
UrbanReNet

EnEff:Stadt - Verbundprojekt Netzoptimierung -

Teilprojekt: Vernetzte regenerative Energiekonzepte im Siedlungs- und Landschaftsraum



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Schlussbericht (Anlage III)

Förderkennzeichen: 0327832D

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2009 bis 31.08.2012

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Kapitel VIII: Anlagen

11.0 CPLEX Modell.....	570
------------------------	-----

Kapitel VIII: Anlagen

11.0 CPLEX Modell

UrbanReNet

Mathematische Modellierung

Debora Mahlke, Andrea Zelmer
FG Diskrete Optimierung

5. Oktober 2011

1 Problembeschreibung

Das Thema dieses Forschungsprojekts ist die ganzheitliche Betrachtung von dezentralen Energieerzeugungs-, Speicher- und Vernetzungspotentialen von Gebäuden und Freiflächen in urbanen Räumen. Dabei ist das Ziel die Entwicklung eines prototypischen Softwaretools als Grundlage für die Planung effizienter, integrativer Energieversorgungskonzepte auf Quartiersebene. Diese Energieversorgungskonzepte sollen Vorschläge zur Nutzung bestehender Potentiale und zum Ausbau von Energieerzeugungsanlagen sowie deren Vernetzung liefern. Der Schwerpunkt des Projekts liegt auf einer gebäudeübergreifenden Betrachtung im urbanen Raum, wodurch vielfältige Synergieeffekte bei einer energetischen Vernetzung ausgenutzt werden können. Zu diesem Zweck wird der Gebäudebestand in Deutschland energetisch und mikroklimatisch untersucht und in so genannten Stadttraumtypologien, d.h. Gebäudegruppen mit ähnlichen baulichen und energetischen Merkmalen, zusammengefasst.

Aus mathematischer Sicht wird diese Fragestellung durch erweiterte Optimierungsmodelle aus dem Netzwerkdesign und der Ausbauplanung abgebildet. Zu Beginn wird ein vorgegebener Stadtausschnitt anhand der energetischen Merkmale in mehrere Sektionen unterteilt und diesen geeignete Stadtraumtypen zugeordnet. Auf dieser Basis werden die energetischen Maßnahmen, die innerhalb einer Sektion umgesetzt werden können, und die Bedarfe dieser Sektion ermittelt. Zu den potentiellen Ausbaumaßnahmen zählt beispielsweise die Installation von Photovoltaik, Solarthermie, Geothermie, Kraft-Wärme-Kopplung und Wärmenetzen sowie die Nutzung von Biomasse. Die betrachteten Energieformen umfassen zurzeit Strom, Wärme, Trinkwarmwasser. Die bereits identifizierten grundlegenden Abhängigkeiten der Inputparameter und den Stadtraumtypologien werden mit in das Modell aufgenommen, wie beispielsweise die Abhängigkeit der mittleren Heizwärmelast von der GFZ.

Das Optimierungsmodell stellt ein transientes, energetisches Netzwerkdesignproblem dar, wobei der betrachtete Zeithorizont in Typtage und mehrere Zeiteinheiten pro Tag un-

terteilt ist. Die zu treffenden Entscheidungen können diskreter oder kontinuierlicher Art sein, z.B. ob eine Anlage innerhalb einer Sektion zu installieren ist, d.h. eine ja/nein-Entscheidung, und im Falle der Errichtung deren Größe und Betriebsweise. Die Nebenbedingungen lassen sich grundsätzlich in zwei Klassen unterteilen, die einerseits Ausbauentscheidungen und andererseits den Betrieb der installierten Anlagen betreffen. Insbesondere ist der Anteil einer Ausbaumaßnahme über die installierte Leistung innerhalb einer Sektion zu bestimmen und darauf aufbauend die an einer Zeiteinheit eines Typtags tatsächlich produzierte Leistung, die in die Bedarfsdeckung eingeht. Weiterhin werden energetische Flüsse zur Vernetzung zwischen den einzelnen Sektionen berücksichtigt. Die Optimierung kann bezüglich verschiedener Kriterien erfolgen, beispielsweise der Wirtschaftlichkeit, des Primärenergiebedarfs oder der CO₂-Einsparung, wobei in einem ersten Schritt die Kosten minimiert werden.

Netzwerkdesignprobleme, die kombinatorische Aspekte mit der Abbildung physikalischer Nebenbedingungen vereinen, sind bisher wenig untersucht. Um diese Probleme für praxisrelevante Größenordnungen lösen zu können, muss schon bei der Modellierung zwischen einer möglichst realitätsnahen Abbildung der Fragestellung und der mathematischen Handhabbarkeit der Modelle abgewogen werden. Hier werden Testläufe mit kleinen exemplarischen Problem instanzen, die auf realen Datensätzen eines Stadtausschnitts beruhen, unter Verwendung des bereits bestehenden Optimierungssoftwarepakets CPLEX durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass Branch-and-Cut Verfahren, wie in CPLEX verwendet, geeignet zur Lösung des oben erläuterten Problems sind. Insbesondere die gelieferte Gütegarantie der Lösungen ist dabei von Bedeutung, um Aussagen über die Qualität der Lösungen treffen zu können. Es lässt sich vermuten, dass die existierende Optimierungssoftware um problemspezifische Methoden erweitert werden muss, um praxisrelevante Problem instanzen in annehmbarer Rechenzeit lösen zu können.

Ein Schwerpunkt ist die Implementierung der entwickelten Verfahren und darauf aufbauend die Erstellung eines prototypischen Softwaretools als Grundlage für die Planung von Energieversorgungskonzepten auf Quartiersebene. Die Optimierungsmodelle und die mathematischen Lösungsverfahren innerhalb des Softwaretools sollen anhand realer Datensätze evaluiert und gegebenenfalls angepasst werden, um eine Anwendung in der Praxis zu ermöglichen.

Das oben beschriebene Modell wurde unter Verwendung der Java API der Concert Technology implementiert. Auch wurde eine erste Nutzeroberfläche entwickelt, welche dem Benutzer erlaubt, spezifische Parameter der Problem instanzen einzugeben und in die Optimierung einzubringen. In diesem Rahmen wurde ebenfalls eine automatisierte Verarbeitung und Verwaltung der Inputdaten vorgenommen und eine Schnittstelle zum Modellierungs- und Optimierungstool hergestellt.

Tabelle 1: Mengen des Modells und Netzstruktur

Name	Menge
$v \in \mathcal{V}$	Knotenmenge des Graphen
$v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}} \subseteq \mathcal{V}$	Menge der Sektionsknoten
$v \in \mathcal{V}_{\mathcal{S}} \subseteq \mathcal{V}$	Menge der Straßenknoten
$a \in \mathcal{A}$	Bogenmenge des Graphen
$a \in \mathcal{A}_{\mathcal{I}} \subseteq \mathcal{A}$	Menge der Hilfsbögen zwischen Straßen- und Sektionsknoten
$a \in \mathcal{A}_{\mathcal{S}} \subseteq \mathcal{A}$	Menge der Straßensegmente
$a \in \mathcal{A}_{\mathcal{S}}^v \subseteq \mathcal{A}_{\mathcal{S}}$	Menge der Straßensegmente, die Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ umschließen
$a \in \mathcal{A}_{\mathcal{I}}^v \subseteq \mathcal{A}_{\mathcal{I}}$	Menge der Hilfsbögen, die an Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ grenzen
$c \in \mathcal{E}$	Menge der Energieformen
$k \in \mathcal{K}$	Menge der Typtage
$l \in \mathcal{L}$	Menge der Zeiteinheiten pro Typtag
$r \in \mathcal{R}$	Menge der Anlagen und Maßnahmen
$r \in \mathcal{R}_e \subseteq \mathcal{R}$	Menge der stromproduzierenden Anlagen/Maßnahmen
$r \in \mathcal{R}_h \subseteq \mathcal{R}$	Menge der wärmeproduzierenden Anlagen/Maßnahmen
$r \in \mathcal{R}_g \subseteq \mathcal{R}$	Menge der Erdgas beziehenden Anlagen

2 Parameter und Variablen

Zur Modellierung des oben beschriebenen Problems werden zunächst die Mengen des Modells sowie die zugrundeliegende Netzstruktur beschrieben und im Anschluss die benötigten Parameter und Variablen eingeführt.

