



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterthesis

Matthias Scholz

Potenzialanalyse - Ermittlung des Wärmespeicherpotenzials innerstädtischer Bunkeranlagen zum Aufbau eines Wärmespeicher-Netzwerkes als Baustein für das Forschungsprojekt „Smart Power Hamburg“

Matthias Scholz

Potenzialanalyse

**Ermittlung des Wärmespeicherpotenzials
innerstädtischer Bunkieranlagen
zum Aufbau eines Wärmespeicher-Netzwerkes
als Baustein für das Forschungsprojekt
„Smart Power Hamburg“**

Masterthesis eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Masterstudiengang Nachhaltige Energiesysteme im Maschinenbau
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer : Prof. Dr. Thomas Veeseer
Zweitprüfer : Dipl.-Ing. (FH) Hans Schäfers

Abgegeben am 07. Mai 2014

Zusammenfassung

Matthias Scholz

Thema der Masterthesis

Potenzialanalyse – Ermittlung des Wärmespeicherpotenzials innerstädtischer Bunkeranlagen zum Aufbau eines Wärmespeicher-Netzwerkes als Baustein für das Forschungsprojekt „Smart Power Hamburg“

Stichworte

Bunkeranlagen, Energiebunker, Wärmespeicher, Blockheizkraftwerk, Solarkollektoren, Heißwassererzeuger Virtuelles Kraftwerk, Smart Grid, Wärmenetz

Kurzzusammenfassung

Das Ziel war es, ehemalige Zivilschutzgebäude in Hamburg zu identifizieren, deren Potenzial für eine Konversion zu einem Energiebunker als besonders hoch einzuschätzen ist. Die gewählte Standardkonfiguration eines solchen Energiebunkers besteht aus einem Wärmespeicher, einer thermischen Solaranlage sowie einem oder mehreren Blockheizkraftwerken und einem Heißwassererzeuger. Die ausgewählten Objekte bilden ein Energiebunker-Netzwerk in Form eines virtuellen Kraftwerks, das zukünftig eine dezentrale, effiziente und insbesondere flexible Strom- und Wärmeerzeugung nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung ermöglichen soll. In der Stadt Hamburg existieren derzeit 10 Bunkeranlagen mit einem Speichervolumen von insgesamt 22.500 m³ und einer Speicherkapazität von 1.236 MWh, die als Energiebunker besonders gut geeignet sind. Am Beispiel eines Standardbunkers wurde ein Simulationsmodell erstellt, dessen Blockheizkraftwerk mit einer thermischen Nennleistung von 2,5 MW die besten Voraussetzungen für eine effiziente Wärmeversorgung und einer konkurrenzfähigen Einspeisung von elektrischer Energie bietet.

Matthias Scholz

Title of the paper

Potential analysis – Determination of the heat storage potential of inner city bunker buildings for a heat storage network as a component of the research project “Smart Power Hamburg”

Keywords

Bunker buildings, energy bunker, heat storage, combined heat and power plant, solar collectors, hot water boiler, virtual power plant, smart grid, heat grid

Abstract

The aim was to identify former civil defence buildings with great potential for conversions to so called “energy bunker”. The standard configuration consists of a heat storage, a solar thermal system, a combined heat and power plants as well as a hot water boiler. The selected buildings form a bunker network as virtual power plant for decentralised, efficient and flexible energy supply. There are currently 10 bunkers in Hamburg with a storage volume of 22,500 m³ and a capacity of 1,236 MWh, whose potential can be assessed as high for a conversion. Using the example of a standard bunker, a simulation model has been created. The combined heat and power plant with a nominal thermal capacity of 2.5 MW offers the best conditions for an efficient heat and power supply.



Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	II
Symbole, Einheiten und Indices	IV
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XI
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Ziele und Grenzen	2
1.3. Methodik und Randbedingungen	3
2. Grundlagen	5
2.1. Smart Grid und die Bedeutung von Wärmespeichern	5
2.2. Systemkomponenten des Energiebunkers	7
2.2.1. Wärmespeicher	7
2.2.2. Kraft-Wärme-Kopplung und Blockheizkraftwerke	11
2.2.3. Solarkollektoren	13
2.2.4. Heißwassererzeuger	19
2.3. Netzinfrastruktur in Hamburg	21
2.3.1. Wärmenetz	21
2.3.2. Stromnetz	23
2.3.3. Erdgasnetz	26
3. Auswahl und Konversion der Bunkeranlagen	28
3.1. Vorbemerkungen und Einschränkungen	28
3.2. Datenbeschaffung, Datenbereinigung und Vorauswahl	33
3.2.1. Zivilschutzdaten der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt	33
3.2.2. Erstellung einer Datenbank für potenzielle Bunkeranlagen	35
3.2.3. Bewertung und Vorauswahl der Zivilschutzbauten	37
3.3. Auswahl und Beschreibung geeigneter Konversions-Bunker	40
3.3.1. Verifizierung des Nutzungsstatus der Bunkeranlagen und Beschaffung von standort- und gebäudetechnischen Daten	40



3.3.2. Bewertung der Erdgas- und Stromnetzinfrastruktur für die Bunkerauswahl	42
3.3.3. Speicherkapazität des Energiebunker-Netzwerkes	45
4. Dynamische Analyse / Modellierung eines Energiebunkers	51
4.1. Systembeschreibung und Eingangsparameter	51
4.1.1. Systembeschreibung und Eingangsparameter	51
4.1.2. Auslegungskriterien und Eingangsdaten des Simulationsmodells	54
4.2. Parametrierung des Bunkermodells	58
4.2.1. Auslegungsrechnung und variable Parametrierung durch Initialisierungsskripte	58
4.3. Zeitgesteuerte Simulation des Bunkermodells	77
4.3.1. Modellierung des Solarkollektors	78
4.3.2. Modellierung des Wärmespeichers	80
4.3.3. Modellierung des Blockheizkraftwerkes	83
4.3.4. Modellierung des Heißwassererzeugers	84
5. Visualisierung und Auswertung des Simulationsmodells	85
5.1. Speichersystem	86
5.2. Kollektorsystem	91
5.3. Blockheizkraftwerk und Heißwassererzeuger	93
5.4. Elektrische Pumpenleistung	99
6. Fazit und Ausblick	102
Literaturverzeichnis	104
A. Anhang	i
A.0.1. Wärmenetzkarte mit konversionsfähigen Bunkeranlagen . . .	i
A.0.2. Wärmenetzkarte mit Standorten der Bunkeranlagen mit hohem und eingeschränktem Potenzial	ii
A.0.3. Nicht verwendete Diagramme	iii



Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BBK	Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImA	Bundesanstalt für Immobilienaufgaben
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BSU	Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg
C4DSI	Center for Demand Side Integration
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
DSM	Demand Side Management/Lastmanagement
E.ON	E.ON Hanse AG
EE	Erneuerbare Energien
EEX	European Energy Exchange AG
EnEV	Energieeinsparverordnung
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
FHH	Freie und Hansestadt Hamburg
FW	Fernwärme (Übertragungsebene)
GuD	Gas- und Dampfkraftwerke
GW	Glykolwassergemisch
HAW Hamburg	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
HE	Hamburg Energie
HHN	Hamburg Netz GmbH
HS	Hochspannungsebene



HWB	Hottel, Whillier und Bliss
HWE	Heißwassererzeuger
IBA	Internationale Bauausstellung
IMIV	Interessengemeinschaft für historische Militär-, Industrie- und Verkehrsbauten
K	Kollektor
KS	Kollektorspeicher
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LIG	Landesbetrieb Immobilienmanagement und Grundvermögen Hamburg
MS	Mittelspannungsebene
MZA	Mehrzweckanlagen
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NS	Niederspannungsebene
NW	Nahwärme (Verteilebene)
PV	Photovoltaik
RL	Rücklauf
SK	Solarkollektoren
SNHH	Stromnetz Hamburg GmbH
SPH	Smart Power Hamburg
UCTE	Union for the Coordination of Transmission of Electricity
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
VWHH	Vattenfall Wärme Hamburg GmbH
VL	Vorlauf
VRK	Vakuumröhrenkollektoren
WS	Wärmespeicher
WT	Wärmetauscher



Symbole, Einheiten und Indices

A	Fläche [m^2]
α	Absorptionskoeffizient [-]
α_s	Sonnenstandswinkel [$^\circ$]
B	Breite [m]
c_p	Spezifische Wärmekapazität [kJ/kgK]
D	Außendurchmesser [m]
d	Innendurchmesser [m]
Δ	Differenz [-]
η	Wirkungsgrad [%]
η_0	Konversionsfaktor [-]
F	Kühlkörperwirkungsgrad [-]
F_P	Pumpenfaktor [-]
F_R	Wärmeabfuhrfaktor [-]
F'	Absorberwirkungsgradfaktor [-]
g	Fallbeschleunigung [m/s^2]
G	Globalstrahlung [W/m^2]
H	Höhe [m]
h	Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2K]
i	Schichtzahl [-]
k_0	Linearer Wärmeverlustfaktor [W/m^2K]
k_1	Quadratischer Wärmeverlustfaktor [W/m^2K^2]
l	Länge [m]
λ	Wärmeleitkoeffizient [W/mK]



Indices

m	Masse [kg]
\dot{m}	Massenstrom [kg/s]
n	Drehzahl [1/min]
n	Anzahl [-]
N	Gesamtsumme der Schichten [-]
P	Leistung [W]
Q	Förderstrom [m^3/h]
Q	Speicherkapazität [Wh]
\dot{Q}	Wärmeleistung [W]
R	Radius [m]
Re	Reynoldszahl [-]
ρ	Dichte [kg/m ³]
ρ	Reflexionskoeffizient [-]
s	Dicke [m]
T	Temperatur [°C]
τ	Transmissionskoeffizient [-]
U	Wärmedurchgangskoeffizient [W/m^2K]
V	Volumen [m^3]
\dot{V}	Volumenstrom [m^3/h]
ζ	Widerstandsbeiwert [-]

Indices

A	Absorber
A	Anlage
a	Austritt
B	Beton
Cu	Kupfer
D	Dämmung

POTENZIALANALYSE

Ermittlung des Wärmespeicherpotenzials innerstädtischer Bunkeranlagen zum Aufbau eines Wärmespeicher-Netzwerkes als Baustein für das Forschungsprojekt "Smart Power Hamburg"

Indices

<i>e</i>	Eintritt
<i>e</i>	Erzwungen
<i>el</i>	Elektrisch
<i>geo</i>	Geodätisch
<i>GW</i>	Glykolwassergemisch
<i>K</i>	Kollektor
<i>KS</i>	Kollektorspeicher
<i>l</i>	Laminar
<i>M</i>	Mantel
<i>m</i>	Mittel
<i>M</i>	Motor
<i>max</i>	Maximum
<i>p</i>	Druckseitig
<i>P</i>	Pumpe
<i>R</i>	Rohr
<i>RL</i>	Rücklauf
<i>Sp</i>	Speicher
<i>T</i>	Tank
<i>t</i>	Turbulent
<i>th</i>	Thermisch
<i>U</i>	Umgebung
<i>v</i>	Geschwindigkeitsseitig
<i>V</i>	Verlust
<i>VL</i>	Vorlauf
<i>W</i>	Wasser
<i>W</i>	Wand
<i>Welle</i>	Welle
<i>zus</i>	Zusätzlich





Abbildungsverzeichnis

2.1. Aufbau eines Smart Grid	6
2.2. Einbindung eines Wärmespeichers mit externen Beladeeinheiten in ein Wärmenetz	11
2.3. Einteilung von Blockheizkraftwerken	12
2.4. Aufbau und Nutzleistungsbilanz durch Einstrahlung und Wärmeverluste eines Flachkollektors	14
2.5. Charakteristische Wirkungsgradkurven von Flach- und Vakuumröhrenkollektoren in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen der Absorber- und Umgebungstemperatur	15
2.6. Vakuumröhrenkollektor mit direkter Durchströmung und als Heatpipe	16
2.7. Anordnung der Kollektorreihen nach dem Tichelmann-System	18
2.8. Schnittansicht eines Flammrohr-Rauchrohrkessels	20
2.9. Darstellung eines vermaschten Wärmenetzes	21
2.10. Verläufe der Wärmelast, Außentemperatur sowie Vorlauf- und Rücklauf- temperatur für das Jahr 2012 im Hamburger Stadtgebiet nördlich der Elbe	22
2.11. Ausschnitt der Hochspannungskarte von Hamburg	24
2.12. Typischer Lastgang für Strom mit Handelsprodukten	25
2.13. Geografische Verteilung der regionalen und überregionalen Hochdruck- leitungen des Erdgasnetzes in Hamburg	27
3.1. Flakbunker am Heiligengeistfeld in Hamburg	30
3.2. Innenansicht eines Zombeck-Turmbunkers	31
3.3. Klotzbunker in der Papenstraße 137 in Hamburg	32
3.4. Standortabhängige Verteilung von Zivilschutzanlagen in Hamburg (Aus- zug aus einer Datenbank der IMIV)	35
3.5. Ausschnitt aus der Wärmenetzkarte von Hamburg mit Bunkerstand- orten und Entfernungsradien von 50 und 100 Metern	38
3.6. Kartenausschnitt für Erdgas-Hochdruckleitungen in Hamburg mit Bun- kerstandorten und Entfernungsradien von 500 und 1.000 Metern	44
3.7. Mindestabstände für Speichertanks zwischen Kolonnen, Behältern und Wänden	46



3.8. Draufsicht und Abmessungen des Bunkergebäudes und des Wärmespeichers mit Dämmung	47
3.9. Seitenansicht und Abmessungen des Bunkergebäudes und Wärmespeichers	48
4.1. Verfahrensfliessbild der Standardkonfiguration eines Energiebunkers .	52
4.2. Geordnete Wärmelastkurve des Wärmenetzes am Bunkerstandort mit Analyseszenarien durch unterschiedliche Leistungsgrößen der Blockheizkraftwerke	57
4.3. Hierarchie der Initialisierungsskripte	59
4.4. Wärmespeicher mit Schichteinteilung und externen Anschlussstutzen der Speicherkreisläufe	61
4.5. Grafische Ermittlung der mittleren Drehzahl der Pumpe	62
4.6. Wirkungsgrade von Elektromotoren nach IEC 60034-30	63
4.7. Reynoldszahl in Abhängigkeit von Förderstrom und Rohrgeometrie .	65
4.8. Aufbau und Bezeichnungen der Teilkomponenten einer Vakuumröhre eines Röhrenkollektors	67
4.9. Aufstellfläche, Ausrichtung und Anordnung der Kollektorfelder auf dem Dach des Bunkergebäudes	69
4.10. Berechnung des Mindestabstands zwischen den Kollektorreihen in Abhängigkeit der Modulhöhe, des Aufstell- und Sonnenstandswinkels .	70
4.11. Kollektorwirkungsgrad in Abhängigkeit von Einstrahlung und Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Umgebung	71
4.12. Anordnung der Komponentenblöcke des Hauptmodells	78
4.13. Externe und interne effektive Massenströme des Wärmespeichers mit N Schichten	81
4.14. BHKW-Blockschaltbild des Simulink-Modells	84
5.1. Vorlauftemperatur des Speichers für alle drei Szenarien	86
5.2. Schichttemperatur der Schichten 1, 4, 7, 10, 13, 15 für Szenario 1 . .	87
5.3. Schichttemperatur der Schichten 1, 4, 7, 10, 13, 15 für Szenario 3 . .	88
5.4. Teilausschnitt der Schichttemperatur der Schichten 1, 4, 7, 10, 13 und 15 für Szenario 3	88
5.5. Ausschnitt der Temperatur der Schichten 1, 7 und 15 mit BHKW-Eintrag (ohne Last und Kollektor) für Szenario 1 und 3	89
5.6. Wärmeverluste des Speichers für alle Szenarien und Wärmeleistung des Kollektorsystems	90
5.7. VL- und RL-Temperatur des Kollektors für Szenario 1 und 3	91
5.8. Wärmeleistung des Kollektorsystems	92
5.9. Wirkungsgrad des Kollektorsystems	92



5.10. Thermische Leistung des BHKW für alle Szenarien	94
5.11. Ausschnitt der thermische Leistung des BHKW im Teillastbereich für Szenario 3	94
5.12. Lastmassenstrom und BHKW-Massenströme der drei Szenarien . . .	95
5.13. Thermische Leistung des HWE für alle Szenarien	96
5.14. Teilausschnitt der thermische Leistung des HWE für alle Szenarien .	96
5.15. Teilausschnitt der thermische Leistung des HWE für Szenario 3 mit und ohne Anpassung der VL- und RL-Temperatur des Wärmenetzes	97
5.16. Gesamte Brennstoffleistung des BHKW und HWE für alle drei Sze- narien	98
5.17. Gesamte Brennstoffleistung des BHKW und HWE für alle Szenarien	99
5.18. Elektrische Leistung der Komponentenpumpen für Szenario 3	100
5.19. Elektrische Gesamtleistung der Pumpen für alle drei Szenarien . . .	100
A.1. Wärmenetzkarte mit konversionsfähigen Bunkeranlagen	i
A.2. Wärmenetzkarte mit Bunkerstandorten der Vorauswahl	ii
A.3. Schichttemperatur der Schichten 1, 4, 7, 10, 13 und 15 für Szenario 2	iii
A.4. Teilausschnitt der Schichttemperatur der Schichten 1, 4, 7, 10, 13 und 15 für Szenario 2	iii
A.5. Rücklauftemperatur des Speicher-, BHKW- und Kollektorkreislaufs aus der untersten Speicherschicht für alle Szenarien	iv
A.6. Vorlauftemperatur des BHKW für alle Szenarien	iv
A.7. Elektrische Leistung des BHKW für alle Szenarien	v
A.8. Elektrische Leistung des BHKW im Teillastbereich für Szenario 3 . .	v
A.9. Temperaturdifferenz zwischen Speicher-VL und Wärmenetz	vi
A.10. Massenströme des Kollektors, BHKW und Speichers für Szenario 3 .	vi
A.11. Wärmeleistung des Speichers, HWE und Wärmenetzes für Szenario 1	vii
A.12. Wärmeleistung des Speichers, HWE und Wärmenetzes für Szenario 3	vii



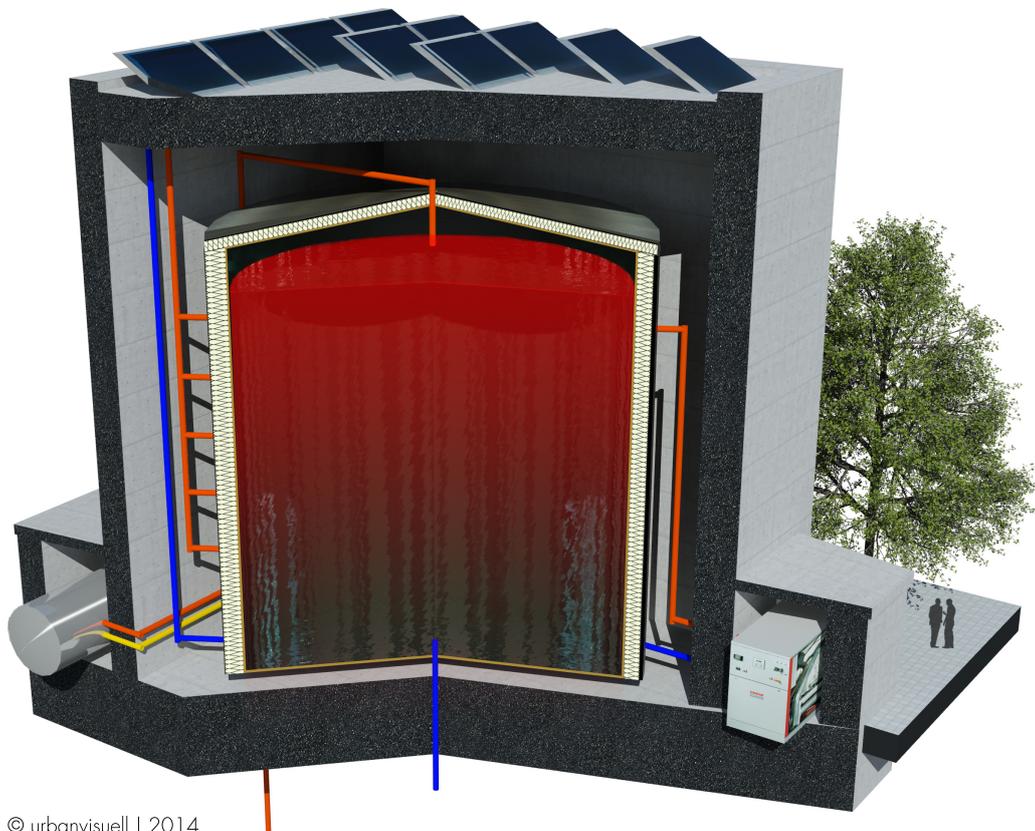
Tabellenverzeichnis

2.1. Einteilung, Übertragungsspannung und Reichweite der Spannungsebenen in Deutschland	23
3.1. Ausschnitt aus der neuerstellten Datenbank für Konversionseigenschaften von ausgewählten Hamburger Zivilschutzgebäuden	36
3.2. Verteilung der Anzahl von Objekten in Potenzialkategorien nach den Kriterien für die Gebäudebewertung	38
3.3. Einordnung der Zivilschutzgebäude in Potenzialkategorien für die Standortbewertung	40
3.4. Zusammenfassung aller konversionsfähigen Bunkeranlagen mit Informationen zu Standort, Nutzung und Abmessungen	42
3.5. Einschätzung des Potenzials der Bunkerstandorte für die Anbindung an das Mittelspannungsnetz	45
3.6. Zusammenfassung der Bewertung für die Anbindung der Bunkergebäude an die Netzinfrastruktur	45
3.7. Zusammenfassung der Speicherkapazitäten des Bunker-Netzwerks	49
4.1. Kennwerte der Lastdaten mit Wärmeleistung, Massenstrom sowie Außen-, Vorlauf- und Rücklauftemperatur	55
4.2. Experimentell ermittelte Korrekturfaktoren für die Strahlungsleistung in Abhängigkeit von Azimutausrichtung und Anstellwinkels von Solarkollektoren	56
4.3. Wesentliche Ergebnisse der Auslegungsrechnung des Wärmespeicher-Subskriptes	66
4.4. Wesentliche Ergebnisse der Auslegungsrechnung des Solarkollektor-Subskriptes	74
4.5. Wesentliche Ergebnisse der Auslegungsrechnung des Blockheizkraftwerk-Subskriptes	76

POTENZIALANALYSE

Ermittlung des Wärmespeicherpotenzials innerstädtischer Bunkeranlagen zum Aufbau eines Wärmespeicher-Netzwerkes als Baustein für das Forschungsprojekt "Smart Power Hamburg"

Tabellenverzeichnis



© urbanvisuell | 2014



1. Einleitung

1.1. Motivation

Die Bundesregierung hat im Jahr 2010 ein Energiekonzept verabschiedet, das die energiepolitische Ausrichtung für Deutschland bis 2050 beschreibt. Nach der Kernschmelze in Fukushima im März 2011 wurde das Konzept überarbeitet, um die Umsetzung der Maßnahmen zu beschleunigen. Im Fokus stehen dabei insbesondere der Ausbau der Erneuerbaren Energien (EE) und Netze sowie die Energieeffizienz von Verbrauchern. Die Hauptziele bis zum Jahr 2050 bestehen darin, den Strombedarf des Landes zu 80 % aus EE zu decken sowie die Treibhausgasemissionen um mindestens 80 % (bezogen auf 1990) und den Primärenergieverbrauch um 50 % (bezogen auf 2008) zu reduzieren [BMU14].

Für eine Umsetzung der genannten Ziele wird seit geraumer Zeit u.a. der Ausbau aus fluktuierenden Energiequellen wie Wind und Sonne gefördert. Durch den großen Zuwachs von Windenergie- und Photovoltaikanlagen resultieren jedoch auch zahlreiche Probleme [Kon09, S. 5f.]. So ist bspw. der zeitliche Leistungsverlauf dieser Anlagen zum größten Teil nicht synchron mit der Verbraucherlast, was wiederum zu Instabilitäten des Übertragungsnetzes führen kann. Klassische Großkraftwerke sind aufgrund ihrer Trägheit nicht auf kurzfristige Leistungsänderungen ausgelegt. Aus diesem Grund ist ein Energieversorgungskonzept notwendig, welches flexibel und effizient auf den Strom- und Wärmebedarf der Verbraucher reagieren kann [Kon09, S. 215f.].

Das Verbundprojekt “Smart Power Hamburg” (SPH)¹ nimmt sich dieser Problematik an. Es wird von den Projektpartnern des *Center for Demand Side Integration* (C4DSI) der HAW Hamburg, des städtischen Energieversorgers Hamburg Energie (HE) und der Rheinisch-Westfälisch Technischen Hochschule Aachen (RWTH) umgesetzt und im Rahmen des Förderprogramms “EnEff:Wärme” vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert [Ham11b]. Kernziel des Projektes ist die Entwicklung innovativer Energieeffizienzdienstleistungen in Form eines Verbundes von städtischen Liegenschaften, die über gekoppelte Wärme- und Stromerzeugung (KWK) effizienter betrieben werden und Energiedienstleistungen

¹Website: <http://www.smartpowerhamburg.de/>



1. Einleitung

für Dritte anbieten können. Dazu werden städtische Infrastrukturen als Energieerzeuger, -verbraucher und -speicher intelligent miteinander vernetzt [BMW11]. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einem sogenannten *Smart Grid*. Im Falle eines Unterangebotes aus EE kann mithilfe von dezentralen Blockheizkraftwerken (BHKW) der Strombedarf gedeckt werden. BHKW verfügen über einen großen Leistungsbereich, innerhalb dessen die benötigte Leistung in kürzester Zeit abgerufen werden kann. Zusätzlich arbeiten sie nach dem KWK-Prinzip, um neben elektrischer auch thermische Energie bereitstellen zu können. Um Erzeugung und Verbrauch der Nutzwärme zeitlich zu entkoppeln, muss sie zwischengespeichert werden [Zah13, S. 195f.].

Die vorliegende Arbeit ist Bestandteil des Teilprojekts (TP) 4 “Speicherkonzepte”. Dabei werden drei verschiedene Wärmespeichertypen untersucht, die als Pufferspeicher in die bestehende städtische Infrastruktur eingebunden werden sollen. Dazu zählen neben Schwimmbädern und Wärmenetzen auch ehemalige militärische Bunkeranlagen [Ham11c]. Im Jahr 2013 wurde bereits ein erstes Bunkerkonzept im Zuge der Internationalen Bauausstellung (IBA)² Hamburg von den Unternehmen der IBA Hamburg GmbH und Hamburg Energie GmbH umgesetzt. Der ursprüngliche Flakbunker im Hamburger Stadtteil Wilhelmsburg wird heute als Energiebunker genutzt. Kern des Bunkers bildet ein 2.000 m³ großer Wärmespeichertank, der aus Solarkollektoren (SK) auf dem Dach, einem BHKW und einer Holzhackschnitzel-Feuerungsanlage sowie der Abwärme aus einem nahegelegenen Industrierwerk gespeist wird. Das BHKW und eine PV-Anlage produzieren zusätzlich noch elektrische Energie [Ham11a]. In der Stadt Hamburg existieren noch weitere ehemalige Zivilschutzbunker, die eventuell für eine ähnliche Konzeptionierung in Frage kommen.

1.2. Ziele und Grenzen

Der Fokus der Masterthesis ist die Ermittlung weiterer Wärmespeicherpotenziale in ehemaligen Militärschutzbunkern in Hamburg. Die konkrete Fragestellung lautet:

Wie viel thermische Energie in Form von Wärme, bzw. wie viel Speichervolumen kann maximal in die Hamburger Bunkerinfrastruktur integriert werden, um ein innerstädtisches Wärmespeicher-Netzwerk aufbauen zu können?

Die Erstellung eines Simulationsmodells des Speichernetzwerks auf Basis der identifizierten Bunker ist ebenfalls Bestandteil der Arbeit. Dazu wird der Wärmespeicher innerhalb des Bunkergebäudes um Erzeugungskomponenten wie Solarkollektoren

²Website: <http://www.iba-hamburg.de/projekte/energiebunker/projekt/energiebunker/>



1. Einleitung

ren (SK), Blockheizkraftwerke (BHKW) und Spitzenlastkessel in Form eines Heißwassererzeugers (HWE) erweitert. Diese Standardkonfiguration wird nachfolgend als Energiebunker bezeichnet. Die statischen Ergebnisse aus der Bunkerkonversion werden in ein zeitgesteuertes Modell in Matlab/Simulink³ übertragen und für verschiedene Last- bzw. Leistungsprofile ausgewertet. Dies hat den Vorteil, dass das Modell für weiterführende Untersuchungen in die Gesamtsimulation des Projektes integriert werden kann. Zusätzlich können die Energieflüsse über ein Bezugsjahr im gesamten Netzwerk dargestellt werden, um eventuelle Schwachstellen eruieren zu können.

Da es sich bei der Ausarbeitung um eine technische Potenzialabschätzung im Rahmen einer Vormachbarkeitsstudie handelt, spielen wirtschaftliche Aspekte nur eine untergeordnete Rolle. Der Fokus liegt auf einer technisch machbaren Umsetzung der Energiebunker, mit dem Ziel einer effizienten und maximalen Leistungsausbeute.

1.3. Methodik und Randbedingungen

Im ersten Abschnitt der Ausarbeitung werden die Grundlagen erläutert, die zum Verständnis des Modells beitragen sollen. So werden u.a. die Funktions- und Betriebsweisen von Wärmespeichern, BHKW und weiteren Energieerzeugern beschrieben. Grundlage für den Betrieb eines Energiebunkers bildet die vorhandene Netzinfrastruktur in Hamburg, die mit dem Bunker kommuniziert. Aufgrund dessen werden die Anforderungen für eine Anbindung an das Wärme-, Strom- und Erdgasnetz betrachtet. Anschließend wird die Arbeit in folgende Arbeitspakete (AP) untergliedert:

AP 1: Identifizierung von potentiellen Zivilschutzbunkern und Ermittlung der maximalen Speicherkapazität der ausgewählten Energiebunker:

- Recherche zu existierenden Bunkeranlagen in Hamburg
- Erstellung einer Datenbank
- Festlegen von Auswahlkriterien, wie z.B.:
 - Gebäudefaktoren (Art des Bunkers, Größe, Zustand, ...)
 - Nutzungsart und Nutzungsgrad (leerstehend, Teilnutzung, ...)
 - Entfernung und Einbindung von Wärme-, Strom und Erdgasnetzen
 - Standortbedingungen (Lage, Umbauung, ...)
 - Konversionseigenschaften des Gebäudes (Anpassung, ...)

³Website: <http://www.mathworks.de/>



1. *Einleitung*

- Bedingungen für den Einsatz von Strom- und Wärmeerzeugern
- Auswahl von potentiell nutzbaren Bunkeranlagen durch selektive Dezimierung anhand der genannten Faktoren
- Beschaffung detaillierter Informationen zu den Auswahlbunkern, wie Bunkergeometrien usw.
- Berechnung der Speichervolumina und maximalen Speicherkapazitäten des Energiebunker-Netzwerkes

AP 2: Modellierung eines ausgewählten Zivilschutzgebäudes als Energiebunker auf Basis von Matlab/Simulink:

- Auswahl eines Standardbunkers aus dem Bunker-Netzwerk mit den für eine Modellierung benötigten Informationen
- Beschaffung und Anpassung von Eingangsdaten und -parametern, wie z.B. Wetterdaten und Lastprofilen
- Definition der Systemkonfiguration (Aufbau, Betriebsweise usw.) und der Simulationsszenarien
- Berechnung und Modellierung des Energiebunkers mit Matlab/Simulink nach folgenden Faktoren:
 - Einfache Parametrierung der Eingangsdaten um Übertragbarkeit zu gewährleisten
 - Erstellung von Subsystemen für die einzelnen Hauptkomponenten um Einbindung in andere Modelle zu ermöglichen
 - Vernetzung der Subsysteme zu einem Hauptsystem
- Auswertung der Simulationsszenarien



2. Grundlagen

Im Kapitel Grundlagen wird der Zusammenhang zwischen dem Begriff *Smart Grid* und einem Energiebunker-Netzwerk dargestellt sowie die Komponenten einer gewählten Standardkonfiguration grundlegend erklärt und optimale Systemparameter für die Modellierung definiert. Für die Bewertung der Konversionsfähigkeit von Bunkeranlagen ist u.a. auch die Netzinfrastruktur in Hamburg entscheidend, die in einem weiteren Kapitel beschrieben wird. Da im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes die Betriebsweise der Komponenten von Interesse ist, die zu einem Großteil von der Preisbildung des Strom-, Wärme- und Erdgasmarktes abhängig ist, werden die grundsätzlichen Preisregularien der Energienetze ebenfalls erläutert.

2.1. Smart Grid und die Bedeutung von Wärmespeichern

Das bestehende elektrische Energiesystem hat sich in der Vergangenheit als Großtechnologie mit zentraler Ausrichtung ausgebildet. Seit einigen Jahren kommen jedoch immer mehr dezentrale Erzeugungsanlagen zum Einsatz, die u.a. aufgrund der energiepolitischen Ausrichtung immer weiter in den Fokus rücken. Der ökologische und ökonomische Umgang mit Energie aus zentralen und dezentralen Erzeugern erfordert ein intelligentes Energieversorgungssystem. Die Normungsroadmap der *Deutschen Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik* (DKE) nennt folgende Definition für ein intelligentes Netz bzw. *Smart Grid* [VDE10, S. 12]:

„Der Begriff *Smart Grid* (Intelligentes Energieversorgungssystem) umfasst die Vernetzung und Steuerung von intelligenten Erzeugern, Speichern, Verbrauchern und Netzbetriebsmitteln in Energieübertragungs- und verteilungsnetzen mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnik (IKT). Ziel ist auf Basis eines transparenten, energie- und kosteneffizienten sowie sicheren und zuverlässigen Systembetrieb die nachhaltige und umweltverträgliche Sicherstellung der Energieversorgung.“

Im Wesentlichen wird also eine verbesserte Koordination der Stromerzeugung unter Einbeziehung einzelner großer und vieler kleiner Erzeuger, elektrischen und thermischen Speichern sowie ein weitaus umfangreicheres Lastmanagement angestrebt (siehe Abbildung 2.1). Das Lastmanagement oder Demand Side Management (DSM)

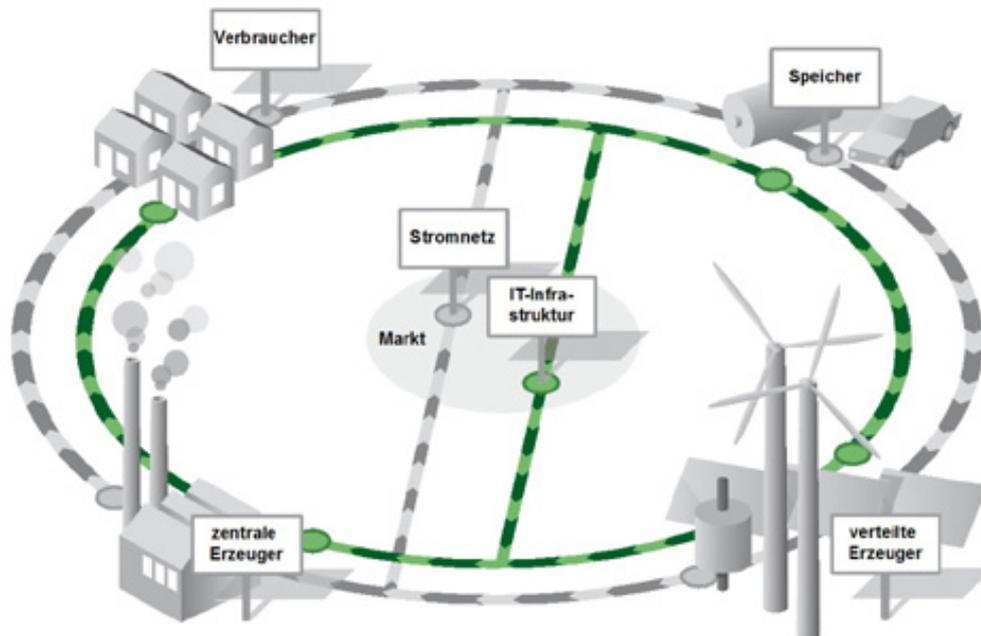


Abbildung 2.1.: Aufbau eines Smart Grid [Sma13]

steuert in diesem Zusammenhang gezielt die Nachfrage der angeschlossenen Verbraucher. Zu Zeitpunkten an denen der Strom besonders günstig ist und/oder wenn ausreichend elektrische Energie aus Erneuerbaren Energien (EE) zur Verfügung steht, werden flexible Verbraucher aktiviert und im gegensätzlichen Fall deaktiviert. Mit einem effizienten DSM wird außerdem dazu beigetragen die Netzfrequenz stabil zu halten [Bun11, S. 11f.].

Da sich in Zukunft der Betrieb von thermischen Kraftwerken hauptsächlich auf die Deckung der Residuallast beschränken wird, d.h. auf die elektrische Last abzüglich des Anteils aus EE, müssen diese weitaus flexibler und dynamischer betrieben werden als es bisher der Fall war. Aus diesem Grund müssen alle großen und kleinen thermischen Kraftwerke auf KWK-Basis die anfallende Nutzwärme zeitweilig in Wärmespeicher auslagern können. Ein Netzwerk aus Energiebunkern, die in Form eines virtuellen Kraftwerks miteinander gekoppelt sind und zentral gesteuert werden, kann dazu beitragen, große elektrische und thermische Leistungen in das Netz einzuspeisen und mithilfe eines Speichers sowohl Wärme als auch Strom flexibel und effizient bereitzustellen.



2.2. Systemkomponenten des Energiebunkers

In der vorliegenden Arbeit wird sich auf eine Standardkonfiguration der Systemkomponenten beschränkt, die eine Adaption auf jeden Zivilschutzbunker des Netzwerkes zulässt. Der Schwerpunkt liegt auf einem Wärmespeicher (WS), der sich im Innern des Bunkers befindet und ein hohes Speichervolumen zur Verfügung stellen soll. Dieser wird von Blockheizkraftwerken (BHKW) gespeist, die aufgrund von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zeitgleich Strom- und Wärme bereitstellen können. Differenzen zwischen den Vorlauftemperaturen bzw. der Wärmeleistung des Energiebunkers und dem Wärmebedarf des Netzes werden durch einen Spitzenlastkessel, im Folgenden Heißwassererzeuger (HWE) genannt, ausgeglichen. Ein HWE kann bei kontinuierlicher Betriebsbereitschaft mehr oder weniger synchron zum Speichervorlauf die Leistung des Wärmeträgermediums erhöhen. Um den Leistungsgrad des Bunkers zu steigern, werden zusätzlich Solarkollektoren (SK) auf dem Dach installiert, die ebenfalls direkt in den Speicher einspeisen. Der Speicher selbst ist mit dem am Bunkerstandort vorhandenen Wärmenetz verbunden. Prinzipiell sind auch weitere Erzeuger denkbar, die wie im Bunkerkonzept in Wilhelmsburg zum Teil bereits umgesetzt wurden (Vgl. [Ham11a]). So kann z.B. auch Abwärme eines nahegelegenen Industrieunternehmens genutzt werden, oder aber das Fernwärmenetz selbst nutzt den Wärmespeicher als Puffer, um die angeschlossenen Großkraftwerke flexibler betreiben zu können. Die Wand- und Dachflächen eines Bunkers bieten sich nicht nur für die Installation von solarthermischen Anlagen an, sondern auch für PV-Systeme. Die Standardkonfiguration des Simulationsmodells kann im späteren Verlauf des Forschungsprojektes optional um einzelne Erzeugerkomponenten ausgetauscht oder erweitert werden.

2.2.1. Wärmespeicher

Die Technologie der KWK ermöglicht bekanntermaßen einen, im Vergleich zur getrennten Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie, höheren Brennstoffausnutzungsgrad, d.h. die zugeführte Brennstoffleistung wird zu einem höheren Grad in Nutzleistung umgesetzt. Nachteilig wirkt sich die gekoppelte Erzeugung dagegen auf die Flexibilität des Einsatzes der thermischen Kraftwerke aus. Da gerade im Winter und in den kälteren Monaten der Übergangszeit die nachgefragte Heizlast die Fahrweise der Erzeuger vorgibt (wärmegeführte Betriebsweise), ist hier neben wirtschaftlichen Verlusten auf der Stromseite auch die Einbindung in das DSM gefährdet. Wie bereits in Kapitel 2.1 erläutert, ist eine flexible Fahrweise der konventionellen Erzeuger in Zukunft zwingend notwendig. Wärmespeicher für das städtische Wärmeverteilungsnetz können eine geeignete Lösung sein, da sich mit



ihrer Hilfe die Stromproduktion ganz oder teilweise von der Wärmenachfrage entkoppeln ließe.

2.2.1.1. Funktionsweise und genereller Aufbau

Wärmespeicher werden in den angestrebten Größenordnungen von mehr als 1.000 Kubikmetern häufig als Verdrängungsspeicher ausgeführt. Sie speichern thermische Energie indem bspw. erwärmtes Wasser aus den Wärmetauschern der BHKW oder der Solarthermieanlage, das sich im Speicherbehälter befindende kalte Wasser verdrängt. Im umgekehrten Sinne verhält es sich beim Entladevorgang, wo warmes Wasser im Speicher durch kaltes Rücklaufwasser aus dem Wärmenetz ersetzt wird. Die sich im Behälter befindende Wassermasse bleibt bei Belade- wie Entladevorgang immer konstant.

Für die Speicherung von Wärme kann auf der Basis des Speicherprinzips generell zwischen drei verschiedenen Arten unterschieden werden [FK12, S. 10f.]:

- **Sensible Wärmespeicher:** Sie verändern beim Lade- oder Entladevorgang ihre „fühlbare“ Temperatur.
- **Latentwärmespeicher:** Sie verändern beim Lade- oder Entladevorgang nicht ihre „fühlbare“ Temperatur, sondern das Wärmespeichermedium ändert seinen Aggregatzustand. Meistens ist das der Übergang von fest zu flüssig (bzw. umgekehrt). Das Speichermedium kann über seine Latentwärmekapazität hinaus be- oder entladen werden, was erst dann zu einer Temperaturerhöhung führt.
- **Thermochemische Wärmespeicher oder Sorptionsspeicher (Silicagel oder Zeolithe):** Sie speichern die Wärme mit Hilfe von endo- und exothermen Reaktionen.

Zudem kann zwischen offenen, im Erdreich eingebauten sogenannten Aquiferspeichern und den üblichen Behälterkonstruktionen unterschieden werden. Aufgrund der erforderlichen Einbindung in bestehende Wärmesysteme, die Heißwasser als Trägermedium verwenden, und der Unterbringung in Bunkeranlagen ist eine sensible Wärmespeicherung in meist zylindrischen Speichertanks aus Stahl zu bevorzugen [FK12, S. 30 und 69]:

Wegen der thermodynamischen Eigenschaften des Wassers und der angestrebten Speichertemperaturen kann grundsätzlich zwischen atmosphärischen Wärmespeichern (maximale Temperatur des gespeicherten Wassers $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) und Druckwärmespeichern (Temperatur des Speicherwassers $> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) unterschieden werden. Durch eine bestimmte Anordnung von Temperaturzonen ist es bis zu einem gewissen Grad möglich, drucklose Wärmespeicher mit einer Speichertemperatur über $100\text{ }^{\circ}\text{C}$



2. Grundlagen

zu betreiben. Diese und Druckspeicher werden hier jedoch nicht weiter betrachtet, da die Erzeugerkomponenten des Energiebunkers Vorlauftemperaturen von über 100 °C nicht oder nur äußerst selten erreichen, so dass eine druckbehaftete Auslegung des Tanks wirtschaftlich nicht zu vertreten wäre. Zudem ist auch die statistische Relevanz der benötigten Wärmenetz-Wasservorlauftemperatur von Bedeutung. So werden bspw. in einem Wärmenetz mit einer Auslegung auf 135 °C bei einer Außentemperatur von -15 °C in 95 Prozent aller Jahrestunden nur Vorlauftemperaturen von maximal 110 °C oder niedriger benötigt [VEWA11, S. 16f.]. Neben der grundlegenden Auswahl des Speicherkonzepts hinsichtlich der Wahl der Speicherauslegungstemperatur ist zu berücksichtigen, inwieweit der Wärmespeicher in das bestehende hydraulische Konzept des Wärmenetzes eingebunden werden kann. Hieraus kann eine Unterscheidung in eine hydraulisch direkte oder indirekte Einbindung abgeleitet werden. Die daraus resultierenden Vor- und Nachteile werden in Kapitel 2.2.1.3 genauer erläutert.

Neben der bereits genannten Flexibilisierung des Energieversorgungsnetzes haben im Wärmenetz eingebundene Wärmespeicher folgende Vorteile [VEWA11, S. 21f.]:

- Große Speicher ermöglichen einen kompletten Stillstand ausgewählter Erzeuger im Wärmenetz, z.B. an Wochenenden, an denen in der Regel der Strompreis niedriger ist als an Werktagen.
- Ein WS kann die Nutzung teurerer Wärmequellen (bspw. Heißwassererzeuger) zur Deckung der Wärmelastspitzen reduzieren.
- Ein Speicher kann die maximal notwendige Wärmeleistung reduzieren, wenn er für diesen Zweck am „kältesten Tag“ eingesetzt wird.
- Ein druckloser WS kann der Druckhaltung im Wärmenetz dienen.
- Dezentrale Speichereinheiten können im gesamten Fernwärmenetz eingesetzt werden, vorausgesetzt die Anschlussbedingungen lassen dies zu.
- Speichernahe Wärmeerzeugung bietet den Vorteil, dass hohe thermische Leistungen mit geringen Verlusten erreicht werden. Zudem kann auf einem Temperaturniveau gespeichert werden, dass von der außentemperaturabhängigen Netztemperatur unabhängig ist.

2.2.1.2. Verdrängungswärmespeicher in atmosphärischer Ausführung

Ein Verdrängungswärmespeicher ist in der Regel nicht homogen durchmischt, sondern das heißere und das kältere Wasser bleiben wegen der temperaturbedingten Dichteunterschiede von einander getrennt. Da warmes Wasser eine geringere Dichte als kaltes Wasser hat, befindet sich die Schicht mit der höchsten Temperatur



im oberen Teil des Speichers. Von dort aus kann in das Wärmenetz eingespeist werden, während von unten kaltes Wasser aus dem Netzurücklauf nachströmt. Eine Schichtspeicherung ist besonders bei externen Erzeugern wie Blockheizkraftwerken und Solarkollektoren geeignet, da über Beladestutzen in unterschiedlichen Höhen die Vorlauftemperatur gezielt in die entsprechende Schicht eingespeist werden kann und somit die Nutzttemperatur des Speichers schneller erreicht wird [Vie08, S. 66]. Zur Vermeidung von hohen Strömungsgeschwindigkeiten, die eine Vergrößerung der Trennzonen zwischen den Schichten und damit eine Durchmischung bewirken können, werden die Ein- und Ausspeiseleitungen mit Diffusoren versehen [VEWA11, S. 21f.].

Bei Speichertemperaturen unterhalb von $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ kann der Speicherbehälter als druckloser atmosphärischer Speicher ausgeführt werden. Die Vorteile einer solchen Ausführung ergeben sich aus den geringeren Anforderungen an die Festigkeitsauslegung eines solchen Tanks [VEWA11, S. 16]. Er unterliegt bspw. nicht den hohen Anforderungen der Druckgeräterichtlinie, die für Drücke ab $1,5\text{ bar}$ gilt (Vgl. [Rat97]).

Die zu wählende Behälterwandstärke ergibt sich lediglich aus dem statischen Wasserdruck am Boden des Behälters entsprechend dem maximalen Füllstand im Behälter sowie aus der Berücksichtigung der Temperaturwechselbeanspruchung durch die sich verschiebende Grenzzone zwischen heißem und kaltem Wasser. Daraus ergibt sich eine abnehmende Wandstärke vom Boden in Richtung Behälterdeckel. Ein weiterer wesentlicher Vorteil des drucklosen Speichers ergibt sich daraus, dass durch eine Einbindung zwischen Vor- und Rücklaufpumpe eine einfache Kopplung des Wärmespeichers mit der Druckhaltung des Wärmenetzes möglich ist. Auf ein zusätzliches Druckhaltesystem kann somit verzichtet werden. Dabei entspricht der statische Druck der Wassersäule im Speicherbehälter dem Ruhedruck des Netzes [FK12, S. 30f.]. Ein Nachteil eines drucklosen Wärmespeichers ergibt sich aus der Tatsache, dass Vorlauftemperaturen über $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht aus diesem abgedeckt werden können. Hierfür ist eine Nachheizung (Spitzenlastkessel) erforderlich.

