

# Diplomarbeit

Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft

Fakultät Geomatik

Studiengang Kartographie und Geomatik



## Prototypische Umsetzung einer GIS- gestützten Nahwärmenetzkonzeption mit Netzwerkerstellung und –Analyse

**Martin Miksche**

September 2010



Prüfer:

Prof. Dr. –Ing. Gerhard Schweinfurth  
Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft



Betreuer:

Biologiedirektor Manfred Müller  
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg



In Zusammenarbeit mit der  
Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg

Klimaschutz- und  
Energieagentur  
Baden-Württemberg  
GmbH



**KEA**

## **Diplomarbeit**

für Herrn Martin M i k s c h e

### **Thema: Prototypische Umsetzung einer GIS-gestützten Nahwärmenetzkonzeption mit Netzwerkerstellung und -analyse**

Die Verbrennung von fossilen Rohstoffen zur Bereitstellung von Wärme (Raumwärme und Warmwasseraufbereitung) führt zu einem dramatischen Ausstoß an Kohlenstoffdioxid und schädigt nachhaltig die Umwelt. Alternativ können erneuerbare Energien wie Solarstrahlung, Biomasse oder Geothermie zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden. Eine zentrale Umwandlung der Energieträger in Wärme mit anschließender Verteilung über ein Nahwärmenetz erweist sich dabei wirtschaftlich gesehen als wesentlich vorteilhafter und umweltschonender als der Einsatz mehrerer Einzelheizungsanlagen. Bei der Planung eines Nahwärmenetzes spielen georeferenzierte Daten eine wichtige Rolle, weshalb sich der Einsatz eines Geoinformationssystems anbietet.

Bereits im Jahr 2008 wurde vom Umweltministerium Baden-Württemberg die „Kooperationsinitiative Nahwärme“ ins Leben gerufen mit dem Ziel, die dezentrale Energieversorgung und -nutzung in der Zukunft weiter auszubauen und konkrete Umsetzungskonzepte zu erarbeiten. Unter anderem wurde zunächst die Firma K.GROUP aus München mit einer Potenzialanalyse beauftragt, wobei mithilfe eines Geoinformationssystems Wärmeatlanten für Baden-Württemberg erstellt werden sollten. Die Initiative läuft noch bis Mitte 2010 und soll danach von der Klimaschutz- und Energieagentur (KEA) Baden-Württemberg weitergeführt werden. Diese soll bei der Nutzung von Nahwärme und dezentraler Kraft-Wärme-Kopplung v.a. durch die Stadtwerke in Baden-Württemberg beratend tätig werden.

Im Rahmen der Diplomarbeit soll für die KEA ein geeignetes Netzwerkanalysetool konzipiert und – mit Schnittstellen zu einer im Rahmen einer Bachelorthesis erstellten GIS-Anwendung (automatisierte Generierung der Hausanschlussleitungen bis zum Verteilernetz im Bereich des Straßenkörpers) – prototypisch umgesetzt werden. Ziel soll es sein, das Werkzeug künftig bei Voruntersuchungen, Konzepten sowie Machbarkeitsstudien zur Nahwärmenutzung einzusetzen.

Bestandteil der Arbeit ist zunächst der Aufbau einer Datengrundlage und die Erstellung eines Nahwärmenetzes unter Berücksichtigung des optimalen Verlaufs der Hauptrohrleitungen. Als Spezialaufgabe soll eine Funktion entwickelt werden, welche zunächst ein Nahwärmenetz analysiert und anschließend die Dimensionierung der Hauptrohrleitungen automatisch berechnet. Die verschiedenen Funktionen sollen in einem benutzerfreundlich bedienbaren Anwendungswerkzeug zusammengeführt und mit einer ansprechenden graphischen Benutzeroberfläche versehen werden. Die Umsetzung erfolgt mit ArcMap der Fa. ESRI in der Programmiersprache „Visual Basic for Applications (VBA)“.

Die Arbeit wird im Informationstechnischen Zentrum der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg in Zusammenarbeit mit der KEA durchgeführt. Die Datenbank des Umweltinformationssystems mit den amtlichen Geobasisdaten (v.a. ALK und ATKIS) und die GIS-Infrastruktur des Räumlichen Informations- und Planungssystems (RIPS) Baden-Württemberg stehen zur Verfügung.

Bearbeitungszeit: 4 Monate

Ausgabedatum: .....

Abgabedatum: .....

.....  
(Prof. Dr.-Ing. G. Schweinfurth)

# Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungskommission vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

.....

Ort, Datum

.....

Martin Miksche

# Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Schweinfurth für die Betreuung der Diplomarbeit seitens der Hochschule Karlsruhe.

Ich danke Herrn Biologiedirektor Manfred Müller für die Betreuung der Diplomarbeit seitens der LUBW.

Herrn Dipl.-Ing. Helmut Böhnisch und Herrn Dipl.-Ing. Harald Bieber von der KEA danke ich für die Zusammenarbeit während der Diplomarbeit.

Herrn Dipl.-Betriebsw. (FH) Volker Wefels von den Stadtwerken Karlsruhe danke ich für die Zusammenarbeit und die Bereitstellung der Daten.

Ein weiteres Dankeschön geht an alle Mitarbeiter im Sachgebiet 53.2 der LUBW.

Ich danke allen meinen Freunden und Kommilitonen für die wunderbare Zeit!

Ira, vielen Dank für das Korrekturlesen und deine Geduld mit mir! Ich bin so froh dass ich dich hab!

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern und meinen Geschwistern, die immer für mich da sind und mich in allem unterstützen, euch widme ich diese Arbeit.

Danke für alles! Ich liebe Euch.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>8</b>
<b>1.1</b>	<b>Beteiligte</b>	<b>10</b>
1.1.1	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg	10
1.1.2	Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH	11
<b>2</b>	<b>NAHWÄRME</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Definition</b>	<b>12</b>
<b>2.2</b>	<b>Netzstruktur</b>	<b>12</b>
2.2.1	Rohrleitungen und Abnehmer	12
2.2.1.1	Netzformen	15
2.2.1.2	Trassenführung	16
2.2.2	Heizzentrale	17
<b>3</b>	<b>ERMITTLUNG DER HAUPTLEITUNGEN</b>	<b>19</b>
<b>3.1</b>	<b>Netzwerkanalyse</b>	<b>19</b>
<b>3.2</b>	<b>Datengrundlage</b>	<b>21</b>
3.2.1	Sachdaten	21
3.2.2	Geometriedaten	21
<b>3.3</b>	<b>Graphentheorie</b>	<b>24</b>
<b>3.4</b>	<b>Routing</b>	<b>27</b>
3.4.1	Dijkstra-Algorithmus	29
3.4.2	Network Analyst	35
3.4.3	Network Dataset – Erstellung und Analyse	36
<b>4</b>	<b>VERSORGUNGSNETZWERK</b>	<b>43</b>
<b>4.1</b>	<b>Geometric Network – Bestandteile</b>	<b>43</b>



4.1.1	Kanten.....	44
4.1.1.1	Netzelemente .....	45
4.1.2	Knoten.....	48
4.1.2.1	Netzelemente .....	49
4.1.3	Quellen und Senken .....	55
4.1.4	Netzwerkgewichtung.....	55
4.1.5	Aktiviert/ deaktiviert.....	56
<b>4.2</b>	<b>Geometric Network – Erstellen und Editieren.....</b>	<b>56</b>
4.2.1	Einstellungen .....	56
4.2.2	Eigenschaften .....	61
4.2.3	Fehleranalyse .....	67
4.2.3.1	Geometrie.....	67
4.2.3.2	Konnektivität.....	68
<b>4.3</b>	<b>Geometric Network – Analyse .....</b>	<b>69</b>
4.3.1	Fließrichtung .....	69
4.3.2	Ablaufverfolgung.....	71
4.3.2.1	Flaggen und Hindernisse .....	71
4.3.2.2	Ablaufverfolgungsverfahren .....	72
<b>5</b>	<b>PROGRAMMIERUNG .....</b>	<b>75</b>
<b>5.1</b>	<b>Akkumulierung .....</b>	<b>77</b>
<b>5.2</b>	<b>Dimensionierung.....</b>	<b>82</b>
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>86</b>
<b>7</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>88</b>
<b>8</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>91</b>

# 1 Einleitung

Das Umweltministerium Baden-Württemberg hat im Jahr 2008 zusammen mit weiteren Partnern die *Kooperationsinitiative Nahwärme* ins Leben gerufen. Ziel dieser Initiative ist es die dezentrale Energie- bzw. Wärmeversorgung durch regenerative Energien voranzutreiben und auch konkret umzusetzen. Die Energiewirtschaft als Schlüsselbranche zur Umsetzung dieser Ziele soll in diese Strategie der Landesregierung aktiv eingebunden werden. In einem ersten Schritt entwickelte das Münchner Unternehmen K.GROUP, ein Partner dieser Initiative, einen Wärmeatlas für Baden-Württemberg, anhand dessen für Nahwärme geeignete Gebiete ausfindig gemacht werden können. Diese so genannten Wärmeinseln geben somit die Ansatzpunkte für die Konzeption und Planung von Nahwärmenetzen vor. Weiter erarbeitete die K.GROUP übergreifende Realisierungsbedingungen und gab die Impulse für konkrete Investitionen in den Bau von dezentralen Anlagen auf Basis regenerativer Energien. Nun steht die Initiative derzeit vor ihrem Abschluss und soll von der Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg (KEA) weitergeführt werden [<http://www.nahwaerme-bw.de>].

Die KEA als ein weiterer Partner dieser Initiative entwickelt unter anderem Energiekonzepte für die Nutzung von Nahwärme. Sie führt diesbezüglich Machbarkeitsstudien durch und erstellt erste Netzstrukturen. Dabei werden die Wärmebedarfswerte der zu versorgenden Gebäude ermittelt. Anhand dieser Bedarfswerte müssen die Rohrleitungen im Netz dimensioniert werden um eine ausreichende Wärmeversorgung gewährleisten zu können. Gegenüber den Stadtwerken als weitere Partner in der *Kooperationsinitiative Nahwärme* nimmt die KEA eine beratende Funktion ein und trägt entscheidend zur Umsetzung dieser Konzepte bei. Hierbei arbeitet die KEA in der Modellierung und Analyse der raumbezogenen Daten bisher ohne den Einsatz eines Geoinformationssystems (GIS). Ein GIS dient der rechnergestützten Verarbeitung raumbezogener Daten und eignet sich daher für die Durchführung und Visualisierung der Arbeitsschritte. Es bietet damit die Voraussetzungen für die Umsetzung einer Nahwärmenetzkonzeption und erlaubt gleichzeitig die Automatisierung der einzelnen Aufgaben.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird für die KEA das Vorgehen in der Konzeption und Erstellung eines Nahwärmenetzes erstmalig mithilfe eines Geoinformationssystems

prototypisch durchgeführt. Als Beispiel dient hierbei eine von den Stadtwerken Karlsruhe ausgewiesene Gebäudegruppe im Karlsruher Stadtteil Wolfartsweier. Zunächst wird ein optimaler Hauptleitungsverlauf ermittelt um anschließend ein komplettes Versorgungsnetzwerk erstellen zu können. Abschließend werden, aus den im GIS vorhandenen Analysefunktionen, angepasste Funktionen programmiert, welche die Dimensionierung der Rohrleitungen auf Basis der Wärmebedarfswerte automatisieren.

Diese Arbeit fand in Kooperation mit der Bachelor- Absolventin Carolin Kucharczyk der Hochschule Karlsruhe statt. Sie befasste sich mit der Ermittlung des Wärmebedarfs der Gebäude, der Erstellung der Hausanschlussleitungen und konzipierte eine graphische Benutzeroberfläche zur Analyse und Visualisierung. Sie stellte die in dieser Arbeit verwendeten *feature classes* Abnehmerknoten, Verteilknoten und Hausanschlussleitungen zur Verfügung.

## 1.1 Beteiligte

### **1.1.1 Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg**

Die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) ist eine selbständige Anstalt des öffentlichen Rechts und hat Ihren Hauptsitz in Karlsruhe.

An der LUBW sind rund 550 Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker sowie Labor- und Verwaltungsfachkräfte beschäftigt und setzen ihr Fachwissen dafür ein, Lösungen für immer komplexer werdende Umweltprobleme zu finden.

Ihre Hauptaufgabe ist die Beratung und Unterstützung der Landesregierung und der Umwelt- und Naturschutzverwaltung in Baden-Württemberg in Fragen des Umwelt- und Naturschutzes, des technischen Arbeitsschutzes, des Strahlenschutzes und der Produktsicherheit. Ihre Aufgaben und Arbeitsweise sind im *Gesetz zur Vereinigung der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg und der UMEG, Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg* festgelegt.

Die LUBW beobachtet zum einen die Flora und Fauna, betreibt landesweite Messnetze für Luft, Wasser, Boden und Radioaktivität und analysiert die chemische, radiologische oder biologische Zusammensetzung in Umweltproben. Diese Messergebnisse werden fachübergreifend und überregional ausgewertet. Eigens von der LUBW entwickelte Datenverarbeitungsverfahren bieten der LUBW aber auch der Öffentlichkeit (durch Veröffentlichung der Ergebnisse im Internet) eine Übersicht über die gewonnenen Daten und den Zustand der Umwelt [<http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/31656/>].

### **1.1.2 Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH**

Die Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH (KEA) wurde im Jahr 1994 gegründet und hat ihren Sitz in Karlsruhe. Zu den Gesellschaftern der KEA gehören das Land Baden-Württemberg, die Leitungsgebundenen Energieversorgungsunternehmen des Landes Baden-Württemberg (neuerdings vertreten durch den Verband für Energie- und Wasserwirtschaft VfEW), die GBR 3 (Handwerkskammer, Verbände, Unternehmen), die Landesbank Baden-Württemberg und der Landesnaturschutzverband. Die KEA finanziert sich ausschließlich durch ihre Leistungen als Beratungsunternehmen und erhält keine institutionelle Finanzierung.

Die Hauptaufgabe der KEA ist die Mitwirkung an der Klimaschutzpolitik des Landes Baden-Württemberg. In diesem Rahmen unterstützt sie Kommunen sowie kleine und mittlere Unternehmen (KMU) bei der Energieeinsparung, der verstärkten Nutzung regenerativer Energien und bei der Steigerung der Energieeffizienz.

Die KEA arbeitet hierfür an der Entwicklung von Klimaschutzkonzepten, unterstützt Bauleitplanungen und erarbeitet Energiekonzepte und Machbarkeitsstudien. Sie stellt ihr Know-how nicht nur zur Verbesserung des Energiemanagements in Kommunen und Betrieben, sondern auch in Form von Dokumentationen und Schulungen zur Verfügung und ist in Sachen Förderprogramme des Landes zum Einsatz erneuerbarer Energien beratend tätig [<http://www.kea-bw.de/ueber-die-kea/ueberblick/>].

## 2 Nahwärme

### 2.1 Definition

Unter dem Begriff Nahwärme versteht man die Verteilung von Wärme im direkten Umfeld des Ortes der Energieerzeugung. Hierfür eignen sich besonders relativ kleinräumige Gebiete, wie beispielsweise Siedlungen oder Gebäudegruppen, Ortschaften und Stadtteile mit räumlich eng zusammen liegenden Objekten. Diese sind über Leitungen miteinander verbunden und werden über ein entsprechend dimensioniertes Heizwerk mit Wärme versorgt. Diese Gebiete haben damit im Gegensatz zur Fernwärme, die Verbraucher in einer Entfernung von bis zu 40km versorgt, relativ kurze Wärmetransportwege von insgesamt nur wenigen Kilometern [EnBW, S. 24 und S. 38 (auf Grundlage von Kraus 2004)]. Demnach steht die Nahwärmeversorgung „(...) zwischen der Fernwärme und der individuellen Beheizung einzelner Gebäude.“ [Bundesministerium für Forschung und Technologie 1986; S. 12].

### 2.2 Netzstruktur

#### 2.2.1 Rohrleitungen und Abnehmer

Ein Nahwärmenetz besteht in der Regel aus einem kleinen zentralen Heizwerk (Heizzentrale) und den zu versorgenden Objekten/ Gebäuden (Abnehmer). Sie werden über Rohrleitungen verbunden, wobei man zwischen den Hauptleitungen und den Hausanschlussleitungen unterscheidet. Die Hausanschlussleitungen verbinden die Objekte mit den Hauptleitungen und richten sich in ihrer Dimension nach dem Wärmebedarf des angeschlossenen Objektes. Jedes Haus hat einen individuellen Wärmebedarf, der zunächst ermittelt werden muss. Hierbei spielen neben der Anzahl der im Gebäude lebenden Personen und deren Verbrauchsverhalten auch beispielsweise die Baualtersklasse oder die Wärmedämmung eine entscheidende Rolle. Dieser Wert wird von der KEA mithilfe des Programms BHKW-Plan, auf der Grundlage erhobener Gebäudedaten, für jedes Gebäude im Nahwärmenetz Wolfartsweier ermittelt. Je höher der Wärmebedarf des Objektes ist, desto größer muss der Durchmesser der Rohrleitung

gewählt werden, um die nötige Wärmeenergie übertragen zu können. Eine Hauptleitung hingegen richtet sich in ihrer Dimensionierung zunächst nach dem Wärmebedarf aller direkt an sie angeschlossenen Objekte. Zusätzlich spielt die Lage der Hauptleitung in Bezug zur Heizzentrale eine entscheidende Rolle. So wird im zu erstellenden Nahwärmenetz (Strahlennetz vgl. Kapitel 2.2.1.1 Netzformen) der Gesamtwärmebedarf ausgehend von den Abnehmern in Richtung der Heizzentrale ermittelt. Eine Hauptleitung muss hierbei also nicht nur den Gesamtwärmebedarf der unmittelbar angeschlossenen Gebäude tragen, sondern auch den Bedarf der vorausgegangenen Hauptleitungen decken. So ergibt sich in Richtung der Heizzentrale ein immer höherer Wärmebedarfswert. Die Hauptleitung die direkt mit der Heizzentrale verbunden ist, muss also so ausgelegt sein, dass sie den Wärmebedarf aller vorausgegangenen Hauptleitungen abdecken kann.

In den folgenden beiden Abbildungen sind zwei Tabellen dargestellt, die die Leistungskapazität der Hauptleitungen und die der Hausanschlussleitungen je nach Nenndurchmesser aufzeigen. Entscheidend für die übertragbare Leistung ist die Differenz ( $dT$  in Kelvin) von Vor- und Rücklauftemperatur, also mit welcher Temperatur das in der Heizzentrale erwärmte Wasser ins Netz eingespeist wird und mit welcher Temperatur es im Rücklauf wieder in der Heizzentrale ankommt. Mit größer werdendem Nenndurchmesser und größer werdender Temperaturdifferenz, steigt die Leistung einer Rohrleitung. So hat beispielsweise eine Hauptleitung mit dem Nenndurchmesser von 20 mm bei einer angenommenen Temperaturspreizung von 20 Kelvin eine Leistung von 31,2 kW wohingegen eine Rohrleitung gleichen Durchmessers bei einer angenommenen Temperaturspreizung von 60 Kelvin eine Leistung von 93,7kW aufweist, also etwa dreimal soviel (s. Abb. 2-1).

Übertragungsleistungen Hauptleitungen nach QM Holzheizwerke							
Nenndurchmesser	Rohrdurchmesser	Wassergeschwindigkeit	Wasserstrom	Hauptleitungen			
				Leistung bei $dT = 20K$	Leistung bei $dT = 30K$	Leistung bei $dT = 40K$	Leistung bei $dT = 60K$
DN	$d_i$	Hauptltg.	Hauptltg.	20	30	40	60
mm	m	m/s	m <sup>3</sup> /h	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]
20	0,023	0,9	1,35	31,2	46,8	62,5	93,7
25	0,029	1,0	2,30	53,3	79,9	106,6	159,8
32	0,037	1,1	4,30	100	150	200	300
40	0,043	1,2	6,30	146	219	292	439
50	0,055	1,4	11,8	273	409	546	818
65	0,070	1,6	22,4	519	778	1.037	1.556
80	0,083	1,8	34,6	804	1.205	1.607	2.411
100	0,107	1,9	61,6	1.430	2.144	2.859	4.289
125	0,132	2,0	98,1	2.276	3.413	4.551	6.827
150	0,159	2,5	179,4	4.162	6.242	8.323	12.485
200	0,207	3,3	397,9	9.231	13.846	18.461	27.692
250	0,260	3,9	747,7	17.347	26.021	34.694	52.041

Abbildung 2-1 : Übertragungsleistung Hauptleitungen [Quelle: Excel-Datei KEA]

Übertragungsleistungen Hausanschlussleitungen nach QM Holzheizwerke							
Nenndurchmesser	Rohrdurchmesser	Wassergeschwindigkeit	Wasserstrom	Hausanschlussleitungen			
				Leistung bei $dT = 20K$	Leistung bei $dT = 30K$	Leistung bei $dT = 40K$	Leistung bei $dT = 60K$
DN	$d_i$	HA	HA	20	30	40	60
mm	m	m/s	m <sup>3</sup> /h	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]
20	0,023	0,5	0,75	17,4	26,0	34,7	52,1
25	0,029	0,6	1,38	32,0	48,0	63,9	95,9
32	0,037	0,8	3,13	72,6	109	145	218
40	0,043	1,0	5,25	121,9	183	244	366

Abbildung 2-2 : Übertragungsleistung Hausanschlussleitungen [Quelle: Excel-Datei KEA]



### 2.2.1.1 Netzformen

Die Struktur eines Wärmeverteilungsnetzes wird hauptsächlich durch die städtebaulichen Gegebenheiten, wie die räumliche Anordnung der Gebäude und die Straßenführung, bestimmt. Weitere auf die Netzstruktur Einfluss nehmende Faktoren sind die Netzgröße und die Anzahl der Heizzentralen, die die Wärme ins Netz einspeisen. Zu den typischen Netzformen für die Hauptverteilung der Wärme von der Heizzentrale zu den Abnehmern, gehören das Strahlen-, das Ring- und das Maschennetz.

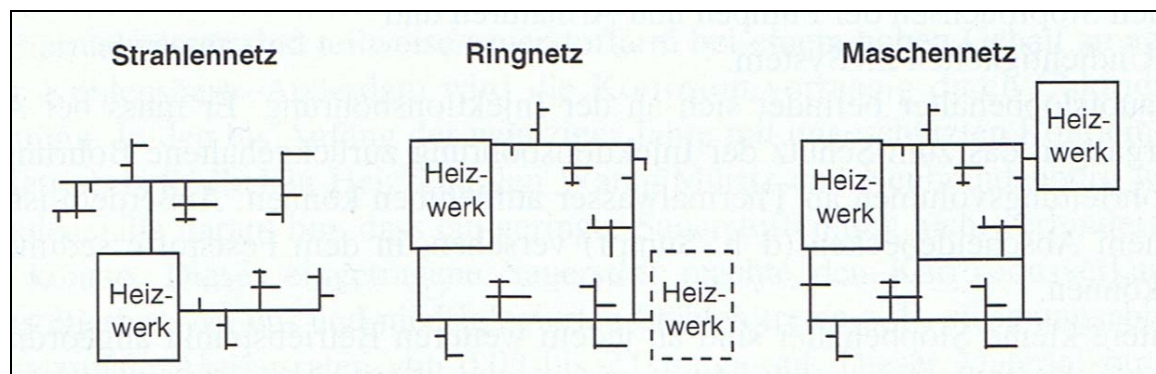


Abbildung 2-3 : Netzformen der Hauptverteilung in Wärmenetzen [Kaltschmitt, Streicher, Wiese 2006; S. 468]

Ringnetze bieten die Möglichkeit mehrere Heizwerke in das Netz einzubinden. Sie sind jedoch, aufgrund der verhältnismäßig großen Trassenlänge und Nenndurchmesser der Leitungen, teurer als die anderen Netzformen. Der Vorteil von Ringnetzen besteht in der Gewährleistung einer hohen Versorgungssicherheit, da hier die Abnehmer nicht nur über einen Leitungsweg mit einem Heizwerk verbunden sind.

Auch Maschennetze bieten eine hohe Versorgungssicherheit und gute Erweiterungsmöglichkeiten für die Einbindung mehrerer Heizwerke. Sie sind jedoch aufgrund hoher Investitionen nur für große Wärmeverteilungsnetze geeignet.

Strahlennetze eignen sich besonders für kleine und mittlere Wärmenetze. Aufgrund ihrer verhältnismäßig kurzen Leitungswege und kleinen Nenndurchmesser sind sie kostengünstiger und können die Wärme effizienter im Netz verteilen. Die Versorgungssicherheit ist in einem Strahlennetz jedoch weitaus geringer als in einem Ring- oder Maschennetz [Kaltschmitt, Streicher, Wiese 2006; S. 468]. Zum einen weil hier die Abnehmer nur über einen Leitungsweg erreichbar sind und somit bei einem Störfall im Leitungsnetz eventuell nicht versorgt werden können. Zum anderen weil die Abnehmer nur von einem Heizwerk mit

Wärme versorgt werden, was durch Redundanz bei der Wärmeerzeugung in der Heizzentrale ausgeglichen werden muss.

In Absprache mit der KEA entspricht die Netzform, für die in dieser Arbeit prototypisch umzusetzende Nahwärmnetzkonzeption, einem Strahlennetz, wobei lediglich eine Hauptleitung direkt mit der Heizzentrale verbunden ist.

### 2.2.1.2 Trassenführung

Die Unterverteilung und die Erstellung der Hausanschlüsse im Wärmenetz wird Trassierung genannt. Um diese zu realisieren, können unterschiedliche Systeme gewählt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, jeden Abnehmer separat an eine Hauptverteilung anzuschließen. Dieses Verfahren, die Standard-Trassenführung, bietet eine hohe Flexibilität und findet vor allem dann Anwendung, wenn das zu versorgende Gebiet nur teilweise erschlossen ist.

Eine andere Form der Trassierung ist die Haus-zu-Haus-Trassenführung. Hierbei werden die zu versorgenden Gebäude in Gruppen zusammengefasst und es wird jeweils nur ein Gebäude der Gruppe direkt an eine Verteilleitung angeschlossen. An den direkt verbundenen Abnehmer sind alle weiteren Gebäude der Gruppe (und somit auch an das Netz) angebunden. Diese Art der Trassierung hat den Vorteil, dass weniger Abzweigungen von der Verteilleitung benötigt werden und bietet sich vor allem in Gebieten mit sehr dichter Bebauung an. Häufig wird eine Mischform aus beiden Systemen gewählt, um die Vorteile der unterschiedlichen Trassierungsarten miteinander zu verknüpfen [Kaltschmitt, Streicher, Wiese 2006; S. 468f].

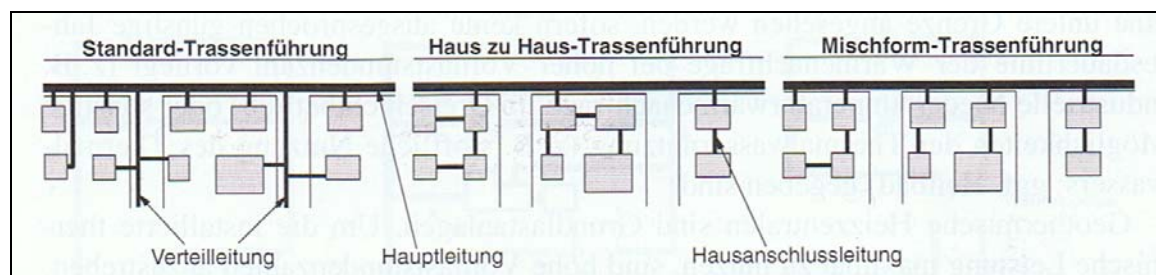


Abbildung 2-4 : Trassenführung in Wärmenetzen [Kaltschmitt, Streicher, Wiese 2006; S. 468]

In Absprache mit der KEA entspricht die Trassenführung, für die in dieser Arbeit prototypisch umzusetzende Nahwärmnetzkonzeption, der Standard-Trassenführung, wobei jeder Abnehmer direkt mit einer Hauptleitung verbunden ist.

### **2.2.2 Heizzentrale**

Als Wärmeerzeuger in der Heizzentrale eines Nahwärmenetzes eignet sich besonders ein Blockheizkraftwerk (BHKW). Ein BHKW beruht auf dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Die KWK ist „(...) die gleichzeitige Erzeugung von elektrischer (mechanischer) und thermischer Nutzenergie (...).“ [Krimmling 2009; S. 145]. Hierbei treibt ein Verbrennungsmotor einen Generator zur Stromerzeugung an. Die dabei anfallende Abwärme des Motors wird, über das Rohrleitungssystem des Nahwärmenetzes, als Heizwärme den einzelnen Abnehmern zugeführt und der erzeugte Strom wird direkt in das Stromnetz eingespeist.