2.1 Mengen und Netzstruktur

In Tabelle 1 werden die Mengen des Modells aufgeführt, wobei der obere Teil die Vernetzung zwischen den Sektionen im betrachteten Stadtausschnitt und der untere Teil die Anlagen und Maßnahmen beschreibt.

Die Vernetzung zwischen den einzelnen Sektionen wird als gerichteter Graph $G = (\mathcal{V}, \mathcal{A})$ modelliert. Dabei ist die Knotenmenge $\mathcal{V} = \mathcal{V}_{\mathcal{I}} \cup \mathcal{V}_{\mathcal{S}}$ in zwei Mengen unterteilt, wobei $\mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ die Menge der Sektionen darstellt und $\mathcal{V}_{\mathcal{S}}$ die restlichen Knoten umfasst, die Straßensegmente darstellen. Die Bogenmenge $\mathcal{A} = \mathcal{A}_{\mathcal{I}} \cup \mathcal{A}_{\mathcal{S}}$ gliedert sich ebenfalls in zwei Mengen, wobei $\mathcal{A}_{\mathcal{I}}$ sich aus den Hilfssegmenten zusammensetzt, die einen Sektions- mit einem Straßenknoten verbinden, und $\mathcal{A}_{\mathcal{S}}$ die übrigen Straßensegmente umfasst. Jedem Sektionsknoten $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ wird eine Menge $\mathcal{A}_{\mathcal{S}}^v$ von Straßensegmenten zugeordnet, die v umschließen, und eine Menge $\mathcal{A}_{\mathcal{I}}^v$ von Hilfssegmenten, die an v angrenzen. Dies ist für die Verlegung eines Wärmenetzes innerhalb dieser Sektion von Bedeutung. In einem ersten Schritt werden lediglich Sektionsknoten und Sektionsbögen, die je zwei Sektionen

Tabelle 2: Kürzel der Maßnahmen

Name	Anlage bzw. Maßnahme
<i>san</i>	Sanierung/Wärmedämmung
<i>bio</i>	Biomüllnutzung
<i>pv</i>	Photovoltaikinstallation
<i>sol</i>	Solarthermieinstallation
<i>geo</i>	Geothermieinstallation
<i>mhp</i>	Mikro-KWK-Installation
<i>chp</i>	KWK-Installation
<i>boil</i>	Heizkesselinstallation
<i>net</i>	Wärmenetzinstallation

Tabelle 3: Ausbauparameter für Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$

Name	Parameter	Einheit
$b_v^{e,r}$	Minimale installierte elektrische Leistung der Anlage $r \in \mathcal{R}_e$	[MW]
$B_v^{e,r}$	Maximale installierte elektrische Leistung der Anlage $r \in \mathcal{R}_e$	[MW]
$b_v^{h,r}$	Minimale installierte thermische Leistung der Anlage $r \in \mathcal{R}_h$	[MW]
$B_v^{h,r}$	Maximale installierte thermische Leistung der Anlage $r \in \mathcal{R}_h$	[MW]
c_v^r	Kosten für Installation der Anlage $r \in \mathcal{R}$	$\left[\frac{\text{€}}{\text{MW}}\right]$
c_v^{net}	Kosten für Wärmenetzinstallation	[€]

miteinander verbinden, betrachtet, d.h. G ist ein vollständiger Graph.

Die betrachteten Energieformen werden in der Menge $\mathcal{E} = \{e, h, w\}$ zusammengefasst, wobei e, h, w für Strom, Wärme und Trinkwarmwasser stehen. Die Menge \mathcal{K} bzw. \mathcal{L} beinhaltet die Indexmenge der Typtage bzw. Zeiteinheiten pro Typtag. Die Menge \mathcal{R} beschreibt alle Anlagen und Maßnahmen, welche innerhalb einer Sektion umgesetzt werden können. Insbesondere bezieht sich $\mathcal{R}_e = \{bio, pv, mhp, chp\}$ auf die stromproduzierenden, $\mathcal{R}_h = \{san, bio, sol, geo, mhp, chp, boil\}$ auf die wärmeproduzierenden und $\mathcal{R}_g = \{mhp, chp, boil\}$ auf die Erdgas beziehenden Anlagen bzw. Maßnahmen. Die verwendeten Kürzel der Anlagen bzw. Maßnahmen werden in Tabelle 2 erläutert.

2.2 Parameter

In Tabelle 3 sind die Parameter des Modells zusammengefasst, welche die Ausbauteilnehmungen einer Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ betreffen. Dabei beschreibt der obere Teil der Tabelle die elektrischen und thermischen unteren bzw. oberen Schranken $b_v^{e,r}$, $b_v^{h,r}$ bzw. $B_v^{e,r}$, $B_v^{h,r}$ an die zu installierenden Leistungen der Anlagen $r \in \mathcal{R}$ in der Sektion. Im unteren Teil sind die Investitionskosten c_v^r der Anlagen $r \in \mathcal{R}$ pro installierte Leistung sowie die Kosten c_v^{net} des Wärmenetzes in der Sektion angegeben.

Tabelle 4: Betriebsparameter für Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$, Typtag $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$

Name	Parameter	Einheit
α	Annuitätenfaktor	[1]
μ	Mittelwertfaktor	[1]
ω_k	Gewichtung des Typtags	[1]
ν_{vkl}	Solarstrahlungsfaktor	[1]
d_{vkl}^c	Bedarf für Energieform $c \in \mathcal{E}$	[MW]
c_{vkl}^e	Kosten für importierte Strommenge	$\left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}}\right]$
c_{vkl}^g	Kosten für importierte Erdgasmenge	$\left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}}\right]$
$c_{vkl}^{ex,r}$	Einspeisetarif für exportierten Strom der Anlage $r \in \mathcal{R}_e$	$\left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}}\right]$

Tabelle 5: Technologieparameter für Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$

Name	Parameter	Einheit
η_v^r	Wirkungsgrad der Anlage $r \in \{mhp, boil, geo\}$	[1]
σ_v^r	Stromkennzahl der KWK-Anlage $r \in \{mhp, chp\}$	[1]
τ_v^r	Minimale Teillast der KWK-Anlage $r \in \{chp\}$	[1]
η_{vj}^r	Teillastwirkungsgrade der KWK-Anlage $r \in \{chp\}$	[1]

Tabelle 6: Ausbauparameter für Bogen $a \in \mathcal{A}$

Name	Parameter	Einheit
l_a	Länge des Bogens	[m]
c_a^{net}	Kosten für Wärmenetzinstallation	[€/m]

Tabelle 4 fasst die Parameter zusammen, welche den Betrieb einer Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ an einem Typtag $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$ beschreiben. Dabei beziehen sich die oberen Parameter auf Charakteristika eines Typtags und einer Zeiteinheit. So ist ω_k die Gewichtung, ν_{vkl} der Solarstrahlungsfaktor und d_{vkl}^c sind die Bedarfe eines Typtags $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$ für eine Energieform $c \in \mathcal{E}$. Im unteren Teil sind die Betriebskosten $c_{vkl}^{e,imp}$ bzw. $c_{vkl}^{h,imp}$ pro MWh für die importierte Strom- und Erdgasmenge in dieser Sektion. Hier wird angenommen, dass die thermische Energie über lokal installierte Bestandheizkessel aus Erdgas produziert wird und das Gasnetz auch zum Bestand zählt. Der Einspeisetarif für die Rückvergütung des exportierten Stroms einer Anlage $r \in \mathcal{R}_e$ wird über $c_{vkl}^{ex,r}$ beschrieben.

