

Zentrale Wärmeversorgung mit Biogasanlagen und Wärmepumpen in ländlichen niedersächsischen Kommunen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Ing. Matthias Kahle

geboren am 20.04.1979
in Hannover

2016

1. Referent Prof. Dr.-Ing. Manfred Gietzelt
2. Referent Prof. Dr.-Ing. Roland Scharf
3. Referent Prof. Dr.-Ing. Stephan Kabelac

Tag der Promotion 05. Juli 2016

Vorwort

Diese Arbeit entstand parallel zu meiner Tätigkeiten am Fernwärme-Forschungsinstitut in Hannover e.V. sowie am Institut für Energie und Klimaschutz der Hochschule Hannover.

Mein Dank gilt insbesondere meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Manfred Gietzelt für die langjährige Betreuung mit vielen, teilweise langwierigen fachlichen Diskussionen bei der Erstellung dieser Arbeit. Des Weiteren danke ich den Referenten Prof. Dr.-Ing. Roland Scharf und Prof. Dr.-Ing. Stephan Kabelac sowie Prof. Dr.-Ing. Lothar Schulze für den Vorsitz der Prüfungskommission.

Zu großem Dank verpflichtet bin ich allen Bürgerinnen und Bürgern aus Heitlingen, die mich mit ihren Daten unterstützt haben. Hier ist insbesondere Herr Volker Tegtmeyer von der Biogas Heitlingen GmbH zu nennen. Ebenso danke ich Herrn Volker Blume, Frau Ursula Carus und Herrn Frank Siedenbergl aus Steyerberg für den regen Informationsaustausch.

Meinen Eltern, Geschwistern, Verwandten, Freunden und Kollegen gilt großer Dank für die Unterstützung. Insbesondere danke ich ihnen dafür, dass sie mich immer wieder darin bestärkt haben die Arbeit zu Ende zu bringen. Weiterhin danke ich allen Anderen, die mich mit ihren Fragen, Anregungen und Informationen unterstützt haben.

Schlagwörter: Fernwärme, ländlicher Raum, Wärmepumpe, Biogas

Key Words: District heating, rural area, heat pump, biogas

Abstract

Zentrale Wärmeversorgung mit Biogasanlagen und Wärmepumpen in ländlichen niedersächsischen Kommunen

Für das Jahr 2050 wird in der Bundesrepublik Deutschland ein Anteil von 60% erneuerbarer Energien am Endenergieaufkommen gesamtgesellschaftlich angestrebt. Dem Bundesland Niedersachsen als flächenmäßig zweitgrößtem deutschen Bundesland kommt im Rahmen der Energiewende eine Schlüsselstellung zu. Niedersachsen verfügt über große Angebote an regenerativen Energien an Land und auf See. Seit Forcierung der Energiewende um das Jahr 2000 werden die Bereiche elektrische Energie, Wärme und Mobilität getrennt voneinander betrachtet – biogene Treibstoffe für den Verkehr, biogene Brennstoffe, oberflächennahe Geothermie und Solarthermie für die Wärmeversorgung sowie Biogas, Photovoltaik (PV), Wind- und Wasserkraft für elektrische Energieerzeugung. Mit zunehmendem Ausbau der dezentral genutzten regenerativen Energien zeigt sich eine Ressourcenkonkurrenz hinsichtlich der benötigten Flächen. Parallel treten auf allen Ebenen der elektrischen Netze (Verteil- und Übertragungsnetze) Engpässe auf. Waren die Netze in der Vergangenheit auf den Transport von Energie aus wenigen, zentralen Großkraftwerken in der Nähe der Verbraucher im urbanen Raum ausgerichtet, wird elektrische Energie aus Wind-, PV- und Biogasanlagen jetzt überwiegend in ländlichen Bereichen auf Nieder- und Mittelspannungsebene bereitgestellt. Wärmenetze, die traditionell aus Abwärme großer Kraftwärmekopplungs-Anlagen (KWK-Anlagen) sowie Industriebetrieben gespeist werden, sind entsprechend der Verteilung der Großkraftwerke ebenfalls vorwiegend im urbanen Raum vorzufinden. Der Bau von Biogasanlagen mit KWK sowie Biomasseheizwerken führte im Zuge der Energiewende zu einer Verbreitung kleiner Fernwärmenetze im ländlichen Raum. Seit 2014 stagniert die Anzahl der Biogasanlagen. Im Vordergrund steht jetzt die Erhöhung der Anlagenleistung und Effizienz, der noch mehrere Jahrzehnte weiter zu betreibenden Anlagen. Zusätzlich gewinnen die Verknüpfungen zwischen den oben genannten Bereichen elektrische Energie, Wärme und Mobilität an Bedeutung. Wärme verliert damit ihren Status als „Abfall“.

