A für KARLSRUHE-OST	48
5.1 Untersuchung des Standorts "Heizwerk-Ost"	
5.2 Untersuchung von Standortalternativen	
6 Zusammenfassung	56
Literaturhinweise	57

¹⁾ Die Grundgedanken dieses Beitrags wurden in Gossensass von meinem Kollegen Dr.-Ing. Raimund Herz vorgetragen.

1 Fernwärme als leitungsgebundenes Infrastruktursystem

=====

Ausbau und Koordination der leitungsgebundenen Systeme zur Energieversorgung sind in den letzten Jahren durch Veränderung der wirtschaftlichen, energie- und umweltpolitischen Rahmenbedingungen und den damit verbundenen Eingriffen in den Energiemarkt zunehmend zu einer öffentlichen Aufgabe der Gemeinden geworden.

Dabei nimmt im Bereich der Raumwärmeversorgung die Fernwärme eine Sonderstellung ein, da sie mehr als alle anderen Energieträger auf kurze Verteilungsstrecken, verbrauchernahe Standorte und Abstimmung mit den Konkurrenten angewiesen ist, wenn sie sich alleine durch den Preis auf dem Wärmemarkt behaupten will. Der energiepolitisch gewünschte Ausbau der Fernwärmeversorgung erfordert daher eine besonders sorgfältige und langfristige Vorausplanung sowie Abstimmung zwischen den örtlichen städtebaulichen Gegebenheiten und dem Energieversorgungssystem.

Aufgrund ihrer fachlichen Kompetenz führen die Energieversorgungsunternehmen den Ausbau der Energieversorgungssysteme durch. Dabei stehen nach dem in der Regel von den Gebietskörperschaften erteilten Unternehmensauftrag vor allem betriebswirtschaftliche Zielsetzungen im Vordergrund. Volkswirtschaftliche, energiepolitische, aber auch stadtplanerische Zielsetzungen konnten dadurch bisher nur in unzureichendem Ausmaß berücksichtigt werden.

Nach den Energieprogrammen der Bundesregierung, zuletzt durch die 3. Fortschreibung vom 4.1.1981, werden nun die Energieversorgungsunternehmen und die Gemeinden gemeinsam aufgefordert, für den örtlichen Ausbau der leitungsgebundenen Energien Versorgungskonzepte zu entwickeln, um ein sinnvolles Zusammenwirken von Strom, Gas, der Nutzung des wirtschaftlichen Fernwärmepotentials auf der Basis der Kraft-Wärme-Kopplung und der industriellen Abwärme zu unterstützen.

Will nun künftig die Stadt- und Regionalplanung bei der Planung der Energiesysteme mitwirken und bei der Koordinierung der Maßnahmen und Investitionen die Ziele der kommunalen bzw. regionalen Entwicklung

vertreten, so muß die Fachplanung der Energieversorgung und speziell die der Fernwärmeversorgung - ebenso wie bisher die der Wasserversorgung oder der Abwasserbeseitigung - in die Stadtplanung integriert werden. Insbesondere ist dies bei einer künftig stärker dezentralisierten Fernwärmeversorgung notwendig, die sich mehr als bisher am Wärmebedarf orientiert, statt lediglich ein Nebenprodukt der Stromerzeugung zu sein. Für diesen Fall können die Kommunen neben der Erschließungsplanung des Verteilungsnetzes auch bei der Standortplanung möglichst verbrauchernahe Wärmeerzeugungsanlagen ihren Beitrag leisten.

Bei einer Fernwärmeversorgungsplanung im Rahmen der Stadtplanung sind vor allem drei Aufgaben von Bedeutung:

1. Eine bedarfsgerechte Anpassung von Fernwärme-Versorgungssystemen an die siedlungsstrukturellen Gegebenheiten.

Dies sollte nicht entsprechend den Schlagworten "big is bad" und "small is beautiful" geschehen. Bei der bisher sehr geringen Anzahl kleiner, verbrauchernahe Kraftwerksstandorte ist jedoch wegen zunehmender Schwierigkeiten bei der Durchsetzung großer Anlagen und teilweise verbesserter Wirtschaftlichkeit kleiner Anlagen mit einem häufigeren Einsatz kleinerer Kraftwerkstypen zu rechnen.

2. Eine gegenseitig abgestimmte räumliche Abgrenzung von Fernwärme-Versorgungsgebieten gegenüber konkurrierenden leitungsgebundenen Versorgungssystemen.

Damit sollen keine neuen Gebietsmonopole geschaffen, sondern lediglich rechtzeitig die Interessen der einzelnen Versorgungssysteme gegeneinander abgewogen werden. Man kann so erreichen, daß durch eine mittelfristig festgelegte Vorausplanung zeitlich abgestufter Versorgungsgebiete dem kapitalintensiven, aber volkswirtschaftlich vorteilhaften Fernwärmesystem Freiräume verschafft werden, um sich langfristig zu entwickeln. Innerhalb der auf diese Weise festgelegten Gebiete können dann mit Hilfe der Stadtplanung gezielte Maßnahmen zur Unterstützung des Ausbaus durchgeführt werden, z.B. durch die Ausweisung von neuen Baugebieten und das Auffüllen von Baulücken in Gebieten mit hoher Wärmebedarfsdichte.

3. Eine Vordimensionierung der Netze für die Entwicklung von Ausbaustrategien und ersten Ausbauschritte.

Fernwärmeversorgungssysteme werden in der Regel auf den Endausbauzustand dimensioniert. Ein stufenweiser Ausbau des Leitungsnetzes ist in den meisten Fällen erst dann sinnvoll, wenn ein Zwischenausbauzustand für einen Zeitraum von über 10 Jahren ausreichend ist. Die Kenntnis des zu versorgenden Gesamtgebiets ist aber auch Voraussetzung für die Anwendung der derzeit zur Verfügung stehenden Dimensionierungs- und Optimierungsverfahren.

2 Problemstellung =====

In diesem Beitrag wird ein Instrument zur Realisierung dieser genannten Aufgaben vorgestellt, das im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsprojekts über die "Grundlagen der Standort- und Erschließungsplanung für die Fernwärmeversorgung" erarbeitet wurde.

Das komplexe Problem, das es dabei zu lösen gilt, läßt sich zunächst auf folgende Aufgabenstellung reduzieren:

Bestimme das Wärmeversorgungsgebiet samt zugehörigem Leitungsnetz, welches von dem gegebenen Standort einer Wärmeerzeugungsanlage aus mit möglichst niedrigen Wärmeerzeugungs- und Verteilungskosten versorgt wird.

Gegeben sind dabei also lediglich

- Standorte für Wärmeerzeugungsanlagen innerhalb gewisser Leistungsbereiche und
- der für das Versorgungssystem disponible Wärmebedarf in seiner räumlichen Verteilung.

Die Standorte ergeben sich aufgrund einer Vorauswahl, bei der vor allem die Möglichkeit gemeinsamer Strom- und Wärmeproduktion oder die Nutzung industrieller Abwärme genutzt werden soll.

Bei der Wärmebedarfsermittlung handelt es sich um solche Mengen, die innerhalb des Planungszeitraums auch tatsächlich durch das beobachtete Versorgungssystem angeschlossen und versorgt werden können. Das heißt, der in der Regel rechnerisch aufgrund der zu beheizenden Wohn- und Gewerbefläche ermittelte Wärmebedarf wird um den bereits anderweitig gedeckten und auch in Zukunft nicht mit zentralen Nah- oder Fernwärmesystemen zu deckenden Bedarf sowie um den künftig durch Wärmedämmung einzusparenden Anteil vermindert.

Gesucht sind dann

- diejenigen räumlichen Einheiten (= das Versorgungsgebiet), die kostengünstig bzw. bis zu einem bestimmten anlegbaren Wärmepreis von den Erzeugungsstandorten aus mit Wärme versorgt werden können,
- die zu erzeugende Wärmemenge in den Anlagen und
- das Verteilungsnetz samt seinen Leitungskapazitäten, das sich aufgrund einer Ausbaureihenfolge ergibt.

Bei dieser Ausgangssituation lassen sich gängige OR-Verfahren, welche z.B. die kostenminimalen Flüsse zwischen einer gegebenen Quelle und mehreren Senken bestimmter Größe in einem gegebenen Netz berechnen, nicht direkt anwenden, da nicht alle Teilgebiete (Senken) zentral wärmeversorgt werden müssen, sondern nur die lohnenden, und da das Verteilungsnetz zunächst nicht gegeben ist. Dieses hängt davon ab, welche Senken in das endgültige System einbezogen werden und in welcher Reihenfolge das Netz ausgebaut wird. Der hohe Anteil der Investitionen in das Transport- und Verteilungsnetz verursacht gewaltige Anlaufkosten, die man möglichst vermeiden möchte. Eine Lösungsmöglichkeit besteht nun darin, ein solches OR-Verfahren mit einer Eliminationsstrategie zu verbinden. Für eine praktische Anwendung hat sich dies jedoch als ungeeignet erwiesen. Der hierfür erforderliche Start vom gesamten möglichen Netz aus ist mit sehr hohen Rechenzeiten verbunden, und die Optimallösung im Endstadium wird dem schrittweisen Aufbau des Verteilungsnetzes über einen Zeitraum von 10 bis 20 Jahren nicht gerecht.

3 Energie-Versorgungs-Algorithmus (E-V-A)

Zur Lösung der hier vorgestellten Problemstellung wird ein heuristisches Lösungsverfahren verwendet, welches durch eine Handlungsstrategie charakterisiert ist, die den Lösungsprozeß steuert, sowie durch einen selektiv wirkenden Entscheidungsoperator, der jeweils die nächste potentielle Lösung auswählt.

Mit Hilfe geeigneter Kriterien lassen sich dann entsprechend der Ausbaureihenfolge Versorgungsgebiete abgrenzen, in denen eine vorgegebene Gesamtmenge abgesetzt oder ein anlegbarer Wärmepreis erreicht werden kann.

3.1 Ermittlung des Entscheidungsoperators

In Anlehnung an das in den Regionalwissenschaften verwendete, aus dem Gravitationsmodell abgeleitete Potentialmodell wird als Entscheidungsoperator ein Potentialwert POT_{ij} verwendet. Dieser soll, bezogen auf den Standort der Wärmeerzeugungsanlage, die Eigenschaft besitzen, daß er mit zunehmendem Wärmebedarf in einem Teilgebiet j (Wärmesenke) ansteigt und sowohl mit dem dazu erforderlichen Transportaufwand t in Abhängigkeit der Distanz d_{ij} zwischen der Wärmequelle i und der Wärmesenke j abnimmt als auch mit der Leistung P_{ij} , für welche die Leitungen ausgelegt werden. Diese Voraussetzungen für den Potentialwert werden durch folgende Gleichung erfüllt:

$$POT_{ij} = \frac{P_j}{t(P_{ij}, d_{ij})} \quad (1)$$

Da es Ziel des Verfahrens ist, die Gesamtkosten aus Wärmeerzeugung und Wärmetransport zu minimieren, werden für den Transportaufwand zwischen i und j die spezifischen Transportkosten in Abhängigkeit der Distanz und der Auslegungsleistung der Leitungen verwendet.