2.2.1.3. Hydraulische Anbindung

Häufig wird für atmosphärische Speicher eine Anordnung parallel zum Wärmenetz gewählt (siehe Abbildung 2.2). Der atmosphärische Speicher kann dann in seinen Dimensionen frei festgelegt werden. In diesem Fall ist jedoch zu beachten, dass die Höhe des Wasserinhaltes im Speicher nicht niedriger ist, als es dem Ruhedruck des Systems entspricht. Andernfalls müssen zusätzliche Maßnahmen zur Drucktrennung durchgeführt werden, die wiederum einen großen technischen und finanziellen Aufwand bedeuten. Darüber hinaus müssen im Falle einer Drucktrennung die sich ergebenden Drosselverluste berücksichtigt werden. Letztere könnten vermieden werden,



2. Grundlagen

wenn der Speicher hydraulisch vollkommen vom Netz entkoppelt und dieser indirekt über einen Wärmetauscher mit dem Heiznetz verbunden wird. Dies würde neben dem hohen technischen Aufwand aufgrund von leistungsstarken Wasser-Wasser-Wärmetauschern zu Grädigkeitsverlusten führen, was wiederum größere Wärmeverluste bedeutet.

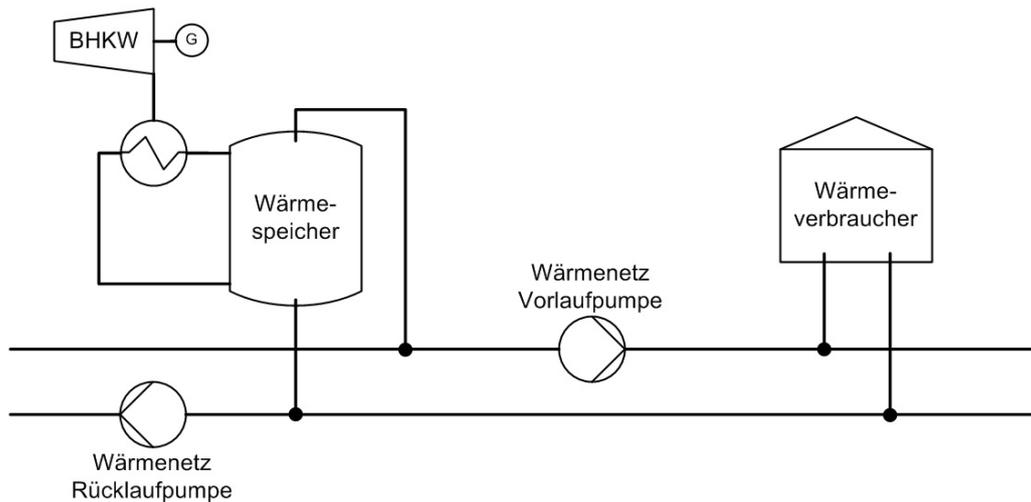


Abbildung 2.2.: Einbindung eines Wärmespeichers mit externen Beladeeinheiten in ein Wärmenetz

Nach einer Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile wird für die Energiebunker ein atmosphärischer Verdrängungsspeicher mit einer direkten Anbindung an das Wärmenetz als hydraulische Insel empfohlen.

2.2.2. Kraft-Wärme-Kopplung und Blockheizkraftwerke

Herkömmliche fossil befeuerte Kraftwerke nutzen nur 30 bis 40 % der eingesetzten Primärenergie zur Stromerzeugung und die übrige Energie wird in Form von Abwärme an die Umgebung abgegeben. Das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) sieht Stromerzeugung mit paralleler Nutzung der entstehenden Abwärme zu Heizzwecken vor. So kann der Brennstoffverbrauch und damit die Treibhausgasemissionen für die Erzeugung von Strom und Wärme signifikant reduziert werden. Das Leistungsspektrum von KWK-Anlagen reicht von Heizkraftwerken im Megawatt-Bereich, welche die Abwärme in Fernwärmenetze einspeisen, bis zu sogenannten Mini-KWK-Anlagen mit wenigen Kilowatt Leistung für den Einsatz in kleinen Gewerbebetrieben oder zur privaten Nutzung [Sch10, S. 1f.].

Aktuell beträgt der Anteil der KWK-Stromerzeugung an der gesamten Nettostromerzeugung in Deutschland rund 19 %. Die Bundesregierung hat beschlossen, durch



2. Grundlagen

Zusatzvergütung und andere Fördermaßnahmen den KWK-Anteil an der Stromerzeugung bis zum Jahre 2020 auf 25 % zu erhöhen. Durch den flächendeckenden Einsatz von Wärmespeichern könnte das KWK-System flexibler agieren und einen wesentlich höheren Anteil der notwendigen Wärme gekoppelt erzeugen. Prognosen gehen davon aus, dass im Jahr 2030 bis zu 88 % der Wärmelast aus KWK-Erzeugung bereitgestellt werden können [Pro11, S. 10f.].

Der Großteil der KWK-Leistung kommt aus Heizkraftwerken, die in der Regel ein Fernwärmenetz versorgen und gleichzeitig Strom produzieren. Dabei kommen im großen Leistungsbereich (Megawatt) meist Gas- und Dampfturbinenanlagen mit Wärmeauskopplung zum Einsatz. Im kleinen bis mittleren Leistungsbereich kommen neben Brennstoffzellen und Mikro-Gasturbinen häufig sogenannte Blockheizkraftwerke (BHKW) zum Einsatz [Sch10, S. 7f.]. In Abbildung 2.3 ist die Einteilung von BHKW nach dem Motortyp, dem Kraftstoff und der Betriebsweise dargestellt. Im Normalfall bestehen BHKW aus einem Verbrennungsmotor, der einen Generator antreibt, sowie aus Anlagen zur Abwärmenutzung. Die Abwärme des Motors wird in drei unterschiedlichen Kühlstufen über Wärmetauscher an den Heizkreislauf abgegeben. Diese Kühlstufen sind Motor- und Schmierölkühlung sowie die Abgasabwärme. Neben konventionellen fossilen Kraftstoffen wie Erdgas oder Heizöl können KWK-Anlagen auch mit Brennstoffen aus regenerativen Quellen betrieben werden [Sch10, S. 55f.].

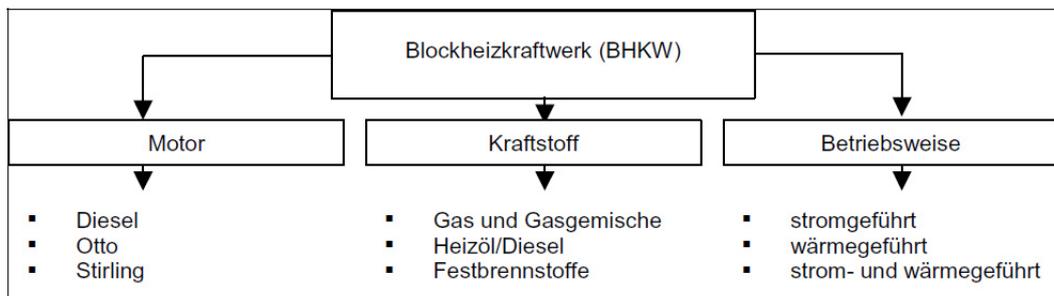


Abbildung 2.3.: Einteilung von Blockheizkraftwerken [Jag03, S. 1f.]

In der Regel werden KWK-Anlagen, die ein Fernwärmenetz versorgen, wärmegeführt betrieben. Das bedeutet, dass die Leistung des Kraftwerks an den aktuellen Wärmebedarf angepasst wird. Der Strom wird somit immer nach der Wärmenachfrage produziert. Im stromgeführten Betrieb wird die Leistung der KWK-Anlage der Stromnachfrage angepasst. Die Wärme wird also immer dann produziert wenn Strombedarf vorhanden ist. Somit muss die Wärme in vielen Fällen zwischen der Erzeugung und dem Verbrauch gespeichert werden [ASU10, S. 16f.]. Das betrifft insbesondere die Einbindung von mehreren BHKW, die innerhalb eines virtuellen Kraftwerks zusammengefasst und zentral gesteuert werden. Die Motoren werden in



diesem Fall netzgeführt betrieben, um Systemdienstleistungen wie bspw. die Bereitstellung von Ausgleichsenergie (Minutenreserve) aber auch Spitzenlastleistung anbieten zu können [BMU13, S. 117f.]. Technisch sind die Motoren in der Lage innerhalb weniger Minuten ihre Nennleistung bereitzustellen. Da sowohl Ausgleichsenergie als auch Spitzenlastleistung eine höhere Vergütung versprechen, können die BHKW trotz geringerer Betriebsstunden, wie es bei der Grundlastabdeckung im privaten Haushalten der Fall ist, sogar wirtschaftlich betrieben werden. Der größte Vorteil liegt jedoch in der Flexibilisierung des Gesamtsystems, sowohl auf der Strom- als auch auf der Wärmeseite in Verbindung mit einem Wärmespeicher. Zum einen kann die Betriebszeit der Motoren verlängert werden und zum anderen lässt sich damit die Wärmeerzeugung dem Lastgang der Wärmeverbraucher anpassen. Ein autarkes Wärmenetz benötigt jedoch zusätzlich ein Backup- bzw. Spitzenlasterzeuger [Sch10, S. 55f.].

BHKW stehen in Leistungsgrößen von wenigen Kilowatt bis hin zu über 10 Megawatt zur Verfügung. Dabei können große Leistungsklassen einen Gesamtwirkungsgrad von über 90 % erreichen [ASU11]. Je nach Motortyp sind Vorlauftemperaturen von etwa 90 °C, bei einer minimalen Temperaturspreizung von 20 Kelvin, die Regel. Bei einer geringeren Temperaturdifferenz zwischen dem Vor- und Rücklauf des BHKW, sinkt die ausgekoppelte Wärme und der Gesamtwirkungsgrad nimmt ab. Aufgrund der geringen Spreizung speisen die Motoren in Verbindung mit einem Speicher meist in die oberste Ebene des Speichertanks ein, um einerseits die maximale thermische Leistungsabgabe des BHKW zu gewährleisten und andererseits die Nutztemperatur des Speichers in den Bereitschaftsteil einzuspeisen. In Ausnahmefällen und mit einem apparatetechnisch höheren Aufwand erreichen einzelne Motorentypen auch eine Vorlauftemperatur von bis zu 110 °C [Zah13, S. 205f.].

Die große Bandbreite der Brennstoffe reduziert sich in diesem Fall auf den Betrieb mit Erdgas. Der Anschluss an das Erdgasnetz ist eine zwingende Voraussetzung, um die BHKW und Spitzenlastkessel kontinuierlich und mit der benötigten Brennstoffleistung versorgen zu können. Prinzipiell wäre zwar eine Versorgung mit Heizöl oder regenerativen Brennstoffen durch Brennstofftanks möglich, jedoch ist für die angestrebten Leistungen eine derartige Versorgung nur mit sehr großem Tankvolumen und/oder einer häufigen Brennstofflieferung verbunden. Ausgenommen von Einzelfällen, ist jedoch weder die nötige Freifläche vorhanden, noch ist eine kontinuierliche Lieferung innerhalb der Stadt zu empfehlen.

2.2.3. Solarkollektoren

Insbesondere sogenannte Hochbunker bieten aufgrund ihrer standardisierten Bauform ausgezeichnete Voraussetzungen für die Installation von solarelektrischen und



-thermischen Anlagen. Bei den Bunkern handelt es sich in der Regel um einen rechteckigen Bau mit mehreren Geschoßebenen und einem Flachdach. Sowohl die Dachfläche als auch freiliegenden Wandflächen eignen sich für eine Bestückung, da es sich unter anderem um große ebene Flächen ohne Einbauten handelt. Während solarelektrische Anlagen (Photovoltaik) die Sonnenenergie mittels aktiver Halbleiterelemente in elektrischen Strom umwandeln, absorbieren thermische Solaranlagen bzw. Solar Kollektoren die Solarstrahlung und geben die Energie in Form von Wärme an ein Übertragungsmedium ab. Bei Niedertemperatursystemen (Vorlauftemperaturen von rund $100\text{ }^{\circ}\text{C}$), die für den vorliegenden Fall relevant sind, wird als Wärmeträger in der Regel Wasser mit einem Anteil an Frostschutzmittel (Glykol) verwendet, um bei Umgebungstemperaturen unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ Schäden in den Rohrleitungen und am Kollektorsystem zu vermeiden.

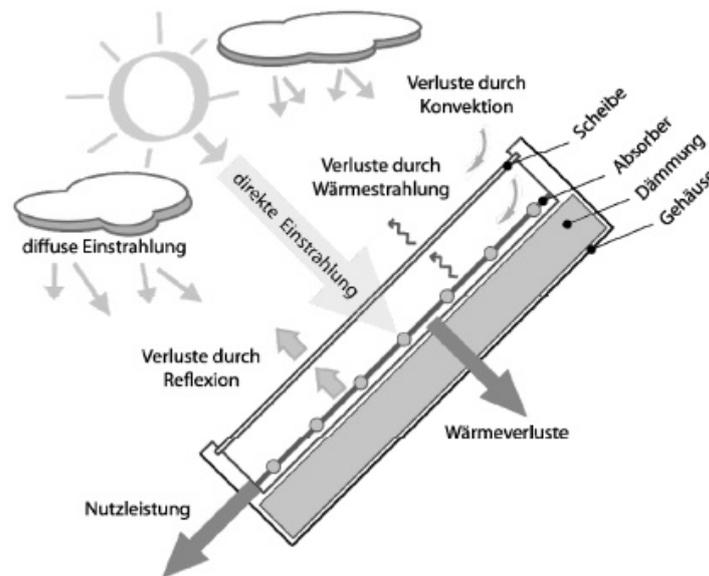


Abbildung 2.4.: Aufbau und Nutzleistungsbilanz durch Einstrahlung und Wärmeverluste eines Flachkollektors [Eic12, S. 62]

In Abbildung 2.4 ist schematisch der Aufbau eines Flachkollektors und die Leistungsbilanz eines Flachkollektors dargestellt. Das einfallende Sonnenlicht in Form von diffuser und direkter Strahlung trifft auf einen Absorber, der sich erwärmt. Durch eine frontseitige transparente Abdeckung können Wärmeverluste durch Abstrahlung und Konvektion reduziert werden. Ebenso kann eine rückseitig angebrachte Wärmeisolierung Wärmeleitungsverluste minimieren. Auf der Rückseite des Absorbers befinden sich Rohrleitungen, durch die das Wärmeträgermedium die Nutzleistung zum Heizkreislauf transportiert. Je nach Kollektortyp kann dieser Aufbau etwas variieren [Eic12, S. 61f.]. Die durchschnittlichen Jahressummen der Globalstrahlung liegen in Deutschland im langjährigen Mittel zwischen 950 und 1.200 kWh/m^2 und Jahr (Vgl.



2. Grundlagen

[Vie08, S. 21]). In Hamburg wird auf eine horizontale Fläche im 10-Jahresmittel eine Globalstrahlung von 976 kWh/m^2 und Jahr erreicht. Das entspricht einer mittleren Bestrahlungsstärke von etwa 111 W/m^2 [NC14]. Die tatsächliche Strahlungsleistung hängt sowohl von der Tageslänge und der Wolkendecke als auch von der Ausrichtung der Kollektoren ab. Eine Südausrichtung mit einem Anstellwinkel von 30 Grad erhöht die Leistung im Schnitt um einen Korrekturfaktor von 1,12 und erreicht damit eine um 12 % höhere Energieausbeute [Laq03, S. 4].

2.2.3.1. Kollektorvarianten

Die verschiedenen Kollektortypen bei Niedertemperatursystemen unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Temperatur abhängigen Wärmeverluste zwischen Absorber und Umgebung. Die folgenden drei Systeme werden vorrangig eingesetzt: [Vie08, S. 43f.]

- **Röhrenabsorber:** Solare Schwimmbadbeheizung.
- **Flachkollektor:** Solare Brauchwassererwärmung und Heizungsunterstützung für private Haushalte.
- **Vakuurröhrenkollektor:** Solare Brauchwassererwärmung und Heizungsunterstützung für klein- und großtechnische Anlagen.

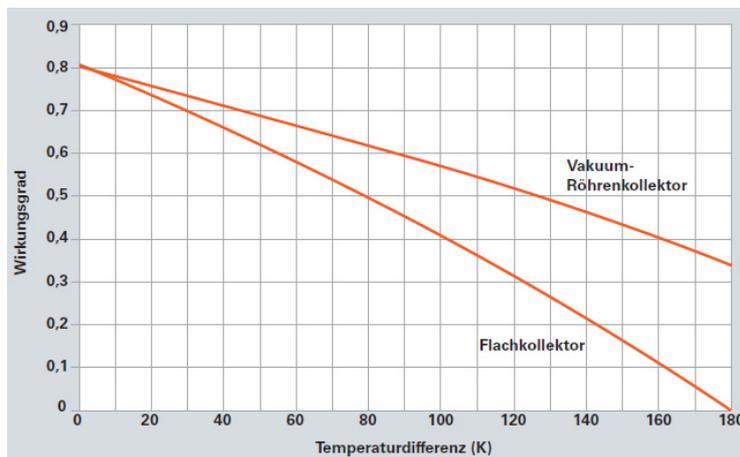


Abbildung 2.5.: Charakteristische Wirkungsgradkurven von Flach- und Vakuurröhrenkollektoren in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen der Absorber- und Umgebungstemperatur [Vie08, S. 25]

Aufgrund einer optimalen Wärmeisolierung erreichen Vakuurröhrenkollektoren (VRK) höhere Wirkungsgrade, bei gleicher Temperaturdifferenz zwischen Absorber- und Außentemperatur, als vergleichbare Flachkollektoren (siehe Abbildung 2.5). Es ist abzusehen, dass die thermischen Leistungen der SK in Bezug auf die angestrebten



Speichergrößen eher eine untergeordnete Rolle spielen werden. Aus diesem Grund ist eine Auslegung auf maximale Leistung anzustreben, was für den Einsatz von VRK spricht. Da in der vorliegenden Potenzialstudie wirtschaftliche Kriterien zunächst unberücksichtigt bleiben, werden die höheren Investitionskosten im Vergleich zu Flachkollektoren vernachlässigt.

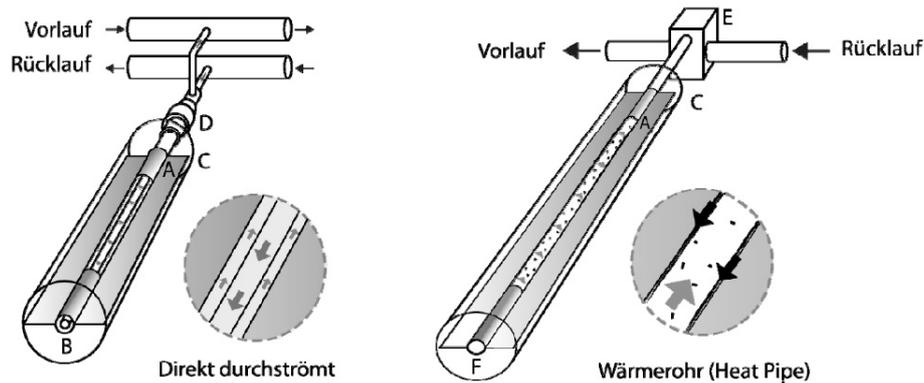


Abbildung 2.6.: Vakuumröhrenkollektor mit direkter Durchströmung und als Heatpipe [Eic12, S. 63]

Bei Vakuumröhrenkollektoren befindet sich ein Absorberstreifen, der meist aus Kupfer oder Aluminium besteht, innerhalb oder seitlich eines evakuierten Glaskolbens. Verluste durch Konvektion (Luftbewegung) und Transmission (Strahlungsdurchgang) sind damit praktisch ausgeschlossen. Lediglich die Wärmeabstrahlung tritt als Verlustfaktor auf, der allerdings durch selektive Beschichtung des Absorbers minimiert werden kann [Mol08, S. 54f.]. Die Wärmeübertragung kann entweder direkt erfolgen, d.h. das Wärmeträgermedium im Absorberrohr ist direkt mit dem Sammelrohr des Heizkreislaufts verbunden, oder der Wärmeübergang erfolgt über eine sogenannte Heatpipe (siehe Abbildung 2.6). Dabei zirkuliert im Absorberrohr einen Dampfstrom, der über einen Kondensator die thermische Energie an das Sammelrohr abgibt. Die erreichbaren Leistungen sind mit der direkten Anbindung vergleichbar, allerdings wird der Austausch einzelner Röhren ermöglicht [Eic12, S. 63f.].

2.2.3.2. Aufbau des Kollektorsystems

Ein Kollektorsystem besteht im Allgemeinen aus zwei Hauptkomponenten, dem Kollektorfeld und dem Pufferspeicher. Unabhängig von der Betriebsweise gibt es einen grundlegenden Aufbau solcher Kollektorsysteme. Die Absorber werden von der Sonnenstrahlung erhitzt und geben die Wärme an die Sammelrohre ab. Eine Rücklauf (RL)-Pumpe transportiert die Wärme über ein Rohrleitungssystem zum Speicher,



2. Grundlagen

wo die thermische Energie mithilfe eines Wärmetauschers (WT) an das Speicherwasser abgegeben wird [Vie08, S. 72f.]. Im Kollektorkreislauf wird bei der Wärmeträgerumwälzung zwischen drei Konzepten unterschieden, dem Low-, High-, und Matched-Flow-Betrieb. Der Durchfluss bei Low-Flow-Systemen ist gegenüber den anderen Betriebsweisen deutlich geringer. So zirkuliert im Kreislauf ein spezifischer Volumenstrom von nur 10 bis 15 Litern pro Quadratmeter Absorberfläche. Dieser geringe Volumenstrom führt dazu, dass sich die Solarflüssigkeit stärker erhitzt und der Kollektor damit auf einem höheren Temperaturniveau arbeiten kann. Aus diesem Grund sind Low-Flow-Systeme besonders für die Heizungsunterstützung geeignet. Allerdings erhöhen sich mit der Vorlauftemperatur auch die Wärmeverluste, die jedoch unter Einsatz von VRK minimiert werden können [Lut08, S. 16]. Im Gegensatz dazu wird die Solaranlage im High-Flow-Modus mit einem Volumenstrom von 25 bis 80 l/m^2 betrieben. Der schnelle Abtransport des Wärmeträgermediums reduziert die Wärmeverluste im System erheblich, mindert jedoch auch die Temperatur der aufgenommenen Wärme, so dass diese Betriebsführung insbesondere für Brauchwasserunterstützung geeignet ist [Lut08, S. 16f.]. Matched-Flow-Anlagen versuchen beide Systeme zu verbinden, indem der Volumenstrom je nach Bedarf angepasst wird. Allerdings erfordert diese Variante einen hohen Planungs- und Kostenaufwand, so dass dieses System bisher selten eingesetzt wird [Lut08, S. 17]. Für größere Anlagen, deren Betrieb auf maximale Ausgangstemperaturen ausgelegt ist, und bei Verwendung eines Wärmespeichers mit Schichtbeladung, ist letztlich der Betrieb im Low-Flow-Bereich zu empfehlen.

In der Regel wird eine gewisse Anzahl an Vakuumröhren zu einem Kollektormodul zusammengefasst. Mehrere seriell verschaltete Module bilden eine Kollektorreihe. Die Größe und Anordnung der einzelnen Reihen hängt von einer Vielzahl an Faktoren ab. Insbesondere bei großen Kollektorfeldern ist darauf zu achten, dass der angestrebte Volumenstrom über das gesamte Feld gleich sein sollte, d.h. alle Kollektoren müssen unter nahezu identischen Druck- und Strömungsverhältnissen durchströmt werden. Um dies zu erreichen, ist darauf zu achten, dass bei der Verschaltung alle angeschlossenen Kollektoren möglichst eine gleiche Leitungslänge aufweisen. Eine solche Anordnung nennt man Tichelmann-System und ist in Abbildung 2.7 dargestellt. So wird vermieden, dass sich für die einzelnen Kollektoren unterschiedliche Strömungswiderstände und damit unterschiedliche Massenströme ergeben. Denn das würde dazu führen, dass die Kollektoren trotz einheitlicher Sonneneinstrahlung mit unterschiedlichen Temperaturen und damit unterschiedlichen Wirkungsgraden betrieben werden. Das Tichelmann-System führt zwar zu etwas größeren Leitungslängen, erlaubt aber das gesamte Kollektorfeld im optimalen Betriebsbereich zu betreiben und vermeidet daher Effizienzverluste [Mol08, S. 48f.]. Da der Wärmespeicher über das gesamte Jahr hinweg betrieben werden soll und die Solarkollektoren aufgrund ih-

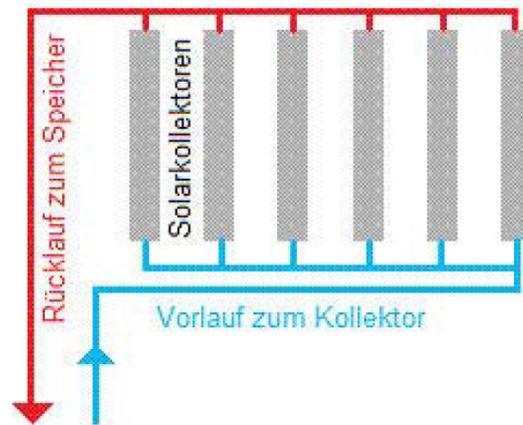


Abbildung 2.7.: Anordnung der Kollektorreihen nach dem Tichelmann-System [Mol08, S. 48]

rer geringen Leistungsdichte im Vergleich zum Speichervolumen von über 1.000 m^3 die Speichertemperatur nur im geringen Maße anheben bzw. die Speicherverluste ausgleichen, müssen auch die SK über das gesamte Jahr die maximale Leistung erzielen. Eine Fassadenmontage in Südausrichtung erreicht aufgrund der Ausrichtung und Abschattung im Jahresmittel über 30 % weniger Strahlung und ist somit für diesen Einsatzzweck nicht zu empfehlen. Hinzu kommen besondere rechtliche Anforderungen, die insbesondere im Stadtgebiet zu größeren Problemen führen könnten. Aufgrund dessen werden ausschließlich die Dachflächen genutzt [Vie08, S. 110f.].

Bei der Dachmontage ist darauf zu achten, dass die Eck- und Randbereiche des Daches nicht als Montagefläche genutzt werden können, da auftretende Windlasten (Sog und Druck) an diesen Stellen deutlicher höher sind als im übrigen Dachbereich und somit die statischen Belastungsgrenzen überschreiten. Die DIN 1055 Teil 4 schreibt vor, dass die Streifenbreite 1 Meter nicht unterschreiten darf (Vgl. [Ind05]). Des Weiteren müssen die in südliche Richtung orientierten Kollektoren für eine optimale Bestrahlungsrichtung im Ganzjahresbetrieb aufgeständert werden. Um jedoch gegenseitigen Abschattungsverluste zu verhindern, muss ein gewisser Abstand zwischen den einzelnen Reihen eingehalten werden [Vie08, S. 43f.].

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Art, wie der Kollektorkreis an den Nutz- bzw. Speicherkreislauf angeschlossen ist. Man spricht von einem offenen Kreislauf wenn der Speicher direkt mit dem Kollektorkreis verbunden ist. Bei einem geschlossenen Kreislauf, und nur dieser kommt für den Ganzjahresbetrieb in Betracht, sind der Kollektor- und der Speicherkreislauf durch einen Wärmetauscher getrennt. Dieser befindet sich entweder innerhalb des Speichers (Glattrohr- oder Rippenrohrwärmetauscher) oder es wird ein externer Gegenstromwärmetauscher verwendet. Aufgrund der Speichergröße kann nur ein externer WT eingesetzt werden, da trotz



2. Grundlagen

zusätzlicher Pumpe der Materialeinsatz in keinem Verhältnis zur übertragenen Wärmeleistung stehen würde. Externe WT ermöglichen zudem in der angestrebten Größenordnung eine gezielte Schichtbeladung des Speichers [Lut08, S. 12]. Dabei können folgende Varianten zum Einsatz kommen [Lut08, S. 13]:

- **Passive Schichtung:** Erfolgt durch im Speicher eingebaute Schichtungsvorrichtung. Aufgrund des Dichteunterschieds steigt das erwärmte Wasser in einem Aufströmrohr und tritt erst dann aus diesem durch seitliche Öffnungen aus, wenn sich außerhalb Wasser mit einem ähnlichen Temperaturniveau befindet.
- **Aktive Schichtung:** Bei der aktiven Schichtung kann die Temperaturschichtung entweder bei konstantem Volumenstrom über Ventile in verschiedenen Speicherhöhen geregelt werden oder die Pumpen schalten ab, wenn die Zieltemperatur der oberen Speicherschicht am Kollektorvorlauf nicht mehr erreicht wird.

Die passive Schichtung hat den Nachteil, dass während des Aufströmens bereits Wärme an untere und damit kältere Schichten abgegeben wird. Somit wird oben im Bereitschaftsteil des Speichers immer eine geringere Temperatur eingebracht, als es bei der aktiven Schichtung der Fall wäre. Allerdings verursacht eine aktive Schichtung durch Regelung der Pumpendrehzahl große Verluste, da die Einsatzzeiten an denen die Zieltemperatur nicht erreicht wird deutlich eingeschränkt sind [Vie08, S. 65f.]. Ein guter Kompromiss stellt die aktive Schichtung über Ventile dar. Das vorhandene Temperaturniveau des Kollektors kann in die entsprechende Schicht des Speichers beladen werden. Nachteilig ist lediglich der erhöhte Regelaufwand, der mit der Anzahl der Ventile ansteigt. Das Regelkonzept spielt bei der Modellierung der Kollektoranlage kaum eine Rolle, so dass eine aktive Ventilschichtung empfohlen wird.

2.2.4. Heißwassererzeuger

Da es sich bei dem Wärmespeicher um einen atmosphärischen Behälter handelt, können nur Temperaturen bis maximal $99\text{ }^{\circ}\text{C}$ gespeichert werden. An kalten Tagen werden im Wärmenetz jedoch VL-Temperaturen von bis zu $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht [Spe12]. Das hieße, der Speicher könnte oberhalb eines Temperaturniveaus von $99\text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht betrieben werden, was einerseits zu vermeidbaren Wärmeverlusten im Speicher führt und andererseits den Betrieb der SK und des BHKW bei vollständiger Speicherbeladung verhindert. Aus diesem Grund muss dafür gesorgt werden, dass auch bei Temperaturen oberhalb von $99\text{ }^{\circ}\text{C}$ der Speicher weiterhin betrieben werden kann. Dazu wird ein Spitzenlastkessel über einen Bypass an den Speichervorlauf



angeschlossen. Das Speicherwasser aus dem Bereitschaftsteil mit der entsprechenden VL-Temperatur, wird im Falle von höheren Temperaturen im Wärmenetz in einen sogenannten Heißwassererzeuger geführt. Der erdgasbefeuerte Kessel erhöht die Temperatur auf das notwendige Niveau und speist das Heißwasser in den Vorlauf des Netzes ein. Je nach Auslegung der Wärmelastdeckung kann ein direkter Anschluss des HWE an den Rücklauf des Netzes sinnvoll sein. Wird bspw. ein Wärmenetz autark betrieben, muss nach dem sogenannten $n-1$ -Kriterium jederzeit eine vollständige Wärmeversorgung garantiert werden. Das hieße, bei Ausfall oder im vollständig entladenen Zustand des Speichers, muss der HWE die Wärmelast zu 100 % decken können [Sch13, S. 429f.]. Spitzenlastkessel werden im Allgemeinen nach dem Prinzip des Flammrohr-Rauchrohrkessels betrieben. Dabei wird dem HWE ein Brennstoff, meist Erdgas, zugeführt und verbrannt. Die heißen Abgase werden durch Rohrbündel geführt, wo es die Wärme an das im Kesselkörper durchströmende Medium Wasser abgibt (siehe Abbildung 2.8). [Vie14]

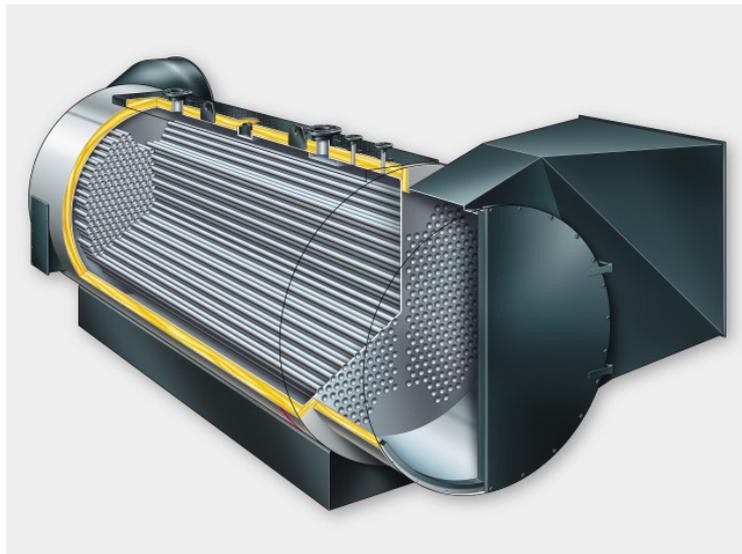


Abbildung 2.8.: Schnittansicht eines Flammrohr-Rauchrohrkessels [Vie14]

Der HWE kann seine Leistung innerhalb kürzester Zeit bereitstellen und funktioniert im Prinzip wie eine Art Durchlauferhitzer. Das ist besonders beim Einsatz als Spitzenlastkessel von Bedeutung, da somit kurzfristig auf die Lastschwankungen im Heiznetz reagiert werden kann. Allerdings bedarf es in diesem Fall einer Warmhaltung des Kessels, da ein Kaltstart in der Regel eine längere Zeit benötigt, um die Bedarfsleistung bereitstellen zu können. Dazu wird entweder ein kleiner Teil des Volumenstroms aus dem Primärkreislauf durch den HWE geleitet oder er wird trotz Bereitschaftsmodus im geringen Maße weiter befeuert. Insgesamt erreichen Rauchrohrkessel einen Wirkungsgrad von bis zu 96 Prozent [Sch13, S. 205f.].



2.3. Netzinfrastruktur in Hamburg

Für eine Beurteilung der Bunkerstandorte ist es von Bedeutung, wie es sich mit der umliegende Netzinfrastruktur an den Standorten verhält. Da der Wärmespeicher direkt an das vorhandene Wärmenetz angebunden werden soll, ist ein Zugang zum Wärmenetz zwingende Voraussetzung. Aber auch der Anschluss an das Stromnetz ist Bedingung für die Standortauswahl, da das BHKW die erzeugte elektrische Leistung in das Mittelspannungsnetz der Stadt Hamburg einspeisen soll. Sowohl Nieder- als auch Hochspannungsnetze sind nicht für mittlere Stromerzeuger mit angestrebten Leistungen zwischen 1 bis 5 MW geeignet [Vat12].

Wie bereits in Kapitel 2.2.2 erläutert, stellt Erdgas für die befeuerten Aggregate des Energiebunkers einen optimale Brennstoff dar. Aus diesem Grund sind die Bedingungen für einen Anschluss an das Gasnetz mit zu berücksichtigen.

2.3.1. Wärmenetz

Das Fernwärmenetz in Hamburg wird von der Vattenfall Wärme Hamburg GmbH (VWHH) und der E.ON Hanse AG (E.ON) betrieben, wobei VWHH das größte Gebiet hauptsächlich nördlich der Elbe abdeckt. E.ON betreibt ein kleines Netz südlich des Flusses. Die Leitungsführung des Fernwärmenetz der VWHH ist maschenartig aufgebaut und wird zentral von mehreren Heizkraftwerken und Heißwassererzeugern gespeist (siehe Abbildung 2.9). [Vat13]

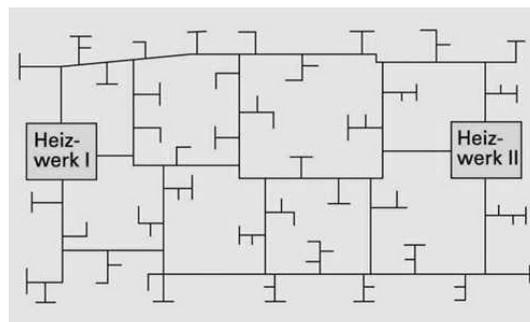


Abbildung 2.9.: Darstellung eines vermaschten Wärmenetzes [Vat13]

Von den Hauptleitungen geht ein weitverzweigtes Verteil- oder auch Nahwärmenetz ab, das die Wärme zu den Verbrauchern transportiert. Die Wärmeabnehmer sind meist indirekt über Wärmetauscher mit dem Verteilnetz verbunden. Das Netz selbst besteht aus einem Zweileitersystem, d.h. es ist jeweils ein Rohr für den Vor- und eines für den Rücklauf des Heizwassers installiert [Vat13]. Der Vorlauf erreicht im Jahresverlauf Temperaturen zwischen 80 und über 130 °C, während der Rücklauf



2. Grundlagen

möglichst „kaltes“ Wasser von 50 bis 60 °C zu den Wärmeerzeugern zurückführt (siehe Abbildung 2.10). Im Februar 2012 wurde eine maximale Wärmeleistung von rund 1.300 MW erreicht. Der Leistungsverlauf korreliert dabei erwartungsgemäß mit der Außentemperatur. Die Zirkulation des notwendigen Massenstroms von durchschnittlich 2.500 kg/s wird über Pumpstationen realisiert, die im gesamten Netz verteilt sind [Spe12].

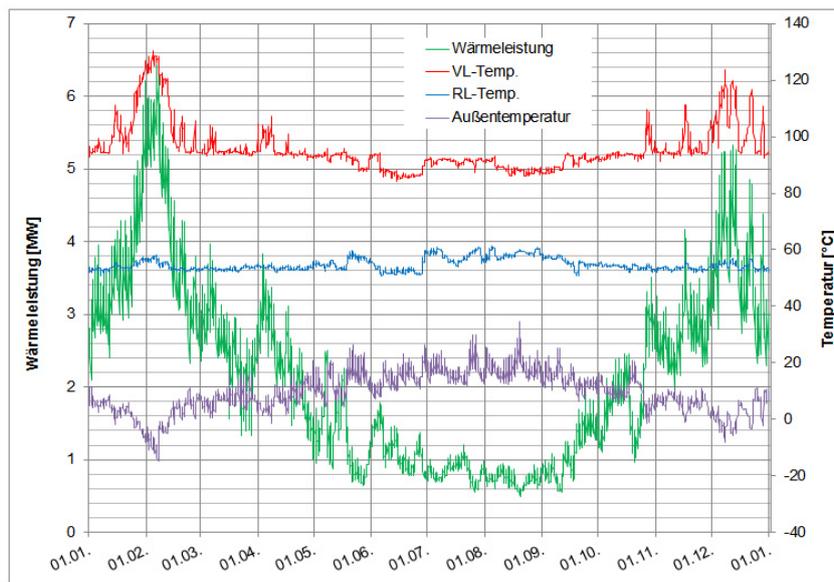


Abbildung 2.10.: Verläufe der Wärmelast, Außentemperatur sowie Vorlauf- und Rücklauf-temperatur für das Jahr 2012 im Hamburger Stadtgebiet nördlich der Elbe [Spe12]

Nachdem das Bundeskartellamt 2012 festgelegt hat, dass jedem Drittanbieter die Durchleitung von Wärme durch das Heiznetz der VWHH gestattet werden muss, ist zumindest rein rechtlich eine Anbindung von dezentralen Erzeugern möglich [KEB14]. Beim technisch bedingten Anschluss an das Wärmenetz, sind jedoch eine Vielzahl an Restriktionen zu beachten, die im Einzelfall mit dem Netzbetreiber geklärt werden müssen.

Wie später gezeigt wird (siehe Kapitel 3), befindet sich ein Großteil der Zivilschutzbunker im inneren Stadtgebiet rund um die Alster. Aufgrund der hohen Anzahl an Verbrauchern ist das Verteilnetz in diesem Bereich sehr engmaschig vernetzt. Befindet sich ein Energiebunker an einem Seitenarm des Netzes, kann dieser dazu beitragen, Versorgungsengpässe, die insbesondere im Winter auftreten können, auszugleichen [KEB14]. Andererseits kann die Leistungsgröße eines Energiebunkers dazu führen, dass kleine Verteilnetze oder Standorte am Ende eines Seitenarms die Einspeisung beschränken. Prinzipiell ist aber auch der Anschluss an das Hauptnetz möglich.



2.3.2. Stromnetz

Der Stromnetzbetreiber in Hamburg ist die Stromnetz Hamburg GmbH (SNHH), die für das Verteilungsnetz verantwortlich ist. Im Zuge der Rekommunalisierung der Energienetze im Jahr 2013 hat die Stadt Hamburg sich dazu entschlossen, die Stromnetze von den Hauptantileignern der Netzgesellschaften Vattenfall GmbH und E.ON Hanse AG zurückzukaufen. Die SNHH ist nun im Besitz des Stromverteilungsnetzes im Konzessionsgebiet der Hansestadt Hamburg [Ham14c].

2.3.2.1. Netzaufbau und Anschlussbedingungen

Die Elektroenergieversorgung in Deutschland wird durch ein nationales Stromnetz sichergestellt, welches Drehstrom in vier Spannungsebenen (siehe Tabelle 2.1) liefert. Die verschiedenen Spannungsebenen werden durch Transformatoren in großen und mittleren Umspannwerken bis hin zu den Ortsnetzstationen realisiert. Die Höchst- und Hochspannungsebenen dienen der Energieübertragung über weite Entfernungen, in der Mittel- und Niederspannungsebene erfolgt die Verteilung zu den Verbrauchern. In der Höchstspannungsebene (380 kV und 220 kV) ist das nationale Stromnetz in das europäische Verbundnetz UCTE (Union for the Coordination of Transmission of Electricity)/ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) eingebunden [Kom11, S. 8f.].

Tabelle 2.1.: Einteilung, Übertragungsspannung und Reichweite der Spannungsebenen in Deutschland [Kom11, S. 9]

Netzbereich	Abkürzung	Spannung	Reichweite	Gesamtentfernung in Deutschland
Höchstspannungsnetz	HÖS	380/400 kV oder 220 kV	unbegrenzt	36 000 km
Hochspannungsnetz	HS	max. 110 kV	10 ... 100 km	75 000 km
Mittelspannungsnetz	MS	max. 36 kV	1 ... 50 km	500 000 km
Niederspannungsnetz	NS	400V/230V	< 2 km	1 000 000 km

In der Höchstspannungsebene (HÖS) speisen Großkraftwerke mit mehr als 700 MW elektrischer Nennleistung ein, kleinere Kraftwerke sowie Windkraftanlagen sind an die Hoch- und Mittelspannungsebene angebunden. Kleinere Kraftwerke bis ca. 10 MW speisen in das Mittelspannungsnetz (MS) ein [Kom11, S. 9f.]. Die angestrebten Leistungsgrößen der BHKW werden diese Grenze nicht überschreiten, so dass davon ausgegangen werden kann, dass der erzeugte Strom in die Mittelspannungsebene eingespeist wird. Die versorgte Fläche auf Hoch- und Mittelspannungsebene beträgt



2. Grundlagen

758 km² mit einer Stromkreislänge des MS-Netzes von 5.323 km im gesamten Hamburger Stadtgebiet. Im Prinzip ist damit die gesamte Stadtfläche abgedeckt [Vat12]. Die Abbildung 2.11 zeigt einen Ausschnitt des HS-Netzes im Zentrum der Stadt Hamburg. Eine MS-Netzkarte ist nicht verfügbar. Es ist dennoch zu erkennen, dass insbesondere das innere Stadtgebiet engmaschig vernetzt ist. Das HS-Netz wird an sogenannten Abspannwerken (schwarzer Punkt) auf MS transformiert und verteilt sich von dort aus hauptsächlich über erdverlegte Kabelstränge.

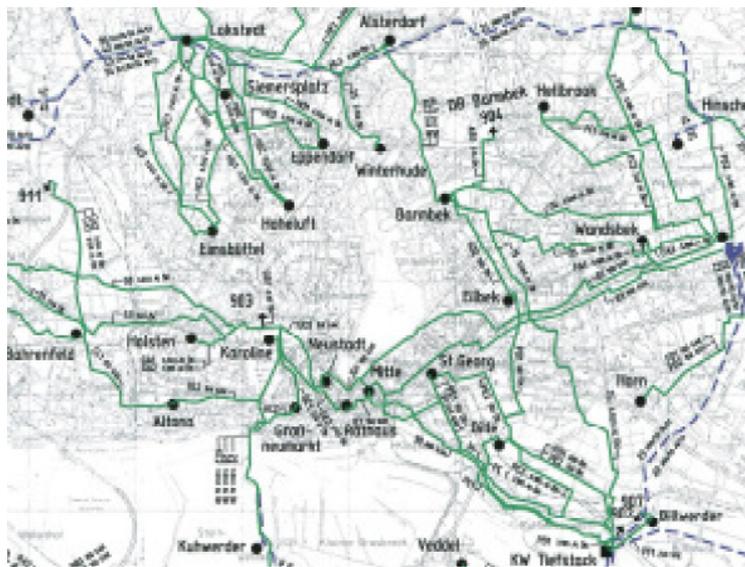


Abbildung 2.11.: Ausschnitt der Hochspannungskarte von Hamburg [Vat12]

Auch wenn theoretisch der Netzverlauf einen Netzanschluss zulässt, ist die Anbindung an das MS-Netz an zahlreiche Bedingungen geknüpft, die im Detail in den „Technischen Anforderungen - für den Anschluss an das Mittelspannungsnetz Hamburg“ (Vgl. [Ham09]) definiert werden. Die technischen Anschlussbedingungen müssen jedoch im konkreten Fall von der Stromnetz Hamburg GmbH überprüft werden.

2.3.2.2. Stromhandel und Strompreisbildung

Der Betriebscharakteristik des BHKW richtet sich nach unterschiedlichen Kriterien. Das BHKW kann sowohl im Spitzenlastbereich betrieben werden, um Preisspitzen abzufangen und im größeren Maßstab teurere Spitzenlastkraftwerke zu entlasten, als auch am Regelenenergiemarkt teilnehmen, um einen Beitrag zur Netzstabilität zu leisten. Beide Varianten werden im Folgenden detaillierter erklärt.

Jedes Übertragungsnetz bildet einen eigenen Marktplatz. Innerhalb Deutschlands kann zwischen den vier Übertragungsnetzen die Energie kostenfrei ausgetauscht



werden. Übergänge ins Ausland sind im Allgemeinen kostenpflichtig. Die eigentliche Preisbildung für den vermarkteten Strom (sowie CO_2 -Zertifikate, Kohle und Erdgas) findet an der Leipziger Energiebörse EEX (European Energy Exchange AG) statt. Der dort gebildete Strompreis hat auch wesentlichen Einfluss auf nicht an der Börse gehandelte Terminkontrakte, daher ist die Börse im weitesten Sinne preissetzend.