Daraus ergibt sich die Fragestellung, ob eine Kombination von elektrisch angetriebenen Großmotorwärmepumpen mit Biogasanlagen zur zentralen Wärmeversorgung im ländlichen Raum energetisch sinnvoll ist. Die elektrische Antriebsenergie der Wärmepumpen soll zur Erreichung größt möglicher Autarkie aus lokalen regenerativen Quellen bezogen werden.

Grundstein der Beantwortung dieser Fragestellung bildet die Ermittlung der Zeitgänge von Wärmenachfrage und -angebot; Dazu werden die ländlichen Siedlungs- und Wärmeabnehmerstrukturen in Niedersachsen mit Auswertung von Literaturdaten sowie Datenaufnahmen vor Ort untersucht. Für einzelne Gebäude werden Referenzlastprofile erstellt. Parallel werden die theoretischen Grundlagen für den Betrieb von Biogasanlagen und Großwärmepumpen dargelegt. Die Angaben zum Eigenwärmebedarf der Biogasanlagen werden mit aus Messungen gewonnenen Standardlastprofilen unterlegt. Die Auswirkungen unterschiedlicher Standorte der Wärmequellen in Wärmenetzen werden zunächst an zwei Beispielorten demonstriert. Unter Berücksichtigung der Einflüsse von Vor- und Rücklauftemperaturen auf die Energieeffizienz der elektrisch angetriebenen Wärmepumpen werden anschließend für einen der Beispielorte verschiedene Kombinationen einer Wärmepumpe mit einer Biogasanlage im Jahresgang quantitativ belegt. Im Ergebnis zeigt sich, dass eine dezentrale Wärmeeinspeisung sowohl hinsichtlich der Wärmeverluste im Netz als auch hinsichtlich der Effizienz des Wärmepumpeneinsatzes vorteilhaft ist. Ebenso wird deutlich, dass größtmögliche Effizienz nur durch saisonale Biogasanlagenfahrweise und Einsatz von Wärmespeichern erreicht werden kann.

Abstract

Centralized heat supply systems with biogas plants and heat pumps in rural Lower Saxony's municipalities

A renewable energy share of more than 60% of the total final energy production is aspired to Germany in 2050. Lower Saxony as the second largest state in Germany has a key position in the so called "Energy transition". Lower Saxony has a large amount of renewable energies available on and off shore. Since the Energy transition started to be forced around 2000 the departments on electricity, heat and mobility are considered separately – biofuels for mobility, biomass, near-surface geothermal energy and solar thermal energy for heating as well as biogas, photovoltaic (PV), wind- and water power for electricity. Continuing decreased use of renewable energies, resource rivalry according to space needed become visible. In parallel capacity shortages at all levels of the electricity integrated network (distribution networks and transmission networks) appear. Electricity networks were constructed to cover electricity from a few centralized large power stations near customers in urban areas in the past. Now electricity from wind, PV and biogas facilities has to be absorbed on low-voltage and medium-voltage power grids. District heating systems, which are traditionally supplied by waste heat from large combined heat and power plants (CHP) as well as from industries, are mainly situated in urban areas like large power stations. During energy transition new biogas facilities with CHP and biomass heating stations stimulate construction of new district heating systems in rural areas. Since 2014 the number of biogas facilities is stable. Now increasing power output and system efficiency is the task for these facilities, which shall operate for further centuries. Additionally connections between electricity, heat and mobility gets more and more important. So heat loses its "waste" status.

These changes lead to the questions, whether and how biogas facilities can be combined energy-efficiently with large scale electrical driven heat pumps to supply district heating systems in rural areas. To achieve highest level of self-sufficiency electric power of heat pumps shall be taken from local renewable energy sources.