Diese besitzen die Eigenschaft, daß sie mit zunehmender Auslegungsleistung geringer werden (BILD 1). Das heißt, der Potentialwert ist um so

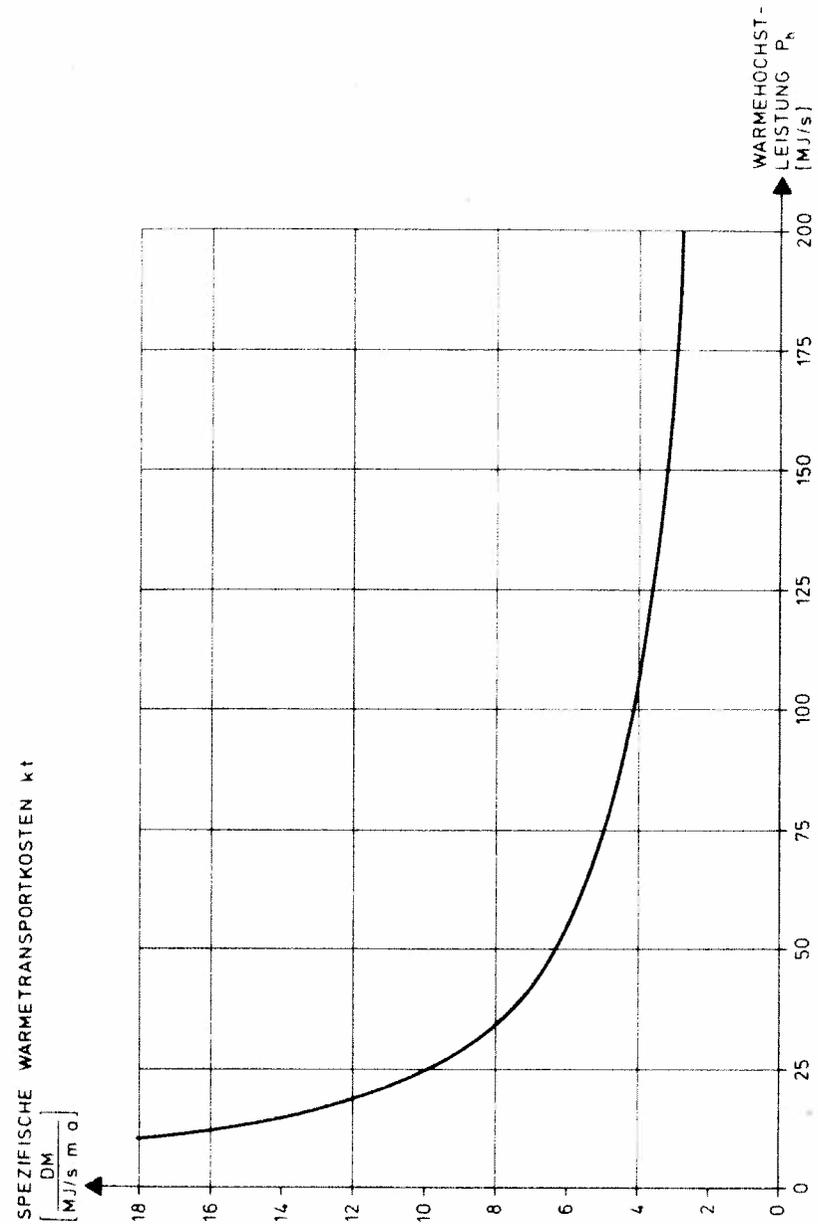


BILD 1: Spezifische Wärmetransportkosten für Leitungen in Haubenkanal-Bauweise bei einer durchschnittlichen Länge eines Stranges von 2,5 km, Kostenstand 1982
Quelle: TIETZ / OESTERLE (1983)

größer, je größer die zu versorgende Leistung in der Wärmesenke und je kürzer die Distanz zwischen Quelle und Senke ist.

Multipliziert man zusätzlich den Wärmebedarf P_j im Zähler jeweils mit denjenigen spezifischen Erzeugungskosten, die sich unter Berücksichtigung der bisher erreichten Gesamtleistung P_{ges} der Wärmeerzeugungsanlage in der Quelle ergeben, erhält man für den Potentialwert die anschauliche Dimension 'Megajoule pro Sekunde'. Gleichzeitig bewirkt auch hier der degressive Verlauf der Kostenfunktion für die Wärmeherzeugung, daß in der Anfangsphase des Netzaufbaus der Wärmesenke ein im Verhältnis zu ihrem Wärmebedarf höherer Potentialwert zugewiesen wird als später bei fortgeschrittenem Netzausbau. Dies ergibt sich aus dem Verlauf der Kostenfunktion für die Wärmeherzeugung, wie er für verschiedene Typen von Wärmeherzeugungsanlagen in BILD 2 dargestellt ist.

Die in dem Algorithmus verwendete Gleichung für den Potentialwert lautet somit:

$$POT_{ij} = \frac{P_j \cdot k_{ej}(P_{ges} + P_j)}{k_{t_{ij}}(P_j)} \quad [MJ/s] \quad (2)$$

- POT_{ij} : Potentialwert der Senke j in bezug auf die Quelle i [MJ/s]
- P_j : Wärmebedarf (Leistung) in Senke j [MJ/s]
- P_{ges} : gesamte bisher erreichte Ausbauleistung [MJ/s]
- k_{ej} : spezifische Jahreskosten für die Wärmeherzeugung in j [DM/MJ/s,a]
- $k_{t_{ij}}$: spezifische Jahreskosten für den Wärmetransport von i nach j [DM/MJ/s,a]

3.2 Handlungsanweisung

Die Handlungsanweisung für den Algorithmus lautet dann:

Suche jeweils diejenige Wärmesenke j, die in bezug auf den Standort der Wärmequelle i den größten Potentialwert POT_{ij} besitzt, und schließe sie an das bisherige Netz an.

Nach dieser Handlungsanweisung bildet der Algorithmus eine Sequenz von Wärmesenken, die den Verlauf des Netzaufbaus beschreibt. Da für jeden

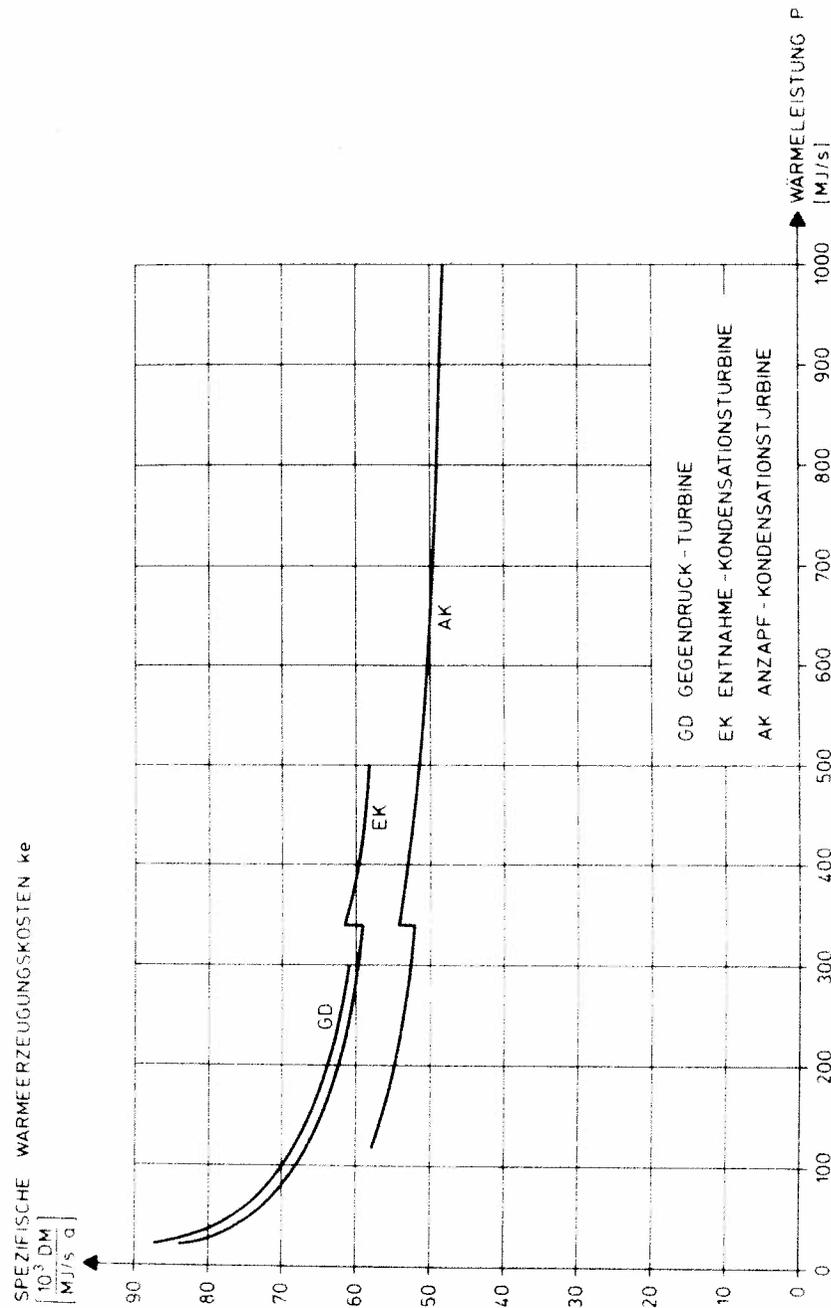


BILD 2: Kostenfunktionen für die Wärmeherzeugung durch unterschiedliche Anlagentypen
Kostenstand 1982. Quelle: TIETZ / OESTERLE 1983

weiteren Schritt die bereits versorgten Wärmesenken und die dafür verwendeten Leitungsstrecken als vorgegeben berücksichtigt werden müssen, ist es auch erforderlich, die inzwischen vorhandenen Leitungsabschnitte für die Berechnung der Potentialwerte entsprechend ihrer Auslegungsleistung heranzuziehen. Nur so kann berücksichtigt werden, daß Wärmesenken, die in der Nähe bereits vorhandener Leitungen liegen, ein höheres Potential besitzen als solche, die über einen hohen Anteil neuer Leitungen versorgt werden müssen.