Auch Technologien wie Stirlingmotoren, Brennstoffzellen oder Gasturbinen können in einem BHKW zum Einsatz kommen. Neben fossilen Brennstoffen können diese Kraftwerke auch mit regenerativen Energiequellen betrieben werden [Krimmling 2009; S. 145 ff]. Den größten Anteil hat hierbei die Biomasse. Unter Biomasse werden Stoffe organischer Herkunft (kohlenstoffhaltige Materie) zusammengefasst. Die Abgrenzung der Biomasse gegenüber den fossilen Brennstoffen beginnt bei der Verrottung der Biomasse zu Torf. So zählt Torf nicht mehr zur Biomasse [Kaltschmitt, Streicher, Wiese 2006; S. 645].

Blockheizkraftwerke sind in Bezug auf den Einsatz verschiedener Brennstoffe aber auch in Bezug auf ihre Gesamtleistung sehr flexibel. Nahwärmenetze stellen die nötige Infrastruktur dar, um diese Anlagen und damit erneuerbare Energien in die Wärmeversorgung zu integrieren [Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg 2007; S. 13] und bieten damit eine Möglichkeit den verstärkten Einsatz regenerativer Energien in der Energie- bzw. Wärmeversorgung zu fördern und voranzutreiben.

Die nachfolgende Abbildung zeigt eine mögliche Netzstruktur eines Nahwärmenetzes.

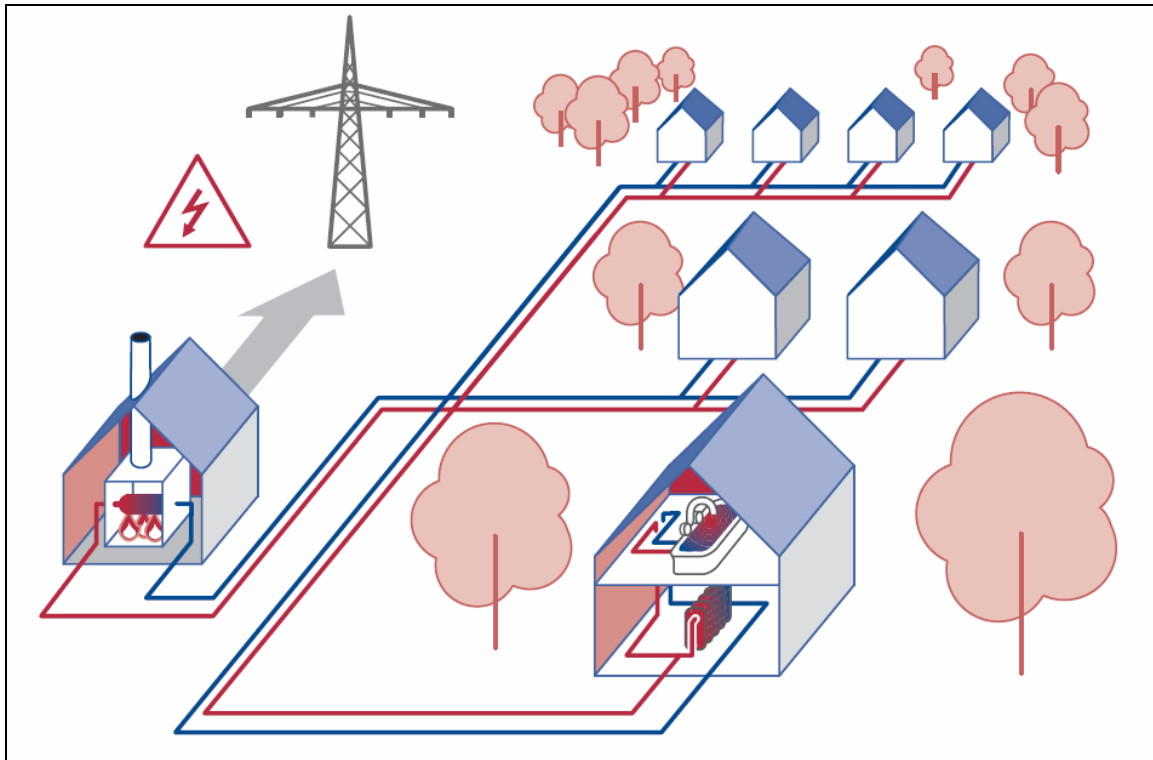


Abbildung 2-5 : Netzstruktur Nahwärmenetz [Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz 2006; S. 12]

## 3 Ermittlung der Hauptleitungen

Zur Erstellung der Hauptleitungen des Nahwärmenetzes ist es zunächst notwendig, die kürzeste Gesamtnetzstrecke, unter Berücksichtigung jedes anzuschließenden Gebäudes und des Standortes der Heizzentrale, auszumachen. Da die Wirtschaftlichkeit, und damit einhergehend die Kosten für die Rohrleitungen, ein entscheidender Faktor ist, soll die kürzeste Verbindung zwischen Abnehmer und Heizzentrale gefunden werden um diese Kosten möglichst gering zu halten. Nachdem das Hauptleitungsnetz ermittelt wurde, wird aus allen am Nahwärmenetz beteiligten Elementen ein Versorgungsnetzwerk erstellt und die Rohrleitungen dimensioniert.

Die Hauptrohrleitungen im Nahwärmenetz orientieren sich am Verkehrsnetzwerk in Wolfartsweier. Für den Entwurf eines optimalen Versorgungsnetzwerks ist im ersten Schritt eine Analyse dieses Verkehrsnetzwerkes notwendig. Anschließend wird aus dem erstellten Leitungsnetzwerk ein Versorgungsnetzwerk erstellt und die Rohrleitungen anhand des Wärmebedarfs der zu versorgenden Gebäude dimensioniert. In diesem Kapitel werden zunächst die grundlegenden Eigenschaften eines Netzwerkes erläutert und ein Hauptleitungsnetz mithilfe der Netzwerkanalysefunktionen des Geoinformationssystems ArcGIS der Firma ESRI (Environmental Systems Research Institute) erstellt. ArcGIS stellt mit ArcCatalog eine Managementoberfläche zur Verwaltung und mit ArcMap eine Anwendung zur Erstellung und Auswertung von Geodaten zur Verfügung. In Kapitel 4 ist die Erstellung und Analyse des Versorgungsnetzwerks mit ArcGIS dokumentiert.

### 3.1 Netzwerkanalyse

Ein Netzwerk wird in dieser Arbeit als geometrisch-topologische Anordnung von Knoten und Kanten verstanden. Diese Anordnung wird Graph genannt. Die Analyse von Netzwerken beruht auf der Graphentheorie, die in diesem Kapitel anhand von Beispielen näher erläutert wird.

Ein GIS stellt Funktionen zur Analyse von Netzwerken, wie sie beispielsweise in Verkehrssystemen wie Straßen- oder Schienennetzen aber auch in der Ver- und Entsorgungsbranche in Form von Rohrleitungsnetzen zu finden sind, zur Verfügung. Besonders im Transportwesen spielen diese Funktionen eine entscheidende Rolle. Die

Kanten in einem Netzwerk repräsentieren lineare Einheiten, die miteinander verbunden sind. Beispiele hierfür sind Straßen, Eisenbahnlinien, Flüsse oder Rohrleitungen. Diese linearen Einheiten sind über die Netzwerkknoten verknüpft. Beispiele hierfür sind Haltestellen, Kreuzungen oder Verbindungsstücke. Den Netzelementen können bestimmte Eigenschaften und Attribute zugewiesen werden, welche in die Analyse miteinbezogen werden können. Die Attribute werden auch als Widerstandswerte (Gewichtung) bezeichnet und bewerten ein Netzelement. So ist die Weglänge (in einer Längeneinheit z.B. Meter) zwischen zwei Knoten aber auch die Fahrzeit, die bei einer bestimmten Geschwindigkeit benötigt wird um diese Weglänge zu überwinden, eine Bewertung einer Kante [de Lange 2006; S. 352 f].

Bei der Netzwerkanalyse in einem Verkehrsnetz treten vorwiegend drei Problemstellungen auf: die beste oder kürzeste Wege-Analyse, die Suche des besten Standorts und das Handlungsreisendenproblem (Traveling Salesman Problem oder kurz TSP). Beim TSP soll die Reihenfolge der zu besuchenden Orte so gewählt werden, dass die gesamte Rundreise möglichst optimal (kurz) ist. Für die Erstellung des Nahwärmenetzes Wolfartsweier spielt die Fragestellung „Bester Weg“ die entscheidende Rolle.

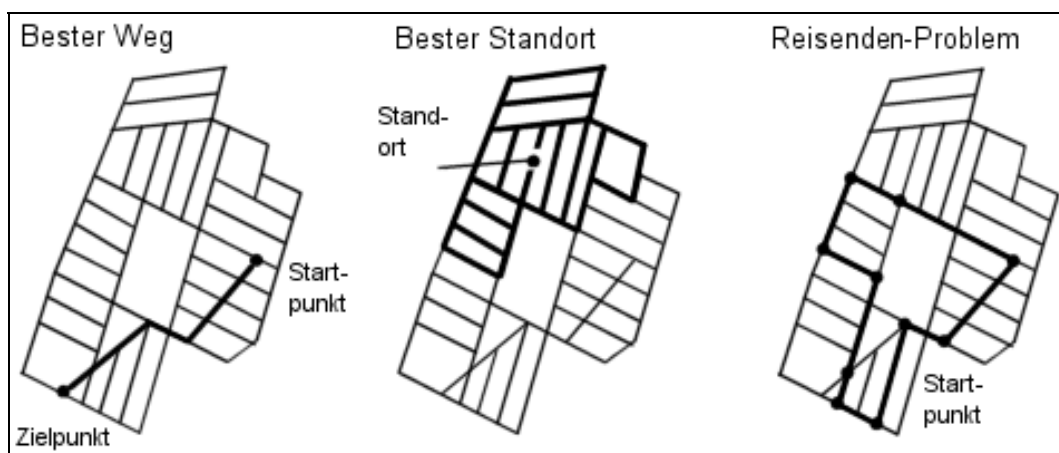


Abbildung 3-1 : Drei Fragestellungen in Netzwerken [Bill, Zehner 2001; S. 188]

## 3.2 Datengrundlage

### 3.2.1 Sachdaten

Die Stadtwerke Karlsruhe haben für den Karlsruher Stadtteil Wolfartsweier Gebäudedaten in Form einer Adressenliste bereitgestellt. Diese Liste enthält neben den Adressen der Gebäude, die an das Nahwärmenetz angeschlossen werden sollen, auch die Anzahl der Wohneinheiten des jeweiligen Gebäudes.

Die KEA stellte für diese Arbeit die Systematik der Netzauslegung zur Verfügung. Diese konzentriert sich hauptsächlich auf die Netzberechnung mithilfe von Excel-Tabellen, wobei der Netzverlauf auf einem Papierplan visualisiert wird.

### 3.2.2 Geometriedaten

Als Grundlage für die Netzerstellung und die Visualisierung wurden die Geobasisdaten der automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) und die des amtlichen topographisch-kartographischen Informationssystems (ATKIS) herangezogen. Diese liegen in der Projektion DHDN\_3\_Degree\_Gauss\_Zone\_3 vor und geben somit die Projektion für alle weiteren Daten vor. Hierbei wurden die Flurstücks- und Gebäudedaten der ALK verwendet. Sie wurden für die weitere Bearbeitung als Merkmalsgruppen (*feature class*) ALK\_Flurstueck und ALK\_Gebaeude in der mithilfe des Programms ArcCatalog erstellten Datenbank (*personal geodatabase*) Nahwaerme\_Wolfartsweier abgelegt. Als Straßen-netzgrundlage, an welcher sich das Rohrleitungsnetz orientiert, dient der Layer Gemeindestraße oder Hauptwirtschaftsweg des ATKIS, welcher als *feature class* ATKIS\_Gemeindestrasse in der Datenbank gespeichert wurde. Bei der Überlagerung der amtlichen Daten ALK und ATKIS ergeben sich jedoch geometrische Fehler. Wie in Abbildung 3-3 zu sehen ist, überschneiden sich an manchen Stellen die Gebäude der ALK mit den Straßen des ATKIS. Hier müsste eine Homogenisierung dieser Datenbestände ansetzen. Für die Prototypische Umsetzung der Nahwärmenetz-konzeption in dieser Arbeit sind diese geometrischen Ungenauigkeiten allerdings nicht relevant.

Da sich die Netzauslegung auf den Karlsruher Stadtteil Wolfartsweier beschränkt und die Daten für ganz Baden-Württemberg vorliegen, werden sie für diesen Bereich zugeschnitten. Hierbei wird ein großzügiger Puffer von 500m um den Stadtteil gelegt, damit

ein eventuell die Ortsteilgrenze überschreitender Standort der Heizzentrale berücksichtigt werden kann. Als zusätzliches Orientierungshilfsmittel werden vier Kacheln des Digitalen Orthophotos (DOP) des Gebiets um Wolfartsweiler eingesetzt. In den folgenden beiden Abbildungen sind die Geobasisdaten dargestellt. In Abbildung 3-3 sind die 49 Gebäude der Abnehmer hervorgehoben.

Für die Netzauslegung mithilfe eines GIS stehen außer den Geobasisdaten keine beispielhaften Daten oder Datenstrukturen zur Verfügung auf denen aufgebaut werden kann. Sie sind daher im Zuge dieser Arbeit erstellt worden.



Abbildung 3-2 : Geobasisdaten Wolfartsweiler



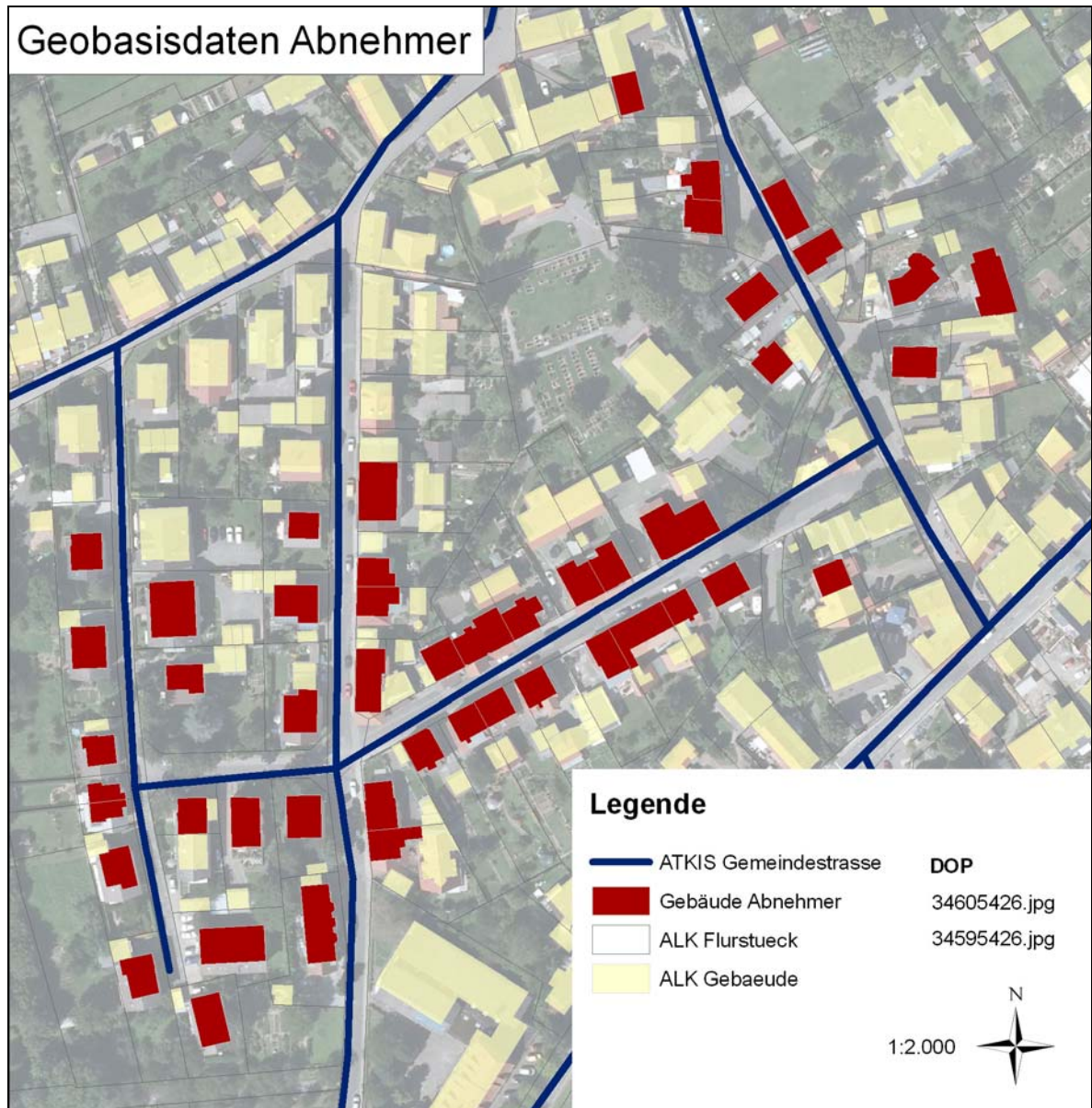


Abbildung 3-3 : Geobasisdaten Abnehmer

### 3.3 Graphentheorie

Raumbezogene Vektordaten werden mithilfe der Graphentheorie topologisch strukturiert. Die Graphentheorie als Teilgebiet der Mathematik untersucht die Eigenschaften von Graphen und ihren Beziehungen. Ein Graph ist „(...) ein Gebilde, das aus Ecken und Kanten besteht. Jede Kante verbindet zwei Ecken.“ [Nitzsche 2005; S. 2]. Die räumlichen Beziehungen der Kanten und Knoten in einem Netz, also die Topologie eines Netzes, wird durch „(...) die Vereinigungsmenge einer Menge von Knoten  $X$  und einer Menge von Kanten  $U$  (...)“ [Bollmann, Koch 2002, CD-ROM-Ausgabe] beschrieben. Graphen können unterschiedliche topologische Konsistenzbedingungen aufweisen. Die für diese Arbeit entscheidenden Eigenschaften sind die Richtung und die Gewichtung eines Graphen. Voraussetzung ist, dass der Graph zusammenhängend ist und keine sich überschneidenden Kanten aufweist, also eben ist. Die wichtigsten Eigenschaften sind nachfolgend aufgeführt.

#### Eben

Ein Graph heißt *eben*, wenn seine Kanten keine Punkte gemeinsam haben außer Ecken.“

[Nitzsche 2005; S. 156].

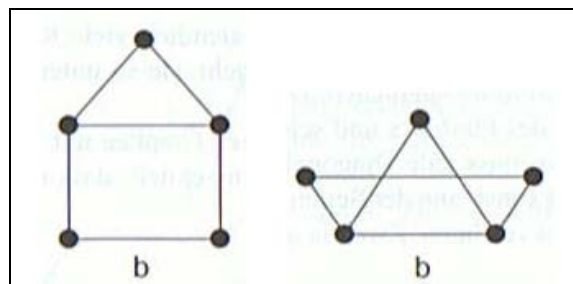


Abbildung 3-4 : Ebener/ unebener Graph [Nitzsche 2005; S. 157]

### Gerichtet (Digraph)

„Ein Graph, in dem alle Kanten eine Richtung haben, nennt man einen *gerichteten Graphen* oder kurz einen *Digraphen*.“ [Nitzsche 2005; S. 123].

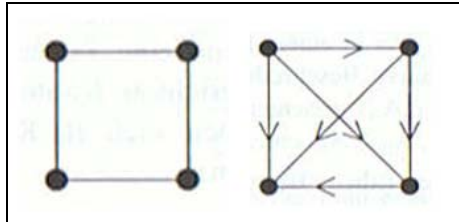


Abbildung 3-5 : Ungerichteter/ gerichteter Graph [Nietzsche 2005; S. 144]

### Gewichtet (nicht negativ)

„A *weighted Graph* is a graph with numerical labels on the edges.“ [West 2001; S. 95].

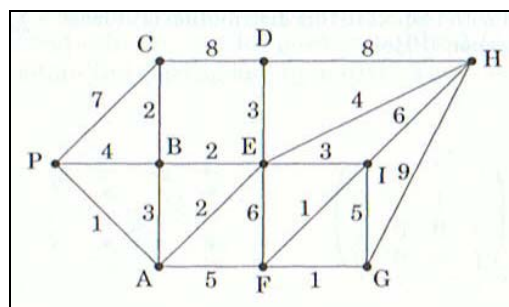


Abbildung 3-6 : Gewichteter Graph [West 2001; S. 105]

### Grad einer Ecke

„Die Anzahl der Kanten, die von einer Ecke ausgehen, erhält einen eigenen Namen: Man nennt sie den Grad dieser Ecke.“ [Nitzsche 2005; S. 4].

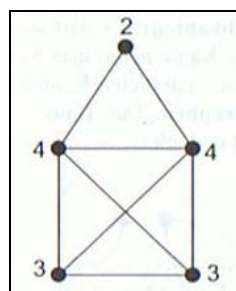


Abbildung 3-7 : Graph mit Eckengrad [Nitzsche 2005; S. 4]

Ergänzung:

„(...) Der Eingangsgrad einer Ecke gibt an, wie viele gerichtet Kanten zu ihr hin führen, der Ausgangsgrad, wie viele von ihr weg führen.“ [Nitzsche 2005; S. 124].

### Baum

„Einen Graphen der sowohl zusammenhängend als auch kreisfrei ist, nennt man *Baum*.“

[Gritzmann, Brandenburg 2003; S. 123].

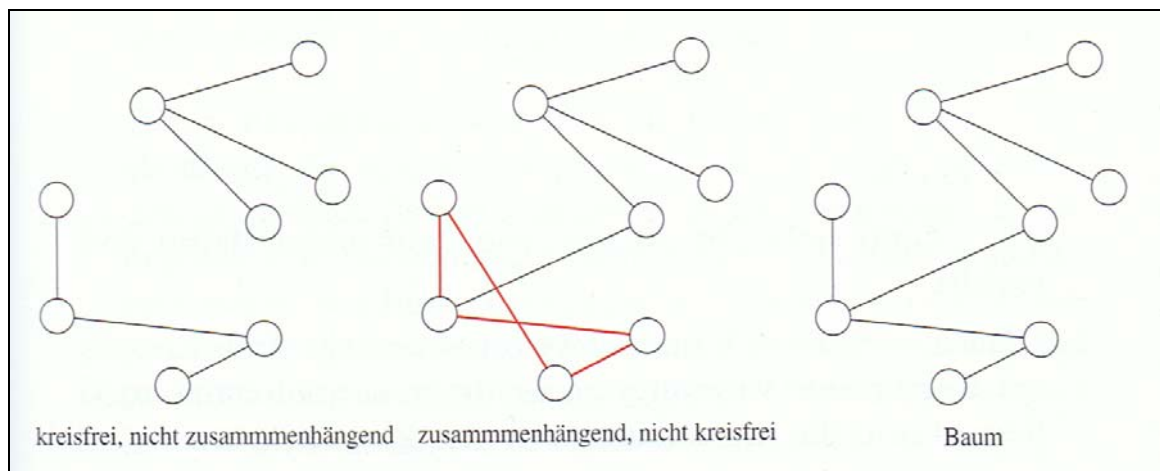


Abbildung 3-8 : Graph als Baum [Gritzmann, Brandenburg 2003; S. 123]

Für diese Arbeit wird das Netzwerk der Straßenachsen des ATKIS verwendet. Es handelt sich hierbei um einen ebenen, ungerichteten und kantengewichteten Graphen. Da bei der Routenfindung die Möglichkeit bestehen darf, eine Kante in jede Richtung zu befahren, spielt die Richtung des Graphen vorerst keine Rolle. Die Gewichtung einer Kante ist hierbei entscheidend und entspricht ihrer Länge in Metern. In diesem Netz soll nun die kürzeste Verbindung zwischen der Heizzentrale und den Abnehmern gefunden werden mit der Bedingung kreisfrei (azyklisch) zu sein. Der resultierende Graph soll demnach einem Baum entsprechen, wobei die Richtung (Fließrichtung) in der späteren Bearbeitung definiert wird.

## 3.4 Routing

Die Verbindung zwischen zwei nicht benachbarten Knoten wird in einem Netzwerk auch Route genannt. Eine Route kann mithilfe der Netzwerkanalysefunktionen eines GIS ermittelt werden und besitzt in der Regel bestimmte Eigenschaften. Sie ist zum Beispiel der kürzeste oder der schnellste Weg zwischen einem Start- und einem Zielpunkt. Ein Routing ist ein computergestütztes Berechnungsverfahren zur Ermittlung einer Route zwischen Knoten. Das Ergebnis der Berechnung ist eine Wegstreckenentfernung. Zusätzlich können noch Informationen über die Fahrzeit und eine Wegbeschreibung in Form einer Karte oder Liste erstellt werden [Bill, Zehner 2001; S. 227].

Diese Anwendung findet sich in Navigationssystemen und Routenplanern. Hierbei sind vielfältige Zusatzeinstellungen möglich, die das Ergebnis des Routing beeinflussen. Zu ihnen gehört beispielsweise die Wahl des Verkehrsmittels (z.B. Fahrzeug, Fußgänger), die Wahl der schnellsten oder kürzesten Strecke, die Möglichkeit gebührenpflichtige Straßen oder Autobahnen zu meiden und einige mehr. Je nach Produkt sind diese Einstellungen entsprechend unterschiedlich. So ist beispielsweise bei einem Fahrradrouutenplaner die Information über Steigungen auf der Route wichtiger als bei einem Autoroutenplaner. In den folgenden beiden Abbildungen sind beispielhaft zwei Online-Routenplaner zu sehen. In Abbildung 3-9 ist der Online-Routenplaner der Firma NAVTEQ zu sehen, der speziell auf die Routenplanung für das Auto ausgelegt ist. In Abbildung 3-10 handelt es sich um einen Routenplaner des Landes Nordrhein-Westfalen für das Verkehrsmittel Fahrrad.