Analysis of demand and supply load profiled are the basis for answering these questions. For this work rural settlement and heat customer structures in Lower Saxony are analysed using literature data and on site covered data. For single buildings reference load profiles are developed. In parallel theoretic basics for operating biogas facilities and large scale electrical driven heat pumps are discussed. Demonstrated heat demand of biogas facilities are based on measurements. All these data are used to show influences of different places for supply units in the district heating systems of two sample villages. Furthermore for one rural settlement different combinations of electricity sources and combinations of heat pump and biogas facility is quantitatively analysed considering influences of supply and return temperatures on the energy efficiency of electrical driven heat pumps in the course of a year. As result it is shown that distributed heat sources in a district heating system can reduce heat losses in a district heating system and raise the energy efficiency of a heat pump. Additionally it is concluded that maximum energy efficiency can only be achieved by seasonal biogas facility operations and heat storages.

1. Inhaltsverzeichnis

1. Inhaltsverzeichnis

1.	Inhaltsverzeichnis	6
2.	Formelzeichen und Indizes	10
3.	Hintergrund	13
3.1.	Ländlicher Raum in Niedersachsen	14
3.2.	Energieversorgung	17
3.3.	Zielsetzung	26
4.	Wärmeabnehmer	28
4.1.	Einführung Wärmeabnehmer	29
4.2.	Typologie der Wärmeabnehmer	30
4.2.1.	Gebäude mit Wohnnutzung	33
4.2.2.	Gebäude ohne Wohnnutzung	37
4.3.	Wärmenutzung und Übergabe	38
4.3.1.	Wärmeübergabestationen	38
4.3.2.	Wärmenutzung	39
4.3.2.1.	Statische Heizungen	40
4.3.2.2.	Luftheizungen	42
4.3.3.	Ermittlung von Jahreslastgängen	45
4.3.4.	Wärmebedarfsermittlung aus Messdaten	48
4.3.5.	Wärmebedarfsberechnung nach EnEV	49
4.3.6.	Wärmebedarfsberechnung nach EN 832:1995 mit PHPP	50
4.3.7.	Berechnung von Lastkurven nach VDI 4655	51
4.3.8.	Berechnung von Lastkurven nach Hellwig und BGW P2007/13	53
4.3.9.	Ermittlung eigener Standardlastprofile	55
4.3.9.1.	Ermittlung von Standardlastprofilen nach Hellwig	57
4.3.9.2.	Ermittlung von Standardlastprofilen in Anlehnung an VDI 4655	63
4.3.10.	Vergleich Wärmebedarfe und Wärmeverbräuche	66
5.	Wärmeerzeuger	71
5.1.	Einführung Wärmequellen für Fernwärmenetze	72
5.2.	Biogasanlagen	75

5.2.1.	Grundlagen	75
5.2.2.	Hauptkomponenten einer Biogasanlage	77
5.2.2.1.	Fermenter	77
5.2.2.2.	Biogas-BHKW	80
5.2.3.	Allgemeine Betriebsweisen von Biogasanlagen	85
5.2.4.	Beispiel Biogasanlage Heitlingen	86
5.2.4.1.	Messungen an der Biogasanlage	88
5.2.4.2.	Energieflüsse in der Biogasanlage	88
5.2.4.3.	Standardlastprofile für die Fermenterheizung – Temperaturklassenverfahren .	90
5.2.4.4.	Standardlastprofile für die Fermenterheizung – Typtagverfahren	93
5.2.4.5.	Bewertung der Verfahren zur Bildung von Standardlastprofilen für Fermenter	96
5.2.5.	Zusammenfassung Einflussfaktoren Fermenterenergieeffizienz	98
5.2.6.	Optimierte Wärmenutzung in der Biogasanlage	99
5.3.	Wärmepumpen	103
5.3.1.	Motorwärmepumpen	103
5.3.2.	Motorwärmepumpen mit elektrischer Nachheizung	109
6.	Wärmenetz	112
6.1.	Grundlagen der Wärmenetze	113
6.1.1.	Siedlungstypologien	113
6.1.2.	Innere Struktur dörflicher Siedlungen	122
6.1.3.	Netzstrukturen	123
6.2.	Netzauslastung	126
6.3.	Wärmeverluste	127
7.	Zusammenführung	134
7.1.	Einfluss des Wärmerzeugerstandortes auf die Netzverluste	135
7.1.1.	Beispielnetz 1 – Heitlingen	136
7.1.2.	Beispielnetz 2 – Steyerberg	138
7.1.3.	Zusammenfassung Einfluss der Wärmeerzeugerstandorte	142
7.2.	Endenergieeffizienz	143
7.2.1.	Ausgangsszenario A – Propangasspitzenlastkessel	145
7.2.2.	Unterszenario B – Wärmepumpe mit Heizstab	146