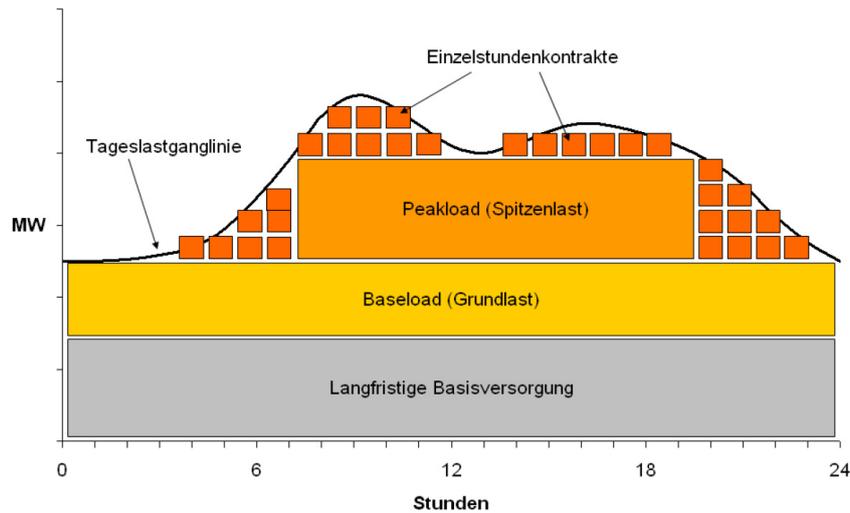


Abbildung 2.12.: Typischer Lastgang für Strom mit Handelsprodukten [Tzs10, S. 11]

Die Börse steht jedem Produzenten offen, der sein Produkt auf dem Energiemarkt verkaufen möchte und den Zulassungsprozess durchlaufen hat. Dabei wird der Strom entweder auf dem Termin- oder auf dem Spotmarkt (EPEX SPOT) gehandelt [Kox09, S. 17f.]. In der Grafik 2.12 sind die einzelnen Handelsprodukte in Form eines typischen Tageslastgangs abgebildet. Während auf dem Terminmarkt längerfristige Lieferverträge geschlossen werden, dient der Spotmarkt als Handelsplatz für kurzfristig lieferbaren Strom. Dabei wird unterschieden zwischen Day-Ahead, wo in der Regel das Erzeugungsportfolio für den nächsten Tag angeboten werden kann, und Intraday, an dem kurzfristige Geschäfte bis zu 45 Minuten vor Lieferung getätigt werden können, um bspw. Abweichungen der Last von der Prognose oder auf Ausfälle von Kraftwerksblöcken reagieren zu können. Die angebotene Leistung kann sowohl in mehrstündigen Blöcken bspw. für die Spitzenlast angeboten werden oder aber als Einzelstundenkontrakte. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass die kleinste Lieferrate ab 1 MW für Block- und 0,1 MW für Einzelstundenkontrakte beginnt [Tzs10, S. 13f.]. Beide Varianten sind aufgrund der Flexibilität von BHKW möglich. Eine exakte Betriebsweise der dezentralen Kraftwerke bedarf einer ausführlichen Kosten- und Marktanalyse, was jedoch kein Bestandteil der vorliegenden Studie ist.



2.3.3. Erdgasnetz

Für eine kontinuierliche Brennstoffversorgung der BHKW und HWE ist Erdgas die beste Alternative. Dazu müssen die Anlagen an das städtische Erdgasnetz angebunden werden. Dies geschieht in der Regel mithilfe einer Gas-Übergabestation, die sowohl den eigentlichen Anschluss als auch die Mess-, Sicherheits- und Druckreduzierstecke umfasst [Ham14a]. Betrieben wird das Erdgasnetz in Hamburg mit einer Gesamtlänge von ca. 7.300 km von der Hamburg Netz GmbH (HHN), deren Anteilseigner die Freie und Hansestadt Hamburg und die E.ON Hanse AG sind. Das Netz wird in den folgenden Druckstufen betrieben [Ham14b]:

- **Hochdruck:** Fließdruck > 1 bar
- **Mitteldruck:** Fließdruck zwischen 0,1 und 1 bar
- **Niederdruck:** Fließdruck $< 0,1$ bar

Für den Anschluss von größeren Energieerzeugern im drei- bis vierstelligen kW-Bereich, ist der Betriebsdruck weit höher als 1 bar. Ein Anschluss an das Hochdrucknetz ist folglich zwingend notwendig. In der Abbildung 2.13 ist die geografische Verteilung des Hochdrucknetzes in Hamburg dargestellt.

Die schwarzen Linien symbolisieren die regionale Netzversorgung durch die Hamburg Netz GmbH und die orangenen Linien stellen das überregionale Hochdrucknetz der E.ON Hanse AG dar. Das Hochdrucknetz ist zwar gleichmäßig über das gesamte Stadtgebiet verteilt, jedoch können die Entfernungen zwischen den Bunkerstandorten und dem nächsten Anschlusspunkt mehrere Kilometer betragen. Bei Neuverlegung einer Anschlussleitung ist somit darauf zu achten, dass sich die Entfernungen und insbesondere auch Leitungsführung in Bezug auf bspw. Querungen großer Straßen in Grenzen hält. Die Kosten können derart ansteigen, dass sich der Energiebunker nicht mehr wirtschaftlich betreiben lässt. Konkrete Standorte müssen demnach gesondert bewertet werden.

Der Erdgaspreis setzt sich im Wesentlichen aus folgenden Kostenkomponenten zusammen [BMW13b, S. 35f.]:

- Kosten der Beschaffung und Gewinnung
- Transport- und Verteilungskosten
- Mineralöl bzw. Ökosteuer

Bezugsverträge können entweder über den regionalen Erdgasversorger abgeschlossen werden, dessen Preis sich in der Regel aus einem Grund- und Arbeitspreis zusammensetzt, oder an der Energiebörse EEX gehandelt werden, die seit 2007 auch das Produkt Erdgas mit aufgenommen hat. Ähnlich wie beim Strommarkt, können dort



2. Grundlagen

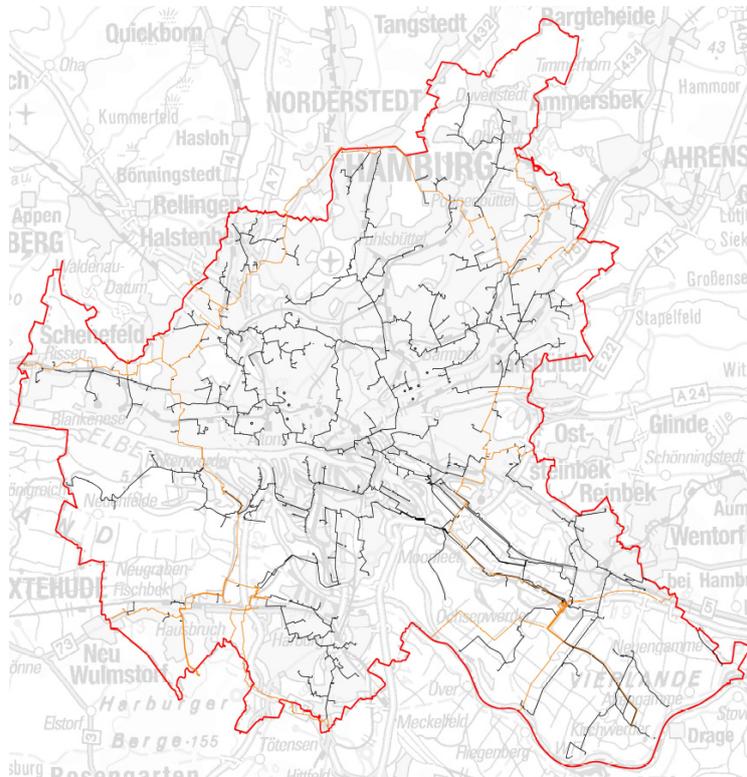


Abbildung 2.13.: Geografische Verteilung der regionalen (schwarz) und überregionalen (orange) Hochdruckleitungen des Erdgasnetzes in Hamburg [Ham14b]

kurzfristige Lieferverträge am Spotmarkt oder mittel- bis langfristige Geschäfte am Terminmarkt abgeschlossen werden [AO14]. Der Gaspreis hat sich für industrielle Kunden, die einen jährlichen Brennstoffbezug von mehreren *MWh* haben, seit dem Jahre 1998 um fast 200 % erhöht. Im Bezugsjahr 2012 lag der durchschnittliche Gaspreis in Deutschland für Großkunden bei etwa 35 *EUR/MWh* [BMW13b, S. 39].



3. Auswahl und Konversion der Bunkeranlagen

Das folgende Kapitel beschreibt die Vorgehensweise der Identifizierung von militärischen Bunkeranlagen, die für eine Konversion zu einem Energiebunker in Betracht kommen. Der Kern eines Energiebunkers bildet ein Wärmespeicher im Innern des Gebäudes. Dabei ist für den Aufbau eines Speichernetzwerkes von Interesse, wie groß die maximale Speicherkapazität jedes einzelnen Bunkers und des gesamten Verbundes ist. Aus diesem Grund wird in einem zweiten Abschnitt des Kapitels eine statische Analyse der Speicherkapazität aller potenziellen Energiebunker durchgeführt.

3.1. Vorbemerkungen und Einschränkungen

Da die Hafenstadt Hamburg bereits vor und während der Weltkriege durch den Handelsverkehr ein strategisch wichtiger Standort für Deutschland war, wurden in der Stadt unzählige Schutzbauwerke errichtet. Grobe Schätzungen gehen davon aus, dass in Hamburg mit mehreren tausend Schutzeinrichtungen die größte Anzahl an Bunkeranlagen aller deutschen Städte existierte. Nachdem der Großteil der Gebäude dem Zweiten Weltkrieg zum Opfer gefallen ist bzw. abgerissen wurde, sollen heute noch rund 700 Bunkeranlagen bestehen [Ham14d]. Es existieren jedoch keine oder nur veraltete und lückenhafte Angaben, die diese Schätzungen bestätigen. Diese Tatsache erschwert das Vorhaben, möglichst sämtliche Bunkeranlagen zu erfassen, die für eine Konversion in Frage kommen.

Für die Bewertung der Bunkeranlagen werden ausschließlich Schutzbauwerke betrachtet, die sich innerhalb der Stadtgrenzen der Freien und Hansestadt Hamburg (FHH) befinden. Der Begriff Bunker vereint dabei alle Schutzräume und -gebäude, die sowohl für den Zivilschutz als auch für strategische Zwecke genutzt wurden. Bunker wurden bereits im Ersten Weltkrieg Anfang des 20. Jahrhunderts errichtet. Durch die Entwicklung von Stahlbeton und infolge der Auseinandersetzungen im Zweiten Weltkrieg und Kalten Krieg wurden vermehrt sehr widerstandsfähige Bunkeranlagen errichtet, die in der Regel aus mehreren Metern dicken Wänden und Decken aus Stahl und Beton bestehen [IMI14].

Neben unzähligen Unterkategorien, kann man Bunkeranlagen prinzipiell in zwei Hauptklassen einteilen. Hochbunker, die sich oberhalb der Erdoberfläche befinden,



und Tiefbunker, die unterirdisch errichtet wurden. Zu Tiefbunkern zählen u.a. Röhrenbunker und Gebäudeunterkellerungen, die zu Schutzräumen umfunktioniert wurden. Insbesondere Röhrenbunker sind häufig eher in ländlicher Umgebung zu finden, da Kabel- und Rohrkanäle im Erdreich und Verkehrssysteme den Bau in Städten erschwert haben [Rad06]. Aus diesem Grund sind in der Stadtmittle von Hamburg eher wenig Tiefbunker dieser Art zu erwarten. Weit aus verbreiteter war die Modifikation von Kellerräumen für den Zivilschutz. Dazu wurde ein Großteil der Kellermauern verstärkt und die Räume mit überlebensnotwendigen Anlagen (Sanitäreanlagen, Beleuchtung, Belüftung usw.) ausgestattet. Zu dieser Art von Schutzeinrichtungen zählen auch Schulschutzräume, die in einer Vielzahl von Schulgebäuden errichtet wurden, da sie neben dem Schulpersonal und den Schulkindern in der Regel auch Kapazitäten für zusätzliche Personen aus der Bevölkerung boten. Weiterhin wurden sogenannte Mehrzweckanlagen (MZA) errichtet, die im Kriegsfall schnell zu einem Schutzraum umfunktioniert werden konnten und zu Friedenszeiten einen gänzlich anderen Zweck erfüllten. Ein bekanntes Beispiel in Hamburg ist die U-Bahnstation Jungfernstieg.

Für eine Konversion zum Energiebunker sind Tiefbunker nur bedingt bzw. nicht geeignet. Schutzräume sind in der Regel nur mit einer geringen Anzahl an Schutzplätzen ausgestattet und bieten demnach keinen Platz für die Installation eines großen Wärmespeichers und der dazugehörigen Energieerzeuger. Zudem ist zum Großteil der Ursprungszustand der Kellerschutzräume wieder hergestellt und sie werden als Abstellräume von den Bewohnern genutzt. Die wenigen Röhrenbunker, die in Hamburg noch existieren und die notwendigen Abmessungen besitzen, sind für eine Installation von Wärmespeichern denkbar schlecht geeignet. Zum einen verlaufen die Röhren stets horizontal, so dass die zwingend vertikale Aufstellung eines in der Regel zylinderförmigen Speichertanks nicht in den benötigten Abmessungen möglich ist. Zum anderen ist der Zugang zu einem Tiefbunker durch die unterirdische Bauweise sehr erschwert und große Aggregate wie bspw. BHKW oder auch Teilsysteme des Speichertanks, können wenn überhaupt nur mit viel Aufwand installiert werden. Aus diesem Grund sind Tiefbunker nicht für die konventionelle Speichertechnik geeignet. Da jedoch in der Forschung auf dem Gebiet der Wärmespeicherung viele Fortschritte erzielt werden, wie z.B. die Speicherung in flexiblen Kunststoffsäcken, ist diese Bunkerkategorie möglicherweise für zukünftige Projekte interessant. Mehrzweckanlagen, die primär ohnehin eine andere Aufgabe als den Zivilschutz haben, sind ebenfalls nicht geeignet.

Hochbunker haben neben der Schutz- häufig auch eine Abwehrfunktion. Diese Art von Bunker gehört im Allgemeinen zu der Kategorie Luftschutzbunker, die in der Regel mit zusätzlichen klein- oder großkalibrigen Waffen (je nach Bunkertyp) bestückt wurden, um Luftangriffe abzuwehren. Im Prinzip gehört jede Art von ober-



irdischen Schutzgebäuden zu der Kategorie Hochbunker, angefangen von kleinen 1-Mann-Splitterzellen bis hin zu großen Flaktürmen. Letztere existieren auch heute noch in Hamburg. So befindet sich ein Flakbunker im Stadtteil Wilhelmsburg, der im Jahr 2013 bereits zu einem Energiebunker umgebaut wurde (siehe Kapitel 1.1).



Abbildung 3.1.: Flakbunker am Heiligengeistfeld in Hamburg [Nik14]

Der Schwesterbunker befindet sich im Stadtteil St.-Pauli direkt am Heiligengeistfeld und beherbergt neben einer Diskothek auch eine Vielzahl an Unternehmen (siehe Abbildung 3.1). Beide Flaktürme stehen demnach nicht für eine Konversion in dieser Studie zur Verfügung. Auch Rundbunker kommen kaum in Frage, da sie sich hauptsächlich auf privaten Grundstücken befinden. Sie bieten Platz für mehrere Familien und sind auch heute noch recht häufig in Eigenheimsiedlungen am Stadtrand oder vereinzelt auch in der Stadtmitte zu finden. Mit einer Höhe von maximal 3 und einem Durchmesser von 5 bis 10 Metern sind sie zu klein, als dass sie für eine Konversion in Frage kämen. Das gilt jedoch nicht für sogenannte Klotz- und Turmbunker [Rad06]. Unter den Turmbunkern ist der sogenannte Zombeck-Turm am häufigsten vertreten. Standardmäßig hat der Rundbau eine Höhe von ca. 15 Metern (bis Dachspitze) und einen Durchmesser von etwa 10 Metern. Das Besondere an diesem Typ ist die große zusammenhängende Nutzfläche im Innern des Bunkers. Es gibt keine konventionellen Etagen und Treppen, sondern lediglich eine Rampe, die wendelförmig bis zum Dach führt. In Hamburg existieren noch 9 Stück dieses Bunkertyps, die zum Teil ungenutzt und leer sind [Ham14e]. Aufgrund der Größe und insbesondere der zylindrischen Form sind diese Anlagen gut geeignet für eine Bunkerkonversion.

Ebenfalls gut geeignet sind Klotzbunker, die sich als Quaderbauwerke über das gesamte Stadtgebiet verteilen. In der Standardausführung haben die maximal 7-



Abbildung 3.2.: Innenansicht eines Zombeck-Turmbunkers [Dec14]

geschössigen Bauwerke eine Höhe von bis zu 20 Metern und eine Grundfläche von 18 mal 18 Metern. Neben den ausreichend großen Dimensionen, weist dieser Bunkertyp noch weitere Vorteile auf, die eine Konversion begünstigen. Diese Bunkeranlagen wurden in der Regel für den Zivilschutz errichtet. Daher befinden sich die Gebäude hauptsächlich in dicht besiedelten, also bevölkerungsreichen Gegenden im Stadtkern. Demzufolge besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass sich an dem Standort eine ausreichende Netzinfrastruktur befindet, die für den Betrieb des Speichers und der Erzeuger notwendig ist (siehe Kapitel 2.3). Ein weiterer und wesentlicher Vorteil ist die Tatsache, dass insbesondere dieser Bunkertyp bis zum Jahr 2007 Bestandteil der sogenannten Zivilschutzbindung war. Die Bundesrepublik Deutschland hatte öffentliche Schutzräume, deren Eigentümer der Bund war, seit Mitte der 1960er Jahre modernisiert oder im Falle eines Fremdbesitzes durch Kommunen oder Privateigentümer bezuschusst. Bedingung war jedoch der Eintrag für die Zivilschutznutzung im Grundbuch, so dass anderweitige Nutzungen und insbesondere der Abbruch des Gebäudes nur beschränkt möglich waren [Bun14]. Infolge der geänderten Sicherheitslage nach dem Ende des Kalten Krieges entsprachen die Schutzraumbauten nicht mehr den aktuellen unmittelbaren Bedrohungsszenarien. Sie waren für den Verteidigungsfall vorgehaltenen worden und sind heute insbesondere aufgrund ihrer langen Vorlaufzeiten nicht mehr für den Schutz der Bevölkerung geeignet. Aus diesem Grund hat der Bund im Jahr 2007 beschlossen, das bisherige Konzept aufzugeben. Die bestehenden öffentlichen Schutzräume, die durch das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe verwaltet werden, sowie die daneben bestehenden privaten Schutzräume werden nach und nach aus der Zivilschutzbindung



entlassen. Nach Abschluss des Rückabwicklungsverfahrens stehen sie den Eigentümern zur uneingeschränkten Verwendung und Verwertung zur Verfügung [Bun14].

Aufgrund dieser Tatsache stehen heute noch viele Hochbunker im Stadtgebiet, die nun durch Bund und Kommunen veräußert werden. Das Ziel ist dabei in der Regel der Abbruch dieser Gebäude, um Platz für Wohnraum oder anderweitig nutzbare Gebäude zu schaffen. In der Vergangenheit wurden die Bunker jedoch in das Stadtbild eingepasst. So befinden sich bspw. Hochbunker mitten in einem Wohngebiet und grenzen mit ihren Außenmauern direkt an benachbarte Wohngebäude. Ein Abbruch der Gebäude ist in diesen und vielen anderen Fällen sehr problematisch, aufwändig und vor allem kostenintensiv. Aufgrund der großen Wand- und Deckenstärken gilt dies auch für den Umbau der Bunker. Alternativ wurden bereits erste Projekte durchgeführt, bei denen der Bunker als Unterkonstruktion für Gebäude auf dem Dach diente.⁴ Diese Variante könnte Potenzial für eine kombinierte Nutzung von Wohnraum und Energiesystem bieten. In diesem Fall ist jedoch mit zahlreichen Einschränkungen, wie bspw. erhöhten Lärmschutz, zu rechnen.



Abbildung 3.3.: Klotzbunker in der Papenstraße 137 in Hamburg [IMI13]

Für eine Konversion als Energiebunker kommen derzeit also ausschließlich Hochbunker des Typs Zombeck und Klotz in Betracht, die aufgrund ihrer Größe eine ausreichende Speicherkapazität bereitstellen können und zudem eine Installation von großen Aggregaten technisch überhaupt ermöglichen. Tiefbunker erschweren durch die unterirdische Bauweise nicht nur den Zugang, sondern sind aufgrund ihrer horizontalen und häufig röhrenförmigen Architektur nicht für herkömmliche Speichertanks geeignet. Da sowohl oberirdische Rundbunker, als auch geeignete Tiefbunker

⁴Website: <http://www.marienbunker.de/>



eventuell mit neuartigen Speichertechniken interessant werden könnten, werden diese mit einer entsprechenden Kennzeichnung ebenfalls in eine eigene Datenbank mit übernommen.

3.2. Datenbeschaffung, Datenbereinigung und Vorauswahl

Wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt, existiert keine zentrale Datensammlung über bestehende Bunkeranlagen in Hamburg. Die nutzbaren Datensätze stammen aus den verschiedensten Quellen und sind meist unvollständig und nicht mehr aktuell, was eine gründliche Recherche überaus erschwert. Die Bunkeranlagen sind unterschiedlichen Eigentümern zugeordnet. So ist bspw. die Bundesrepublik Deutschland (kurz Bund) in Besitz von etwa 50 Bunkergebäuden in Hamburg [Bun13]. Diese werden von der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben (BImA) verwaltet, die seit der Zivilschutzaufhebung 2007 dafür verantwortlich ist, die Gebäude zu veräußern. Weitaus mehr Bunker gehören der FHH oder den jeweiligen Kommunen. Insbesondere die Bezirksämter sind in Besitz von alten Akten, die Auskunft über den Bestand der Bunkeranlagen im Bezirkskreis geben. Eine Datenbank mit aktuellen Bunkerstandorten ist hier allerdings ebenfalls nicht vorhanden. Dies gilt auch für private Eigentümer oder stadteigene Unternehmen wie die Hamburger Hochbahn AG, der ebenfalls einige Gebäude gehören.

Für eine Beurteilung der Konversionseigenschaften der bestehenden Bunkeranlagen sind mehrere Schritte notwendig. Zunächst müssen Informationsquellen erschlossen werden, die Informationen und Datensätze zu Zivilschutzbauten in Hamburg besitzen. Anschließend müssen die Daten bereinigt und so selektiert werden, dass sie in eine weitere Auswahlebene übernommen werden können. Abschließend werden die Objekte bewertet und es wird eine Vorauswahl getroffen, die wiederum der nächst höheren Detailstufe übergeben wird.

3.2.1. Zivilschutzdaten der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt

Die Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg (BSU) besitzt eine Liste mit Schutzbauwerken jeglicher Art und Größe, die seit Beginn des 20. Jahrhunderts in Hamburg registriert wurden [Mor13]. Der Datensatz enthält lediglich Informationen zum Standort (ursprüngliche Adresse), dem Bunkertyp bzw. dem Bauzustand und der Ortsteilkennziffer. Die Datensätze wurden auf keinem aktuellen Stand gehalten, so dass teilweise weder die Existenz des Gebäudes noch die aktuelle Adresse bekannt ist, da im Laufe der Zeit ganze Straßenzüge umbenannt wurden. Zudem ist nicht auszuschließen, dass sich Daten zu den Schutzanlagen überlagern, da nicht



selten für ein und das selbe Objekt mehrere Adressen zugeordnet wurden. Dennoch bietet der Datensatz eine erste Basis, um möglichst alle potenziellen Bunkeranlagen zu erfassen, die für eine Konversion geeignet sind. Dazu muss die Liste allerdings von nicht benötigten Daten bereinigt werden.

Die Liste enthält insgesamt 4.586 militärische Schutzgebäude, die durch 25 verschiedene Bunkertypen oder Bauzustände in Form einer Abkürzung klassifiziert wurden. Zu den Typenklassen zählen bspw. Abkürzungen wie *BH* für bombensicherer Hochbunker oder *S* für splittersicherer Schutzraum. Anstelle des Bunkertyps wurde teilweise der Gebäudezustand zu Beginn des kalten Krieges angegeben, der entweder durch ein *I* für instandgesetzt oder *N* für Neubau gekennzeichnet wurde. Aufgrund einer fehlenden Legende konnten die Abkürzungen teilweise nur mithilfe der BSU und des selbstständigen Geschichtsforschers Klaus Pinker (Vgl. [Pin13]) entschlüsselt werden. Einige der Abkürzungen wie bspw. *eK* und *wN* blieben dennoch unerklärt. Jedoch ist die Anzahl der unbekanntem Schutzraumtypen derart gering (1 bis 2), dass diese vernachlässigt werden können.

In einem ersten Schritt wurden alle Schutzbauwerke entfernt, die entweder eine unbekannte Typenklasse (11) besitzen oder aufgrund der Größe kein Potenzial für Energiebunker bieten. Dazu zählen Keller (1.644), Einmannbunker/Beobachtungsstände (37), Splitterschutzbauwerke (87), Betonformsteinunterstände (46), Ringstände (85) und jede Art von splittergeschützten Schutzräumen (2.125). Ebenfalls entfernt wurden die Zombeck-Bunker (48), da bekannt ist, dass heute noch 9 Zombeck-Türme in Hamburg existieren und diese in einer weiteren Datenbank bereits enthalten sind. Die Kategorien instandgesetzt (44) und Neubau (131) überlagern sich mit den Einträgen der Bunkerklassen. Hinzu kommt, dass die Neubau-Anlagen in der Regel in neuere Gebäude integriert wurden und ohnehin nicht nutzbar wären. Zudem hat es keine Bedeutung wann das Gebäude gebaut oder saniert wurde, was dazu führt, dass auch diese Einträge nicht weiter betrachtet werden. Insgesamt werden somit 3.859 Bunker aus der Liste entfernt.

Die übrigen 328 Schutzanlagen werden nun näher betrachtet und ggf. selektiert. Wie bereits erwähnt, wurden in der Nachkriegszeit insbesondere nationalsozialistische Straßenbezeichnungen umbenannt. In der Liste sind größtenteils die ursprünglichen Straßennamen enthalten. Ist dies an einem Bunkerstandort der Fall, wurde der entsprechende Eintrag nachträglich mit einem *ex* gekennzeichnet. Aufgrund der fehlenden Nachvollziehbarkeit der Standorte, werden auch diese Einträge entfernt, so dass letztlich 234 Schutzbauwerke der Kategorie Hochbunker (145), Rundbunker (53) und Turmbunker (36) übrig bleiben.



3.2.2. Erstellung einer Datenbank für potenzielle Bunkeranlagen

In Zusammenarbeit mit der Interessengemeinschaft für historische Militär-, Industrie- und Verkehrsbauten (IMIV) und dem Verein „Unter Hamburg e.V.“⁵ konnten weitere Informationen zu den Hamburger Bunkeranlagen beschafft werden. Die IMIV betreibt seit einigen Jahren ein eigenständiges Netzwerk aus privaten Geschichtsforschern in ganz Deutschland, die sich mit der militärischen Vergangenheit Deutschlands auseinandersetzen. Im Zuge dessen wurde vor vier Jahren eine Datenbank erstellt, die einen Teil der bestehenden Bunkeranlagen in Deutschland erfasst und fortlaufend aktualisiert wird. Die Informationen über die einzelnen Standorte werden in der Regel von Privatpersonen ermittelt und mit Fotos dokumentiert. In der Datenbank sind Angaben enthalten, wie Adresse, Bunkertyp und Eigentümer sowie aktuelle Nutzung, Schutzplätze und Stand der Informationen. Bei neuen Informationen zu einem bereits erfassten Standort werden diese aktualisiert, wodurch die Datenbank stets aktuell gehalten wird. Die Datensammlung umfasst dabei ausschließlich öffentliche und halböffentliche Zivilschutzanlagen. Kleine private Schutzräume o.ä. sind nicht enthalten. Zu beachten ist zudem, dass sowohl Hoch- als auch Tiefbunker in die Liste aufgenommen werden. Für Hamburg enthält die Datenbank bisher insgesamt 115 Einträge. Diese Daten werden in die erstellte Datenbank übertragen. In der Abbildung 3.4 sind die Standorte dieser Bunkeranlagen als grobe Übersicht dargestellt. Deutlich zu erkennen ist hier bereits, dass sich der Großteil der Gebäude im Zentrum der Stadt befindet, was für die Konversion von Energiebunkern sehr vorteilhaft ist.



Abbildung 3.4.: Standortabhängige Verteilung von Zivilschutzanlagen in Hamburg (Auszug aus einer Datenbank der IMIV) [IMI13]

⁵Website: <http://www.unter-hamburg.de/>



3. Auswahl und Konversion der Bunkeranlagen

Der Verein „Unter Hamburg e.V.“ befasst sich mit der Erforschung und Dokumentation sowie der kritischen und wissenschaftlichen Aufarbeitung der Geschichte unterirdischer Bauwerke in Hamburg. Mit dessen Hilfe konnten die Schriftstücke „Schriftliche kleine Frage“ zum Thema der öffentlichen Zivilschutzbunker zwischen den Jahren 1999 und 2010, die die Bürgerschaft der FHH an den Senat gestellt hat, beschafft werden. Diese enthalten weitere Informationen zu Bunkeranlagen in Hamburg, mit der Angabe von Adresse, Bunkertyp und der aktuellen Nutzung. Die Daten werden in die bestehende Datenbank eingepflegt und bei Übereinstimmungen zusammengefügt. Dabei ist stets der aktuellste Stand der Informationen ausschlaggebend. Insgesamt können somit 44 weitere Bunkerstandorte hinzugefügt werden, die zum Großteil der Kategorie Klotzbunker zuzuordnen sind.

Das gleiche Verfahren wird auf die Informationen aus der BSU-Datenbank angewendet (siehe Kapitel 3.2.1). Dazu werden die 234 Einträge ebenfalls in die Datenbank übertragen und Übereinstimmungen in den bestehenden Datensatz integriert, so dass effektiv 86 weitere Objekte hinzugefügt werden können. Da bei diesen Objekten weder der Gebäudebestand noch die Verwendung bekannt ist, müssen diese durch eine Online-Recherche verifiziert werden. Die Standorte der Objekte werden mit der frei zugänglichen Software Google Maps⁶ überprüft (Kartendaten aus Hamburg Stand 2009) und zusätzliche Informationen wie bspw. die derzeitige Verwendung aus dem Internet bezogen. Alle abgebrochenen Gebäude der 245 Einträge werden aus der Liste entfernt.

Tabelle 3.1.: Ausschnitt aus der neuerstellten Datenbank für Konversionseigenschaften von ausgewählten Hamburger Zivilschutzgebäuden

Nr.	Objekt	Postleitzahl	Ort	Bunkertyp	Eigentümer	Aktuelle Nutzung	Stand	Fotos	Schutzplätze	Details/Bemerkungen
10	Alsterdorfer Str. 234	22297	Hamburg	HB/TuB		Abgebrochen	2013			
11	Alsterkrugchaussee 382-396	22337	Hamburg	SR		Kellerräume (OZSB)	18.02.2013	x	200	Details
12	Alte Wöhr 20b	22307	Hamburg	TB/HB/RöB	FHH	Leerstand - Noch nicht endgültig entschieden	20.01.2009		90	OZSB
13	Altenwerder Damm 10	21129	Hamburg	TB	FHH	Leerstand wegen Zivilschutzvorhaltung	12.04.2011	x	100	Details
14	Altenwerder Damm 12	21129	Hamburg	TB	FHH	Leerstand wegen Zivilschutzvorhaltung	17.08.2012	x	198	Details
15	Am Paris	22519	Hamburg	SSR		Komplex der Geschwister-Scholl-Gesamts	09.02.2013	x	700	Details
16	Am Holthusenkaai	20457	Hamburg	TB		Abgebrochen 2001	20.11.2012	x	102	Details
17	An der Baumschule 3/5	22415	Hamburg	HB/RuB		Lage nicht verifiziert; Befindet sich auf Pri	2013			
18	An der Rennkoppel	21075	Hamburg	SSR		Pflegeheim Heimfeld; keine entgeltliche Veri	12.02.2011	x	50	Details
19	Anemonenweg 17/Voßkuhlen	22047	Hamburg	HB	FHH	Abgebrochen	2013			OZSB
20	Archenholzstr. 87	22117	Hamburg	TB/SR	FHH/P	Keller einer Wohnanlage; MZSB	24.01.2011	x	50	Details
21	Argentinienbrücke	20457	Hamburg	TB	FHH	Leerstand wegen Zivilschutzvorhaltung	05.04.2011	x	158	Details
22	Arnoldstr. 20	22765	Hamburg	HB	FHH	Abgebrochen 2010	18.12.2010	x	1701	Details
23	Barmbeker Str. /Grasweg	22303	Hamburg	TB/RöB	FHH	Leerstand	02.03.2010			OZSB
24	Barmwisch	22179	Hamburg	SSR		Schutzraum des Gymnasium Osterbek	11.01.2013	x	700	Details
25	Barnerstr. 14	22765	Hamburg	HB	FHH	Leerstand wegen Zivilschutzvorhaltung	18.12.2010	x	958	Details
26	Bauerberg 43	22111	Hamburg	HB/RuB	FHH	Leerstand	02.03.2010		123	OZSB

Insgesamt beinhaltet der erste Entwurf der Datenbank zu diesem Zeitpunkt 217 Zivilschutzbauten in Hamburg. Ein Ausschnitt der Datenbank mit allen darin enthaltenen Informationen ist in der Tabelle 3.1 abgebildet.

⁶Website: <http://www.google.de/maps/>



3.2.3. Bewertung und Vorauswahl der Zivilschutzbauten

Die 217 Bunkeranlagen werden im Folgenden einer 3-stufigen Bewertung unterzogen. Wobei die Bewertungsstufen untereinander in Abhängigkeit stehen. Innerhalb der ersten Stufe wird das Potenzial des Gebäudes bzw. des Bunkers selbst beurteilt. Vier Kategorien bilden die Grundlage für eine Beurteilung, die mit abnehmendem Potenzial verschiedenen Kriterien unterliegen. Dazu gehören:

1. Hohes Potenzial:

- Kein Abbruch/Nicht verkauft/Keine geplante Konversion
- Originalzustand des Gebäudes bzw. kein Umbau für Umnutzung o.ä.
- Leerstand oder vorübergehende Nutzung
- Hochbunker (Klotz- oder Zombeck-Bunker)
- Schutzplatzanzahl > 500 (falls vorhanden)
- Eigentümer FHH oder Bund

2. Potenzial mit einigen Einschränkungen:

- Kein Abbruch/Nicht verkauft
- Originalzustand des Gebäudes bzw. kein Umbau für Umnutzung o.ä.
- Vorübergehende Nutzung oder Teilnutzung
- Hochbunker (Klotz-, Zombeck-, oder Rundbunker auf öffentlichem Gelände)
- Schutzplatzanzahl > 200 (falls vorhanden)
- Eigentümer FHH, Bund oder Privat

3. Potenzial mit vielen Einschränkungen:

- Kein Abbruch
- Teilnutzung
- Hochbunker (Klotz-, Zombeck-, oder Rundbunker auf privatem Gelände)
- Keine/Wenig Informationen

4. Kein Potenzial

POTENZIALANALYSE

Ermittlung des Wärmespeicherpotenzials innerstädtischer Bunkeranlagen zum Aufbau eines Wärmespeicher-Netzwerkes als Baustein für das Forschungsprojekt "Smart Power Hamburg"

3. Auswahl und Konversion der Bunkeranlagen

Tabelle 3.2.: Verteilung der Anzahl von Objekten in Potenzialkategorien nach den Kriterien für die Gebäudebewertung

Hohes Potenzial	Potenzial mit einigen Einschränkungen	Potenzial mit vielen Einschränkungen	Kein Potenzial
33	25	77	82

Jedes einzelne Objekt wurde nach Abschätzung der Kriterien einer jeweiligen Kategorie zugeordnet. Daraus ergibt sich folgende Verteilung für die Anzahl der Bunker:

In die zweite Bewertungsstufe werden nur Bunker der 1. und 2. Kategorie übernommen. Dazu werden die insgesamt 58 Objekte hinsichtlich ihres Standortes bewertet. Da der Energiebunker zwingend mit dem Wärmenetz der Stadt Hamburg interagieren muss, ist das Vorhandensein einer Fernwärmeleitung in unmittelbarer Nähe zwingend erforderlich. Das gilt im Prinzip auch für das Gas- und Stromnetz, jedoch müssen aufgrund von strikteren Einspeisebedingungen diese im Einzelfall mit dem zuständigen Netzbetreiber geklärt werden. Auch für das Wärmenetz gelten Regularien wie bspw. das Druckstufenniveau, um einen Anschluss gewährleisten zu können. Für diese Detailstufe wird jedoch angenommen, dass innerhalb des Netzverbundes an jeder Stelle eingespeist werden kann.

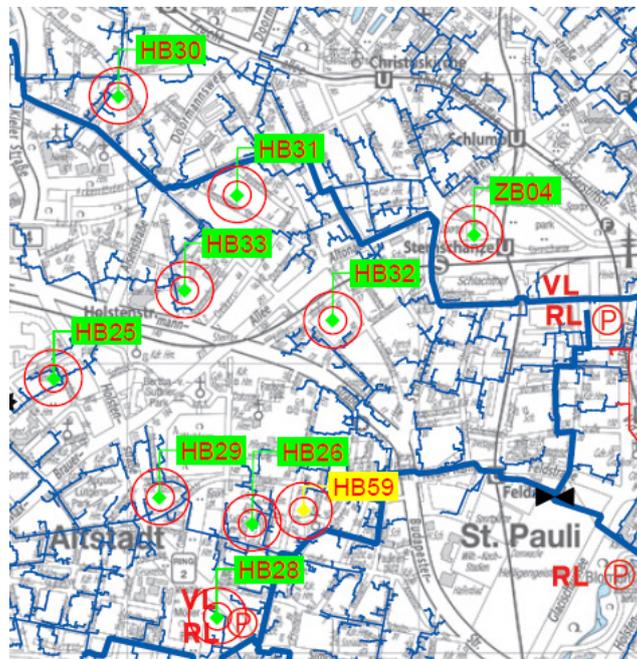


Abbildung 3.5.: Ausschnitt aus der Wärmenetzkarte von Hamburg mit Bunkerstandorten und Entfernungsradien von 50 und 100 Metern



Die Standorte der 58 Bunkeranlagen werden in den Wärmenetzplan der Vattenfall Europe Wärme GmbH (VEW) eingezeichnet und mit einem festen Abstandsring von 100 und 200 Metern Durchmesser markiert (siehe Abbildung 3.5). Die gesamte Karte befindet sich im Anhang. Da keinerlei Ansätze vorhanden sind, ab welcher Entfernung eine Anbindung zwischen Bunker und Wärmenetz unabhängig von der Verkehrsführung problematisch werden kann, wird pauschal ein Umkreis von 50 und 100 Metern ausgehend vom Bunkerstandort angenommen. Der Abstand kann zwar auch größer gewählt werden, jedoch erhöht sich dementsprechend die Wahrscheinlichkeit, dass zum einen größere Verkehrswege überquert und Gebäude umgangen werden müssen und zum anderen steigen die Baukosten und damit das wirtschaftliche Risiko erheblich, je größer der Aufwand für eine schwierige Anbindung ist. Hinzu kommen weitere Bewertungskriterien, die teilweise das Entfernungskriterium relativieren. Diese sind:

1. Hohes Potenzial:

- Wärmenetz im Umkreis von max. 50 Metern
- Anbindung an Hauptnetz möglich oder keine Anbindung am Ende eines Verteilnetzes notwendig
- Keine Querung großer Verkehrswege (Hauptstraßen, Schienennetz usw.) oder Gebäude

2. Eingeschränktes Potenzial:

- Wärmenetz im Umkreis von max. 100 Metern
- Anbindung an Hauptnetz oder Verteilnetz
- Querung großer Verkehrswege oder Gebäude notwendig

3. Kein Potenzial

Auch in diesem Fall werden die Bunker nach den entsprechenden Kriterien bewertet und einer Kategorie zugeordnet. Da das Wärmenetz der VEW relativ engmaschig vernetzt ist und sich der Großteil der Bunker im inneren Stadtgebiet befindet, weisen insgesamt 23 Objekte ein hohes Standortpotenzial auf. Die weitere Verteilung ist in der Tabelle 3.3 dargestellt. In der letzten Bewertungsstufe werden die beiden Bewertungskategorien Bunker und Standort miteinander kombiniert. Ausschlaggebend ist das Potenzial der schlechter bewerteten Kategorie. Das bedeutet, ein Bunker, der in der Bunkerbewertung zwar ein hohes Potenzial aufweist aber dessen Standort nur bedingt nutzbar ist, wird insgesamt mit einem eingeschränkten Potenzial bewertet.

Die Tabelle 3.3 fasst die Anzahl der potenziellen Bunker aller Bewertungskategorien zusammen, wobei die 3. und 4. Kategorie der Bunkerbewertung addiert werden.



Tabelle 3.3.: Einordnung der Zivilschutzgebäude in Potenzialkategorien für die Standortbewertung

	Hohes Potenzial	Eingeschränktes Potenzial	Kein Potenzial
Bunker	33	25	159
Standort	23	11	24
Kombiniert	16	18	24

Insgesamt 16 Zivilschutzbunker weisen nach dieser ersten Selektion ein hohes und 18 ein eingeschränktes Potenzial für eine Konversion zu einem Energiebunker auf (siehe Anhang A.0.2).

3.3. Auswahl und Beschreibung geeigneter Konversions-Bunker

Die bisher durchgeführten Bewertungsschritte ermöglichen eine erste Grobauswahl der potenziellen Bunkeranlagen hinsichtlich der Eignung des Gebäudes und des Zugangs zum Wärmenetz. Für eine weitergehende statische und dynamische Analyse des Bunkernetzwerkes müssen diese Informationen mit aktuellen Daten verifiziert werden und Aussagen über die Gebäudeabmessungen sowie die Anbindung an das Strom- und Erdgasnetz getroffen werden.

Es werden ausschließlich die Zivilschutzbauten betrachtet, die in der vorangegangenen Bewertungsebene ein hohes Potenzial aufweisen. Im weiteren Verlauf des Projektes „Smart Power Hamburg“ bestünde auch die Möglichkeit, die Gebäude der Kategorie „Eingeschränktes Potenzial“ einer detaillierteren Prüfung zu unterziehen. Um die hierfür notwendigen Informationen zu erhalten, ist es jedoch erforderlich, sich mit den zuständigen Behörden und Unternehmen in Verbindung zu setzen. Die Herausgabe von Daten beruht dabei meist auf freiwilliger Basis und ist häufig kostenpflichtig. Für die Akteneinsicht im Staatsarchiv⁷ der FHH werden bspw. Gebühren verlangt. Aus diesem Grund sollte die Anzahl der angefragten Bunkeranlagen möglichst gering gehalten werden.

3.3.1. Verifizierung des Nutzungsstatus der Bunkeranlagen und Beschaffung von standort- und gebäudetechnischen Daten

Insgesamt 10 der 16 Bauwerke mit hohem Potenzial sind Eigentum des Bundes und werden von der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben (BImA) verwaltet. Auf An-

⁷Website: <http://www.hamburg.de/staatsarchiv/>



frage an die zuständige Stelle der BImA wurden Exposés für 6 zum Verkauf stehende Objekte übermittelt [Kar14]. Die restlichen 4 Bunkeranlagen werden für den Verkauf vorbereitet, sobald die Zivilschutzbindung für diese Gebäude offiziell aufgehoben ist. Die meisten Klotzbunker stehen derzeit leer oder werden vorübergehend teilweise und befristet als Lager von kleineren Unternehmen genutzt. Das Exposé liefert eine Vielzahl an notwendigen und aktuellen Informationen hierzu. So werden neben der Anzahl der Ebenen auch die Länge, Breite und Höhe der Außenabmessungen sowie die Wand- und Deckenstärke genannt. Relevante zusätzliche Informationen wie die Dicke der Innenwände und Zwischendecken sowie die Flurstück- und Bruttogeschossflächen werden ebenfalls in die hier erstellte Datenbank übernommen. Ebenfalls von Bedeutung für die Umsetzbarkeit des Vorhabens sind die umliegende Bebauung und die angrenzenden Gebäude. Mithilfe von Bauskizzen, Fotos und Flurstückzeichnungen aus dem Exposé werden auch diese Informationen übernommen. Dabei befindet sich ein Großteil der Bunker in Wohngebieten, wo die Gebäude meist frei stehen oder mit maximal einer Außenwand an umliegende Gebäude angrenzen. Eine Beurteilung der 6 zum Verkauf stehenden Bunkeranlagen lassen den Schluss zu, dass diese für eine Konversion als Energiebunker geeignet sind und in die Konzeption des Bunkernetzwerkes übernommen werden können.

Die Informationen zu den übrigen 4 Zivilschutzgebäuden des Bundes und zu 5 weiteren, die im Besitz der FHH bzw. in einem Fall in Privathand sind, müssen mithilfe der jeweiligen Bezirksämter und Landesbehörden ermittelt werden. Für Daten zu Bunkeranlagen, die sich in den Bezirken Altona, Wandsbek, Nord und Mitte befinden, wurde im Rahmen dieser Studie eine Anfrage an die Fachämter für Stadt- und Landschaftsplanung der jeweils zuständigen Bezirksämter geschickt. Lediglich die Abteilungen für Bauprüfung der Bezirke Wandsbek und Altona gaben Auskunft über die vorhandenen Objekte. Allerdings waren diese Informationen nicht aktuell und zum Teil unvollständig. Mithilfe des Bezirksamtes Altona konnte jedoch ein Kontakt zum Landesbetrieb Immobilienmanagement und Grundvermögen Hamburg (LIG) hergestellt werden (Vgl. [Kuh14]). Die Abteilung für Flächen- und Portfoliomanagement konnte konkrete Aussagen über die derzeitige und zukünftige Nutzung der 5 Zivilschutzgebäude der FHH und dem privaten Bunker geben. Drei der Objekte wurden bereits für den Wohnungsbau veräußert und werden in absehbarer Zeit abgebrochen. Der einzige Zombeck-Bunker aus der Liste wurde unter Denkmalschutz gestellt und neu vermietet. Eine weitere Bunkeranlage befindet sich auf dem Kultur- und Mediacampus Finkenau und wird von der Behörde für Wissenschaft und Forschung verwaltet und genutzt. Die Verkaufsabsichten für das Objekt in Privatbesitz wurden bereits von der LIG erfragt. Jedoch wird dieser Bunker von dem Eigentümer als Lager genutzt und steht nicht zum Verkauf. Das bedeutet, alle 6 genannten Bunker stehen nicht für eine Konversion zur Verfügung und müssen aus der Liste



3. Auswahl und Konversion der Bunkeranlagen

entfernt werden. Somit kann davon ausgegangen werden, dass bis dato die Voraussetzungen für eine Nutzung als Energiebunker für insgesamt 10 Bunkeranlagen, die ausschließlich dem Bund gehören, gegeben sind.

Für detaillierte Informationen zu den verbleibenden 4 Gebäuden, die noch nicht Bestandteil eines Verkaufsprozesses der BImA sind, wurde sich an die Behörde für Inneres und Sport Hamburg (BIS) gewandt (Vgl. [Lem14]). Die BImA selbst konnte zum Zeitpunkt der Recherche keine Daten herausgeben. Aus dem Archiv der Abteilung für Öffentliche Sicherheit, Brand- und Bevölkerungsschutz der BIS wurden jedoch Akten zur Verfügung gestellt, die bei einem Vor-Ort-Termin auf relevante Informationen geprüft wurden. Neben unzähligen Bauzeichnungen konnten alle benötigten Daten, wie z.B. die Abmessungen, Wand- und Deckenstärke, der 4 Objekte herausgefiltert und anschließend in die Datenbank eingepflegt werden.

Tabelle 3.4.: Zusammenfassung aller konversionsfähigen Bunkeranlagen mit Informationen zu Standort, Nutzung und Abmessungen

Nr.	Objekt	Bezirk	Eigentümer	Aktuelle Nutzung	Ebenen	Abmessungen					Grundfläche [m²]	Flurstückfläche [m²]	Umbauung
						Länge [m]	Breite [m]	Höhe [m]	Wand [m]	Decke [m]			
1	Nebendahlstraße 22	Wandsbek	B	Leerstand, (Sekundär:	7	18	18	20	1,1	1,4	324	535	Freistehend;
2	Börnstraße 22	Wandsbek	B	Leerstand	7	22	18	20	1,1	1,4	375	762	3 Seiten
3	Eilbeker Weg 94	Wandsbek	B	Leerstand; Verkaufsversuch	7	18	18	20	1,1	1,6	375	660	Freistehend;
4	Papenstraße 137	Wandsbek	B	Leerstand	7	18	18	20	1,1	1,4	350	654	Freistehend;
5	Wielandstraße 23-28	Wandsbek	B	Leerstand	7	43	18	21	2,5	2,5	746	1.249	3 Seiten
6	Habichtstraße 37	Nord	B	Leerstand, (Sekundär: Lager	7	18	18	22	1,1	1,4	324	852	Freistehend;
7	Behringstraße 38	Altona	B	Leerstand, (Sekundär: Kleide	7	24	15	21	1,1	1,6	360	675	3 Seiten
8	Holstenstraße 75a	Altona	B	Leerstand, (Sekundär: Lager	7	23	20	22	1,1	1,4	460	1.058	3 Seiten
9	Eimsbütteler Straße 135	Altona	B	Leerstand, (Sekundär: Lager	6	31	13	20	1,1	1,4	403	939	3 Seiten
10	Missundestraße 10-12	Mitte	B	Leerstand, (Sekundär: Lager	7	22	20	21	1,1	1,4	440	551	2 Seiten

Die Tabelle 3.4 fasst alle 10 konversionsfähigen Bunkeranlagen, die ausschließlich aus dem Typ Klotzbunker bestehen, zusammen und beschreibt sowohl die standort- und nutzungsspezifischen Faktoren als auch die Gebäudeabmessungen, Grundflächen und Umbauung der Gebäude.