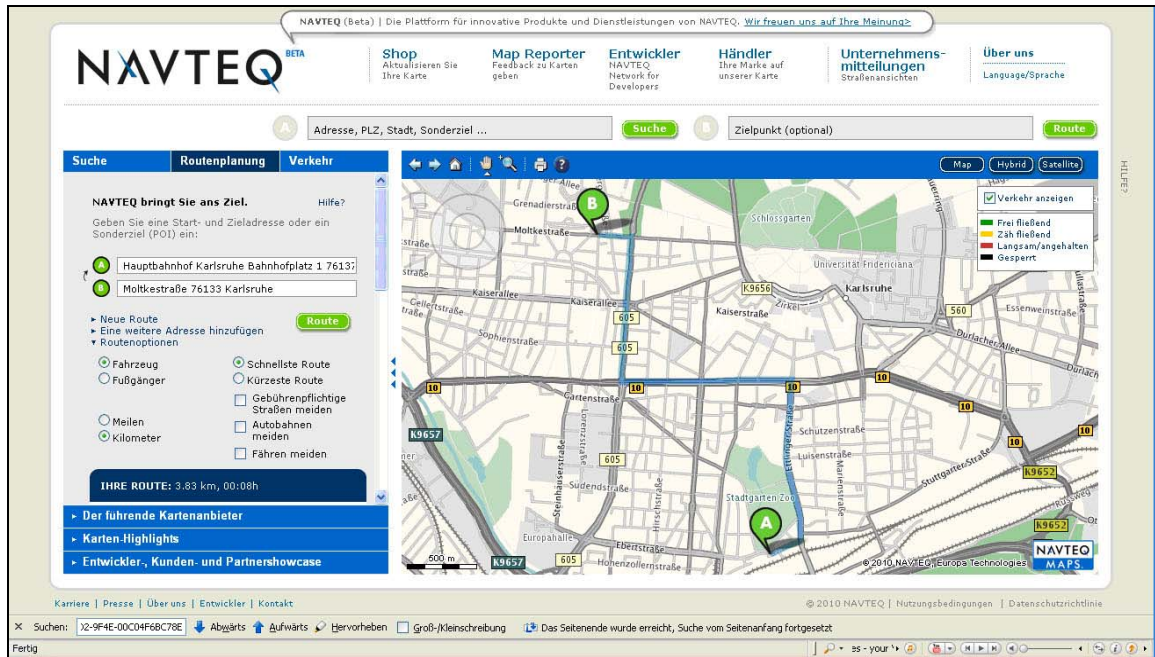


Abbildung 3-9 : NAVTEQ Routenplanung [http://www.navteq.com/]

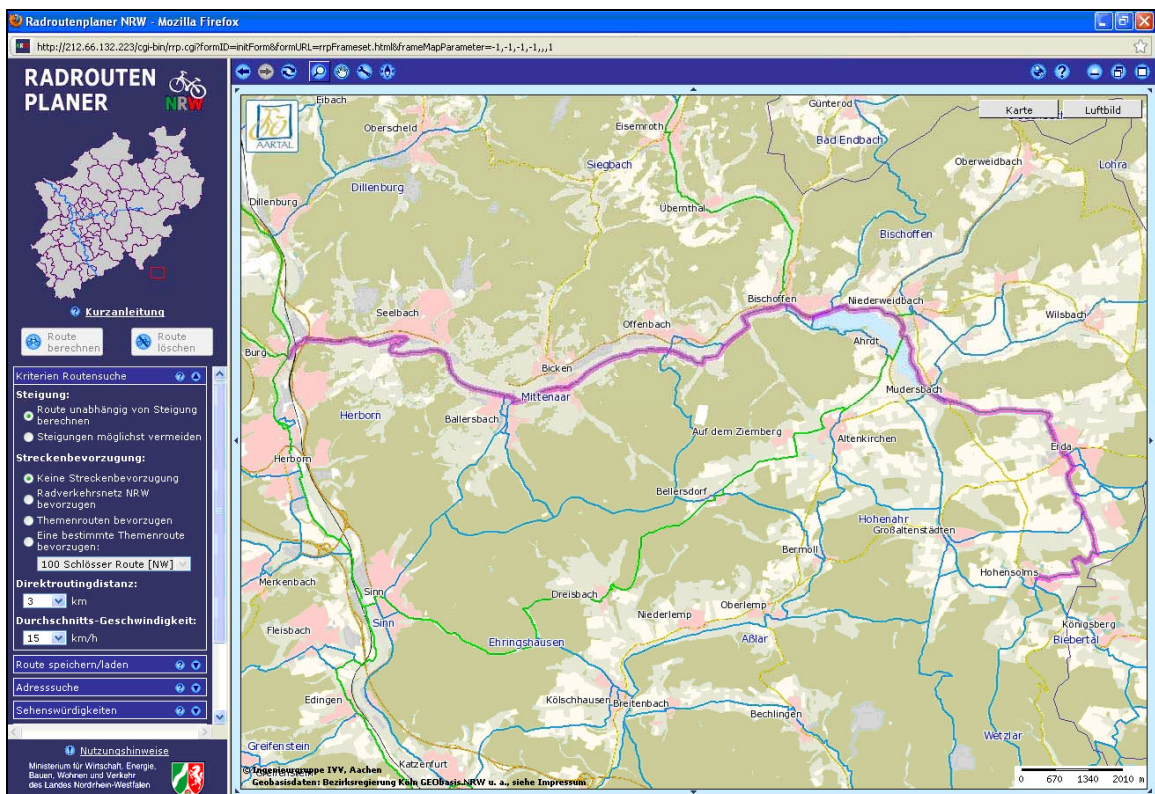


Abbildung 3-10 : Radroutenplaner NRW [http://www.radroutenplaner.nrw.de/]

Um die kürzeste Verbindung der Nahwärmenetzelemente zu finden, wird mithilfe des Geoinformationssystems ArcGIS und der Programmerweiterung *Network Analyst* ein Routing durchgeführt. Dieses Routing beruht auf dem Dijkstra-Algorithmus und erfordert zusätzlich spezielle Einstellungen, die auf den nächsten Seiten erläutert werden.

### 3.4.1 Dijkstra-Algorithmus

Der Dijkstra-Algorithmus ist ein Graphenalgorithmus zur Berechnung kürzester Wege. Er wurde im Jahr 1959 von Edsger W. Dijkstra veröffentlicht und nach ihm benannt. Der Algorithmus beruht auf einer iterativen Erweiterung einer am „billigsten“ erreichbaren Knotenmenge. Er gehört zu den so genannten Greedy-Algorithmen (gierige Algorithmen), deren Prinzip darin besteht, in jedem Teilschritt so viel wie möglich zu erreichen. Voraussetzung ist ein zusammenhängender Graph, dessen Kantengewichte nicht negativ sein dürfen. Es könnte sonst ein Zyklus mit negativem Gewicht existieren, der beliebig oft durchlaufen wird und bei jedem Durchlauf das Gewicht des Pfades reduziert. Daher entspricht das Ergebnis eines Dijkstra Algorithmus immer einem Baum und ist somit azyklisch und erfüllt damit die Bedingung für das gesuchte Nahwärmenetz.

Gewichtete Graphen sind eine wichtige Erweiterung des einfachen Graphenmodells. Hierbei ist jeder Kante ein Gewicht zugeordnet. Gewichtete Graphen können sowohl gerichtet als auch ungerichtet sein. Ungerichtete gewichtete Graphen sind zum Beispiel Flugverbindungen oder Straßennetze mit Kilometerangabe. Wenn in einem Straßennetz auch Einbahnstraßen modelliert werden sollen, wird ein gerichteter gewichteter Graph benötigt. In Abbildung 3-11 handelt es sich um einen gerichteten und gewichteten Graphen. Die Kante  $(s, u)$  hat das Gewicht Zehn. Wenn die Kantengewichte zum Beispiel Kosten entsprechen, ist es günstiger indirekt über  $x$  von  $s$  nach  $u$  zu gelangen, da hier die Kosten geringer sind. Ein gerichteter Graph wird als  $G = (V, E, \gamma)$  notiert, wobei  $V$  für Vertices (Knoten),  $E$  für Edges (Kanten) steht und  $\gamma$  der Gewichtsfunktion  $\gamma: E$  entspricht. Die Distanz  $D$  zweier Punkte ist das Gewicht des kürzesten Pfades zwischen den beiden Punkten und entspricht im Beispiel der Verbindung von  $s$  nach  $u$  dem Wert Acht.

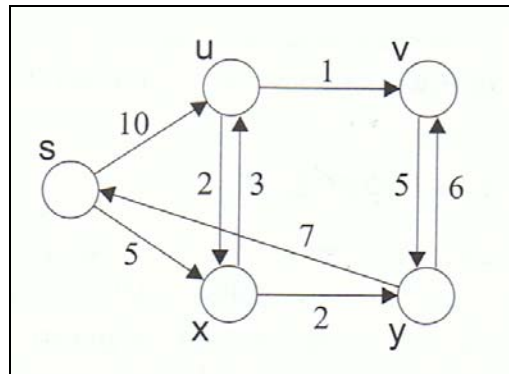


Abbildung 3-11 : Dijkstra – Gerichteter und gewichteter Graph [Saake, Sattler 2010; S. 455]

Die Berechnung kürzester Wege ist eine der wichtigsten Problemstellungen für gewichtete Graphen. Hierbei sollen Pfade im Graphen gefunden werden, für die es keine Alternative mit geringeren Kosten gibt. „Einer der bekanntesten Algorithmen zur Lösung kürzester-Wege-Probleme ist der Algorithmus von Dijkstra.“ [Internetquelle: Hüftle 2006, S.18], der im Folgenden näher erläutert wird.

#### Dijkstra Algorithmus in Pseudocode-Notation:

```

algorithm Dijkstra ( $G, s$ )
  Eingabe: Graph  $G$  mit Startknoten  $s$ 

  for each Knoten  $u \in V[G] - s$  do
     $D[u] := \infty$ 
  od;
   $D[s] := 0$ ; PriorityQueue  $Q := V$ ;
  while  $\neg$  isEmpty( $Q$ ) do
     $u :=$  extractMinimal( $Q$ );
    for each  $v \in$  ZielknotenAusgehenderKanten( $u$ )  $\cap Q$  do
      if  $D[u] + \gamma((u, v)) < D[v]$  then
         $D[v] := D[u] + \gamma((u, v))$ ;
        adjustiere  $Q$  an neuen Wert  $D[v]$ 
      fi
    od
  od

```

Abbildung 3-12 : Dijkstra Algorithmus in Pseudocode-Notation [Saake, Sattler 2010; S. 456]



Für jeden Knoten wird ein Wert  $D$  gespeichert, der während der Berechnung variabel ist und Zwischenwerte enthält. Daher ist zu Beginn die Distanz  $D$  unendlich. Nach Ablauf des Verfahrens soll für jeden Knoten der korrekte Distanzwert zum Startknoten gespeichert werden. Der Startknoten  $s$  erhält den Wert Null.

Die verwendete Prioritätswarteschlange (Priority Queue) entspricht einer sortierten Liste der Knoten aus  $G$ , aus der jeweils das erste Element entfernt wird und ermöglicht damit das Herauslesen des jeweils minimalen Elementes. Der Algorithmus berechnet die Distanz zum Startknoten für jeden Knoten im Graph. Dieses Verfahren entspricht einer Breitensuche mit gewichteter Entfernung. Bei einer Breitensuche werden auf jedem Niveau des Graphen ausgehend vom Startknoten  $s$  zuerst alle Knoten besucht, die direkt verbunden sind, bevor auf das nächste Niveau gewechselt wird. Diesen ersten Schritt bezeichnet man als Initialisierung und ist in Abbildung 3-13 verdeutlicht.

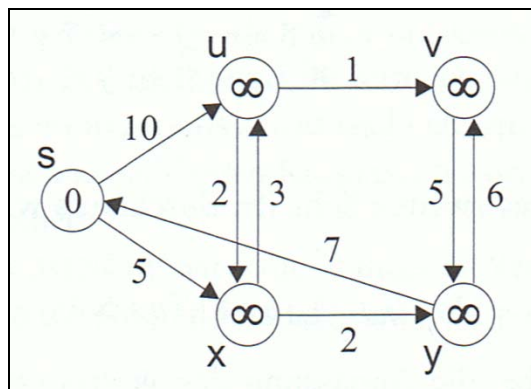


Abbildung 3-13 : Dijkstra – Initialisierung [Saake, Sattler 2010; S. 457]

Die Prioritätswarteschlange hat nach der Initialisierung folgende Form:

$$Q = \{(s : 0), (u : \infty), (v : \infty), (x : \infty), (y : \infty)\}.$$

In Abbildung 3-14 ist der Zustand nach dem ersten Schleifendurchlauf des Dijkstra-Algorithmus aufgezeigt. Hierbei erhalten alle Knoten, die von  $s$  direkt erreicht werden, das Gewicht der direkten Kante.

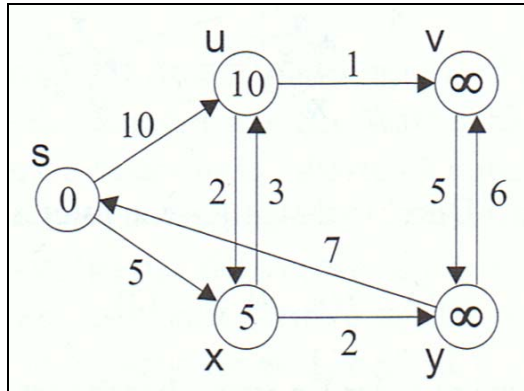


Abbildung 3-14 : Dijkstra – Erster Schleifendurchlauf [Saake, Sattler 2010; S. 457]

Nach dem ersten Schleifendurchlauf wurde  $s$  aus  $Q$  entfernt und es ergibt sich folgende Prioritätswarteschlange:

$$Q = \{(x : 5), (u : 10), (v : \infty), (y : \infty)\}.$$

Im zweiten Schleifendurchlauf (s. Abb. 3-15) wird der Knoten  $x$  bearbeitet, da er nun den minimalen Distanzwert aus  $Q$  enthält. Dieser Wert ist der endgültige Distanzwert von  $x$ , da jeder andere Pfad zu  $x$  über die Kante  $u$  führen müsste und mindestens einen Distanzwert von Zehn hätte.

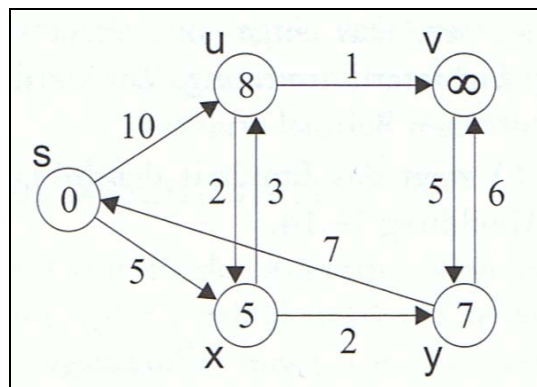


Abbildung 3-15 : Dijkstra – Zweiter Schleifendurchlauf [Saake, Sattler 2010; S. 458]

Nachdem  $x$  auch aus  $Q$  entfernt wurde, ergibt sich nun folgende Prioritätswarteschlange:

$$Q = \{(y : 7), (u : 8), (v : \infty)\}.$$

Zu beachten ist, dass der Distanzwert von  $u$  angepasst worden ist. Der indirekte Pfad über  $x$  hat eine geringere Gewichtung als der direkte Weg von  $s$  nach  $u$ .

In Abbildung 3-16 ist das Ergebnis des dritten Schleifendurchlaufs aufgezeigt. Hierbei wurde nun der Knoten  $y$  bearbeitet.

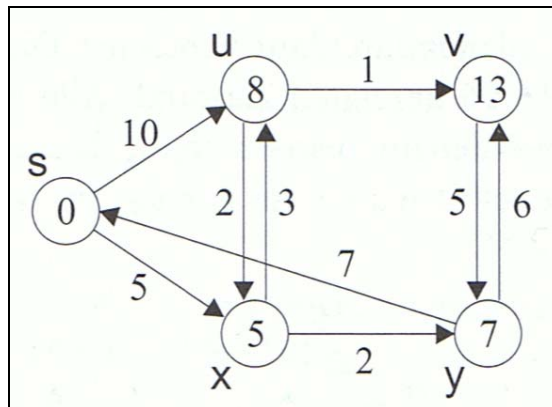


Abbildung 3-16 : Dijkstra – Dritter Schleifendurchlauf [Saake, Sattler 2010; S. 458]

Die Prioritätswarteschlange hat nun folgende Form:

$$Q = \{(u : 8), (v : 13)\}.$$

Im vierten Durchlauf wird nun wieder der Knoten mit dem minimalen Distanzwert bearbeitet, also  $u$ . Das Ergebnis zeigt Abbildung 3-17.

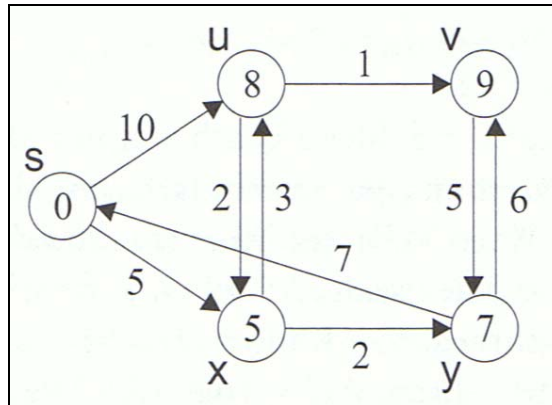


Abbildung 3-17 : Dijkstra – Vierter Schleifendurchlauf [Saake, Sattler 2010; S. 458]

Die Prioritätswarteschlange  $Q$  enthält jetzt noch einen Knoten, dessen Abarbeitung aber nichts mehr an den Distanzwerten ändert. Die Abbildung 3-17 zeigt das Ergebnis des Dijkstra. Alle Knoten sind jetzt mit der kürzesten Verbindung zum Startknoten  $s$  versehen [Saake, Sattler 2010; S. 454 ff].

Dieses Verfahren und spezielle Modifikationen des Dijkstra-Algorithmus bilden die Grundlage für die Netzwerkanalysefunktionen im *Network Analyst*.

### 3.4.2 Network Analyst

Die ArcGIS Programmiererweiterung *Network Analyst* bietet die Möglichkeit viele mit Verkehrsnetzwerken zusammenhängenden Aufgaben und Probleme zu lösen. Zu diesen Aufgabenstellungen gehören Routensuche, Routenbeschreibung, Standortzuweisung und Umgebungssuche. Mit diesem Werkzeug ist es möglich, dynamische Netzzustände wie Abbiegevorschriften, Geschwindigkeitsbeschränkungen, Höhenlimits, die gegenwärtige Verkehrssituation und tageszeitabhängige Effekte realistisch zu modellieren. Der *Network Analyst* ist in der Lage, Fahrzeitanalysen durchzuführen, Routen zwischen zwei Punkten zu finden und Routenbeschreibungen zu erzeugen. Er kann Versorgungsgebiete (*service areas*) errechnen, Ereignisse (z.B. Kunden) dem am besten geeigneten Standort (z.B. Filiale) zuweisen, Kreuztabellen zwischen vielen Start- und Zielpunkten ausgeben und kürzeste beziehungsweise günstigste Verbindungen zwischen Punkten ermitteln. Anwendung findet diese Erweiterung vor allem in den Marktsegmenten Verkehr und Logistik, Gesundheitswesen, Innere Sicherheit, Schule und Bildung, Ver- und Entsorgung sowie im Geomarketing [<http://www.esri-germany.de/products/arcgis/extensions/networkanalyst/index.html>].

Der *Network Analyst* ermöglicht das Erstellen, Editieren und Analysieren von Netzwerken. Er beinhaltet neben einem Werkzeug zur Erstellung eines Netzwerkdatenbestandes (*network dataset*) im ArcCatalog auch eine Werkzeugleiste in ArcMap mit der die, für das jeweilige Routing entsprechenden, Einstellungen getätigt werden können. Ein *network dataset* wird aus den *feature classes*, die am Netzwerk beteiligt sein sollen, gebildet. Es beinhaltet ein Konnektivitätsmodell, das komplexe Szenarien multimodaler (Transport durch mehrere Verkehrsträger wie z.B. Schiene, Straße, Wasserstraße) Verkehrsnetzwerke repräsentieren kann. Ebenso hat es ein Netzwerkattributmodell, das es ermöglicht, Widerstände, Beschränkungen und eine Rangordnung im Netzwerk zu definieren und zu verwalten [[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=What\\_is\\_a\\_network\\_dataset%3F](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=What_is_a_network_dataset%3F)].

Es werden hauptsächlich zwei Arten von Netzwerken unterschieden: Zum einen ein Verkehrsnetzwerk (*transportation network*) und zum anderen ein Versorgungsnetzwerk (*utility network*). Ein *transportation network* ist ein ungerichtetes Netzwerk. Das bedeutet, dass die Möglichkeit besteht, zu entscheiden in welche Richtung, mit welcher Geschwindigkeit und zu welchem Ziel die Beförderung stattfindet. Allerdings kann eine Kante mit Beschränkungen (*restrictions*) belegt werden. Zu diesen Beschränkungen gehören beispielsweise Einbahnstraßen oder Straßen, die keine Wendemöglichkeit

bieten. Dies ist ein entscheidender Unterschied zu einem *utility network*. Solche Netzwerke sind gerichtet. Hier ist festgelegt, in welche Richtung das zu transportierende Gut (z.B. Wasser oder Strom) durch das Netzwerk fließt. Der Weg (Fließrichtung), den zum Beispiel das Wasser nimmt, ist also vorher festgelegt. Die Fließrichtung (*flow direction*) kann in Abhängigkeit von Quellen (*sources*) oder Senken (*sinks*) geändert werden. In ArcGIS wird ein *utility network* mittels eines geometrischen Netzwerks (*geometric network*) erstellt [[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?id=4392&pid=4390&topicname=Types\\_of\\_networks](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?id=4392&pid=4390&topicname=Types_of_networks)].

Aufgabe ist es nun, aus dem erstellten *transportation network* mithilfe der Routingfunktionen des *Network Analyst* den Streckenverlauf für das *utility network* (Nahwärmenetz) zu finden. Dies wurde mit dieser Erweiterung realisiert und ist auf den kommenden Seiten beschrieben. Die Erstellung eines *utility network* beziehungsweise *geometric network* ist im anschließenden Kapitel 4 ausführlich erläutert.

### 3.4.3 Network Dataset – Erstellung und Analyse

Voraussetzung für die Nutzung des *Network Analyst* und den dazugehörigen Funktionen ist eine routingfähige Netzgrundlage, das *network dataset*. Das heißt, der erste Schritt besteht darin, aus der Feature Class *ATKIS\_Gemeindestrasse* mithilfe des ArcCatalog ein *network dataset* zu erzeugen. Wichtig sind hierbei die Verbindungseinstellungen (*connectivity*). Da es sich um einen ebenen Graphen handelt wird die *endpoint-connectivity* gewählt, das heißt, dass eine Kante nur über ihren Endpunkt mit einer anderen Kante verbunden sein kann. Eine weitere Möglichkeit ist die Einbeziehung von Höhendaten (*elevation*), die beispielsweise für Brücken oder Tunnel entscheidend sind. Da das Wenden oder Abbiegen in diesem Netz allerdings nur an Knoten erlaubt ist, finden die Höheninformationen keine Berücksichtigung. Die Einstellung *global turns* ermöglicht Wendemanöver in jede Richtung. Weiter wird als entscheidendes Attribut für das Routing die Länge der Streckensegmente gewählt. Die Länge einer Strecke ist also ihr Gewicht. Bei den *directions* Einstellungen wird festgelegt, was in der Routenbeschreibung angezeigt wird. Hier wurden zum einen die Länge des Streckensegments in Metern und der Straßenname des Streckensegments gewählt.

Abbildung 3-18 zeigt das erzeugte *network dataset* mit den Straßenachsen (Edges) und den automatisch erzeugten Kreuzungen (Routing\_ND\_Junctions).

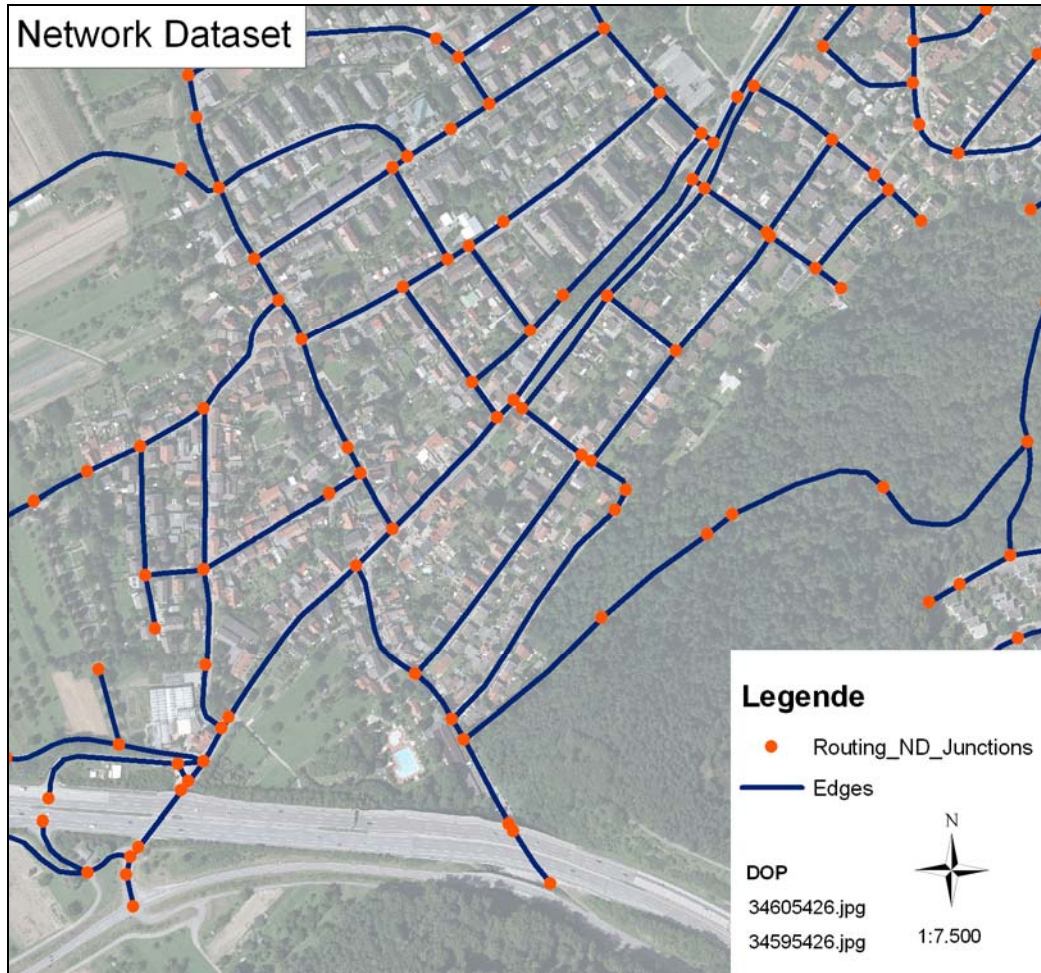


Abbildung 3-18 : Network Dataset

Um nun in diesem Netzwerk die Route zwischen der Heizzentrale und den Abnehmern zu finden, wurde die *solve* Funktion (in Abb. 3-19 rot markiert) der *Network Analyst toolbar* verwendet.

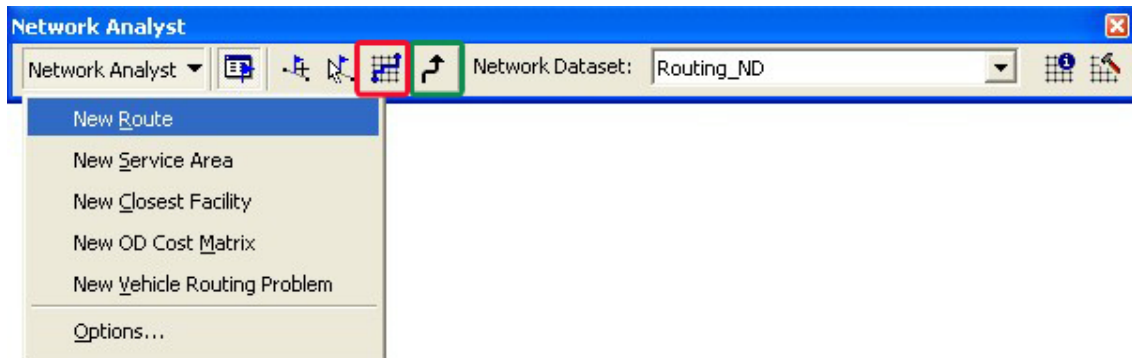


Abbildung 3-19 : Network Analyst toolbar

Zunächst wurde eine neue Route angelegt. Anschließend wurden die Abnehmer und die Heizzentrale aus den jeweiligen *feature classes* als Haltestellen (*stops*) der Route geladen. Bei den Analyseinstellungen für das Routing wurde das Kantengewicht zugewiesen, die Heizzentrale als Startpunkt gewählt und Kehrtwenden (*U-turns*) im gesamten Netz zugelassen.



Das Ergebnis des Routing und die über die *directions* Funktion (in Abb. 3-19 grün markiert) erzeugte Routenbeschreibung zeigen die beiden folgenden Abbildungen 3-20 und 3-21.