1. Inhaltsverzeichnis

7.2.3.	Unterszenario C – Wärmepumpe am BHKW (Reihenschaltung)	149
7.2.4.	Unterszenario D – Wärmepumpe dezentral im Netz	152
7.2.5.	Unterszenario E – Wärmepumpe mit BHKW als Endenergiequelle	155
7.2.6.	Vergleich der Unterszenarien	156
7.3.	Fazit und Ausblick	158
8.	Zusammenfassung	160
9.	Quellenverzeichnis	163
10.	Tabellenverzeichnis	181
11.	Abbildungsverzeichnis	184
Anhang A	194
A.1.	Übergabestationen.....	195
A.2.	Heizkörper.....	197
A.3.	Luftheizregister.....	199
A.4.	Messdatenfilterung für Standardlastprofile.....	202
A.4.1.	Ermittlung Standardlastprofil in Anlehnung an VKU BGW Praxisinformation P 2007/13.....	202
A.4.2.	Ermittlung von Standardlastprofilen in Anlehnung an VDI 4655.....	206
A.5.	Wirkungsgraddefinitionen.....	211
A.6.	Biogasanlage.....	213
A.6.1.	Sankeydiagramm.....	213
A.6.2.	Optimierte Wärmeauskopplung aus einer Biogasanlage.....	227
A.7.	Wärmepumpe.....	229
A.8.	Photovoltaik.....	231
A.9.	Windkraftanlagen.....	238
A.10.	Wärmeverlustberechnungen für Rohrleitungen.....	241
A.10.1.	Anheyer, Kruse, Rühling, Wünsche (FFI, TU Dresden).....	241
A.10.2.	Bøhm.....	243
A.10.3.	EN 13941:2010-12.....	246
A.10.4.	Isoplus.....	248
A.10.5.	Løgstør Rør.....	251

A.10.6.	Obernberger.....	253
A.10.7.	Tarco.....	254
A.10.8.	Wallentén.....	255
A.10.9.	Zeitler.....	260
A.10.10.	Zinko et. al.....	263
Anhang B		265
B.1.	Stromlastgang in Deutschland.....	266
B.2.	Standardlastprofile.....	267
B.2.1.	Fermenterheizung.....	267
B.2.2.	Wohnsitz.....	269
B.2.3.	Viehwirtschaft.....	272
B.2.4.	Ackerbaubetrieb.....	275

2. Formelzeichen und Indizes

2. Formelzeichen und Indizes

Formelzeichen

A	Oberfläche (Kapitel 9)	[m ²]
A_N	EnEV-Bezugsfläche	[m ²]
a, b, c	Parameter (Kapitel 4)	[-]
A, B, C, D	Parameter (Kapitel 4, 5)	[-]
B_R	Bruttoraumbelastung	[kg _{OTS} /(m ³ d)]
COP	Coefficient of Performance / Leistungszahl	[-]
D	Tag (Kapitel 4)	[-]
d	Parameter	[-]
F	Wochentagsfaktor	[-]
GLF	Gleichzeitigkeitsfaktor	[-]
h	Enthalpie	[J/kg]
h_G	Geschosshöhe	[m]
$h(\vartheta_D)$	Normierte Tageswärmemenge aus Sigmoidfunktion	[-]
H_i	Heizwert	[J/kg]
KW	Kundenwert	[kWh]
l	Länge	[m]
\dot{m}	Massenstrom	[kg/s]
n	Anzahl	[-]
$N_{PerslWE}$	Anzahl Personen bzw. Wohneinheiten	[-]
P	Leistung	[kW]
q	Spezifischer Wärmeaufwand	[-]
Q	Wärmeverbrauch	[kWh]
\dot{Q}_0	Auslegungsleistung des Netzes	[kW]
Q_i	Jahreswärmemenge	[kWh]
\dot{Q}	Leistung (thermisch oder chemisch)	[kW]
SF	Stundenfaktor	[-]
t	Zeit	[h]
t	Jahresstunden (Kapitel 6)	[h]
T	Temperatur	[K]
u	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/(m ² *K)]