3.3 Berechnung der Wärmetransportkosten

Der größte Potentialwert für eine Wärmesenke ergibt sich dann, wenn sie über den Weg mit den geringsten zusätzlichen Transportkosten pro Wärmeinheit versorgt wird.

Zur Bestimmung dieser Strecken in einem vorgegebenen möglichen Netz wird ein Routensuchalgorithmus verwendet, bei dem der sonst übliche Widerstand zwischen den einzelnen Knoten durch die jeweils erforderlichen Jahreskosten für den Wärmetransport in Abhängigkeit der Länge und der Auslegungsleistung ersetzt wird.

Führt man einen zusätzlichen Widerstandsfaktor W ein, um Hindernisse bzw. Erschwernisse bei der Verlegung berücksichtigen zu können, so ergibt sich der Strecken-Widerstand zwischen zwei Knoten k und l auf der Strecke zwischen der Senke j und der Quelle i in Abhängigkeit der Leistung, für welche die Leitung ausgelegt werden muß zu

$$WS_{kl} = kt_{kl}(P_{kl}) \cdot W_{kl} \quad \left[\frac{DM}{MJ/s \cdot a} \right] \quad (3)$$

- WS_{kl} : Strecken-Widerstand zwischen den Knoten k und l [DM/MJ/s, a]
- kt_{kl} : spezifische Jahreskosten für den Wärmetransport von k nach l [DM/MJ/s, a]
- P_{kl} : Leistung, für welche die Leitung zwischen k und l ausgelegt werden muß [MJ/s]
- W_{kl} : Widerstandsfaktor für die Strecke zwischen k und l [-]

Mit diesem Strecken-Widerstand kann auf vorhandene Algorithmen zur Routensuche zurückgegriffen werden. Als am geeignetsten hat sich dabei

der C2-Algorithmus nach DIAL (1969) erwiesen, da er durch die Verwendung verketteter Sequenzlisten im Vergleich zu anderen Verfahren weniger Speicherplatz benötigt (HARTUNG 1981).

Aufgrund des Funktionsverlaufs von kt ist der Strecken-Widerstand um so kleiner, je größer die bereits vorhandene Ausbauleistung ist. Dadurch werden vorhandene Strecken in dem Routensuchalgorithmus bevorzugt. Für noch nicht benutzte Strecken muß ein Anfangswiderstand festgelegt werden, und zwar größer als der Widerstand für den Mindestquerschnitt einer Leitung.

Das Ergebnis ist die Sequenzliste derjenigen Knoten - und damit der Strecken -, über welche eine Senke von der Quelle aus mit den geringsten spezifischen Transportkosten erreicht wird.

3.4 Arbeitsschritte des Energie-Versorgungs-Algorithmus (E-V-A)

Der heuristische Algorithmus zur Abgrenzung von Energieversorgungsgebieten wurde in der weitverbreiteten elementaren Programmiersprache BASIC programmiert und ist dadurch mit Hilfe gebräuchlicher Mikrorechner direkt anwendbar.

Die einzelnen Arbeitsschritte des Algorithmus sind in dem Ablaufdiagramm in BILD 3 zusammengefaßt und lassen sich ausführlich wie folgt beschreiben:

- (1) Einlesen der Eingabedaten
 - QK: Quellknoten (Standort der Wärmeerzeugungsanlage vom Typ E)
 - P(J): disponibler Wärmeleistungsbedarf P in der Senke j
 - S(K,L): Verknüpfungsmatrix (Knoten-Knoten-Matrix)
 - D(K,L): Distanzenmatrix (Knoten-Knoten-Matrix)
 - KE(E,P): Erzeugungskosten in Abhängigkeit vom Typ E der Erzeugungsanlage und der Leistung P
 - KT(D,PA): Transportkosten in Abhängigkeit von der Distanz D und der Auslegungsleistung PA einer Strecke
 - KV(P,F,ST): Verteilungskosten in Abhängigkeit der zu verteilenden Leistung P sowie der Fläche F und dem Siedlungstyp ST des Bezugsgebiets

- (2) Suche nach dem kleinsten Wärmeleistungsbedarf $P(J) = P_{MIN}$.

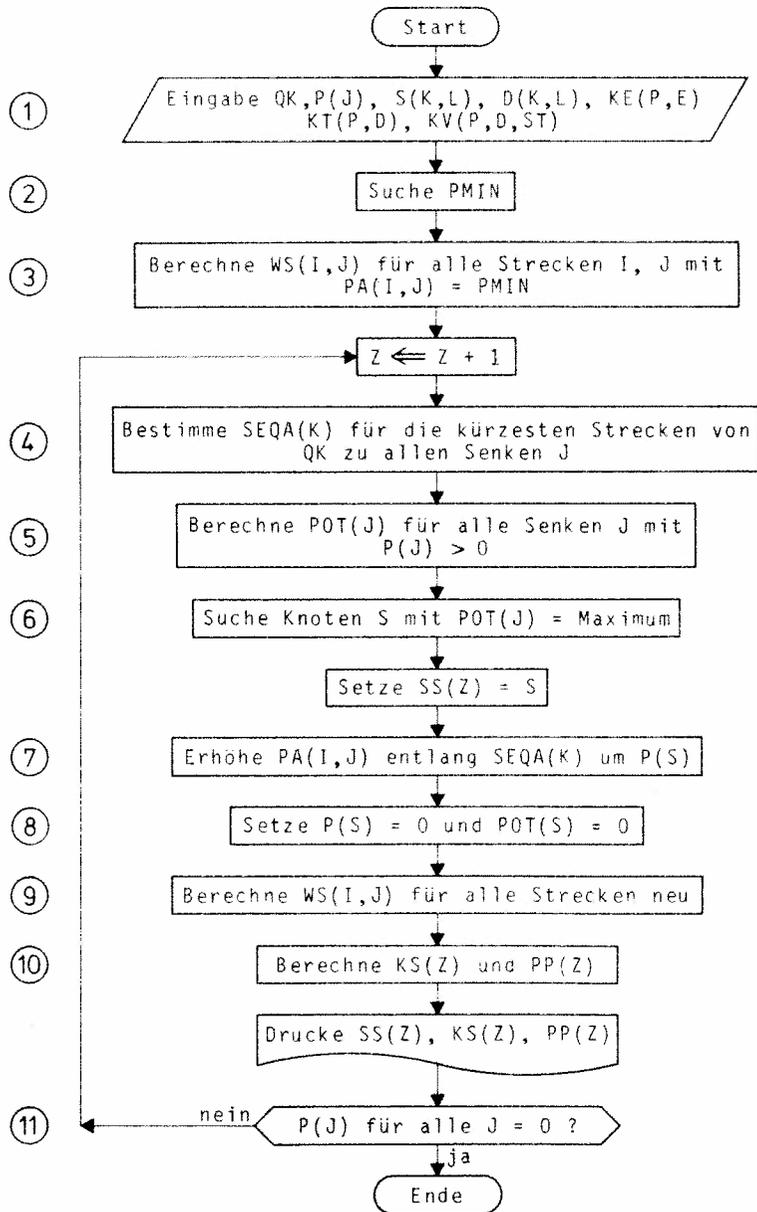


BILD 3: Ablaufdiagramm für den Energie-Versorgungs-Algorithmus E-V-A

- (3) Berechnung der Ausgangswerte der Strecken-Widerstände $WS(I,J)$ für alle Strecken nach Gleichung 3 bei einer Auslegungsleistung $PA(I,J)$ der Größe $PMIN$.
- (4) Bestimmung der Knoten-Sequenz $SEQA(K)$ für die jeweils kürzesten Strecken vom Quellknoten QK zu allen Senken J mit Hilfe des Routensuchalgorithmus von DIAL.
- (5) Bestimmung der Potentialwerte $POT(J)$ nach Gleichung 2 für alle Senken J , deren Wärmeleistungsbedarf größer Null ist.
- (6) Suche nach der Senke S mit dem größten Potentialwert $POT(J)$.
- (7) Erhöhung der Auslegungsleistung $PA(K,L)$ entlang der Sequenz $SEQA(K)$ zum Knoten S um den Wärmeleistungsbedarf $P(S)$ in S .
- (8) Potentialwert $POT(S)$ und Wärmeleistungsbedarf $P(S)$ des abgearbeiteten Knotens S werden gleich Null gesetzt.
- (9) Berechnung der Strecken-Widerstände $WS(I,J)$ für alle Strecken mit den aktuellen Auslegungsleistungen PA .
- (10) Berechnung der jeweiligen spezifischen Gesamtkosten sowie der angeschlossenen Gesamtleistung PP nach dem Iterationsschritt.
- (11) Ausführung des nächsten Iterationsschrittes ab (4), wenn
 - alle Wärmebedarfswerte P angeschlossen sind oder
 - die spezifischen Gesamtkosten einen Grenzwert erreicht haben oder
 - die Kapazität der Wärmeerzeugungsanlage im Quellknoten QK erschöpft ist.

3.5 Darstellung der Ergebnisse des E-V-A

Das Ergebnis des Algorithmus ist zunächst nur die Knoten-Sequenz SS der nacheinander angeschlossenen Wärmesenken. Das jeweils zugehörige Versorgungsgebiet ergibt sich dann als Summe der angeschlossenen Teilgebiete nach jedem Iterationsschritt. Das endgültige gesuchte Versorgungsgebiet ist dann von der Abbruchstelle abhängig. Es ist daher erforderlich, ein geeignetes Abbruchkriterium zu finden.

Hierzu wird ein Kostendiagramm verwendet, in dem nach jedem Iterationsschritt die spezifischen Gesamtkosten in Abhängigkeit von der angeschlossenen Gesamtwärmeleistung dargestellt werden. BILD 4 zeigt den qualitativen Verlauf der Gesamtkosten kg als spezifische Jahreskosten sowie die Kostenkomponente für Wärmeerzeugung bzw. Wärmetransport und -verteilung, die den Verlauf der Gesamtkosten bestimmen.

