



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Der globale Klimawandel ist eine der größten Herausforderungen unserer Zeit. Die Vereinten Nationen versuchen seit über zwei Jahrzehnten den Ausstoß klimaschädlicher Gase zu regulieren und die globale Erwärmung zu verlangsamen. Mit dem Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) wurde 1992 ein internationales Umweltabkommen verabschiedet, das die „Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre“ zum Ziel hat, so dass „eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird“ (UNFCCC, 1992). Auf dem Weltklimagipfel in Kyoto 1997 wurde diese Vereinbarung weiterentwickelt und als Abschlussprotokoll der Konferenz verabschiedet (sog. Kyoto-Protokoll (UNFCCC, 1997)). Das Kyoto-Protokoll trat 2005 in Kraft und legt verbindliche Zielwerte für die Treibhausgasemissionen der größten Industrieländer bis 2020 fest. In Deutschland ist der Energiesektor der mit Abstand größte Emittent von Treibhausgasen und für 83,66 % der Emissionen verantwortlich (Umweltbundesamt, 2014a). Damit bieten sich in diesem Sektor die größten Einsparpotenziale, da bereits geringe Effizienzsteigerungen eine große Auswirkung auf die Gesamtemissionen haben können.

Die deutsche Bundesregierung hat verschiedene Gesetze und Programme auf den Weg gebracht, um die Effizienz im Energiesektor zu erhöhen und dadurch die im Kyoto-Protokoll festgelegte Reduktion der Treibhausgasemissionen zu erreichen. Das Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung ist am 1. April 2002 in Kraft getreten und hat zum Ziel „im Interesse der Energieeinsparung, des Umweltschutzes und der Erreichung der Klimaschutzziele der Bundesregierung einen Beitrag zur Erhöhung der Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung in der Bundesrepublik Deutschland auf 25 Prozent bis zum Jahr 2020 (...) zu leisten“ (KWKG, 2002). Mit Kraft-Wärme-Kopplung wird die kombinierte Bereitstellung von Strom und Wärme bezeichnet. Die Auskopplung von Nutzwärme aus der Stromerzeugung erhöht die Effizienz solcher Anlagen, die dadurch einen Gesamtwirkungsgrad von 85 % und mehr erreichen können. Tatsächlich hat sich der Anteil des in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) erzeugten Stroms von 13,8 % im Jahr 2003 auf 18,1 % im Jahr 2013 erhöht und damit zur Verringerung des Primärenergieverbrauchs pro Kopf beigetragen (AG Energiebilanzen e.V., 2014).

Neben der Kraft-Wärme-Kopplung fördert die Bundesregierung auch den Ausbau der erneuerbaren Energien. Im Jahr 2000 wurde das Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG) verabschiedet, das „im Interesse des Klima- und Umweltschutzes“ (EEG, 2000) den Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien fördert. Zu diesem Zweck regelt das Gesetz die vorrangige Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Quellen in das Stromnetz. Außerdem legt es garantierte Einspeisevergütungen für die Erzeuger fest, um ökonomische Anreize für den Ausbau der erneuerbaren Energien zu setzen. Durch diese staatliche Förderung ist der Anteil der Energieerzeugung aus erneuerbaren Quellen von 3,4 % im Jahr 2000 auf 15 % im Jahr 2013 gestiegen. Um die gesetzlich festgelegten Ziele bis zum Jahr 2020 zu erreichen (25 % KWK-Strom, 35 % Strom aus erneuerbaren Quellen, 18 % Anteil erneuerbarer



Energien am Bruttoendenergieverbrauch), muss der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung und der Energiegewinnung mit erneuerbaren Ressourcen weiter vorangetrieben werden.

Nahwärmenetze sind besonders geeignet für die kombinierte Nutzung von erneuerbaren Energien und Kraft-Wärme-Kopplung, da die produzierte Abwärme direkt als Heizenergie in Haushalten genutzt werden kann, während der erzeugte Strom in das Stromnetz eingespeist wird. Nahwärmenetze können dabei in ihrer Größe und Ausgestaltung stark variieren. Das Bioenergie-dorf Jühnde ist ein Beispiel für ein kleines Nahwärmenetz. In einer Biogasanlage wird lokal erzeugte Biomasse zu Biogas vergoren, um mit einem Blockheizkraftwerk 140 Haushalte mit Heizwärme zu versorgen und ca. 5 Mio. kWh Strom in das Netz einzuspeisen (Ruppert, 2008). In Kiel hingegen soll 2015 ein modernes Heizkraftwerk mit 200 MW installierter elektrischer Leistung gebaut werden, das jährlich ca. 1,6 Mio. MWh Strom und Wärme produzieren könnte (Stadtwerke Kiel, 2015). Für beide Kraftwerke ist es jedoch aus ökonomischer Sicht wichtig, dass ausgehend von einem optimalen Standort die Wärme effizient verteilt wird. In dieser Arbeit wird daher ein Modell entwickelt, das die Planungssituation von Nahwärmenetzen abbilden kann und mit dessen Hilfe die Standorte der Anlagen sowie das Nahwärmenetz optimiert werden.