V	Volumen	[m ³]
V_e	Umbautes Volumen	[m ³]
β_D	Thermische Belastung	[-]
ε	Leistungszahl	[-]
η	Wirkungsgrad	[-]
$\bar{\eta}$	Brennstoffnutzungsgrad	[-]
θ	Bedeckungsgrad	[-]
ϑ	Temperatur	[°C]
ϑ_{mK}	Mittlere Wärmeerzeugertemperatur	[°C]
ϑ_D	Geometrische Viertage-Mitteltemperatur	[°C]
ϑ_0	Bezugstemperatur	[°C]
ϕ	Belastungsgrad	[-]
Φ_{erf}	Auslegungsleistung der Wärmeerzeuger	[-]
ω_N	Jahresnutzungsgrad eines Wärmenetzes	[-]

Indizes

a	Jahr
ab	Abgeführt
B	Bereitschaft
$B70$	Bezugstemperatur Wärmeerzeugermitteltemperatur
$Biogasanlage$	Biogasanlage
Br	Brennstoff
D	Tag
el	Elektrisch
F	Fermenter
FH	Fermenterheizung
Gas	Biogas
ges	Gesamt
$Heiz$	Heizung
i	Zählindex
K	Kessel
$M7$	Siebentage-Mittel
max	Maximum
N	Kundennummer

2. Formelzeichen und Indizes

<i>Stunde</i>	Stunde
<i>Substrat</i>	Substrat
<i>th</i>	Thermisch
<i>TT</i>	Typtag
<i>TWW</i>	Trinkwarmwasser
<i>u</i>	Umgebung
<i>V</i>	Verbrennung
<i>zu, Verd</i>	Zugeführt zum Verdichter

3. Hintergrund

In der Bundesrepublik Deutschland wird ein Wechsel von fossilen und nuklearen Energieträgern hin zu erneuerbaren Primärenergieträgern angestrebt. Technische und politische Zielszenarien gehen davon aus, dass 2050 mehr als 60 % des Endenergiebedarfs in Deutschland aus erneuerbaren Energien gedeckt wird. Mit dem Dreiklang aus Bedarfsvermeidung, Effizienzsteigerung und Substitution soll der Umstieg auf eine Energiebedarfsdeckung mittels erneuerbarer Energien erreicht werden. [1][2][3]

Niedersachsen ist bezogen auf die Fläche nach Bayern das zweitgrößte deutsche Bundesland und damit größer als die Schweiz, Estland oder Dänemark. Abgesehen von den Verdichtungsräumen um Hamburg, Hannover, Bremen und Braunschweig sowie den Stadtregionen Oldenburg, Osnabrück, Hildesheim und Göttingen ist Niedersachsen mit seinen rund 8 Millionen Einwohnern, entsprechend rund 10 % der deutschen Gesamtbevölkerung, ländlich geprägt. So werden über 50 % der Landesfläche landwirtschaftlich genutzt. Den ländlichen Bereichen Niedersachsens mit ihren Flächen für den Anbau von Biomassen sowie der Installation großer Windparks und Photovoltaikanlagen kommt bei der Energiewende eine Schlüsselrolle zu. [4][5][6]

Bisher wird die rund um das Jahr 2000 begonnene Energiewende vornehmlich auf die Versorgung mit elektrischer Energie bezogen. Eine konsequente Energiewende im Wärmebereich wird derzeit nicht vorangetrieben. So erfolgen aktuelle Diskussionen zu Verknüpfungen zwischen Wärme- und Stromversorgung fast ausschließlich aus Sicht der elektrischen Energieversorgung oder global. [7][8]