Tabelle 5 umfasst die Technologieparameter, welche die Anlagen $r \in \mathcal{R}$ einer Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ charakterisieren. Dazu gehören die Wirkungsgrade η_v^r der Anlagen $r \in \{mhp, boil, geo\}$ sowie die Stromkennzahl σ_v^r für die KWK-Anlagen $r \in \{mhp, chp\}$, die das Verhältnis zwischen der produzierten elektrischen und thermischen Leistung der KWK-Anlagen beschreibt. Die große KWK-Anlage weist zusätzlich ein Teillastverhalten auf, das über die Teillastwirkungsgrade η_{vj}^r für $j \in \mathcal{J}_v^r$ und die minimale Teillast τ_v^r

Tabelle 7: Ausbauvariablen für Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$

Name	Bereich	Variable	Einheit
$z_v^{in,r}$	$\in \{0, 1\}$	Installation der Anlage $r \in \mathcal{R}$ (ja/nein)	[1]
z_v^{net}	$\in \{0, 1\}$	Wärmenetzinstallation (ja/nein)	[1]
$y_v^{e,r}$	$\in \mathbb{R}_+$	Installierte elektrische Leistung der Anlage $r \in \mathcal{R}_e$	[MW]
$y_v^{h,r}$	$\in \mathbb{R}_+$	Installierte thermische Leistung der Anlage $r \in \mathcal{R}_h$	[MW]

Tabelle 8: Betriebsvariablen für Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$, Typtag $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$

Name	Bereich	Variable	Einheit
$p_{vkl}^{e,r}$	$\in \mathbb{R}_+$	Produzierte elektrische Leistung durch Anlage $r \in \mathcal{R}_e$	[MW]
$q_{vkl}^{e,r}$	$\in \mathbb{R}_+$	Exportierte elektrische Leistung durch Anlage $r \in \mathcal{R}_e$	[MW]
$p_{vkl}^{h,r}$	$\in \mathbb{R}_+$	Produzierte thermische Leistung durch Anlage $r \in \mathcal{R}_h$	[MW]
$p_{vkl}^{g,r}$	$\in \mathbb{R}_+$	Benötigte Gasleistung der Anlage $r \in \mathcal{R}_g$	[MW]
s_{vkl}^e	$\in \mathbb{R}_+$	Importierte elektrische Leistung	[MW]
s_{vkl}^h	$\in \mathbb{R}_+$	Lokal produzierte thermische Leistung	[MW]
$z_{vkl}^{op,r}$	$\in \{0, 1\}$	Betrieb der KWK-Anlage $r \in \{chp\}$ (ja/nein)	[1]
w_{vklj}^r	$\in \{0, 1\}$	Teillastwirkungsgrad $j \in \mathcal{J}_v^r$ der KWK-Anlage $r \in \{chp\}$	[1]

beschrieben wird.

In Tabelle 6 sind die Parameter zusammengefasst, die den Ausbau auf einem Bogen $a \in \mathcal{A}$ betreffen. Diese beinhalten die Länge l_a des Bogens sowie die Installationskosten c_a^{net} pro Länge der Leitung.

Hier wird angenommen, dass alle Parameter nichtnegativ und die unteren Schranken höchstens so groß wie die oberen Schranken sind.

2.3 Variablen

Wie bei den Parametern wird auch bei den Variablen zwischen Ausbau und Betrieb in einer Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ unterschieden. In Tabelle 7 sind zunächst die binären Entscheidungsvariablen $z_v^{in,r}$ aufgeführt, welche angeben, ob eine Anlage installiert bzw. eine Maßnahme $r \in \mathcal{R}$ durchgeführt wird. Die unteren Variablen $y_v^{e,r}$ bzw. $y_v^{h,r}$ beschreiben die tatsächlich installierte elektrische bzw. thermische Leistung der Anlagen bzw. Maßnahmen $r \in \mathcal{R}$.

Für eine Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$, einen Typtag $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$ beschreiben die Betriebsvariablen in Tabelle 8 die produzierte und zur Deckung des Bedarfs verwendete elektrische bzw. thermische Leistung $p_{vkl}^{e,r}$ bzw. $p_{vkl}^{h,r}$ durch eine Anlage $r \in \mathcal{R}$. Für eine stromproduzierende Anlage $r \in \mathcal{R}_e$ ist außerdem noch die exportierte elektrische Leis-

Tabelle 9: Ausbau-/Betriebsvariablen für Bogen $a \in \mathcal{A}$, Typtag $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$

Name	Bereich	Variable	Einheit
x_a^{net}	$\in \{0, 1\}$	Wärmenetzinstallation (ja/nein)	[1]
f_{akl}^e	$\in \mathbb{R}$	Elektrischer Leistungsfluss	[MW]
f_{akl}^h	$\in \mathbb{R}$	Thermischer Leistungsfluss	[MW]

zung $q_{vkl}^{e,r}$ von Bedeutung, da überschüssige Energie wieder in das öffentliche Stromnetz eingespeist und rückvergütet werden kann. Dabei ist die Summe $p_{vkl}^{e,r} + q_{vkl}^{e,r}$ die insgesamt produzierte Leistung der Anlage $r \in \mathcal{R}_e$. Weiterhin wird für die Erdgas beziehenden Anlagen $r \in \mathcal{R}_g$ die zur Produktion benötigte Gasleistung $p_{vkl}^{g,r}$ betrachtet. Die importierte elektrische bzw. lokal produzierte thermische Leistung wird über die Betriebsvariable s_{vkl}^e bzw. s_{vkl}^h beschrieben. Im Fall einer großen KWK-Anlage $r \in \{chp\}$ werden zusätzliche Binärvariablen zur Beschreibung des Teillastverhaltens benötigt. Dabei gibt $z_{vkl}^{op,r}$ an, ob die KWK-Anlage am Typtag $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$ in Betrieb ist und w_{vklj}^r wählt den entsprechenden Wirkungsgrad aus der Menge \mathcal{J}_v^r aus.

Weiterhin sind in Tabelle 9 die Variablen zusammengefasst, welche den Ausbau oder den Betrieb auf einem Bogen $a \in \mathcal{A}$ betreffen. Die binäre Entscheidungsvariable x_a^{net} gibt an, ob eine Wärmenetzleitung auf diesem Bogen installiert wird, während f_{akl}^e bzw. f_{akl}^h die elektrischen bzw. thermischen Leistungsflüsse auf dem Bogen beschreiben.

3 Nebenbedingungen

Bei der mathematischen Modellierung des oben beschriebenen Problems werden zunächst die Nebenbedingungen bezüglich der Ausbauentscheidungen und im Anschluss der Betrieb formuliert. Im letzten Abschnitt wird die Zielfunktion des Modells beschrieben.

3.1 Ausbauentscheidungen

Für jede Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ und jede strom- bzw. wärmeproduzierende Anlage $r \in \mathcal{R}_e$ bzw. $r \in \mathcal{R}_h$ wird die tatsächlich installierte Leistung nach unten und oben beschränkt:

$$b_v^{e,r} z_v^{in,r} \leq y_v^{e,r} \leq B_v^{e,r} z_v^{in,r}, \quad (1)$$

$$b_v^{h,r} z_v^{in,r} \leq y_v^{h,r} \leq B_v^{h,r} z_v^{in,r}. \quad (2)$$

Das bedeutet, dass für $z_v^{in,r} = 1$ die installierte elektrische Leistung $y_v^{e,r}$ zwischen $b_v^{e,r}$ und $B_v^{e,r}$ liegt, während für $z_v^{in,r} = 0$ auch $y_v^{e,r}$ auf 0 gezwungen wird. Gleiches gilt für die thermische Leistung $y_v^{h,r}$.