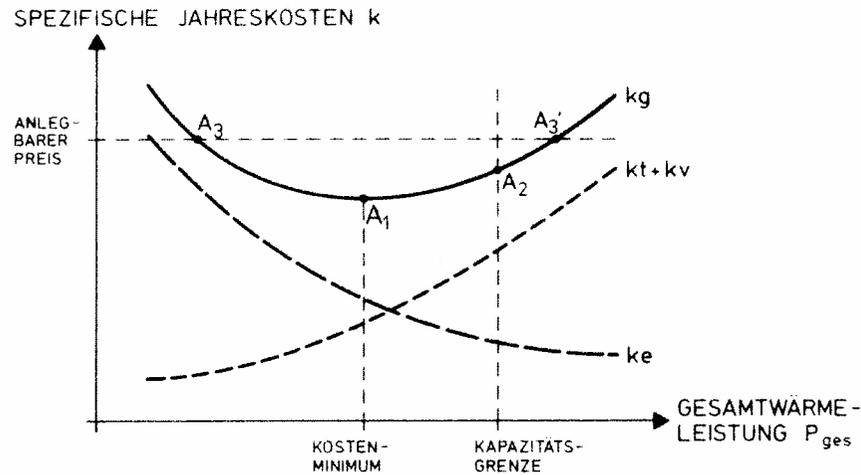


BILD 4: Qualitativer Verlauf der spezifischen Gesamtkosten k_g , als Überlagerung der spezifischen Transportkosten k_t und der Erzeugungskosten k_e in Abhängigkeit der jeweiligen Gesamtwärmeleistung P_{ges} eines Ausbaustandes mit möglichen Abbruchstellen A

Mit Hilfe dieses Diagramms läßt sich ermitteln, bei welcher Gesamtleistung, d.h. bei welchem zugehörigen Versorgungsgebiet sich bei der vorgegebenen Ausbaustrategie die geringsten Gesamtkosten ergeben (Abbruchstellen A_1 in BILD 4), bzw. welche spezifischen Gesamtkosten und welches Versorgungsgebiet sich bei einer vorgegebenen Kapazitätsgrenze der Wärmeerzeugungsanlage ergeben (A_2). Ebenso kann bestimmt werden, welche Versorgungsgebietsgröße erforderlich ist, um einen gegebenen anlegbaren Preis zu erreichen (A_3), bzw. bis zu welcher maximalen Gebietsgröße und Gesamtanschlußleistung dieser Preis unterschritten werden kann (A_3').

3.6 Darstellung des Gesamtverfahrens

Für die Anwendung des Energie-Versorgungs-Algorithmus sind neben den bereits dargestellten Komponenten "Wärmeerzeugung" und "Wärmetransport" weitere Merkmale des Fernwärmeverversorgungssystems, vor allem aber auch der jeweils gegebenen Siedlungsstruktur zu berücksichtigen. In

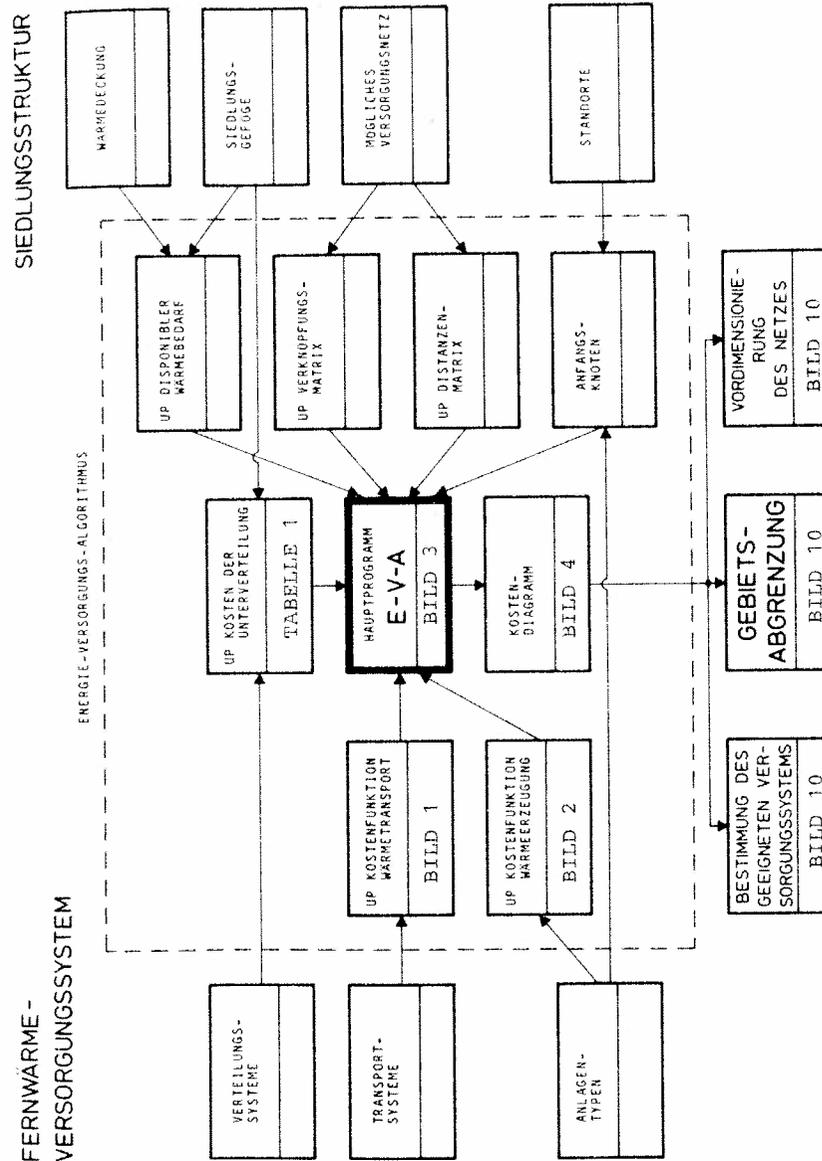


BILD 5: Energie-Versorgungs-Algorithmus E-V-A mit Unterprogrammen sowie den dabei berücksichtigten Merkmalen des Versorgungssystems und der Siedlungsstruktur

TABELLE 1: Spezifische Wärmeverteilungskosten für verschiedene Siedlungstypen. Kostenstand 1982.

Siedlungstyp Nr.	Art der Bebauung	Wärmehöchst- leistungsbe- darf	Anschlüsse pro km ²	Leitungs- länge pro 500 x 500	Spez.Ver- teilungs- kosten
		$\left[\frac{\text{MJ/s}}{\text{km}^2} \right]$	$[1/\text{km}^2]$	$[m]$	$\left[\frac{\text{DM}}{\text{kJ/s} \cdot \text{a} \cdot \text{m}^2} \right]$
1	Ein- und Mehr- familienhaus- siedlung nied- riger Dichte	11	484	3650	669,22
2	Dorfkern und Einfamilien- haussiedlung hoher Dichte	21	787	3812	419,21
3	Reihenhaus- siedlung	19	920	3850	493,03
4	Zeilenbebau- und mittlerer Dichte	42	566	3711	193,64
5	Zeilenbebau- ung hoher Dichte und Hochhäuser	42	493	3658	193,54
6	Blockbebauung	48	787	3812	190,44
7	Citybebauung ab Mitte 19. Jahrhundert	54	920	3850	180,46
8	Mittelalter- liche Altstadt	108	1494	3935	116,77
9	Industrie- und Lagergebäude	43	298	3387	170,54

BILD 5 sind alle in dem Verfahren verwendeten Komponenten sowie die Unterprogramme, über die sie in den Algorithmus eingehen, dargestellt und je nach ihrer Zugehörigkeit den Bereichen "Versorgungssystem" oder "Siedlungsstruktur" zugeordnet.

Eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Unterprogramme ist dem Abschlußbericht des Forschungsprojekts zu entnehmen (TIETZ 1983). Im Rahmen des hier vorgestellten Anwendungsbeispiels soll eine kurze Darstellung der wichtigsten Komponenten genügen.

Die Kosten der Unterverteilung werden mit Hilfe der in den Teilgebieten durch Luftbilder identifizierten Siedlungstypen sowie den in TABELLE 1 aufgeführten flächenspezifischen Kostenwerten berechnet.

Die Größe und räumliche Verteilung des Wärmebedarfs wird unter Berücksichtigung der bisherigen Wärmeversorgungssysteme ebenfalls über Siedlungstypen aus der Siedlungsstruktur als sogenannter für die Fernwärmeversorgung "disponibler" Wärmebedarf ermittelt.

Ein Beispiel für die räumliche Verteilung des Wärmebedarfs und ein mögliches Leitungsnetz als Grundlage für die Berechnungen ist in BILD 7 dargestellt.

4 Anwendungsbeispiel KARLSRUHE-OST =====

4.1 Das Untersuchungsgebiet

Das Gebiet im Osten der Stadt Karlsruhe (BILD 6) wurde ausgewählt, da es zur Zeit auch von den Stadtwerken Karlsruhe auf seine Eignung für einen Ausbau der Fernwärmeversorgung hin untersucht wird. Das in diesem Gebiet vorhandene Dampfnetz und das dazugehörige, mit schwerem Heizöl betriebene Heizwerk-Ost (32 MJ/s) muß in den nächsten Jahren erneuert werden. Da das Fernwärmenetz von Karlsruhe vorwiegend aus einem im Westen der Stadt liegenden Heizkraftwerk (264 MJ/s) versorgt wird, hat es sich in den letzten Jahren von Westen her bis in die Stadtmitte ausgedehnt und endet zur Zeit am westlichen Rand des Untersuchungsgebiets (siehe ebenfalls BILD 6). Ein Zusammenschluß der