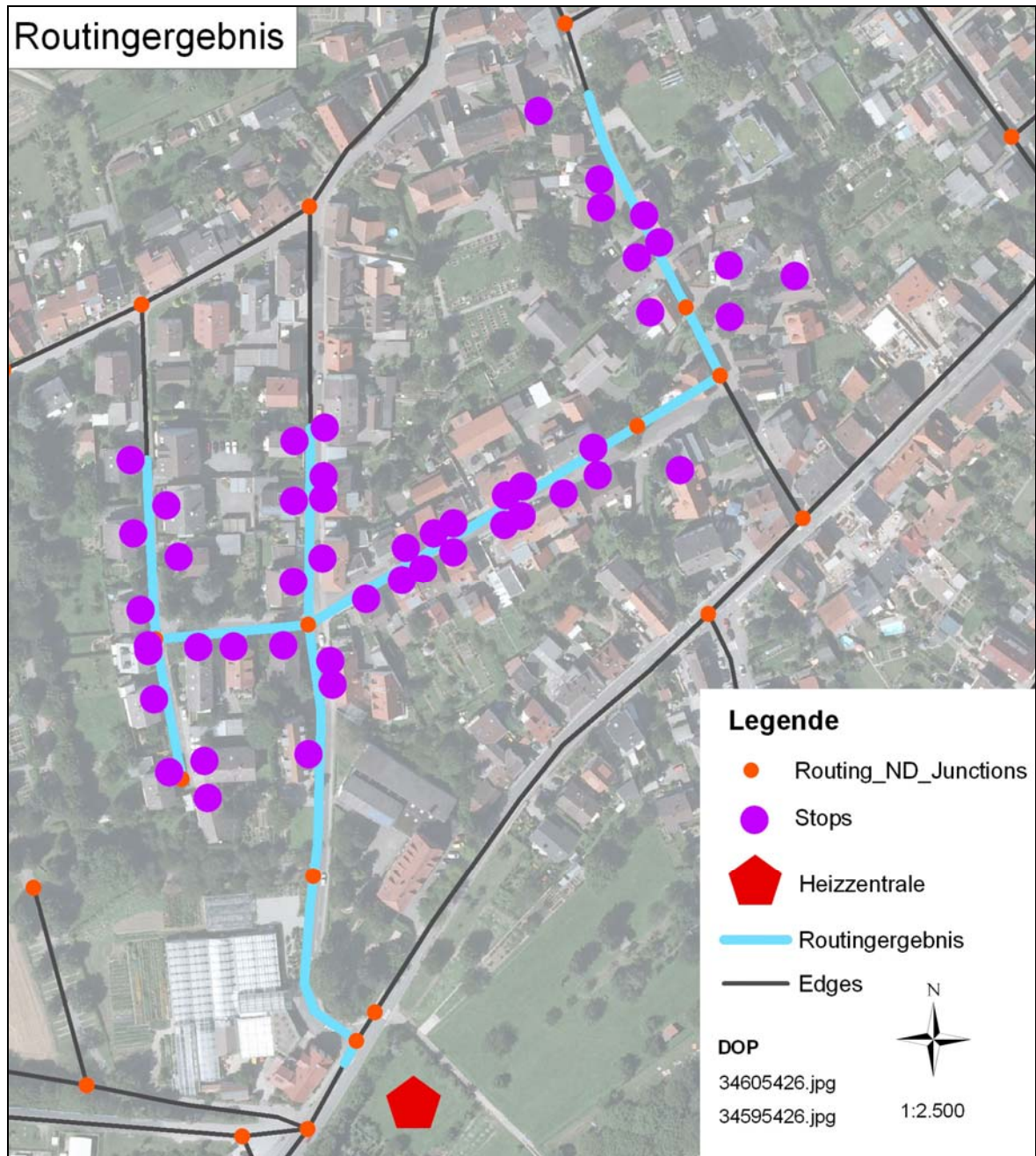


Abbildung 3-20 : Routingergebnis

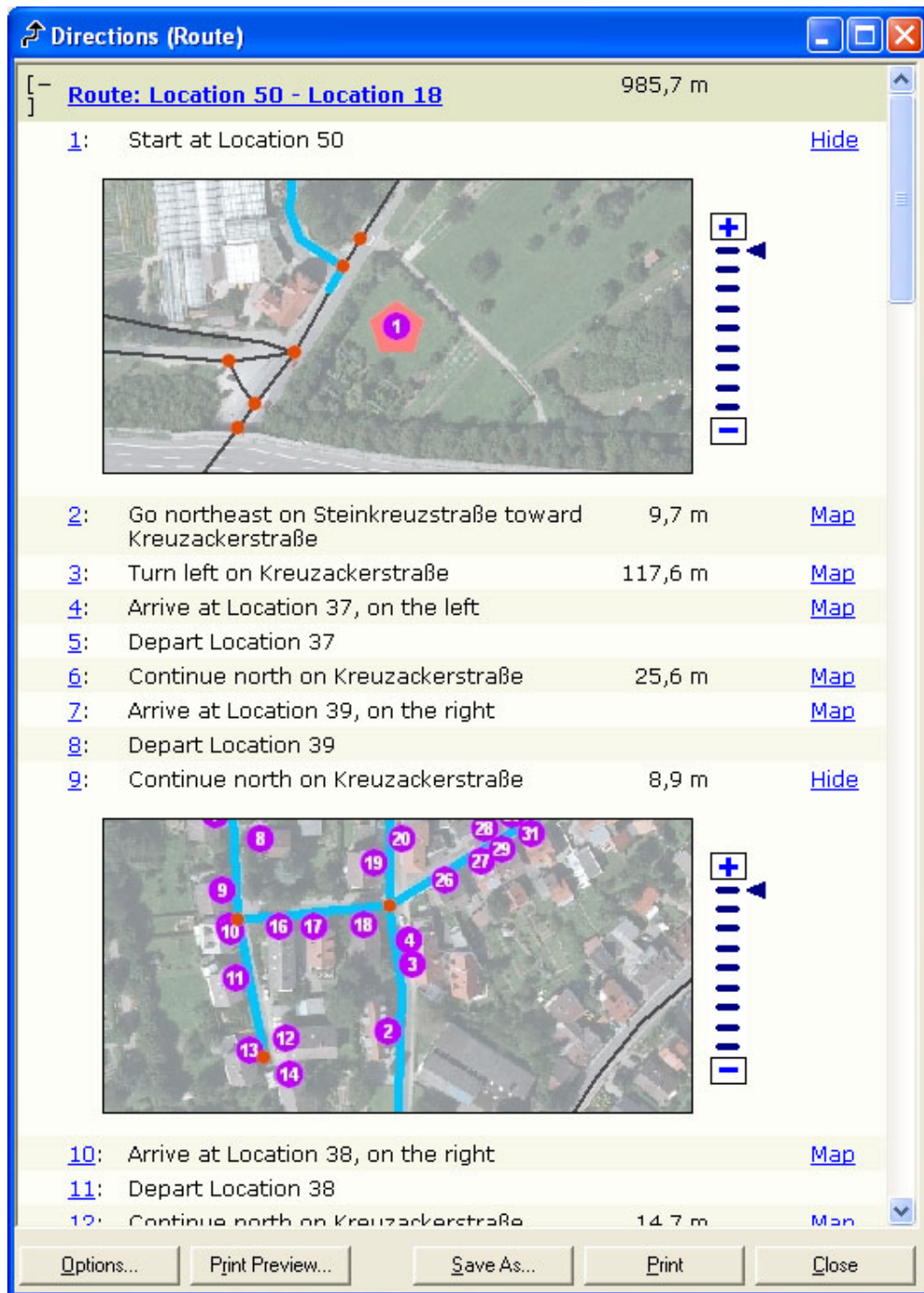


Abbildung 3-21 : Routenbeschreibung

Das Ergebnis des Routing dient nun als Vorlage für die Hauptleitungen im zu erstellenden Nahwärmenetz. Da es für die weitere Bearbeitung, vor allem im Hinblick auf die Erstellung der Hausanschlussleitungen, entscheidend ist, die Attribute der ATKIS Daten zu übernehmen, wurde aus dieser Datengrundlage anhand des Routingergebnisses das Netz der Hauptleitungen erstellt.

Zunächst wurde die Route als neue *feature class* mit dem Namen Routingergebnis in der Datenbank abgelegt. Danach wurde in ArcMap aus der *feature class* ATKIS\_Gemeindestrassen das Netz anhand der Vorlage Routingergebnis herausgeschnitten und als neue *feature class* Hauptleitungen in der Datenbank abgelegt. Da die Straßenachsen der ATKIS Daten nicht in jedem Fall einer Hauptleitung entsprechen, sondern sich aus mehreren Segmenten zusammen setzen können, werden diese gegebenenfalls zu einer Achse vereinigt. Diese Schritte sind für die Netzerstellung unabdingbar, da der korrekte geometrische Verlauf der Hauptleitungen den entscheidenden Faktor für die spätere Berechnung des kumulierten Wärmebedarfs darstellt.



Die folgende Abbildung zeigt die erstellten Hauptleitungen des Nahwärmenetzes.

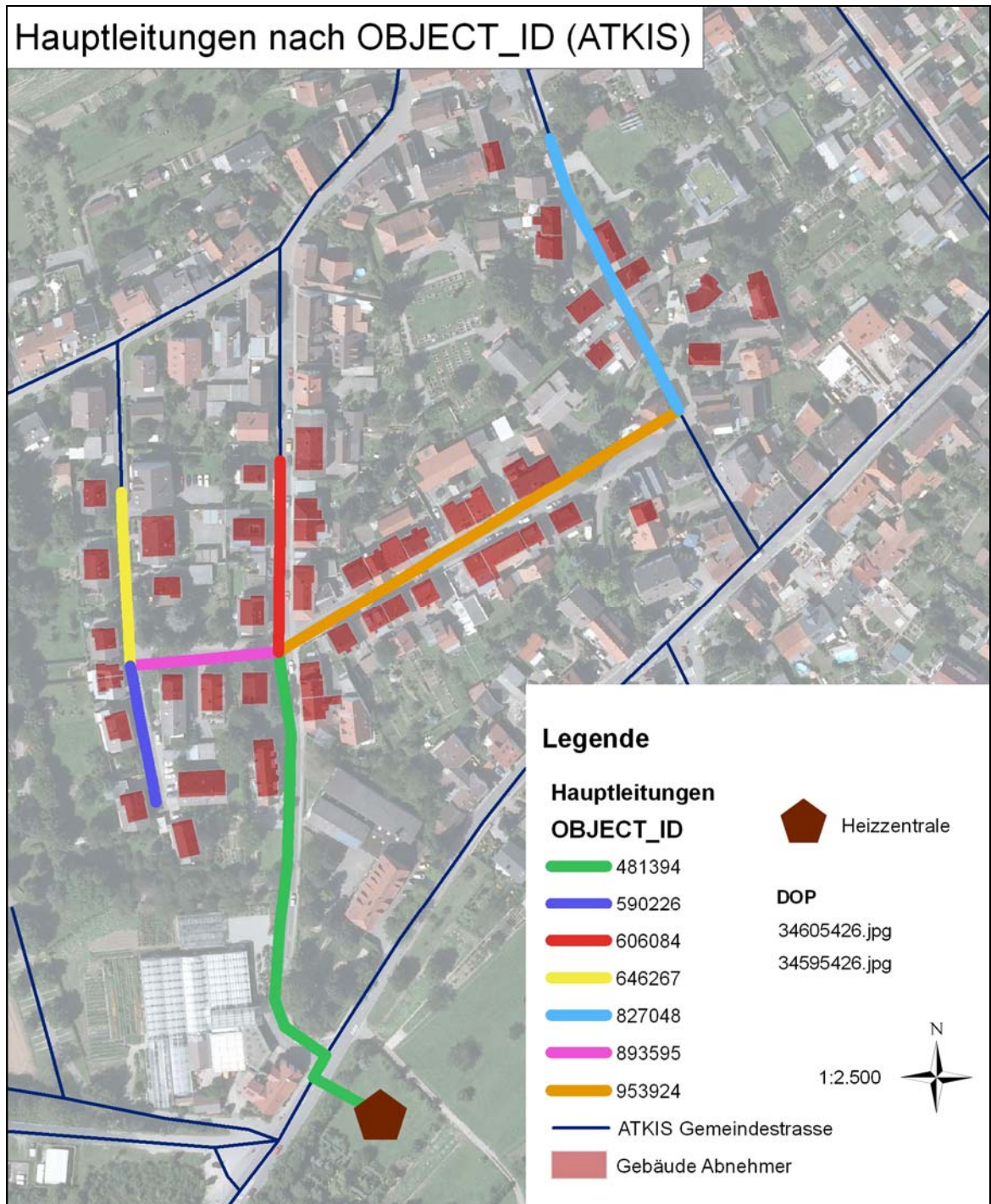


Abbildung 3-22 : Hauptleitungen nach ATKIS OBJECT\_ID

## 4 Versorgungsnetzwerk

Ein Versorgungsnetzwerk (*utility network*) wird in ArcGIS mithilfe eines geometrischen Netzwerks (*geometric network*) erstellt. Ein *geometric network* ermöglicht es, reale Versorgungsnetzwerke und Infrastrukturen zu modellieren und zu analysieren. Beispiele für diese Netze sind die Leitungen einer Wasserversorgung, Strom-, Gas- und Telefonleitungen aber auch ganze Flussnetzwerke. Ein solches Netz besteht aus miteinander verbundenen Kanten (*edges*) und Knoten (*junctions*). Um das Verhalten eines solchen Netzwerkes so realistisch wie möglich darzustellen, wird diese Verbundenheit durch bestimmte Bedingungen und Regeln (*connectivity rules*) definiert. Als Datenquelle für ein *geometric network* dienen die *feature classes* einer *geodatabase*. Welche Rolle die einzelnen *feature classes* im Netzwerk spielen, wird bei der Erstellung des *geometric network* festgelegt [[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=What\\_is\\_a\\_geometric\\_network?](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=What_is_a_geometric_network?)].

### 4.1 Geometric Network – Bestandteile

Ein *geometric network* wird innerhalb eines Merkmalsdatenbestandes (*feature dataset*) einer *geodatabase* erstellt. Die *feature classes* eines *feature dataset* stellen hierbei die Datenquelle für die Netzwerkkanten und –knoten. Die Konnektivität des Netzwerkes beruht auf der räumlichen Übereinstimmung der Datenquelle. Ein *geometric network* beinhaltet zwei Hauptelemente, Kanten und Knoten. Diese sind topologisch miteinander verknüpft. Wobei eine Kante mit einer anderen Kante über einen Knoten verbunden sein muss um den Fluss im Netzwerk zu gewährleisten. Dies wird auch Netzwerkintegrität genannt und durch das logische Netzwerk (*logical network*) sichergestellt. Ein *logical network* wird von ArcGIS automatisch beim Erzeugen eines *geometric network* erstellt und repräsentiert ein Konnektivitätsmodell der Beziehungen der Netzelemente. Es stellt somit den Konnektivitätsgraph für Ablaufverfolgungen (*tracing*) und Flussberechnungen (*flow calculations*) im Netz. Eine Kante oder ein Knoten des *geometric network* entspricht einer oder mehreren Kanten oder Knoten im *logical network*. Es wird intern in Form von Tabellen verwaltet, die automatisch erzeugt und erhalten werden. Dies ermöglicht schnelle Ablaufverfolgungsverfahren (*tracing*) im Netzwerk (vgl. Kapitel 4.3.2 Ablaufverfolgung) und erhält die Konnektivität beim Editieren des Netzes [[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=What\\_is\\_a\\_geometric\\_network?](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=What_is_a_geometric_network?)].

### 4.1.1 Kanten

Eine Kante ist ein Element entlang dessen das Transportgut (in diesem Fall Wasser) fließt. Kanten werden auf der Grundlage von *line feature classes* eines *feature datasets* gebildet und entsprechen gleichzeitig den Kantenelementen des *logical network*. Beispiele für *edges* sind Wasserhauptleitungen, Hochspannungsleitungen, Pipelines oder Telefonleitungen. Es gibt zwei Arten von Kanten in einem *geometric network*, zum einen die *simple edges* und zum anderen die *complex edges*.

#### Simple edges

*Simple edges* sind immer mit zwei Knoten verbunden, ein Knoten an jedem Ende. Ein Beispiel für eine *simple edge* ist ein Abzweigstück in einem Wassernetzwerk. Das Abzweigstück ist an einem Ende mit einem Knoten entlang der Wasserhauptleitung und am anderen Ende beispielsweise mit einem Ventil oder einer Pumpe verbunden. *Simple edges* besitzen keine so genannte *mid-span connectivity*. Das bedeutet, wenn ein neuer Knoten unter Einhaltung der Konnektivität eingefügt wird, dann wird die Kante in zwei separate Kanten unterteilt. Somit entspricht eine *simple edge* einer einzelnen Kante im *logical network*.

#### Complex edges


*Complex edges* sind immer mit mindestens zwei Knoten verbunden, ein Knoten an jedem Ende. Sie können aber entlang ihrer Strecke mit zusätzlichen Knoten verbunden sein. Eine Hauptleitung in einem Wassernetzwerk ist ein Beispiel für eine *complex edge*. Sie kann über Knoten entlang ihrer Strecke mit mehreren *simple edges* verbunden sein, ohne in mehrere Leitungen gespalten zu werden. *Complex edges* besitzen also die *mid-span connectivity*. Wenn ein neuer Knoten entlang einer *complex edge* eingefügt wird, bleibt die Kante geometrisch erhalten und wird nur logisch gespalten. So kann eine *complex edge* einer oder mehrerer Kanten im *logical network* entsprechen [[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=What\\_is\\_a\\_geometric\\_network?](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=What_is_a_geometric_network?)].

#### 4.1.1.1 Netzelemente

Im Nahwärmenetz Wolfartsweier gibt es drei *edge feature classes*, die Hauptleitungen, die Hausanschlussleitungen und die Abzweigleitungen.

#### Hauptleitungen

Sie entsprechen den Hauptwasserleitungen im Nahwärmenetz Wolfartsweier und wurden aus den ATKIS Daten erzeugt. An jede Hauptleitung können mehrere Hausanschlussleitungen anknüpfen. Da später die Dimension (Durchmesser) anhand des kumulierten Wärmebedarfs für jede Hauptleitung berechnet werden soll, werden sie als *complex edges* in das *geometric network* eingebunden. Die Hauptleitungen beinhalten alle Attribute der ATKIS Daten. Da aber nicht alle Attribute für die weitere Bearbeitung notwendig sind, wurde die Attributtabelle auf die entscheidenden Spalten reduziert. Zu diesen gehören die **OBJECT\_ID**, die als Referenz zur Erzeugung der Hausanschlussleitungen dient, der vorherrschende Straßename (**GN**) der Hauptleitung und die Länge (**Laenge**) der Leitung in Metern. Die Spalte **Shape** bezeichnet den Geometrietyp der *feature class*. Da es sich hierbei um Linienelemente handelt, entspricht dies dem Typ *Polyline*, wohingegen die Knoten dem Typ *Point* entsprechen. Die bereinigte Attributtabelle zeigt die folgende Abbildung.



OBJECTID	Shape	OBJECT ID	GN	Laenge
1	Polyline	481394	Kreuzackerstraße	206,48
2	Polyline	953924	Rathausstraße	182,26
3	Polyline	893595	Rathausstraße	57,91
4	Polyline	646267	Grundstraße	68,03
5	Polyline	590226	Grundstraße	53,75
6	Polyline	827048	Wettersteinstraße	117,53
7	Polyline	606084	Kreuzackerstraße	74,63

Abbildung 4-1 : Attributtabelle Hauptleitungen

## Hausanschlussleitungen

Die Hausanschlussleitungen entsprechen *simple edges* und verbinden die Hauptleitungen mit den Abnehmerknoten. Das entscheidende Attribut für die spätere Dimensionierung der Hausanschlussleitungen ist der Wärmebedarfswert des anschließenden Abnehmerknoten (**Leistung\_k**). Weitere Attribute sind die **OBJECTID**, die für jede Leitung individuell ist, der **Typ** der Leitung, die Information von welchem Abnehmerknoten zu welchem Verteilknoten (**ID\_von** und **ID\_nach**) sich die Leitung erstreckt, die Adresse des anschließenden Gebäudes (**Adresse\_Ge**), die anschließende Hauptleitung (**ID\_Strasse**; entspricht **OBJECT\_ID** der Hauptleitung) und die Länge (**Laenge**) der Leitung in Metern. Die Attributtabelle der Hausanschlussleitungen ist in der folgenden Abbildung zu sehen.

OBJECTID	Shape	OBJECTID	Typ	Leistung_k	ID_von	ID_nach	Adresse_Ge	ID_Strasse	Laenge
1	Polyline	79	Hausanschlussleitung	48,65	80	80	Rathausstr. 2	953924	1,5
2	Polyline	80	Hausanschlussleitung	28,01	81	81	Rathausstr. 3	953924	22,71
3	Polyline	81	Hausanschlussleitung	17,99	82	82	Rathausstr. 3a	953924	8,21
4	Polyline	82	Hausanschlussleitung	27,77	83	83	Rathausstr. 4	953924	2,88
5	Polyline	83	Hausanschlussleitung	15,53	84	84	Rathausstr. 5	953924	7,48
6	Polyline	84	Hausanschlussleitung	28,53	85	85	Rathausstr. 6	953924	3,24
7	Polyline	85	Hausanschlussleitung	28,04	86	86	Rathausstr. 7	953924	6,46
8	Polyline	86	Hausanschlussleitung	27,1	87	87	Rathausstr. 8	953924	4,56
9	Polyline	87	Hausanschlussleitung	16,56	88	88	Rathausstr. 9	953924	6,06
10	Polyline	88	Hausanschlussleitung	12,87	89	89	Wettersteinstr. 10	827048	21,79
11	Polyline	89	Hausanschlussleitung	17,58	90	90	Wettersteinstr. 11	827048	12,79
12	Polyline	90	Hausanschlussleitung	25,79	91	91	Wettersteinstr. 12	827048	2,45
13	Polyline	91	Hausanschlussleitung	21,41	92	92	Wettersteinstr. 13	827048	7,76
14	Polyline	92	Hausanschlussleitung	20,77	93	93	Wettersteinstr. 14	827048	1,77
15	Polyline	93	Hausanschlussleitung	37,45	94	94	Wettersteinstr. 19	827048	11,54

Abbildung 4-2 : Attributtabelle Hausanschlussleitungen



In Abbildung 4-3 ist ein Ausschnitt der Hauptleitungen (türkis) und Hausanschlussleitungen (blau) dargestellt.

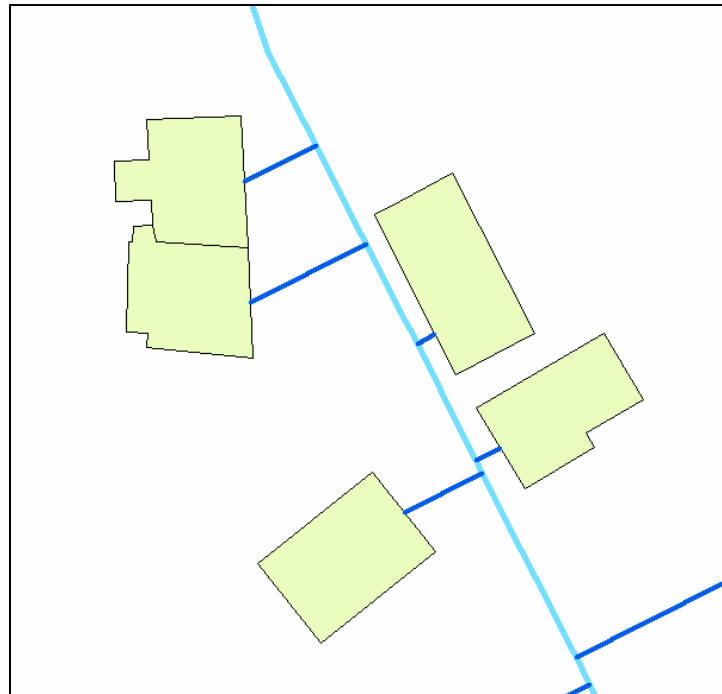
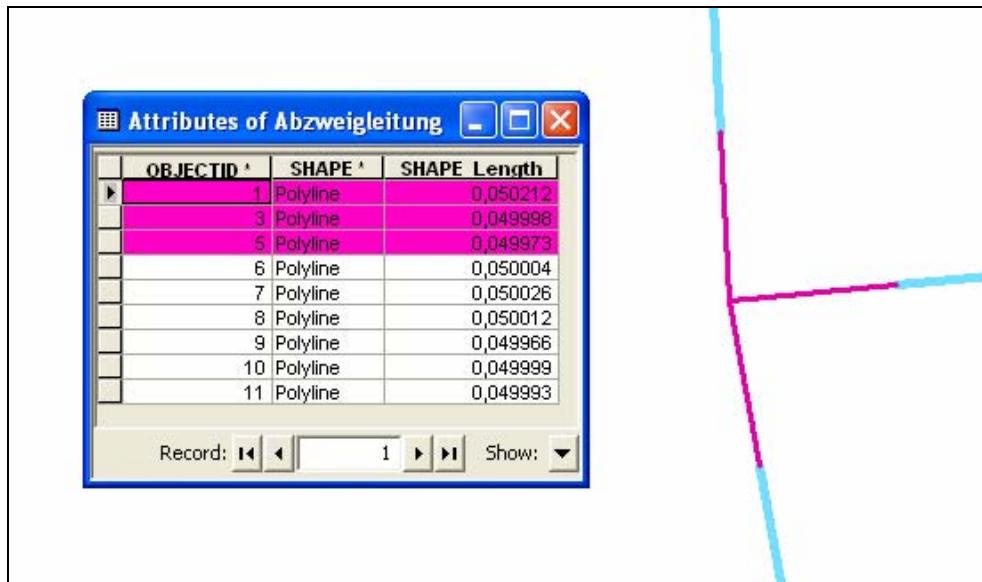


Abbildung 4-3 : Ausschnitt Hauptleitungen und Hausanschlussleitungen

### Abzweigungen

Um Ablaufverfolgungen im *geometric network* zu ermöglichen, wurden zusätzliche Abzweigungen erstellt. An jedem Knoten, an dem sich mindestens zwei Hauptleitungen treffen, wurde für jede Hauptleitung eine Abzweigung mit der Länge von fünf Zentimetern eingefügt. Da im *tracing* der kumulierte Wert von Knoten zu Knoten berechnet wird, erfordert dies für jede Hauptleitung separate Knoten. Die Abzweigungen sind also die Verbindung der Abzweignoten mit den Hauptleitungen.

Die folgende Abbildung zeigt die Attributtabelle der Abzweigleitungen und einen Ausschnitt einer Hauptleitungskreuzung.



The screenshot shows a window titled "Attributes of Abzweigleitung" with a table of attributes. The table has three columns: OBJECTID, SHAPE, and SHAPE Length. The first five rows are highlighted in pink. To the right of the window is a diagram showing a vertical cyan line intersecting a horizontal cyan line, with a pink line segment connecting them at the intersection point.

OBJECTID	SHAPE	SHAPE Length
1	Polyline	0,050212
3	Polyline	0,049998
5	Polyline	0,049973
6	Polyline	0,050004
7	Polyline	0,050026
8	Polyline	0,050012
9	Polyline	0,049966
10	Polyline	0,049999
11	Polyline	0,049993

Abbildung 4-4 : Attributtabelle Abzweigleitungen und Ausschnitt

## 4.1.2 Knoten

Knoten werden auf der Grundlage von *point feature classes* erzeugt und entsprechen den Knotenelementen des *logical network*. Beispiele für Knoten sind Sicherungen, Schalter oder Ventile oder wie im Fall des Nahwärmenetzes Hausübergabestationen. Es werden zwei Arten von Knoten unterschieden, die so genannten *user-defined junctions* und die *orphan junctions*.

### User-defined junctions

*User-defined junctions* sind Knoten einer *point feature class*, die beim Erstellen eines *geometric network* als Datenquelle dient. Sie entsprechen einem einzelnen Knoten im *logical network*.

### Orphan junctions

Die *orphan junctions* sind Knoten, die bei der Erstellung eines *geometric network* automatisch als neue *junction feature class* erzeugt werden. Der Name dieser *feature class* entspricht dem Namen des *geometric network*, mit der Erweiterung „\_junctions“.

Diese *feature class* dient dazu, die Netzwerkintegrität des *geometric network* sicher zu stellen. Hierbei wird an jedem Endpunkt einer jeden Kante ein Knoten eingefügt, wenn hierfür kein Knoten aus den Quelldaten vorhanden ist. Die *orphan junctions* sind also ein Indikator für die Qualität der Netzwerkintegrität der Quelldaten [[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=What\\_is\\_a\\_geometric\\_network?](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=What_is_a_geometric_network?)].

#### 4.1.2.1 Netzelemente

Im Nahwärmenetz Wolfartsweier gibt es vier *junction feature classes*. Das sind die Abnehmerknoten, die Verteilknoten, die Abzweigknoten und die Heizzentrale.

##### Abnehmerknoten

Die Abnehmerknoten sind *user-defined junctions* und wurden im Zuge der Erstellung der Hausanschlussleitungen erzeugt. Sie entsprechen dem auf der Gebäudekante gelegenen Endpunkt der Hausanschlussleitung. Die Abnehmerknoten enthalten den Wärmebedarf des Gebäudes (**Leistung\_k**). Weitere Attribute sind die individuelle **OBJECTID**, der **Typ**, die Koordinaten des Knoten (**POINT\_X** und **POINT\_Y**), die Adresse des Gebäudes und die zugeordnete Hauptleitung (**ID\_Strasse**). In den nachfolgenden Abbildungen sind die Attributtabelle und ein Ausschnitt der Abnehmerknoten (lila) dargestellt.