Die folgende Ungleichung garantiert, dass die solaraktive Fläche einer Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ zwischen Photovoltaik- und Solarthermieanlagen aufgeteilt wird, d.h. dass keine Doppel-

nutzung auftreten kann:

$$\frac{1}{B_v^{e,pv}} y_v^{e,pv} + \frac{1}{B_v^{h,sol}} y_v^{h,sol} \leq 1. \quad (3)$$

Sowohl Mikro-KWK-Anlagen als auch große KWK-Anlagen weisen ein festes Verhältnis von Strom- und Wärmeleistung auf, welches durch die Stromkennzahl σ_v^r angegeben wird. Dieser Zusammenhang wird für alle Sektionen $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ und Anlagen $r \in \{chp, mhp\}$ durch die folgende Gleichung modelliert:

$$y_v^{e,r} = \sigma_v^r y_v^{h,r}. \quad (4)$$

Der Bau einer großen KWK-Anlage in Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ beinhaltet auch den Ausbau eines lokalen Wärmenetzes, um die produzierte thermische Leistung in der Sektion verteilen zu können. Dies wird über die folgende Ungleichung sichergestellt:

$$z_v^{chp} \leq z_v^{net}. \quad (5)$$

Das bedeutet, dass bei Installation der großen KWK-Anlage, also für $z_v^{chp} = 1$, der Ausbau eines lokalen Wärmenetzes durch $z_v^{net} = 1$ garantiert wird. Falls kein Wärmenetz gebaut wird, d.h. für $z_v^{net} = 0$, kann andererseits wegen $z_v^{chp} = 0$ auch keine große KWK-Anlage gebaut werden. Zusätzlich müssen bei Ausbau eines lokalen Wärmenetzes auch Wärmeleitungen auf allen Straßenbögen $a \in \mathcal{A}_S^v$ bzw. Hilfsbögen $a \in \mathcal{A}_{\mathcal{I}}^v$, welche die Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ umschließen bzw. angrenzen, verlegt werden:

$$z_v^{net} \leq x_a^{net}. \quad (6)$$

Hier wird angenommen, dass ein Stromnetz in jeder Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ existiert.

Insgesamt setzen sich die Investitionskosten einer Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ aus den Installationskosten der Anlagen bzw. Maßnahmen und den Kosten des Wärmenetzes zusammen:

$$c_v^{inv} = \sum_{r \in \mathcal{R}_h} c_v^r y_v^{h,r} + \sum_{r \in \mathcal{R} \setminus \mathcal{R}_h} c_v^r y_v^{e,r} + c_v^{net} z_v^{net}. \quad (7)$$

Dabei umfasst der erste Summand die Kosten, welche sich aus den installierten Wärmeleistungen berechnen, und der zweite Summand beschreibt die Kosten für die installierten Stromleistungen der Anlagen, die nur Strom erzeugen.

Zusätzlich gibt es Investitionskosten eines Bogens $a \in \mathcal{A}$, die aus den Installationskosten einer Wärmeleitung auf diesem Bogen bestehen:

$$c_a^{inv} = c_a^{net} l_a x_a^{net}. \quad (8)$$

3.2 Betrieb

Eine der wesentlichen Nebenbedingungen des Betriebs stellt die Bedarfsdeckungsgleichung in jeder Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ dar. Diese fordert, dass an jedem Typtag $k \in \mathcal{K}$ und

Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$ sowohl der Strombedarf d_{vkl}^e als auch der Wärme- und Trinkwarmwasserbedarf d_{vkl}^h und d_{vkl}^w durch importierte und produzierte Leistung bzw. über Nachbar-sektionen gedeckt werden:

$$s_{vkl}^e + \sum_{r \in \mathcal{R}_e} p_{vkl}^{e,r} + \sum_{a \in \delta_v^-} f_{akl}^e - \sum_{a \in \delta_v^+} f_{akl}^e = d_{vkl}^e + \eta_v^{geo} p_{vkl}^{h,geo}, \quad (9)$$

$$s_{vkl}^h + \sum_{r \in \mathcal{R}_h} p_{vkl}^{h,r} + \sum_{a \in \delta_v^-} f_{akl}^h - \sum_{a \in \delta_v^+} f_{akl}^h = d_{vkl}^h + d_{vkl}^w. \quad (10)$$

Dabei beschreiben δ_v^- bzw. δ_v^+ die Menge der ein- bzw. ausgehenden Flüsse zur Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ und $\eta_v^{geo} p_{vkl}^{h,geo}$ den Pumpstrombedarf, der im Falle der Geothermiemaßnahme aufgebracht werden muss.

Analog muss in jedem Straßenknoten $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{S}}$ an jedem Typtag $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$ Flusserhaltung für die Strom- und Wärmeleistungsflüsse gelten, d.h. die Summe der eingehenden Leistungsflüsse muss mit der Summe der ausgehenden Leistungsflüsse übereinstimmen:

$$\sum_{a \in \delta_v^-} f_{akl}^e - \sum_{a \in \delta_v^+} f_{akl}^e = 0, \quad (11)$$

$$\sum_{a \in \delta_v^-} f_{akl}^h - \sum_{a \in \delta_v^+} f_{akl}^h = 0. \quad (12)$$

Beim Betrieb der strom- bzw. wärmeproduzierenden Anlagen $r \in \mathcal{R}_e$ bzw. $r \in \mathcal{R}_h$ einer Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ wird die an einem Typtag $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$ produzierte elektrische bzw. thermische Leistung von der tatsächlichen installierten Leistung begrenzt:

$$p_{vkl}^{e,r} + q_{vkl}^{e,r} \leq y_v^{e,r}, \quad (13)$$

$$p_{vkl}^{h,r} \leq y_v^{h,r}. \quad (14)$$

Bei den Solarthermie und Photovoltaikanlagen $r \in \{pv, sol\}$ einer Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ wird die an einem Typtag $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$ produzierte elektrische bzw. thermische Leistung zusätzlich durch den Solarstrahlungsfaktor ν_{vkl} begrenzt:

$$p_{vkl}^{e,r} + q_{vkl}^{e,r} \leq \nu_{vkl} y_v^{e,r}, \quad (15)$$

$$p_{vkl}^{h,r} \leq \nu_{vkl} y_v^{h,r}. \quad (16)$$

Die Gasleistungen, die zur Produktion der Erdgas beziehenden Anlagen $r \in \mathcal{R}_g \setminus \{chp\}$ einer Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ an einem Typtag $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$ benötigt werden, werden mit der produzierten elektrischen bzw. thermischen Leistung über den Wirkungsgrad der Anlage gekoppelt:

$$p_{vkl}^{g,r} = \frac{1}{\eta_v^r} (p_{vkl}^{e,r} + q_{vkl}^{e,r}), \quad (17)$$

$$p_{vkl}^{g,r} = \frac{1}{\eta_v^r} p_{vkl}^{h,r}, \quad (18)$$

Das Teillastverhalten der großen KWK-Anlage $r \in \{chp\}$ einer Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ wird mit Hilfe der zusätzlichen Binärvariablen aus Tabelle 8, die den Betrieb beschreiben, abgebildet. Die folgenden Ungleichungen garantieren, dass die an einem Typtag $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$ produzierte elektrische bzw. thermische Leistung im Falle des Betriebs der KWK-Anlage $r \in \{chp\}$ über deren minimalen Teillast liegen:

$$-B_v^{e,r} (1 - z_{vkl}^{op,r}) + \tau_v^r y_v^{e,r} \leq p_{vkl}^{e,r} + q_{vkl}^{e,r} \leq B_v^{e,r} z_{vkl}^{op,r}, \quad (19)$$

$$-B_v^{e,r} (1 - z_{vkl}^{op,r}) + \tau_v^r y_v^{e,r} \leq p_{vkl}^{h,r} \leq B_v^{h,r} z_{vkl}^{op,r}. \quad (20)$$