## 1.2 Zielsetzung und Lösungsweg

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein mathematisches Modell zur ökonomischen Optimierung von Nahwärmenetzen zu entwickeln. Das Modell ist in der Lage, verschiedene Planungssituationen für Nahwärmenetze abzubilden und unter Berücksichtigung der gegebenen Eingangsparameter zu optimieren. Bei der Planung und Umsetzung lokaler Nahwärmesysteme müssen verschiedene Aspekte, wie die Kapazität und die Standorte der Anlagen, die Auswahl der Wärmeabnehmer sowie der Verlauf des Nahwärmenetzes betrachtet werden. Bisherige Ansätze haben meistens nur einen dieser Aspekte berücksichtigt und optimiert, wie beispielsweise die Kapazitätsplanung und den Betrieb der Anlagen (Hochloff und Braun, 2014; Casisi u. a., 2009), die Standortplanung (Plata, 2008) oder die Planung und Sicherung der Versorgung mit Biomasse (Kim u. a., 2011). In dieser Arbeit wird erstmals ein Netzwerk-Standort-Modell entwickelt, das die Kapazitäts- und Standortplanung der Anlagen sowie den Verlauf und die Auslegung des Nahwärmenetzes simultan betrachtet und ökonomisch optimiert. Zur Erreichung dieser Zielsetzung werden in dieser Arbeit die folgenden Forschungsfragen untersucht und beantwortet:

- Wie können lokale Nahwärmesysteme unter Berücksichtigung der spezifischen Besonderheiten (z.B. Kapazität und Standort der Wärmequellen, Anschluss der Wärmekunden, Verlauf des Netzes, Wärmeverlust im Netzwerk) adäquat abgebildet werden?
- Wie lassen sich regulatorische Rahmenbedingungen für Nahwärmesysteme (z.B. die Vorgaben des EEG) in dem Modell abbilden?
- Wie können die einzelnen Teile des Nahwärmesystems bewertet werden, um eine ökonomische Optimierung zu ermöglichen?
- Lässt sich das Modell auf beliebige Nahwärmenetze verallgemeinern?

Im zweiten Kapitel werden die Grundlagen der Wärmeversorgung mit unterschiedlichen Wärmequellen vorgestellt. Dabei wird insbesondere auf die Eigenheiten der Fernwärme, das zu Grunde liegende Wärmenetz und die verschiedenen Anschluss- und Nutzungsmöglichkeiten für die Wärmekunden eingegangen. Ebenfalls aufgezeigt werden Möglichkeiten zum Ausgleich einer schwankenden Wärmenachfrage, die meistens durch den saisonalen Heizbedarf bedingt ist.

Als Beispiel eines kleinen Nahwärmenetzes, das seine Wärme aus einer mit Biogas betriebenen KWK-Anlage bezieht, wird das Bioenergiedorf Jühnde in Niedersachsen vorgestellt. In diesem Zusammenhang wird im Anschluss kurz auf das „Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien“ (Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG) eingegangen, das die Subventionierung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen regelt.

Kapitel 3 liefert die Grundlagen der Netzwerk- und Standorttheorie. Das mathematische Modell, das in dieser Arbeit entwickelt wird, kombiniert klassische Flussprobleme in Graphen und Netzwerkkonstruktionsprobleme mit Problemstellungen aus der mathematischen Standortplanung. Diese Kombination der verschiedenen Ansätze ist notwendig, da in dem Modell neben dem Wärmefluss auch die Auslegung des Nahwärmenetzes und die Standortwahl für die Kraftwerke abgebildet werden muss. Dementsprechend beschreibt dieses Kapitel die verschiedenen Problemstellungen und stellt deren mathematische Formulierung dar. Anschließend wird auf die Lösbarkeit von gemischt-ganzzahligen mathematischen Programmen im Allgemeinen und Flussproblemen im Besonderen eingegangen.

Das grundlegende Netzwerk-Standort-Modell zur Modellierung von Nahwärmenetzen wird in Kapitel 4 beschrieben. Das Modell wird sowohl als Eingüter- als auch als Mehrgütermodell formuliert und deren wesentliche Unterschiede analysiert. Bei der Anwendung herkömmlicher Lösungsalgorithmen weisen die beiden Formulierungen signifikante Unterschiede auf, so dass im Anschluss ein Vergleich der für die Optimierung notwendigen Laufzeit durchgeführt wird. Insbesondere wird der Einfluss verschiedener Eingangsparameter auf die Laufzeit untersucht.