3.3.2. Bewertung der Erdgas- und Stromnetzinfrastruktur für die Bunkerauswahl

In dem vorangegangenen Kapitel wurde das Potenzial für eine Anbindung an das Hamburger Wärmenetz bewertet. Wie es sich mit dem Erdgas- und Stromnetz verhält, soll in diesem Abschnitt erläutert werden. Grundsätzliches zum Aufbau des Erdgasnetzes und warum eine direkte Anbindung des Energiebunkers an das Gasnetz sinnvoll ist, wurde in Kapitel 2.3.3 erläutert. Da ein Anschluss an das Netz mit einer Vielzahl an Restriktionen verbunden ist, wurde der Kontakt zum Gasnetzbetreiber Hamburg Netz GmbH (HHN) hergestellt [Har14]. Der zuständige Leiter für Netzkundenbetreuung und Planung/Bau benötigte als Input neben dem Standort



auch die maximale Versorgungsleistung, um eine generelle Aussage über das Anbindungspotenzial geben zu können. Da zu diesem Zeitpunkt noch keine Angaben zur Systemkonfigurationen der Energiebunker und zu den installierten Leistungsklassen gemacht werden konnten, wurde eine Gesamtfeuerungsleistung für die BHKW und HWE von 10 MW pro Standort angenommen. Diese basieren auf den Lastdaten des Fernwärmenetzes fuer das Bezugsjahr 2012 mit einer maximalen thermischen Übertragungsleistung von 1290 MW (Vgl. [Spe12]). Nimmt man als Ansatz, dass sich diese Leistung auf die angenommenen 150 NW-Netze gleichmäßig verteilt, so erhält man eine Wärmelast von 8,6 MW pro Verteilnetz. Geht man weiterhin davon aus, dass ein Großteil der Wärme durch HWE erzeugt werden kann und diese einen Wirkungsgrad von rund 90 % aufweisen, ist im Maximalfall mit einer Feuerungsleistung von rund 10 MW zu rechnen. In der Realität besitzen die NW-Netze aufgrund ihrer unterschiedlichen Größe und Wärmeabnehmer sehr differente Versorgungsleistungen. Für eine erste Abschätzung ist die getroffene Annahme jedoch ausreichend.

Anhand der Standorte und den angenommenen Einspeiseleistungen, wurde von der HHN eine generelle Verfügbarkeit an das Erdgas-Hochdrucknetz für jeden Bunkerstandort abgeschätzt. Da das Hochdrucknetz nicht so engmaschig vernetzt ist wie das Wärmenetz, bestimmen hier insbesondere die Entfernungen zum nächstliegenden Einspeisepunkt den Aufwand und damit das Potenzial für eine Netzanbindung. Dazu wurde von der HHN sowohl eine Hochdruck-Netzkarte zur Verfügung gestellt als auch Angaben zur Entfernung zwischen den Bunkern und der nächsten Übergabestation gemacht. In Abbildung 3.6 sind alle 10 Standorte markiert und analog zum Wärmenetz mit Entfernungsringsen versehen. Da wie bereits erwähnt das Hochdrucknetz weitmaschig verläuft, müssen hier andere Entfernungsmaßstäbe angesetzt werden, als es bei dem Wärmenetz der Fall war. So gilt für den Standort ein hohes Potenzial, sollte sich im Umkreis des Bunkers von 500 Metern ein Netzanschluss befinden. Eine Aussage zur Querung von großen Verkehrswegen oder Gebäuden oder kann aufgrund der geringen Auflösung der bereitgestellten Netzkarte nur bedingt getroffen werden. Sollten sich jedoch besonders große Straßen, Bahnhöfe etc. zwischen dem Netzanschlusspunkt und dem Bunker befinden, die aus der Karte ersichtlich sind, werden diese in einer Kategorie berücksichtigt, die ein geringeres Potenzial ausweist. In diesem Sinne wurde eine zweite Bewertungskategorie mit eingeschränktem Potenzial eingeführt, die eben die Leitungsführung und den nächstgelegenen Netzanschlusspunkt zwischen 500 und 1.000 Metern berücksichtigt. Sollten die Bedingungen keiner der beiden Kategorien zugeordnet werden können, so wird der Standort hinsichtlich des Gasnetzanschlusses als „Kein Potenzial“ bewertet.

Aus der abgebildeten Karte wird ersichtlich, dass sich bei allen 10 Bunkerstandorten innerhalb eines 1.000 Meter Radius ein Hochdrucknetz befindet. Bei lediglich

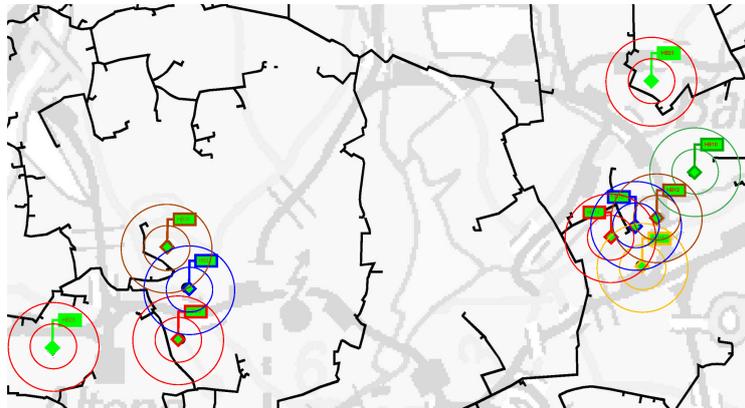


Abbildung 3.6.: Kartenausschnitt für Erdgas-Hochdruckleitungen in Hamburg mit Bunkerstandorten und Entfernungsradien von 500 und 1.000 Metern

3 Standorten ist die Versorgungsleitung mehr als 500 Meter entfernt, die somit ein eingeschränktes Potenzial aufweisen. Die übrigen 7 Objekte sind zwischen 70 und 500 Metern von dem Hochdrucknetz entfernt und weisen demzufolge ein hohes Potenzial für einen Gasnetzanschluss auf.

In einem letzten Schritt muss nun noch das Potenzial für eine Anbindung der BHKW in das bestehende Stromnetz ermittelt werden. Die BHKW speisen aufgrund der Leistungsklasse im MW-Bereich in das Mittelspannungsnetz der Stadt Hamburg ein. Nähere Informationen dazu wurden bereits in Kapitel 2.3.2 beschrieben. Um die Anschlussbedingungen einschätzen zu können, wurde sich mit dem Netzbetreiber Stromnetz Hamburg GmbH (SNHH) in Verbindung gesetzt [Nof14]. Die Abteilung Distribution für Mid & Low Voltage Hamburg benötigte analog zur Gasnetzanbindung ebenfalls die Standorte und die voraussichtlichen Einspeiseleistungen der Energiebunker. Ausgehend von der zuvor angenommenen Brennstoffleistung von 10 MW und einem durchschnittlichen elektrischen Wirkungsgrad der BHKW von 40 %, wurde eine maximale elektrische Leistung von 4 MW pro Standort angegeben. In der Regel sind ähnlich dem Gas- und Wärmenetz weitaus mehr technische Daten der Erzeuger notwendig, um eine verlässliche Aussage über die Anschlussbedingungen geben zu können. Wie bereits erwähnt, sind diese jedoch für eine grobe Potenzialabschätzung nicht von Bedeutung. Aus diesem Grund mussten von der SNHH neben der Einspeiseleistung weitere Annahmen getroffen werden. So wurden bspw. ein maximaler Kurzschlussstrom von 450 A und eine maximale Spannungsanhebung am Netzanschlusspunkt von 2 % mit dem Kabel-Typ *Al120* angenommen. Die Einschätzung des Anbindungspotenzials selbst wurde vollständig von der SNHH vorgenommen und als Bewertungsmatrix mit einer Einteilung in 5 Kategorien ausgegeben, die das Potenzial mit „Sehr gut“ bis „Sehr schwierig“ bewerten. Sehr schwierig ist die Anbindung an keinem Standort, d.h. prinzipiell ist an allen Stand-

POTENZIALANALYSE

Ermittlung des Wärmespeicherpotenzials innerstädtischer Bunkeranlagen zum Aufbau eines Wärmespeicher-Netzwerkes als Baustein für das Forschungsprojekt "Smart Power Hamburg"

3. Auswahl und Konversion der Bunkeranlagen

orten ein Anschluss an die bestehenden Ringe des Mittelspannungsnetzes möglich. Ausgehend von der Entfernung zur nächsten Netzstation und von den genannten Restriktionen ergibt sich folgende Verteilung der Bunkeranzahl (Tabelle 3.5).

Tabelle 3.5.: Einschätzung des Potenzials der Bunkerstandorte für die Anbindung an das Mittelspannungsnetz

++	sehr gut	3
+	gut	3
0	neutral	2
-	schwierig	2
--	sehr schwierig	0

In der eigenen Datenbank wurden die Kategorien „Sehr gut“ und „Gut“ zu der internen Bewertungskategorie „Hohes Potenzial“ zusammengefasst. Gleiches gilt für die Kategorie „Eingeschränktes Potenzial“, die die neutrale und schwierige Netzanbindung verknüpft.

Tabelle 3.6.: Zusammenfassung der Bewertung für die Anbindung der Bunkergebäude an die Netzinfrastruktur

Nr.	Objekt	Bunkertyp	Eigentümer	Karten-bez.	Bewertung Wärmenetz	Bewertung Gasnetz	Bewertung Stromnetz
1	Nebendahlstraße 22	HB	B	HB10		500m	0
2	Börnestraße 22	HB	B	HB12		550m	-
3	Eilbeker Weg 94	HB	B	HB13		350m	++
4	Papenstraße 137	HB	B	HB15		900m	++
5	Wielandstraße 23-28	HB	B	HB16		200m	+
6	Habichtstraße 37	HB	B	HB21		300m	++
7	Behringstraße 38	HB	B	HB23		550m	+
8	Holstenstraße 75a	HB	B	HB29		70m	+
9	Eimsbütteler Straße 135	HB	B	HB30		250m	-
10	Missundestraße 10-12	HB	B	HB33		500m	0

In der Tabelle 3.6 werden die Bewertungen zur Netzinfrastruktur aller 10 Objekte zusammengefasst. Deutlich wird hier, dass lediglich 4 der bewerteten Bunkeranlagen gute Bedingungen sowohl für den Erdgas- als auch Stromnetzanschluss bieten. Bei den restlichen Gebäuden ist zwar prinzipiell eine technische Umsetzbarkeit gegeben, jedoch wären der Aufwand und damit die Kosten unverhältnismäßig hoch.

3.3.3. Speicherkapazität des Energiebunker-Netzwerkes

Nachdem nun bekannt ist, welche ehemaligen Zivilschutzbauwerke ein potenzielles Energiebunker-Netzwerk bilden können, stellt sich die Frage wie viel Wärmespeicherkapazität das Netzwerk maximal bereitstellen kann. Im Folgenden wird die Ermittlung der Speicherkapazität am Beispiel des Klotzbunkers „Eilbeker Weg 94“





(Zeichnungsnummer HB10) beschrieben, der in allen überprüften Kategorien ein außerordentlich hohes Potenzial aufweist und im weiteren Verlauf als Standardbunker bezeichnet wird.

Zunächst muss bekannt sein, welche Abmessungen der Speichertank im Innern des Bunkers haben darf. Ziel ist es, das Speichervolumen unter Berücksichtigung der technischen Anforderungen zu maximieren. Zu den Anforderungen zählen bspw. die Wahl und Stärke der Dämmmaterialien sowie einzuhalten Mindestabstände zwischen einzelnen Tanks und den Seiten- und Deckenwänden. Die Speichergröße wird hauptsächlich durch die Bunkergeometrien begrenzt. Die Abmessungen der Gebäude sind bereits aus Kapitel 3.3.1 bekannt. Der Standardbunker selbst besitzt Außenabmessungen von $20 \times 18 \times 18 \text{ m}$ (HxLxB) sowie eine Wanddicke von $1,1 \text{ m}$ und eine Deckenstärke von $1,6 \text{ m}$. Geht man davon aus, dass es bautechnisch möglich wäre, sämtliche Zwischenwände und -decken im Innern des Gebäudes zu entfernen, so ergibt sich daraus ein Nettoinnenvolumen von $4.593 \text{ Kubikmetern}$. Dazu subtrahiert man die Wand- und Deckenstärke von den Außenabmessungen und multipliziert diese miteinander.

Der Standardbunker ist quaderförmig aufgebaut und besitzt Anbauten an den zwei Seiten des Gebäudes, die ursprünglich als Eingangsschleusen dienten. Diese werden nicht mit betrachtet, allerdings bieten sie zusätzlichen Raum für bspw. BHKW, HWE oder Pumpen. Wie in Kapitel 2.2.1 bereits beschrieben wurde, wird für die Speichertanks eine klassische zylinderförmige Stahlkonstruktion empfohlen. In der Regel besitzen diese aus Gründen der Statik ein Kuppeldach, was insbesondere bei hohen Druckanforderungen eine große Bedeutung hat. Da es sich in diesem Fall um eine erste Abschätzung handelt und der Speicher als drucklose Variante ausgelegt wird, wird der Tankdeckel als eben angenommen werden. Die Auswirkungen in Bezug auf die Speicherkapazität sind ohnehin vernachlässigbar klein.

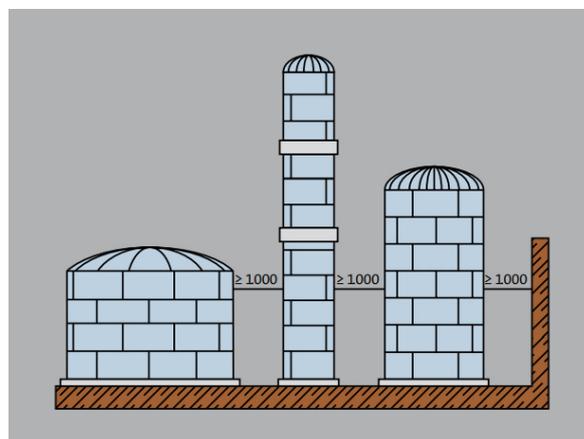


Abbildung 3.7.: Mindestabstände für Speichertanks zwischen Kolonnen, Behältern und Wänden [Ind14]



Der kürzeste Abstand zwischen zwei gegenüberliegenden Seiten des Gebäudes bestimmt den maximalen Außendurchmesser des Tanks. Der tatsächliche Durchmesser ist jedoch auch von dem Mindestabstand zwischen Tank und Wand oder zwischen mehreren Tanks abhängig (siehe Abbildung 3.7). Die DIN 4140 schreibt einen Mindestabstand von 1 Meter vor, der in diesem Fall so übernommen wird (Vgl. [Ind14]). In der Realität würde sicher der Abstand etwas größer gewählt werden, da insbesondere auch mögliche Baumaßnahmen im Innern des Bunkers den Abstand bestimmen.

Im Falle des Standardbunkers ergibt sich bei einem minimalen Wandabstand von 15,8 m ein Außendurchmesser des Tanks von 13,8 m. Die Grundfläche des Innenraumes ist annähernd quadratisch, was dazu führt, dass nur ein Tank in das Gebäude installiert werden kann. Vereinzelt Bunkeranlagen haben allerdings auch eine rechteckige Grundfläche, so dass in diesem Fall mehrere Speichertanks nebeneinander angeordnet werden, um das vorhandene Raumvolumen maximal als Speichervolumen nutzen zu können.

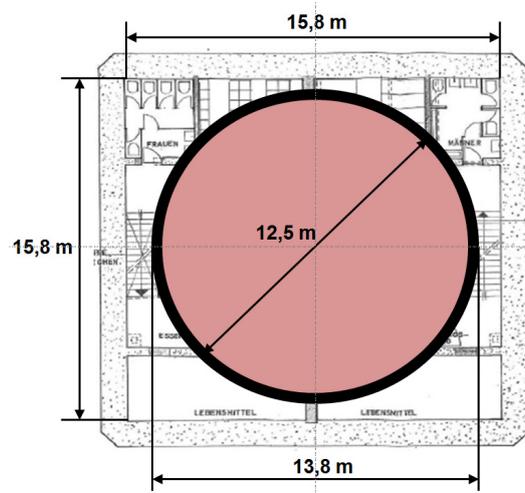


Abbildung 3.8.: Draufsicht und Abmessungen des Bunkergebäudes und des Wärmespeichers mit Dämmung

In Abbildung 3.8 ist eine Draufsicht mit den Abmessungen des Bunkergebäudes und des Wärmespeichers dargestellt. Der Innendurchmesser des Tanks, der u.a. das eigentliche Speichervolumen vorgibt, ist von der Schichtdicke der Dämmung und der Wandstärke des Stahlbehälters abhängig. Letztere ergibt sich aus den Druckverhältnissen am Boden sowie den Temperaturwechselbeanspruchungen innerhalb des Tanks. Aus statischen und drucktechnischen Gründen nimmt die Wandstärke des Tanks im Allgemeinen mit der Höhe ab. Als Vereinfachung wird an dieser Stelle eine konstante Wandstärke über die gesamte Fläche angenommen. Aus vergleichbaren Wärmespeicherprojekten, die in der Regel als Fernwärmespeicher ausgelegt sind



und ähnliche Abmessungen aufweisen, wurde eine gängige Wandstärke von 160 mm und eine Dämmschichtdicke von $0,5\text{ m}$ übernommen [GL13, S. 13]. Abzüglich dieser Werte vom maximalen Außendurchmesser ergibt sich eine Tankinnendurchmesser von $d_{Sp} = 12,5\text{ m}$.

Die Tankhöhe wird analog zum Durchmesser bestimmt (siehe Abbildung 3.9). Allerdings beträgt hier der Mindestabstand zwischen Bunkerdecke und Tankdeckel 2 m , wodurch sichergestellt wird, dass die Baumaßnahmen am oberen Tankbereich nicht aufgrund von Platzmangel behindert werden. Anders als beim Wandabstand begrenzt hier die gesamte Deckenfläche den Abstand zum Tank.

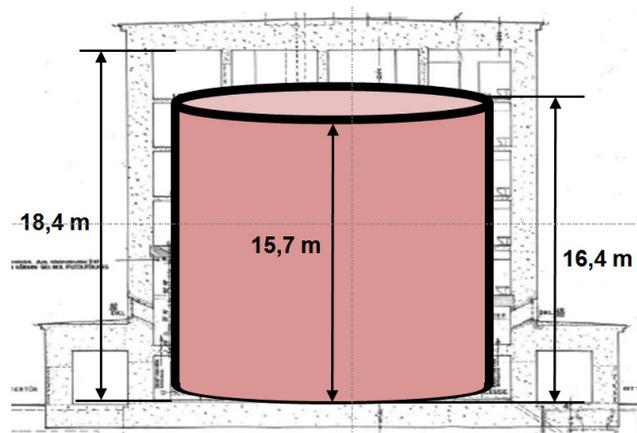


Abbildung 3.9.: Seitenansicht und Abmessungen des Bunkergebäudes und Wärmespeichers

Eine Dämmung, die in der Regel aus Fasern besteht, wird in der Regel in dieser Größenordnung aus konstruktionsbedingten Gründen nicht am Behälterboden angebracht. Der Stahltank steht direkt auf dem Betonfundament des Bunkers. Beton hat jedoch im Vergleich zu Luft und Stahl einen geringeren Wärmedurchgangskoeffizienten und erreicht damit ebenfalls eine dämmende Wirkung. Das gilt insbesondere für eine Fundamentstärke des Bunkers von rund 2 m . Der Behälter erreicht inklusive der Deckeldämmung eine Höhe von $16,4\text{ m}$. Wird die Dämmschichtdicke und die Wandstärke des Tanks von der Behälterhöhe subtrahiert, so erhält man eine Tankinnenhöhe von $H_{Sp} = 15,7\text{ m}$. Das nutzbare Speichervolumen V_{Sp} von 1.925 m^3 errechnet sich nach der Formel 3.1.

$$V_{Sp} = H_{Sp} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{Sp}}{2}\right)^2 \quad (3.1)$$

Die maximale Speicherkapazität $Q_{Sp,max}$ (siehe Formel 3.2) ist neben dem Speichervolumen noch von weiteren Faktoren abhängig. Die Dichte und die spezifische Wärmekapazität des Heißwassers sind im Wesentlichen von der Temperatur im Behälter



3. Auswahl und Konversion der Bunkeranlagen

abhängig. Im Tank herrscht jedoch keine konstante Temperatur, sondern nimmt aufgrund der Temperaturschichtung mit der Höhe zu (siehe Kapitel 2.2.1.2). Die Abweichungen innerhalb der Temperaturgrenzen zwischen Vor- (VL) und Rücklauf (RL) des Speichers sind allerdings äußerst gering, so dass die Kennwerte des Wassers bei einer mittleren Speichertemperatur als konstant angenommen werden können. Die mittlere Speichertemperatur ergibt sich für diese statische Betrachtung aus der maximalen Temperaturdifferenz zwischen dem Speicher-VL und RL. Die maximale VL-Temperatur ist durch die drucklose Behälterauslegung auf $T_{Sp,VL} = 99 \text{ }^\circ\text{C}$ begrenzt. Im Bezugsjahr 2012 wurde im FW-Netz von Hamburg durchschnittlich eine RL-Temperatur von $54,7 \text{ }^\circ\text{C}$ gemessen (Vgl. [Spe12]). Für die theoretische Betrachtung und die damit verbundene maximale Temperaturspreizung im Speicher, ist die minimale RL-Temperatur maßgebend, die im Bezugsjahr einen Wert von $T_{Sp,RL} = 50,6 \text{ }^\circ\text{C}$ erreicht. Bei einer mittleren Speichertemperatur von $75 \text{ }^\circ\text{C}$ ergibt sich aus Stoffwerttabellen für die Dichte ein Wert von $\rho_W = 975 \text{ kg/m}^3$ und für die spezifische Wärmekapazität von $c_{p,W} = 4,19 \text{ kJ/kgK}$ bzw. $1,16 \text{ Wh/kgK}$ [Kre12]. Bei der Berechnung ist zu darauf zu achten, dass die Temperaturen in der SI-Basiseinheit Kelvin [K] angegeben werden müssen.

$$Q_{Sp,max} = V_{Sp} \cdot \rho_W \cdot c_{p,W} \cdot (T_{Sp,VL} - T_{Sp,RL}) \tag{3.2}$$

Der Wärmespeicher des Standardbunkers kann mit den getroffenen Annahmen eine maximale thermische Speicherkapazität von rund 106 MWh erreichen.

Tabelle 3.7.: Zusammenfassung der Speicherkapazitäten des Bunker-Netzwerks

Bunkerstandort	Nettovolumen Bunker [m³]	Anzahl Speichertanks	Speichervolumen (Tank) [m³]	Speichervolumen (Gesamt) [m³]	Speicherkapazität (Tank) [MWh]	Speicherkapazität (Gesamt) [MWh]
Nebendahlstraße	4.643	1	1.950	1.950	107,1	107,1
Börnstraße	5.819	1	1.950	1.950	107,1	107,1
Eilbeker Weg	4.593	1	1.925	1.925	105,8	105,8
Papenstraße	4.643	1	1.950	1.950	107,1	107,1
Wielandstraße	8.214	3	1.166	3.497	64,0	192,1
Habichtstraße	4.893	1	2.195	2.195	120,5	120,5
Behringstraße	3.427	1	1.182	1.182	64,9	64,9
Holstenstraße	7.183	1	2.954	2.954	162,3	162,3
Eimsbütteler Straße	5.350	3	700	2.101	38,5	115,4
Missundestraße	6.414	1	2.790	2.790	153,2	153,2
SUMME	55.180	14		22.494		1.236

In Tabelle 3.7 ist die Speicherkapazität aller ausgewählten Bunker dargestellt. Der Bunker in der Wielandstraße ist mit einem Nettoinnenvolumen von über 8.000 m^3 nicht nur der größte Bunker in dieser Auswahl, sondern auch der größte Klotzbunker in Hamburg. Die Summe aller Bunkeranlagen erreicht ein Nettovolumen von mehr als 55.000 m^3 . Bei den Bunkern in der Wielandstraße und Eimsbütteler Straße handelt es sich um Klotzbunker mit einer rechteckigen Grundfläche, für die jeweils 3 Speichertanks vorgesehen werden. Die übrigen Objekte können mit einem Behälter

POTENZIALANALYSE

Ermittlung des Wärmespeicherpotenzials innerstädtischer Bunkeranlagen zum Aufbau eines Wärmespeicher-Netzwerkes als Baustein für das Forschungsprojekt “Smart Power Hamburg”

3. Auswahl und Konversion der Bunkeranlagen

ausgestattet werden. Insgesamt erreicht das Bunker-Netzwerk ein Speichervolumen von rund 22.500 m^3 , wobei mit 1.200 m^3 das Speichervolumen und mit 65 MWh auch die thermische Speicherkapazität in der Behringstraße am geringsten ist. In Summe ergibt sich für alle Energiebunker eine Speicherkapazität von 1.236 MWh .





4. Dynamische Analyse / Modellierung eines Energiebunkers

Das folgende Kapitel ist Bestandteil des zweiten Arbeitspaketes „Modellierung eines Energiebunkers“. Nachdem die potenziellen Energiebunker in dem vorangegangenen Kapitel ausgewählt und die potenzielle maximale Speichergröße festgelegt wurde, ist nun von Interesse, welche Leistungsgrößen der Erzeugereinheiten für den Leistungsbedarf des Wärmenetzes notwendig sind und/oder was für ein Optimierungspotenzial die gewählte Standardkonfiguration bietet. Weiterhin bedarf es einer dynamischen Analyse, um zu erfahren, wie sich der Energiebunker im zeitlichen Verlauf zum Wärmebedarf verhält. Dazu wird am Beispiel des bereits in Kapitel 3.3.3 verwendeten Standardbunkers „Eilbeker Weg“ das Vorgehen erläutert.

Für die Modellierung des Systems wird das numerische Simulationstool Matlab/Simulink verwendet. Matlab selbst nutzt primär numerische Berechnungen anhand von Matrizen und ist die Basis von Simulink, das mithilfe einer grafischen Benutzeroberfläche komplexe Systeme modellieren und simulieren kann. Ziel des Energiebunker-Modells ist es, neben einer diskreten Simulation mit einem vorgegebenen festen Zeitschritt, eine einfache Parametrierung und damit für den weiteren Verlauf des Forschungsprojektes eine Adaption auf sämtliche Auswahlbunker zu ermöglichen.

4.1. Systembeschreibung und Eingangsparameter

Im folgenden Kapitel wird zunächst der Aufbau der Systemkomponenten des Energiebunkers anhand eines Verfahrensfließbildes beschrieben. Anschließend werden allgemeine Annahmen getroffen und Auslegungskriterien festgelegt, die für die Modellierung notwendig sind. Zudem werden die Eingangsparameter definiert, die die Schnittstellen zur Umwelt bilden.

4.1.1. Systembeschreibung und Eingangsparameter

Wie bereits in Kapitel 1.2 beschrieben, besteht der Energiebunker aus einem Wärmespeicher (WS), der von Solarkollektoren (SK) und einem oder mehreren Blockheizkraftwerken (BHKW) gespeist wird. Zusätzlich befindet sich in einem Bypass am

POTENZIALANALYSE

Ermittlung des Wärmespeicherpotenzials innerstädtischer Bunkeranlagen zum Aufbau eines Wärmespeicher-Netzwerkes als Baustein für das Forschungsprojekt “Smart Power Hamburg”

4. Dynamische Analyse / Modellierung eines Energiebunkers

Vorlauf (VL) des Speichers ein Spitzenlastkessel in Form eines Heißwassererzeugers (HWE). Der Rücklauf (RL) und der VL des Speichers sind mit dem vorhandenen Wärmenetz der Stadt Hamburg verbunden. Diese Auslegungsvariante ist innerhalb des Modells nicht variierbar, sondern gilt als Standardkonfiguration für das gesamte Netzwerk. Jedoch werden die Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten in dem Modell so ausgelegt, dass es ohne weiteres möglich ist, zusätzliche Erzeuger hinzuzufügen oder ursprüngliche Systemkomponenten zu entfernen. In Abbildung 4.1 wurde ein Verfahrensfießbild erstellt, das die Komponenten und deren Beziehung untereinander verdeutlicht. Die Bezeichnung der einzelnen Elemente entspricht den Beschriftungen im Simulationsmodell.

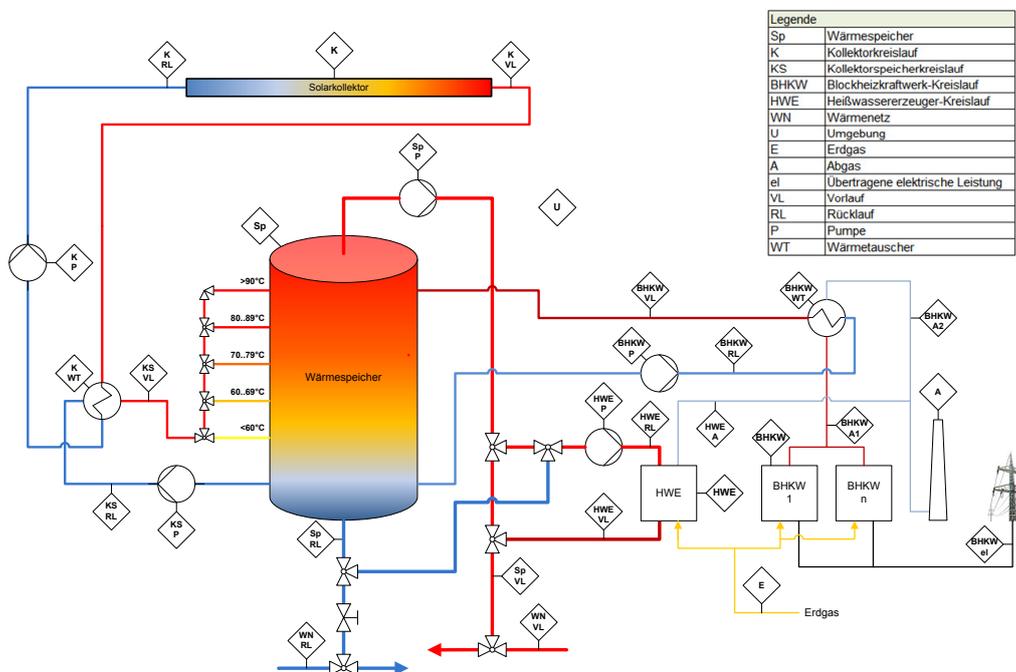


Abbildung 4.1.: Verfahrensfießbild der Standardkonfiguration eines Energiebunkers

Der Wärmespeicher bildet den Kern des Systems. Er befindet sich innerhalb des Gebäudes und wird als drucklose Variante ausgelegt, was eine maximale VL-Temperatur von 99 °C impliziert (siehe Kapitel 2.2.1).

Der Speicher wird direkt über ein Sicherheitsventil an den RL des Wärmenetzes eingebunden. Der Speicher-VL wird über eine drehzahlgeregelte Pumpe geregelt und ist von der im Netz benötigten Wärmelast abhängig. Der Volumenstrom zwischen VL und RL des Speichers muss jederzeit identisch sein. Andernfalls sind Auswirkungen auf den Druck im Speicher und Wärmenetz zu erwarten, was wiederum zu Beeinträchtigungen und eventuellen Schäden an Netzkomponenten führen kann. Ausschlaggebend für den Betrieb der Pumpe ist die Temperatur in der obersten



Schicht des Speichers. Entsprechend der geforderten Wärmeleistung und der VL-Temperatur wird der Massenstrom angepasst. Differenzen zwischen der maximalen Wärmeleistung oder Temperatur des Speichers und des jeweiligen Bedarfs im Netz werden von einem HWE ausgeglichen (siehe Kapitel 2.2.4). Dieser muss je nach Auslegung des Systems zu jeder Zeit die benötigten Temperaturen und Wärmeleistungen bereitstellen können. In diesem Fall wird der HWE nach dem sogenannten *n-1*-Kriterium ausgelegt. Ist der Speicher nicht betriebsbereit, da er sich bspw. im Beladezyklus befindet und/oder kein entsprechendes Temperaturniveau liefern kann oder Komponenten wie die Speicherpumpe bzw. die BHKW ausgefallen sind, muss der HWE die gesamte Wärmeleistung bereitstellen können. In diesem Fall ist der Netz-RL über ein 3-Wegeventil direkt mit dem HWE-RL gekoppelt, so dass der HWE auch ohne den Speicherkreislauf betrieben werden kann.

Das BHKW speist generell in die oberste Schicht des Speichers ein. Da sich an dieser Stelle auch der Speicher-VL befindet, muss keine direkte Verbindung des BHKW mit dem Netz-VL vorgesehen werden. In der Simulation wird bspw. im Zeitschritt *x* eine thermische Leistung *y* vom BHKW in den Speicher geladen, der im selben Zeitschritt diese Leistung an den VL des Netzes weitergeben kann. Der RL des BHKW befindet sich in der untersten Schicht, wodurch sichergestellt wird, dass in sämtlichen Schichten ein gleichmäßiger Leistungsaustausch stattfindet. In der Modellierung werden die verschiedenen Wärmetauscher (WT) der BHKW (Öl-, Kühlwasser- und Abgaswärmetauscher) zusammengefasst und bei mehreren BHKW über eine gemeinsame Sammelleitung in den Speicher geführt. Die erzeugte elektrische Leistung wird in das Mittelspannungsnetz eingespeist. Verluste außerhalb des BHKW-Teilsystems werden nicht betrachtet.

Auf die Dachfläche des Energiebunkers ist ein Kollektorsystem installiert, dessen Auslegungsgröße ausschließlich von den Dachabmessungen und kollektorspezifischen Restriktionen abhängig ist (siehe Kapitel 2.2.3). Aufgrund der Tatsache, dass interne WT für Speicher diese Größenordnung nicht in Frage kommen und der Kollektorkreislauf mit einem Glykol-Wasser-Gemisch als Frostschutz betrieben wird, muss der Kollektor- vom Speicherkreislauf hydraulisch entkoppelt werden. Die Wärmeleistung aus den Solarkollektoren wird in so einem Fall üblicherweise mithilfe eines externen Platten-WT im Gegenstromverfahren an den Speicherkreislauf übertragen. Beide Kreisläufe besitzen eine nicht drehzahlregelte RL-Pumpe, da der Wärmeträger im Low-Flow-Betrieb bei einem konstanten spezifischen Volumenstrom zwischen 10 und 15 l/m² Absorberfläche umgewälzt wird. Unterschiedliche VL-Temperaturen des Kollektors werden mithilfe einer aktiven Schichtbeladung im Kollektorspeicher-Kreislauf geregelt. Insgesamt 5 seitlich angebrachte Einfüllstutzen in verschiedenen Speicherhöhen ermöglichen eine Beladung des Speichers bei unterschiedlichen VL-Temperaturen. Die Stutzen sind über 2- bzw. 3-Wegeventile mit der Sammel-



leitung verbunden und werden entsprechend des Temperaturniveaus angesteuert. Ist die Schichttemperatur selbst in der untersten Stutzebene höher als die VL-Temperatur des Kollektors, so dass es eine Abkühlung des Speicherwassers bewirken würde, wird das Kollektorsystem abgeschaltet.

4.1.2. Auslegungskriterien und Eingangsdaten des Simulationsmodells

4.1.2.1. Betriebsweise des Energiebunkers und Wärmelastdaten

Jede der ausgewählten Bunkeranlagen befindet sich an einem Nah- bzw. Verteilwärmenetz, das über eine Schnittstelle an das Hamburger Fernwärmenetz (FW-Netz) der Vattenfall Europe Wärme GmbH angebunden ist (siehe Kapitel 3.2.3). Das FW-Netz überträgt bezogen auf das gesamte Jahr durchschnittlich eine Wärmeleistung von rund 500 MW, was zu einem Großteil dem Wärmebedarf der Stadt Hamburg entspricht, unabhängig von einzelnen autarken Nahwärmenetzen und dem von der E.ON Hanse AG betriebenen Wärmenetz. Bei einer zukünftig generellen Dezentralisierung des Wärmesystems oder einer Unterstützung der konventionellen Wärmeerzeugung durch dezentrale Einheiten, wäre theoretisch der Bedarf an zusätzlicher Wärmeleistung aus dem Energiebunker-Netzwerk jederzeit vorhanden. Die Auslegung der Betriebsweise des Bunker-Netzwerks im FW-System ist jedoch von sehr vielen Faktoren abhängig, die den Umfang der Studie weit überschreiten würden. Aus diesem Grund wird nicht das gesamte FW-Netz in das Modell einbezogen, sondern lediglich das Verteilnetz an dem sich der Energiebunker befindet. Dieses wird vom Hauptnetz entkoppelt und als autark angenommen. Die Messdaten des FW-Netzes für das Bezugsjahr 2012 werden auf die Verteilnetzebene angepasst, da keine Daten für die einzelnen Nahwärmenetze zur Verfügung stehen. In Kapitel 3.3.2 wurde davon ausgegangen, dass sich die gesamte Wärmeleistung über alle rund 150 Nahwärmenetze des Netzverbundes gleichmäßig verteilt. Die tatsächliche Leistung ist jedoch signifikant von der Netzgröße abhängig. Dazu wird das Größenverhältnis des Nahwärmenetzes an dem sich der Standardbunker befindet, mit der Gesamtanzahl der Teilnetze aus der Vattenfall-Wärmenetzkarte der Stadt Hamburg (siehe Anhang A.0.2) verglichen, um einen prozentualen Anteil an der Gesamtwärmelast abschätzen zu können. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass die Wärmeleistung des betrachteten Nahwärmenetzes 0,5 % der Wärmelast des FW-Netzes entspricht. Die Vor- und Rücklauftemperaturen werden ohne weitere Anpassungen übernommen. Zusammen mit dem daraus resultierenden Massenstrom, bilden diese Daten den Bedarfsfall über das Bezugsjahr 2012 ab. Sollten zukünftig exakte Werte zur Verfügung stehen, können diese ohne weiteres im Modell angepasst werden. In der Tabelle 4.1 sind die Minimal-, Maximal- und Mittelwerte für das betrachtete Netz zusammengefasst.



Tabelle 4.1.: Kennwerte der Lastdaten mit Wärmeleistung, Massenstrom sowie Außen-, Vorlauf- und Rücklauftemperatur

	Wärmeleistung	Massenstrom	VL-Temp.	RL-Temp.	Außentemp.
	[MW]	[kg/s]	[°C]		
Mittel	2,2	12,1	95,7	54,7	9,7
Min.	0,5	4,2	84,3	50,6	-14,8
Max.	6,5	22,8	130,4	61,2	34,5

Die Daten liegen für das Jahr 2012 in einer Schrittweite von einer Stunde vor. Da es sich um ein Schaltjahr handelt, entspricht das 8.784 Zeitschritten im Jahr. Die Inputwerte sind in der *mat.*-Datei „Zeitreihen“ gespeichert.

4.1.2.2. Betriebsweise und Eingangsparameter der Solarkollektoren

Neben den Wärmenetzdaten wird für die Berechnung der Solarkollektoren auch die Strahlungsleistung der Sonne benötigt. Diese weist die Besonderheit auf, dass sie nicht auf das Jahr 2012 bezogen wird, sondern als 10-Jahresmittelwert vorliegt. Die Globalstrahlung wird in der Einheit kWh/m^2 und Jahr, oder wie in diesem Fall pro Tag, angegeben. Für die Auslegung einer Solaranlage wird jedoch die Strahlungsleistung bzw. Bestrahlungsstärke in W/m^2 benötigt. Dazu muss die tägliche Globalstrahlung auf die Zeiteinheit pro Tag bezogen werden, an der Leistung an die Kollektoren abgegeben wird, was bspw. nachts nicht der Fall ist. Auch bedeckter Himmel und andere Wettereinflüsse mindern die momentane Strahlungsleistung der Sonne auf die Kollektoren. Vereinfachend kann allerdings eine mittlere Strahlungsleistung auf Basis der gemessenen Globalstrahlung und der Tageslänge zwischen Sonnenauf- und untergang angegeben werden. Dazu wird das Jahr in zwei Hälften untergliedert und die durchschnittliche Tageslänge der Wintermonate (Oktober bis März) von 10 und der Sommermonate (April und September) von 13 Stunden angegeben. Durch Division mit der Globalstrahlung erhält man die durchschnittliche Strahlungsleistung pro Tag. Dieser Wert bezieht sich jedoch auf eine horizontale Fläche. Wie bereits in Kapitel 2.2.3 erklärt, werden Solarkollektoren auf Flachdächern, wie es bei allen Bunkeranlagen der Fall ist, mit einem gewissen Anstellwinkel aufgeständert, um eine maximale Leistungsausbeute erzielen zu können. Von daher muss die in der Modulebene zur Verfügung stehende Leistung aus der horizontalen Globalstrahlung errechnet werden. Die Berechnung ist jedoch sehr aufwändig, da sich die Globalstrahlung aus einem von der Tages- und Jahreszeit abhängigen Mix an richtungsunabhängiger diffuser Strahlung und der richtungsabhängigen direkten Solarstrahlung zusammensetzt. Experimentell gewonnene Korrekturfaktoren zeigen, dass die Neigungs- und Orientierungsabhängigkeit das Jahresergebnis im Vergleich zu anderen Verlusten nicht allzu sehr beeinflusst [Laq03, S. 4f.]. Die Korrekturfak-



toren sind in der Tabelle 4.2 angegeben. Im vorliegenden Fall ist der Anstellwinkel aufgrund des Flachdaches frei wählbar. Die Dachfläche des Standardbunkers ist nach Süd-Ost ausgerichtet. Bei einem Anstellwinkel von 30 Grad beträgt der Korrekturfaktor 1,1, d.h. bei der gewählten Anordnung der Kollektoren liegt die Strahlungsleistung im Jahresmittel um 10 % über der von horizontalen Flächen. Nähere Informationen zur Aufstellung der Kollektoren sind im Kapitel 4.2.1.2 beschrieben.

Tabelle 4.2.: Experimentell ermittelte Korrekturfaktoren für die Strahlungsleistung in Abhängigkeit der Azimutausrichtung und des Anstellwinkels von Solarkollektoren [Laq03, S. 4]

Neigung/Orientierung	Süd	Süd-West Süd-Ost	West Ost
30°	1,12	1,10	0,98
45°	1,11	1,09	0,93
60°	1,08	1,05	0,84

Insgesamt wird im Sommer ein Maximalwert der mittleren Strahlungsleistung pro Tag von rund 490 W/m^2 erreicht. Die momentane Bestrahlungsstärke kann hingegen in den Sommermonaten bei klarem Himmel bis zu 800 W/m^2 und mehr betragen. In Abweichung von den anderen Eingangsdaten werden die Strahlungsdaten mit einem Zeitschritt von 1.440 Minuten, das entspricht einem Tag, als Input in das Simulationsmodell übertragen.

Die Einsatzzeit der Solarkollektoren richtet sich ausschließlich nach der Solarstrahlung und der damit erreichbaren VL-Temperatur des Kollektors. Aufgrund der bereits sehr hohen RL-Temperatur, die der Kollektor aus dem Speicher und dieser wiederum aus dem Wärmenetz bezieht, ist die Temperaturspreizung im Kollektorkreislauf verhältnismäßig gering. Für den Kollektor des Energiebunkers bedeutet das jedoch auch, dass eine Mindesttemperatur erreicht werden muss, damit überhaupt in den Speicher eingespeist werden kann. Wird diese nicht überschritten, wird die Pumpe gestoppt und der Kollektor liefert keine Wärme. Andernfalls wird über die gesamte Zeit hinweg das Kollektorsystem betrieben.

4.1.2.3. Betriebsweise des Blockheizkraftwerks und Heißwassererzeugers

Die maximalen Leistungsgrößen werden sowohl für die Solarkollektoren als auch für den Wärmespeicher durch die Bunkergeometrien vorgegeben. Das gilt nicht für die Leistung der BHKW. Es wird angenommen, dass innerhalb oder außerhalb des Bunkergebäudes ausreichend Platz vorhanden ist, um BHKW in unterschiedlichen Leistungsklassen installieren zu können. Das Simulationsmodell soll eine Aussage dazu liefern, welche BHKW-Leistung für den jeweiligen Energiebunker geeignet ist.



Aufgrund des Einsatzes eines Wärmespeichers ist die thermische von der elektrischen Erzeugung des BHKW zwar nicht entkoppelt, allerdings lässt sich der Wärme weitaus flexibler nutzen. Zu welchen Zeiten das BHKW tatsächlich in Betrieb genommen wird, hängt von einer ganzen Reihe an Faktoren ab (siehe Kapitel 2.2.2). Das C4DSI hat einen Fahrplan-Generator auf Basis von Matlab/Simulink entwickelt, der bei vorgegebenen Eingangsparametern, wie z.B. dem Wärmelastverlauf, dem Erdgaspreis und der BHKW-Nennleistung, in Bezug auf die Standardkonfiguration und das Basisjahr 2012 einen Einsatzplan für das BHKW und den HWE generiert.

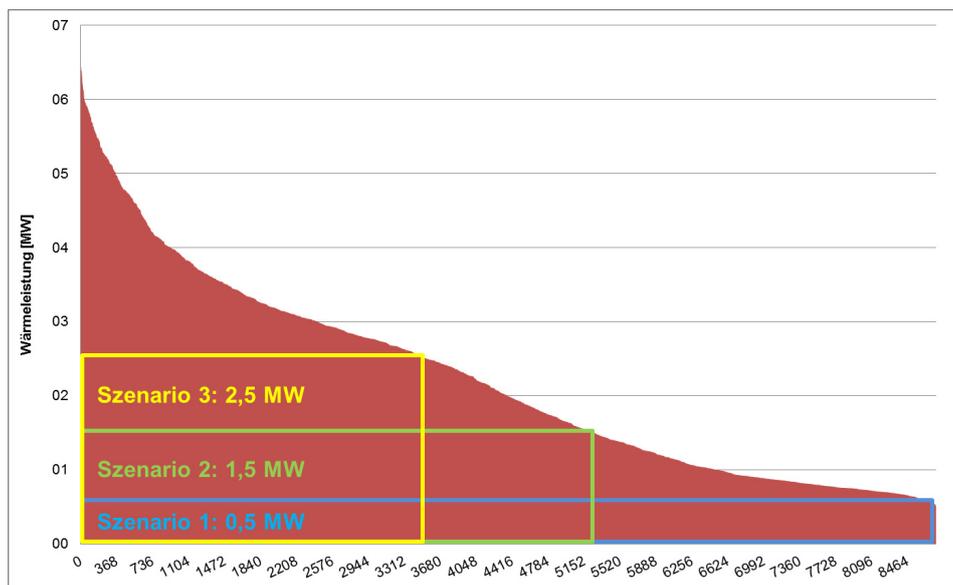


Abbildung 4.2.: Geordnete Wärmelastkurve des Wärmenetzes am Bunkerstandort mit Analyseszenarien durch unterschiedliche Leistungsgrößen der Blockheizkraftwerke

Für den Energiebunker werden insgesamt drei Szenarien erstellt, bei der die Nennleistung der BHKW variiert wird. In der Abbildung 4.2 wurde die geordnete Wärmelastkurve für das Verteilnetz des Standardbunkers über den Jahresstunden aufgetragen. Diese gibt an, wie viele Stunden im Jahr die entsprechende Leistung benötigt wird. In der Praxis würden für die Lastabdeckung mehrere BHKW mit unterschiedlichen Leistungsklassen installiert werden. Das führt dazu, dass die BHKW in der Summe zwar weniger Stunden pro Jahr betrieben werden, ermöglicht es aber einen größeren Leistungsbereich der Wärmelast abzudecken. Der entwickelte Fahrplan-Generator ist jedoch nur für die Ausgabe eines einzelnen BHKW geeignet, so dass in jedem Szenario ein BHKW mit einer unterschiedlichen Leistungsklasse untersucht werden muss. Die Szenarien lauten wie folgt:

- **Szenario 1 - Konventionelle Auslegung:** Die konventionelle Auslegung basiert auf einer Betriebsführung mit maximalen Betriebsstunden des BHKW



(Grundlast-BHKW). Die Wärmeleistung des Verteilnetzes beträgt minimal 0,5 MW (siehe Kapitel 4.1.2.1). Daraus ergibt sich eine installierte thermische Nennleistung von ebenfalls 0,5 MW mit 8.784 Betriebsstunden pro Jahr. Die fehlende Leistung wird von dem HWE bereitgestellt.