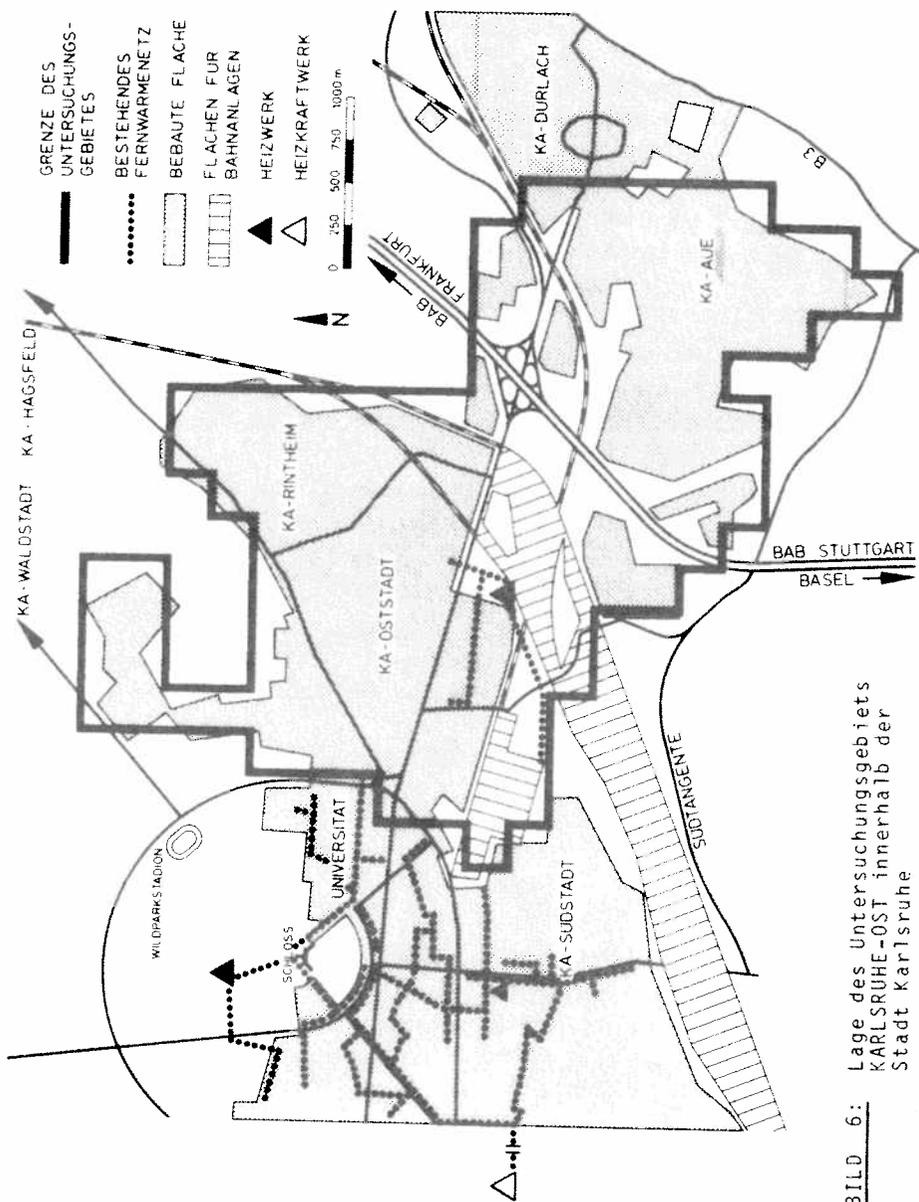


BILD 6: Lage des Untersuchungsgebiets KARLSRUHE-OST innerhalb der Stadt Karlsruhe

Netze ist wegen der unterschiedlichen Betriebsart (Heißwasser im Westen, Dampf im Osten) bisher nicht möglich gewesen. Langfristig ist dies aber erstrebenswert, da durch eine zusätzliche Einspeisung in das Hauptnetz von Osten die Versorgungssicherheit erheblich erhöht werden könnte.

Ein weiterer Grund für die Auswahl des Gebiets liegt darin, daß der Standort des bisherigen Heizwerks-Ost von der Stadt Karlsruhe auch als möglicher Standort für eine Müllverbrennungsanlage in Betracht gezogen wird.

BILD 7 zeigt das Untersuchungsgebiet, wie es für die Anwendung des Energie-Versorgungs-Algorithmus verwendet wird. Die Einteilung des Gesamtgebiets in Planquadrate 250 m x 250 m erfolgt in Anlehnung an den Wärmeatlas der Stadt Karlsruhe (STADT KARLSRUHE 1982). Eine Einteilung in Baublöcke wäre ebenso möglich.

Für jedes Planquadrat wurden die möglichen Verknüpfungen zu den Nachbarquadraten, der Wärmehöchstleistungsbedarf sowie die jeweilige Siedlungsstruktur im Planquadrat ermittelt. Zur Erhöhung der Aussagegenauigkeit bei der Ermittlung der Unterverteilungskosten wurden pro Planquadrat jeweils bis zu zwei Siedlungstypen mit ihren prozentualen Freiflächenanteilen an der Gesamtfläche und gegebenenfalls der Freiflächenanteil ermittelt. Dazu wurden topographische Karten 1 : 2000 sowie Luftbilder (Schrägbildaufnahmen) herangezogen. Beispiele hierfür befinden sich in TIETZ (1983).

4.2 Disponibler Wärmebedarf

Die Berechnung des für die Fernwärmeversorgung disponiblen Wärmebedarfs im Untersuchungsgebiet KARLSRUHE-OST erfolgt entsprechend der jeweiligen Wärmedeckung¹⁾ in einem Planquadrat und berücksichtigt eine künftige Anschlußquote der einzelnen Energieträger. Diese drückt aus, zu wieviel Prozent der Wärmebedarf im Planungszeitraum z.B. durch Fernwärme gedeckt werden wird. Der Übergang von einem Energieträger

1) Anteile der Versorgungssysteme Fernwärme, Gas, Elektro oder Öl am Gesamtwärmebedarf des Planquadrats.

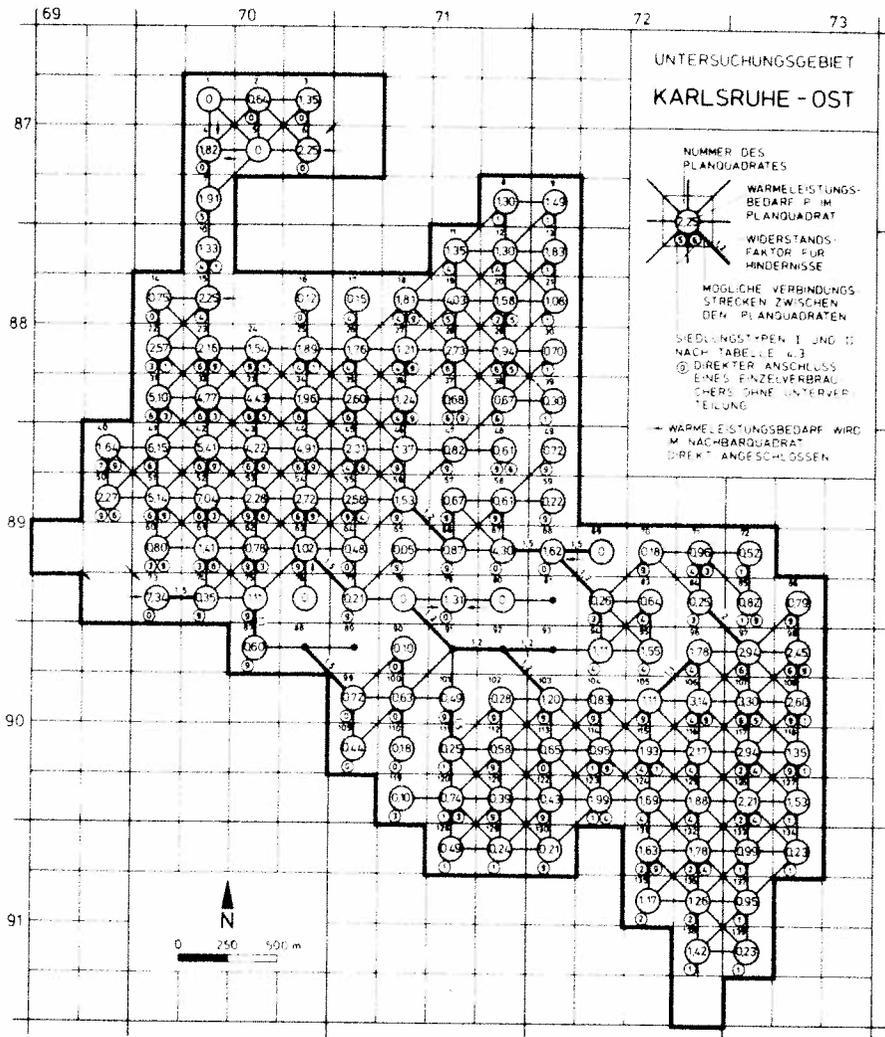


BILD 7: Abbildung von Wärmehöchstleistungsbedarf und Siedlungsstruktur in den Planquadraten des Untersuchungsgebiets KARLSRUHE-OST sowie der möglichen Verknüpfungen zwischen den Planquadraten und deren Widerstandsfaktoren

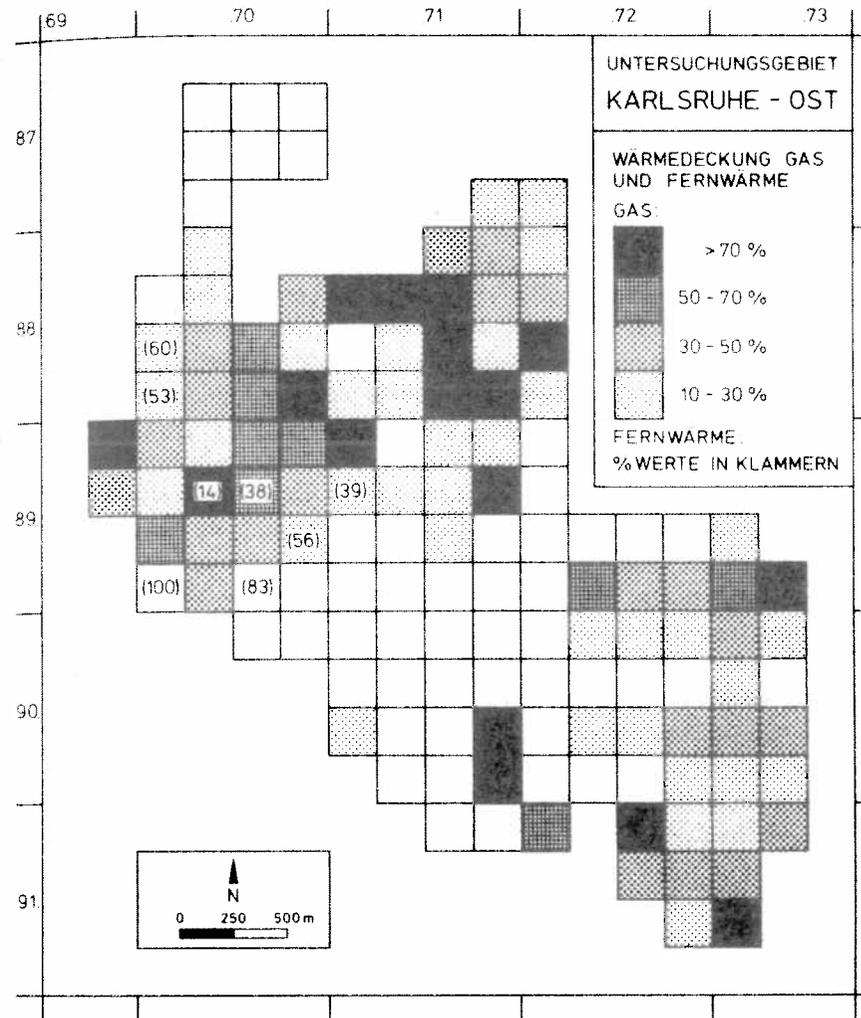


BILD 8: Bisherige Wärmedeckung durch Gas und Fernwärme im Untersuchungsgebiet. Der übrige Wärmebedarf wird vorwiegend durch Heizöl gedeckt. Stand 1982. Quelle: Stadtwerke Karlsruhe

auf einen anderen ist u.a. abhängig von den jeweiligen Preisrelationen untereinander (z.B. Fernwärme billiger als Öl), zum Teil auch von der Unternehmensentscheidung des Querverbund-Energieversorgungsunternehmens, die Gasversorgung zu Gunsten der Fernwärmeversorgung abzubauen, statt in die Erneuerung oder Ertüchtigung eines abgeschriebenen Netzes zu investieren. Außerdem läßt sich über die Anschlußquote berücksichtigen, ob Modernisierungs- oder Sanierungsmittel in das Teilgebiet (PLQ) fließen werden, wodurch die beschleunigte Umstellung auf Sammelheizungen mit Fernwärmeanschluß erwartet werden kann. Schließlich kann in dieser Anschlußquote auch ausgedrückt werden, um wieviel der Wärmebedarf infolge von Dämmmaßnahmen oder verändertem Verbraucherverhalten bis zum Ende des Planungszeitraums zurückgehen wird.