OBJECTID_1	Shape *	OBJECTID	Typ	Leistung_k	POINT_X	POINT_Y	Adresse	ID Strasse
24	Point	53	Abnehmerknoten	21,99	3459852,02	5426375,63	Grundstr. 14	590226
23	Point	52	Abnehmerknoten	29,6	3459837,38	5426385,34	Grundstr. 12	590226
22	Point	51	Abnehmerknoten	24,6	3459850,68	5426389,48	Grundstr. 11	590226
37	Point	66	Abnehmerknoten	38,87	3459890,16	5426392,11	Kreuzackerst	481394
21	Point	99	Abnehmerknoten	21,96	3459831,68	5426412,76	Grundstr. 10	590226
39	Point	68	Abnehmerknoten	21,26	3459899,13	5426418,42	Kreuzackerst	481394
38	Point	67	Abnehmerknoten	22,94	3459898,26	5426427,28	Kreuzackerst	481394
32	Point	61	Abnehmerknoten	13,04	3459829,64	5426430,95	Grundstr. 8b	590226
29	Point	58	Abnehmerknoten	23,35	3459848,44	5426432,48	Grundstr. 7	893595
1	Point	79	Abnehmerknoten	34,74	3459861,76	5426432,71	Rathausstr. 1	893595
31	Point	60	Abnehmerknoten	13,03	3459829,4	5426433,04	Grundstr. 8a	590226
35	Point	64	Abnehmerknoten	37,23	3459880,51	5426433,13	Kreuzackerst	893595
30	Point	59	Abnehmerknoten	17,14	3459826,53	5426446,5	Grundstr. 8	646267
49	Point	78	Abnehmerknoten	20,72	3459911,93	5426450,63	Rathausstr. 1	953924
33	Point	62	Abnehmerknoten	30,48	3459884,41	5426457,29	Kreuzackerst	606084

Abbildung 4-5 : Attributtabelle Abnehmerknoten

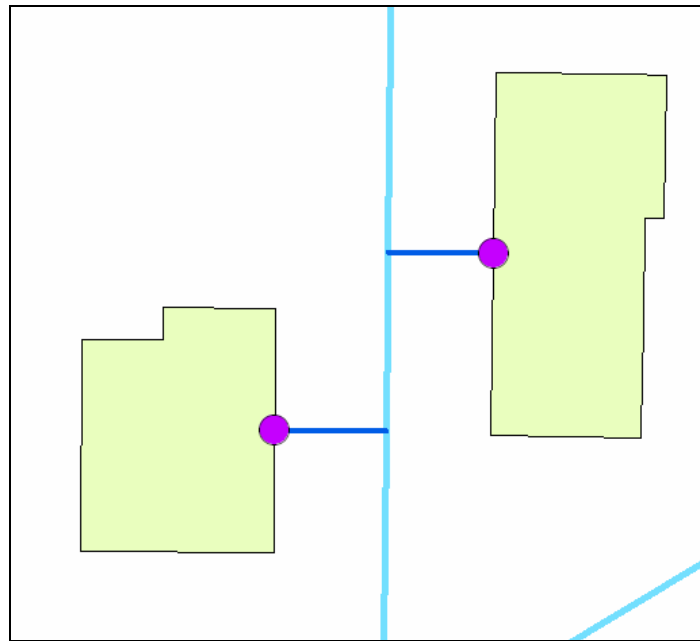


Abbildung 4-6 : Ausschnitt Abnehmerknoten

## Verteilknoten

Die Verteilknoten sind ebenfalls *user-defined junctions* und wurden wie die Abnehmerknoten bei der Erstellung der Hausanschlussleitungen erzeugt. Sie entsprechen dem auf der Hauptleitung gelegenen Endpunkt der Hausanschlussleitung. Die Verteilknoten enthalten ebenfalls den Wärmebedarf (**Leistung\_k**) des angeschlossenen Gebäudes, die **OBJECTID**, den **Typ**, die Koordinaten des Knoten (**POINT\_X** und **POINT\_Y**), die Adresse des Gebäudes (**Adresse\_G**) und die zugeordnete Hauptleitung (**ID\_Strasse**). Sie sind entscheidend für die Netzwerkintegrität und verbinden die Hauptleitungen mit den Hausanschlussleitungen. In den folgenden Abbildungen sind die Attributtabelle und ein Ausschnitt der Verteilknoten (orange) dargestellt.

OBJECTID	Shape	OBJECTID	Typ	Leistung_k	POINT_X	POINT_Y	Adresse_G	ID_Strasse
1	Point	79	Verteilknoten	34,74	3459861,238	5426438,244	Rathausstr. 1	893595
2	Point	80	Verteilknoten	48,65	3459998,728	5426506,812	Rathausstr. 2	953924
3	Point	81	Verteilknoten	28,01	3460018,844	5426519,005	Rathausstr. 3	953924
4	Point	82	Verteilknoten	17,99	3459995,294	5426504,735	Rathausstr. 3	953924
5	Point	83	Verteilknoten	27,77	3459972,585	5426490,996	Rathausstr. 4	953924
6	Point	84	Verteilknoten	15,53	3459982,702	5426497,116	Rathausstr. 5	953924
7	Point	85	Verteilknoten	28,53	3459966,567	5426487,355	Rathausstr. 6	953924
8	Point	86	Verteilknoten	28,04	3459967,389	5426487,852	Rathausstr. 7	953924
9	Point	87	Verteilknoten	27,1	3459947,22	5426475,649	Rathausstr. 8	953924
10	Point	88	Verteilknoten	16,56	3459960,990	5426483,980	Rathausstr. 9	953924
11	Point	89	Verteilknoten	12,87	3460029,584	5426567,388	Wettersteinst	827048
12	Point	90	Verteilknoten	17,58	3460030,804	5426564,976	Wettersteinst	827048

Abbildung 4-7 : Attributtabelle Verteilknoten

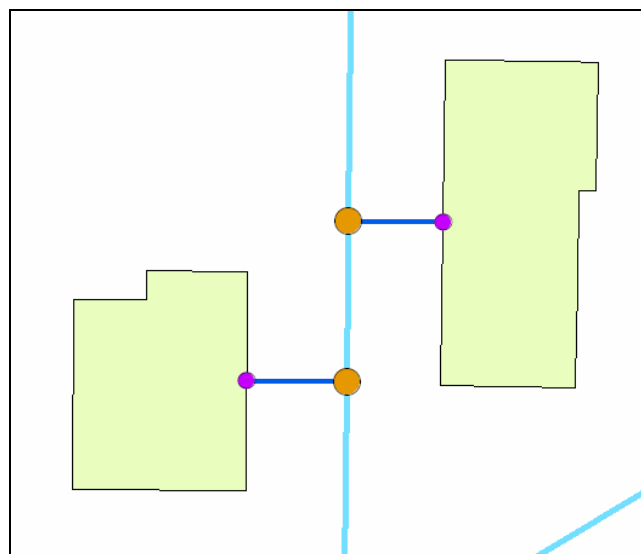


Abbildung 4-8 : Ausschnitt Verteilknoten

## Abzweigknoten

Die Abzweigknoten gehören auch zu *user-defined junctions* und wurden bei der Erstellung der Abzweigleitungen erzeugt. Sie verbinden die Hauptleitungen mit den Abzweigleitungen, gewährleisten die Netzwerkintegrität und sind entscheidend für die Berechnung des kumulierten Wärmebedarfs der Hauptleitungen.

Die folgende Abbildung zeigt die Abzweigknoten an einer Hauptleitungskreuzung.

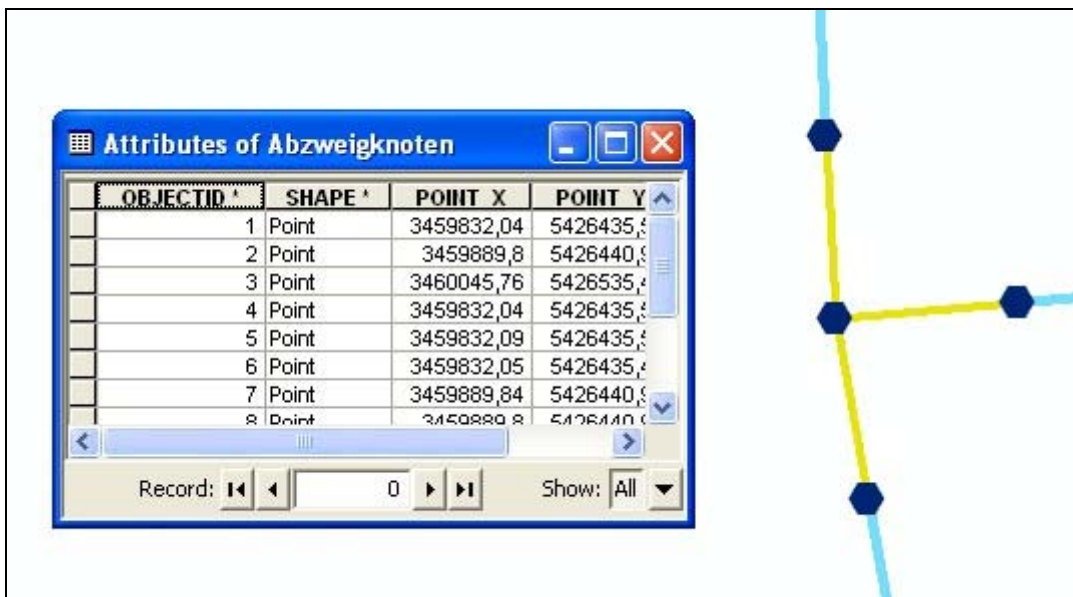


Abbildung 4-9 : Attributtabelle Abzweigknoten und Ausschnitt

## Heizzentrale

Die Heizzentrale gehört auch zu den *user-defined junctions*. Die Standortwahl der Heizzentrale spielt in der Nahwärmenetzkonzeption eine wichtige Rolle. Zum einen sollte sie aus wirtschaftlichen Gründen so nah wie möglich am Hauptleitungsnetz liegen und zum anderen sollte auch ein Standort gewählt werden, der von den Bewohnern akzeptiert wird und für sie nicht störend ist. Im Beispiel des Nahwärmenetzes Wolfartsweier wurde der Standort ohne Einsatz der GIS Analysefunktionen gewählt, da dies von der KEA in dieser Konzeption nicht gefordert war. So wurde die Heizzentrale möglichst nah an das Leitungsnetz platziert und befindet sich auf einer Freifläche am Ortsrand. Die folgende Abbildung zeigt den Standort der Heizzentrale und ihre Attributtabelle.

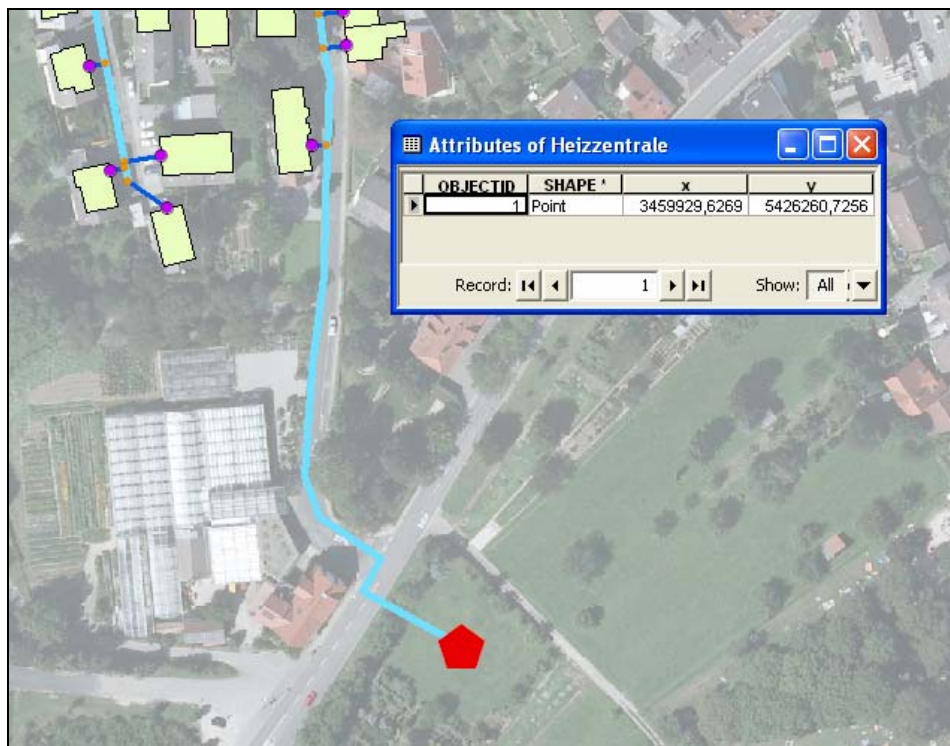


Abbildung 4-10 : Attributtabelle Heizzentrale und Lage

In der folgenden Abbildung sind nun alle *feature classes*, die das Nahwärmenetz Wolfartsweier bilden (Abzweigungen nicht sichtbar und Abzweignoten generalisiert), dargestellt.



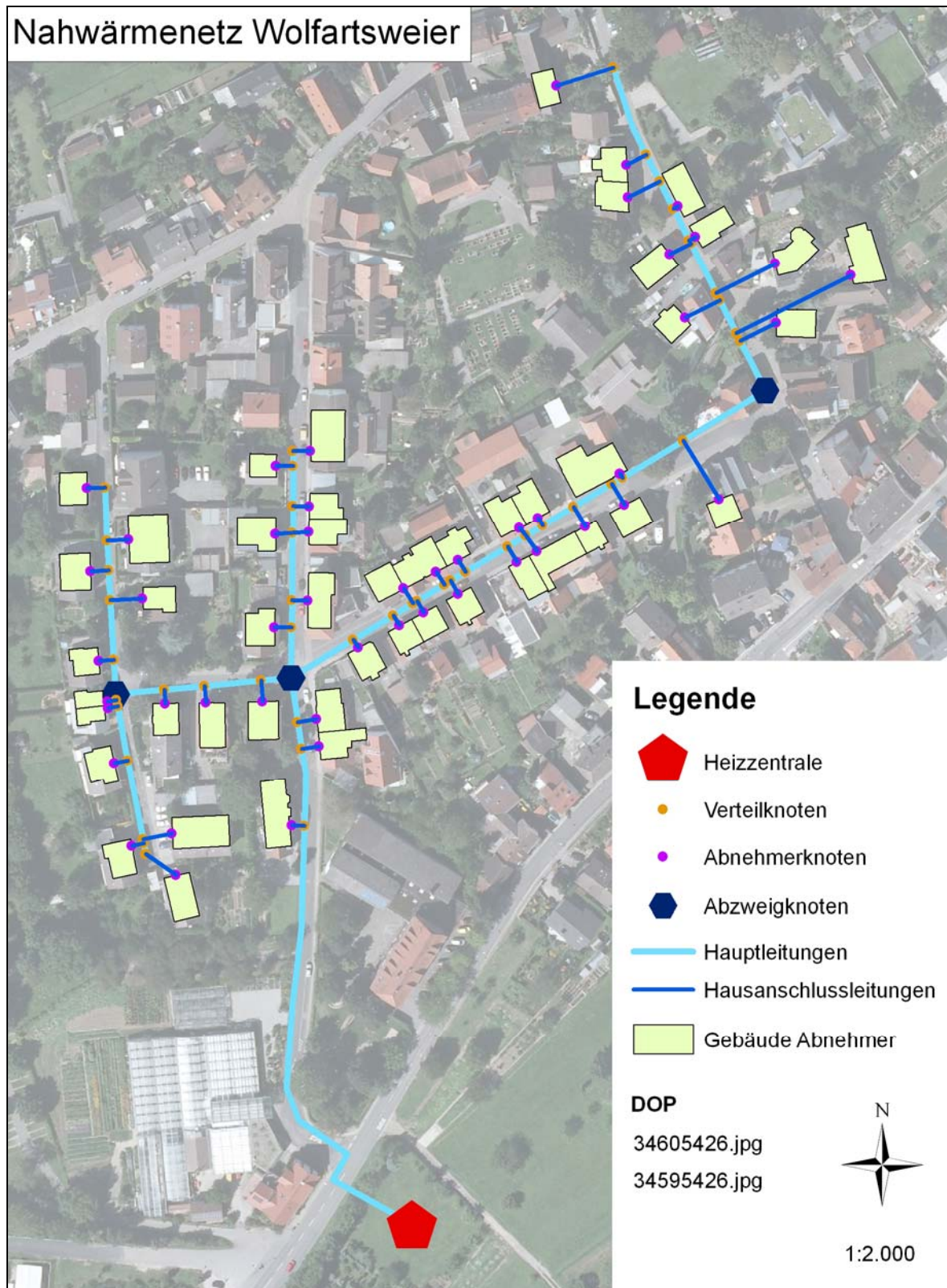


Abbildung 4-11 : Nahwärmenetz Wolfartsweier



### 4.1.3 Quellen und Senken

In einem *geometric network* ist die Richtung im Netzwerk klar definiert. Zum Beispiel ist in einem Stromnetz der Stromfluss vom Elektrizitätswerk hin zu den Verbrauchern. In einem Wassernetzwerk kann die Fließrichtung beispielsweise von einer Pumpstation zu den Verbrauchern oder von den Verbrauchern zu einer Kläranlage definiert sein. Im Nahwärmenetz Wolfartsweier handelt es sich um einen Wasserkreislauf, in dem das in der Heizzentrale aufgeheizte Wasser zu den Abnehmern geleitet wird und im Rücklauf wieder von den Abnehmern zur Heizzentrale zurückfließt.

Die Fließrichtung (*flow direction*) wird anhand von Quellen (*sources*) und Senken (*sinks*) berechnet. Die Fließrichtung ist weg von den *sources*, wie zum Beispiel Heizzentrale, Elektrizitätswerk oder Pumpstation und hin zu den *sinks*, wie zum Beispiel Abnehmern oder Kläranlage. Den *junction feature classes* in einem *geometric network* kann die Eigenschaft *source* oder *sink* zugewiesen werden. Während der Erstellung des *geometric network* wird der *junction feature class*, die als *source* oder *sink* dienen soll, die Spalte **AncillaryRole** hinzugefügt, in der der entsprechende Status eingetragen wird. In diesem Fall ist das die *feature class* Heizzentrale, wobei dem Knoten die Funktion *sink* zugewiesen wird, da die Fließrichtung für die Akkumulierung der Wärmebedarfswerte von den Abnehmern hin zur Heizzentrale ist [[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?topicname=what\\_is\\_a\\_geometric\\_network?](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?topicname=what_is_a_geometric_network?)].

### 4.1.4 Netzwerkgewichtung

Einem Netzwerk können eine Vielzahl von Gewichtungen (*weights*) zugewiesen werden. Ein Gewicht repräsentiert die Kosten der Nutzung eines Elements im *logical network*. Jedes Attribut einer *feature class* im *geometric network* kann einem *network weight* zugeordnet werden. Allerdings kann ein *weight* nur einem Attribut in einer *feature class* oder dem gleichen Attribut in mehreren *feature classes* zugeordnet werden.

Für die Dimensionierung der Hauptleitungen im Nahwärmenetz ist es erforderlich, den Wärmebedarf der Abnehmer in Fließrichtung zu kumulieren. Der Leistungswert (**Leistung\_k**) der *feature class* Abnehmerknoten entspricht hierbei den Kosten und damit dem Gewicht des Netzwerks [[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?topicname=what\\_is\\_a\\_geometric\\_network?](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?topicname=what_is_a_geometric_network?)].

### 4.1.5 Aktiviert/ deaktiviert

Ein Knoten oder eine Kante eines *geometric network* kann im *logical network* entweder aktiviert (*enabled*) oder deaktiviert (*disabled*) sein. Diese Eigenschaft wird beim Erstellen des *geometric network* als neue Spalte **Enabled** in die Attributtabelle jeder *feature class* eingefügt und auf den Standardwert *true* (also aktiviert) gesetzt. Ein deaktiviertes Element wird beim *tracing* nicht berücksichtigt. Dadurch können bei Berechnungen im Nahwärmenetz die Abnehmer variabel sein. Wenn also bestimmte Abnehmer nicht in eine Berechnung mit einfließen sollen, können in der Attributtabelle der Abnehmer die entsprechenden Knoten in der Spalte **Enabled** auf *false* gesetzt werden [[http://webhelp.esri.com/arcgis/desktop/9.3/index.cfm?TopicName=What\\_is\\_a\\_geometric\\_network?](http://webhelp.esri.com/arcgis/desktop/9.3/index.cfm?TopicName=What_is_a_geometric_network?)].

## 4.2 Geometric Network – Erstellen und Editieren

Vor der Erstellung eines *geometric network* muss klar sein, aus welchen *feature classes* es aufgebaut werden soll und welche Rolle die *feature classes* im Netzwerk spielen. Das Nahwärmenetz Wolfartsweier wird aus den *feature classes* Heizzentrale, Abnehmerknoten, Verteilknoten, Abzweignoten, Hausanschlussleitungen, Hauptleitungen und Abzweigungen gebildet. Aufgrund ihrer präzisen Abstimmung bei der Erstellung der einzelnen *feature classes* im Vorfeld, bietet die Datengrundlage eine hohe geometrische Übereinstimmung und stellt somit die Netzwerkintegrität sicher.

### 4.2.1 Einstellungen

Das *geometric network* UtilityNetwork\_Net wurde mithilfe des Assistenten *Build Geometric Network Wizard* (s. Abb. 4-12) des ArcCatalog im *feature dataset* UtilityNetwork der *geodatabase* Nahwaerme\_Wolfartsweier erstellt.

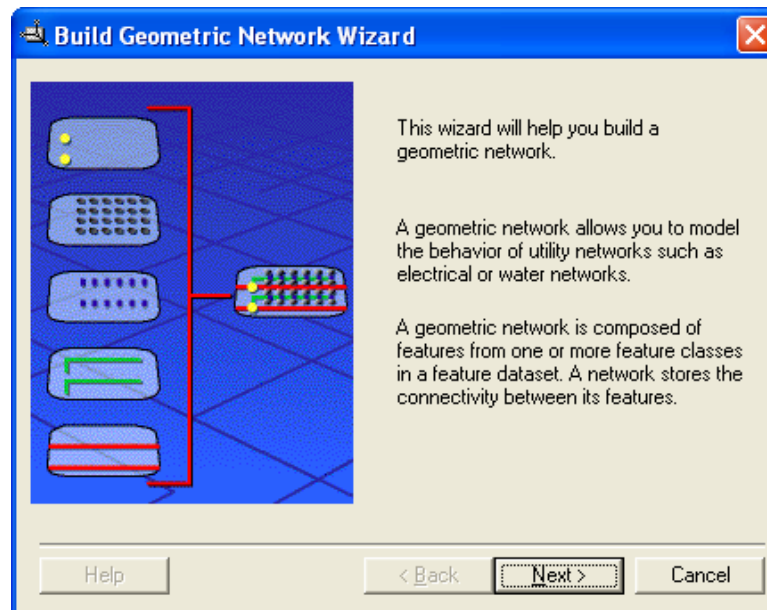


Abbildung 4-12 : Build Geometric Network Wizard

Als Datenquelle für das *geometric network* wurden die oben genannten *feature classes* des *feature dataset* UtilityNetwork verwendet.

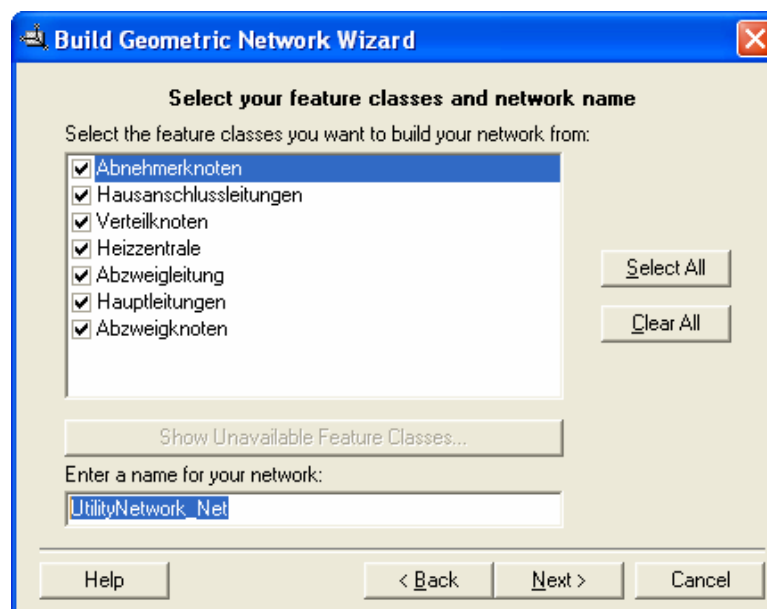


Abbildung 4-13 : Build Geometric Network Wizard - Feature classes

Während der Erstellung wurde festgelegt, dass die Hauptleitungen *complex edges* und die Hausanschlussleitungen und Abzweigleitungen *simple edges* im Netz entsprechen.

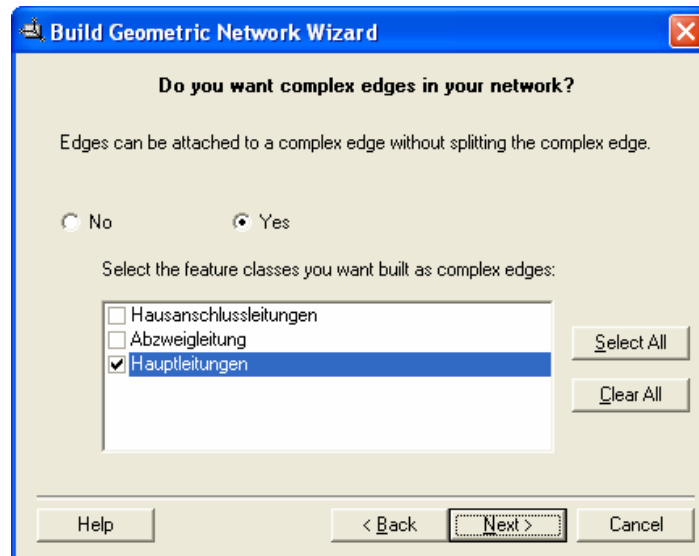


Abbildung 4-14 : Build Geometric Network Wizard - Complex edges

Weiter wurde im *geometric network* eine so genannte *snap tolerance* von zwei Zentimetern für alle *feature classes* definiert, um eventuelle Abweichungen in der geometrischen Übereinstimmung der Daten in diesem Bereich im Vorfeld abfangen und automatisch korrigieren zu können.

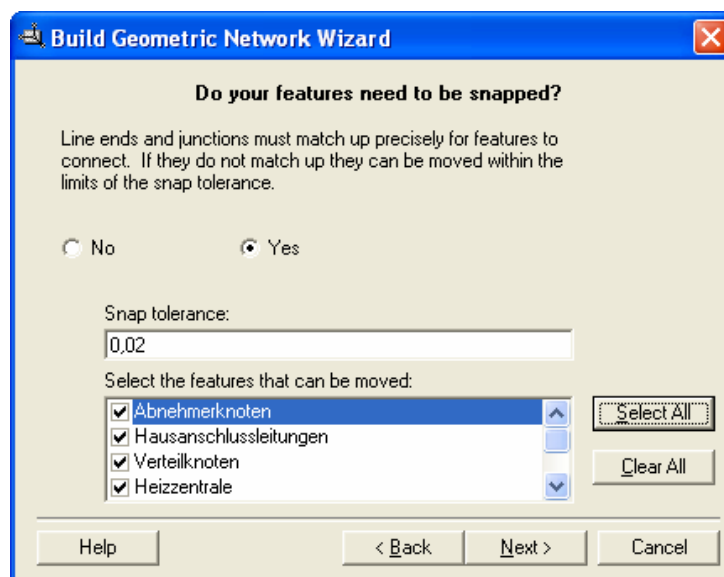


Abbildung 4-15 : Build Geometric Network Wizard – Snapping

Im nächsten Schritt wurde nun die *feature class* gewählt, deren Elemente im Netz *source* oder *sink* sein können. Im Nahwärmenetz Wolfartsweier stellt der die Heizzentrale repräsentierende Knoten die Senke im Netz dar und gibt somit die Fließrichtung von den Abnehmern zur Heizzentrale vor.

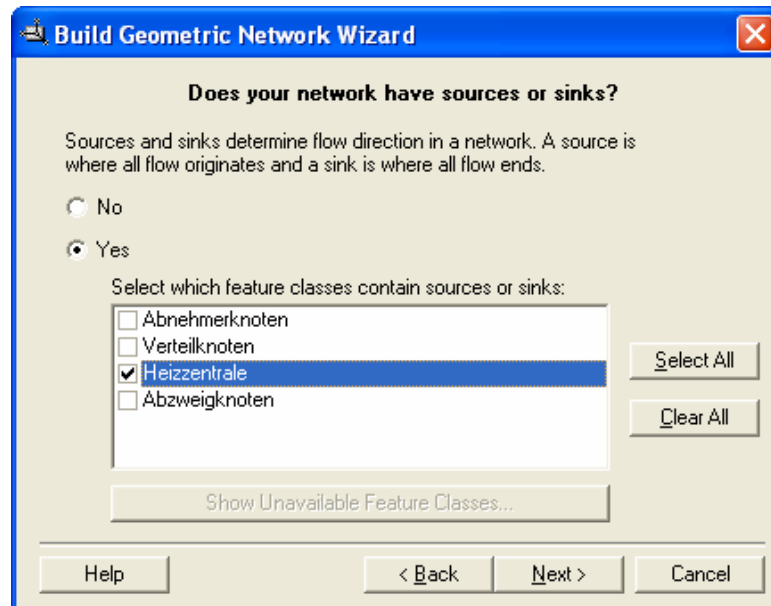


Abbildung 4-16 : Build Geometric Network Wizard – Sources/ Sinks

Die nächsten Einstellungen ermöglichen die Zuordnung von Gewichtungen im *geometric network*. Hier wurde das Gewicht *Leistung* mit dem Datentyp Double erstellt (s. Abb. 4-17) und dem Attribut **Leistung\_k** der *feature class* Abnehmer zugeordnet (s. Abb. 4-18), welches die Grundlage für die Netzdimensionierung darstellt.