- **Szenario 2 - Mittlere Lastabdeckung:** In diesem Szenario würde das Grundlast-BHKW um ein BHKW (Mittellast-BHKW) mit einer Nennleistung von 1 MW erweitert werden. Insgesamt ergibt sich damit eine thermische Gesamtleistung von rund 1,5 MW, die über einen Motor dargestellt und durch den HWE ergänzt wird.
- **Szenario 3 - Hohe Lastabdeckung:** Um eine möglichst hohe Wärmelastabdeckung zu ermöglichen, wird ein Spitzenlast-BHKW mit einer Leistung von ebenfalls 1 MW hinzugefügt. Die Gesamtleistung der BHKW beträgt damit etwa 2,5 MW. Differenzen zur Wärmelast oder zu den VL-Temperaturen werden vom HWE bereitgestellt.

4.2. Parametrierung des Bunkermodells

Im Kapitel Parametrierung wird nun der Aufbau des Modells und die einzelnen Berechnungsschritte der Komponenten bzw. deren Zusammenhang zueinander beschrieben. In einem ersten Schritt wird eine Initialisierungsrechnung mit Matlab durchgeführt, die zum einen die Eingaben der variablen Eingangsparameter ermöglicht und zum anderen sämtliche konstante Werte berechnet, die für eine Auslegung des Systems notwendig und über die gesamten Zeitschritte konstant sind. Im Anschluss daran werden in Simulink die Komponenten in Form eines Blockmodells erzeugt. Eine Ausnahme bildet der Wärmespeicher, der mithilfe einer Matlab-Funktion in das Modell eingebunden wird.

4.2.1. Auslegungsrechnung und variable Parametrierung durch Initialisierungsskripte

Die in Matlab erstellten Initialisierungsskripte ermöglichen eine einfache Eingabe aller variablen Bezugsgrößen wie bspw. die Bunkerabmessungen und die komponentenspezifische Kennwerte. In welcher Einheit die Eingaben erfolgen müssen, ist an der entsprechenden Stelle gekennzeichnet. Darüber hinaus reduzieren sie den Rechenaufwand, da diese im ersten Zyklus der Simulation eingelesen und berechnet werden. Die Ausgaben werden anschließend als Konstanten an das Simulink-Modell übergeben. Der Aufbau der Skript-Hierarchie ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

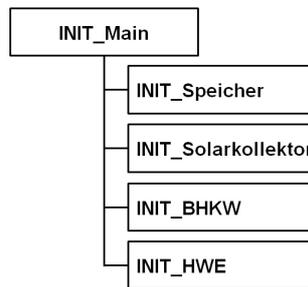


Abbildung 4.3.: Hierarchie der Initialisierungsskripte

Die oberste Ebene bildet das Hauptskript mit der Bezeichnung „INIT_Main“ ab. Darin werden keine Berechnungen ausgeführt, sondern es erlaubt die Eingabe aller allgemeinen Parameter und übergeordneten Konstanten, die keiner Systemkomponente direkt zugeordnet werden können. So wird an dieser Stelle die zu berechnende Bunkeranlage ausgewählt und die Eingabe der Bunkerdimensionen gefordert. Dazu gehören die Höhe, Breite, und Länge der Außenabmessungen sowie die Wand- und Deckenstärke des Gebäudes.

Da mit Ausnahme des Kollektorkreislaufs im gesamten System Wasser als Wärmeträgermedium verwendet wird, sind an dieser Stelle die Stoffwerte Dichte, spezifische Wärmekapazität, dynamische und kinematische Viskosität sowie die Wärmeleitfähigkeit einzutragen. Die Werte beziehen sich wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben auf eine mittlere Speichertemperatur von $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ und wurden aus den entsprechenden Stoffwerttabellen entnommen (Vgl. [Kre12]). Weiterhin werden an dieser Stelle die Kennwerte für die Rohr- und Speicherdämmung definiert. Für den Wärmespeicher und sämtliche Rohre wird eine Faserdämmung verwendet, die nach der aktuellen Energieeinsparverordnung (EnEV) einen Wärmeleitkoeffizienten λ_D von maximal $0,04\text{ W/mK}$ aufweisen darf [BMW13a]. Gleiches gilt auch für den Wärmedurchgangskoeffizienten für Beton von $U_B = 1,1\text{ W/m}^2\text{K}$ bei einer durchschnittlichen Wand- und Fundamentstärke des Bunkers von $1,5\text{ m}$. Der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Dämmung und Umgebung h_{DU} wird in der Literatur mit $8\text{ W/m}^2\text{K}$ angegeben [Eic12, S. 77]. Weiterhin wird für die Druckverlustberechnung die Rohrrauigkeit benötigt. Unter der Annahme, dass es sich bei allen Rohren im System um neue Kupferrohre handelt, kann hierfür ein Wert von $0,0013\text{ mm}$ festgelegt werden [FW12]. Weitere Basiswerte sind die mittlere Außentemperatur für das Bezugsjahr von $T_{U,aust} = 9,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ und die Fallbeschleunigung g .

Im letzten Schritt ist das Hauptskript dafür verantwortlich, die in Kapitel 4.1.2 definierten Eingangsparameter in Form von Zeitreihen und die Subskripte der Systemkomponenten einzulesen. Dabei ist darauf zu achten, dass für Berechnungen innerhalb des Skriptes nur die Variablen verwendet werden können, die zuvor definiert



wurden. Die Subskripte, die neben der Parameterabfrage auch die Auslegungsrechnungen durchführen, werden in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

4.2.1.1. Initialisierungsskript des Wärmespeichers

In Kapitel 3.3.3 wurden für die Behälterauslegung bereits Annahmen für die Wandstärke des Tanks, Schichtdicke der Dämmung und die erforderlichen Mindestabständen gewählt, die innerhalb der Parametereingabe des Subskriptes „INIT_Speicher“ eingegeben werden. Aus diesen und den im Hauptskript definierten Kenngrößen lässt sich in der Auslegungsrechnung die Anzahl und die Dimensionen sowie das Volumen des Speichers bestimmen.

Ein realistisches Modell muss eine Temperaturschichtung im Tank berücksichtigen (siehe Kapitel 2.2.1.2). Dazu wird der Behälter über die gesamte Tankinnenhöhe $H_{Sp,i}$ in mehrere Schichten eingeteilt. Für jede Schicht i wird eine Energiebilanz aufgestellt, die in Kapitel 4.3.2 beschrieben wird. Für die Auslegungsrechnung wird an dieser Stelle eine Schichthöhe von $H_{Sp,i,aust} = 1 \text{ m}$ gewählt, die gemeinsam mit den Tankdimensionen die erforderlichen Schichtparameter bestimmt. Durch Abrunden des Quotienten zwischen Tankinnenhöhe und der gewählten Schichthöhe ergibt sich die Anzahl der Schichten $n_{Sp,i} = 15$. Die genaue Schichthöhe $H_{Sp,i}$ resultiert aus der Schichtanzahl. Zu den weiteren Schichtparametern zählen der Durchmesser $d_{Sp,i}$, das Volumen $V_{Sp,i}$, die Schichtmasse $m_{Sp,i}$ und Querschnittsfläche $A_{Sp,i}$. Ebenfalls benötigt wird die Mantel- bzw. Außenfläche $A_{Sp,i,M}$ der einzelnen Schichten. Während es sich bei allen Zwischenschichten um die zylinderförmige Mantelfläche handelt, berücksichtigt die oberste Schicht zusätzlich die Deckel- und die unterste die Bodenfläche. Für die dynamische Temperaturberechnung der Schichten in Simulink wird zum Zeitpunkt $t_{Start} = 0$ eine Starttemperatur aller Schichten benötigt. Es wird davon ausgegangen, dass der Speicher zu Beginn der Simulation mit der RL-Temperatur des Wärmenetzes im ersten Zeitschritt gefüllt ist. Dazu wird ein Vektor mit $n_{Sp,i}$ -Elementen erzeugt, dessen Wert die Starttemperatur $T_{Start} = 53,8 \text{ }^\circ\text{C}$ besitzt.

Die Solarkollektoren speisen über 5 Stutzen je nach VL-Temperatur in unterschiedliche Schichten ein. Mithilfe eines Vektors können die Schichten gewählt werden, in denen sich ein Kollektorstutzen befindet. Im Auslegungsbeispiel beträgt die maximale Differenz zwischen Speicher-VL und RL ca. $50 \text{ }^\circ\text{C}$, so dass jeder Stutzen einen VL-Temperaturbereich von $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ansteuern kann (siehe Abbildung 4.4). Angefangen bei Temperaturen von oberhalb $90 \text{ }^\circ\text{C}$, die in die erste Schicht $i = 1$ einspeisen, bis hin zu Temperaturen unterhalb von $60 \text{ }^\circ\text{C}$, wo sich der Stutzen in Höhe der Schicht $i = 13$ befindet. In der untersten Schicht $N = 15$ sind der Kollektor-RL sowie der RL des Wärmenetzes und des BHKW angeschlossen. Für letzteren kann



im Initialisierungsskript bei Bedarf auch eine andere Schicht gewählt werden. Der VL des BHKW und des Speichers befinden sich in der ersten Schicht.

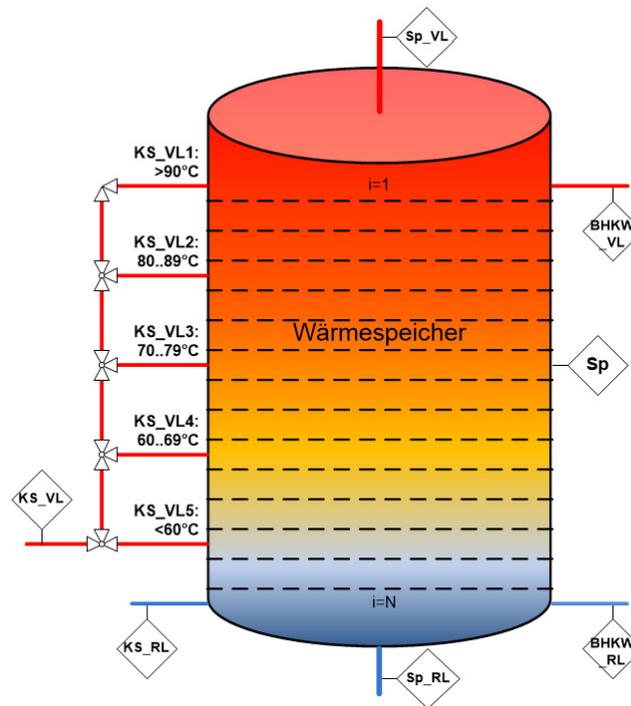


Abbildung 4.4.: Wärmespeicher mit Schichteinteilung und externen Anschlussstutzen der Speicherkreisläufe

Weiterhin werden im Subskript die Wärmedurchgangskoeffizienten des Speicherbodens und der Speicherwand, die aufgrund der gleichen Dämmung auch dem Speicherdeckel entsprechen, berechnet. Aus der Formel 4.1 lässt sich anhand der bereits festgelegten Parameter aus dem Hauptskript und der aus Kapitel 3.4 bekannten Dämmschichtdicke der Wärmedurchgangskoeffizient der Speicherwand $U_{Sp,W}$ bestimmen [Eic12]. Der Wärmedurchgangskoeffizient des Behälterbodens $U_{Sp,B}$ entspricht vereinfachend dem für Beton.

$$U_{Sp,W} = \frac{1}{(s_{Sp,TD}/\lambda_D) + (1/h_{DU})} \quad (4.1)$$

Um die elektrische Leistung der VL-Pumpe berechnen zu können, müssen zunächst weitere Annahmen getroffen werden. Druckverluste in den Rohrleitungen sind u.a. von deren Länge abhängig. Durch die Speicherhöhe ist die Länge zwischen Entlaststutzen und, wenn man davon ausgeht, dass die Pumpe auf dem Bunkerfundament installiert wird, der Pumpe bekannt. Nicht bekannt ist hingegen die Entfernung zwischen der Pumpe und dem Nahwärmenetz. Zusätzliche Rohrlängen $l_{Sp,Rzus}$, wie bspw. jene Entfernung, können optional als fester Wert in das Skript eingegeben werden. Aus der Wärmenetzkarte ist ersichtlich, dass sich der Bunker inner-



halb des 50 Meter-Radius befindet (siehe Anhang A.0.1), wodurch eine maximale Entfernung von 50 Metern abgeschätzt werden kann. Für die Auslegungsrechnung der Rohrabmessungen ist auch der maximale Massenstrom notwendig, der sich mit $\dot{m}_{Sp,max} \approx 23 \text{ kg/s}$ aus den Wärmelastdaten ergibt (Vgl. [Spe12]).

Einen signifikanten Einfluss auf die benötigte elektrische Leistung der Kreiselpumpe hat sowohl der Wirkungsgrad der Pumpe als auch der des zugehörigen Motors. Beide sind in der Regel nicht konstant, sondern von der Nennleistung und dem Betriebsverhalten abhängig. Das gilt insbesondere für den Pumpenwirkungsgrad, der hauptsächlich vom dynamischen Förderstrom abhängt. In der Literatur existieren grafische Kennlinien, die für bekannte Förderströme die Drehzahl und den Wirkungsgrad angeben. Als Bezugspunkt wird der mittlere Massenstrom $\dot{m}_{Sp,m} = 12 \text{ kg/s}$ angenommen und durch die Dichte von Wasser dividiert. Daraus ergibt sich ein mittlerer Förderstrom von $Q_{Sp,m} \approx 45 \text{ m}^3/\text{h}$. Zusammen mit der durch den Speicher vorgegeben Förderhöhe von 16,4 Metern, lässt sich aus dem unten abgebildeten Nomogramm (siehe Abbildung 4.5) eine mittlere Drehzahl $n_{Sp,P} \approx 3000 \text{ 1/min}$ bestimmen [KSB05, S. 13f.].

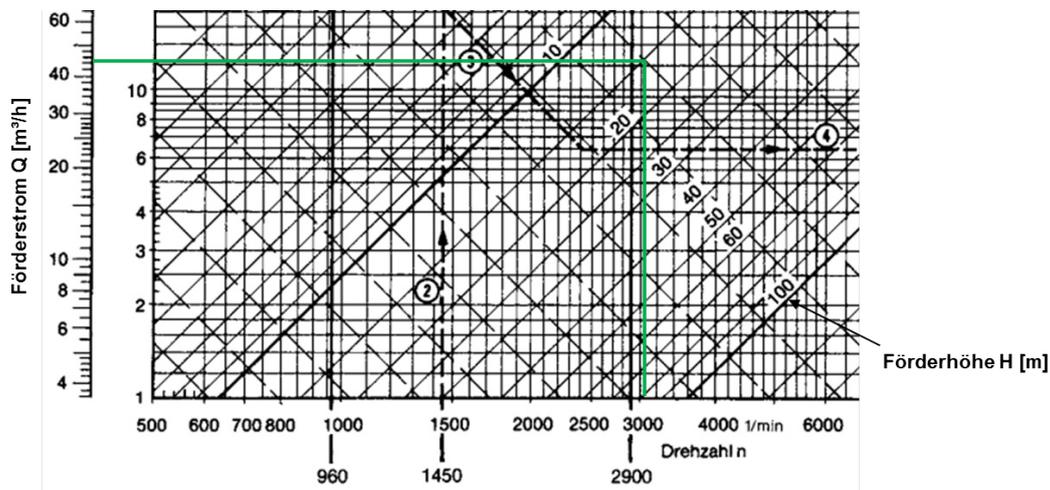


Abbildung 4.5.: Grafische Ermittlung der mittleren Drehzahl der Pumpe [KSB05, S. 13]

Aus den Kennlinien für Kreiselpumpen mit Radialrad ergibt sich aus dem Förderstrom und der Drehzahl ein mittlerer mechanischer Wirkungsgrad von etwa 60 Prozent [KSB05, S. 14]. Im Jahr 2011 wurde von der Europäischen Union beschlossen, dass ausschließlich hocheffiziente Drehstrom-Asynchronmotoren in Verkehr gebracht werden dürfen. Die Elektroantriebe werden in der Norm IEC 60034-30 in drei Effizienzklassen eingeteilt [ABB09]. Für die Bestimmung des Motorwirkungsgrades der Pumpe wird die Standardeffizienz IE1 angenommen (siehe Abbildung 4.6). Die Nennleistung ist jedoch zu diesem Zeitpunkt noch nicht bekannt, so dass für einen



ersten Durchlauf der Simulation eine Annahme von $\eta_{Sp,M} = 85\%$ getroffen wird. Ist im Anschluss daran die maximale mechanische Leistung der Pumpe bekannt, kann die Motornennleistung und damit der tatsächliche Wirkungsgrad bestimmt werden.

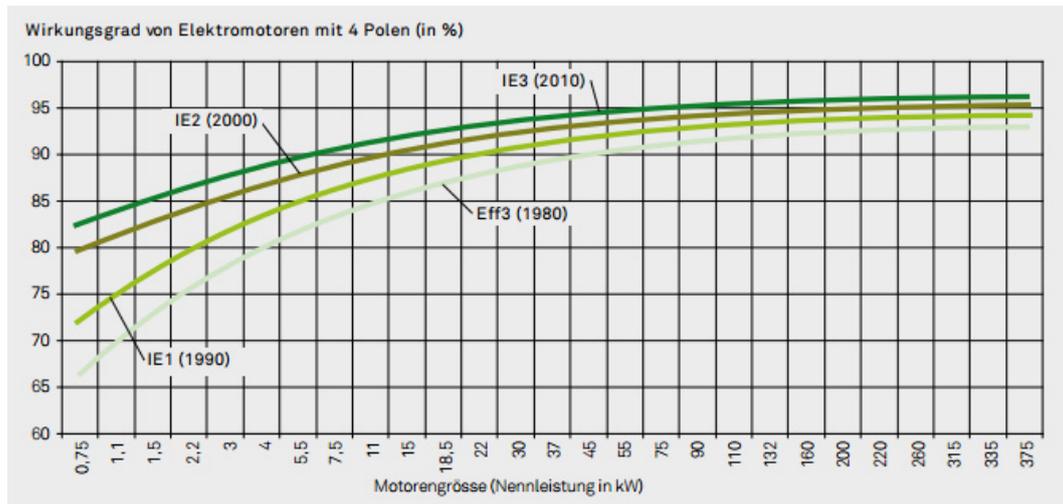


Abbildung 4.6.: Wirkungsgrade von Elektromotoren nach IEC 60034-30 [Top09, S. 1]

Die mechanische Leistung der Pumpenwelle und die elektrische Leistung des Motors berechnen sich allgemein nach den folgenden Formeln 4.2 und 4.3:

$$P_{Welle} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_A}{\eta_P} \quad (4.2)$$

$$P_{Motor} = \frac{P_{Welle}}{\eta_M} \quad (4.3)$$

Die Dichte ρ , Fallbeschleunigung g und der Pumpenwirkungsgrad η_P sind bereits bekannt. Der Förderstrom Q in Kubikmeter pro Sekunde ist von der Wärmeleistung im VL des Speichers abhängig und geht als Input in das zeitgesteuerte Modell ein. Konstant und damit in der Auslegungsrechnung zu berücksichtigen ist die Förderhöhe der Anlage H_A nach Formel 4.4 (Vgl. [KSB05, S. 17]).

$$H_A = H_{geo} + \Delta H_p + \Delta H_v + \sum H_V \quad (4.4)$$

Die Förderhöhe ist die von der Pumpe auf das Fördermedium übertragene mechanische Arbeit, bezogen auf die Gewichtskraft in Metern und setzt sich aus folgenden vier Anteilen zusammen [KSB05, S. 18f.]:

- **Geodätische Förderhöhe H_{geo} :** Die geodätische Förderhöhe ist der Höhenunterschied zwischen dem saug- und druckseitigen Flüssigkeitsspiegel. Innerhalb eines geschlossenen Kreislaufs ist die geodätische Förderhöhe Null.



- **Manometrische Druckhöhendifferenz ΔH_p :** Das ist die Differenz der über dem saug- (p_e) und druckseitigen (p_a) Flüssigkeitsspiegel liegenden Druckhöhen bei mindestens einem geschlossenen Behälter.

$$\Delta H_p = \frac{p_a - p_e}{\rho \cdot g} \quad (4.5)$$

- **Differenz der Geschwindigkeitshöhe ΔH_v :** Diese beschreibt die Differenz der Geschwindigkeiten zwischen der Saug- (v_e) und Druckseite (p_e) in den Behältern. Kann jedoch in der Praxis häufig vernachlässigt werden.

$$\Delta H_v = \frac{v_a^2 - v_e^2}{2 \cdot g} \quad (4.6)$$

- **Druckhöhenverluste H_V :** Die Druckhöhenverluste ist die Summe der Strömungswiderstände in den Rohrleitungen, Armaturen und Formstücken in der Saug- und Druckleitung. Diese werden in der Praxis auch als Druckverluste p_V bezeichnet.

$$H_V = \frac{\sum p_V}{\rho \cdot g} \quad (4.7)$$

Die geodätische Höhe entspricht im Falle des Speichers der Höhe zwischen Entladestutzen und Boden oder vereinfacht ausgedrückt, der Behälterhöhe. Die manometrische Druckhöhendifferenz wird durch den Druck am Austritt p_a , d.h. dem Netzdruck, und dem Druck am Eintritt p_e (Beladestutzen) bestimmt. Der saugseitige Druck ist von der geodätischen bzw. Tankhöhe abhängig und lässt sich mit folgender Formel 4.8 ermitteln:

$$p_e = H_{geo} \cdot \rho \cdot g \quad (4.8)$$

Der Netzdruck ist nicht bekannt. In der Literatur werden Drücke für ein Wärmenetz mit Niederdruckheißwasser und VL-Temperaturen von 70 bis 120 °C zwischen 4 und 6 bar angegeben [JW03, S. 2]. Für das Verteilnetz wird der maximale Wert von 6 bar Überdruck angenommen und in die obige Formel 4.5 eingesetzt. Daraus ergibt sich die manometrische Druckhöhendifferenz in Meter. Der Druckabfall in den Rohrleitungen ist primär durch die Wand- und innere Fluidreibung in geraden Rohren und Formstücken bedingt. Aufgrund der geringen Anzahl an Rohrkrümmungen im Speichervorlauf können diese vernachlässigt werden. Der Druckverlust der geraden Rohre muss hingegen mit betrachtet werden und lässt sich mithilfe der Formel 4.9 bestimmen.

$$\Delta p_{V,R} = \frac{\lambda_R \cdot l_R \cdot \rho \cdot c_R^2}{d_R \cdot 2} \quad (4.9)$$

Die Gesamtlänge der Rohre l_R ergibt sich aus der Behälterhöhe und der anfangs erwähnten zusätzlichen Rohrlänge. Unbekannt sind die voneinander abhängigen Strö-



mungsgeschwindigkeit c_R und der Rohrinne Durchmesser d_R . In der Literatur sind Kennwertdiagramme für neue Metallrohre zu finden, die mit dem gegebenen maximalen Förderstrom $Q_{Sp,max} \approx 85 \text{ m}^3/\text{h}$ die Reynoldszahl bestimmen (siehe Abbildung 4.7). Die dimensionslose Reynoldszahl $Re = 200.000$ stellt das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften dar und ist damit ein Kennwert für das Strömungsverhalten von Fluiden.

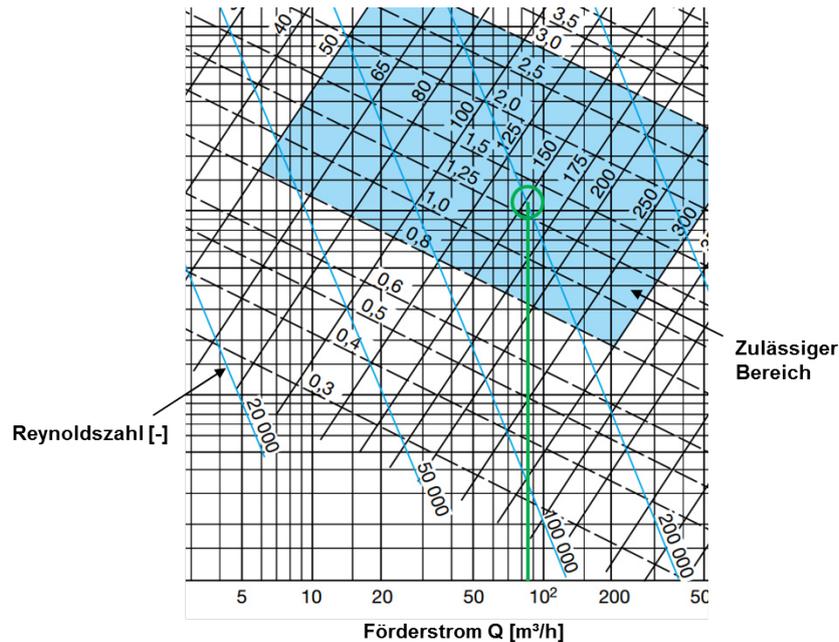


Abbildung 4.7.: Reynoldszahl in Abhängigkeit von Förderstrom und Rohrgeometrie [KSB05, S. 21]

Mithilfe der Re-Zahl und der dynamischen Viskosität des Fluids η lässt sich nun der erforderliche Rohrinne Durchmesser (Formel 4.10) und die Strömungsgeschwindigkeit (Formel 4.11) berechnen [KSB05].

$$d_R = \frac{\dot{m}_{max}}{\pi \cdot \eta \cdot Re} \tag{4.10}$$

$$c_R = \frac{\dot{m}_{max}}{\rho \cdot \pi \cdot (d_R/2)^2} \tag{4.11}$$

In einem letzten Schritt muss noch die ebenfalls dimensionslose Rohrreibungszahl λ_R ermittelt werden. Als Funktion der Re-Zahl macht diese eine Aussage über die hydraulische Oberflächenbeschaffenheit des Rohres und damit den Einfluss auf den Druckverlust. Bei einer laminaren Strömung innerhalb des Rohres ($Re \leq 2.300$)



lässt sich die Rohrreibungszahl nach Formel 4.12 und im turbulenten Bereich ($Re > 2.300$) nach Formel 4.13 bestimmen [KSB05].

$$\lambda_{R,l} = \frac{64}{Re} \tag{4.12}$$

$$\lambda_{R,t} = \frac{0,3164}{Re^{1/4}} \tag{4.13}$$

Im Subskript wurde dies mithilfe einer sogenannten *if*-Abfrage realisiert. Nach Überprüfung der Bedingung in welchem Bereich sich die Strömung befindet, wird die entsprechende Formel ausgewählt und in Formel 4.9 für den Druckverlust eingefügt.

Tabelle 4.3.: Wesentliche Ergebnisse der Auslegungsrechnung des Wärmespeicher-Subskriptes

Auslegungsrechnung des Speicher-Kreislaufs:	
Innendurchmesser Tank d_SpT =	12.48 m
Außendurchmesser Tank D_SpB =	13.80 m
Behälterhöhe H_SpB =	16.40 m
Tankhöhe (ohne Dämmung) H_SpT =	15.74 m
Anzahl der Speichertanks n_Sp =	1
Geamtes Speichervolumen V_SpTges =	1925.41 m³
Anzahl der Schichten n_Spi =	15
Rohrinnendurchmesser d_SpR =	0.10 m
Strömungsgeschwindigkeit c_Sp =	3.19 m/s
Druckhöhenverlust d_SpR =	0.00 m
Geodätische Höhe H_Spgeo =	16.40 m
Manometrische Druckhöhendifferenz H_Spp =	46.33 m
Förderhöhe der Speicher-VL-Pumpe H_SpA =	62.73 m

Oben abgebildet (Tabelle 4.3) sind alle wesentlichen Ausgaben der Auslegungsrechnung für den Standardbunker des Subskriptes „INIT_Speicher“. Bei der Berechnung der Förderhöhe ist zu erkennen, dass der Druckhöhenverlust im Prinzip keine Auswirkung auf die Pumpenleistung hat. Im Gegensatz zu der manometrischen Druckhöhendifferenz, die im Wesentlichen aus dem hohen Gegendruck des Wärmenetzes resultiert.

4.2.1.2. Initialisierungsskript der Solarkollektoren

Parametereingabe: Im Subskript „INIT_Solarkollektor“ wird die Eingabe der Parameter und im Anschluss daran die Auslegungsrechnungen durchgeführt. In Kapitel 4.1.1 wurden bereits die zwei Kreisläufe des Kollektorsystems beschrieben. Während der Kollektorspeicherkreislauf (KS) mit Wasser aus dem Speicher betrieben wird,



verwendet der Kollektorkreislauf (K) ein Glykol-Wasser-Gemisch (GW), das häufig aus einem Verhältnis von 60 % Wasser und 40 % Glykol besteht (Vgl. [Lut08]). Die Stoffwerte werden analog zu den Kennwerten von Wasser in den ersten Abschnitt des Subskriptes eingegeben.

Für die Berechnung wird ein Standard-Kollektormodul mit indirekt verbundenen Vakuurröhren verwendet. Die Vorteile dieser Systemkonfiguration wurden in Kapitel 2.2.3.1 erläutert. Die notwendigen Eingangswerte können aus dem Datenblatt des gewählten Kollektortyps entnommen werden [Wol09]. Zu den Eingaben gehören u.a. die Abmessungen des Moduls, das mehrere Vakuurröhren zusammenfasst, der Röhren sowie der Transmissionskoeffizient τ_K der Abdeckung und die Wärmeverlustbeiwerte k_0 bzw. k_1 . Der Wärmeverlustfaktor k_0 fasst die experimentell ermittelten Strahlungs-, Konvektions- und Wärmeleitungsverluste in W/m^2 zusammen. Der quadratische Wärmeverlustbeiwert k_1 mit der Einheit W/m^2K^2 ist um etwa zwei Größenordnungen kleiner als der lineare Faktor k_0 und hat daher erst bei hohen Temperaturdifferenzen zwischen der Absorber- und Umgebungstemperatur signifikanten Einfluss auf den Wirkungsgrad und die thermische Nutzleistung [Mol08, S. 43].

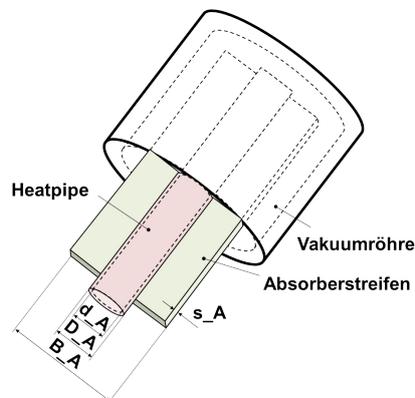


Abbildung 4.8.: Aufbau und Bezeichnungen der Teilkomponenten einer Vakuurröhre eines Röhrenkollektors

Der Absorber selbst, der in der Regel aus Kupfer besteht, hat entscheidenden Einfluss auf die erzielbaren Temperaturen und Leistungen der Anlage. Es gibt unterschiedliche Bauformen des Absorbers in Vakuurröhren. In diesem Fall besteht der Absorber aus der Heatpipe und dem umgebenden Absorberstreifen, wie in Abbildung 4.8 dargestellt ist. Die spezifischen Werte aus dem Datenblatt müssen ebenfalls in das Skript eingegeben werden. Zu den Eingaben zählen der Außen- (D_A) und Innendurchmesser (d_A) der Heatpipe sowie die Breite B_A und Dicke s_A des Absorberstreifens. Weiterhin müssen die dimensionslosen Kennzahlen Emission ϵ_A , Reflexion ρ_A und der Kontaktwiderstand $h_{A,fi}$ des Absorbers bekannt sein. Der



Wärmeübergangskoeffizient und die Wärmeleitfähigkeit für Kupfer lassen sich aus Stoffwerttabellen entnehmen [Kre12]. Für die Aufstellung der Kollektoren werden die Azimutausrichtung und der Anstellwinkel der Kollektorfläche sowie der nicht nutzbare Randbereich der Dachfläche benötigt. Der Abstand zwischen den Fußpunkten der einzelnen Kollektorreihen ist von dem sogenannte Sonnenstands- oder auch Sonnenhöhenwinkel α_s abhängig. Als Kriterium gilt für eine akzeptable gegenseitige Verschattung, dass am solaren Mittag der Wintersonnenwende am Tag des 21.12. keine gegenseitige Abschattung stattfindet. Abhängig von der bereits bekannten Azimutausrichtung der Kollektoren, kann anhand eines Sonnenstanddiagramms für jeden beliebigen Standort der Sonnenhöhenwinkel für den genannten Zeitpunkt bestimmt werden. Für Hamburg beträgt der Winkel $\alpha_s = 14$ Grad [RE13].

Der spezifische Volumenstrom im Low-Flow-Betrieb wird mit 12 l/h je Quadratmeter Absorberfläche angenommen (siehe Kapitel 4.1.1). Nach einem ersten Rechendurchgang ergibt sich nach der Berechnung der Absorberfläche ein konstanter Massenstrom $\dot{m}_K = 0,24 \text{ kg/s}$ bzw. ein Volumenstrom von $\dot{V}_K = 0,85 \text{ m}^3/\text{h}$ für den Kollektorkreislauf. Für die Berechnung der Pumpenleistung ist u.a. der Druckverlust der Kollektormodule zu berücksichtigen. Für den nun bekannten Volumenstrom kann dieser aus einem Diagramm im Datenblatt abgelesen werden (Vgl. [Wol09, S. 8]).

Ähnlich wie in der Auslegungsrechnung des Wärmespeichers kann für die Druckverlustberechnung auch hier eine zusätzliche Länge der geraden Rohrleitungen definiert werden. Da sich die Länge der Rohre jedoch hauptsächlich aus der Entfernung zwischen den Kollektormodulen und der am Boden befindlichen Pumpe, also der Bunkerhöhe, ergibt, kann dieser Wert auf Null gesetzt werden. Anders als beim Speicher, müssen hier die Rohrkrümmungen mit betrachtet werden, da für die Verschaltung der Kollektorreihen eine größere Anzahl an Formteilen benötigt wird. Die Anzahl der Rohrkrümmungen an den Kollektorreihen wird in der Auslegungsrechnung bestimmt. Ähnlich wie bei den geraden Rohren kann auch hier eine zusätzliche Anzahl an Formteilen angegeben werden. Eine grobe Abschätzung aus dem Verlauf der Rohrleitungen ergibt einen Wert von 10 Stück. Für die Bestimmung des Widerstandsbeiwertes der Rohrkrümmung ζ_K wird zudem das Verhältnis zwischen dem Radius und Durchmesser der Rohrbogens benötigt. Der Innendurchmesser der Rohrleitungen wird in der Auslegungsrechnung bestimmt. Mithilfe der Nennweite des Rohres kann aus der DIN 5508 der Mindestbiegeradius der Rohrkrümmung R_{KR} festgelegt werden [KBG01, S. 155f.].

Analog zu der Initialisierungsrechnung des Wärmespeichers muss auch hier der Wirkungsgrad von den beiden Pumpen im Solarkreislauf bestimmt werden. Die Kennwertdiagramme sind jedoch nicht für derart kleine Förderströme geeignet. Eine grobe



Abschätzung ergibt bereits, dass trotz einer Förderhöhe von rund 20 Metern, keine mechanische Pumpenleistung oberhalb 1 kW erreicht wird. Anlagen mit einer Leistungsgröße zwischen 0,1 und 1 kW erreichen in der Regel einen Wirkungsgrad von 45 bis 65 Prozent. Je geringer die Leistung desto geringer ist der Wirkungsgrad, der in diesem Fall mit 45 Prozent angenommen wird [WIL02]. Der abgeschätzte Motorwirkungsgrad von $\eta_K = 72 \%$ ergibt sich aus der Abbildung 4.6 in Kapitel 4.2.1.1 bei einer Leistung von rund 0,75 kW und einer Effizienzklasse IE1 (Vgl. [Top09]). Im letzten Schritt der Eingabe wird ein Faktor $f_K = 0,85$ für den Wärmekapazitätsausgleich am Wärmetauscher eingeführt, der die unterschiedliche spezifische Wärmekapazität zwischen Wasser und dem Glykol-Wasser-Gemisch berücksichtigt und damit den Volumenstrom im Kollektorspeicherkreislauf vorgibt. In guter Näherung kann aus Erfahrungswerten für den Wärmetauscher ein Druckverlust pro Seite von 0,1 bar angenommen werden [Vie08, S. 70].

Auslegungsrechnung: Die Auslegungsrechnung beschränkt sich im KS-Kreislauf lediglich auf die Berechnung des Massenstroms und die Förderhöhe. Im K-Kreislauf hingegen werden zusätzlich die Anordnung der Module und eine Faktorberechnung für die Leistungs- und Temperaturbestimmung des Kollektorsystems durchgeführt.



Abbildung 4.9.: Aufstellfläche, Ausrichtung und Anordnung der Kollektorfelder auf dem Dach des Bunkergebäudes

Zunächst werden die Aufstellung und die damit verbundene Absorberfläche bestimmt. Da die Absorberfläche für jedes Modul bereits aus dem Datenblatt bekannt ist, muss dazu die Anzahl der Module festgelegt werden. Aus den Dachabmessungen abzüglich des nicht nutzbaren Randbereichs ergibt sich eine Nutzfläche von 256 m²



(siehe Abbildung 4.9). In Kapitel 2.2.3.2 wurde bereits ein Mindestabstand zwischen den Kollektorfußpunkten erwähnt, um eine gegenseitige Verschattung möglichst zu verhindern. In Abbildung 4.10 sind die Aufstellung der Reihen und die Bezugsgrößen

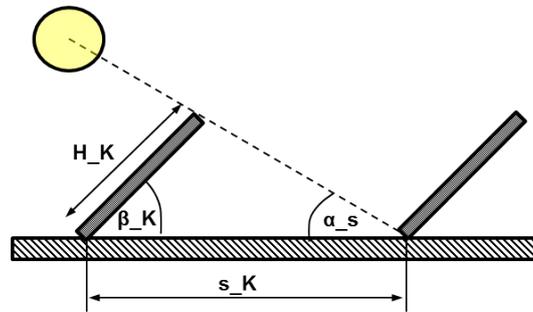


Abbildung 4.10.: Berechnung des Mindestabstands zwischen den Kollektorreihen in Abhängigkeit der Modulhöhe, des Aufstell- und Sonnenstandswinkels

für die Berechnung dargestellt. Die Höhe der Module H_K sowie der Aufstellwinkel β_K und der Sonnenstandswinkel α_s sind aus den Eingaben bekannt. Der Mindestabstand s_K ist ausschlaggebend für die Anzahl der Kollektorreihen auf dem Dach n_{KR} und ergibt sich aus folgender Formel 4.14 [Eic12, S. 53]:

$$s_K = H_K \cdot \cos \beta_K + H_K \cdot \sin \beta_K \cdot \frac{\cos \alpha_s}{\sin \alpha_s} \quad (4.14)$$

Durch Abrunden des Quotienten aus der Dachlänge des Bunkers abzüglich des Randbereichs und des Mindestabstands der Kollektormodule, ergibt sich die Anzahl der Reihen auf dem Dach. Die Anzahl der Module pro Reihe lässt sich analog dazu bestimmen, nur dass die Länge durch die Breite des Daches und der Mindestabstand durch die Breite der Kollektormodule ersetzt werden. Multipliziert man beide Ergebnisse miteinander, lässt sich so die Anzahl der Module und damit auch die gesamte Absorberfläche ermitteln. Diese wiederum bestimmt mithilfe des spezifischen Volumenstroms aus den Eingangsdaten den notwendigen Volumen- bzw. Massenstrom des Kollektorkreislaufs.

Die im Kollektor auftretenden Verluste teilen sich auf in die optischen Verluste, die vor der Umwandlung der Strahlung in Wärme entstehen, und in thermische Verluste, welche die bereits erzeugte Wärme vermindern (siehe Abbildung 4.11).

Während die thermischen Verluste von sowohl von der Strahlungsleistung G als auch von der Temperaturdifferenz zwischen der Absorber- und Außentemperatur abhängig sind, sind die optischen Verlusten konstant und werden durch den Konversionsfaktor η_0 , auch optischer Wirkungsgrad genannt, beschrieben. Dieser lässt

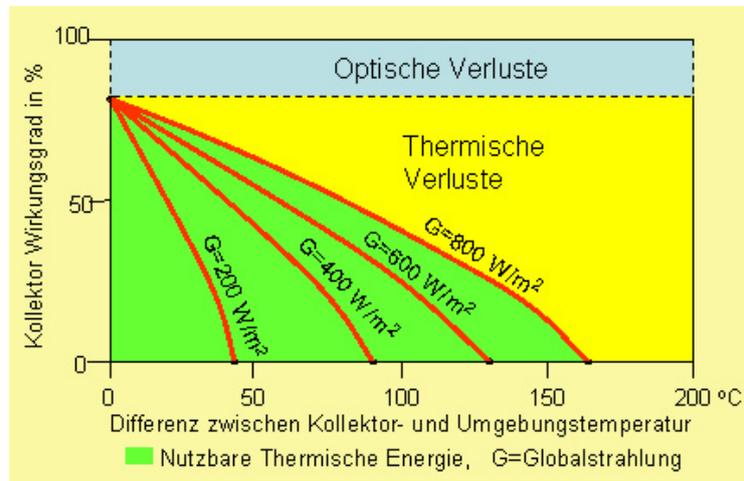


Abbildung 4.11.: Kollektorwirkungsgrad in in Abhängigkeit der Einstrahlung und der Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Umgebung [Jun12]

sich nach Formel 4.15 berechnet und ist von der Transmission der Glasabdeckung τ_K und dem Absorptionsvermögen des Absorbers α_A abhängig [Mol08, S. 43f.].

$$\eta_0 = \tau_K \cdot \alpha_A \quad (4.15)$$

Der Transmissionskoeffizient kann aus dem Datenblatt entnommen werden. Der Absorptionskoeffizient muss hingegen rechnerisch ermittelt werden. Grundsätzlich gilt für alle Stoffe:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (4.16)$$

Das bedeutet, die Summe aus absorbiertes α , reflektiertes ρ und transmittiertes τ Strahlungsleistung ist gleich der gesamten auftreffenden Strahlungsleistung. Für undurchsichtige Körper wie den Absorber gilt $\tau_A = 0$. Umgestellt nach dem unbekannten Absorptionsvermögen des Absorbers α_A , lautet die Formel wie folgt:

$$\alpha_A = 1 - \rho \quad (4.17)$$

Die Nutzleistung der Kollektoren berechnet sich allgemein aus der Absorberfläche, des Transmissions- und Absorptionskoeffizienten, der Globalstrahlung, des Wärmeverlustfaktors k_0 und der Differenz aus Absorber- (T_A) und Umgebungstemperatur T_U (siehe Formel 4.18).

$$\dot{Q}_N = A_K \cdot (\tau_K \cdot \alpha_A \cdot G - k_0 \cdot (T_A - T_U)) \quad (4.18)$$

Diese Grundgleichung ist für eine Systemberechnung jedoch nicht geeignet, da die Absorbtemperatur weder gemessen werden kann, noch ist sie eine „Systemein-



gangsgröße“. In diesem Fall wird ein vereinfachtes analytisches Kollektormodell nach *Hottel, Whillier und Bliss* (HWB) angewendet, das sowohl die Nutzleistung als auch die VL-Temperatur mithilfe eines Wärmeabfuhrfaktors F_R bestimmt. Dieser gibt das Verhältnis der tatsächlichen zur erzielbaren Nutzleistung an, wenn der vollständige Absorber die RL-Temperatur des Fluids besitzt (Vgl. [DB91]). Der Wärmeabfuhrfaktor ist eine Funktion des Massenstroms \dot{m}_K , der spezifischen Wärmekapazität des Glykol-Wasser-Gemisches $c_{p,GW}$, der Absorberfläche A_K , des Wärmeverlustfaktors k_0 und des sogenannten Absorberwirkungsgradfaktor F^* (siehe Formel 4.19) [Eic12, S. 98f.].

$$F_R = \frac{\dot{m}_K \cdot c_{p,GW}}{A_K \cdot k_0} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-k_0 \cdot F^* \cdot A_K}{\dot{m}_K \cdot c_{p,GW}}\right)\right) \quad (4.19)$$

Der Absorberwirkungsgradfaktor F^* ist ein Maß für die Effizienz der Energieübertragung vom Absorberblech auf den Wärmeträger und ist u.a. von den Absorbergeometrien abhängig, die bereits im Abschnitt *Parametereingabe* erläutert wurden.

$$F^* = \frac{1/k_0}{B_A \cdot \left(\frac{1}{h_{A,fi} \cdot \pi \cdot d_A} + \frac{1}{\lambda_A} + \frac{1}{((B_A - D_A) \cdot F + D_A) \cdot k_0}\right)} \quad (4.20)$$

Weitere Faktoren sind der Wärmeübergangskoeffizient $h_{A,fi}$ und die effektive Kontaktleitfähigkeit λ_A , die bei heutigen Absorberkonstruktionen in der Regel vernachlässigbar ist. Der Faktor F bezeichnet den Kühlkörperwirkungsgrad des Absorbers und gibt das Verhältnis des tatsächlichen Wärmestroms zum idealen Wärmestrom an, der sich ergibt, wenn das gesamte Absorberblech die Eingangstemperatur des Fluids mit entsprechend geringen Wärmeverlusten hätte.

$$F = \frac{\tanh(m \cdot (B_A - D_A)/2)}{m \cdot (B_A - D_A)/2} \quad (4.21)$$

Der Wert m bildet dabei eine materialspezifische Konstante der Differenzialgleichung ab und lässt sich u.a. mit der Absorberblechdicke s_A und dem Wärmeleitkoeffizienten für Kupfer λ_{Cu} nach folgender Formel bestimmen:

$$m = \sqrt{\frac{k_0}{s_A \cdot \lambda_{Cu}}} \quad (4.22)$$

Mithilfe des ermittelten Wärmeabfuhrfaktors F_R lässt sich im Simulink-Modell eine dynamische Nutzleistung und die entsprechenden VL-Temperaturen berechnen. Vergleichbar mit der Pumpendimensionierung des Speichers, muss auch im KS- und K-Kreislauf die Förderhöhe bestimmt werden. Diese und der Volumenstrom sind im K-Kreislauf konstant, was dementsprechend auch für die Pumpenleistung der Kollektorpumpe gilt. Aus diesem Grund kann die Leistung bereits in der Auslegungsrechnung ermittelt werden und wird anschließend als Konstante an das Modell übergeben. Im ersten Schritt werden die Rohrgeometrien festgelegt. Aufgrund des ge-



ringen Förderstroms haben die genannten Kennwertdiagramme für die Reynoldszahl bei turbulenter Strömung keine Bedeutung mehr. Somit kann eine Re-Zahl von 2.300 gewählt werden, die einen vertretbaren Rohrdurchmesser bei einer laminaren und damit weniger verlustbehafteten Strömung zulässt. Der Rohrrinnendurchmesser und die Strömungsgeschwindigkeit werden nach dem Formeln 4.10 und 4.11 bestimmt. Zu beachten ist hierbei, dass sich die Stoffwerte auf das Glykol-Wasser-Gemisch beziehen. Für den Druckhöhenverlust müssen alle einzelnen Druckverluste im K-Kreislauf aufsummiert werden. Reibungsbedingte Verluste von geraden Rohren ergeben sich aus der Formel 4.9. Die Länge der geraden Rohre resultiert aus der doppelten Bunkerhöhe für RL und VL. Die Druckverluste durch Formteile lassen sich anhand der Formel 4.23 bestimmen.

$$\Delta p_{V,F} = n_F \cdot \zeta_F \cdot \frac{\rho}{2} \cdot c_R^2 \quad (4.23)$$

Die Anzahl der Formteile n_F ergibt sich dabei aus der Summe der Rück- und Vorläufe der Kollektorreihen sowie der anfangs erwähnten zusätzlichen Rohrbogenanzahl. Der Widerstandsbeiwert des Formteils ζ_F bildet sich aus dem Verhältnis des Druckhöhenverlustes zum Staudruck unter der Angabe, ob es sich um ein hydraulisch glattes oder rauhes Rohr handelt. Bei neuen Kupferrohren kann davon ausgegangen werden, dass diese sich hydraulisch glatt sind. Es existieren Tabellenwerke, die zu einem festen Verhältnis zwischen Biegeradius und Durchmesser des Rohrbogens den entsprechenden Beiwert ausgeben (Vgl. [SS11, S. 7]). Da dies nur für ganzzahlige Verhältnisse der Fall ist, wird das Ergebnis aufgerundet und im Skript mit einer *switch-case*-Anweisung überprüft. Im Falle einer Übereinstimmung mit dem vorgegeben Wert, wird der zugehörige Widerstandsbeiwert ausgegeben. Andernfalls wird eine Änderung des Krümmungsradius gefordert.