Das bedeutet, dass im Betriebsfall, also für $z_{vkl}^{op,r} = 1$, die insgesamt produzierte elektrische Leistung $p_{vkl}^{e,r} + q_{vkl}^{e,r}$ zwischen der minimalen Teillast $\tau_v^r y_v^{e,r}$ und der oberen Schranke $B_v^{e,r}$ liegt. Für $z_{vkl}^{op,r} = 0$ ergibt sich $-B_v^{e,r} + \tau_v^r y_v^{e,r} \leq p_{vkl}^{e,r} + q_{vkl}^{e,r} \leq 0$, d.h. es gibt keine elektrische Produktion. Analog ergibt sich die gleiche Situation für die produzierte thermische Leistung $p_{vkl}^{h,r}$.

Die Gasleistungen, die zur Produktion der großen KWK-Anlage $r \in \{chp\}$ einer Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ benötigt werden, müssen noch mit der produzierten elektrischen Leistung und dem zugehörigen Teillastwirkungsgrad in Verbindung gebracht werden. Dazu werden die zusätzlichen Binärvariablen aus Tabelle 8, die einen Teillastwirkungsgrad auswählen, verwendet. Dabei darf an einem Typtag $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$ höchstens ein Teillastwirkungsgrad \mathcal{J}_v^r ausgewählt werden:

$$\sum_{j \in \mathcal{J}_v^r} w_{vklj}^r \leq 1. \quad (21)$$

Die zur Produktion der großen KWK-Anlage $r \in \{chp\}$ einer Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ benötigte Gasleistung und die an einem Typtag $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$ produzierte elektrische Leistung werden über die Summe der Binärvariablen und den minimalen Teillastwirkungsgrad $\eta_v^{min,r}$ nach oben beschränkt:

$$p_{vkl}^{e,r} + q_{vkl}^{g,r} \leq B_v^{e,r} \sum_{j \in \mathcal{J}_v^r} w_{vklj}^r, \quad (22)$$

$$p_{vkl}^{g,r} \leq \frac{B_v^{e,r}}{\eta_v^{min,r}} \sum_{j \in \mathcal{J}_v^r} w_{vklj}^r. \quad (23)$$

Dadurch werden $p_{vkl}^{e,r} + q_{vkl}^{g,r}$ und $p_{vkl}^{g,r}$ auf 0 gezwungen, falls alle w_{vklj}^r 0 sind.

Die an einem Typtag $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$ produzierte elektrische Leistung der großen KWK-Anlage $r \in \{chp\}$ einer Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ muss zwischen den jeweiligen Teillasten $\tau_{vj}^r \in [\tau_v^r, 1]$ für $j \in \mathcal{J}_v^r$ liegen:

$$-B_v^{e,r} (1 - w_{vklj}^r) + \tau_{vkl(j-1)}^r y_v^{e,r} \leq p_{vkl}^{e,r} + q_{vkl}^{e,r} \leq \tau_{vklj}^r y_v^{e,r} + B_v^{e,r} (1 - w_{vklj}^r). \quad (24)$$

Dabei lassen sich die Teillasten τ_{vj}^r für $j \in \mathcal{J}_v^r$ über die minimale Teilast τ_v^r und die Anzahl $|\mathcal{J}_v^r|$ berechnen, wobei $\tau_{v0}^r = \tau_v^r$ und $\tau_{v|\mathcal{J}_v^r}^r = 1$ ist. Falls ein $w_{vklj}^r = 1$ ausgewählt wird, liegt $p_{vkl}^{e,r} + q_{vkl}^{e,r}$ wie verlangt zwischen $\tau_{vkl(j-1)}^r y_v^{e,r}$ und $\tau_{vklj}^r y_v^{e,r}$, andernfalls zwischen hinreichend großen Schranken.

Schließlich muss noch die zur Produktion der großen KWK-Anlage $r \in \{chp\}$ einer Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ benötigte Gasleistung mit der an einem Typtag $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$ produzierten elektrischen Leistung und dem zugehörigen Teillastwirkungsgrad $j \in \mathcal{J}_v^r$ gekoppelt werden:

$$-\frac{B_v^{e,r}}{\eta_v^{min,r}} (1 - w_{vklj}^r) + \frac{1}{\eta_{v,j}^r} (p_{vkl}^{e,r} + q_{vkl}^{e,r}) \leq p_{vkl}^{g,r} \leq \frac{1}{\eta_{v,j}^r} (p_{vkl}^{e,r} + q_{vkl}^{e,r}) + \frac{B_v^{e,r}}{\eta_v^{min,r}} (1 - w_{vklj}^r). \quad (25)$$

Falls ein $w_{vklj}^r = 1$ ausgewählt wird, ist $p_{vkl}^{g,r} = \frac{1}{\eta_{v,j}^r} (p_{vkl}^{e,r} + q_{vkl}^{e,r})$ wie verlangt, andernfalls liegt es zwischen hinreichend großen Schranken.

Analog zu der zu installierenden elektrischen und thermischen KWK-Leistung, stehen die produzierte elektrische und thermische Leistung der Mikro-KWK- und KWK-Anlagen $r \in \{mhp, chp\}$ einer Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ an einem Typtag $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$ über die Stromkennzahl σ_v^r in einem festen Verhältnis zueinander:

$$p_{vkl}^{e,r} = \sigma_v^r p_{vkl}^{h,r}. \quad (26)$$

Ein thermischer Leistungsfluss auf einem Bogen $a \in \mathcal{A}$ für einen Typtag $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$ kann erst stattfinden, falls eine Wärmeleitung auf diesem Bogen installiert ist. Dies wird durch die folgenden Ungleichungen garantiert:

$$-M_a^h x_a^{net} \leq f_{akl}^h \leq M_a^h x_a^{net}, \quad (27)$$

mit hinreichend großen, positiven Zahlen M_a^h . Hier wird angenommen, dass die elektrischen Leistungsflüsse praktisch unbeschränkt sind.

Die jährlichen Betriebskosten einer Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ bestehen aus den Kosten für die elektrische und thermische Energie, die an jedem Typtag $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$ extern importiert bzw. durch die installierten Anlagen lokal produziert wird:

$$c_v^{op} = \sum_{k \in \mathcal{K}} \frac{24 \cdot 365 \omega_k}{|\mathcal{L}|} \sum_{l \in \mathcal{L}} \left(c_{vkl}^e s_{vkl}^e + \frac{c_{vkl}^g}{\eta_B} s_{vkl}^h + \sum_{r \in \mathcal{R}_g} c_{vkl}^g p_{vkl}^{g,r} - \sum_{r \in \mathcal{R}_e} c_{vkl}^{ex,r} q_{vkl}^{e,r} \right). \quad (28)$$

Dabei summieren sich alle Typtage $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheiten $l \in \mathcal{L}$ über den Faktor $\frac{24 \cdot 365 \omega_k}{|\mathcal{L}|}$ zu einem Jahr und $\frac{1}{\eta_B} s_{vkl}^h$ ist die Gasleistung, die zur lokalen Wärmeproduktion über Bestandheizkessel mit Wirkungsgrad η_B benötigt wird. In die Betriebskosten gehen lediglich die Kosten für die Gasleistungen $p_{vkl}^{g,r}$ ein, die zur Produktion durch die Erdgas beziehenden Anlagen $r \in \mathcal{R}_g$ benötigt werden. Die Rückvergütung für die exportierte Strommenge $q_{vkl}^{e,r}$ der stromproduzierenden Anlagen $r \in \mathcal{R}_e$ wird als Gewinn mit negativem Faktor in die Zielfunktion aufgenommen.