In Kapitel 5 wird das allgemeine Netzwerk-Standort-Modell an die Planung von Bioenergiedörfern angepasst, um die gegebenen Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Neben der Modellierung der Kraftwerkskapazitäten und des Wärmeverlustes, die beide auch bei der Analyse herkömmlicher Nahwärmenetze betrachtet werden müssen, integriert das spezielle Modell zur Planung von Bioenergiedörfern einige spezifische Rahmenbedingungen dieser Nahwärmenetze. Unter anderem werden die Verfügbarkeit von Bioenergiepflanzen, die Nutzung von Gülle als Substrat und die notwendigen Bedingungen des EEG 2012 für die Subventionierung solcher Projekte über entsprechende Nebenbedingungen im Modell implementiert.

In der Fallstudie in Kapitel 6 dieser Arbeit wird das spezielle Modell zur Planung von Bioenergiedörfern auf ein reales Beispieldorf in Niedersachsen angewendet. Dieses Kapitel teilt sich in zwei Teile. Im ersten Teil werden die notwendigen Modellparameter für die Durchführung der Fallstudie bestimmt. Dazu gehören die Bestimmung der Substratkosten für den Betrieb der Biogasanlagen, die Berechnung der Kapitalwerte der Biogasanlagen sowie die ökonomische Bewertung der Wärmekunden und Netzteilstücke. Außerdem wird der Ausgangsgraph konstruiert, der der Fallstudie zu Grunde liegt und das Beispieldorf mit allen potentiellen Wärmekunden und Netzteilstücken abbildet. Im zweiten Teil des Kapitels wird in der Fallstudie die Planungssituation in dem Beispieldorf analysiert. Dabei werden verschiedene Szenarien bezüglich der Biomasseverfügbarkeit, der Anschlussbereitschaft der Bevölkerung sowie der Einschränkungen durch gesetzliche Vorschriften betrachtet, um die Auswirkungen dieser Parameter auf den Kapitalwert und damit auf die ökonomische Rentabilität einer solchen Investition zu untersuchen.

Kapitel 7 enthält eine weitere Fallstudie, in der die Planungssituation eines Nahwärmenetzes in einer chilenischen Großstadt untersucht wird. Diese Problemstellung unterscheidet sich stark von der Fallstudie im vorigen Kapitel, da die Rahmenbedingungen in Chile und Deutschland sehr unterschiedlich sind. Neben den geographischen und gesetzlichen Gegebenheiten müssen beispielsweise auch die Unterschiede in der baulichen Struktur einer chilenischen Großstadt im Vergleich zu einem kleinen Dorf in Deutschland berücksichtigt werden. Dazu wird im ersten



Teil des Kapitels das allgemeine Netzwerk-Standort-Modell an die chilenischen Verhältnisse angepasst und erweitert. Insbesondere wird damit die Flexibilität des Modells gezeigt, indem die Rahmenbedingungen in Chile mit Hilfe geeigneter Nebenbedingungen im Modell implementiert werden. Der zweite Teil des Kapitels enthält die eigentliche Fallstudie, in der die ökonomische Vorteilhaftigkeit einer Investition in ein Nahwärmenetz untersucht wird, das mehrere tausend Haushalte mit Wärme versorgt.

Die Erkenntnisse aus der Entwicklung und Anwendung des Modells werden im achten Kapitel dargelegt. Dabei werden insbesondere die verschiedenen Möglichkeiten zur Anwendung des Modells und die dadurch bestehenden Vorteile bei der Analyse einer gegebenen Planungssituation aufgezeigt. Anschließend wird auf mögliche Erweiterungen eingegangen, um zusätzliche Aspekte bei der Netzwerkkonstruktion, der Substratverfügbarkeit oder der Unsicherheit verschiedener Parameter zu berücksichtigen. Kapitel 9 fasst die Arbeit zusammen.



## 2 Grundlagen der Nahwärmeversorgung und Rahmenbedingungen für Bioenergiedörfer

Die Kraft-Wärme-Kopplung stellt unabhängig vom eingesetzten Energieträger eine sehr effiziente Möglichkeit zur Bereitstellung von Strom und Wärme dar und kann dazu beitragen, den Primärenergieverbrauch zu reduzieren. Grundvoraussetzung für einen effizienten Betrieb ist eine geeignete Wärmenachfrage und -verteilung an die Kunden über ein Nahwärmenetz. In diesem Kapitel werden daher die Grundlagen der Wärmeversorgung unter Berücksichtigung verschiedener Wärmequellen und schwankender Nachfrage betrachtet. Abschließend wird das Bioenergiedorf Jühnde als Beispiel eines kleinen, unabhängigen Nahwärmenetzes vorgestellt und die gesetzlichen Grundlagen zur Subventionierung solcher Projekte beschrieben.