Die Höhe der Anschlußquote ist in den bisher durch Gas versorgten Teilgebieten (BILD 8) vor allem davon abhängig, ob ein Abbau der bisherigen Versorgung zu Gunsten der Fernwärme wirtschaftlich verantwortet werden kann. Dies ist in der Regel nur dann möglich, wenn die Gasversorgungsleitungen sowie die Feuerungsanlagen bei den Verbrauchern betriebswirtschaftlich abgeschrieben sind.

In Teilgebieten, die bisher schon mit Fernwärme versorgt wurden, kann davon ausgegangen werden, daß dieser Bedarf auch künftig durch Fernwärme gedeckt werden wird. Durch Wärmedämmmaßnahmen oder verändertes Verbraucherverhalten (Sparen) ist jedoch auf lange Sicht in einem vorhandenen Fernwärmesystem mit einer geringeren Anschlußleistung zu rechnen.

Die Anschlußquote in bisher durch Heizöl versorgten Gebieten ergibt sich aus der Anzahl der Häuser, die bereits an eine Sammelheizung angeschlossen sind. Falls die bisherige Anlage erneuerungsbedürftig ist, ist eine Umstellung auf Fernwärme mit geringeren Investitionen möglich, als bei solchen Häusern, die hohe Investitionen in den Einbau einer Sammelheizung erfordern. Die Bereitschaft hierzu ist auch davon abhängig, ob die Investoren zugleich Nutznießer verringerter Energiekosten sind.

4.3 Szenarien für die Entwicklung des Wärmebedarfs

Um die Auswirkungen auf die Gebietsabgrenzung, die Wirtschaftlichkeit eines Fernwärmeversorgungssystems und die Netzausbildung deutlich zu machen, werden für das Anwendungsbeispiel KARLSRUHE-OST vier Szenarien für die Entwicklung des für die Fernwärme disponiblen Wärmebedarfs gebildet.

SZENARIO I: Gas 0 %; Fernwärme 80 %; Öl 60%¹⁾

In diesem Fall wird davon ausgegangen, daß die Fernwärmeversorgung ohne flankierende Maßnahmen bei einem Preis eingeführt wird, der unter dem für Heizöl liegt. Es werden alle bisherigen Fernwärmekunden angeschlossen, wobei sich der Wärmeleistungsbedarf durch Wärmedämmung und Sparmaßnahmen auf 80 % des bisherigen Wertes verringert. Das Gasnetz bleibt voll erhalten, und bei den bisher mit Öl versorgten Abnehmern wird lediglich derjenige Anteil von 60 % an die Fernwärme angeschlossen, der bereits eine Sammelheizung besitzt.

SZENARIO II: Gas 0 %, Fernwärme 90 %; Öl 80 %

Es gelten die Voraussetzungen wie bei Szenario I, jedoch sollen hier zur Förderung der Umstellung auf Sammelheizungen Modernisierungsmittel in das Untersuchungsgebiet gelenkt werden. Dadurch erhöht sich die Anschlußquote auf 80 % bei den sonstigen Energieträgern. Der Bedarf der bisherigen Fernwärmeverbraucher wird dann vermutlich durch Wärmedämmung und Sparen in geringerem Maße, nämlich lediglich auf 90 Prozent verringert werden.

SZENARIO III: Gas 50 %; Fernwärme 80 %; Öl 60 %

Es gelten ebenfalls die Voraussetzungen wie bei Szenario I, hier wird jedoch davon ausgegangen, daß künftig 50 Prozent des bisher durch Gas gedeckten Wärmeleistungsbedarfs durch Fernwärme gedeckt werden und das teilweise veraltete Stadtgasnetz nicht erneuert wird.

SZENARIO IV: Gas 100 %; Fernwärme 100 %; Öl 100 %

Als Vergleichswert gegenüber den übrigen drei Szenarien wird hier angenommen, daß der gesamte Wärmeleistungsbedarf im Untersuchungsgebiet

¹⁾ Die Prozentzahlen geben an, wieviel Prozent der bisherigen Wärmedeckung künftig für die Fernwärmeversorgung disponibel sein werden.

durch Fernwärme abgedeckt wird, was sich, zumindest theoretisch, durch die Einführung eines Anschluß- und Benutzungszwanges erreichen ließe.

5 Ergebnisse des E-V-A für KARLSRUHE-OST

Mit Hilfe des Energie-Versorgungs-Algorithmus E-V-A können dann für einen Standort des Anwendungsbeispiels KARLSRUHE-OST folgende Fragen beantwortet werden:

1. Wie groß sind die geringstmöglichen spezifischen Jahreskosten für die Fernwärmeversorgung durch eine bestimmte Wärmeerzeugungsanlage?
2. Wie ist das Versorgungsgebiet abzugrenzen, in dem die Kosten unter einem bestimmten (minimalen, anlegbaren) Wärmepreis liegen?
3. Welche Reduzierung der spezifischen Jahreskosten ergibt sich in dem Gesamtsystem, wenn durch gezielte Maßnahmen der disponible Wärmebedarf erhöht wird?
4. Welche Veränderung der spezifischen Jahreskosten ergibt sich für mögliche Standortalternativen?

5.1 Untersuchung des Standorts "Heizwerk-Ost"

Für den Standort "Heizwerk-Ost" (PLQ 64) sollen zunächst die Fragen 1 bis 3 beantwortet und die Möglichkeit einer Interpretation der Ergebnisse aufgezeigt werden.

- Minimale Gesamtkosten

Frage 1 läßt sich mit Hilfe der in BILD 9 dargestellten Kostendiagramme für drei¹⁾ unterschiedliche Wärmeerzeugungsanlagen beantworten. Dabei liegt für den disponiblen Wärmebedarf jeweils Szenario II zugrunde. Aus den Diagrammen ergeben sich die geringsten Jahreskosten zu ca. 117 000 DM pro MJ/s bei Verwendung einer Gegendruck-Anlage mit einer Anschlußleistung von etwa 55 MJ/s, einem für diesen Anlagentyp recht niedrigen Wert.

Mit einer Gasturbinenanlage werden nur geringfügig höhere minimale

1) Aufgrund der Standortbedingungen wurde für den Standort Heizwerk-Ost auf die Berechnungen für eine Entnahme- und eine Anzapf-Kondensationsanlage (BILD 2) verzichtet.

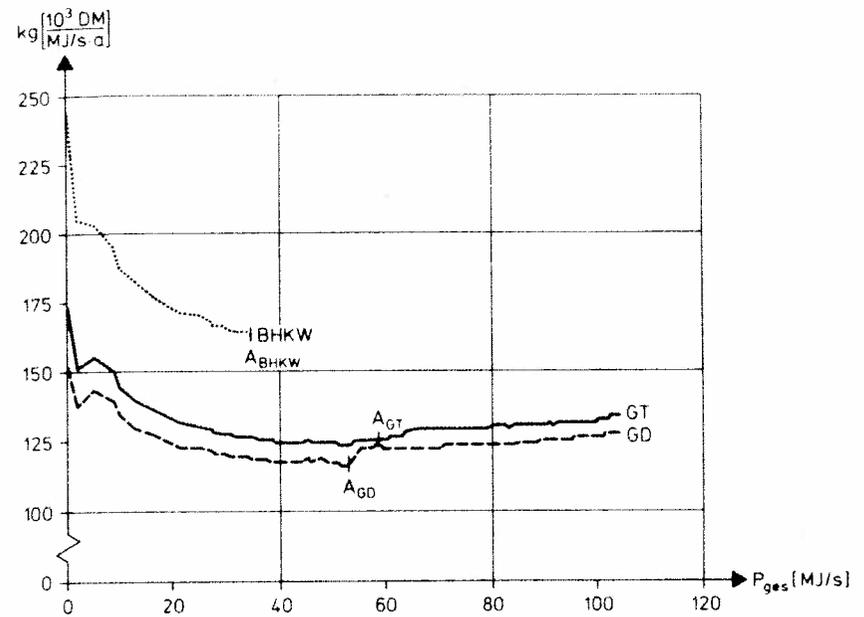


BILD 9: Kostendiagramme für den Standort "Heizwerk-Ost" (PLQ 64) bei Wärmeerzeugung durch ein Blockheizkraftwerk (BHKW), eine Gasturbine (GT) bzw. eine Gegendruckanlage (GD). Wärmebedarf nach Szenario II

Jahreskosten erreicht, während bei einem Blockheizkraftwerk wesentlich höhere Gesamtkosten in Kauf genommen werden müssen, die sich zudem erst bei völliger Ausschöpfung des Leistungsbereiches dieser Anlage ergeben.

- Versorgungsgebietsgröße

BILD 10 zeigt diejenigen Versorgungsgebiete, welche sich bei den einzelnen Wärmeerzeugungsanlagen nach dem Abbruchkriterium 'minimale Gesamtkosten' in BILD 9 ergeben. Für das Blockheizkraftwerk bildet sich wegen der Kapazitätsbeschränkung auf 35 MJ/s das kleinste Versorgungsgebiet aus. Es ist interessant, daß sich die geringsten Gesamtkosten bei Verwendung der Gegendruckanlage in einem kleineren Versorgungsgebiet erreichen lassen als bei einer Gasturbine, die in den Gesamtkosten etwas höher liegt.