3.3 Zielfunktion

Die zu minimierende Zielfunktion umfasst die durchschnittlichen jährlichen Investitions- und Betriebskosten für alle Sektionen $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ und alle Bögen $a \in \mathcal{A}$:

$$\min \sum_{v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}} (\alpha c_v^{inv} + \nu c_v^{op}) + \sum_{a \in \mathcal{A}} \alpha c_a^{inv}. \quad (29)$$

Über den Annuitätenfaktor α werden die Investitionskosten in gleiche Jahreswerte (Annuitäten) umgewandelt, welche die Verzinsung des eingesetzten Kapitals über die Nutzungsdauer gewährleisten. Dabei wird der Annuitätenfaktor α als

$$\alpha = \frac{(1+i)^T i}{(1+i)^T - 1} \quad (30)$$

mit Kalkulationszinssatz i und Zeithorizont T berechnet. Für die jährlichen Betriebskosten wird zusätzlich eine jährliche Teuerungsrate e bei der Abzinsung (Diskontierung) berücksichtigt, die in den Diskontierungssummenfaktor δ eingeht:

$$\delta = (1+e) \frac{(1+i)^T - (1+e)^T}{1+i)^T (i-e)}. \quad (31)$$

Daraus lässt sich der Mittelwertfaktor μ berechnen, der die durchschnittlichen jährlichen Betriebskosten bestimmt:

$$\mu = \alpha \delta. \quad (32)$$

Die hier betrachtete Zielfunktion hat als Ziel die Wirtschaftlichkeit des Systems, welche das Kriterium darstellt, nach dem die Optimierung des Problems erfolgt. Weitere mögliche Ziele sind die Minimierung der CO₂-Emissionen oder die Maximierung der Energieautarkie des Systems, die über Gewichtungsfaktoren mit den Kosten gekoppelt werden können.

Insgesamt lässt sich das oben beschriebene gemischt-ganzzahlige lineare Problem für die Planung von Energieversorgungskonzepten auf Quartiersebene wie folgt zusammenfassen:

$$\begin{aligned} \min \quad & (29) \\ \text{s.t.} \quad & (1) - (8) \\ & (9) - (28) \end{aligned}$$

4 Daten

Bei den Inputdaten für das mathematische Modell wird zwischen typologieabhängigen und maßnahmeabhängigen Daten unterschieden. Diese sind zusätzlich von sektionsspezifischen Parametern abhängig, die für jede betrachtete Probleminstanz variieren. Zusätzlich werden noch übergeordnete Betriebsdaten betrachtet.

4.1 Typologieabhängige Daten

Tabellen 10 und 11 beschreiben die typologieabhängigen Daten des Modells, z.B. die GFZ und die Bedarfe. Im Folgenden wird die Berechnung einiger Werte, die von mehreren Faktoren abhängen, genauer erklärt.

Tabelle 10: Bedarfe für Typologie EST4 (Zeilenbebauung niedriger Dichte)

Name	Abhängig	Minimum	Maximum	Default
GFZ	-	0,5 [1]	0,9 [1]	0,7 [1]
Wärmebedarf	GFZ	538,4 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$	969,2 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$	753,8 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$
Warmwasserbedarf	-	41,1 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$	74,0 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$	57,6 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$
Strombedarf	-	146,8 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$	264,2 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$	205,5 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$
Wärmebedarfsred.	GFZ	250,2 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$	450,4 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$	350,3 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$

Tabelle 11: Bedarfe für Typologie EST6 (Blockrandbebauung)

Name	Abhängig	Minimum	Maximum	Default
GFZ	-	2,0 [1]	4,0 [1]	3,0 [1]
Wärmebedarf	GFZ	2808,5 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$	5617,0 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$	4212,8 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$
Warmwasserbedarf	-	632,6 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$	1265,3 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$	949,0 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$
Strombedarf	-	177,2 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$	354,4 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$	265,8 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$
Wärmebedarfsred.	GFZ	1633,9 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$	3267,7 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$	2450,8 $[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}]$

Tabelle 12: Aktive Flächenanteile der Typologien pro regenerative Maßnahme

Maßnahme	EST4	EST6
Photovoltaik	5 %	2 %
Solarthermie	5 %	2 %
Geothermie	20 %	10 %

GFZ: Für die GFZ besteht die Möglichkeit, den Wert manuell innerhalb der gegebenen Intervallgrenzen vorzugeben. Ist dies nicht der Fall, wird der Defaultwert als Mittelwert angesetzt, d.h. $GFZ = \frac{\min_{GFZ} + \max_{GFZ}}{2}$.

Wärmebedarf: Der Wärmebedarf wird nun in linearer Abhängigkeit von der gegebenen GFZ bestimmt. Dazu wird zunächst der Faktor

$$\text{fact}_{GFZ} = \frac{GFZ - \min_{GFZ}}{\max_{GFZ} - \min_{GFZ}}$$

berechnet und anhand dessen der Wärmebedarf in den gegebenen Intervallgrenzen bestimmt:

$$\text{Wärme} = \min_{\text{Wärme}} + \text{fact}_{GFZ} (\max_{\text{Wärme}} - \min_{\text{Wärme}}).$$

Wärmebedarfsreduktion: Die Wärmebedarfsreduktion wird analog zu oben in linearer Abhängigkeit von der gegebenen GFZ berechnet. Sie geht in die Bedarfsdeckung ein, wenn die Sanierung als Maßnahme für die jeweilige Sektion gewählt wird.

Tabelle 13: Maßnahmeabhängige Daten

Maßnahme	Wirkungs- grad	Strom- zahl	Investitions- kosten	Minimale Installation	Maximale Installation
Photovoltaik	0,13 [el]	-	134769230,8 $\left[\frac{\text{€}}{\text{MW}}\right]$	0,0 $\left[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}\right]$	1300,0 $\left[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}\right]$
Solarthermie	0,74 [th]	-	13613513,5 $\left[\frac{\text{€}}{\text{MW}}\right]$	0,0 $\left[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}\right]$	7400,0 $\left[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}\right]$
Geothermie	0,28	-	27500000,0 $\left[\frac{\text{€}}{\text{MW}}\right]$	0,0 $\left[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}\right]$	876,0 $\left[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}\right]$
KWK	0,3 [el]	0,6	250000,0 $\left[\frac{\text{€}}{\text{MW}}\right]$	8760,0 $\left[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}\right]$	17520,0 $\left[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}\right]$
Mikro-KWK	0,2 [el]	0,33	3100000,0 $\left[\frac{\text{€}}{\text{MW}}\right]$	0,0 $\left[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}\right]$	1314,0 $\left[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}\right]$
Heizkessel	0,85 [th]	-	200000,0 $\left[\frac{\text{€}}{\text{MW}}\right]$	0,0 $\left[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}\right]$	1752,0 $\left[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}\right]$
Wärmenetz	-	-	10000000,0 $\left[\frac{\text{€}}{\text{ha}}\right]$	-	-

Tabelle 12 beschreibt den prozentualen Flächenteil der Stadtraumtypen, die für die jeweiligen regenerativen Anlagen $r \in \{pv, sol, geo\}$ tatsächlich genutzt werden können. Dieser ist für die übrigen Maßnahmen $r \in \{san, mhp, chp, boil\}$ nicht definiert.