### 2.1 Wärmeversorgung

In Deutschland wurden im Jahr 2014 insgesamt ca. 3.600 TWh Primärenergie verbraucht, was einem pro Kopf Verbrauch von ungefähr 43.900 kWh entspricht (AG Energiebilanzen e.V., 2015). Die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser beanspruchte in Deutschland durchschnittlich einen Anteil von 35 % dieser Primärenergie (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2012). Fernwärme ist eine Möglichkeit den Abnehmern diese thermische Energie zur Verfügung zu stellen. Mit Fernwärme wird die Versorgung mit thermischer Energie aus einer geographisch entfernten Wärmequelle bezeichnet. Bei geringer Trassenlänge oder niedriger Betriebstemperatur des Versorgungsnetzes wird umgangssprachlich auch von Nahwärmenetzen gesprochen (Umweltbundesamt, 2007). Rechtlich gesehen besteht jedoch kein Unterschied zwischen Nah- und Fernwärme, wie der Bundesgerichtshof in seinem Urteil vom 25.10.1989 klarstellt:

„Wird aus einer nicht im Eigentum des Gebäudeeigentümers stehenden Heizungsanlage von einem Dritten nach unternehmenswirtschaftlichen Gesichtspunkten eigenständig Wärme produziert und an andere geliefert, so handelt es sich um Fernwärme. Auf die Nähe der Anlage zu dem versorgenden Gebäude oder das Vorhandensein eines größeren Leitungsnetzes kommt es nicht an.“<sup>1</sup>

Weder die Länge noch die Betriebstemperatur eines Versorgungsnetzes stellen demnach ein rechtliches Kriterium dar, um zwischen Nahwärme und Fernwärme zu unterscheiden. Stattdessen wird Fernwärme ausschließlich über die besondere Struktur dieser Wärmeversorgung definiert. Der Gebäudeeigentümer bezieht die benötigte Wärme über ein Leitungsnetz aus einer Wärmequelle, die sich nicht in seinem Eigentum befindet. Die folgenden Teilschnitte orientieren sich an dieser Definition und gehen genauer auf die Wärmequelle, das Leitungsnetz und den Wärmeabnehmer ein.

<sup>1</sup>BGH, Urteil vom 25.10.1989 - VIII ZR 229/88; NJW 1990, 1181

### 2.1.1 Wärmequellen

Die Wärmequellen für Nahwärmenetze sind in Abhängigkeit von den Randbedingungen sehr unterschiedlich. Grundsätzlich unterteilen sich die Wärmequellen in drei Arten. Heizkraftwerke sind Wärmequellen, deren wesentlicher Kern eine Kraft-Wärme-Kopplungsanlage zur Bereitstellung von Strom und Wärme ist. Heizwerke hingegen sind Anlagen, bei denen die eingesetzte Energie ausschließlich in Wärme umgesetzt wird. Als dritte Wärmequelle für die Bereitstellung von Nahwärme muss die industrielle Abwärme genannt werden, die jedoch in Deutschland in den letzten Jahren eher vernachlässigt wurde und nur einen sehr geringen Anteil einnimmt (Umweltbundesamt, 2007). Die Nutzung industrieller Abwärme wird daher in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Circa 19 % der in Deutschland genutzten Fernwärme wird von Heizwerken geliefert. Heizwerke setzen meistens fossile Brennstoffe ein, nutzen aber auch nachwachsende Rohstoffe, wie beispielsweise Holzhackschnitzel oder Holzpellets für die Wärmebereitstellung. Des Weiteren können in Heizwerken auch erneuerbare Energiequellen wie Solarthermie oder Geothermie verwendet werden. Diese Energiequellen sind jedoch sehr standortabhängig und werden (noch) nicht für die großflächige Versorgung mit Fernwärme eingesetzt (Umweltbundesamt, 2007). Ein grundsätzliches Problem von Heizwerken ist die ausschließliche Bereitstellung von thermischer Energie, die bei der Stromerzeugung aus fossilen und biogenen Brennstoffen auch als häufig nicht genutzte Abwärme anfällt. Heizkraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) ermöglichen hingegen die Bereitstellung von Strom und Wärme. KWK-Anlagen bieten durch ihre hohe Effizienz von über 80 % ein großes Potential zur Verringerung des Energiebedarfs in Deutschland, da die Umwandlungsverluste bei der Stromversorgung circa ein Fünftel des Primärenergiebedarfs in Deutschland ausmachen (Umweltbundesamt, 2007). Im Rahmen europäischer Vorgaben zur Energieeffizienz (Europäische Kommission, 2011) werden Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen daher seit einigen Jahren in Deutschland ausgebaut und durch das KWKG staatlich gefördert. Insgesamt stellen Heizkraftwerke etwa 81 % der in Deutschland genutzten Fernwärme bereit.