Zusammen mit dem Druckverlust des Kollektorfeldes, der sich aus dem Produkt der gesamten Modulanzahl und dem spezifischen Verlustwert ergibt, und dem kollektorseitigen Druckverlust des Wärmetauschers, lässt sich der Gesamtdruckverlust und der Druckhöhenverlust des K-Kreislaufes bestimmen. Da es sich hierbei um einen geschlossenen Kreislauf handelt, ist zum einen die geodätische Höhe Null, zum anderen entspricht die manometrische Druckhöhendifferenz einzig dem Abstand zwischen der Pumpe und dem Kollektor. Die Summe der Höhenverluste bzw. die Förderhöhe der Anlage (siehe Formel 4.4) geht in die Berechnung der Pumpen- und Motorleistung (Formel 4.2 und 4.3) ein. Wie bereits im ersten Abschnitt beschrieben, wird für den KS-Kreislauf der Volumenstrom über einen Kapazitätsausgleichsfaktor bestimmt. Die höhere spezifische Wärmekapazität von Wasser resultiert aus einem um den genannten Faktor geringen Volumenstrom. Aufgrund der Einschichtung des Kollektorspeicher-VL ändert sich während des Betriebes auch die benötigte Pumpeleistung. Konstante Werte sind zum einen der Druckhöhenverlust, der sich aus dem Druckverlust des Wärmetauschers ergibt, da aufgrund der geringen Anzahl an



Formteilen und geraden Rohren diese Verluste vernachlässigt werden können. Zum anderen befindet sich der RL des KS-Kreislaufs in der untersten Schicht des Speichers und gibt damit einen konstanten Vordruck am Eintritt der Saugleitung vor. Dieser berechnet sich aus den Druckverhältnissen am Boden des Speicherbehälters.

Die folgende Tabelle 4.4 fasst alle wesentlichen Ausgaben der Auslegungsrechnung zusammen:

Tabelle 4.4.: Wesentliche Ergebnisse der Auslegungsrechnung des Solarkollektor-Subskriptes

Auslegungsrechnung des Solarkollektor-Kreislaufs:	
Kollektor-Kreislauf:	
Anzahl der Kollektorreihen s_{KA} =	5
Anzahl der Module pro Reihe n_K =	9
Anzahl der Einzelmodule n_K =	45
Absorberfläche A_{KA} =	72.00 m ²
Massenstrom Kollektorkreislauf m_{punkt_K} =	0.24 kg/s
Optischer Wirkungsgrad η_0 =	0.84
Wärmeabfuhrfaktor F_{KR} =	0.97
Rohrquerschnitt d_{KR} =	0.04 m
Strömungsgeschwindigkeit c_K =	0.20 m/s
Druckhöhenverlust H_{Kv} =	14.18 m
Maometrische Druckhöhendifferenz H_{Kp} =	20.00 m
Förderhöhe der Anlage H_{KA} =	34.18 m
Motorleistung P_{KMotor} =	0.11 kW(e1)
Kollektorspeicher-Kreislauf:	
Massenstrom m_{punkt_KS} =	0.20 kg/s
Druckhöhenverlust H_{KSv} =	1.05 m

Wie in der Abbildung 4.9 zu Beginn dieses Kapitels bereits skizziert, werden insgesamt 5 parallel geschaltete Reihen mit jeweils 9 Modulen auf dem Dach installiert. Die daraus resultierenden 45 Module haben eine Absorberfläche von 72 m². Der Massenstrom von 0,24 kg/s verteilt sich aufgrund der Tichelmann-Anordnung gleichmäßig über alle Kollektorreihen und ist neben der Förderhöhe des Kreislaufs von rund 34 m für die elektrische Motorleistung von 0,11 kW verantwortlich. Mit dem HWB-Modell lässt sich ein Wärmeabfuhrfaktor von 0,97 für die Vakuumröhren bestimmen. Der KS-Kreislauf besitzt einen um 15 % verringerten Massenstrom von 0,2 kg/s.

4.2.1.3. Initialisierungsskript des Blockheizkraftwerks und Heißwassererzeugers

Das Initialisierungsskript des BHKW „INIT_BHKW“ und des HWE „INIT_HWE“ werden in diesem Kapitel zusammengefasst, wobei zunächst das Skript des BHKW beschrieben wird.



Subskript „INIT_BHKW“: Im Gegensatz zum HWE kann der heizungsseitige Volumenstrom des BHKW nicht beliebig geregelt werden (siehe Kapitel 2.2.2) werden. Auf Nennlast erreicht das BHKW in der Regel eine Temperaturspreizung von 20 Kelvin zwischen RL und VL. Die maximale VL-Temperatur der ausgewählten Motoren ist auf 90 °C beschränkt [UH11, S. 5f.]. Sollte die RL-Temperatur aus dem Speicher höher sein als die maximale RL-Temperatur von 70 °C, muss das BHKW die Leistung reduzieren. Die beschränkte Regelfähigkeit des BHKW wird über einen Faktor berücksichtigt, der ausgehend von der Nennlast eine untere Leistungsgrenze von 30 % festlegt. Unterhalb dieser Grenze schaltet sich das BHKW ab. Bis zu einem gewissen Grad kann die Pumpe des BHKW-Speicherkreislaufs den Volumenstrom erhöhen, um diese Leistungsdefizite aufzufangen. Dazu wird die erforderliche Nennleistung um einen Pumpenfaktor von 1,2 erhöht. Erreicht die Pumpe ihre Leistungsgrenze, bleibt der maximale Massenstrom konstant und die thermische Nutzleistung des Kreislaufs nimmt ab.

Hersteller von BHKW geben für eine erste Dimensionierung der Anlage Anhaltswerte für den Gesamtdruckverlust der BHKW-Wärmetauscher von 0,2 bar je Fluidseite an [Zil14]. Die Wirkungsgrade der Pumpe und des Motors werden analog zu Kapitel 4.2.1.1 ermittelt. Für die Simulation können im Initialisierungsskript bis zu drei verschiedene BHKW definiert werden. Aufgrund der Beschränkung auf einen Motor wird für die in Kapitel 4.1.2.3 beschriebenen Szenarien die Leistung des ersten BHKW variiert. Die anderen beiden Motoren werden deaktiviert.

Zunächst wird ein gewünschter Wert für die thermische Leistung zwischen 0,5 und 10 MW eingegeben. Mithilfe eines sogenannten *Cell Arrays*, das mehrdimensionale Elemente einer beliebigen Datenstruktur zusammenfasst, wurden alle notwendigen Kenndaten von erdgasbetriebenen BHKW in verschiedenen Leistungsklassen eingebunden [ASU11]. Zu den Kenndaten zählen bspw. die elektrischen, thermischen und Brennstoffnennleistungen bzw. Wirkungsgrade sowie die maximalen Vor- und Rücklauftemperaturen. Anschließend wird ein Nullvektor erzeugt, dessen Elemente über eine Schleife mit den elektrischen Leistungen der BHKW aus dem *Cell Array* überschrieben werden. Ein weiterer Vektor berechnet den Betrag aus der Differenz zwischen der Leistungseingabe und den Leistungsdaten des zuvor gebildeten Vektors. Der kleinste Betrag definiert die entsprechende Stelle innerhalb des Vektors und damit auch das verwendete BHKW. Im letzten Schritt werden alle Kennwerte des ausgewählten BHKW entsprechenden Variablen zugeordnet.

Da aus den Datenblättern ausschließlich die Nennleistungen bekannt sind, wird für den vorgegeben Regelbereich ein fester Faktor für das Verhältnis zwischen elektrischer und thermischer Leistung sowie Brennstoff- und elektrischer Leistung definiert. Aus der Grundgleichung der Wärmelehre, die eine Aussage darüber macht wie viel



4. Dynamische Analyse / Modellierung eines Energiebunkers

thermische Energie ein Körper aufnimmt oder abgibt (siehe Formel 4.24 und 4.25), ergibt sich der maximale Massenstrom des BHKW-Kreislaufs \dot{m}_{max} (Formel 4.26). Dieser ist von der um den Pumpenfaktor F_P erhöhten thermischen Nennleistung \dot{Q} , der spezifischen Wärmekapazität und der maximalen Temperaturspreizung ΔT abhängig.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \tag{4.24}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T \tag{4.25}$$

$$\dot{m}_{max} = \frac{\dot{Q} \cdot F_P}{c_p \cdot \Delta T} \tag{4.26}$$

Die untere thermische Leistungsgrenze des BHKW ergibt sich aus dem Produkt der Nennleistung und dem zuvor definierten Regelbereich von maximal 30 % der Nennleistung. Die Bestimmung der Rohrgeometrien und der Förderhöhe der Anlage erfolgt nach dem gleichen Schema wie in Kapitel 4.2.1.1. Da analog zum Speicher das BHKW in die oberste ein- und aus der untersten Schicht ausspeist, gelten die gleichen Höhen- und Rohrlängenbedingungen. Druckverluste durch Formteile können hier ebenfalls vernachlässigt werden. Die manometrische Druckhöhendifferenz resultiert aus dem Druck am Ein- und Ausspeisestutzen im Speicher.

Tabelle 4.5.: Wesentliche Ergebnisse der Auslegungsrechnung des Blockheizkraftwerk-Subskriptes

Auslegungsrechnung des BHKW-Kreislaufs:	
BHKW 1:	
Gewünschte th. Leistung:	500 kW
Ermittelte th. Leistung P _{th} =	538 kW, mit Typ GG 402 S (GK 40)
El. Leistung P _{el} =	405 kW
Brennstoffleistung P _{br} =	1045 kW
El. Wirkungsgrad eta _{el} =	0.39
Th. Wirkungsgrad eta _{th} =	0.52
Gesamtwirkungsgrad eta _{ges} =	0.90
Rohrgeometrien und Förderhöhen:	
Maximaler Massenstrom mpunkt _{BHKWmax} =	7.70 kg/s
Rohrinnendurchmesser d _{BHKW_R} =	0.07 m
Strömungsgeschwindigkeit c _{BHKW} =	2.38 m/s
Druckhöhenverlust H _{BHKWv} =	0.00 m
Geodätische Höhe H _{BHKWgeo} =	14.69 m
Manometrische Druckhöhendifferenz H _{BHKWp} =	14.17 m
Förderhöhe der Anlage H _{BHKWA} =	28.86 m

Für das erste Szenario wurde beispielhaft eine thermische Leistung von 500 kW gewählt. Aus den Kenndaten ergibt sich damit ein entsprechendes BHKW, das mit den benötigten Motordaten ausgegeben wird (siehe Tabelle 4.5). Ebenfalls ausgegeben werden Rohrgeometrien und die Höhenparameter der Pumpenanlage.



Subskript „INIT_HWE“: Das HWE wird nach dem bereits erwähnten $n-1$ -Kriterium ausgelegt und muss damit die maximale Wärmelast des Netzes von rund 6,5 MW bereitstellen können. Die Eingaben für den HWE beschränken sich auf die Wirkungsgrade des HWE sowie der Pumpe und des Motors. Während der Pumpen- und Motorwirkungsgrad analog zum Speicher bestimmt wird, kann aus Datenblättern von erdgasbefeuerten HWE-Kesseln in der genannten Leistungsklasse ein Wirkungsgrad von 93 % bestimmt werden. Aus diesen lässt sich zudem ein Druckverlust von 0,25 bar auf der Wasserseite des HWE ablesen [Vie13, S. 6].

Da sich der Output des HWE zum Großteil aus den zeitgesteuerten Ausgangswerten des Speichers und BHKW berechnet, wird in der Auslegungsrechnung der Druckhöhenverlust, der sich aus dem Druckverlust des HWE ergibt, bestimmt. Sollte der HWE eingesetzt werden, fördert die Speicherpumpe das Heißwasser des Vorlaufs über den Bypass des HWE und muss in diesem Fall den Druckverlust des HWE ausgleichen. Die Pumpe des HWE-Kreislaufs wird nur dann eingesetzt, wenn der gesamte Speicherkreislauf keinen Output liefern kann und der HWE den Rücklauf vom Wärmenetz bezieht. In diesem Fall ist die Pumpenleistung sowohl vom Verlust im HWE als auch vom Netzdruck und den Druckverlusten in den Rohren zwischen Bunker und Wärmenetz abhängig.

4.3. Zeitgesteuerte Simulation des Bunkermodells

Im vorherigen Kapitel wurden alle Eingaben und konstanten Parameter definiert und in das Modell eingelesen. Darauf aufbauend werden die dynamischen Berechnungen der Simulation mithilfe von Blockschaltbildern in Simulink ausgeführt. Dabei werden im gesamten Modell in jedem Zeitschritt die im Folgenden erklärten Berechnungsschritte durchgeführt. Das Modell wird ähnlich dem Initialisierungsskript in mehrere Subsysteme unterteilt. Der grundlegende Aufbau des Hauptmodells ist in Abbildung 4.12 dargestellt.

Als Input gehen die mittlere Strahlungsleistung und die Zeitreihen der RL- und VL-Temperatur des Wärmenetzes sowie die Außentemperatur in das Modell ein. Der Solarkollektor und das BHKW geben den Massenstrom und die VL-Temperatur an den Speicher weiter. Der Output des Speichers bildet sich zum einen aus der RL-Temperatur des BHKW und zum anderen aus dem Massenstrom und der VL-Temperatur des HWE. Ist die Differenz zwischen der VL-Temperatur des Speichers und der benötigten Temperatur des Netzes größer als Null, wird diese vom HWE ausgeglichen. In den folgenden Kapiteln werden die Subsysteme und deren Vernetzung detaillierter beschrieben.

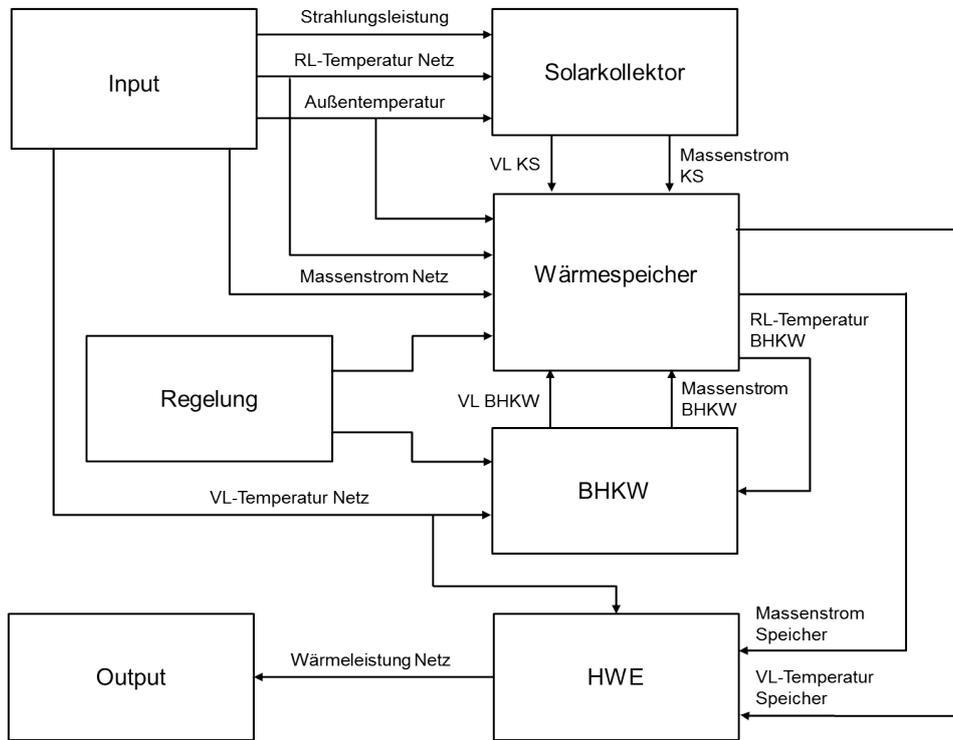


Abbildung 4.12.: Anordnung der Komponentenblöcke des Hauptmodells

4.3.1. Modellierung des Solarkollektors

Das Subsystem des Solarkollektors bezieht seine Inputwerte ausschließlich aus den zuvor beschriebenen Zeitreihen. Der Kollektor- und Kollektorspeicherkreislauf wurden der Übersichtlichkeit halber in Subsysteme unterteilt. Der KS-Kreislauf bezieht seine RL-Temperatur aus der untersten Speicherschicht. In der Praxis wird üblicherweise eine optimale Temperaturdifferenz von 5 Kelvin zwischen den beiden RL-Temperaturen der Kreisläufe angestrebt [Vie08, S. 70]. Mithilfe der nun bekannten RL-Temperatur des K-Kreislaufs $T_{K,RL}$, der Globalstrahlung und den konstanten Größen aus dem Initialisierungsskript lässt sich die VL-Temperatur der Solarkollektoren $T_{K,VL}$ nach folgender Formel 4.27 berechnen [But09, S. 103f.]:

$$T_{K,VL} = T_{K,RL} + \frac{G \cdot \tau_K \cdot \alpha_A}{k_0} - \frac{G \cdot \tau_K \cdot \alpha_A}{k_0} \cdot \exp\left(\frac{-k_0 \cdot F^* \cdot A_K}{\dot{m}_K \cdot c_p}\right) \quad (4.27)$$

Die zugehörige Nutzleistung des Kollektors lässt sich mithilfe des Wärmeabfuhrfaktors F_R aus der Auslegungsrechnung bestimmen (Formel 4.28) [Eic12, S. 104].

$$\dot{Q}_K = F_R \cdot A_K \cdot (G \cdot \tau_K \cdot \alpha_A - (T_{K,RL} - T_U)) \quad (4.28)$$



Zu diesem Zeitpunkt sind allerdings noch keine Wärmeverluste in den Rohrleitungen $\dot{Q}_{K,v}$ mit berücksichtigt. Diese werden nach der Formel 4.29 sowohl für die VL- als auch für die RL-Rohrleitung berechnet [Wos08, S. 85].

$$\dot{Q}_{K,v} = \frac{l_R \cdot \pi \cdot \Delta T}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_D} \cdot \ln\left(\frac{D_D}{d_D}\right) + \frac{1}{h_{DU} \cdot D_D}} \quad (4.29)$$

Die Wärmeverluste ergeben sich dabei aus der Länge der Rohre, der Differenz zwischen der Temperatur des Mediums im Rohr und der Umgebung ΔT sowie von dem Wärmeleitkoeffizienten der Dämmung λ_D , dem Innen- bzw. Außendurchmesser der Dämmung und dem Wärmeübergang h_{DU} zwischen der Dämmung und Umgebung. Abzüglich der Wärmeverluste von der Kollektorleistung ergibt sich die Nutzleistung des K-Kreislaufs, die über den Wärmetauscher an den KS-Kreislauf übertragen wird. Da sich die RL-Temperatur des Speichers bereits auf einem hohen Temperaturniveau befindet, muss sichergestellt werden, dass der Kollektor bei geringen Strahlungsleistungen nicht den Speicher abkühlt. Bei ersten Rechendurchläufen wurde festgestellt, dass unterhalb einer Einstrahlung von 100 W/m^2 die VL-Temperatur die kritische Grenze der maximalen RL-Temperatur des Speichers bzw. des Kollektorspeichers unterschreitet. In Simulink wird diese Grenzeinstrahlung mit einem sogenannten *Switch* überprüft, so dass der Kollektor erst ab einer Einstrahlung von mehr als 100 W/m^2 seinen Betrieb aufnimmt und die Leistung an den Speicher abgibt. Der Kollektorwirkungsgrad ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen der spezifischen Nutzleistung des Kollektors und der eingestrahelten Leistung (Formel 4.30) [Eic12, S. 105].

$$\eta_K = \frac{\dot{Q}_K}{A_K \cdot G} \quad (4.30)$$

Die Pumpenleistung des Primärkreislaufs wurde bereits in der Initialisierungsrechnung bestimmt. Im zeitgesteuerten Model wird anhand des Massenstroms lediglich überprüft, ob der Kollektor in Betrieb ist. Bei Stillstand der Anlage wird der Wert Null gesetzt, andernfalls wird eine konstante Pumpenleistung ausgegeben. Der Wärmeübergang zwischen den beiden Kreisläufen im Wärmetauscher wird vereinfachend als adiabat angenommen, d.h. es werden keine Wärmeverluste mitberücksichtigt. Die Wärmeleistung des Kollektorvorlaufs entspricht der des Kollektorspeichers ($\dot{Q}_K = \dot{Q}_{KS}$). Die unbekannt VL-Temperatur des KS erhält man durch die Äquivalenzumformung der Wärmegrundgleichung (siehe Formel 4.24). Daraus ergibt sich folgende Formel 4.31:

$$T_{KS,VL} = T_{KS,RL} + \frac{\dot{m}_K \cdot c_{p,GW} \cdot (T_{K,VL} - T_{K,RL})}{\dot{m}_{KS} \cdot c_{p,W}} \quad (4.31)$$

Die Berechnung der Pumpenleistung erfolgt in Simulink innerhalb einer Matlab-Funktion. Diese führt ebenfalls zu jedem Zeitschritt die definierten Berechnungen



aus, erweitert oder vereinfacht jedoch die Berechnungen anstelle einer Blockschaltung. Die Funktion überprüft mithilfe einer *Wenn-Oder*-Abfrage die VL-Temperatur des Sekundärkreislaufs und gibt als Output die entsprechende Höhe des jeweiligen Einspeisestutzens aus. Anhand dieser Höhe kann die Förderhöhe und damit auch die elektrische Leistung der Pumpe analog zu Kapitel 4.4 berechnet werden.

4.3.2. Modellierung des Wärmespeichers

Der Massenstrom und die VL-Temperatur des KS-Kreislaufs werden an das Subsystem des Speichers übergeben. Weitere Eingangsgrößen sind die Zeitreihen der Außentemperatur, der RL-Temperatur und des Massenstromes des Wärmenetzes sowie die VL-Temperatur und der Massenstrom des BHKW. Die letzten beiden Inputwerte und die ebenfalls als Eingangswert definierte thermische Leistung des HWE müssen über einen sogenannten *Memory*-Block gesteuert werden, da sie in direkter Abhängigkeit von der Speicherberechnung stehen. Der *Memory*-Block verzögert die Berechnung um einen Zeitschritt und gibt im ersten Berechnungszyklus einen festgelegten Startwert an die Speicherfunktion aus. Der Startwert für die VL-Temperatur des Speichers wurde bereits im Initialisierungsskript bestimmt (siehe Kapitel 4.4). Aus dem maximalen Massenstrom ergibt sich der Startwert des BHKW, und für den HWE wurde der Wert 0 angenommen. Über ein Steuerungs-Subsystem in der obersten Ebene lassen sich die Terme der Wärmelast, des Kollektors und des BHKW manuell deaktivieren oder aktivieren. Abschließend werden sämtliche Konstanten aus der Parametrierungsrechnung (Kapitel 4.2) geladen, die für die Speichersimulation von Bedeutung sind und als Input in das Subsystem eingehen.

Die Modellierung des Speichers findet ebenfalls in einer Matlab-Funktion statt. Der Speichertank wird in $n_{sp} = 15$ Schichten mit einer Schichthöhe von rund 1 Meter eingeteilt. Das BHKW speist oben in Schicht $i = 1$ ein und bezieht seinen RL aus der untersten Schicht $N = 15$. Mit dem Speicher-VL und RL verhält es sich in umgekehrter Reihenfolge. Der Solarkollektor-RL befindet sich ebenfalls in der untersten Schicht, speist allerdings je nach VL-Temperatur in Schicht 1, 4, 7, 10 oder 13 ein. Zunächst werden in der Funktion alle hydraulischen Parameter definiert. Für alle externen Massenströme der drei Kreisläufe werden Schichtvektoren und ein Summenvektor mit der Schichtanzahl an Elementen und dem Wert Null erzeugt. Anschließend wird den Nullvektoren in der entsprechenden Schicht, und je nach Fließrichtung des Mediums, ein positiver oder negativer Massenstrom zugeordnet. Der Summenvektor fasst alle Vektoren zusammen und erstellt für jede Schicht eine Bilanzrechnung der externen Massenströme.

Zwischen den Schichten wird u.a. eine erzwungene Strömung der Wärmemenge \dot{Q}_e ausgetauscht, die in Zusammenhang mit der externen Massenstrombilanz des Spei-



chers steht. Generell gilt, in einer Schicht ohne externe Anschlüsse sind die Wärmekapazitätsströme zwischen den Schichten gleich und der erzwungenen Wärmestrom errechnet sich aus [Eic12, S. 121]:

$$\dot{Q}_e = (\dot{m} \cdot c_p)_{i-1} \cdot (T_{i-1} - T_i) + (\dot{m} \cdot c_p)_i \cdot (T_i - T_{i+1}) \quad (4.32)$$

Für die Berechnung des Energieaustausches zwischen den Schichten müssen die externen Massenströme mit berücksichtigt werden, so dass zunächst die effektiven Massenströme \dot{m}_i zwischen den Schichten zu bestimmen sind (siehe Abbildung 4.13). Dazu wird abermals ein Nullvektor mit der Anzahl der Schichten erzeugt. In der ersten und aus der letzten Schicht ist der effektive Massenstrom gleich Null. In Schicht 2 bildet sich der Massenstrom aus dem Summenvektor der externen Energiebilanz. Das gilt auch für alle weiteren Schichten, denen über eine Schleifenfunktion der entsprechende effektive Massenstrom zugeordnet wird.

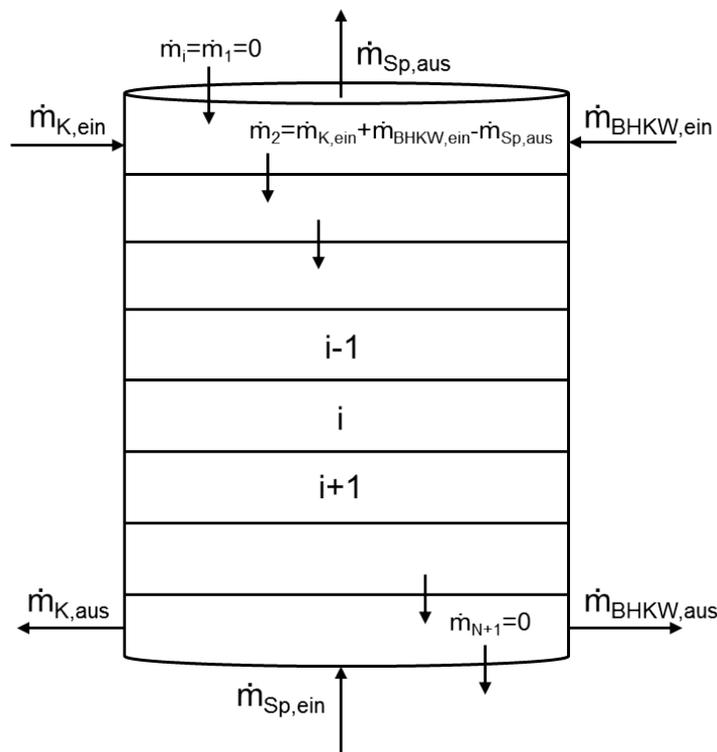


Abbildung 4.13.: Externe und interne effektive Massenströme des Wärmespeichers mit N Schichten

In der Bilanzierung wird ein positiver effektiver Massenstrom aus Schicht $i - 1$ mit dem Parameter $\delta_{i+} = 1$ berücksichtigt, andernfalls ist der Wert Null. Im Falle des Überwiegens des Lastmassenstroms wird die Schicht i abgekühlt, was zu einem negativen effektiven Massenstrom aus Schicht $i + 1$ und einem Parameter $\delta_{i-} = 1$ führt. Für die Bilanzrechnung in der Schicht gilt ebenfalls, dass bei einem Massen-



strom der externen Lastflüsse kleiner oder gleich Null, die jeweilige Wärmeleistung ebenfalls Null ist, da diese abgeführt wird und nicht mehr zu einer Erhöhung der Schichttemperatur beiträgt bzw. diese gegebenenfalls sogar verringert. Die thermische Berechnung der Schichten geschieht in insgesamt drei Unterfunktionen. Jeweils eine für die unterste und oberste Schicht sowie über eine Schleifenberechnung der Zwischenschichten.

Ziel ist es, für jede Schicht die Temperaturänderung über der Zeit zu beschreiben. Dafür muss in jeder Schicht eine Gesamtbilanz der Wärmeleistung erstellt werden. Neben den Wärmemengenströmen des Solarkollektors, des BHKW und der Speicherlast sowie der erzwungenen Konvektion durch die effektiven Massenströme ist auch der Wärmeverlust über die Speicherwand und die freie Konvektion innerhalb der Schichten mit zu berücksichtigen. Der Wärmeverlust \dot{Q}_v ist von den effektiven Wärmedurchgängen U_{eff} der gedämmten Speicherwand und des Deckels sowie dem Fundament am Boden des Speichers abhängig. Die Werte sind bereits aus der Initialisierungsrechnung bekannt. Weitere Einflussfaktoren sind die Temperaturdifferenz zwischen Schicht- und Umgebungstemperatur $T_i - T_U$ und der Außenwandfläche A_i der Schicht (Formel 4.33) [Eic12, S. 75].

$$\dot{Q}_v = U_{eff} \cdot A_i \cdot (T_i - T_U) \quad (4.33)$$

Eine genaue mathematische Modellierung der Wärmeleitung durch freie Konvektion ist sehr aufwändig. In guter Näherung kann die Wärmeströmung mit einer effektiven vertikalen Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} ersetzt werden. Der Wärmeübergang zwischen Schicht $i - 1$ und i sowie von i nach $i + 1$ ergibt sich mit der Schichthöhe H_i und der Querschnittsfläche $A_{q,i}$ aus der Differenz der beiden Wärmeströme (Formel 4.34) [Eic12, S. 120].

$$\dot{Q}_f = A_{q,i} \cdot \frac{\lambda_{eff}}{H_i} \cdot (T_{i+1} - 2 \cdot T_i + T_{i-1}) \quad (4.34)$$

Durch eine hohe effektive Wärmeleitfähigkeit wird die vertikale Temperaturschichtung im Speicher abgebaut. Die effektive Wärmeleitfähigkeit liegt bei guten Speichern ohne innere Einbauten im Bereich der Wärmeleitfähigkeit von Wasser mit $\lambda_{eff} = 0,663 \text{ W/mK}$ bei einer mittleren Speichertemperatur von $75 \text{ }^\circ\text{C}$. In der obersten Schicht findet keine freie Konvektion statt.

Bei der erzwungenen und freien Konvektion tritt eine Kopplung der Gleichungen für Schicht i mit den Schichten $i - 1$ und $i + 1$ auf. Das Gleichungssystem wird vereinfacht, wenn in jedem Zeitschritt nur der Energieeintrag aus der vorhergehenden Schicht $i - 1$ betrachtet wird, so dass sich die Temperaturänderung in jedem Knoten i von der ersten bis zur letzten Schicht nacheinander berechnen lässt. Für jeden



Temperaturknoten gilt mit dem Zeitschritt $\Delta t = 60$ Sekunden und der Schichtmasse m_i folgende Energiebilanz (Formel 4.35) [Eic12, S. 122]:

$$\begin{aligned} \Delta T_i = \frac{\Delta t}{m_i \cdot c_p} \cdot \left[\left(\dot{m}_{KS} \cdot c_p \cdot (T_{KS,VL} - T_i) \right) + \left(\dot{m}_{BHKW} \cdot c_p \cdot (T_{BHKW,VL} - T_i) \right) \right. \\ - \left(\dot{m}_{Sp} \cdot c_p \cdot (T_i - T_{Sp,RL}) \right) - \left(U_{eff} \cdot A_i \cdot (T_i - T_U) \right) - \left(A_{q,i} \cdot \frac{\lambda_{eff}}{H_i} \cdot (T_i - T_{i-1}) \right) \\ \left. + \left(\delta_{i+} \cdot \dot{m}_i \cdot c_p \cdot (T_{i-1} - T_i) \right) + \left(\delta_{i-} \cdot \dot{m}_{i+1} \cdot c_p \cdot (T_i - T_{i+1}) \right) \right] \end{aligned} \quad (4.35)$$

Da zum Zeitpunkt $t = 0$ die Temperatur der Schichten im Speicher noch nicht bekannt ist, wird eine Starttemperatur angenommen, die der RL-Temperatur des Netzes zum ersten Zeitschritt entspricht. Die neue Schichttemperatur $T_{i,neu}$ ergibt sich aus der Temperaturdifferenz ΔT_i und wird für jede Schicht in einem Vektor zusammengefasst (Formel 4.36).

$$T_{i,neu} = T_i + \Delta T_i \quad (4.36)$$

Die VL-Temperatur des Speichers, die der Temperatur in der Schicht 1 entspricht, und die Temperatur für den BHKW- und Kollektor-RL in der letzten Schicht des Speichers werden als Funktionsausgang den anderen Subsystemen übergeben. Das gilt auch für die Speicher- und Pumpenleistung des Speicherkreislaufs. Letztere wird über eine *if*-Abfrage geregelt, die je nach Einsatz des HWE die Druckverluste im Bypass mit berücksichtigt.

4.3.3. Modellierung des Blockheizkraftwerkes

Das Blockschaltbild des dynamischen Modells des BHKW ist in Abbildung 4.14 dargestellt. Das Subsystem des BHKW bezieht seinen Input aus dem BHKW-Fahrplan und in Form der RL-Temperatur aus der untersten Speicherschicht. Die VL-Temperatur des BHKW ergibt sich aus der Spreizung von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ zwischen VL und RL und erreicht maximal $90 \text{ }^\circ\text{C}$. Hat sich die unterste Schicht im Speicher so weit erwärmt, dass diese Spreizung nicht mehr eingehalten werden kann, wird die Leistung reduziert. Ein *Min*-Block regelt die VL-Temperatur anhand der Spreizung und sorgt bei Überschreiten der $90 \text{ }^\circ\text{C}$ für eine konstante maximale VL-Temperatur. Ähnliches gilt für den Massenstrom, der sich aus der Wärmegrundgleichung (Formel 4.24) ergibt und u.a. von der thermischen Nennleistung und der Spreizung abhängig ist. Wird der maximale Massenstrom überschritten, wird dieser konstant gesetzt und die tatsächliche Wärmeleistung, die sich ebenfalls aus der Wärmegrund-

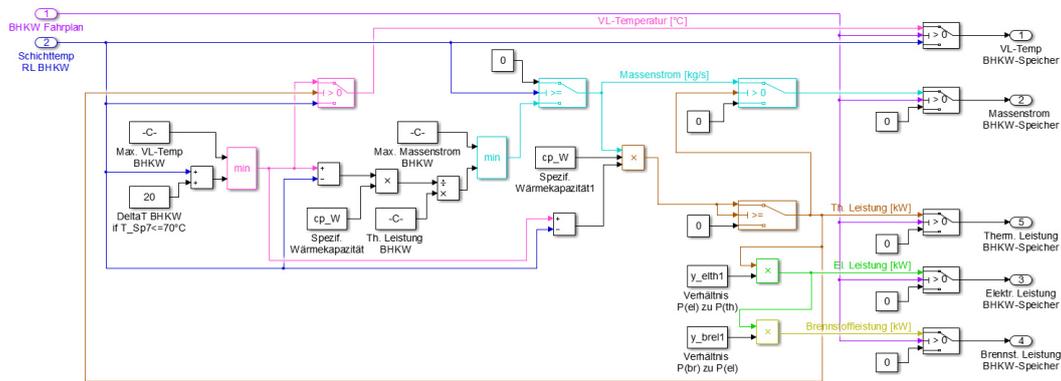


Abbildung 4.14.: BHKW-Blockschaltbild des Simulink-Modells

gleichung bestimmen lässt, reduziert sich bis die untere Leistungsgrenze von 30 % erreicht ist und sich das BHKW abschaltet. In der Auslegungsrechnung wurden bereits zwei Faktoren für das Verhältnis der elektrischen und Brennstoffleistung definiert. Durch Multiplikation mit der thermischen Nutzleistung ergeben sich deren Ausgangswerte. Der Fahrplan regelt den Betrieb des BHKW in Form einer Zeitreihe mit 0 oder 1. Die Ausgabe wird jeweils durch einen *Switch* an den Blockausgängen der VL-Temperatur, des Massenstroms und der drei Nutz- bzw. Bezugsleistungen geregelt.

Die Pumpenleistung ist nicht im Schaltbild dargestellt. Diese wird analog zum KS-Kreislauf als Matlab-Funktion in Simulink eingebunden und ist neben den konstanten Größen aus der Initialisierungsrechnung vom dynamischen Massenstrom des BHKW abhängig.

4.3.4. Modellierung des Heißwassererzeugers

Der HWE bildet die Differenz aus der VL-Temperatur des Speichers und der benötigten Temperatur im Wärmenetz. Gemeinsam mit dem Massenstrom ergibt sich aus der Wärmegrundgleichung die thermische Leistung des HWE, die für die Lastabdeckung des Netzes erforderlich ist. Der im Auslegungsskript festgelegte Wirkungsgrad gibt die erforderliche Brennstoffleistung vor. Da auch hier die Pumpenleistung allein von der dynamischen Größe des Massenstroms abhängig ist, wird die elektrische Leistung des Pumpenmotors innerhalb einer Matlab-Funktion berechnet. In Kapitel 4.2.1.3 wurde der Sonderfall der HWE- Pumpe bereits erwähnt. Die Pumpe ist also nur in Betrieb, wenn der Lastmassenstrom nicht über den Speicherkreislauf, sondern ausschließlich über den HWE-Bypass zirkuliert.



5. Visualisierung und Auswertung des Simulationsmodells

In Kapitel 3 wurden insgesamt 10 Zivilschutzbunker identifiziert, deren Potenzial für eine Konversion zu einem Energiebunker als besonders hoch eingeschätzt wird. Ein Objekt wurde als Standardbunker festgelegt, an dessen Beispiel ein Simulationsmodell mit der Bezeichnung „Energiebunker_Modell“ erstellt wurde. Die Parametrierung des Modells erfolgt analog zum Standardbunker und lässt sich damit auf sämtliche Bunker adaptieren. Eine Simulation des gesamten Netzwerkes lässt sich allerdings erst mit den entsprechenden Eingangsdaten bewerkstelligen, die zum jetzigen Zeitpunkt nicht vorhanden sind. Im Verlauf des Projektes „Smart Power Hamburg“ bietet das Modell jedoch die Grundlage für die Simulation eines solchen Netzwerkes. Zudem ist die Einbindung des Gesamtsystems oder einzelner Komponenten in bestehende oder zukünftige Simulink-Modelle durch den strukturellen Aufbau von Subsystemen mit den notwendigen Schnittstellen relativ einfach zu gestalten. Für den oben genannten Standardbunker kann mit den Annahmen, dass es sich bei dem am Bunkerstandort befindlichen Verteilnetz um eine autarke Versorgung durch den Energiebunker handelt und die Lastdaten sich, ausgenommen der Vor- und Rücklauftemperaturen, prozentual aus den Daten des gesamten FW-Netzes der Stadt Hamburg bilden (siehe Kapitel 4.1.2.1), eine Simulation der Wärmeversorgung durchgeführt werden. Dazu werden drei Szenarien erstellt, die sich in der Leistungsgröße des BHKW unterscheiden. Szenario 1 bildet eine konventionelle Auslegung mit der thermischen Minimallast von 0,5 MW ab, so dass das BHKW möglichst viele Stunden im Jahr in Betrieb ist. Das zweite Szenario erhöht die Leistung auf 1,5 MW und Szenario 3 auf insgesamt 2,5 MW Wärmeleistung.

Der Einsatzfahrplan des BHKW ist, wie in Kapitel 2.2.2 bereits erklärt, von einer Vielzahl an Kriterien abhängig. Aus diesem Grund wurden die Betriebszeiten mithilfe eines Fahrplan-Generators des C4DSI erzeugt. Das grundsätzliche Ziel dieser Simulation ist es, herauszufinden welche Leistungsgröße des BHKW in Bezug auf den Wärmebedarf optimal für den Einsatz in einem Energiebunkersystem geeignet ist und welche Schwachstellen das System besitzen könnte. Die Ergebnisse der dynamischen Berechnung werden in Form von Diagrammen visualisiert. Die Ausgangsdaten beziehen sich dabei, wenn nicht anders angegeben, auf den Zeitverlauf über das gesamte Jahr 2012 in Minuten (X-Achse).



5.1. Speichersystem

In Abbildung 5.1 sind die Vorlauftemperaturen des Wärmespeichers für alle drei Szenarien abgebildet. Die Temperaturen sind von der Energiebilanz in der obersten Speicherschicht abhängig, die während der Simulation in der Speicherfunktion berechnet wird. Abhängig von der thermischen Leistung des Kollektors und des BHKW sowie dessen Einsatzzeiten, ergibt sich eine entsprechende VL-Temperatur. Zum größten Teil bestimmt das BHKW das Leistungspotenzial des Speichers, da die erreichbare Wärmeleistung des Kollektors im Vergleich nur einen minimalen Einfluss auf die Wärmebilanz und damit auch auf die Temperaturen im Speichers hat. Das spiegelt sich auch in den erreichbaren Vorlauftemperaturen des Speichers wider, die im Prinzip ausschließlich von der maximalen Vorlauftemperatur des BHKW von $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ vorgegeben wird (siehe Kapitel 4.2.1.3). Während bei großen Motoren mit einer thermischen Nennleistung von 2,5 bzw. 1,5 MW die Grenztemperatur über einen Großteil des Jahres erzielt wird, ist die maximale VL-Temperatur des Speichers mit dem kleinsten Motor von 0,5 MW bereits bei $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht.

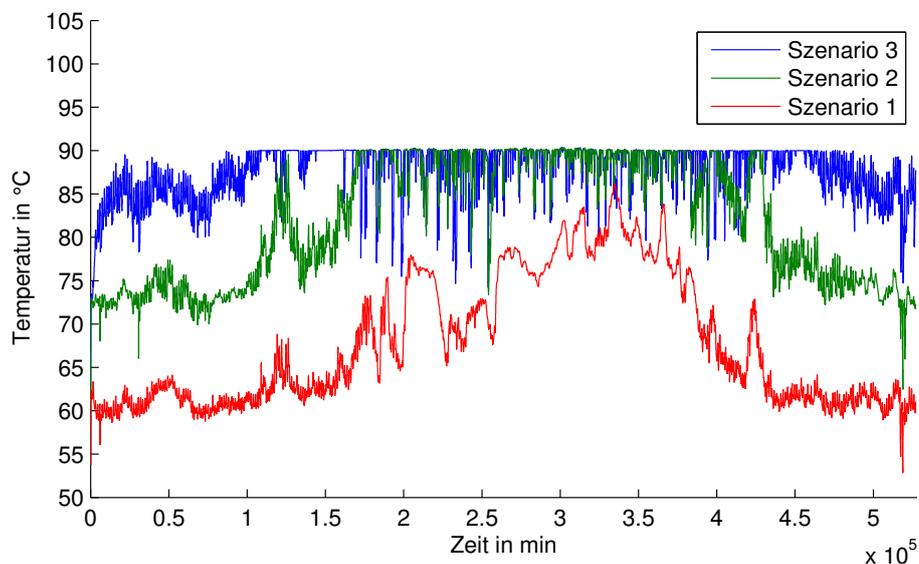


Abbildung 5.1.: Vorlauftemperatur des Speichers für alle drei Szenarien

Das bei kleinen Motoren nicht die maximal mögliche VL-Temperatur des Speichers erreicht wird, liegt unter anderem auch daran, dass die Leistung des BHKW im Verhältnis zur Wärmelast des Netzes nicht ausreicht, um alle Schichten des Speichers zu erwärmen. In Abbildung 5.2 ist für das erste Szenario der Temperaturverlauf der 6 Schichten dargestellt, an denen VL- und/oder RL-Stutzen der Erzeuger und des Wärmenetzes angebracht sind. Das BHKW speist in die oberste Schicht ein, in der sich auch der VL des Speichers befindet. Die eingebrachte Leistung wird zu



jedem Berechnungsschritt vollständig aus dem Speicher entnommen, so dass kein Wärmeaustausch durch erzwungene Konvektion mit den unteren Schichten stattfinden kann. Wird keine Wärmeleistung mit der untersten Schicht ausgetauscht, in der sich u.a. der RL des BHKW befindet, so kann infolge der maximalen Temperaturspreizung des BHKW von 20 Kelvin auch nicht die VL-Temperatur erhöht werden.

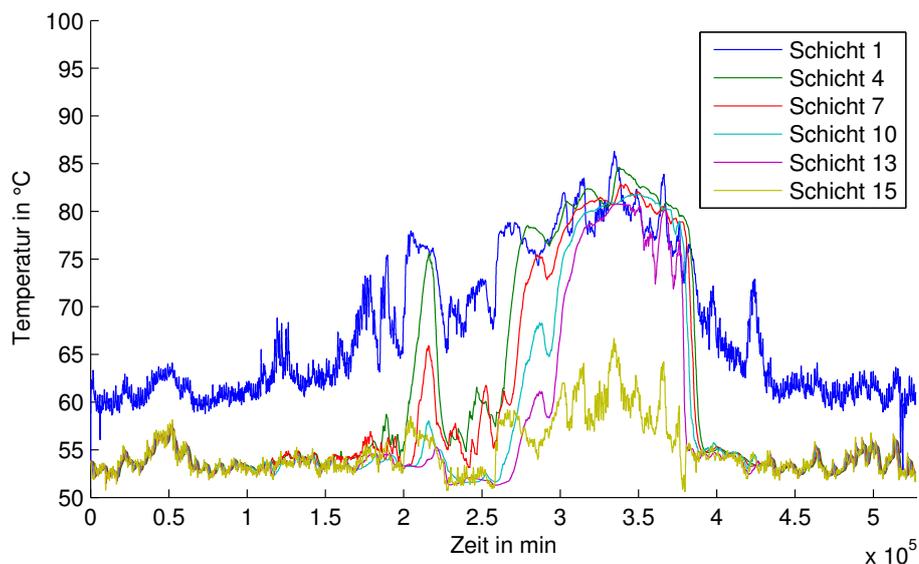


Abbildung 5.2.: Schichttemperatur der Schichten 1, 4, 7, 10, 13, 15 für Szenario 1

Zur Jahresmitte speist der Kollektor, aufgrund einer solaren Einstrahlung oberhalb des Grenzwertes von 100 W/m^2 , über die aktive Schichtung in unterschiedliche Höhen des Speichers ein, so dass diese sich erwärmen und insbesondere im Hochsommer dazu beitragen, dass sich die Temperatur der untersten Schicht etwas erhöht und damit die RL- bzw. die VL-Temperatur des BHKW gesteigert werden kann. Mit dem größten Motor aus Szenario 3 ist zum einen die Wärmenennleistung um ein vielfaches größer als im ersten Szenario und zum anderen erhöht sich der externe Massenstrom (siehe Kapitel 5.3), der wiederum Einfluss auf den effektiven Massenstrom im Speicher hat. Im Falle des dritten Szenario, dargestellt in Abbildung 5.3, ist der Massenstrom des Motors größer als der Lastmassenstrom, was einen positiven und damit von oben nach unten gerichteten effektiven Massenstrom im Speicher bewirkt. Die Wärmeleistung, die nicht über den Speicher-VL an das Netz abgegeben wird, erwärmt sämtliche Schichten des Speichers. Aus der untersten Schicht 15 wird Leistung über den RL des BHKW und Kollektors entzogen, so dass diese sich erst mit Reduzierung des Lastmassenstroms erhöht. Die Maximaltemperatur von 90 °C wird in der letzten Schicht jedoch zu keinem Zeitpunkt erreicht, da ab einer RL-Temperatur von etwa 82 °C die untere Leistungsgrenze des BHKW erreicht ist,



5. Visualisierung und Auswertung des Simulationsmodells

der Motor den Betrieb einstellt und keine thermische Leistung mehr in den Speicher abgegeben wird.