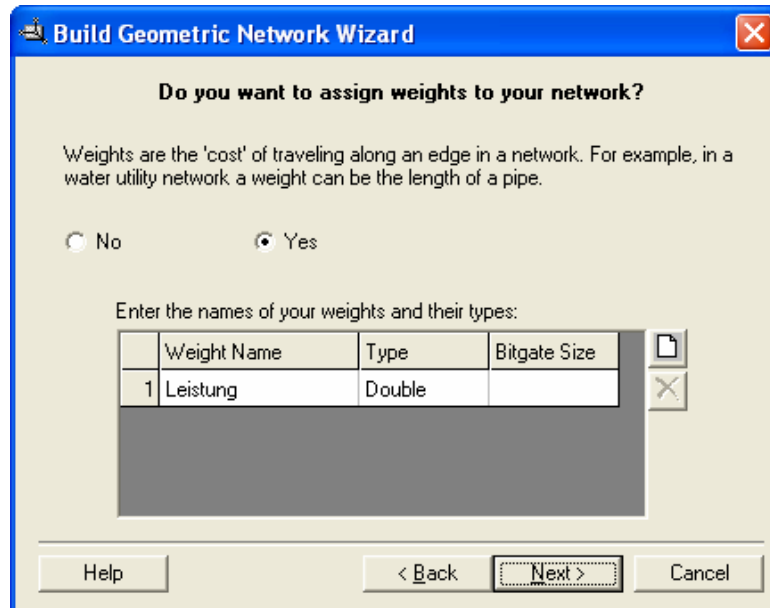


Abbildung 4-17 : Build Geometric Network Wizard – Weights

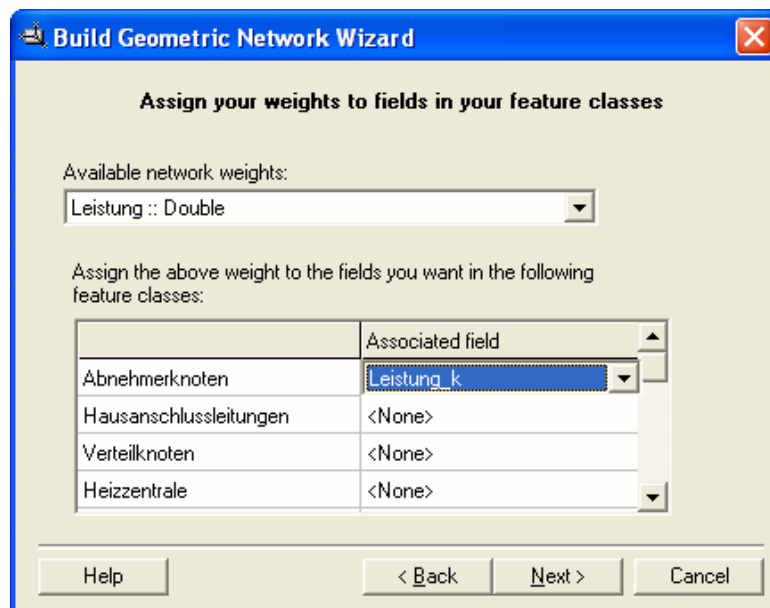


Abbildung 4-18 : Build Geometric Network Wizard – Weight Field

Abschließend erscheinen in einer Übersicht alle Einstellungen, die bei der Erstellung getätigt wurden. Nach Durchsicht und Bestätigung der Übersicht wurde das *geometric network* vom Assistenten erstellt. Die automatisch erzeugte *feature class* *UtilityNetwork\_Net\_Junctions* (*orphan-junctions*) enthält, wie in Abbildung 4-19 zu sehen, keine Datensätze und ist damit der Beweis für die Netzwerkintegrität der Quelldaten [[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Building\\_a\\_geometric\\_network\\_from\\_existing\\_simple\\_feature\\_classes](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Building_a_geometric_network_from_existing_simple_feature_classes)].

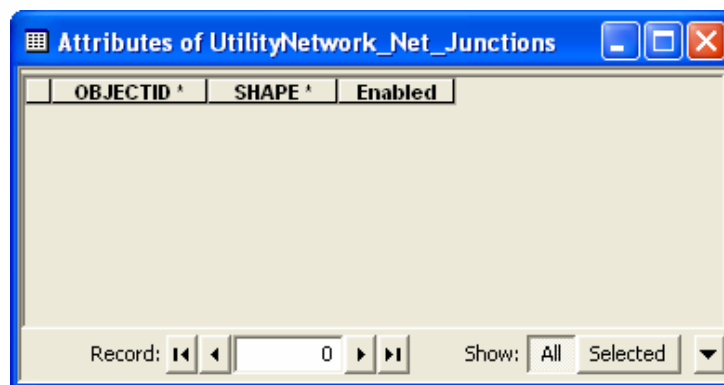


Abbildung 4-19 : Attributtabelle UtilityNetwork\_Net\_Junctions

### 4.2.2 Eigenschaften

Nachdem nun das *geometric network* erstellt wurde, wurden über die Eigenschaften (*Properties*) weitere Einstellungen vorgenommen. Wie in Abbildung 4-20 zu sehen ist, werden unter dem Reiter *General* alle *feature classes* und ihre Funktion im Netzwerk aufgelistet.

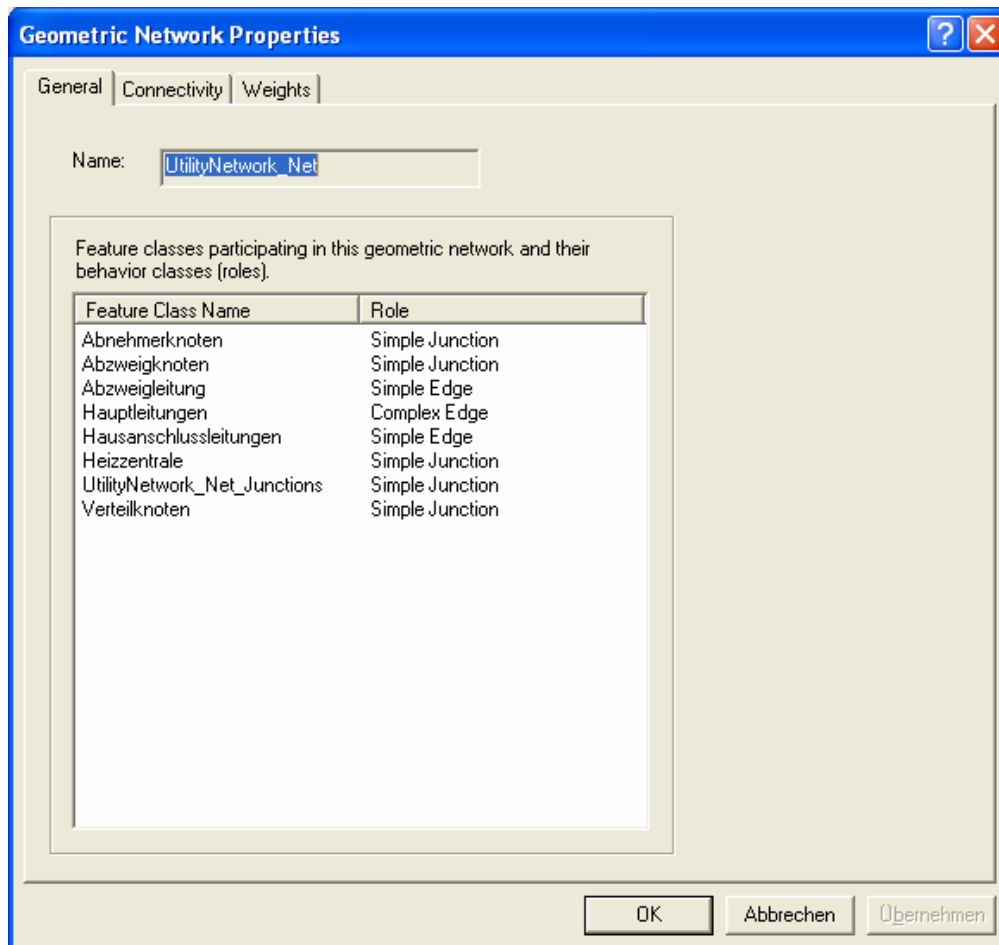


Abbildung 4-20 : Geometric Network Properties – General

Da im *geometric network* nicht alle Kanten mit allen Knoten verbunden sein dürfen, wurde die geometrische Verbindung der *feature classes* unter dem Reiter *Connectivity* festgelegt. Diese Verbindungsregeln (*connectivity rules*) ermöglichen die Validierung der Netzwerkkonnektivität. Es gibt zwei Arten von Verbindungsregeln: Zum einen die Kante-Knoten Regel (*edge-junction rule*) und zum anderen die Kante-Kante Regel (*edge-edge rule*). Die *edge-junction rule* legt fest, dass beispielsweise Kanten vom Typ A mit Knoten vom Typ B verbunden sind. Die *edge-edge rule* setzt immer eine Gruppe von Knoten voraus und legt fest, dass beispielsweise Kanten vom Typ A mit Kanten vom Typ B durch Knoten vom Typ C miteinander verbunden sind. Zusätzlich kann auch die Kardinalität, die Anzahl der Elemente die miteinander verbunden sein dürfen, definiert werden [[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Geometric\\_network\\_connectivity\\_rules](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Geometric_network_connectivity_rules)].



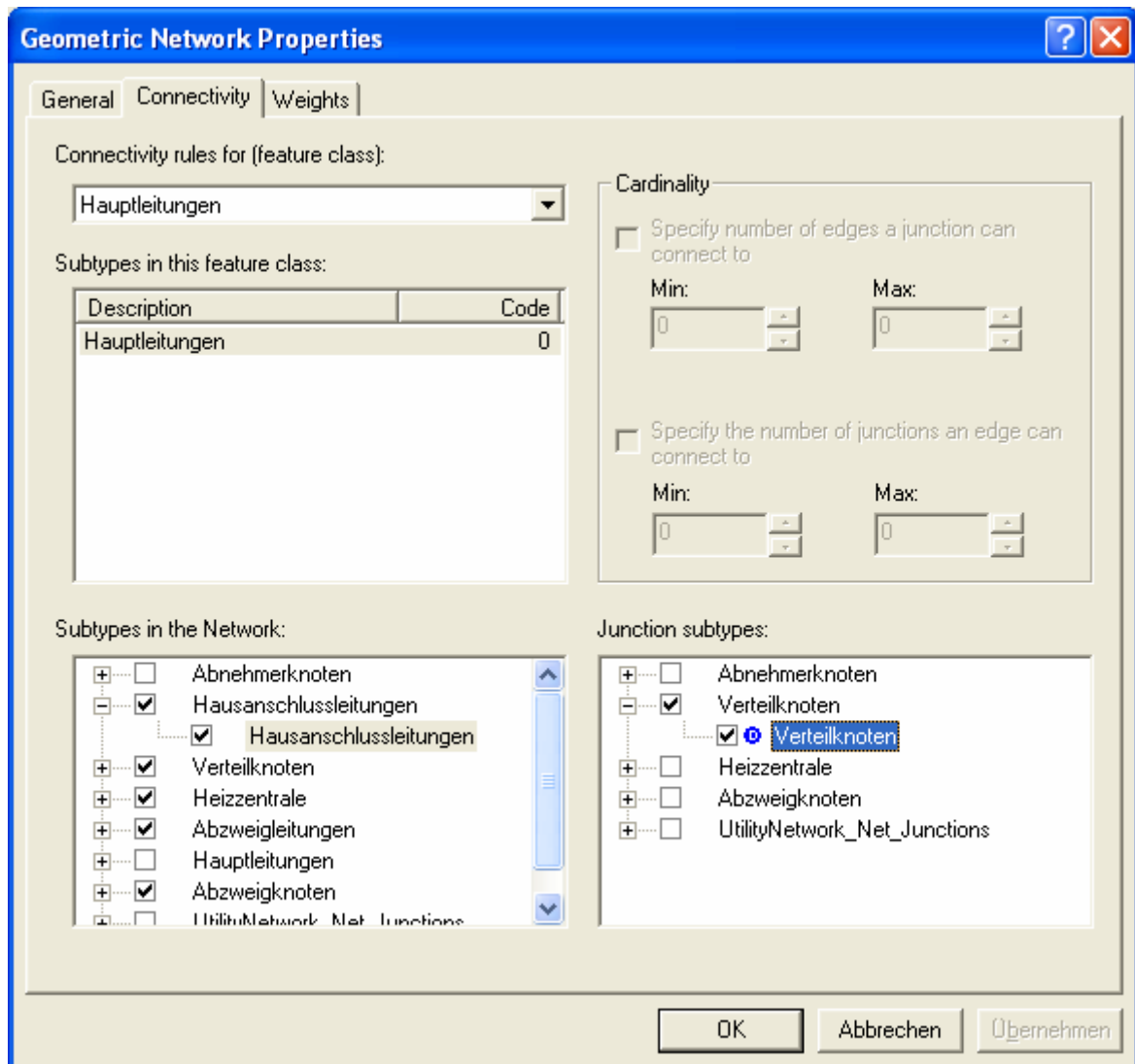


Abbildung 4-21 : Geometric Network Properties – Connectivity

Für das *geometric network* wurden für jede *feature class* Verbindungsregeln definiert, die im Folgenden erläutert werden, wobei jede Regel nur einmal aufgeführt wird.

### **Abnehmerknoten**

Die Elemente der *feature class* Abnehmerknoten dürfen nur mit den Elementen der *feature class* Hausanschlussleitungen verbunden sein. Dies wird über eine *edge-junction rule* definiert.

Die Abnehmerknoten sind Endknoten, das heißt jeder Abnehmerknoten ist nur mit einer Hausanschlussleitung und jede Hausanschlussleitung nur mit einem Abnehmerknoten verbunden.

### **Hausanschlussleitungen**

Die *feature class* Hausanschlussleitungen ist neben der *feature class* Abnehmerknoten auch mit den *feature classes* Verteilknoten und Hauptleitungen verbunden.

Die Kardinalität der Verbindung mit den Verteilknoten ist die gleiche wie die mit den Abnehmerknoten. Die Verbindung mit den Hauptleitungen erfolgt über die Verteilknoten.

### **Verteilknoten**

Die Verteilknoten sind neben den Hausanschlussleitungen auch mit den Hauptleitungen verbunden.

Jeder Verteilknoten ist mit nur einer Hauptleitung verbunden und eine Hauptleitung ist mit mindestens einem Verteilknoten verbunden.

### **Hauptleitungen**

Die Hauptleitungen sind neben den Verteilknoten und Hausanschlussleitungen, zusätzlich mit den *feature classes* Heizzentrale, Abzweigung und Abzweignoten verbunden.

Jeder Knoten der *feature class* Heizzentrale ist mit einer Hauptleitung verbunden, wobei eine Hauptleitung mit maximal einem Knoten der *feature class* Heizzentrale verbunden sein kann.

Die Verbindung der Hauptleitungen mit den Abzweigungen erfolgt über die Abzweignoten. Ein Abzweignoten kann mit maximal einer Hauptleitung verbunden sein, wobei eine Hauptleitung mit mindestens einem aber maximal zwei Abzweignoten verbunden ist.

### **Abzweigknoten**

Die Abzweigknoten verbinden die Hauptleitungen mit den Abzweigleitungen. Hierbei ist ein Abzweigknoten mit mindestens einer Abzweigleitung verbunden. Gleichzeitig ist eine Abzweigleitung immer mit zwei Abzweigknoten verbunden.

### **Abzweigleitungen**

Die Abzweigleitungen sind über die Abzweigknoten mit den Hauptleitungen verbunden.

### **Heizzentrale**

Die Knoten der *feature class* Heizzentrale sind nur mit den Kanten der *feature class* Hauptleitungen verbunden.

Unter dem dritten und letzten Reiter der *Geometric Network Properties* werden die Netzwerkgewichtungen (*weights*) verwaltet. Im Nahwärmenetz Wolfartsweier ist das *weight* Leistung enthalten und der *feature class* Abnehmerknoten zugewiesen. Einem *geometric network* können jederzeit weitere *weights* zugeordnet werden. Bereits erstellte *weights* können jedoch nicht mehr verändert oder gelöscht werden [[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Adding\\_a\\_new\\_weight\\_to\\_your\\_geometric\\_network](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Adding_a_new_weight_to_your_geometric_network)].

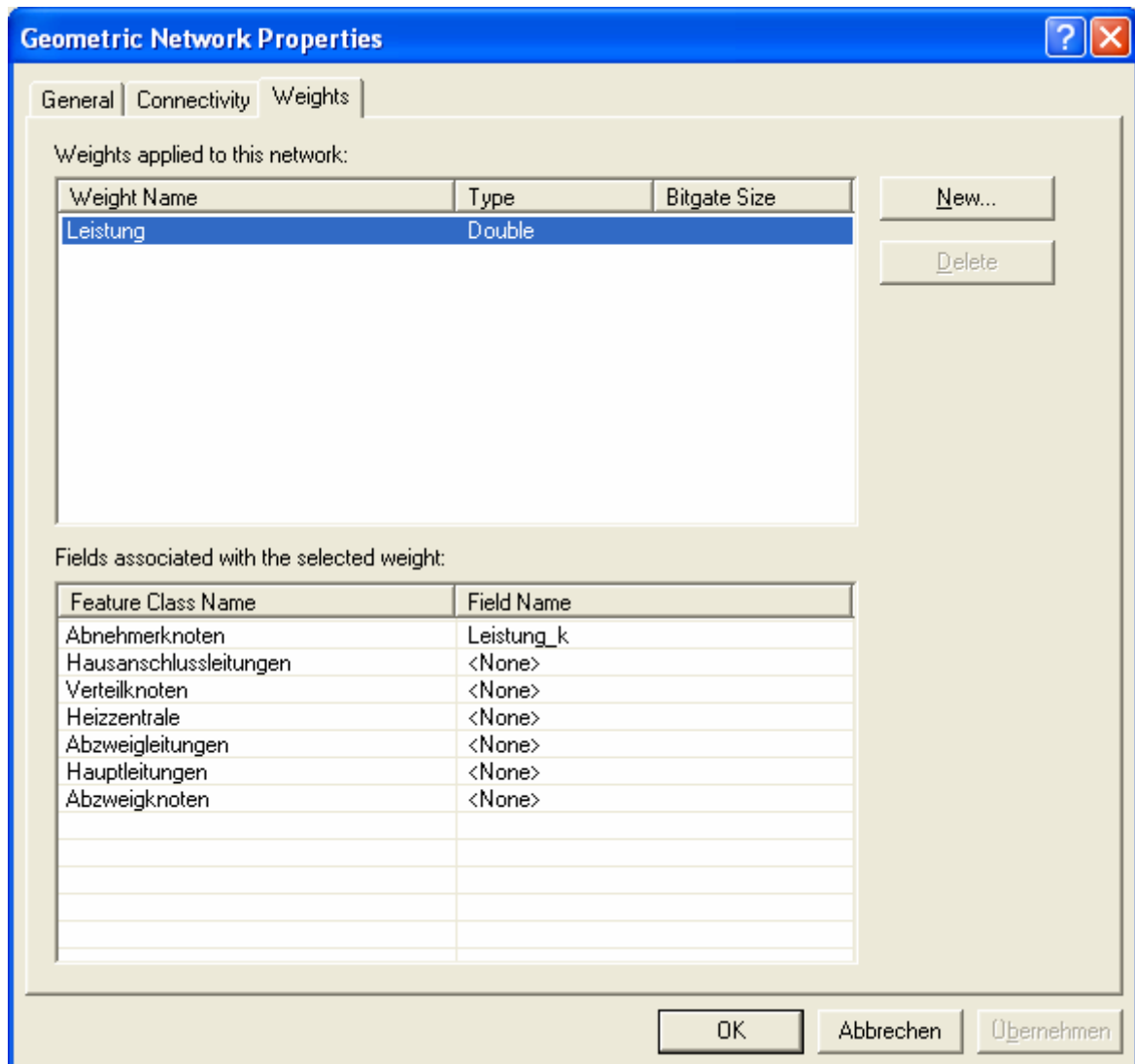


Abbildung 4-22 : Geometric Network Properties – Weights

## 4.2.3 Fehleranalyse

### 4.2.3.1 *Geometrie*

Beim Erstellen eines *geometric network* aus existierenden *feature classes* ist es möglich, dass Geometriefehler auftreten. Wenn dies der Fall ist, erscheint am Ende des Erstellungsprozesses eine Warnmeldung und es wird in der *geodatabase* automatisch eine Error-Tabelle mit den gefundenen Fehlern erzeugt. Der Name der Tabelle setzt sich aus dem Namen des *geometric network* und der Erweiterung *\_BUILDERR* zusammen. Zu den möglichen Fehlern zählen Elemente ohne Geometrie, Kantenelemente die einen geschlossenen Ring formen, Kantenelemente die aus mehreren Teilen bestehen oder Kantenelemente mit der Länge Null.

Bei der Erstellung des *geometric network* für das Nahwärmenetz Wolfartsweier sind keine Geometriefehler aufgetreten. Dennoch wurde zur Kontrolle jede *feature class* anschließend in ArcMap überprüft. ArcMap beinhaltet hierfür Werkzeuge mithilfe derer diese Fehler identifiziert und behoben werden können. Zu diesen Werkzeugen gehört die *Geometric Network Editing toolbar*. Mithilfe der Funktion *Verify Network Feature Geometry Command* (in Abb. 4-23 rot markiert) wurde jede *feature class* auf Fehler hinsichtlich ihrer Geometrie überprüft wobei jeder *feature class* eine gültige Geometrie nachgewiesen werden konnte.



Abbildung 4-23 : Geometric Network Editing toolbar – Verify Geometry

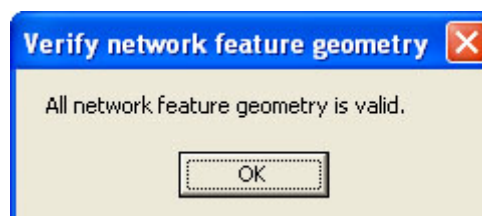


Abbildung 4-24 : Ergebnismeldung - Verify Geometry

#### 4.2.3.2 Konnektivität

Die festgelegten Verbindungsregeln der *feature classes* im *geometric network* definieren die Konnektivität im Netzwerk. Mithilfe der Funktion *Verify Connectivity Command* (in Abb. 4-25 rot markiert) der *Geometric Network Editing toolbar* kann das Netzwerk auf Fehler überprüft werden. Auch das *logical network* wird dabei auf Inkonsistenz überprüft. Wenn Fehler im Netz auftreten, werden diese in einer Auswahl zusammengefasst und über ein Dialogfenster angezeigt. Mögliche Fehler, die eine inkonsistente Konnektivität verursachen, sind ein Netzwerk ohne zugehörige Netzwerkelemente, eine *feature class* mit fehlenden oder doppelten Netzelementen oder eine *feature class*, die mit ungültigen oder nicht existierenden Netzelementen verbunden ist. Zur Behebung dieser Fehler gibt es die beiden Werkzeuge *Rebuild Connectivity* und *Repair Connectivity* (in Abb. 4-25 grün markiert) [[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Identifying\\_geometric\\_network\\_build\\_errors](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Identifying_geometric_network_build_errors) UND [http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=About\\_creating\\_geometric\\_networks](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=About_creating_geometric_networks) UND [http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?id=6772&pid=6765&topicname=About\\_Verify\\_Network\\_tools\\_and\\_commands](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?id=6772&pid=6765&topicname=About_Verify_Network_tools_and_commands)].



Abbildung 4-25 : Geometric Network Editing toolbar – Verify and Repair Connectivity

Bei der Überprüfung des *geometric network* sind keine Fehler in der Konnektivität aufgetreten.



Abbildung 4-26 : Ergebnismeldung – Verify Connectivity

## 4.3 Geometric Network – Analyse

ArcMap bietet die Möglichkeit, ein *geometric network* mithilfe der Werkzeugleiste *Utility Network Analyst toolbar* zu analysieren. Im linken Teil wird das zu analysierende Netzwerk ausgewählt und die Fließrichtung erstellt, im rechten Teil können die Einstellungen für das *tracing* vorgenommen werden [[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?id=6784&pid=6779&topicname=Using\\_the\\_UTILITY\\_Network\\_Analyst\\_toolbar](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?id=6784&pid=6779&topicname=Using_the_UTILITY_Network_Analyst_toolbar)].

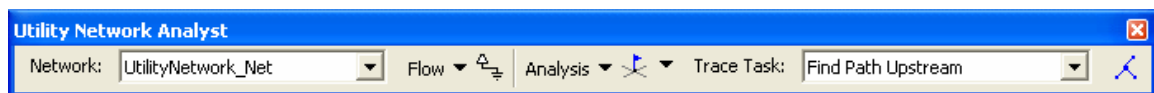


Abbildung 4-27 : Utility Network Analyst toolbar

### 4.3.1 Fließrichtung

Durch Festlegung der Fließrichtung im *geometric network* wird die Richtung bestimmt, in welche das Transportgut (Wasser) entlang einer Kante fließt. Die Fließrichtung im Nahwärmenetz Wolfartsweier ist für die Berechnung des kumulierten Wärmebedarfs (Leistung in kW), ausgehend von den Abnehmerknoten hin zur Heizzentrale, essentiell. Die Fließrichtung im *geometric network* wird durch die *connectivity*, die *sources* und *sinks* und durch den Status *enabled/ disabled* bestimmt. Da die Fließrichtung entweder durch *sources* oder durch *sinks* definiert wird, genügt es nur *sources* oder nur *sinks* im Netzwerk festzulegen, da sonst unter Umständen die Fließrichtung nicht eindeutig bestimmt werden kann. Wenn Netzelemente deaktiviert sind, kann der Fluss im Netzwerk beeinträchtigt sein und es kann für diese Elemente keine Fließrichtung ermittelt werden. Bei der Bestimmung der Fließrichtung wird eine Kante entweder der Kategorie *determinate* (bestimmt), *indeterminate* (nicht bestimmt) oder *uninitialized* (nicht initialisiert) zugeordnet. Wenn die Fließrichtung einer Kante eindeutig festgelegt werden kann, so wird sie der Kategorie *determinate* zugeordnet. Wenn allerdings durch die Topologie, die Lage der *sources* und *sinks* oder durch deaktivierte Netzelemente im Netzwerk keine eindeutige Bestimmung der Fließrichtung möglich ist, so wird die Kante der Kategorie *indeterminate* zugeordnet. Eine isolierte Kante im Netzwerk, also eine Kante die topologisch nicht oder durch deaktivierte Netzelemente mit den *sources* oder *sinks* verbunden ist, wird der Kategorie *uninitialized* zugeordnet [[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Flow\\_direction\\_in\\_a\\_geometric\\_network](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Flow_direction_in_a_geometric_network)].

Die Heizzentrale entspricht der *sink* im Netz und ermöglicht somit die Festlegung der Fließrichtung mithilfe der Funktion *Set Flow Direction* (in Abb. 4-28 rot umrandet).

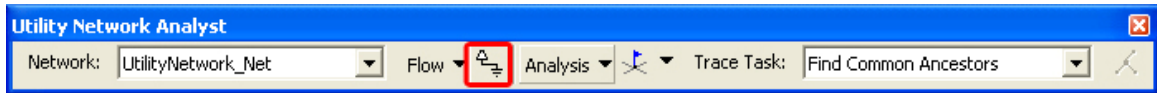


Abbildung 4-28 : Set Flow Direction

Die folgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt des Ergebnisses der Fließrichtungsbestimmung, wobei jede Kante eindeutig bestimmt werden konnte.

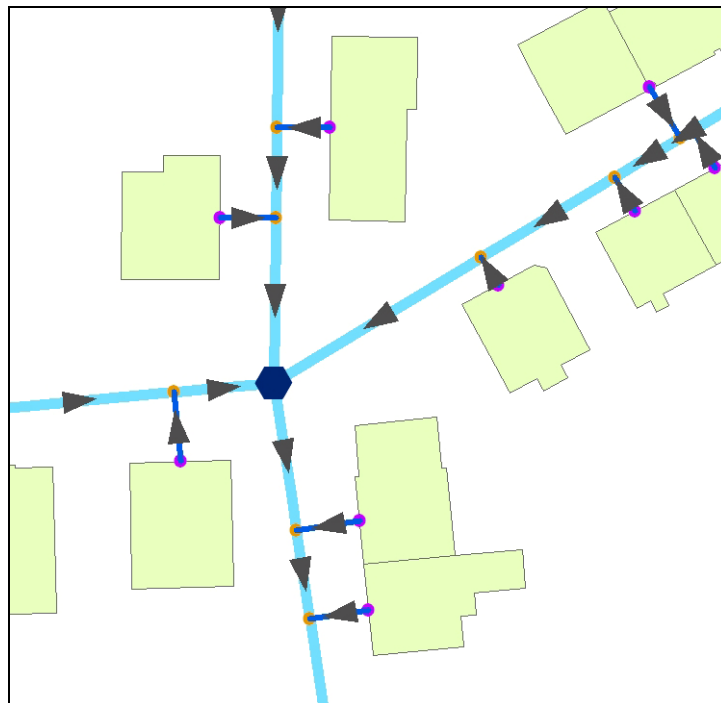


Abbildung 4-29 : Ausschnitt der Fließrichtungsbestimmung



### 4.3.2 Ablaufverfolgung

Unter Ablaufverfolgung (*tracing*) im *geometric network* versteht man das Ermitteln einer Gruppe von Netzelementen durch ein spezielles Verfahren im Netzwerk. Die Elemente dieser Gruppe haben spezielle Eigenschaften oder erfüllen spezielle Anforderungen, die dieses Verfahren an sie stellt. Das *tracing* erfordert Konnektivität. Ein Netzelement kann nur dann in ein *tracing* miteinbezogen werden, wenn dieses mit anderen Netzelementen der gesuchten Gruppe verbunden ist. Das Ergebnis einer Ablaufverfolgung, das *trace result*, ist die Netzelementgruppe, die durch das Ablaufverfolgungsverfahren, die *trace operation*, ermittelt wurde.