KWK-Anlagen gibt es in Deutschland in einer Vielzahl von Varianten. In einigen deutschen Städten, wie beispielsweise Flensburg, Kiel oder Mannheim, werden große Fernwärmenetze mit mehreren Tausend Anschlussstationen aus KWK-Anlagen in konventionellen Kraftwerken versorgt (Umweltbundesamt, 2007). Aber auch kleinere, dezentrale Wärmeversorgungsnetze können mit KWK-Anlagen in Form von Blockheizkraftwerken (BHKW) betrieben werden. Die Auswahl an Größen reicht dabei von Mikro-BHKW ( $< 5 \text{ kW}_{el}$ ) für die Versorgung einzelner Haushalte oder Mehrfamilienhäuser bis hin zu BHKW für die Versorgung ganzer Dörfer (Ruppert, 2008). Auch die eingesetzten Brennstoffe sind sehr unterschiedlich und variieren von fossilen Brennstoffen (Erdgas, Diesel), über Pyrolysegas aus der Holzvergasung bis hin zu Biogas aus der Vergärung von Biomasse (Fraunhofer UMSICHT, 1998). In den folgenden Abschnitten werden die Grundlagen der Wärmebereitstellung in Anlehnung an Strauß (2009) und den von Fraunhofer UMSICHT (1998) herausgegebenen „Leitfaden Nahwärme“ dargestellt.

### 2.1.2 Leitungsnetz

Wärmequellen versorgen in einem Nahwärmenetz die Endverbraucher mit thermischer Energie, die als Raumwärme oder für Warmwasser genutzt werden kann. Die Bereitstellung der Wärme erfolgt über ein Leitungsnetz, in dem ein Trägermedium die Wärme von den Wärmequellen zum Verbraucher transportiert. Moderne Leitungssysteme werden fast ausschließlich als Zweileiter-Systeme mit Heizwasser als Wärmeträger konzipiert. Diese Zweileiter-Systeme bestehen

aus einem Vorlauf, der die Wärme zum Verbraucher transportiert, und einem Rücklauf, der das abgekühlte Heizwasser zur Wärmequelle zurück leitet. Typische Vorlauftemperaturen in Nahwärmenetzen liegen zwischen  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Der Rücklauf ist meistens auf  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  abgekühlt.

Die Struktur der Leitungsnetze ist stark von den äußeren Gegebenheiten abhängig. Die wichtigsten Faktoren sind die Dichte und Art der Bebauung, die Straßenführung, die Größe des Netzes und die Einbindung der Wärmequellen. Bei kleinen und mittleren Nahwärmenetzen werden meistens Strahlennetze verlegt, da diese Netzstruktur ohne Ringschlüsse die geringste Trassenlänge aufweist und dadurch relativ kostengünstig und effizient ist. Nachteilig ist hierbei jedoch die Abhängigkeit von einer einzelnen Wärmequelle und die geringere Versorgungssicherheit durch fehlende redundante Leitungen. Ringnetze hingegen haben diese Nachteile nicht, da die Möglichkeit besteht, mehrere Wärmequellen in eine ringförmige Netzstruktur einzubinden und damit die Endverbraucher auch bei Ausfall einer der Wärmequellen oder eines Netzteilstückes relativ sicher mit Wärme zu versorgen. Ein weiterer Vorteil der Ringstruktur ist die bessere Erweiterbarkeit bei zusätzlichen Endverbrauchern im Einzugsgebiet des Netzes. Dem gegenüber stehen jedoch die höheren Kosten durch längere Trassen und größere Nenndurchmesser der Ringleitungen. Eine Erweiterung der Ringstruktur sind die Maschennetze, deren Maschen jeweils aus einzelnen Ringstrukturen bestehen. Diese Netzstruktur bietet die größte Variabilität bezüglich der Erweiterung und eine sehr hohe Versorgungssicherheit, wird allerdings auf Grund der hohen, notwendigen Investitionen nur für große Wärmenetze verwendet.

Aus städtebaulichen Gründen werden Wärmenetze häufig entlang der Straßen erdverlegt, da Freileitungen in den meisten Fällen nicht genehmigt werden. Ein Netzverlauf entlang der Straßen eignet sich zudem, da die Besitzverhältnisse der Grundstücke nicht geklärt werden müssen, was beim Verlegen über private Grundstücke unter Umständen zu Problemen führen kann. Bei dieser Standard-Trassenführung ist jeder Endverbraucher über eine Anschlussstation einzeln an das Wärmenetz angeschlossen, wodurch zusätzliche Wärmekunden später leicht in das Netz integriert werden können. In dicht bebauten Siedlungsgebieten kann auch eine Kellerverlegung sinnvoll sein. Dabei werden die Leitungen direkt durch die Keller der angrenzenden Häuser verlegt. Diese Methode ist zwar relativ kostengünstig, allerdings schließt sie eine nachträgliche Erweiterung des Netzes nahezu aus.