4.2 Maßnahmeabhängige Daten

Die maßnahmeabhängigen Daten sind in Tabelle 13 beschrieben und umfassen die Wirkungsgrade, Installationskosten und untere bzw. obere Schranken an die zu installierende Leistung der Anlagen. Die Berechnung der Werte, die von mehreren Faktoren abhängen, wird im Folgenden genauer erläutert.

Photovoltaik und Solarthermie: Wir gehen von einer Globalstrahlung von $1 \left[\frac{\text{MWh}}{\text{m}^2 \text{ a}}\right] = 10000 \left[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}\right]$ aus. Daraus lässt sich die maximale zu installierende Leistung der Photovoltaik- bzw. Solarthermieranlagen innerhalb einer Sektion nach folgender Formel berechnen:

$$\text{maximale Leistung} = \text{Wirkungsgrad} * \text{Globalstrahlung}.$$

Die Installationskosten der Photovoltaik- bzw. Solarthermieranlagen werden auf $2000 \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2}\right] = 20000000 \left[\frac{\text{€}}{\text{ha}}\right]$ bzw. $1150 \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2}\right] = 11500000 \left[\frac{\text{€}}{\text{ha}}\right]$ angesetzt. Mit Hilfe der oben angegebenen maximal zu installierenden Leistung lassen sich daraus die Investitionskosten der Photovoltaik- bzw. Solarthermieranlagen innerhalb einer Sektion berechnen:

$$\text{Investitionskosten} = \frac{\text{Installationskosten}}{\text{maximale Leistung}}.$$

Die zugehörigen Werte werden noch mit der Fläche der Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ sowie dem solaraktiven Anteil des jeweiligen Stadtraumtyps aus Tabelle 12 multipliziert, um die unteren und oberen Schranken $b_v^{c,r}$ und $B_v^{c,r}$ an die zu installierende Leistung sowie die Investitionskosten c_v^r der Anlage $r \in \{pv, sol\}$ mit $c \in \{e, h\}$ aus Tabelle 3 zu berechnen.

Tabelle 14: Spezielle maßnahmeabhängige Daten

Maßnahme	Einspeisetarif	Teillastwirk.grad	Min. Teillast
Photovoltaik	280,0 $\left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}}\right]$	-	-
Mikro-KWK	100,0 $\left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}}\right]$	-	-
KWK	100,0 $\left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}}\right]$	0,22	60 %

Geothermie (Erdkollektor): Die mögliche spezifische Entzugsleistung für Erdkollektoren wird auf $10 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right] = 876 \left[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}\right]$ angesetzt. Die Installationskosten der Geothermieanlagen betragen $275 \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2}\right] = 2750000 \left[\frac{\text{€}}{\text{ha}}\right]$. Mit Hilfe der oben angegebenen maximal zu installierenden Leistung lassen sich daraus die Investitionskosten Geothermieanlagen innerhalb einer Sektion berechnen:

$$\text{Investitionskosten} = \frac{\text{Installationskosten}}{\text{maximale Leistung}}.$$

Analog zu oben werden die zugehörigen Werte noch mit der Fläche der Sektion sowie dem geothermieaktiven Anteil aus Tabelle 12 multipliziert. Der angegebene Wirkungsgrad bezieht sich auf die gekoppelte Wärmepumpe und geht zusammen mit der produzierten Leistung als Pumpstrombedarf in die Bedarfsdeckungsgleichung ein.

KWK: Es wird angenommen, dass die minimale bzw. maximale zu installierende Leistung einer großen KWK-Anlage innerhalb einer Sektion $1 \left[\frac{\text{MW}}{\text{ha}}\right] = 8760 \left[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}\right]$ bzw. $2 \left[\frac{\text{MW}}{\text{ha}}\right] = 17520 \left[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}\right]$ beträgt. Um die unteren und oberen Schranken $b_v^{e, chp}$ und $B_v^{e, chp}$ an die zu installierende Leistung sowie die Investitionskosten c_v^{chp} der KWK-Anlage aus Tabelle 3 zu berechnen, müssen die zugehörigen Werte noch mit der Fläche der Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ multipliziert werden.

Mikro-KWK: Hier nehmen wir an, dass maximal 10 Mikro-KWK-Anlagen von je 15 [kW] innerhalb einer Sektion installiert werden können, d.h. die maximale zu installierende Leistung der Mikro-KWK-Anlagen innerhalb einer Sektion ergibt $10 * 0.015 \left[\frac{\text{MW}}{\text{ha}}\right] = 1314 \left[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}\right]$. Analog zu oben wird der zugehörige Wert noch mit der Fläche der Sektion multipliziert.

Heizkessel: Die maximale zu installierende Leistung der Heizkessel innerhalb einer Sektion wird auf $200 \left[\frac{\text{kW}}{\text{ha}}\right] = 1752 \left[\frac{\text{MWh}}{\text{ha a}}\right]$ angesetzt. Wie oben wird der zugehörige Wert noch mit der Fläche der Sektion multipliziert.

Tabelle 14 fasst zusätzliche maßnahmeabhängige Daten für die stromproduzierenden Anlagen $r \in \{pv, mhp, cph\}$ zusammen. Der über Photovoltaik- oder über KWK-Anlagen produzierte überschüssige elektrische Energie kann in das öffentliche Stromnetz eingespeist und über den Einspeisetarif aus Tabelle 14 rückvergütet werden. Zur Abbildung des Teillastverhaltens der KWK-Anlage wird der Teillastwirkungsgrad und die prozentuale minimale Teillast verwendet.

Tabelle 15: Übergeordnete Betriebsdaten

Name	Wert	
Annuitätenfaktor	0,078	[1]
Mittelwertfaktor	1,541	[1]
Kesselwirkungsgrad	0,5	[1]
Stromkosten	220,0	$\left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}}\right]$
Gaskosten	65,0	$\left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}}\right]$
Wärmerohrkosten	700,0	$\left[\frac{\text{€}}{\text{m}}\right]$

Tabelle 16: Gewichtung der Typtage

Typtag	Gewichtung
Sommer	$\frac{123}{365}$
Übergang	$\frac{102}{365}$
Winter	$\frac{140}{365}$

4.3 Übergeordnete Betriebsdaten

Die übergeordnete Betriebsdaten beziehen sich auf die Betriebsparameter aus Tabelle 4, die in die Zielfunktion eingehen. Tabelle 15 umfasst den Annuitäten- und den Mittelwertfaktor, den Wirkungsgrad der Heizkessel im Bestand, die zur lokalen Wärmeproduktion dienen, sowie die Kosten für die importierte Strom- und Gasmenge sowie die Kosten für ein Wärmerohr. Da diese keine zu installierende Maßnahme darstellen, geht nur der Wirkungsgrad zur Berechnung der Gasleistung in die Zielfunktion ein. Der Annuitäten- und der Mittelwertfaktor werden nach (30) und (32) für einen Kalkulationszinssatz i von 6 %, einer Teuerungsrate e von 4 % und einem Zeithorizont T von 25 Jahren berechnet. Zusätzlich werden in Tabelle 16 die Gewichte der betrachteten Typtage angegeben.

Abbildung 1 zeigt die prozentualen Tageslastprofile für Wohngebäude an einem Übergangstag nach VDI 2067 für Heizwärme und nach VDEW für Strom und Trinkwarmwasser. Hier werden einheitliche monatliche Strom- und Trinkwarmwasserbedarfe angenommen, während sich die monatlichen Heizwärmebedarfe nach Genske, IBA Hamburg, wie in Abbildung 2 angedeutet unterscheiden.

Abbildung 3 zeigt den prozentualen Tagesverlauf der Globalstrahlung an einem Übergangstag nach ISFH, während Abbildung 4 den prozentualen Jahresverlauf der Globalstrahlung nach DIN 4108-6 anzeigt.