#### 4.3.2.1 Flaggen und Hindernisse

Flaggen (*flags*) definieren die Startpunkte beim *tracing*. Sie können mithilfe der Funktionen *Add Junction Flag Tool* und *Add Edge Flag Tool* überall im Netz auf einer Kante oder einem Knoten platziert werden.

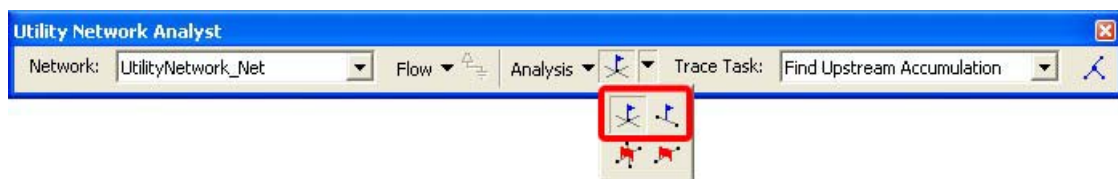


Abbildung 4-30 : Flag Tools

Hindernisse (*barriers*) hingegen blockieren das *tracing*. Wenn das *tracing* beispielsweise nur in einem bestimmten Teil und nur für bestimmte Netzelemente des Netzwerks durchgeführt werden soll, können sie mithilfe der Funktionen *Add Junction Barrier Tool* und *Add Edge Barrier Tool* genauso wie die *flags* im Netz platziert werden. Die mit den *barriers* belegten Netzelemente werden nun beim *tracing* als deaktivierte Elemente interpretiert und verhindern das *tracing* über diese Elemente.

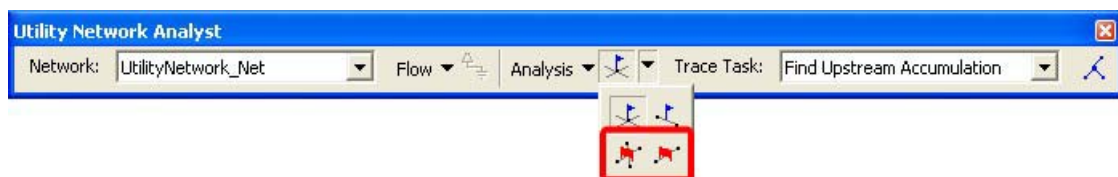


Abbildung 4-31 : Barrier Tools

#### 4.3.2.2 Ablaufverfolgungsverfahren

Die *Utility Network Analyst toolbar* stellt neun *trace operations* zur Verfügung. Zu ihnen gehören *trace upstream*, *trace downstream*, *find upstream accumulation*, *find connected*, *find disconnected*, *find path*, *find path upstream*, *find common ancestors* und *find loops*. Beispielhaft werden im Folgenden vier dieser Verfahren mit Abbildungen verdeutlicht.

##### **Find Connected**

Bei diesem Verfahren werden alle Elemente ermittelt, die mit den durch eine *flag* (grünes Quadrat) gekennzeichneten Kanten oder Knoten verbunden sind. Die Abbildung zeigt alle Netzelemente (pink markiert), die mit der markierten Kante verbunden sind und überprüft so die Konnektivität.

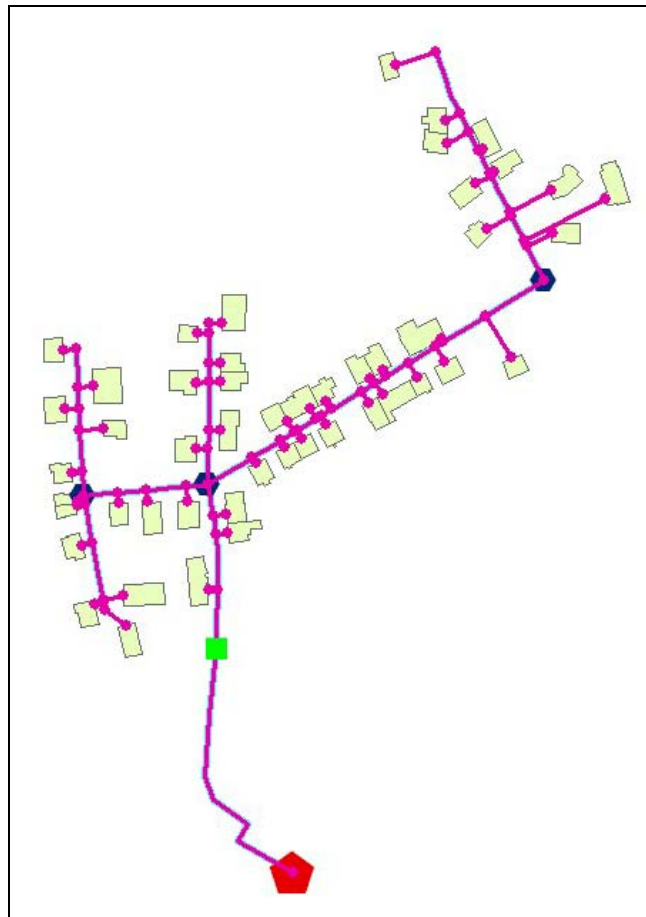


Abbildung 4-32 : Tracing - Find Connected

### Trace Upstream/ Downstream

Bei diesen beiden Verfahren werden alle Netzelemente ermittelt, die sich in Abhängigkeit von der Fließrichtung entweder vor (*upstream*) oder nach (*downstream*) einer *flag* befinden.

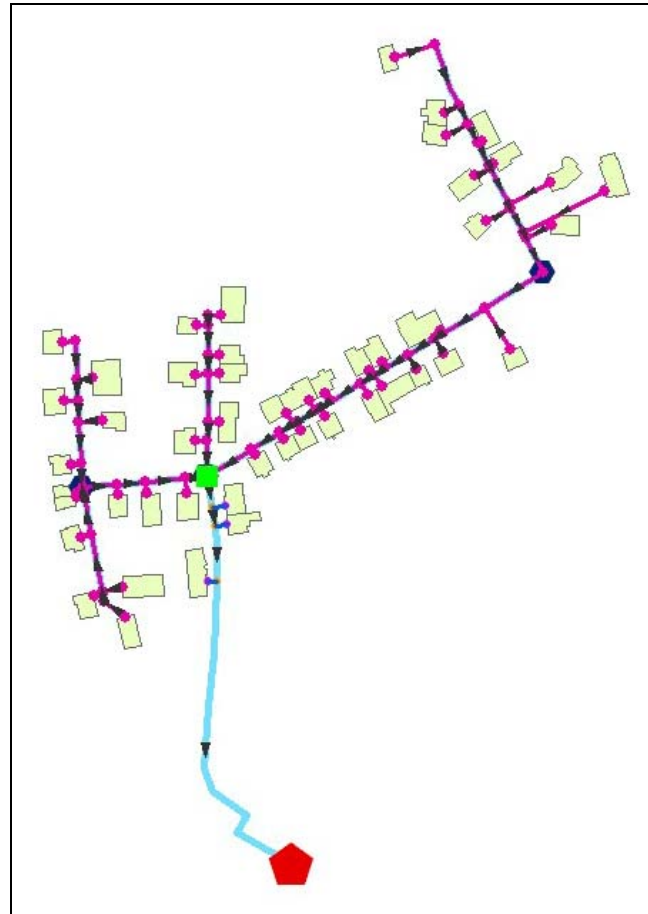


Abbildung 4-33 : Tracing - Trace Upstream

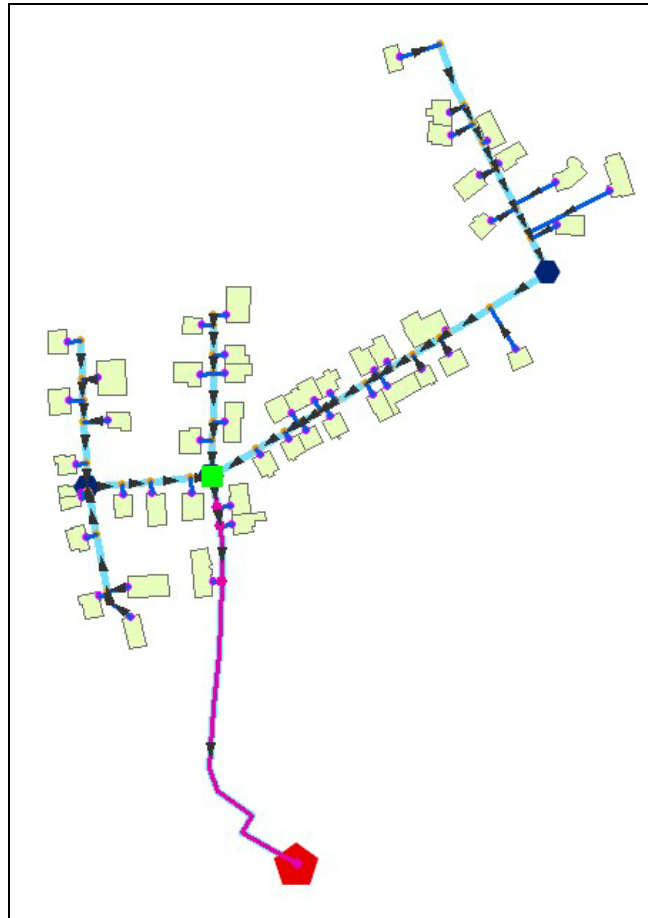


Abbildung 4-34 : Tracing - Trace Downstream

### Find Upstream Accumulation

Dieses *tracing* verläuft prinzipiell genau wie das *trace upstream* Verfahren. Allerdings können bei diesem *tracing* die im Netzwerk definierten *weights* bestimmter Netzelemente in Fließrichtung akkumuliert werden. Dies lässt sich nicht für alle Elemente einer *feature class* gleichzeitig durchführen und der berechnete Wert wird nur temporär in der unteren Programmleiste angezeigt und kann nicht gespeichert werden [[http://webhelp.esri.com/arcgis/desktop/9.3/index.cfm?TopicName=Tracing\\_on\\_geometric\\_networks](http://webhelp.esri.com/arcgis/desktop/9.3/index.cfm?TopicName=Tracing_on_geometric_networks)].

Dieses Verfahren bildet die Grundlage für die Rohrleitungsdimensionierung der Hauptleitungen im Nahwärmenetz Wolfartsweier. Um diese Berechnung für jede der Hauptleitungen automatisch durchführen zu können, wurde ein Werkzeug entwickelt, dessen Funktionen im anschließenden Kapitel erläutert sind.

## 5 Programmierung

ArcGIS bietet die Möglichkeit, die enthaltenen Funktionen und Werkzeuge über einen integrierten Editor (in ArcMap und ArcCatalog) den eigenen Wünschen und Anforderungen anzupassen. Die Entwicklung individueller Funktionen und die Steuerung bestimmter Programmabläufe wird hierbei in der Skriptsprache Visual Basic for Applications (VBA) realisiert.

Die Grundlage bildet das ArcObjects Objektmodell. Dieses Modell wiederum basiert auf der COM Architektur (Component Object Model) von Microsoft. Die COM Technologie ist objektorientiert und basiert damit auf Klassen und Objekten. Eine Klasse hat bestimmte Eigenschaften und Methoden. Die Kommunikation zwischen den Klassen erfolgt hierbei über Schnittstellen. Die Schnittstellen definieren welche Funktionen verfügbar sind, wobei die Klassen den Programmcode zu diesen Funktionen enthalten. Die Schnittstelle ist von der Klasse getrennt. Dies ermöglicht das Ansprechen von Objekten unterschiedlicher Klassen über die gleiche Schnittstelle (sofern sie über diese Schnittstelle verfügen). Das ist das Grundprinzip der Polymorphie (Vielgestaltigkeit). Eine Methode einer Klasse ist also dann polymorph, wenn sie in verschiedenen Klassen die gleiche Schnittstelle hat [Höck, Manegold, 2006; S. 100ff].

ArcObjects enthält die von ESRI entwickelten GIS Funktionen, die in der Entwicklungsumgebung (VB Editor) verwendet werden können und erlaubt es darüber hinaus weitere Funktionen zu entwickeln [Liebig, 2007; S. 42]. Hierfür wurde im VB Editor eine graphische Benutzeroberfläche (Graphic User Interface GUI) mit dem Namen Nahwaermenetz gestaltet. Die GUI enthält zwei Schaltflächen (Button), eine zur Akkumulierung der Hauptleitungen und eine zur Dimensionierung der Haupt- und Hausanschlussleitungen. Durch einen Mausklick auf die „Start...“ Buttons wird der entsprechende Programmcode der Funktion ausgeführt. Wobei die Schaltfläche zur Dimensionierung erst aktiv wird wenn die Akkumulierung durchgeführt wurde. Über den Button „Starte Netzberechnungen...“ der neu erstellten Toolbar Nahwaerme wird die GUI geöffnet.

Für die Programmierung der Funktionen, wurden neben Fachliteratur auch die im Literaturverzeichnis (Internetquellen) unter dem Punkt Programmierung aufgeführten Webseiten zu Hilfe genommen.

Abbildung 5-1 zeigt die Nahwaerme Toolbar.

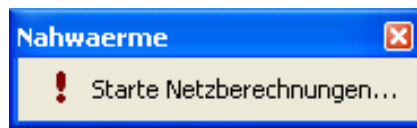


Abbildung 5-1 : Nahwaerme Toolbar

Abbildung 5-2 zeigt die GUI NahwaermeNetz.

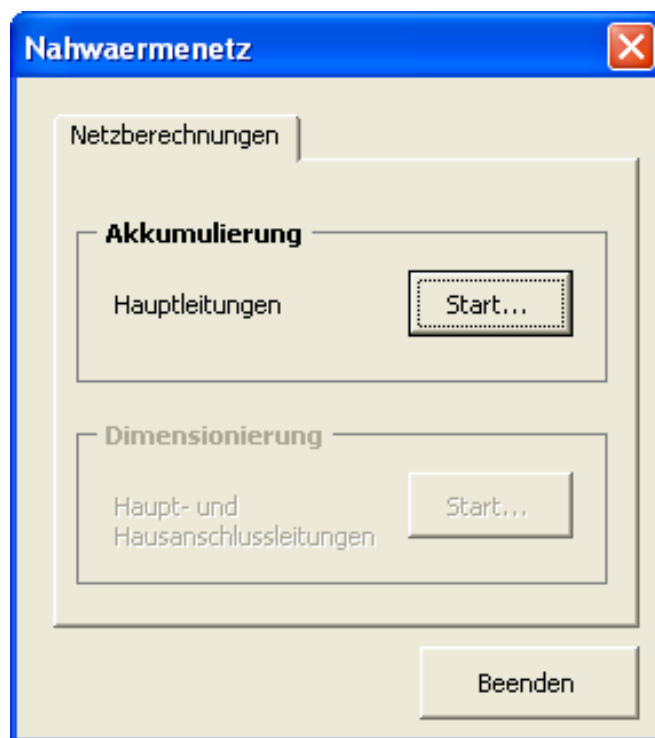


Abbildung 5-2 : GUI NahwaermeNetz

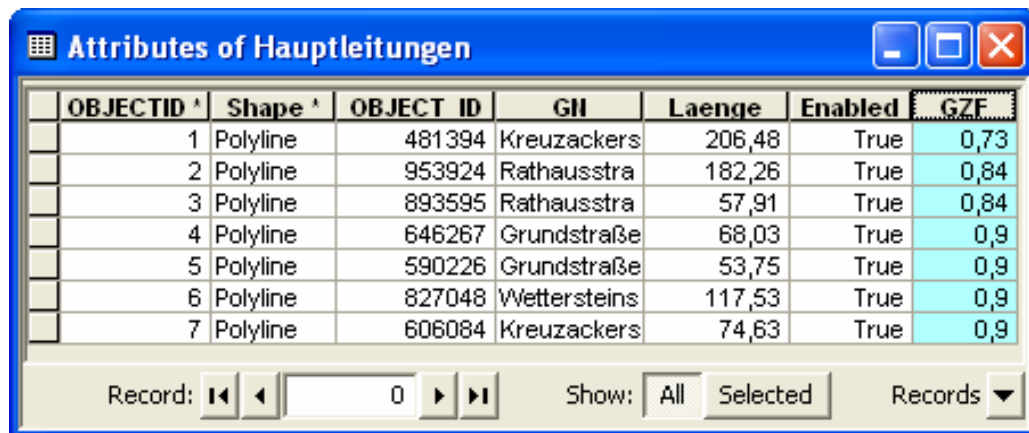
## 5.1 Akkumulierung

Auf Grundlage der *Find Upstream Accumulation* Funktion und einem Beispielskript [<http://arcscrippts.esri.com/details.asp?dbid=14481>], welches diese Funktion einsetzt, wurde die automatische Akkumulierung des Wärmebedarfs der Abnehmer für jede Rohrleitung der *feature class* Hauptleitungen in einem neu entwickelten Werkzeug realisiert.

In diese Berechnung fließt der so genannte Gleichzeitigkeitsfaktor (GZF) mit ein. Hierfür wurde in einem vorbereitenden Schritt der Attributtabelle der Hauptleitungen die neue Spalte **GZF** hinzugefügt. Diese Spalte enthält den GZF einer Hauptleitung als Prozentwert. Der Gleichzeitigkeitsfaktor berücksichtigt die Tatsache, dass nie alle Abnehmer gleichzeitig die volle Leistung anfordern. Daher werden bei der Dimensionierung eines Versorgungsnetzes aus Gründen der Wirtschaftlichkeit die Leitungen nicht auf eine gleichzeitige Anforderung der Gesamtleistung (GZF entspräche dann 100%) ausgelegt. Die Grundlage für die Dimensionierung ist daher das Ergebnis der Multiplikation des kumulierten Leistungswertes mit dem Gleichzeitigkeitsfaktor. Im Nahwärmenetz Wolfartsweier wird für jede Hauptleitung ein Prozentwert für den GZF festgelegt. Dabei ist entscheidend wo sich die Hauptleitung in Abhängigkeit zur Heizzentrale befindet. In Absprache mit der KEA werden hierfür drei Bereiche im Netz definiert: Außenbereich I, Außenbereich II und die Umgebung in unmittelbarer Nähe der Heizzentrale. Je näher sich eine Hauptleitung an der Heizzentrale befindet, desto weniger ist eine gleichzeitige Nutzung der Gesamtleistung anzunehmen und damit der GZF geringer.

Von der KEA wurde für jeden Bereich im Nahwärmenetz ein GZF vorgegeben. Dieser liegt demnach im Außenbereich I bei 90%, im Außenbereich II bei 84% und in direkter Umgebung der Heizzentrale bei 73%. Hierbei handelt es sich um empirische Werte.

Abbildung 5-3 zeigt die Attributtabelle der Hauptleitungen mit der neuen Spalte **GZF**.



OBJECTID ^	Shape ^	OBJECT ID	GI	Laenge	Enabled	GZF
1	Polyline	481394	Kreuzackers	206,48	True	0,73
2	Polyline	953924	Rathausstra	182,26	True	0,84
3	Polyline	893595	Rathausstra	57,91	True	0,84
4	Polyline	646267	Grundstraße	68,03	True	0,9
5	Polyline	590226	Grundstraße	53,75	True	0,9
6	Polyline	827048	Wettersteins	117,53	True	0,9
7	Polyline	606084	Kreuzackers	74,63	True	0,9

Abbildung 5-3 : Attributtabelle Hauptleitungen mit GZF



Abbildung 5-4 zeigt die Hauptleitungen nach ihrem **GZF** Wert.

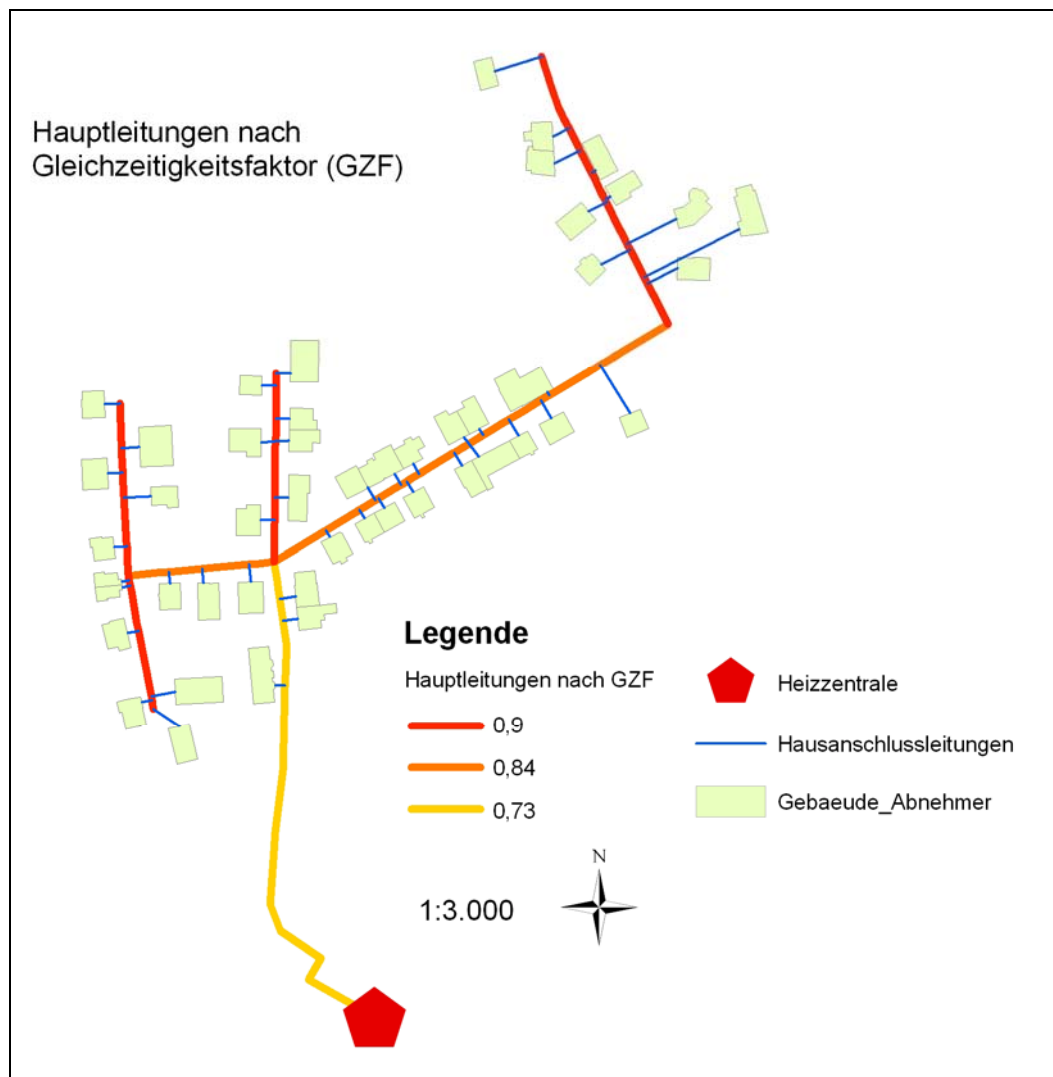


Abbildung 5-4 : Hauptleitungen nach GZF

Bei der Akkumulierungsfunktion wird zunächst das *GeometricNetwork UtilityNetwork\_Net* auf das *weight* Leistung durchsucht. Danach wird der Endpunkt (Abzweignoten in Fließrichtung) einer Hauptleitung ermittelt und auf diesen Knoten eine *flag* gesetzt. Diese *flag* wird der Klasse *TraceFlowSolver2* übergeben. Der Methode *findAcumulation* der Klasse *TraceFlowSolver2* wird der Parameter *esriFMUpstream* übergeben, das das Durchlaufen des Netzes entlang der Kanten im Netz ermöglicht. Damit werden nun alle Werte die sich (flussaufwärts) vor der gesetzten *junction flag* befinden akkumuliert. Diese Berechnung wird innerhalb einer Schleife, die die *feature class* Hauptleitungen durchläuft,

für jede Hauptleitung ausgeführt. Der hierbei ermittelte akkumulierte Wert wird in einer neu angelegten Spalte **Akk** in der Attributtabelle der Hauptleitungen gespeichert.

Um nun den Gleichzeitigkeitsfaktor zu berücksichtigen, wird die Spalte **Akk** mit der Spalte **GZF** multipliziert und das Ergebnis in einer neuen Spalte **Akk\_GZF** gespeichert. Dieser Wert dient nun als Grundlage für die anschließende Dimensionierung der Leitungen.

Abbildung 5-5 zeigt die Attributtabelle der Hauptleitungen mit den nach der automatischen Akkumulierung neu erstellten Spalten.

OBJECTID	Shape	OBJECT ID	GI	Laenge	Enabled	GZF	Akk	Akk_GZF
1	Polyline	481394	Kreuzackers	206,48	True	0,73	1221,41	891,63
2	Polyline	953924	Rathausstra	182,26	True	0,84	640,41	537,94
3	Polyline	893595	Rathausstra	57,91	True	0,84	348,17	292,46
4	Polyline	646267	Grundstraße	68,03	True	0,9	128,63	115,77
5	Polyline	590226	Grundstraße	53,75	True	0,9	124,22	111,8
6	Polyline	827048	Wettersteins	117,53	True	0,9	240,45	216,4
7	Polyline	606084	Kreuzackers	74,63	True	0,9	149,76	134,78

Abbildung 5-5 : Attributtabelle Hauptleitungen nach Akkumulierung

Abbildung 5-6 zeigt die Hauptleitungen nach ihrem **Akk\_GZF** Wert.