Beim Betrieb eines Wärmenetzes müssen verschiedene Parameter berücksichtigt werden. Der Netzdruck hängt vor allem von der Netzstruktur und der Topographie ab und muss so gewählt werden, dass der kritische Verbraucher, bei dem der Netzdruck am geringsten ist, sicher versorgt werden kann. Zudem muss der Netzdruck immer oberhalb des Dampfdruckes liegen, um ein Sieden des Wärmeträgermediums zu verhindern. Die Netztemperatur (Vor- und Rücklauf) ist ein zweiter wichtiger Parameter, der sowohl die übertragbare Leistung als auch die Wärmeverluste beeinflusst. Die maximal übertragbare Leistung hängt von der Temperaturspreizung, also der Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur ab, wohingegen die Wärmeverluste mit der mittleren Temperatur im Netz positiv korreliert sind, da bei höheren Temperaturen ein größerer Anteil der thermischen Energie während des Transportes an die Umgebung abgegeben wird. In kleineren Netzen, die ein BHKW als Wärmequelle nutzen, wird die Vorlauftemperatur aus wirtschaftlichen und technischen Gründen daher meistens unter  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  gewählt. Es besteht auch die Möglichkeit, die Temperaturen unabhängig von den Wärmequellen zu beeinflussen, indem Spitzenlastkessel zur Erhöhung der Vorlauftemperatur bzw. Wärmepumpen zur Reduzierung der Rücklauftemperatur in das Leitungsnetz integriert werden.

### 2.1.3 Wärmekunden

Die Endverbraucher nutzen thermische Energie als Raumwärme und zur Bereitstellung von Warmwasser. Der Anschluss an das Leitungsnetz kann auf zwei Arten realisiert werden. Bei einem direkten Anschluss wird das Wärmeträgermedium direkt in den Heizkreislauf der Verbraucher geleitet. Entsprechend müssen die Anlagen und Heizungssysteme auf den Netzdruck, die Beschaffenheit des Trägermediums und die Netztemperaturen angepasst sein. Bei indirekten Anschlüssen wird ein Wärmeübertrager zwischengeschaltet, der die Wärme aus dem Netz in den Heizkreislauf des Verbrauchers transferiert. Trotz der höheren Kosten werden in den meisten Wärmenetzen auf Grund der erhöhten Sicherheit und der Unabhängigkeit von Netzdrücken und -temperaturen indirekte Anschlüsse verwendet.

Bei der Trinkwassererwärmung sind noch weitere Aspekte zu berücksichtigen. Im Gegensatz zur Raumwärme spielt bei der Trinkwassererwärmung auch die Hygiene eine wichtige Rolle, da die Endverbraucher mit dem erwärmten Trinkwasser in direkten Kontakt kommen. Während die Raumwärme über Radiatoren direkt vom Wärmeträgermedium abgegeben wird, kommen bei der Trinkwassererwärmung verschiedene Konzepte für die Wärmeübertragung zwischen Heiz- und Trinkwasser zum Einsatz. Durchflusserhitzer erwärmen das Trinkwasser zum Zeitpunkt des Bedarfs, indem das Wasser direkt vor der Entnahme einen Wärmeübertrager durchfließt. Dadurch fallen nur sehr geringe Investitionen an und die Hygiene des Trinkwassers wird durch die Erwärmung nicht beeinflusst. Zusätzliche Vorteile sind der geringe Platzbedarf und die hohe Effizienz, da das Heizwasser stark abgekühlt wird. Allerdings ist die Leistungsnachfrage bei Durchflusserhitzern sehr punktuell und unregelmäßig, was jedoch durch eine große Anzahl an Abnehmern teilweise wieder ausgeglichen werden kann. Das zweite Konzept zur Trinkwassererwärmung nutzt einen Warmwasserspeicher an den Entnahmestellen. Vorteile dieses Systems sind die geringe Anschlussleistung, mit der ein relativ großer Vorrat an Warmwasser konstant auf Temperatur gehalten wird. Allerdings sind die notwendigen Investitionen und der Platzbedarf für den Warmwasserspeicher deutlich höher als bei Durchflusserhitzern. Außerdem sind die Speicher relativ anfällig für Verunreinigungen mit Legionellen oder anderen Keimen, die sich in dem stehenden, warmen Wasser des Speichers gut vermehren können. Eine Kombination beider Konzepte bietet das Speicher-Lade-System, bei dem ein Durchflusserhitzer die Grundversorgung mit Warmwasser sichert und die Verbrauchsspitzen durch einen Warmwasserspeicher abgedeckt werden. In Zeiten geringen Verbrauchs wird der Speicher durch den Wärmeübertrager aufgeheizt. Dieses System verbindet die Vorteile beider Konzepte und ermöglicht eine hohe Effizienz und gleichmäßige Auslastung der Anschlussleistung. Allerdings setzt ein effizienter Betrieb des Systems die optimale Auslegung des Wärmeübertragers und des Speichers voraus, die durch eine komplexe Regelungstechnik aufeinander abgestimmt sein müssen.