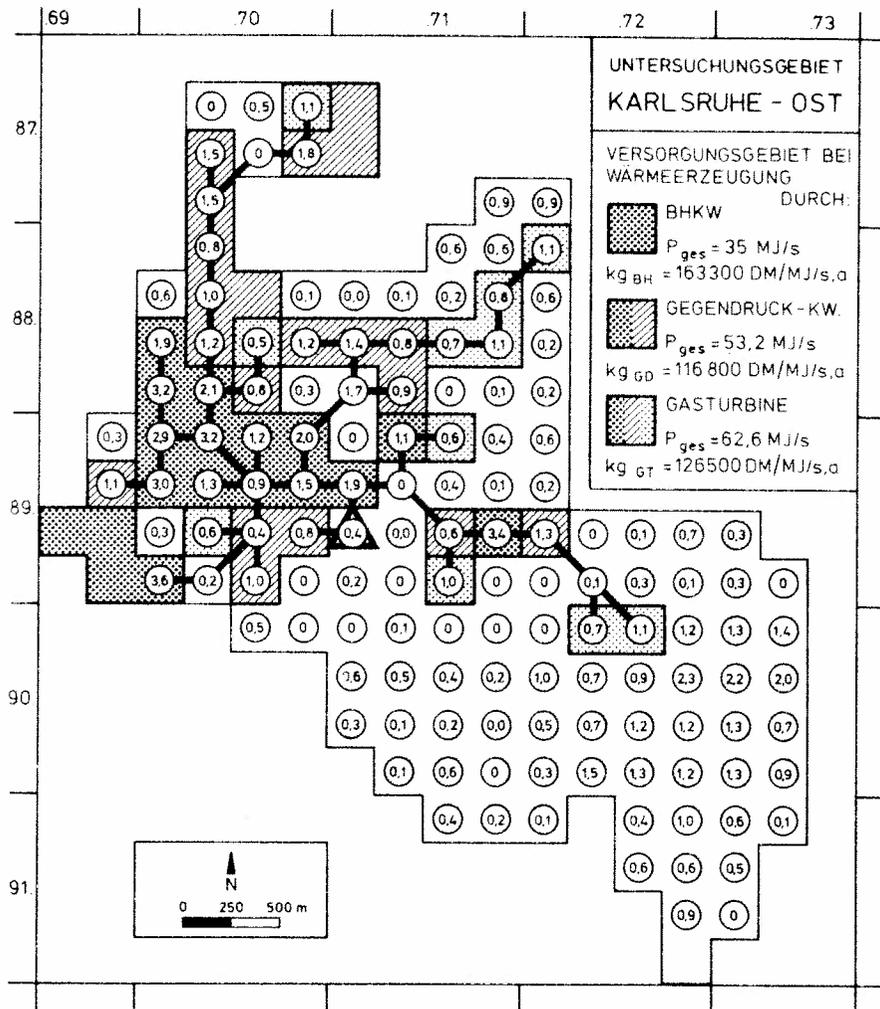


BILD 10: Versorgungsgebiete für den Standort PLQ 64 bei Blockheizkraftwerk, Gasturbine und Gegendruckkraftwerk als Wärmeerzeugungsanlage. Zugehörige Abbruchpunkte AB_H , AG_T und AG_D siehe BILD 9. Disponibler Wärmebedarf nach Szenario II

Die Versorgungsgebiete sind nicht geschlossen, d.h. einzelne Planquadrate bleiben unversorgt, obwohl sie inmitten versorgter Teilgebiete liegen. Dabei handelt es sich meistens um Gebiete mit einem hohen Gasversorgungsanteil, in denen sich für die Fernwärme nur ein geringer disponibler Wärmebedarf ergibt, der nur unter hohen Verteilungskosten erschlossen werden kann.

Bei einem Standort in Planquadrat 64 ergibt sich für den südlichen Teil des Untersuchungsgebiets keine wirtschaftliche Fernwärmeversorgung, wenn das Kostenminimum als Abbruchkriterium verwendet wird. Sofern der untersuchte Standort in Planquadrat 64 eine Wärmeerzeugungsanlage mit mehr als 60 MJ/s Ausbauleistung zuläßt, kann jedoch nach Überschreiten des Kostenminimums der gesamte südliche Teil des Untersuchungsgebiets bei relativ geringem Anstieg des Wärmepreises versorgt werden. Aufgrund der hierfür erforderlichen hohen Investitionen in den Netzausbau wäre ein solcher Anschluß aber erst nach mehreren Jahren möglich.

- Einfluß des disponiblen Wärmebedarfs

Mit Hilfe der Kostendiagramme für unterschiedliche Entwicklungen des disponiblen Wärmebedarfs lassen sich quantitative Aussagen darüber machen, welche Verringerung der Gesamtkosten des Energiesystems durch welche Investitionen zur Erhöhung der Investitionsbereitschaft an die Fernwärme erzielt werden kann.

Für das Untersuchungsgebiet KARLSRUHE-OST zeigt BILD 11, daß sich bei einem Vollanschluß aller Abnehmer (Szenario IV) Jahreskosten von annähernd 100 000 DM pro MJ/s erreichen ließen. Ohne Unterstützung der Anschlußbereitschaft muß dagegen mit Jahreskosten von 132 000 DM pro MJ/s gerechnet werden. Eine Modernisierungsförderung in dem Untersuchungsgebiet (Szenario II) läßt eine Verringerung auf 124 000 DM pro MJ/s und Jahr erwarten, die Übernahme von durchschnittlich 50 Prozent des bisherigen Gasanteils (Szenario III) eine Reduzierung der Jahreskosten auf 120 000 DM pro MJ/s. Damit zeigt sich, daß durch eine Modernisierungsförderung, die zusätzlich positive städtebauliche Impulse für das Gebiet mit sich bringen kann, annähernd die gleiche Wirtschaftlichkeit erreicht wird, wie durch den volkswirtschaftlich wenig sinnvollen Abbau des Gasnetzes.

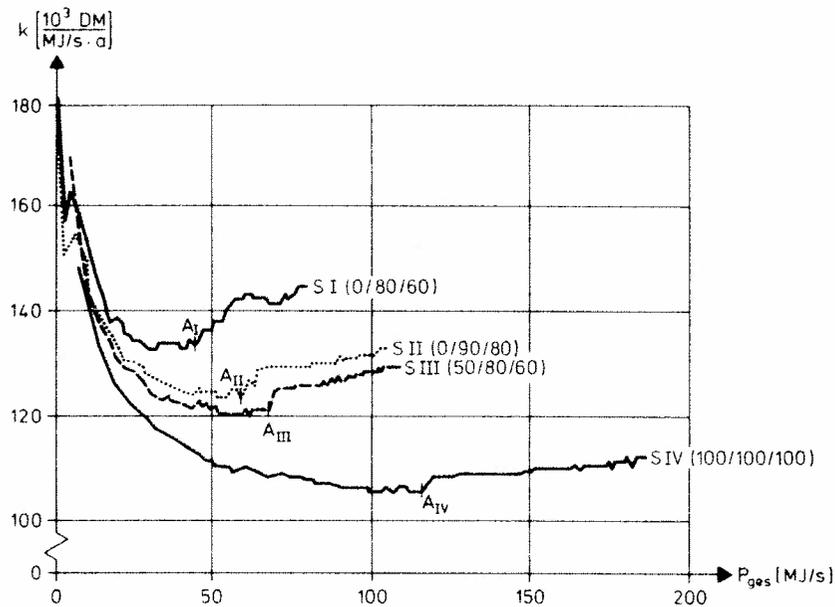


BILD 11: Kostendiagramme für den Standort PLQ 64 bei Wärmeerzeugung durch eine Gasturbinenanlage und unterschiedlichen Szenarien des disponiblen Wärmebedarfs im Untersuchungsgebiet. Kostenstand 1982

5.2 Untersuchung von Standortalternativen

Der Energie-Versorgungs-Algorithmus eignet sich ebenfalls dazu, Standortalternativen für Wärmeerzeugungsanlagen zu untersuchen (Frage 4). Hierzu wird das Kostendiagramm für unterschiedliche Standorte berechnet. Mit seiner Hilfe wird dann der Einfluß der räumlichen Lage einer Wärmeerzeugungsanlage auf die Ausbildung des Verteilungsznetzes in einer gegebenen Siedlungsstruktur ermittelt.

Als Alternative zu dem Standort "Heizwerk-Ost" im Planquadrat 64, der etwa in der Mitte des Untersuchungsgebietes liegt, wurden zwei Stand-

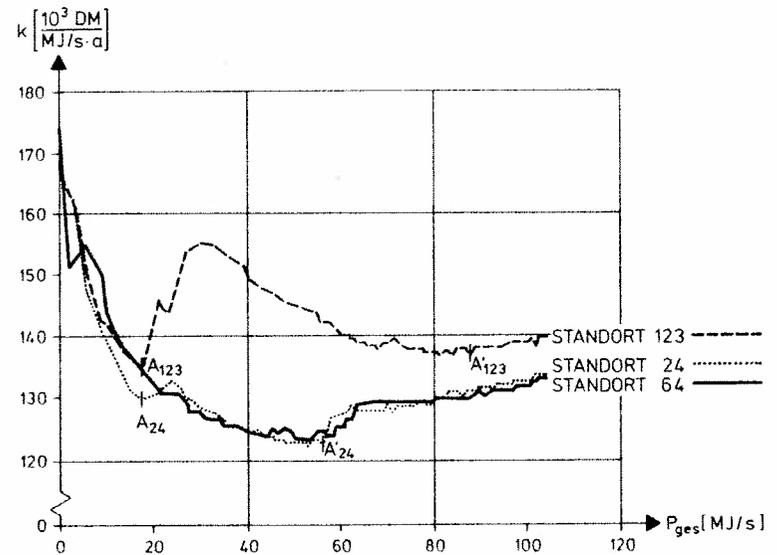


BILD 12: Kostendiagramme für die Standorte PLQ 24, PLQ 64 und PLQ 123 bei Wärmeerzeugung durch eine Gasturbinenanlage und disponiblen Wärmebedarf nach Szenario II

orte betrachtet, von denen der eine weiter im Norden (PLQ 24), der andere weiter im Süden (PLQ 123) liegt.

Dabei zeigt sich, daß die Kostendiagramme (BILD 12) für die Standorte PLQ 64 und PLQ 24, die beide am Rand der nördlichen Wärmebedarfsverdichtung liegen, einen weitgehend identischen Verlauf aufweisen. Das Kostendiagramm für den Standort bei dem kleineren, südlich gelegenen Verdichtungsgebiet liegenden Standort ergibt dagegen aufgrund der siedlungsstrukturellen Verhältnisse einen stark abweichenden Verlauf.