Ende 2013 produzierten bereits mehr als 1.500 Biogasanlagen mit einer elektrischen Gesamtleistung von über 870 MW und rund 133.000 Photovoltaikanlagen mit einer Gesamtleistung von 3.316 MW elektrische Energie. Ende 2014 stellten zusätzlich rund 5.600 Windkraftanlagen mit einer Leistung von 8.233 MW elektrischen Strom bereit. Windenergieanlagen wiesen dabei eine mittlere Leistung von 1.500 kW auf. Die größten Onshore-Anlagen erreichen eine installierte Leistung von 6.000 kW. 2013 betrug die durchschnittliche installierte elektrische Leistung der Biogasanlagen rund 567 kW und die maximale Leistung 8.360 kW. Obgleich Biogasanlagen überwiegend am Rand von Siedlungen oder im Außenbereich errichtet werden, verfügten 2013 rund 70 % der Anlagen über ein Wärmenutzungskonzept, mit dem insgesamt mehr als 50 % der in niedersächsischen Biogasanlagen anfallenden Abwärme genutzt werden konnte. [9][10][11]

3. Hintergrund

3.1. Ländlicher Raum in Niedersachsen

Das Bundesland Niedersachsen liegt im Nordwesten der Bundesrepublik Deutschland. Es erstreckt sich von den Mittelgebirgen im Süden bis an die Nordsee und von der niederländischen Grenze bis in den Harz. So vielfältig wie die landschaftlichen Strukturen und deren Nutzung sind auch die Siedlungen. Hier stehen viele ländliche Siedlungen und zahlreiche Kleinstädte wenigen Großstädten gegenüber. Viele ländliche Siedlungen in Niedersachsen sind heute Teile von größeren Gemeinden oder Städten. So existieren in Niedersachsen insgesamt rund 1.600 Ortschaften mit 20.000 Wohnplätzen in 1.030 Gemeinden und Städten. [12]

Der vielfach für ländliche Siedlungen verwendete Begriff „Dorf“ ist nicht eindeutig definiert und unterliegt einem stetigen Wandel [13]. Daher wird er in dieser Arbeit nicht weiter verwendet. Ländlicher Raum und ländliche Kommunen auf der einen Seite sowie Städte auf der anderen Seite sind in der europäischen Union hingegen eindeutig durch Eurostat in [14] definiert. Ländliche Gemeinden sind danach alle Gemeinden

- mit weniger als 5.000 Einwohnern oder
- in denen mehr als 50 % der Einwohner in jeweils 1 km² großen Flächenbereichen, die weniger als 300 Einwohnern je km² aufweisen, leben.

Städte und Stadtregionen sind Gemeinden mit jeweils mindestens 5.000 Einwohnern und

- in denen mindestens 50 % der Einwohner in jeweils 1 km² großen Flächenbereichen, die wenigstens 300 Einwohner je km² aufweisen, leben, aber
- in denen bei insgesamt mehr als 50.000 Einwohnern gleichzeitig weniger als 50 % der Einwohner in jeweils 1 km² großen Gebieten mit mindestens 1.500 Einwohnern je km² leben.

Großstädte und Verdichtungsräume sind definiert durch

- mindestens 50.000 Einwohner je Gemeinde und
- mehr als 50 % der Einwohner in jeweils 1 km² großen Gebieten mit mindestens 1.500 Einwohnern je km² lebend.

Wie oben beschrieben gehören viele ländliche Siedlungen durch Eingemeindungen zu Städten oder Großstädten. Für eine Abschätzung des Anteils der niedersächsischen Bevölkerung, der in ländlichen Siedlungen wohnt, werden die vom Land Niedersachsen vorgenommenen Zuordnungen der Landkreise und kreisfreien Städte herangezogen. In Abbildung 1 ist die Bevölkerungsverteilung auf den ländlichen Raum, die Stadtregionen und die Verdichtungsräume dargestellt. Die Zuordnung der Landkreise und kreisfreien Städte wurde dazu aus dem Regionalmonitoring 2012 [4] übernommen.