Um die Bedarfe d_{vkl}^c für die Energieform $c \in \mathcal{E}$, einen Typtag $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$ aus Tabelle 4 zu berechnen, muss zunächst der Defaultwert aus den Tabellen 10 und 11 mit der Fläche der Sektion $v \in \mathcal{V}_{\mathcal{I}}$ des jeweiligen Stadtraumtyps multipliziert werden.

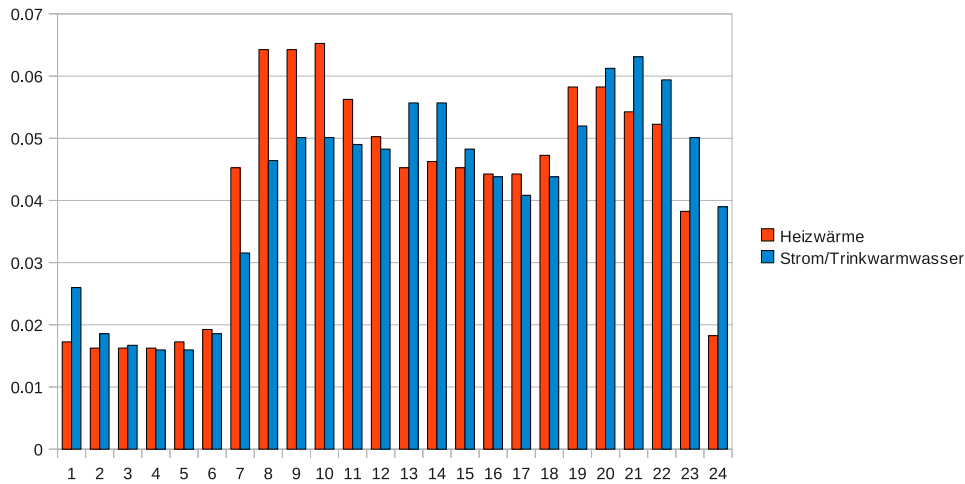


Abbildung 1: Tageslastprofile für Heizwärme, Trinkwarmwasser und Strom

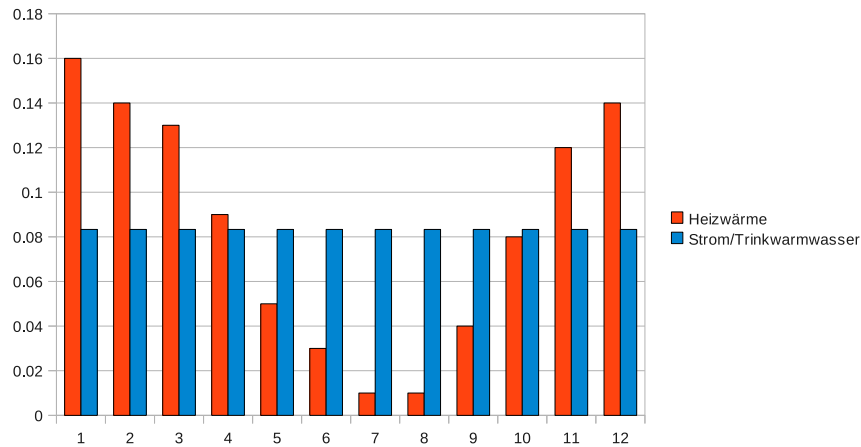


Abbildung 2: Jahreslastprofile für Heizwärme, Trinkwarmwasser und Strom

Mit Hilfe der Faktoren aus Abbildung 2 und der Gewichtung aus Tabelle 16 werden diese Bedarfe auf Typtageswerte umgewandelt. Die Typtageswerte werden dann mittels der Faktoren aus Abbildung 1 pro jeweilige Zeiteinheit, z.B. stündlich, berechnet. Analog wird mit der Globalstrahlung verfahren, aus der dann die Solarstrahlungsfaktoren ν_{vkl} für einen Typtag $k \in \mathcal{K}$ und Zeiteinheit $l \in \mathcal{L}$ aus Tabelle 4 berechnet werden.

4.4 Beispielhafte instanzabhängige Daten

In diesem Abschnitt werden die Inputdaten beschrieben, welche für jede betrachtete Probleminstanz variieren. Sie werden beispielhaft anhand einer kleinen Testinstanz für einen Stadtausschnitt aus Darmstadt erläutert, der in Abbildung 5 zu sehen ist. Tabel-

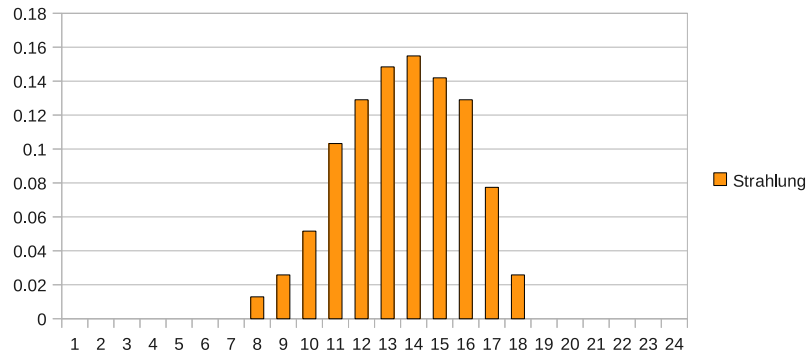


Abbildung 3: Tagesprofil der Globalstrahlung

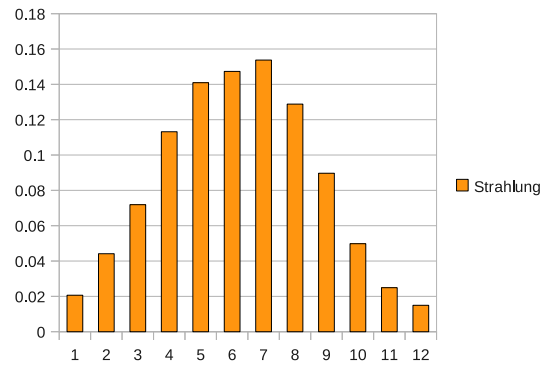


Abbildung 4: Jahresprofil der Globalstrahlung

le 17 fasst die sektionsabhängigen Parameter zusammen. Dazu gehören die Fläche der Sektion, der EST-Typ, die Baualtersklasse, die GRZ, und die Anzahl der Vollgeschosse. Tabelle 18 beschreibt die richtungsabhängigen Sektionsbögen und deren Länge, welche als Abstand zwischen den Schwerpunkten zweier Sektionen berechnet wird. Dabei ergeben, wie im Modell beschrieben, die Sektionsknoten n_1, \dots, n_4 und -bögen a_1, \dots, a_6 zusammen einen vollständigen Graphen.

Tabelle 17: Beispielhafte Sektionsknoten

Sektion	Fläche	EST	Baualter	GRZ	Vollgeschosse
n_1	0,6197 [ha]	EST4	A	0,175	4,0
n_2	0,8152 [ha]	EST4	A	0,175	4,0
n_3	0,1123 [ha]	EST6	B	0,6	4,0
n_4	0,5974 [ha]	EST6	B	0,6	4,0

Tabelle 18: Beispielhafte Sektionskanten

Bogen	Länge
$a_1 = (n_1, n_2)$	110,0 [m]
$a_2 = (n_1, n_3)$	95,0 [m]
$a_3 = (n_1, n_4)$	130,0 [m]
$a_4 = (n_2, n_3)$	135,0 [m]
$a_5 = (n_2, n_4)$	70,0 [m]
$a_6 = (n_3, n_4)$	180,0 [m]



Abbildung 5: Beispiel eines Stadtausschnitts in Darmstadt