Nach Anschluß eines Wärmebedarf von etwa 20 MJ/s werden wie bei den anderen Standorten Jahreskosten zwischen 130 000 und 140 000 DM pro MJ/s erreicht. Danach ist jedoch durch Anschluß weiterer Wärmesenken vom südlichen Standort keine Verringerung der Jahreskosten mehr mög-

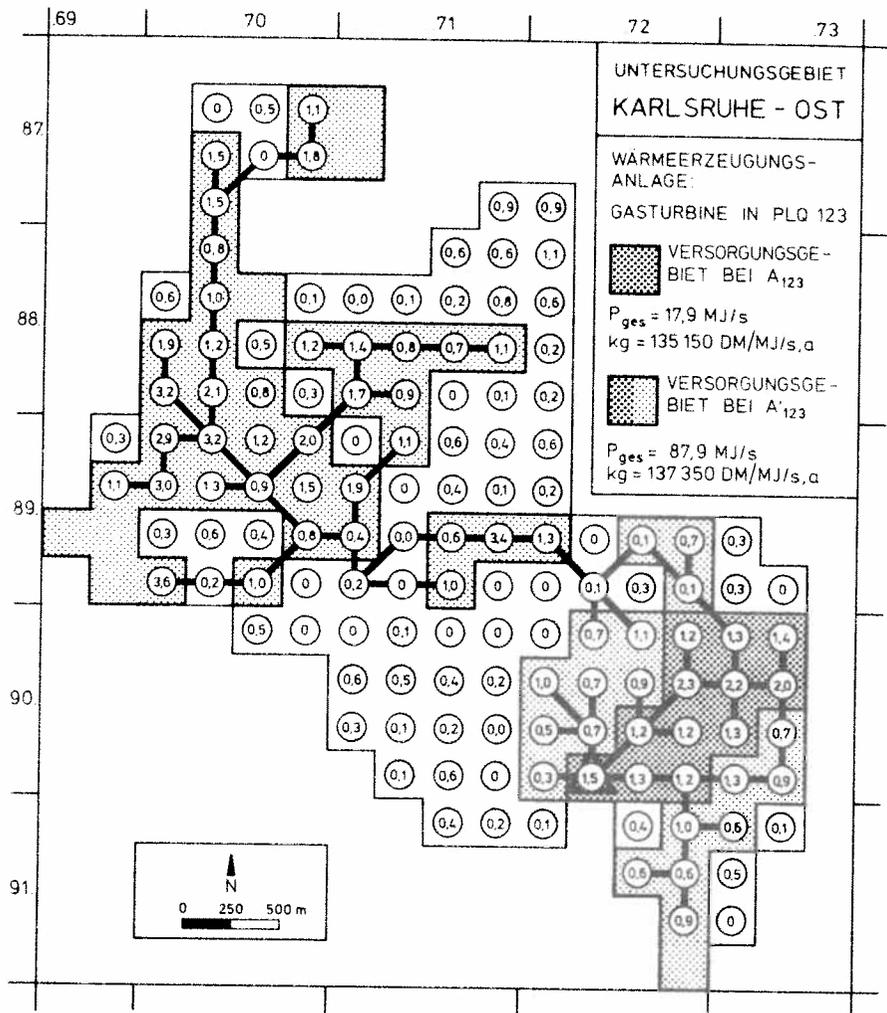


BILD 13: Versorgungsgebiete für den Standort PLQ 123 mit einer Gasturbine als Wärme­erzeugungsanlage bei den Abbruchstellen A₁₂₃ und A'₁₂₃ (BILD 12). Wärmebedarf nach Szenario II

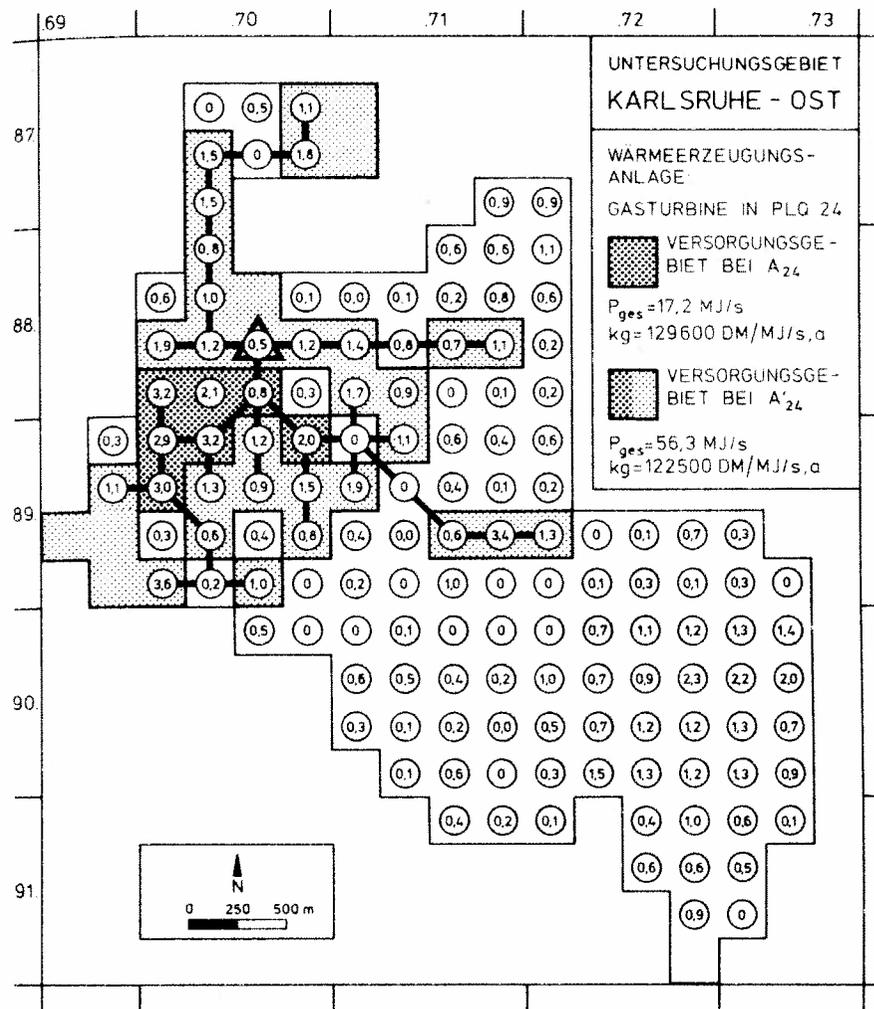


BILD 14: Versorgungsgebiete für den Standort PLQ 24 mit einer Gasturbine als Wärme­erzeugungsanlage bei den Abbruchstellen A₂₄ und A'₂₄ (BILD 12). Wärmebedarf nach Szenario II

lich. Die hohen Potentiale des nördlichen Versorgungsgebiets müssen dann mit relativ hohem Aufwand angeschlossen werden. Die hierdurch entstehenden Gesamtkosten aufgrund der Transportleitungen werden erst wieder bei einer Gesamtausbauleistung von ca. 60 MJ/s ausgeglichen. Diese liegen dann aber ca. 10 000 DM pro MJ/s und Jahr höher als bei den beiden anderen Standorten.

BILD 13 und BILD 14 zeigen die Versorgungsgebiete, wie sie sich für die Standorte PLQ 123 und PLQ 24 bei den Abbruchstellen aus BILD 12 ergeben. Das Versorgungsgebiet zu PLQ 64 ist bereits in BILD 10 dargestellt.

6 Zusammenfassung =====

Mit dem Energie-Versorgungs-Algorithmus E-V-A steht somit ein Instrument zur Verfügung, mit dessen Hilfe in dem Abstimmungsprozeß der Energieträger untereinander sowie zwischen dem Versorgungssystem Fernwärme und den jeweiligen siedlungsstrukturellen Gegebenheiten konkrete Aussagen über die räumliche Abgrenzung des Versorgungsgebiets mit Hilfe der darin entstandenen Jahreskosten möglich sind.

Durch die Berechnung der Ausbauschnitte in diesen Gebieten nach betriebswirtschaftlichen Kriterien lassen sich dann Strategien für den Ausbau der Netze und die zeitlich vorausschauende Unterstützung des Fernwärmesystems durch städtebauliche Begleitmaßnahmen entwickeln und auf ihre Wirtschaftlichkeit überprüfen. Denkbar wäre hier eine Ergänzung des Verfahrens durch die dynamische Investitionsrechnung.

LITERATURHINWEISE

- BMBau (1980) - BUNDESMINISTERIUM FÜR RAUMORDNUNG, BAUWESEN UND STÄDTEBAU (Hrsg.): Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeverversorgungssystemen. Schriftenreihe Raumordnung 06.044. Bonn: BMBau.
- DIAL, R.B. (1969): Algorithm 360 - Shortest Path Forest With Topological Ordering. Communications of the ACM 12: 632-633.
- HARTUNG, H.-H. (1981): Wegemodelle. Verfahren und Algorithmen. GEOMOD Band 1. Paderborn: Schöningh.
- MEINKE, D. (1970): Gravitations- und Potentialmodelle. In: Handwörterbuch für Raumforschung und Raumordnung I: 1048-1060. Hannover: Jä-necke.
- STADT KARLSRUHE (Hrsg.) (1982): Örtliches Versorgungskonzept. Versorgung der Stadt Karlsruhe mit leitungsgebundenen Energien. Zwischenbericht Juni 1982. (Unveröffentlicht)
- STEWART, J.Q. (1948): Demographic Gravitation: Evidence and Applications. In: Sociometry 11, 1 + 2: 31-58.
- STEWART, J.Q und W. WARNTZ (1958): Physics of Population Distribution. In: Journal of Regional Science 1, 1: 167-184.
- TIETZ, H.-P. (1982): Energiebewußte Stadtplanung. In: LAMMERS, G. und H.-P. TIETZ (Hrsg.): Energie im Städtebau. Seminarberichte des Instituts für Städtebau und Landesplanung. Karlsruhe: Institut für Städtebau und Landesplanung.
- TIETZ, H.-P. (1984): Erschließungs- und Standortplanung für die Fernwärmeverorgung. =Schriftenreihe des Instituts für Städtebau und Landesplanung, Heft 17. Karlsruhe: Institut für Städtebau und Landesplanung.
- TIETZ, H.-P und A. OESTERLE (1984): Kostenfunktionen für Erzeugung, Transport und Verteilung von Fernwärme. Karlsruhe: Institut für Städtebau und Landesplanung.