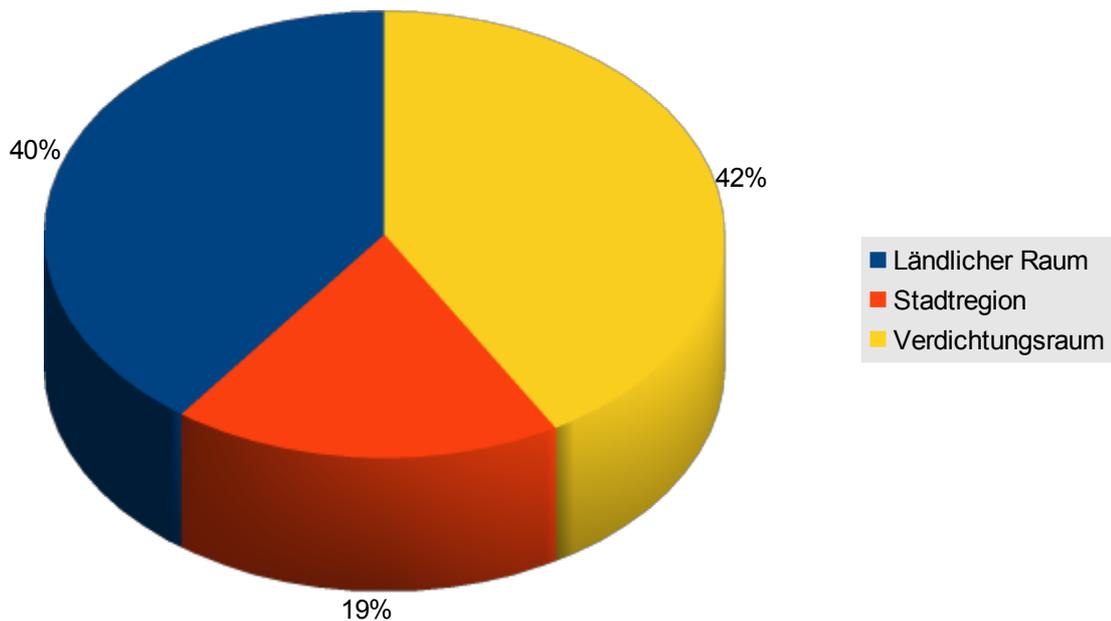


Abbildung 1: Bevölkerungsverteilung in Niedersachsen 2012 (eigene Darstellung, Datenbasis [5])

Der ländliche Raum Niedersachsens weist mit Ausnahme der Landkreise Schaumburg, Vechta und Hameln-Pyrmont sowie der Städte Emden und Wilhelmshaven eine unterdurchschnittliche Bevölkerungsdichte (Durchschnittliche Bevölkerungsdichte in Niedersachsen: 166 Einwohner pro Quadratkilometer [5][15]; Deutschland: 225 Einwohner je Quadratkilometer [6]) auf. Im Gegenzug stehen große land- und forstwirtschaftliche Flächen zur Verfügung, die zur Bereitstellung regenerativer Energien genutzt werden könnten (siehe Abbildungen 2 und 3).