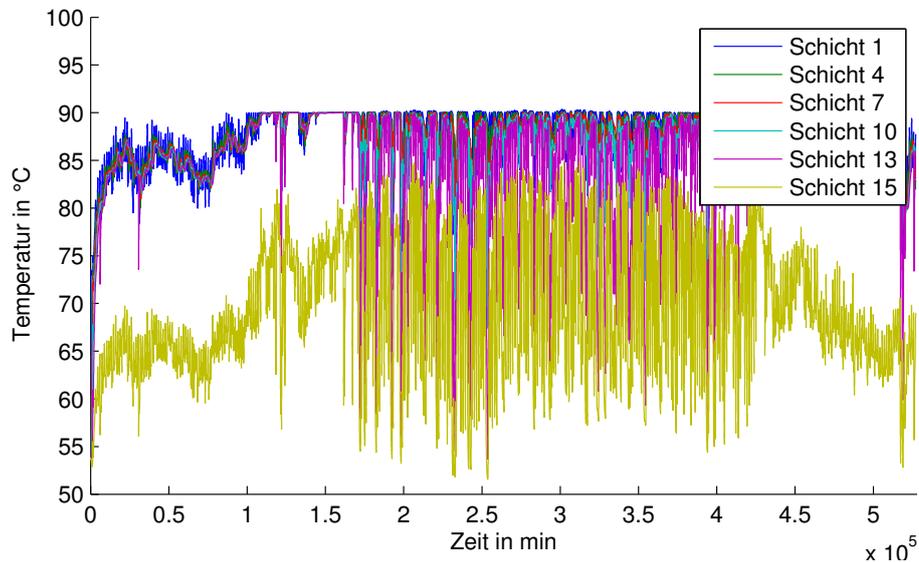


Abbildung 5.3.: Schichttemperatur der Schichten 1, 4, 7, 10, 13, 15 für Szenario 3

Um zu verdeutlichen, wie sich der zeitliche Verlauf der Temperaturschichtung verhält, wurden im Diagramm 5.4 die Schichttemperaturen für das Szenario 3 zu Beginn der Simulation bzw. in den ersten 10 Tagen des Jahres abgebildet.

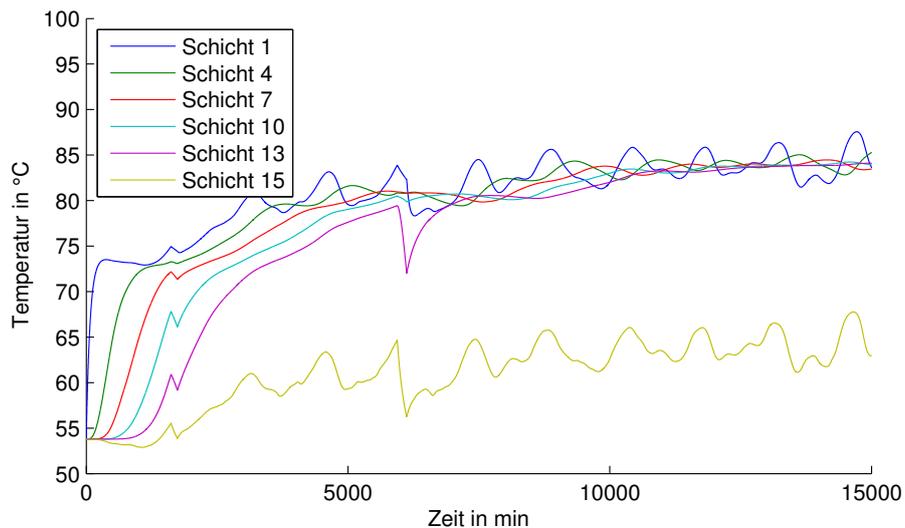


Abbildung 5.4.: Teilausschnitt der Schichttemperatur der Schichten 1, 4, 7, 10, 13 und 15 für Szenario 3



Während die unterste Schicht hauptsächlich vom Netz-RL dominiert wird, erreicht die erste Schicht, trotz großer Leistungsentnahme durch die Verbraucher im Winter, bereits nach etwa 5 Stunden eine Temperatur von rund $74\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Schicht 4 benötigt für dieses Temperaturniveau 20 Stunden und Schicht 7 etwa 40 Stunden. Solange der effektive Massenstrom positiv ist, erwärmt sich der gesamte Speicher und jede Schichttemperatur steigt bis zum Erreichen der Grenztemperatur von $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ kontinuierlich an. Die vereinzelt Ausschläge der Graphen sind dem Abschalten des BHKW geschuldet, das nach Fahrplan zu diesen Zeitschritten keine Leistung abgibt.

Die Grafik 5.5 stellt den Sonderfall dar, dass weder Leistung aus dem Speicher entnommen wird, noch speist der Kollektor ein. Der Speicher wird ausschließlich von dem BHKW beladen. Dabei sind für das Szenario 1 und 3 jeweils die Temperaturverläufe der Schichten 1, 7 und 15 in den ersten 7 Tagen dargestellt.

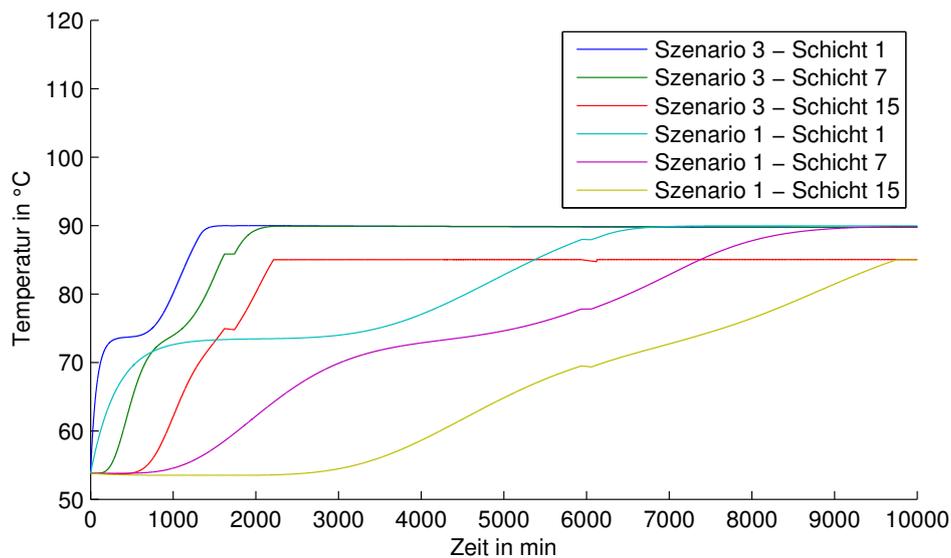


Abbildung 5.5.: Ausschnitt der Temperatur der Schichten 1, 7 und 15 mit BHKW-Eintrag (ohne Last und Kollektor) für Szenario 1 und 3

Zu erkennen ist in der Grafik auch die bereits genannte Temperaturgrenze des BHKW-RL aus der untersten Schicht sowie der Temperaturverlauf ab $74\text{ }^{\circ}\text{C}$ aufgrund der Beschränkung einer maximalen Temperaturspreizung von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ zwischen VL und RL. Sobald sich die unterste Schicht und damit der RL des BHKW erwärmt, kann der Motor, unter Beachtung der Leistungsgrenze der Pumpe und des BHKW, die VL-Temperatur bis $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ erhöhen. Das BHKW mit einer thermischen Leistung von $2,5\text{ MW}$ benötigt etwa 35 Stunden um den gesamten Speicher von 54 auf $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu erwärmen. Im Vergleich dazu benötigt das kleinste BHKW mit $0,5\text{ MW}$ bis zu 170 Stunden um den Speicher vollständig zu beladen.

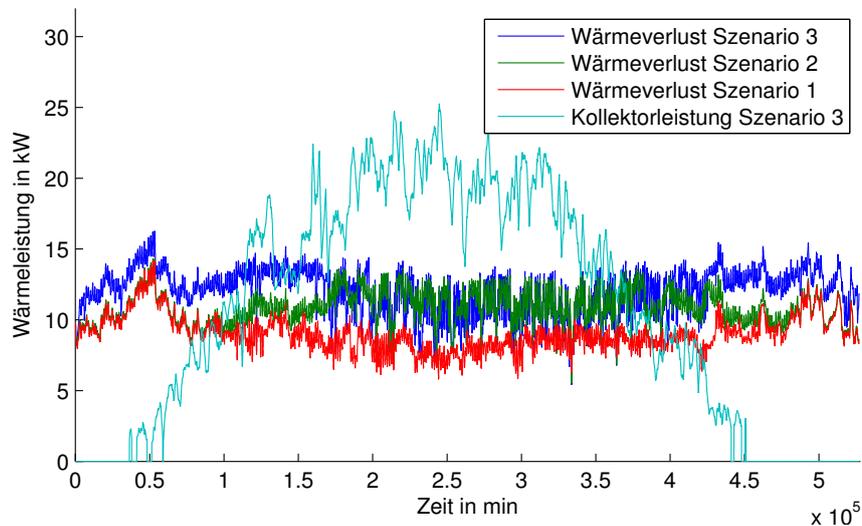


Abbildung 5.6.: Wärmeverluste des Speichers für alle Szenarien und Wärmeleistung des Kollektorsystems

Die Wärmeverluste über die gesamte Außenhülle des Speichers sind in Abbildung 5.6 veranschaulicht. Je größer die Temperaturdifferenz in den einzelnen Schichten zur Außentemperatur ist, desto höher sind die Verluste. Wie zu erwarten war, sind die Verluste in Szenario 1 mit durchschnittlich 10 kW am geringsten und in Szenario 3 mit etwas mehr als 12 kW am größten. Da der effektive Massenstrom im Speicher zu Beginn und gegen Ende des Jahres aufgrund der größeren Wärmelast negativ ist, werden in Szenario 2 die unteren Schichten analog zu Szenario 1 nicht erwärmt. Daraus resultiert ein entsprechend identischer Verlauf der Verluste. Im Sommer und zur Übergangszeit ist der BHKW-Massenstrom größer als der Lastmassenstrom, die Schichten werden durch erzwungene Konvektion erwärmt und die Verluste steigen.

Zusätzlich zu den Wärmeverlusten ist auch die eingebrachte Wärmeleistung der Kollektoren für Szenario 3 in dem Diagramm dargestellt. Wie sich in Kapitel 5.2 herausstellen wird, sind die Abweichungen der Kollektorleistung zwischen den Szenarien äußerst gering. Im Sommer erreicht die Einstrahlung und damit auch die thermische Leistung des Kollektors von rund 25 kW das Maximum. Wie bereits erwähnt, hat der Kollektor im Vergleich zu der Nennleistung des BHKW keinen wesentlichen Einfluss auf die Wärmeleistung des Speichers. In der Summe kann das Kollektorsystem jedoch die Speicherverluste über das Jahr minimieren und in diesem Fall sogar ausgleichen. Bei Vernachlässigung der Rohrleitungsverluste des BHKW-Systems und der bereits berücksichtigten Verluste des Kollektorkreislaufs, kann der Wärmespeicher in Verbindung mit den genannten Erzeugern für den Betrachtungszeitraum von einem Jahr als „wärmeverlustfrei“ bezeichnet werden.



5.2. Kollektorsystem

In Abbildung 5.7 sind die Vorlauf- und Rücklauftemperaturen des Kollektorspeicher-Kreislaufs für das erste und dritte Szenario dargestellt. Der Sekundärkreislauf ist direkt mit dem Wärmespeicher verbunden und bezieht seinen RL aus der untersten Schicht des Speichers, dessen Temperatur durch den RL des Wärmenetzes vorgegeben wird.

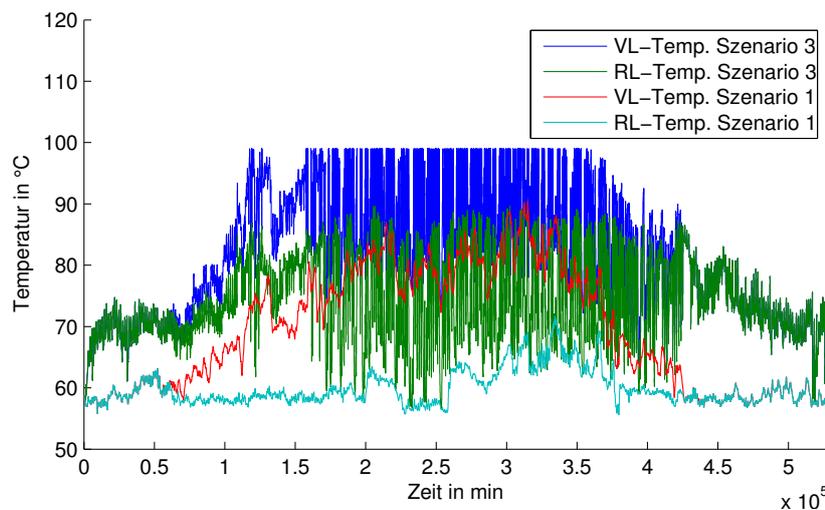


Abbildung 5.7.: VL- und RL-Temperatur des Kollektors für Szenario 1 und 3

Aufgrund des bereits sehr hohen RL-Temperaturniveaus des Netzes und der geringeren Solarstrahlung in den Wintermonaten, erreicht das System nicht die notwendige VL-Temperatur, um über ein aktives Schichtsystem dem Speicher Wärme zuzuführen (siehe Kapitel 4.2.1.2). Der Kollektor ist in dieser Zeit nicht in Betrieb und die Differenz zwischen RL- und VL-Temperatur beträgt in der Simulation für alle Szenarien gleich Null. Sobald eine Einstrahlung von mehr als 100 W/m^2 erreicht wird, schalten sich die Pumpen ein und der Kollektor produziert Wärme. Im Sommerhalbjahr erreicht das Szenario 1, bei einer Einstrahlung von rund 500 W/m^2 , VL-Temperaturen bis zu $90 \text{ }^\circ\text{C}$ mit einer maximalen Temperaturspreizung von rund $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Im dritten Szenario erwärmt sich im Gegensatz zum kleinen Motor die RL-Schicht des Kollektorspeicher-Kreislaufs und die VL-Temperatur erreicht Temperaturen von mehr als $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Das gilt in der Praxis, im Hinblick auf die gemittelten Tageswerte des Simulationinputs, auch für eine größere momentane Bestrahlungsstärke von bis zu 800 W/m^2 . Da es sich jedoch um eine drucklose Auslegung des Speichers handelt, muss ab einer Grenztemperatur von $99 \text{ }^\circ\text{C}$ der Kollektor-VL entweder abgekühlt oder der Massenstrom erhöht werden. Statt einem kontinuierlichen Low-Flow-Betrieb, wäre eher eine hydraulische Fahrweise im Matched-Flow-Modus



5. Visualisierung und Auswertung des Simulationsmodells

sinnvoll, die im Falle eines Überschreitens der maximal zulässigen VL-Temperatur den Förderstrom erhöht. Dadurch kann das Temperaturniveau im Kollektor gesenkt werden und dennoch Wärmeleistung an den Speicher abgegeben werden.

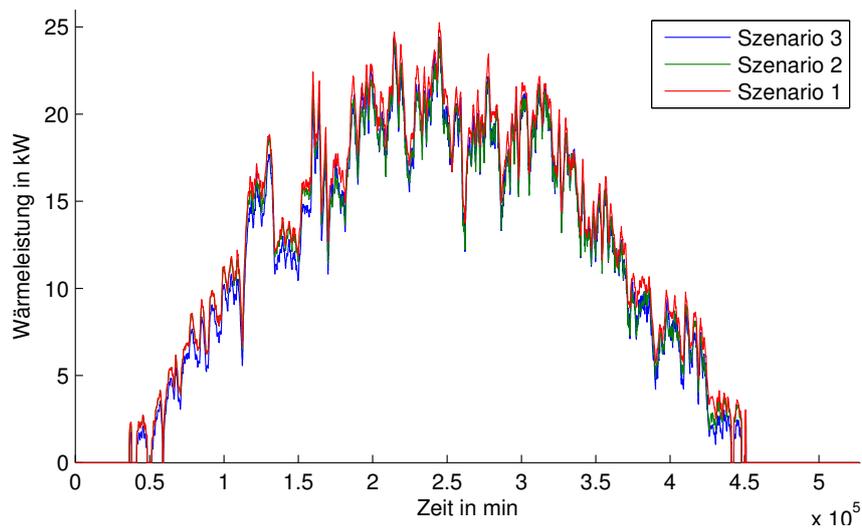


Abbildung 5.8.: Wärmeleistung des Kollektorsystems

Die Begrenzung der maximalen VL-Temperatur führt in der Simulation dazu, dass sich mit der Motorgröße die Differenz zwischen VL- und RL-Temperatur verringert und die Kollektorleistung reduziert wird (siehe Abbildung 5.8). Allerdings sind die Abweichungen zwischen den Szenarien verhältnismäßig gering. Zumindest für die gemittelte Solarstrahlung, hat die Differenz zwischen den Temperaturspreizungen (trotz Temperaturbegrenzung) nur wenig Einfluss auf die Leistung des Kollektors.

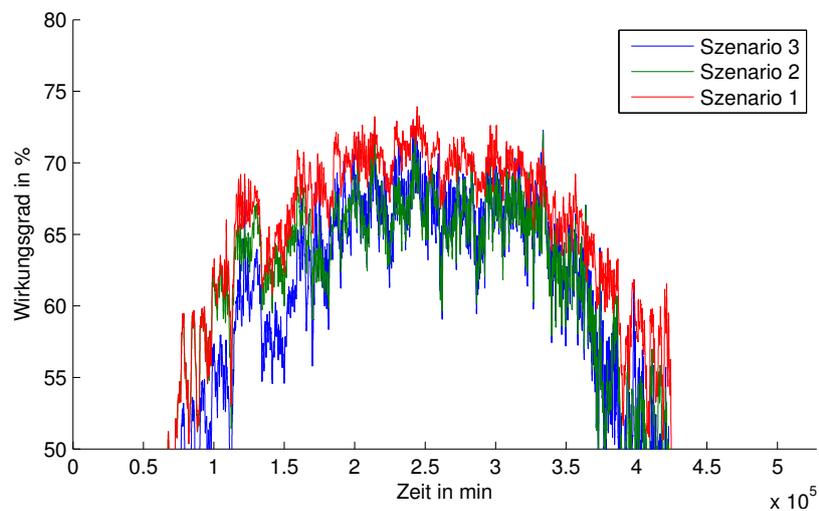


Abbildung 5.9.: Wirkungsgrad des Kollektorsystems



Diese Erkenntnis unterstreicht auch die Abbildung 5.9, die den Kollektorwirkungsgrad der drei Szenarien darstellt. Der Kollektor des Szenario 1 erzielt während der Sommermonate durchschnittlich einen Wirkungsgrad von etwa 71 % und Szenario 2 bzw. 3 variieren um ca. 68 %.

5.3. Blockheizkraftwerk und Heißwassererzeuger

Die tatsächliche Leistungsgröße des BHKW wird während der Simulation aus den Kennwerten der Motordatenbank angepasst. Für die angenommenen thermischen Leistungen der Szenarien ergeben sich folgende Nennleistungen die in die Berechnung eingehen:

- *Szenario 1* ($0,5 MW_{th}$):
 - Thermische Leistung: 538 kW
 - Elektrische Leistung: 405 kW
 - Brennstoffleistung: 1.045 kW
- *Szenario 2* ($1,5 MW_{th}$):
 - Thermische Leistung: 1.505 kW
 - Elektrische Leistung: 1.413 kW
 - Brennstoffleistung: 3.358 kW
- *Szenario 3* ($2,5 MW_{th}$):
 - Thermische Leistung: 2.399 kW
 - Elektrische Leistung: 2.433 kW
 - Brennstoffleistung: 5.606 kW

In Abbildung 5.10 ist der zeitliche Verlauf der Wärmeleistung des BHKW für alle drei Szenarien visualisiert. Im Normalfall wird das BHKW binär betrieben, d.h. entweder wird die Nennleistung an den Speicher und das Stromnetz abgegeben oder der Motor ist aus und die Leistung entsprechend Null. Das Szenario 1 bildet diese Fahrweise besonders deutlich ab. Abgesehen von einigen Stunden im Winter liefert das kleinste BHKW kontinuierlich über das Jahr hinweg die thermische Nennleistung von 538 kW. Die Anzahl der Betriebsstunden verringert sich signifikant mit ansteigender Leistungsgröße. Vorrangig zu schwachen Lastzeiten im Sommerhalbjahr liefern die Motoren des Szenario 2 und 3 keine Energie. Aufgrund der Anhebung der RL-Temperatur wird insbesondere im dritten Szenario, das BHKW im Teillastbereich betrieben.

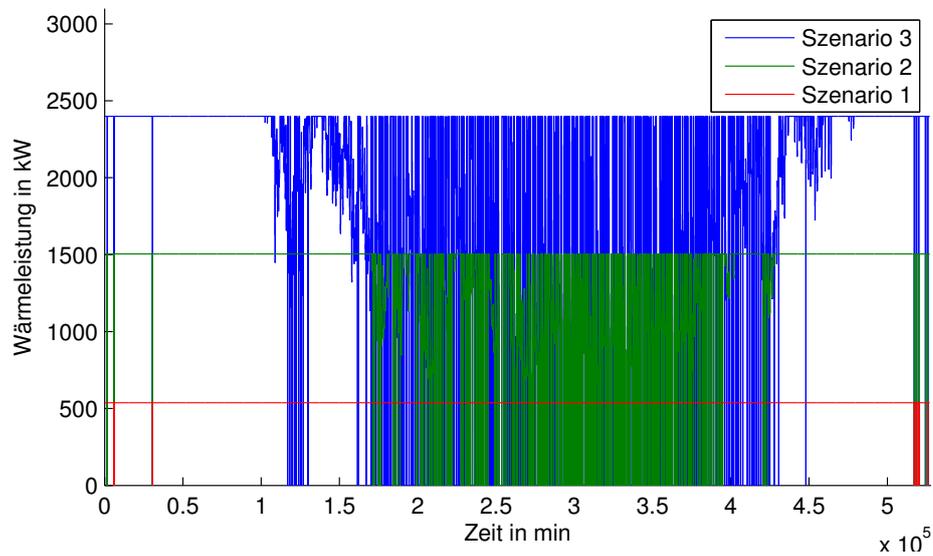


Abbildung 5.10.: Thermische Leistung des BHKW für alle Szenarien

In der Grafik 5.11 ist zur Verdeutlichung ein Ausschnitt über 500 Stunden des Leistungsverlaufs für den größten Motor dargestellt. Die elektrische Leistungsabgabe der BHKW verhält sich, aufgrund des in der Auslegungsrechnung festgelegten Leistungsverhältnisses, analog zur Wärmeleistung.

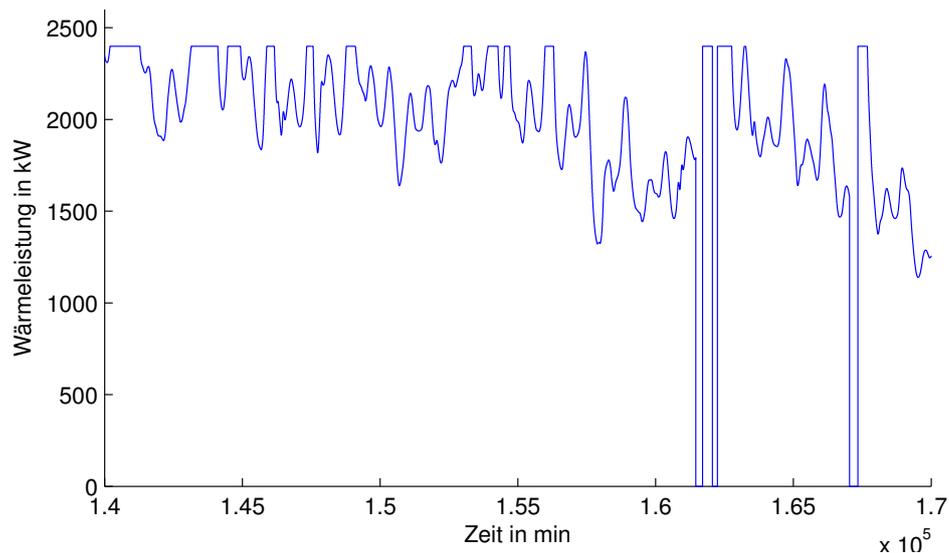


Abbildung 5.11.: Ausschnitt der thermische Leistung des BHKW im Teillastbereich für Szenario 3



Wie bereits in Kapitel 5.1 erwähnt, ist die Bilanz des effektiven Massenstroms ausschlaggebend für die Wärmeverteilung im Speicher. Der Kollektor hat aufgrund des geringen Massenstroms nur wenig Einfluss auf die Bilanz. Hauptsächlich bestimmt der Lastmassenstrom und der Massenstrom des BHKW die Richtung des Wärmeaustausches zwischen den Schichten. Im Diagramm 5.12 sind die Massenströme der BHKW-Szenarien und des Netzes abgebildet. Der Massenstrom des kleinsten Motors ist zu einem Großteil des Jahres kleiner als der Lastmassenstrom, woraus eine negative erzwungene Konvektion von unten nach oben resultiert. Die Wärme kann somit nicht über den gesamten Speicher verteilt werden (siehe Abbildung 5.2). Dies betrifft zu Beginn und Ende des Jahres auch den mittleren Motor. Aufgrund der reduzierten Verbraucherleistung im Sommer und dem damit verbundenen kleineren Massenstrom des Netzes, kann das BHKW durch Konvektion die Speicherschichten erwärmen. Erreicht die RL-Schicht des BHKW eine Temperatur oberhalb von 70 °C, wird die maximale Temperaturspreizung zwischen VL und RL reduziert und der Massenstrom bis zur Leistungsgrenze der Pumpe erhöht, um dennoch die Nennleistung zur Verfügung stellen zu können. Steigt die RL-Temperatur weiter an, verringert sich die Leistung und das BHKW wird im Teillastbereich betrieben, bis auch hier die untere Leistungsgrenze erreicht ist und der Motor abgeschaltet wird.

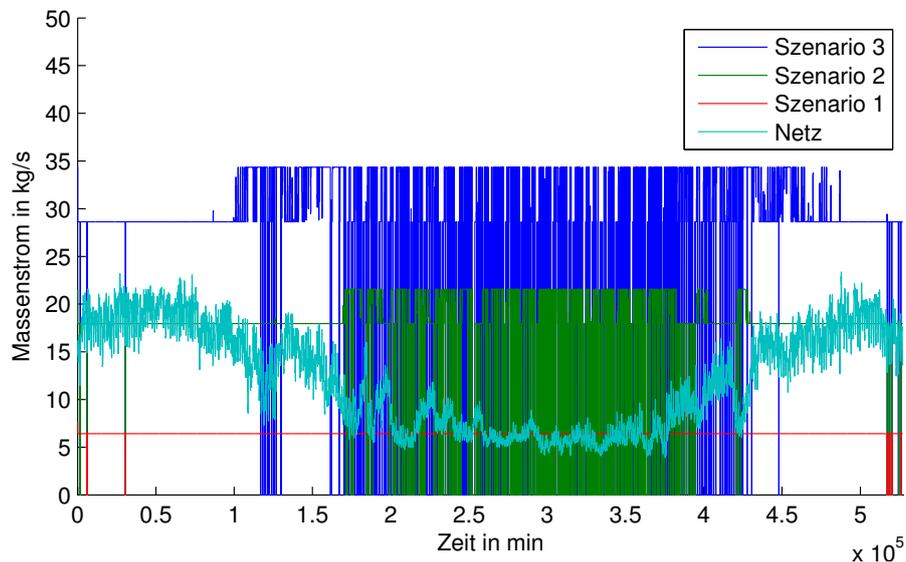


Abbildung 5.12.: Lastmassenstrom und BHKW-Massenströme der drei Szenarien

Bei Betrieb des dritten Motors ist der Massenstrom ausreichend groß, um einen positiven internen Speichermassenstrom zu gewährleisten und ermöglicht damit eine geschichtete Speicherbeladung. Andererseits führt das zu einem schnelleren Anstieg der RL-Temperatur des BHKW, so dass dieser über längere Zeiträume im Teillastbereich betrieben werden muss.



5. Visualisierung und Auswertung des Simulationsmodells

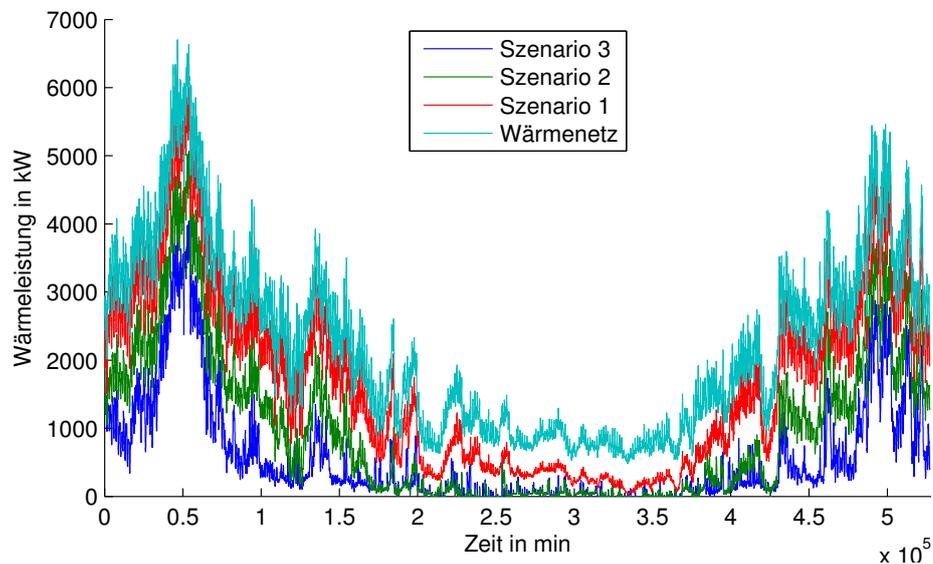


Abbildung 5.13.: Thermische Leistung des HWE für alle Szenarien

Diagramm 5.13 bildet die thermische HWE-Leistung der drei Szenarien und die Wärmelast ab. Der Spitzenlastkessel erzeugt generell die Differenz der Wärmeleistungen zwischen dem Speichersystem und dem Netz-VL. Besonders in den Wintermonaten hat der Speicher nur wenig Einfluss auf die zeitlich entkoppelte Wärmeerzeugung des BHKW. Ein Großteil der Leistung wird aus der ersten Speicherschicht direkt an den HWE abgegeben, der die Differenz, auch in Bezug auf das höhere Temperaturniveau im Netz, ausgleicht.

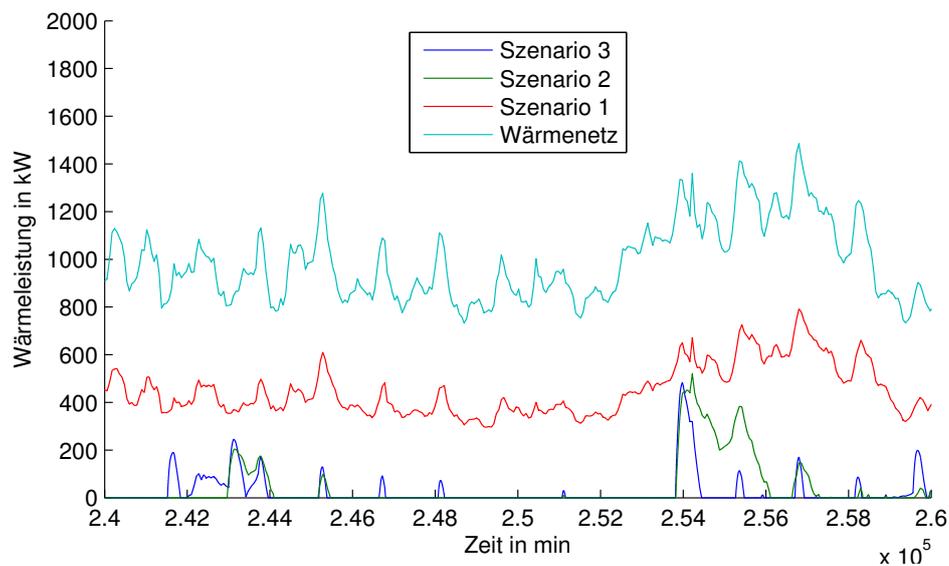


Abbildung 5.14.: Teilausschnitt der thermische Leistung des HWE für alle Szenarien



Im Sommer sind die VL-Temperaturen und Wärmeleistungen im Netz weitaus geringer, so dass insbesondere im Szenario 2 und 3 ein hoher Anteil der thermischen BHKW-Leistung zwischengespeichert werden kann. Dazu wurde in der Abbildung 5.14 das vorherige Diagramm auf einen Zeitausschnitt von rund 330 Stunden im Sommer vergrößert.

Der HWE muss teilweise über einen Zeitraum von 50 Stunden nicht betrieben werden. Im Sommer würde zumindest für das Szenario 3, die Wärmeleistung ausreichen, um die Verbraucher ohne Einsatz des HWE zu versorgen. Allerdings wird die VL-Temperatur des Speichers durch die Grenztemperatur des BHKW von 90 °C vorgegeben. Der Netz-VL benötigt jedoch auch im Sommer teilweise Temperaturen oberhalb dieser Grenze. In diesen Fällen muss der Spitzenlastkessel ebenfalls in Betrieb genommen werden, um die fehlende Temperaturdifferenz auszugleichen. Versuchsweise wurde im Modell eine Simulation für das Szenario 3 mit um den Faktor 0,9 reduzierten VL- und RL-Temperaturen des Wärmenetzes durchgeführt (siehe Abbildung 5.15).

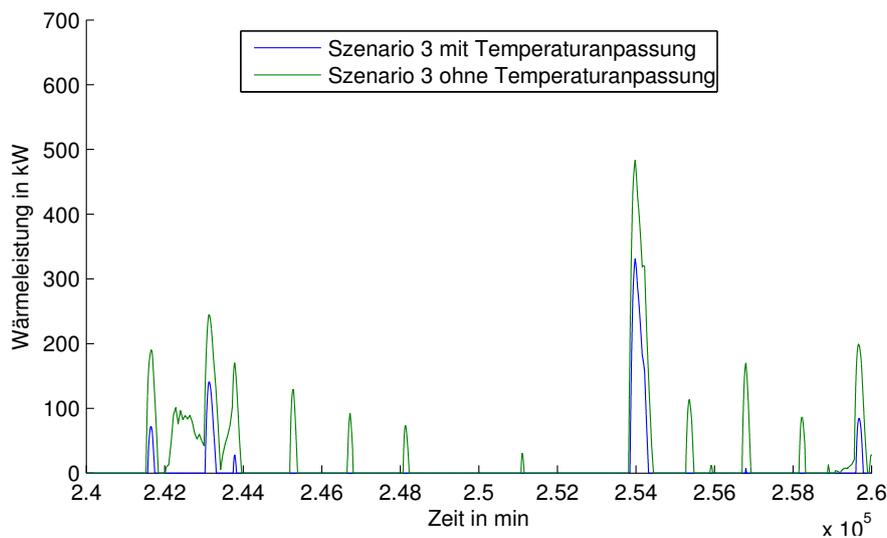


Abbildung 5.15.: Teilausschnitt der thermische Leistung des HWE für Szenario 3 mit und ohne Anpassung der VL- und RL-Temperatur des Wärmenetzes

Es ist zu erkennen, dass sich die Leistung und die Betriebszeit des HWE im Falle eines reduzierten Temperaturniveaus wesentlich verringern. Besonders in den Sommermonaten hat die erwähnte Temperaturgrenze des BHKW nicht mehr einen so großen Einfluss auf den Spitzenlastkessel, da ein wesentlicher Teil des Temperaturniveaus über das Speichersystem abgedeckt werden kann. In der Realität haben Verteilnetze dieser Art, je nach Anzahl und Typ der Verbraucher, ein entsprechend geringeres Temperaturniveau als die angenommenen Daten des Fernwärmenetzes.

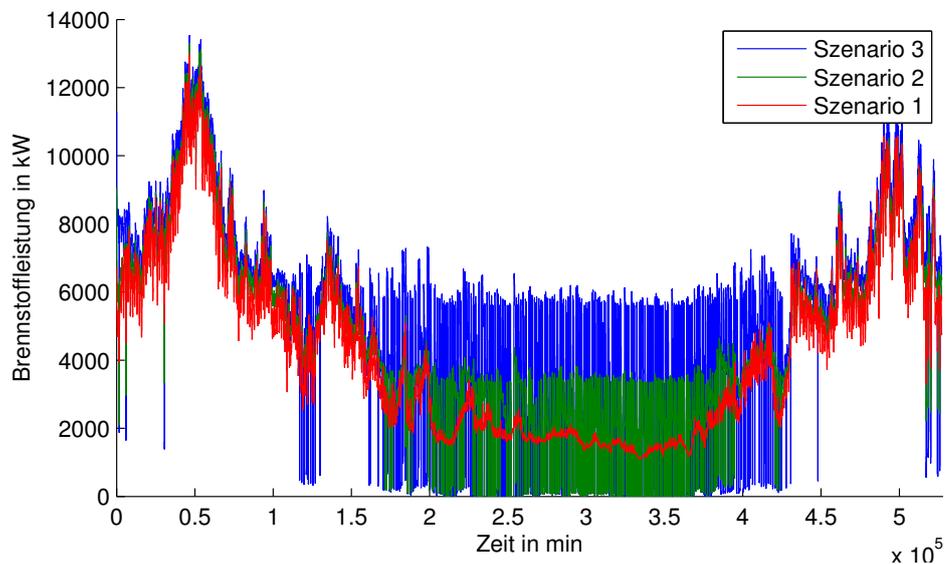


Abbildung 5.16.: Gesamte Brennstoffleistung des BHKW und HWE für alle drei Szenarien

In der Abbildung 5.16 sind die summierten Brennstoffleistungen des BHKW und HWE für alle Szenarien dargestellt. In Szenario 1 wird die Wärmeleistung zum Großteil vom HWE bereitgestellt und der Motor liefert, bis auf wenige Ausnahmen, über das gesamte Jahr hinweg seine thermische Nennleistung ohne den Speicher zu erwärmen. Der mittlere und große Motor fahren zum einen besonders in den Sommermonaten im Teillastbereich bzw. mit verringerten jährlichen Betriebsstunden aufgrund der Vorgabe des Fahrplans. Zum anderen werden aufgrund der positiven effektiven Massenstrombilanz die Speicherschichten erwärmt. Somit kann ein Teil der Wärmelast vom Speicher bereitgestellt werden, wenn keine externen Erzeuger in Betrieb sind. Besonders deutlich wird dieser Sachverhalt zur Jahresmitte veranschaulicht (siehe Abbildung 5.17).

Über mehr als 30 Stunden (Szenario 3), kann der Speicher ohne Befuerung des BHKW oder HWE die benötigte Wärmeleistung bereitstellen, während das Szenario 1 zu jederzeit Brennstoffleistung für beide Erzeuger benötigt. Aufgrund des thermisch höheren Wirkungsgrades des HWE von $\eta_{th} = 93 \%$ im Vergleich zum BHKW mit $\eta_{th} \approx 45 \%$, sind besonders im Sommer die Brennstoffleistungen für die leistungsstärkeren Motoren höher. Das BHKW aus Szenario 1 deckt selten den Leistungsbedarf ab, im Gegensatz zu Szenario 2 und 3. Die Motoren werden trotz abnehmender Last weiterhin im Nennbetrieb gefahren und benötigen dementsprechend mehr Brennstoff. Allerdings wird zum einen auch mehr elektrische Leistung in das Stromnetz abgegeben und zum anderen belädt ein Großteil der Wärme den Speicher. Während der fahrplanmäßigen Betriebsstopps, kann auch ohne HWE die

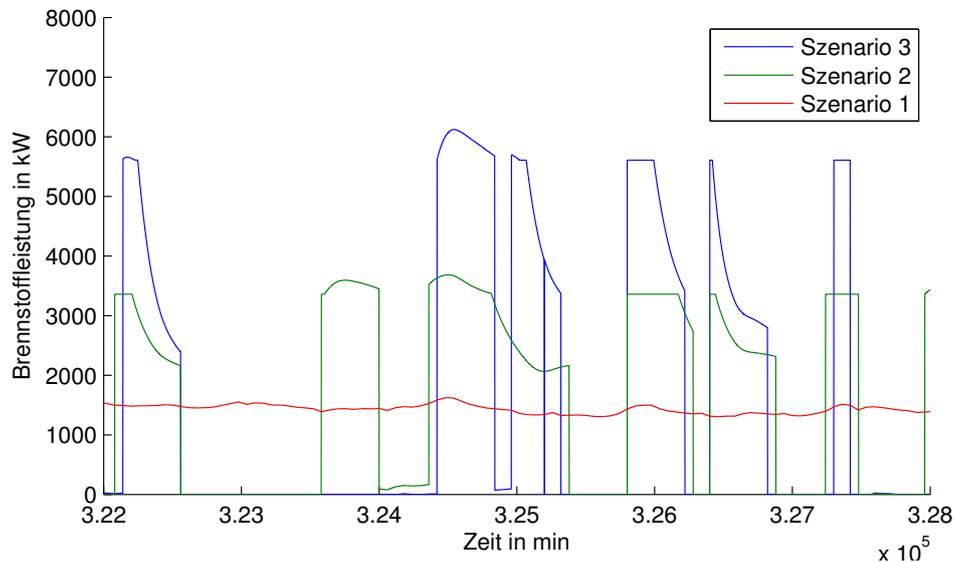


Abbildung 5.17.: Gesamte Brennstoffleistung des BHKW und HWE für alle Szenarien

Verbraucherleistung bereitgestellt werden. In der Jahressumme sind die Differenzen zwischen den Brennstoffleistungen verhältnismäßig gering, insbesondere unter der Betrachtung einer wesentlich höheren elektrischen Leistungsabgabe bei größeren Motoren. Es ist somit zu erwarten, dass Szenario 3 einen wirtschaftlicheren Vorteil gegenüber dem ersten und zweiten Szenario bietet.

5.4. Elektrische Pumpenleistung

Am Beispiel des Szenario 3 sind im Diagramm 5.18 die Pumpenleistungen für sämtliche hydraulische Kreisläufe des Systems abgebildet. Die Leistung der beiden Pumpen für den Primär- und Sekundärkreislauf des Kollketors wurden zusammengefasst. Da während der Simulation das Wärmenetz die Leistung ausschließlich über den Speicher-VL bezieht und die Druckverluste im HWE-Kreislauf von der VL-Pumpe des Speichers übernommen werden, ist die Bypasspumpe des HWE nicht mit berücksichtigt.

Die Pumpenleistung des Energiebunkers wird hauptsächlich im Winter und der Übergangszeit von der Speicherpumpe dominiert. Insbesondere der variierende Lastmassenstrom und die geodätische Höhe sowie der Druckhöhenverlust sind ausschlaggebend für eine elektrische Leistung zwischen rund 23 kW im Winter und 9 kW im Sommer. Im Gegensatz dazu haben die Pumpenleistungen des BHKW- und Kollketorkreislaufs über das Jahr einen annähernd konstanten Verlauf. Aufgrund des

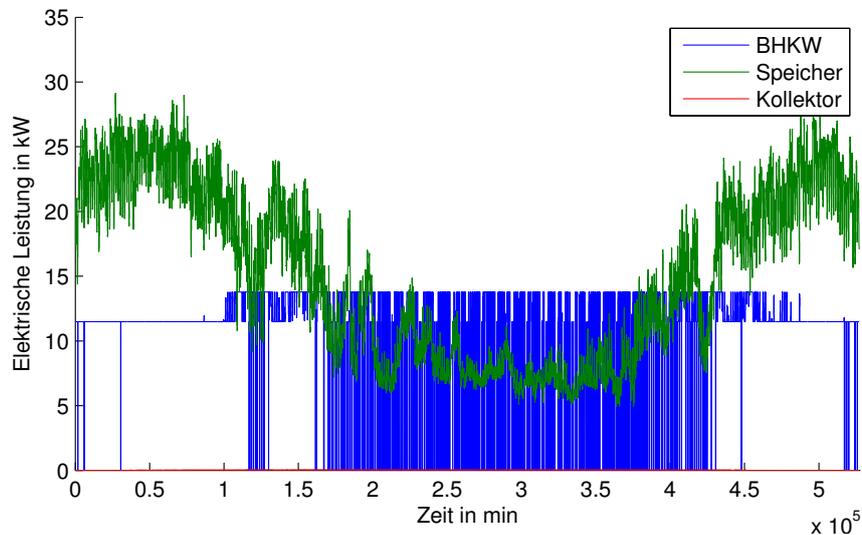


Abbildung 5.18.: Elektrische Leistung der Komponentepumpen für Szenario 3

geringen Massenstroms im Low-Flow-Betrieb beträgt die elektrische Leistung der Kollektorpumpe etwa 0,3 kW. Im Normalfall erreicht die BHKW-Pumpe eine Leistung von 12 kW und erhöht sich bei einem maximalen Massenstrom auf 14 kW.

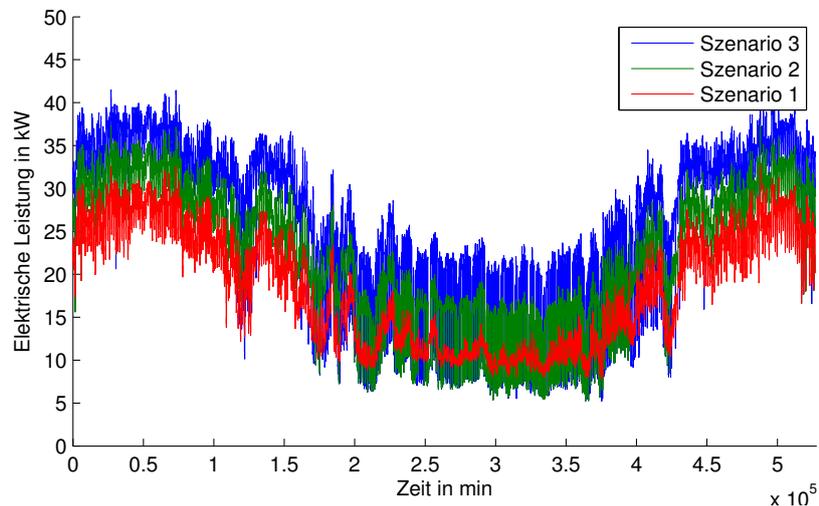


Abbildung 5.19.: Elektrische Gesamtleistung der Pumpen für alle drei Szenarien

Der Verlauf der aufsummierten Pumpenleistungen der Szenarien sind in Abbildung 5.19 visualisiert. Tendenziell gibt der BHKW-Massenstrom die Differenz zwischen den Summenleistung der Szenarien vor. Besonders in den Wintermonaten ist der Verlauf eindeutig. In den Sommermonaten ist im Gegensatz zum ersten Szenario der HWE des Szenario 2 und 3 seltener in Betrieb, so dass die Pumpe des Speicher-VL

POTENZIALANALYSE

Ermittlung des Wärmespeicherpotenzials innerstädtischer Bunkeranlagen zum Aufbau eines Wärmespeicher-Netzwerkes als Baustein für das Forschungsprojekt “Smart Power Hamburg”

5. Visualisierung und Auswertung des Simulationsmodells

nicht die Druckverluste des Spitzenlastkessels aufbringen muss. Hinzu kommt, dass die Betriebszeiten dieser BHKW im Sommer deutlich reduziert sind und die Pumpe bei Stillstand keine Leistung benötigt. Zur Jahresmitte sind die Pumpenleistungen der größeren BHKW somit teilweise geringer als die Leistung des kleinsten Motors.