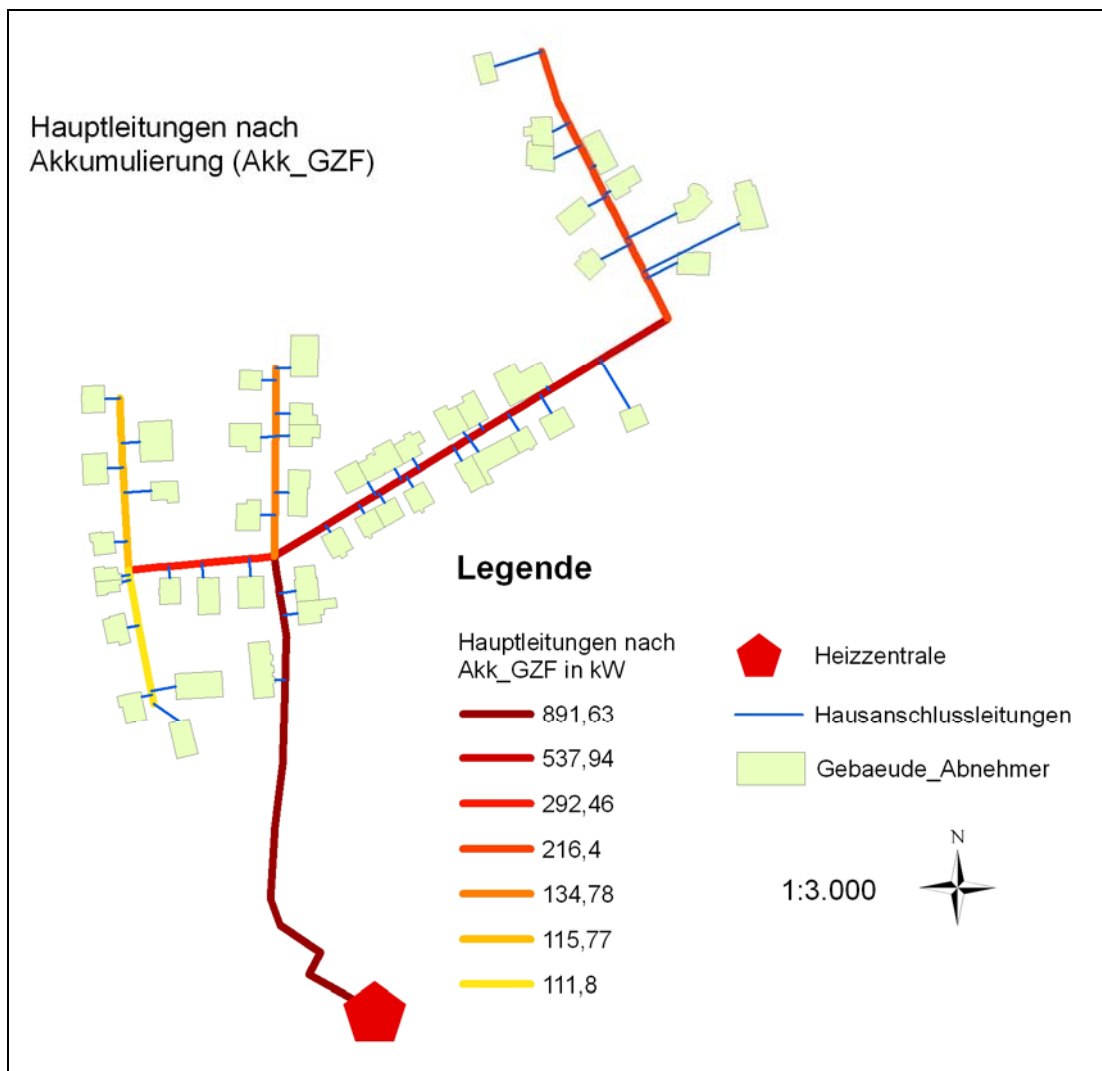


Abbildung 5-6 : Hauptleitungen nach Akkumulierung

## 5.2 Dimensionierung

Bei der Dimensionierungsfunktion wird, ausgehend von den berechneten Werten in **Akk\_GZF**, jeder Hauptleitung der entsprechende Durchmesser für die jeweilige Temperaturspreizung zugewiesen. Hierbei werden die Übertragungsleistungen aus der Tabelle in Abb. 2-1 zugrunde gelegt. Für die Dimensionierung der Hausanschlussleitungen wird der, bereits in der Attributtabelle der Hausanschlussleitungen vorhandene, Wärmebedarfswert (vgl. Abb. 4-2 **Leistung\_k**) zugrunde gelegt. Die Übertragungsleistungen richten sich hierbei nach der Tabelle aus Abb. 2-2.

Zunächst wird der Attributtabelle der beiden *feature classes* eine neue Spalte mit dem Namen der entsprechenden Temperaturspreizung (z.B. **DN\_20K**) hinzugefügt. Für jeden Nenndurchmesser wird mit einer *Where* Bedingung ein Intervall angelegt, um die Wärmebedarfswerte zu filtern. So wird beispielsweise bei einem Wärmebedarfswert größer gleich Null und kleiner gleich 31,2kW (bei einer Temperaturspreizung von 20K) der Nenndurchmesser 20mm zugewiesen. Nach diesem Prinzip werden alle Werte der Spalten **Akk\_GZF** oder **Leistung\_k** überprüft und je nachdem in welchem Intervall sie sich befinden, wird der Leitung der entsprechende Nenndurchmesser zugewiesen.

Die Funktion wird für jede Temperaturspreizung (20K, 30K, 40K und 60 K) durchgeführt. Somit werden der Attributtabelle der Hauptleitungen und Hausanschlussleitungen vier neue Spalten **DN\_20K**, **DN\_30K**, **DN\_40K** und **DN\_60K** hinzugefügt und mit den entsprechenden Werten gefüllt.

Abbildung 5-7 zeigt die Attributtabelle der Hauptleitungen mit den nach der automatischen Dimensionierung neu erstellten Spalten.

OBJECTID	Shape	OBJECT ID	GN	Laenge	Enabled	GZF	Akk	Akk GZF	DIH 20K	DIH 30K	DIH 40K	DIH 60K
1	Polyline	481394	Kreuz	206,48	True	0,73	1221,41	891,63	100	80	65	65
2	Polyline	953924	Rathau	182,26	True	0,84	640,41	537,94	80	65	50	50
3	Polyline	893595	Rathau	57,91	True	0,84	348,17	292,46	65	50	50	32
4	Polyline	646267	Grunds	68,03	True	0,9	128,63	115,77	40	32	32	25
5	Polyline	590226	Grunds	53,75	True	0,9	124,22	111,8	40	32	32	25
6	Polyline	827048	Wetter	117,53	True	0,9	240,45	216,4	50	40	40	32
7	Polyline	606084	Kreuz	74,63	True	0,9	149,76	134,78	40	32	32	25

Abbildung 5-7 : Attributtabelle Hauptleitungen nach Dimensionierung

Abbildung 5-8 zeigt die Attributtabelle der Hausanschlussleitungen mit den nach der automatischen Dimensionierung neu erstellten Spalten.

OBJE	Shap	OBJE	Typ	ID vor	ID nac	Adres	ID Stra	Laenge	Enabled	Leistung k	DIH 20K	DIH 30K	DIH 40K	DIH 60K
1	Polylin	79	Hausan	80	80	Rathau	953924	1,5	True	48,65	32	32	25	20
2	Polylin	80	Hausan	81	81	Rathau	953924	22,71	True	28,01	25	25	20	20
3	Polylin	81	Hausan	82	82	Rathau	953924	8,21	True	17,99	25	20	20	20
4	Polylin	82	Hausan	83	83	Rathau	953924	2,88	True	27,77	25	25	20	20
5	Polylin	83	Hausan	84	84	Rathau	953924	7,48	True	15,53	20	20	20	20
6	Polylin	84	Hausan	85	85	Rathau	953924	3,24	True	28,53	25	25	20	20
7	Polylin	85	Hausan	86	86	Rathau	953924	6,46	True	28,04	25	25	20	20
8	Polylin	86	Hausan	87	87	Rathau	953924	4,56	True	27,1	25	25	20	20
9	Polylin	87	Hausan	88	88	Rathau	953924	6,06	True	16,56	20	20	20	20
10	Polylin	88	Hausan	89	89	Wetter	827048	21,79	True	12,87	20	20	20	20
11	Polylin	89	Hausan	90	90	Wetter	827048	12,79	True	17,58	25	20	20	20
12	Polylin	90	Hausan	91	91	Wetter	827048	2,45	True	25,79	25	20	20	20

Abbildung 5-8 : Attributtabelle Hausanschlussleitungen nach Dimensionierung

Abbildung 5-9 zeigt die Hauptleitungen und Hausanschlussleitungen nach Akkumulierung und Dimensionierung für eine Temperaturspreizung von 20K.

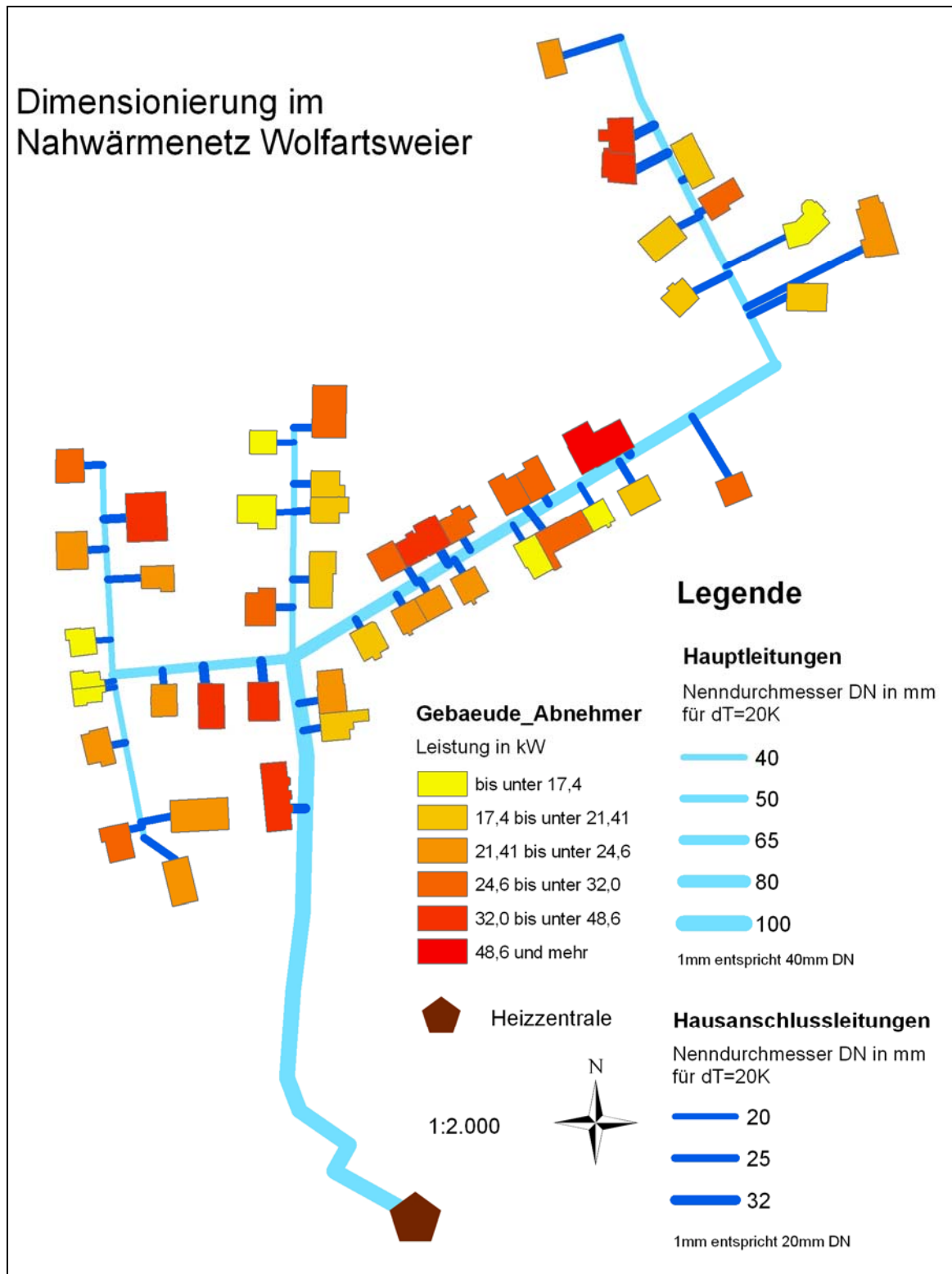


Abbildung 5-9 : Dimensionierung im Nahwärmenetz Wolfartsweier

Abschließend können die Attributtabeln der beiden *feature classes* Hauptleitungen und Hausanschlussleitungen als \*.dbf Dateien exportiert werden und stehen damit weiteren statistischen Auswertungen (beispielsweise mit Microsoft Excel) zur Verfügung.

## 6 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Diplomarbeit war die Umsetzung der Konzeption, Erstellung und Dimensionierung des Leitungsnetzwerkes eines Nahwärmenetzes für ein Beispielgebiet in Wolfartsweier mithilfe des Geoinformationssystems ArcGIS. In einem ersten Schritt wurde dabei die Vorgehensweise der Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg in der Konzeption eines Nahwärmenetzes eingehend analysiert. Danach wurde für die Umsetzung mithilfe des GIS eine grundsätzliche Vorgehensweise erarbeitet.

Auf Basis der amtlichen Daten ALK und ATKIS wurde zunächst mittels eines Routingverfahrens der optimale Hauptleitungsverlauf zwischen der Heizzentrale und den Wärmeabnehmern ermittelt. Das Ergebnis des Routing bildete die Grundlage für die Erstellung eines Versorgungsnetzwerkes. Im Weiteren wurden die Möglichkeiten von ArcGIS zur Erstellung und Analyse eines *geometric network* zunächst untersucht um dann für die Modellierung des Nahwärmenetzes Wolfartsweier genutzt zu werden. Abschließend wurden innerhalb der Entwicklungsumgebung von ArcMap neue Funktionen zur automatisierten Berechnung des akkumulierten Wärmebedarfs und der darauf basierenden Dimensionierung der Rohrleitungen im Nahwärmenetz programmiert und über eine graphische Benutzeroberfläche zur Verfügung gestellt.

Da es sich bei dieser Arbeit um eine prototypische Umsetzung einer Nahwärmenetzkonzeption handelt, finden sich einige Optimierungsmöglichkeiten in der Automatisierung der Arbeitsschritte. Beispielsweise für das Routing sowie für die Erstellung der Geometrie der Hauptleitungen aus den ATKIS Daten, die weitestgehend manuell mithilfe der Editierfunktionen von ArcMap durchgeführt wird, wäre eine Funktion zur automatischen Erstellung denkbar. Ebenso birgt die Erstellung des *geometric network* Automatisierungsbedarf.

Neben der Automatisierung besitzt auch die Weiterentwicklung und Erweiterung dieser Herangehensweise und der entwickelten Funktionen großes Potenzial. So ist beispielsweise eine Zusammenführung der Ergebnisse dieser Diplomarbeit mit denen der Bachelorthesis von Frau Kucharczyk als nächster Schritt in der Entwicklung sinnvoll. Ebenso ist die Anpassung der Vorgehensweise und der erstellten Funktionen an die Weiterentwicklung des Geoinformationssystems ArcGIS gekoppelt.



Abschließend lässt sich sagen, dass das erarbeitete Vorgehen zukünftig in Voruntersuchungen und Machbarkeitsstudien (auf Basis der GIS Technologie) im Bereich der Wärmeversorgung durch Nahwärme eingesetzt werden kann.

## 7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 : Übertragungsleistung Hauptleitungen [Quelle: Excel-Datei KEA] .....	14
Abbildung 2-2 : Übertragungsleistung Hausanschlussleitungen [Quelle: Excel-Datei KEA] .....	14
Abbildung 2-3 : Netzformen der Hauptverteilung in Wärmenetzen [Kaltschmitt, Streicher, Wiese 2006; S. 468] .....	15
Abbildung 2-4 : Trassenführung in Wärmenetzen [Kaltschmitt, Streicher, Wiese 2006; S. 468].....	16
Abbildung 2-5 : Netzstruktur Nahwärmenetz [Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz 2006; S. 12].....	18
Abbildung 3-1 : Drei Fragestellungen in Netzwerken [Bill, Zehner 2001; S. 188].....	20
Abbildung 3-2 : Geobasisdaten Wolfartsweier.....	22
Abbildung 3-3 : Geobasisdaten Abnehmer.....	23
Abbildung 3-4 : Ebener/ unebener Graph [Nietzsche 2005; S. 157].....	24
Abbildung 3-5 : Ungerichteter/ gerichteter Graph [Nietzsche 2005; S. 144].....	25
Abbildung 3-6 : Gewichteter Graph [West 2001; S. 105].....	25
Abbildung 3-7 : Graph mit Eckengrad [Nietzsche 2005; S. 4].....	25
Abbildung 3-8 : Graph als Baum [Gritzmann, Brandenburg 2003; S. 123] .....	26
Abbildung 3-9 : NAVTEQ Routenplanung [ <a href="http://www.navteq.com/">http://www.navteq.com/</a> ] .....	28
Abbildung 3-10 : Radroutenplaner NRW [ <a href="http://www.radroutenplaner.nrw.de/">http://www.radroutenplaner.nrw.de/</a> ] .....	28
Abbildung 3-11 : Dijkstra – Gerichteter und gewichteter Graph [Saake, Sattler 2010; S. 455].....	30
Abbildung 3-12 : Dijkstra Algorithmus in Pseudocode-Notation [Saake, Sattler 2010; S. 456].....	30
Abbildung 3-13 : Dijkstra – Initialisierung [Saake, Sattler 2010; S. 457].....	31
Abbildung 3-14 : Dijkstra – Erster Schleifendurchlauf [Saake, Sattler 2010; S. 457].....	32
Abbildung 3-15 : Dijkstra – Zweiter Schleifendurchlauf [Saake, Sattler 2010; S. 458] .....	32
Abbildung 3-16 : Dijkstra – Dritter Schleifendurchlauf [Saake, Sattler 2010; S. 458] .....	33
Abbildung 3-17 : Dijkstra – Vierter Schleifendurchlauf [Saake, Sattler 2010; S. 458].....	34

Abbildung 3-18 : Network Dataset .....	37
Abbildung 3-19 : Network Analyst toolbar .....	38
Abbildung 3-20 : Routingergebnis.....	39
Abbildung 3-21 : Routenbeschreibung.....	40
Abbildung 3-22 : Hauptleitungen nach ATKIS OBJECT_ID.....	42
Abbildung 4-1 : Attributtabelle Hauptleitungen.....	45
Abbildung 4-2 : Attributtabelle Hausanschlussleitungen.....	46
Abbildung 4-3 : Ausschnitt Hauptleitungen und Hausanschlussleitungen.....	47
Abbildung 4-4 : Attributtabelle Abzweigleitungen und Ausschnitt.....	48
Abbildung 4-5 : Attributtabelle Abnehmerknoten .....	49
Abbildung 4-6 : Ausschnitt Abnehmerknoten.....	50
Abbildung 4-7 : Attributtabelle Verteilknoten.....	51
Abbildung 4-8 : Ausschnitt Verteilknoten .....	51
Abbildung 4-9 : Attributtabelle Abzweignoten und Ausschnitt.....	52
Abbildung 4-10 : Attributtabelle Heizzentrale und Lage.....	53
Abbildung 4-11 : Nahwärmenetz Wolfartsweier.....	54
Abbildung 4-12 : Build Geometric Network Wizard.....	57
Abbildung 4-13 : Build Geometric Network Wizard - Feature classes .....	57
Abbildung 4-14 : Build Geometric Network Wizard - Complex edges.....	58
Abbildung 4-15 : Build Geometric Network Wizard – Snapping.....	58
Abbildung 4-16 : Build Geometric Network Wizard – Sources/ Sinks.....	59
Abbildung 4-17 : Build Geometric Network Wizard – Weights.....	60
Abbildung 4-18 : Build Geometric Network Wizard – Weight Field.....	60
Abbildung 4-19 : Attributtabelle UtilityNetwork_Net_Junctions .....	61
Abbildung 4-20 : Geometric Network Properties – General.....	62
Abbildung 4-21 : Geometric Network Properties – Connectivity .....	63
Abbildung 4-22 : Geometric Network Properties – Weights.....	66
Abbildung 4-23 : Geometric Network Editing toolbar – Verify Geometry .....	67
Abbildung 4-24 : Ergebnismeldung - Verify Geometry.....	67
Abbildung 4-25 : Geometric Network Editing toolbar – Verify and Repair Connectivity.....	68
Abbildung 4-26 : Ergebnismeldung – Verify Connectivity .....	68

---

Abbildung 4-27 : Utility Network Analyst toolbar .....	69
Abbildung 4-28 : Set Flow Direction.....	70
Abbildung 4-29 : Ausschnitt der Fließrichtungsbestimmung.....	70
Abbildung 4-30 : Flag Tools.....	71
Abbildung 4-31 : Barrier Tools .....	71
Abbildung 4-32 : Tracing - Find Connected .....	72
Abbildung 4-33 : Tracing - Trace Upstream.....	73
Abbildung 4-34 : Tracing - Trace Downstream .....	74
Abbildung 5-1 : Nahwaerme Toolbar .....	76
Abbildung 5-2 : GUI Nahwaermenetz .....	76
Abbildung 5-3 : Attributtabelle Hauptleitungen mit GZF.....	78
Abbildung 5-4 : Hauptleitungen nach GZF.....	79
Abbildung 5-5 : Attributtabelle Hauptleitungen nach Akkumulierung .....	80
Abbildung 5-6 : Hauptleitungen nach Akkumulierung .....	81
Abbildung 5-7 : Attributtabelle Hauptleitungen nach Dimensionierung .....	83
Abbildung 5-8 : Attributtabelle Hausanschlussleitungen nach Dimensionierung .....	83
Abbildung 5-9 : Dimensionierung im Nahwärmenetz Wolfartsweier .....	84

## 8 Literaturverzeichnis

- BILL, RALF & ZEHNER, MARCO L. *Lexikon der Geoinformatik*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2001.
- BOLLMANN, JÜRGEN & KOCH, WOLF GÜNTHER. *Lexikon der Kartographie und Geomatik*. CD-ROM-Ausgabe, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, 2002.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE. HERAUSGEBER: ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR SPARSAMEN UND UMWELTFREUNDLICHEN ENERGIEVERBRAUCH E.V. (ASUE). *Nahwärme. Konzepte – Ausführung, Betriebserfahrungen*. Vulkan Verlag, Essen, Nr. 9 der ASUE- Schriftenreihe, 1986.
- CHANG, KANG-TSUNG. *Programming ArcObjects with VBA. A Task-Oriented Approach*. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton (FL), Second Edition, 2008.
- DE LANGE, NORBERT. *Geoinformatik in Theorie und Praxis*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2. Auflage, 2006.
- ENBW VERTRIEBS- UND SERVICEGESELLSCHAFT MBH. *Das Energie-ABC. Die wichtigsten Energiebegriffe im Überblick*. (auf der Grundlage von KRAUS, MICHAEL. *Lexikon der Energiewirtschaft. Liberalisierte Strom- und Gasmärkte von A bis Z*. Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln, 2004)
- GRITZMANN, PETER & BRANDENBERG, RENÉ. *Das Geheimnis des kürzesten Weges. Ein mathematisches Abenteuer*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2. Auflage, 2003.
- HESSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, LÄNDLICHEN RAUM UND VERBRAUCHERSCHUTZ (HERAUSGEBER). IDEE UND KONZEPTION: WIRTSCHAFTSMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG ABT. 4 TECHNOLOGIE UND ENERGIEPOLITIK. ZENTRUM FÜR SONNENENERGIE- UND WASSERSTOFF-FORSCHUNG, ZSW STUTTGART. DEUTSCHE VERSUCHSANSTALT FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT, DLR STUTTGART. HELMUT BÖHNISCH (ZSW), MARIA KLINGEBIEL (ZSW), MICHAEL NAST (DLR). *Nahwärme. Ratgeber zur Planung und Errichtung von Nahwärmenetzen*. Wiesbaden, 2006.

- HÖCK, MICHAEL & MANEGOLD, JOCHEN. *ArcMap. Programmierung mit VBA*. Lavis, 4. Auflage, 2006.
- KALTSCHMITT, MARTIN & STREICHER, WOLFGANG & WIESE, ANDREAS (HRSG.). *Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 4. aktualisierte, korrigierte und ergänzte Auflage, 2006.
- KRIMMLING, JÖRN. *Erneuerbare Energien. Einsatzmöglichkeiten – Technologien – Wirtschaftlichkeit*. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln, 2009.
- LIEBIG, WOLFGANG. *ArcGIS – ArcView 9 Programmierung. Einführung in Visual Basic (VBA) und ArcObjects*. Points Verlag Norden, Halmstad, 2007.
- NITZSCHE, MANFRED. *Graphen für Einsteiger. Rund um das Haus vom Nikolaus*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2. Auflage, 2005.
- SAAKE, GUNTER & SATTLER, KAI-UWE. *Algorithmen und Datenstrukturen. Eine Einführung mit Java*. dpunkt.verlag, Heidelberg, 4. Auflage, 2010.
- WEST, DOUGLAS B. *Introduction to Graph Theory*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, Second Edition, 2001.
- WIRTSCHAFTSMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG (HERAUSGEBER). REFERAT 44 „ERNEUERBARE ENERGIEN, RAT. ENERGIEANWENDUNG UND LEBENSWISSENSCHAFTEN“ (KONTAKT, IDEE, KONZEPTION UND REDAKTION). KONZEPTION UND AUSARBEITUNG : ZENTRUM FÜR SONNENENERGIE- UND WASSERSTOGG-FORSCHUNG, ZSW STUTTGART. DEUTSCHE VERSUCHSANSTALT FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT, DLR STUTTGART. HELMUT BÖHNISCH (ZSW), MARIA KLINGEBIEL (ZSW), MICHAEL NAST (DLR). *Nahwärmenetzkonzepte. Kraft-Wärme-Kopplung und erneuerbare Energien*. Stuttgart, 2. Auflage, 2007.

### Internetquellen

- ArcGIS – Network Analyst. <http://www.esri-germany.de/products/arcgis/extensions/networkanalyst/index.html>. [zuletzt abgerufen am 28.09.2010]
- ArcGIS – Network dataset.  
[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=What\\_is\\_a\\_network\\_dataset%3F](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=What_is_a_network_dataset%3F). [zuletzt abgerufen am 28.09.2010]

- **ArcGIS – Netzwerktypen.**  
[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?id=4392&pid=4390&topicname=Types\\_of\\_networks](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?id=4392&pid=4390&topicname=Types_of_networks). [zuletzt abgerufen am 28.09.2010]
- **Geometric Network – Connectivity.**  
[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Geometric\\_network\\_connectivity\\_rules](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Geometric_network_connectivity_rules). [zuletzt abgerufen am 28.09.2010]
- **Geometric Network – Erstellung.**  
[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=About\\_creating\\_geometric\\_networks](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=About_creating_geometric_networks)  
. [http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Building\\_a\\_geometric\\_network\\_from\\_existing\\_simple\\_feature\\_classes](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Building_a_geometric_network_from_existing_simple_feature_classes) . [http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=What\\_is\\_a\\_geometric\\_network?](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=What_is_a_geometric_network?). [zuletzt abgerufen am 28.09.2010]
- **Geometric Network – Fehleranalyse.**  
[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?id=6772&pid=6765&topicname=About\\_Verify\\_Network\\_tools\\_and\\_commands](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?id=6772&pid=6765&topicname=About_Verify_Network_tools_and_commands). [http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Identifying\\_geometric\\_network\\_build\\_errors](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Identifying_geometric_network_build_errors). [zuletzt abgerufen am 28.09.2010]
- **Geometric Network – Flow direction.**  
[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Flow\\_direction\\_in\\_a\\_geometric\\_network](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Flow_direction_in_a_geometric_network). [zuletzt abgerufen am 28.09.2010]
- **Geometric Network – Tracing.**  
[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Tracing\\_on\\_geometric\\_networks](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Tracing_on_geometric_networks). [zuletzt abgerufen am 28.09.2010]
- **Geometric Network – Utility Network Analyst toolbar.**  
[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?id=6784&pid=6779&topicname=Using\\_the\\_Utility\\_Network\\_Analyst\\_toolbar](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?id=6784&pid=6779&topicname=Using_the_Utility_Network_Analyst_toolbar). [zuletzt abgerufen am 28.09.2010]
- **Geometric Network – Weights.**  
[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Adding\\_a\\_new\\_weight\\_to\\_your\\_geometric\\_network](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Adding_a_new_weight_to_your_geometric_network). [zuletzt abgerufen am 28.09.2010]
- **HÜFTLE, MIKE. *Methoden aus der Graphentheorie*. 2006.**  
[http://www.google.de/url?sa=t&source=web&cd=1&ved=OCBYQFjAA&url=http%3A%2F%2Fthe-kilter-project.googlecode.com%2Ffiles%2FMethoden%2520der%2520Graphentheorie.pdf&rct=j&q=h%C3%BCftle%20methoden%20der%20graphentheorie&ei=1tCITLarAZHFswaQmbTPCg&usq=AFOjCNG9R3peRA95fj\\_ENMrYnTXQJ45qsQ&cad=rja](http://www.google.de/url?sa=t&source=web&cd=1&ved=OCBYQFjAA&url=http%3A%2F%2Fthe-kilter-project.googlecode.com%2Ffiles%2FMethoden%2520der%2520Graphentheorie.pdf&rct=j&q=h%C3%BCftle%20methoden%20der%20graphentheorie&ei=1tCITLarAZHFswaQmbTPCg&usq=AFOjCNG9R3peRA95fj_ENMrYnTXQJ45qsQ&cad=rja). [zuletzt abgerufen am 28.09.2010]
- **Informationen zur KEA.** <http://www.kea-bw.de/ueber-die-kea/ueberblick/>. [zuletzt abgerufen am 28.09.2010]
- **Informationen zur LUBW.** <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/31656/>. [zuletzt abgerufen am 28.09.2010]

- **Kooperationsinitiative Nahwärme.** <http://www.nahwaerme-bw.de>. [zuletzt abgerufen am 28.09.2010]
- **Programmierung.** [http://resources.esri.com/help/9.3/arcgisdesktop/com/vba\\_start.htm](http://resources.esri.com/help/9.3/arcgisdesktop/com/vba_start.htm).  
<http://edn.esri.com/index.cfm?fa=home.welcome>. <http://edndoc.esri.com/arcobjects/9.0/>.  
<http://resources.esri.com/gateway/index.cfm>. <http://arcscripts.esri.com/details.asp?dbid=14481>.  
[zuletzt abgerufen am 28.09.2010]
- **Routenplanerbeispiele.** <http://www.navteq.com/>. <http://www.radroutenplaner.nrw.de/>. [zuletzt abgerufen am 28.09.2010]