### 2.1.4 Schwankungen der abgenommenen Wärmemengen

Beim Betrieb von Wärmenetzen tritt häufig das Problem schwankender Abnahmemengen auf, wodurch die Auslastung der Wärmequellen reduziert wird. Diese Schwankungen treten auf verschiedenen Zeitskalen auf und sind von den angeschlossenen Endverbrauchern abhängig, da die Lastprofile der Verbraucher sehr unterschiedlich sein können. Beispiele unterschiedlicher Tageslastprofile sind in den Abbildungen 2.1 und 2.2 dargestellt. Spitzenlastzeiten von Wärmeabnehmern in Wohnsiedlungen konzentrieren sich in den Morgen- und Abendstunden, wohingegen der beispielhafte Tagesgang eines Krankenhauses die Spitzenlast um die Mittagszeit erreicht. Nachts weisen beide Wärmeabnehmer eine deutlich reduzierte Last auf. Die Kombination von Wärmeabnehmern

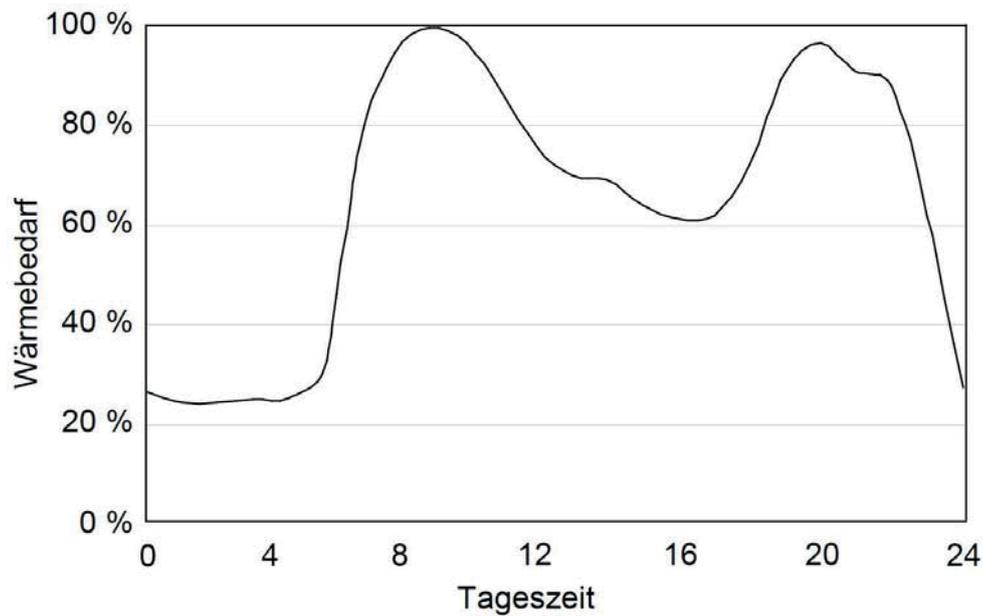


Abbildung 2.1: Charakteristischer Tagesgang einer Wohnsiedlung (Fraunhofer UMSICHT, 1998)

in Wohngebieten und öffentlichen Einrichtungen ermöglicht durch die verschobenen Spitzenlastzeiten einen teilweisen Ausgleich der unterschiedlichen Tagesgänge, so dass sich insgesamt ein etwas gleichmäßigerer Verbrauch über den Tag ergibt. Ein Ausgleich der Spitzenlast kann außerdem durch die Nutzung von Wärmespeichern oder Speicher-Lade-Systemen erreicht werden. Dabei werden die Speicher zur Deckung der Spitzenlast genutzt und bei niedriger Last (beispielsweise nachts) wieder aufgeladen. Dadurch kann eine Nivellierung der Lastabnahme über den ganzen Tag erreicht werden.

Diese unterschiedlichen Lastgänge treten nicht nur über den Tag, sondern auch über das Jahr hinweg auf. Grund dafür ist vor allem der erhöhte Raumwärmebedarf im Winter, während der Warmwasserbedarf annähernd konstant bleibt. Die Gradtagszahlen<sup>2</sup> bieten eine Grundlage für die genormte Schätzung des Heizbedarfs (Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2000) und liefern Durchschnittswerte für die anteiligen Heizbedarfe pro Monat. Demnach werden im kältesten Monat (Januar) durchschnittlich 17% der jährlichen Raumwärme benötigt, wohingegen in den Sommermonaten Juli bis August lediglich 1,3% des Raumwärmebedarfs anfallen. Diese Zahlen verdeutlichen die Schwierigkeit, bei schwankenden Wärmebedarfen die Wärmequellen effizient zu betreiben und auszulasten. Abbildung 2.3 zeigt beispielhaft den Anteil der benötigten Maximalleistung im Verhältnis zu den Jahrestunden, in denen diese Leistung benötigt wird. Dabei wird deutlich, dass die Leistungsspitzen nur in einer sehr geringen Zeitspanne zur Verfügung stehen müssen. Abhängig von der Wärmequelle liegen die wirtschaftlichen Grundlastanteile zwischen 10% und 40% der Maximallast, so dass ca. 60% - 80% der gesamten Jahresarbeit von dem Grundlasterzeuger geleistet werden.