6. Fazit und Ausblick

Im ersten Abschnitt der Arbeit wurde durch Eigenrecherche und mithilfe unterschiedlicher Behörden und Institutionen eine Bewertung von Bunkeranlagen in der Stadt Hamburg realisiert, die für eine Nutzung als Energiebunker, hinsichtlich der Gebäudeart und -verwendung sowie der Netzanbindungen, geeignet sind. Insgesamt 10 Zivilschutzgebäude in Form von Klotzbunkern, bieten ein hohes Potenzial für eine Konversion. Weitere 14 Standorte wurden der Kategorie „Potenzial mit wenigen Einschränkungen“ zugeordnet. Mit Fortschritten in der Speichertechnik, können zukünftig auch Tiefbunker eine Option für die Nutzung innerstädtischer Energiebunker darstellen.

Die 10 Objekte bilden die Grundlage für den Aufbau eines Energiebunker-Netzwerkes, bestehend aus jeweils einem Wärmespeicher, Blockheizkraftwerk, Heißwassererzeuger und Solarkollektoren auf dem Dach des Gebäudes. Am Beispiel eines konkreten Standortes und angepassten Lastdaten für ein autarkes Wärmenetz, wurde ein Simulationsmodell erstellt, das für den Betrachtungszeitraum von einem Jahr (2012) eine thermodynamische Analyse des Systems ermöglicht. Dazu wurden drei Szenarien betrachtet, die sich in der Leistungsgröße der eingesetzten BHKW unterscheiden. Das Modell kann im weiteren Verlauf des Projektes „Smart Power Hamburg“, auf sämtliche Standorte adaptiert zu werden.

Die Ergebnisse der Simulation lassen den Schluss zu, dass mit kleinen BHKW wie im Szenario 1, mit einer thermischen Leistung von 0,5 MW und einem Massenstrom unterhalb des Lastmassenstroms, keine Wärmeabfuhr in die unteren Schichten des Speichers bewirkt wird. Der effektive Massenstrom im Speicher ist in diesen Fällen negativ und die eingebrachte Leistung wird direkt aus der obersten Schicht entnommen, ohne den Speicher zu beladen. Das Szenario 3 mit einer thermischen Leistung des Motors von rund 2,5 MW ist für den Einsatz im Energiebunker als beste Option anzusehen. Zum einen kann ein Großteil der Wärme im Speicher gepuffert werden, so dass insbesondere im Sommer über mehrere Stunden hinweg die Wärmelast ausschließlich vom Speicher abgedeckt werden kann. Zum anderen ist die Differenz der jährlich zugeführten Brennstoffenergie zwischen den einzelnen Szenarios nur geringfügig größer. Zudem steigt mit der thermischen Leistung der BHKW auch die elektrische Leistung, die wiederum mit hohen Gewinnen in das Stromnetz eingespeist werden kann. In der Simulation wurde weiterhin festgestellt, dass ein nicht



unwesentlicher Anteil der Leistung des HWE auf das hohe Temperaturniveau des Verteilnetzes zurückzuführen ist, das den Temperaturen des Fernwärmenetzes Hamburg entspricht. In der Praxis werden insbesondere Nahwärmenetze in der Regel mit geringeren VL-Temperaturen betrieben, als es in der Simulation angenommen wurde. Aufgrund einer Begrenzung der VL-Temperatur der BHKW auf $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, muss über das Jahr hinweg der HWE die Differenz bereitstellen. Würde das Temperaturniveau des Netzes angepasst werden, könnte das BHKW bzw. der Speicher einen größeren Anteil der Verbraucherleistung bereitstellen. Die Brennstoffleistung des HWE würde sich verringern, der Speicher hätte wesentlich mehr Einfluss auf die Lastabdeckung und das BHKW könnte neben der thermischen auch mehr elektrische Energie bereitstellen.

Das Kollektorsystem hat, bezogen auf die Speicherkapazität und die Leistungsgrößen der BHKW, nur einen geringfügigen Einfluss auf die eingebrachte Speicherleistung. Zwar könnten im Matched-Flow-Betrieb, und nicht wie in der Simulation angenommen im Low-Flow-Modus, die Kollektorleistung etwas gesteigert werden, allerdings decken sie in der Jahressumme lediglich die Wärmeverluste des Speichers ab. Eine wirtschaftliche Analyse müsste im weiteren Verlauf des Projektes eine Aussage über den Einsatz des Kollektorsystems geben. Alternativ wäre an den meisten Standorten der Konversionsbunker eine Vergrößerung der Kollektorfläche durch eine zusätzliche Anbringung von Modulen an der Fassade der Gebäude möglich. Zukünftig käme anstatt von Solarkollektoren auch eine Installation von Photovoltaik-Modulen in Betracht.

Mit der Annahme, dass die Verteilnetze der restlichen 9 Bunkerstandorte ähnliche Anforderungen besitzen wie der untersuchte Standardbunker, so könnten insgesamt 5 % des Wärmebedarfs der Stadt Hamburg mit einem Energiebunker-Netzwerk abgedeckt werden. Zusätzlich kann das Netzwerk, bei Einsatz eines Motors in der Größenordnung des dritten Szenarios, durchschnittlich eine elektrische Leistung von rund 25 MW bereitstellen.



Literaturverzeichnis

- [ABB09] ABB: *Fachwissen: IEC 60034-30 Norm zu den Wirkungsgradklassen fuer Niederspannungsmotoren*. 2009 4.2.1.1
- [AO14] APOLL-ON: *Gas-Informationen*. <http://www.schnellgas.de/gasboerse/>, 2014. – Zugriff Februar 2014 2.3.3
- [ASU10] ASUE: *BHKW-Grundlagen*. 2010 2.2.2
- [ASU11] ASUE: *BHKW-Kenndaten 2011: Module, Anbieter, Kosten*. 2011 2.2.2, 4.2.1.3
- [BMU13] BMU: *Klimapolitischer Beitrag kohlenstoffarmer Energieträger in der dezentralen Stromerzeugung sowie ihre Integration als Beitrag zur Stabilisierung der elektrischen Versorgungssysteme*. 2013 2.2.2
- [BMU14] BMU: *Energiekonzept 2050 - Meilensteine und Bewertungen: Langfristiger Entwicklungspfad fuer ambitionierte Klimaschutzziele, Energieeffizienz und Erneuerbare*. <http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimapolitik-der-bundesregierung/>, 2014. – Zugriff Februar 2014 1.1
- [BMW11] BMWi: *Intelligente Vernetzung von Stadtinfrastrukturen - Smart Power Hamburg*. <http://www.eneff-stadt.info/de/waerme-und-kaeltenetze/projekt/details/intelligente-vernetzung-von-stadtinfrastrukturen-smart-power-hamburg/>, 2011. – Zugriff Januar 2014 1.1
- [BMW13a] BMWi: *Arbeitspapier: Energieeinsparverordnung (EnEV) 2013*. <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/>, 2013. – Zugriff Januar 2014 4.2.1
- [BMW13b] BMWi: *Energien in Deutschland: Trends und Hintergründe zur Energieversorgung*. 2013 2.3.3
- [Bun11] BUNDESNETZAGENTUR, Deutschland: *Smart Grid und Smart Market: Eckpunktepapier der Bundesnetzagentur zu den Aspekten des sich verändernden Energieversorgungssystems*. 2011 2.1



- [Bun13] BUNDESANSTALT, Immobilienaufgaben: *Bundesimmobilien: Bunker*. <http://faszination-bunker.bundesimmobilien.de/>, 2013. – Zugriff Dezember 2013 3.2
- [Bun14] BUNDESAMT, Bevoelkerungsschutz: *Baulicher Bevoelkerungsschutz*. <http://www.bbk.bund.de/>, 2014. – Zugriff Januar 2014 3.1
- [But09] BUTTINGER, Frank J.: *Dissertation: Entwicklung eines konzentrierenden Vakuum-Flachkollektors zur Prozesswaermeerzeugung*. Technische Universitaet Muenchen - Lehrstuhl fuer Energiesysteme, 2009 4.3.1
- [DB91] DUFFIE, John A. ; BECKMAN, William A.: *Solar engineering of thermal processes* -. 2nd. New York : Wiley, 1991. – ISBN 978-0-471-51056-7 4.2.1.2
- [Dec14] DECONCRETE: *Fotografie eines Zombeck-Turms, Bismarckstrasse*. <http://www.deconcrete.org/wp-content/uploads/2010/12/air-raid-shelter-Zombeck-tower-Bismarckstr/>, 2014. – Zugriff Januar 2014 3.2
- [Eic12] EICKER, Ursula: *Solare Technologien fuer Gebaeude: Grundlagen und Praxisbeispiele*. 2. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2012. – ISBN 978-3-8348-8237-0 2.4, 2.2.3, 2.6, 2.2.3.1, 4.2.1, 4.2.1.1, 4.2.1.2, 4.2.1.2, 4.3.1, 4.3.1, 4.3.2, 4.3.2, 4.3.2, 4.3.2
- [FK12] FISCH, Manfred N. ; KARLSRUHE, Fachinformationszentrum.: *Waermespeicher - Bine-Informationspaket*. Koeln : Verlag TUEV Rheinland, 2012 2.2.1.1, 2.2.1.2
- [FW12] FH WOLFENBUETTEL, Datenpool I.: *Druckverluste in geraden Rohrstrecken*. 2012 4.2.1
- [GL13] GAEBLER, Wolfgang ; LECHNER, Stefan: *Power to Heat: Projekt Waermespeicher Forst-Lausitz*. 2013 3.3.3
- [Ham09] HAMBURG, Stromnetz: *Technische Anforderungen - fuer den Anschluss an das Mittelspannungsnetz Hamburg, Bau und Betrieb von Uebergabestationen*. 2009 2.3.2.1
- [Ham11a] HAMBURG, Energie: *Der Energiebunker: vom Kriegsbauwerk zum Öko-kraftwerk*. <http://www.hamburgenergie.de/index.php?id=293>, 2011. – Zugriff Januar 2014 1.1, 2.2
- [Ham11b] HAMBURG, Energie: *Smart Power Hamburg: Das Projekt stellt sich vor*. <http://www.smartpowerhamburg.de/>, 2011. – Zugriff März 2014 1.1



- [Ham11c] HAMBURG, Energie: *Smart Power Hamburg: TP 4 - Speicherkonzepte*. <http://www.smartpowerhamburg.de/index.php/speicherkonzepte.html>, 2011. – Zugriff März 2014 1.1
- [Ham14a] HAMBURG, Netz: *Energiewissen: Grundlagen Erdgas*. <http://hh-netz.com/grundlagen-gas/>, 2014. – Zugriff März 2014 2.3.3
- [Ham14b] HAMBURG, Netz: *Informationen zum Hamburger Gasnetz*. <http://hh-netz.com/netz/gasnetz/>, 2014. – Zugriff März 2014 2.3.3, 2.13
- [Ham14c] HAMBURG, Unser N.: *Hamburger Volksentscheid erfolgreich: Energienetze in Oeffentlicher Hand*. <http://unser-netz-hamburg.de/>, 2014. – Zugriff April 2014 2.3.2
- [Ham14d] HAMBURG.DE: *Bunker in Hamburg*. <http://www.hamburg.de/bunker-in-hamburg/>, 2014. – Zugriff Februar 2014 3.1
- [Ham14e] HAMBURG.DE: *Denkmaeler Hamburg-Mitte: Rundturm-Bunker (Zombbeck)*. <http://www.hamburg.de/kulturbehoerde/auswahl/177590/>, 2014. – Zugriff Februar 2014 3.1
- [Har14] HARM, Sven: *HH Netz - Netzkundenbetreuung und Planung/Bau*. <http://www.hh-netz.com>, 2014. – M: sven.harm(at)hh-netz.com 3.3.2
- [IMI13] IMIV: *Geschichtsspuren-Datenbank: Zivilschutzanlagen-Datenbank*. <http://www.geschichtsspuren.de/datenbanken/bunker-datenbank/>, 2013. – Zugriff November 2013 3.3, 3.4
- [IMI14] IMIV: *Neuigkeiten und Unterlagen: Bunker, Luftschutz, Zivilschutz*. <http://www.geschichtsspuren.de/artikel/bunker-luftschutz-zivilschutz/>, 2014. – Zugriff Januar 2014 3.1
- [Ind05] INDUSTRIENORM, Deutsche: *DIN 1055-4:2005-03 Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten und DIN 1055-4:Ber1:2006-03*. 2005 2.2.3.2
- [Ind14] INDUSTRIENORM, Deutsche: *DIN 4140:2014-04 - Daemmarbeiten an betriebstechnischen Anlagen in der Industrie und in der technischen Gebaudeausruestung*. 2014 3.7, 3.3.3
- [Jag03] JAGNOW, Wolff: *Ueberblick Kraft-Waerme-Kopplung (BHKW)*. 2003 2.3
- [Jun12] JUNGE, Ingenieurbuero: *Kollektorwirkungsgrad*. <http://www.xn--ingbro-junge-0ob.de/html/solarthermie>, 2012. – Zugriff März 2014 4.11
- [JW03] JAGNOW, K. ; WOLFF, D.: *Manuskript fuer: Der Energieberater*. Verlag Deutscher Wirtschaftsdienst Koeln, 2003 4.2.1.1



- [Kar14] KARG, Raymund: *BImA-Verkauf: Region SH, HH, MV*. <https://www.bundesimmobilien.de/4960/verkauf>, 2014. – T: 0381-336-101 3.3.1
- [KBG01] KIEHL, Peter ; BREUTMANN, Norbert ; GOETHE, Wolfgang: *Einfuehrung in die DIN-Normen* -. 13. Aufl. Berlin : Springer DE, 2001. – ISBN 978-3-519-26301-2 4.2.1.2
- [KEB14] KEBAP: *Kultur Energie Bunker Altona Projekt - Energie*. <http://kulturenergiebunker.blogspot.de/p/energie/>, 2014. – Zugriff Februar 2014 2.3.1
- [Kom11] KOMMUNIKATIONSTECHNIK, Fraunhofer-Einrichtung fuer Systeme d.: *Smart Grid Communications 2020 - Fokus Deutschland*. 2011 2.3.2.1, 2.1, 2.3.2.1
- [Kon09] KONSTANTIN, Panos: *Praxisbuch Energiewirtschaft - Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt*. 2. bearb. u. aktualisierte Aufl. 2009. Berlin, Heidelberg : Springer, 2009. – ISBN 978-3-540-78591-0 1.1
- [Kox09] KOX, Alexander: *European Federation of Energy Traders: Stromhandel*. Trianel GmbH, 2009 2.3.2.2
- [Kre12] KRETZSCHMAR, H.-J.: *HS Zittau/Goerlitz: Stoffwertsammlung: Technische Thermodynamik, Waerme- und Stoffuebertragung*. 2012 3.3.3, 4.2.1, 4.2.1.2
- [KSB05] KSB: *Technische Information: Auslegung von Kreiselpumpen*. 5. Auflage. Frankenthal (Pfalz) : KSB Zentrale Kommunikation V51, 2005. – ISBN 3-00-004734-4 4.2.1.1, 4.5, 4.2.1.1, 4.2.1.1, 4.2.1.1, 4.7, 4.2.1.1, 4.2.1.1
- [Kuh14] KUHN, Marlene: *LIG Hamburg - Abteilung Flaechen- und Portfoliomanagement*. 2014. – M: [marlene.kuhn\(at\)lig.hamburg.de](mailto:marlene.kuhn@lig.hamburg.de) 3.3.1
- [Laq03] LAQUAI, Bernd: *Abschaetzung des moeglichen Energieertrags einer Photovoltaikanlage*. 2003 2.2.3, 4.1.2.2, 4.2
- [Lem14] LEMINSKY, Martina: *BIS Hamburg - Abteilung fuer Oeffentliche Sicherheit, Brand- und Bevoelkerungsschutz*. 2014. – M: [martina.leminsky\(at\)bis.hamburg.de](mailto:martina.leminsky@bis.hamburg.de) 3.3.1
- [Lut08] LUTZ, Hans P.: *Thermische Solaranlagen zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstuetzung*. 6. Auflage. Stuttgart : Wirtschaftsministerium Baden-Wuerttemberg, 2008 2.2.3.2, 2.2.3.2, 4.2.1.2



- [Mol08] MOLTER, Karl: *Vorlesungsskript FH Trier: Alternative Energietechniken*. 2008 2.2.3.1, 2.2.3.2, 2.7, 4.2.1.2, 4.2.1.2
- [Mor13] MORID, Ali A.: *Behörde fuer Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg - Amt fuer Bauordnung und Hochbau (ABH3331)*. <http://www.hamburg.de/bsu/>, 2013. – M: [aliakbar.morid\(at\)bsu.hamburg.de](mailto:aliakbar.morid(at)bsu.hamburg.de) 3.2.1
- [NC14] NASA ; CENTER, Atmospheric Science D.: *Surface meteorology and Solar Energy*. <https://eosweb.larc.nasa.gov/>, 2014. – Zugriff Januar 2014 2.2.3
- [Nik14] NIKON, Fotografie: *Fotos von Bunkern*. <http://www.nikon-fotografie.de/vbulletin/nf-f-bilderforum/84387-bunker-heiligengeistfeld-hamburg/>, 2014. – Zugriff Januar 2014 3.1
- [Nof14] NOFFZ, Tim: *Stromnetz Hamburg - Mid/Low Voltage, Distribution*. <https://www.stromnetz-hamburg.de>, 2014. – M: [tim.noffz\(at\)vattenfall.com](mailto:tim.noffz(at)vattenfall.com) 3.3.2
- [Pin13] PINKER, Klaus: *Mitglied bei IMIV und Hamburger Unterwelten e.V.* 2013. – M: [k.pinker\(at\)hamburg.de](mailto:k.pinker(at)hamburg.de) 3.2.1
- [Pro11] PROGNOSE: *Massnahmen zur nachhaltigen Integration von Systemen zur gekoppelten Strom- und Waermebereitstellung in das neue Energieversorgungssystem*. 2011 2.2.2
- [Rad06] RADDATZ, Holger: *Bunkertypen, Luftschutzanlagen*. 2006 3.1, 3.1
- [Rat97] RAT, Europaeisches P.: *Richtlinie 97/23/EG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten ueber Druckgeraete*. 1997 2.2.1.2
- [RE13] RENEWABLE-ENERGY, Concepts: *Deutschland, Hamburg: Sonnenstandsdiagramm*. <http://www.renewable-energy-concepts.com/german/sonnenenergie/basiswissen-solarenergie/verschattung-solarmodul/>, 2013. – Zugriff Dezember 2013 4.2.1.2
- [Sch10] SCHMITZ, Karl W.: *Kraft-Waerme-Kopplung* -. Berlin, Heidelberg : Springer, 2010. – ISBN 978-3-642-01425-3 2.2.2, 2.2.2
- [Sch13] SCHOLZ, Guenter: *Heisswasser- und Hochdruckdampfanlagen: Planungshandbuch fuer Industrie- und Fernwaermeversorgung*. 15. Auflage. Berlin : Springer DE, 2013. – ISBN 978-3-642-36588-1 2.2.4, 2.2.4
- [Sma13] SMARTGRIDS, Austria: *Energieversorgung: Ziele und Trends*. 2013 2.1



- [Spe12] SPERRVERMERK, Quellenangabe ueber A.: *Waermelastdaten fuer das Hamburger Fernwaermenetz im Jahr 2012*. 2012 2.2.4, 2.3.1, 2.10, 3.3.2, 3.3.3, 4.2.1.1
- [SS11] SPECHT, E. ; SCHMIDT, J.: *Institut fuer Stroemungstechnik und Thermodynamik, Otto-von-Guericke-Unwiversitaet Magdeburg: Arbeitsheft - Koerperdurchstroemung, reibungsbehaftet*. 2011 4.2.1.2
- [Top09] TOPMOTORS: *Technische Daten: Wirkungsgrade von IE1-, IE2- und IE3-Motoren nach Norm IEC 60034-30*. 2009 4.6, 4.2.1.2
- [Tzs10] TZSCHEUTSCHLER, Peter: *Vorlesungsskript Energie und Wirtschaft": Stromhandel*. TU Muenchen, 2010 2.12, 2.3.2.2
- [UH11] UMWELT HAMBURG, BSU B. u.: *BHKW-Check: Handbuch zur Ermittlung von Einsparpotenzialen durch den Einsatz von Blockheizkraftwerken*-. 2. Aufl. Hamburg : HGC Hamburg Gas Consult GmbH, 2011 4.2.1.3
- [Vat12] VATTENFALL, Hamburg S.: *Technische Daten Stromverteilstromnetz Hamburg*. 2012 2.3, 2.3.2.1, 2.11
- [Vat13] VATTENFALL, Hamburg W.: *Fernwaermenetzinformationen Hamburg*. <http://www.vattenfall.de/de/fernwaerme-fuer-berlin-und-hamburg/>, 2013. – Zugriff November 2013 2.3.1, 2.9, 2.3.1
- [VDE10] VDE, DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik I. u.: *Die deutsche Normungsroadmap E-Energy / Smart Grid*. 2010 2.1
- [VEWA11] VATTENFALL EUROPE WAERME AG, System Intelligence System Planning G.: *Machbarkeitsstudie - Fernwaermespeicher in Berlin*. 2011 2.2.1.1, 2.2.1.2
- [Vie08] VIESSMANN, Deutschland W.: *Planungshandbuch - Solarthermie*. 2008 2.2.1.2, 2.2.3, 2.2.3.1, 2.5, 2.2.3.2, 2.2.3.2, 4.2.1.2, 4.3.1
- [Vie13] VIESSMANN, Deutschland W.: *Datenblatt - Gas-Niederdruck-Heisswassererzeuger*. 2013 4.2.1.3
- [Vie14] VIESSMANN, Deutschland W.: *Abhitzekessel fuer die Heisswassererzeugung*. <http://www.viessmann.de/de/Industrie-Gewerbe/Produkte/Abhitzekessel/>, 2014. – Zugriff Januar 2014 2.2.4, 2.8
- [WIL02] WILO: *BINE Publikation: Hocheffizienzpumpen fuer Heizung und Kuehlung*. 2002 4.2.1.2



- [Wol09] WOLF: *Planungsunterlage: Vakuum-Roehrenkollektor CRK-12*. 2009 4.2.1.2, 4.2.1.2
- [Wos08] WOSSOG, Guenter: *Handbuch Rohrleitungsbau, Band I - Planung, Herstellung, Errichtung*. 3. Aufl. Essen : Vulkan-Verlag GmbH, 2008. – ISBN 978-3-802-72745-0 4.3.1
- [Zah13] ZAHORANSKY: *Energietechnik - Systeme zur Energieumwandlung ; Kompaktwissen fuer Studium und Beruf*. Berlin : Springer DE, 2013. – ISBN 978-3-834-82279-6 1.1, 2.2.2
- [Zil14] ZILMET, Deutschland: *Informationen: Plattenwaermetauscher*. <http://www.zilmet.de/>, 2014. – Zugriff Februar 2014 4.2.1.3



A. Anhang

A.0.1. Wärmenetzkarte mit konversionsfähigen Bunkeranlagen

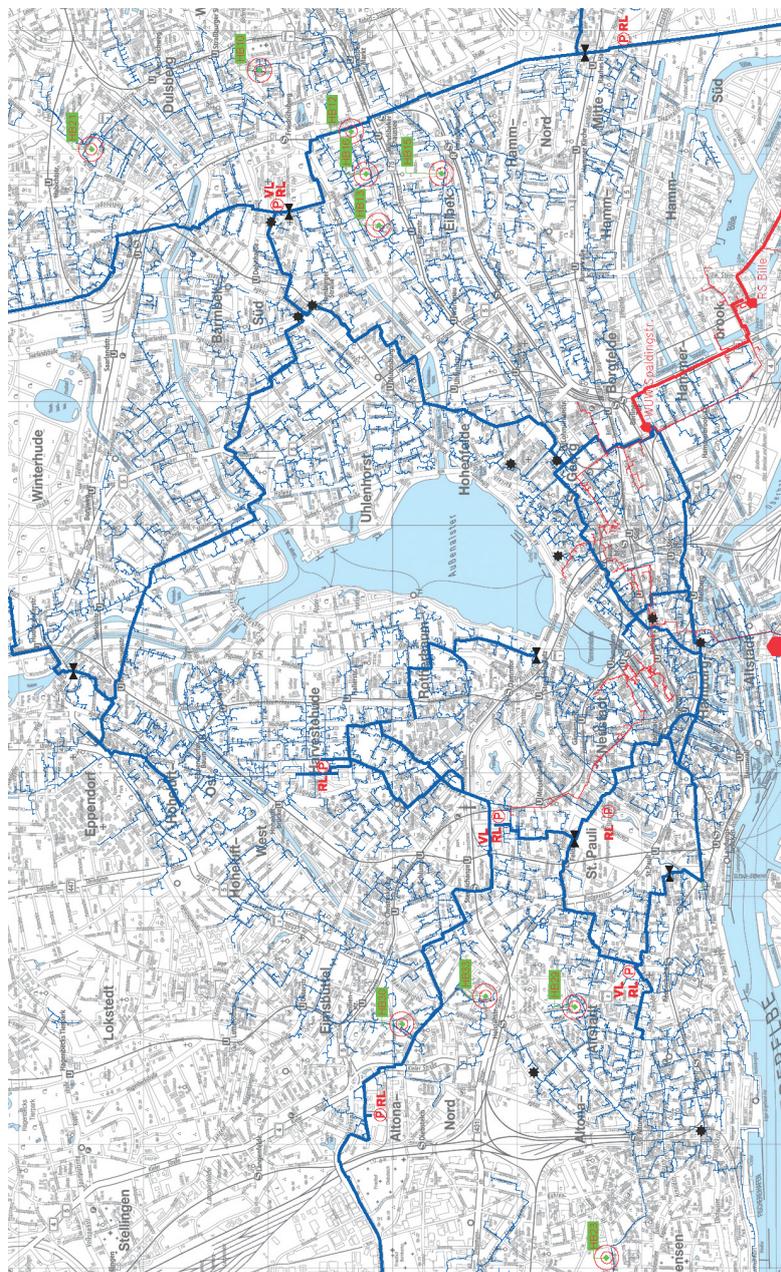


Abbildung A.1.: Wärmenetzkarte mit konversionsfähigen Bunkeranlagen



A.0.2. Wärmenetzkarte mit Standorten der Bunkeranlagen mit hohem und eingeschränktem Potenzial

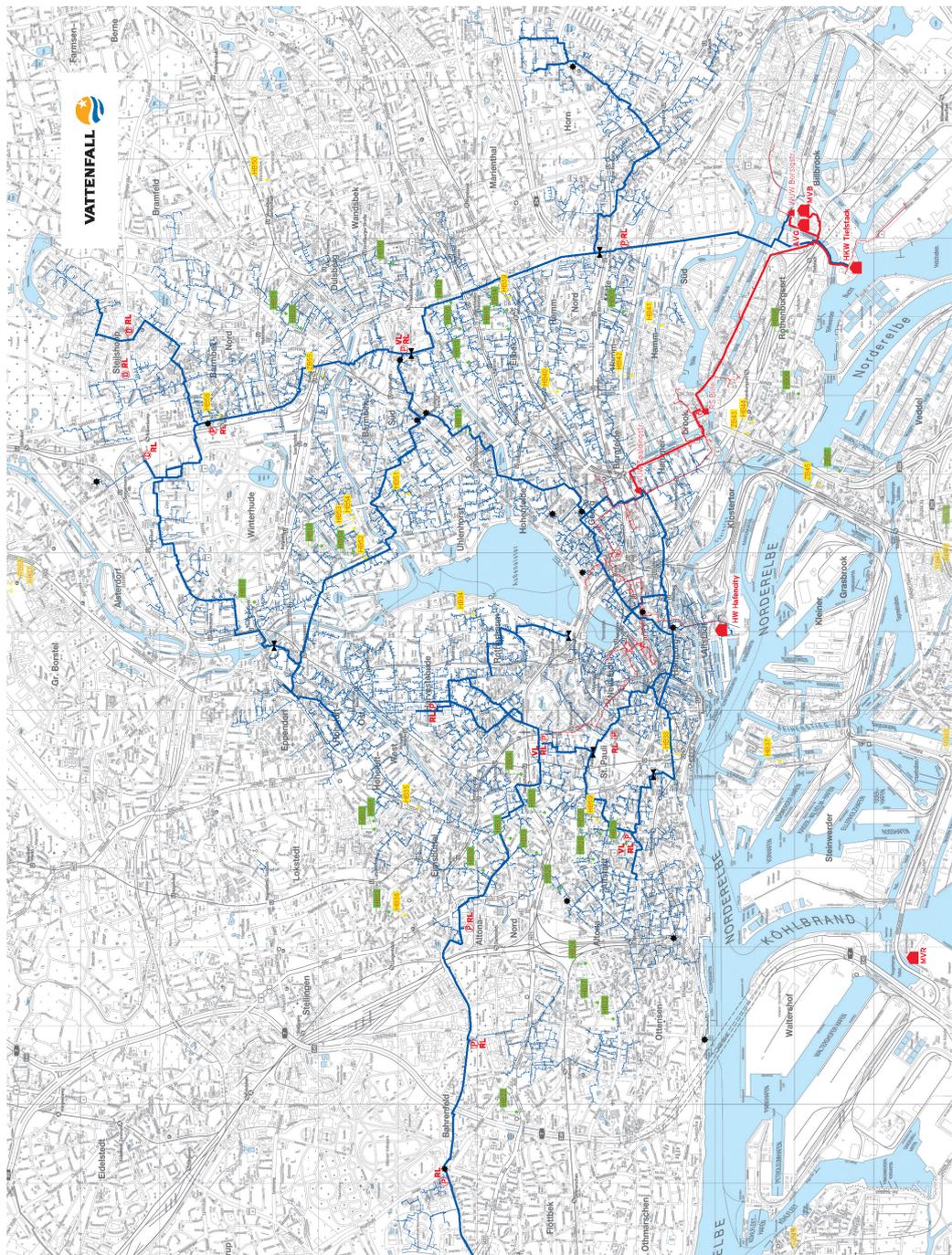


Abbildung A.2.: Wärmenetzkarte mit Bunkerstandorten der Vorauswahl



A.0.3. Nicht verwendete Diagramme

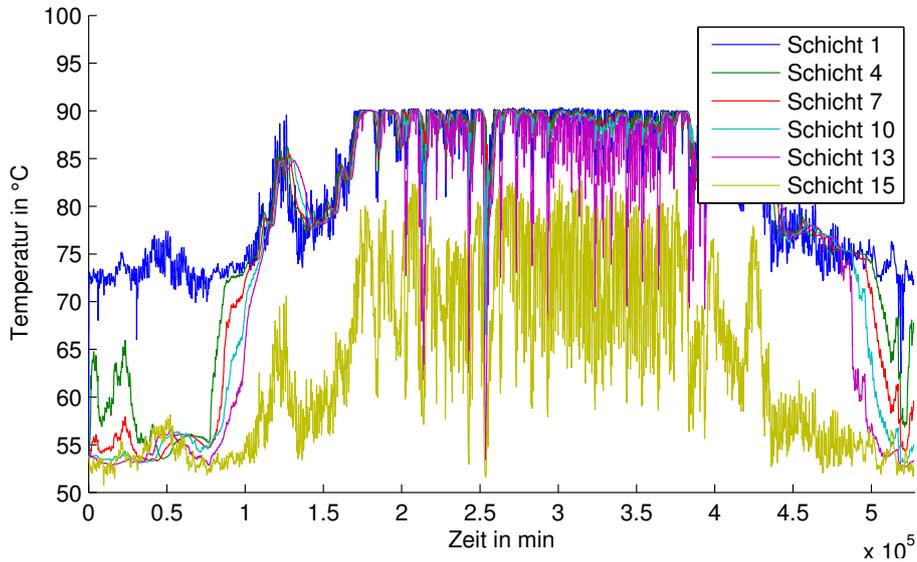


Abbildung A.3.: Schichttemperatur der Schichten 1, 4, 7, 10, 13 und 15 für Szenario 2

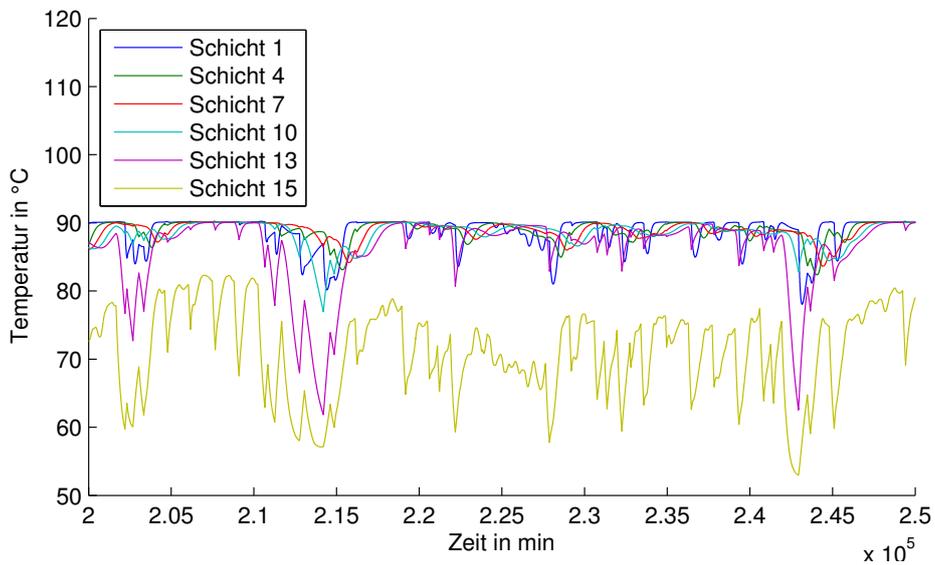


Abbildung A.4.: Teilausschnitt der Schichttemperatur der Schichten 1, 4, 7, 10, 13 und 15 für Szenario 2

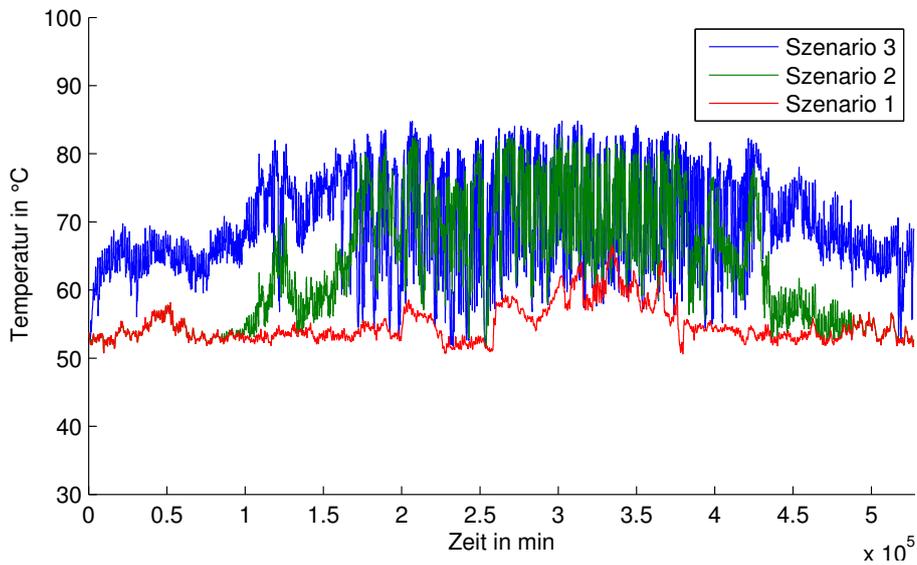


Abbildung A.5.: Rücklauftemperatur des Speicher-, BHKW- und Kollektorkreislaufs aus der untersten Speicherschicht für alle Szenarien

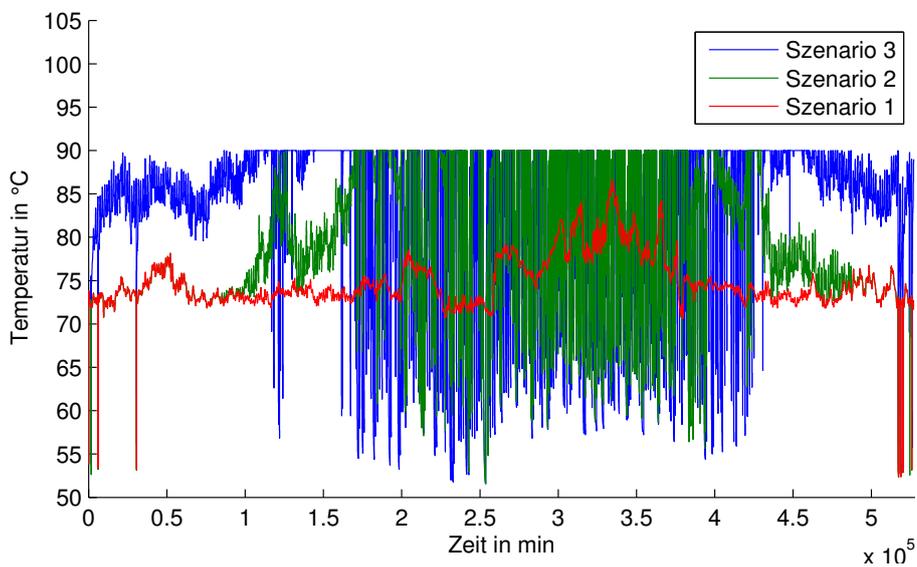


Abbildung A.6.: Vorlauftemperatur des BHKW für alle Szenarien

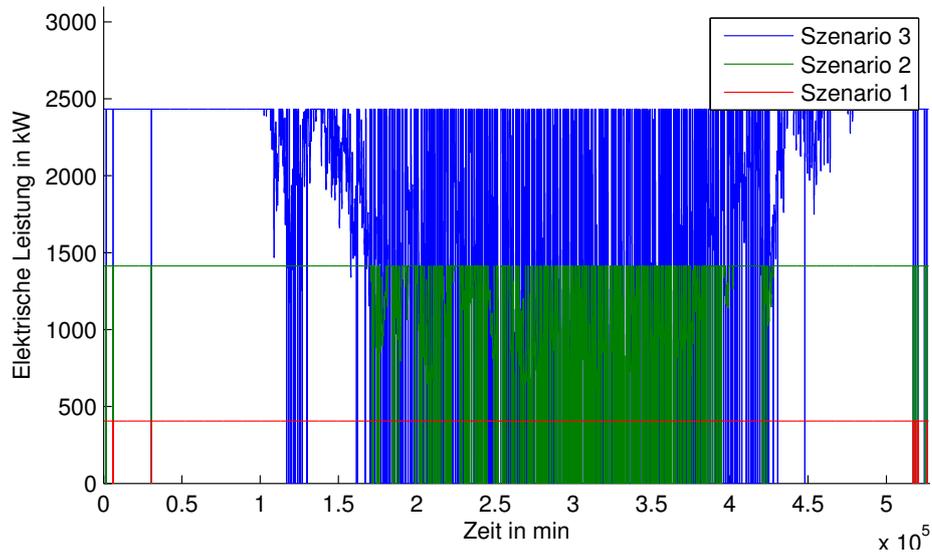


Abbildung A.7.: Elektrische Leistung des BHKW für alle Szenarien

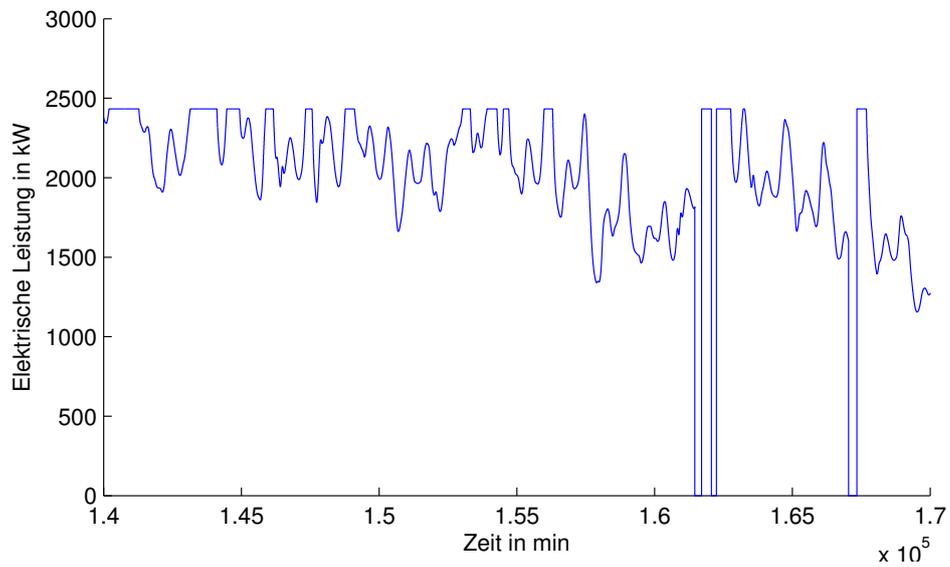


Abbildung A.8.: Elektrische Leistung des BHKW im Teillastbereich für Szenario 3

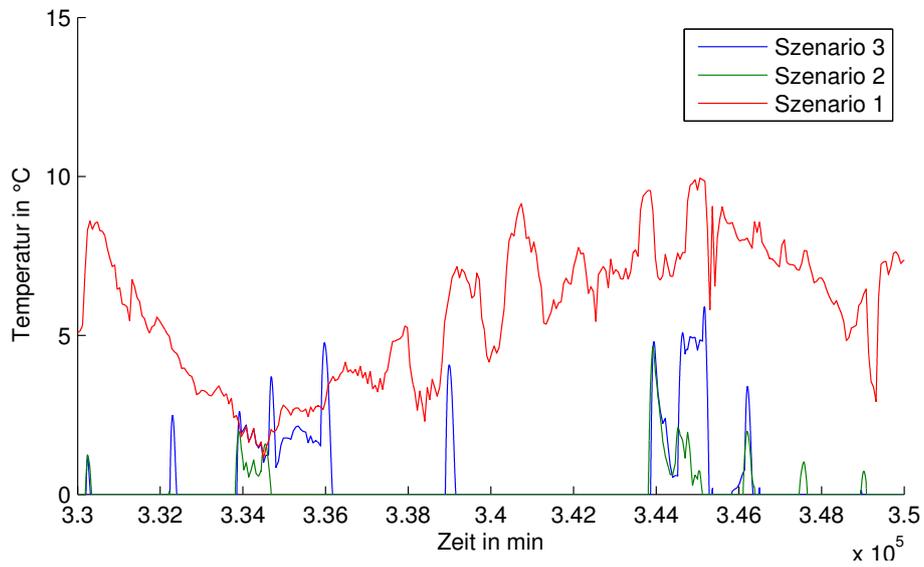


Abbildung A.9.: Temperaturdifferenz zwischen Speicher-VL und Wärmenetz

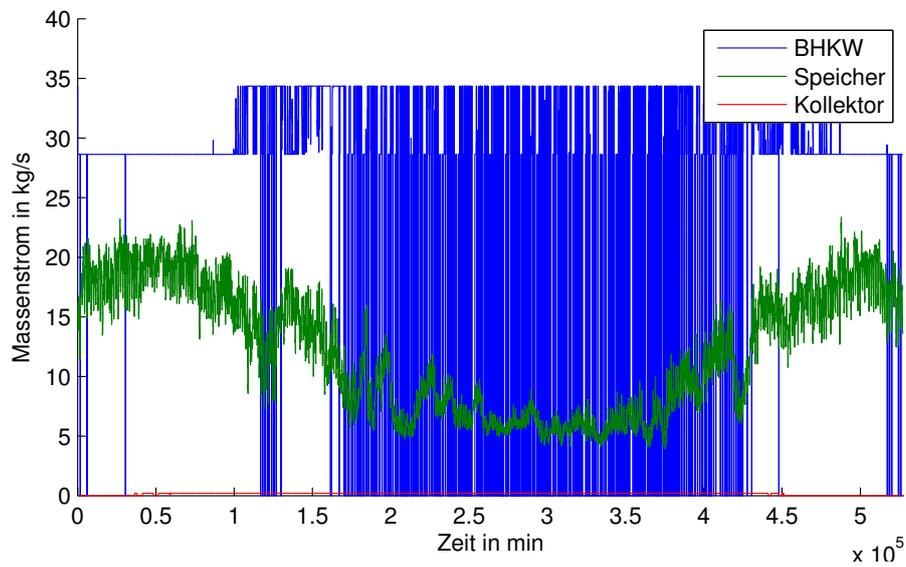


Abbildung A.10.: Massenströme des Kollektors, BHKW und Speichers für Szenario

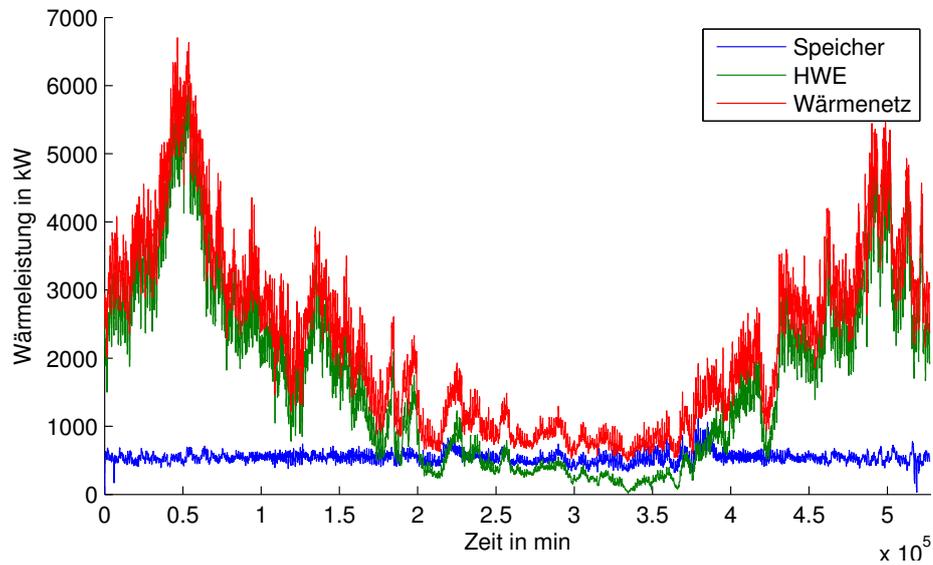


Abbildung A.11.: Wärmeleistung des Speichers, HWE und Wärmenetzes für Szenario 1

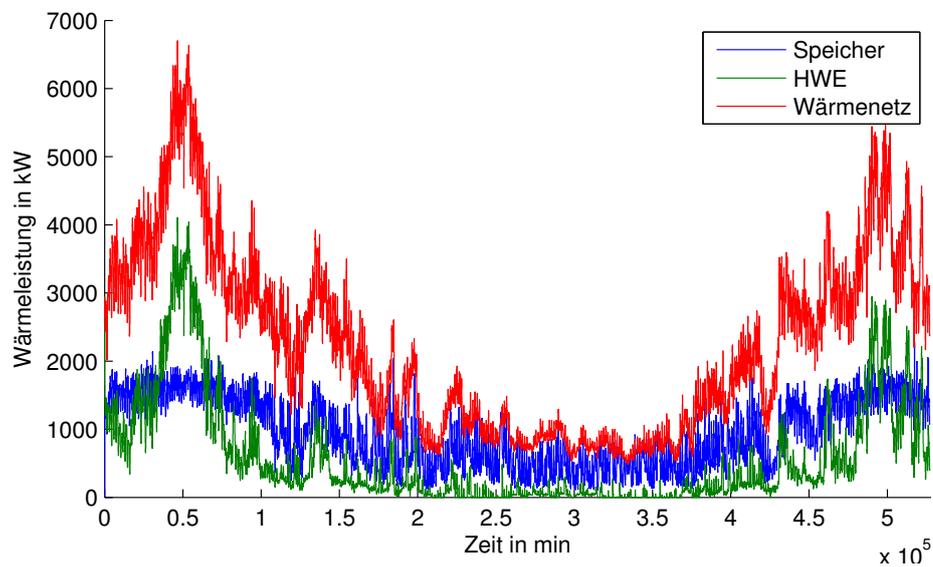


Abbildung A.12.: Wärmeleistung des Speichers, HWE und Wärmenetzes für Szenario 3