Durch den Anschluss weiterer Wärmesenken ist es möglich, einen Lastausgleich über das ganze Jahr zu erreichen. Dazu müssen Wärmeabnehmer angeschlossen werden, die vor allem im Sommer einen hohen Wärmebedarf aufweisen. Eine Möglichkeit ist die überschüssige Wärme zur Trocknung biogener Rohstoffe zu nutzen. Allerdings stellt sich hier die Frage, ob sich geeignete

<sup>2</sup>Gradtagszahlen berechnen sich als Differenz der gewünschten Raumtemperatur (20 °C) und der durchschnittlichen Tagestemperatur, sobald diese unter die Heizgrenztemperatur von 15 °C fällt.

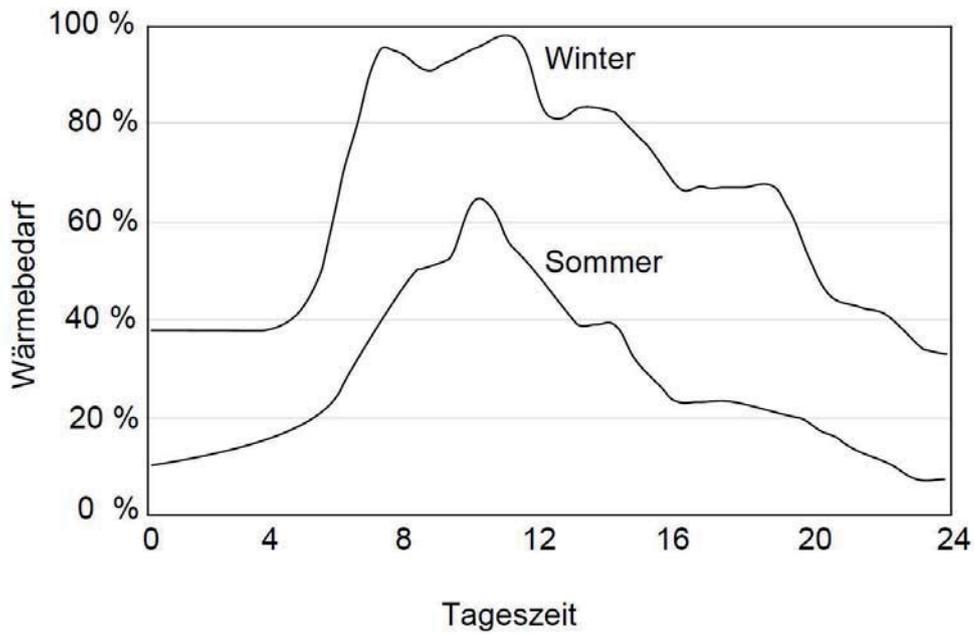


Abbildung 2.2: Charakteristischer Tagesgang eines Krankenhauses im Sommer und Winter (Fraunhofer UMSICHT, 1998)

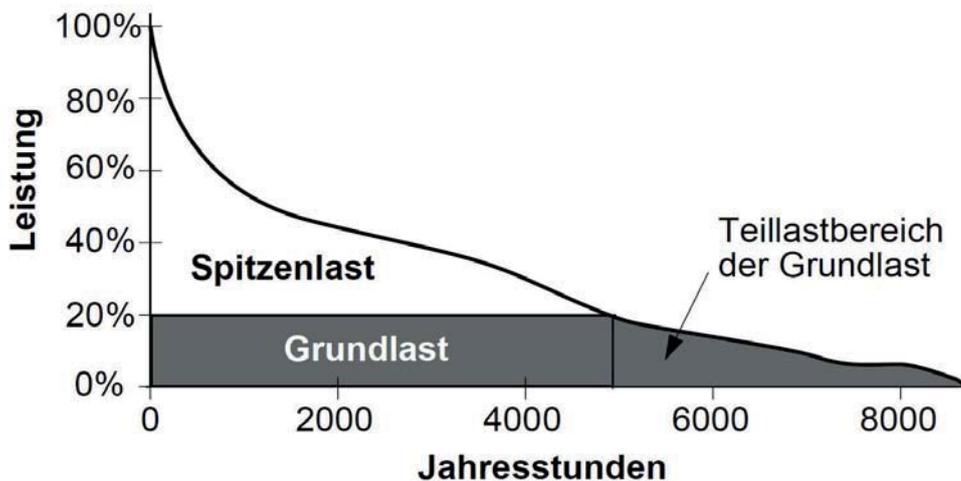


Abbildung 2.3: Aufteilung der Jahresdauerlinie in Grund- und Spitzenlast (Fraunhofer UMSICHT, 1998)