3. Hintergrund

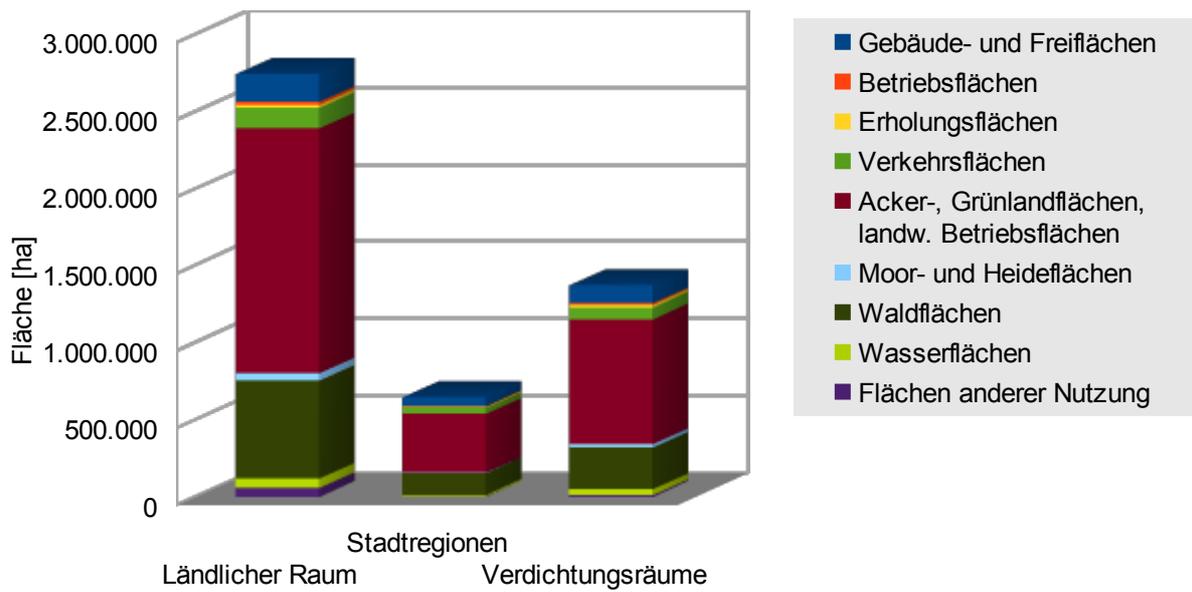


Abbildung 2: Räumliche Gliederung in Niedersachsen 2013 (eigene Darstellung; Datenbasis [4][5])

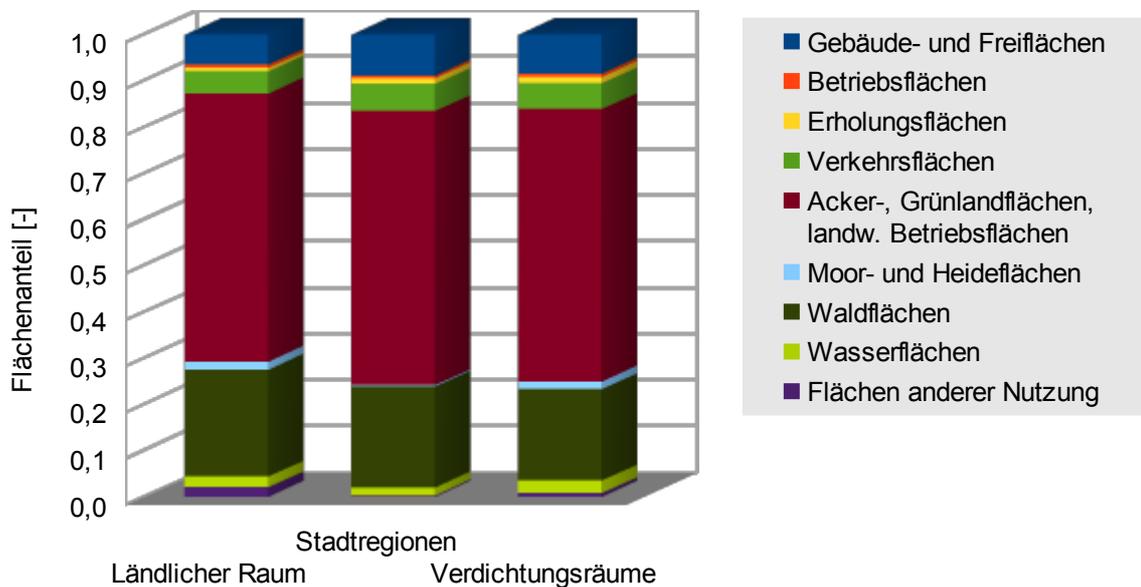


Abbildung 3: Räumliche Gliederung in Niedersachsen 2013, normierte Darstellung (eigene Darstellung; Datenbasis [4][5])

3.2. Energieversorgung

Die kontinuierliche Versorgung mit Energie ist für alle Zivilisationen essentiell. In Niedersachsen wurden im Jahr 2011 rund 10 % des gesamten deutschen Primärenergieverbrauchs genutzt – entsprechend 1.349 PJ in Niedersachsen von 13.599 PJ in ganz Deutschland [15][16] (Neuere Daten liegen für Niedersachsen nicht vor). Bisher wird der größte Teil des Primärenergieverbrauchs in Niedersachsen, wie aus Abbildung 4 ersichtlich ist, mit fossilen Energieträgern gedeckt.

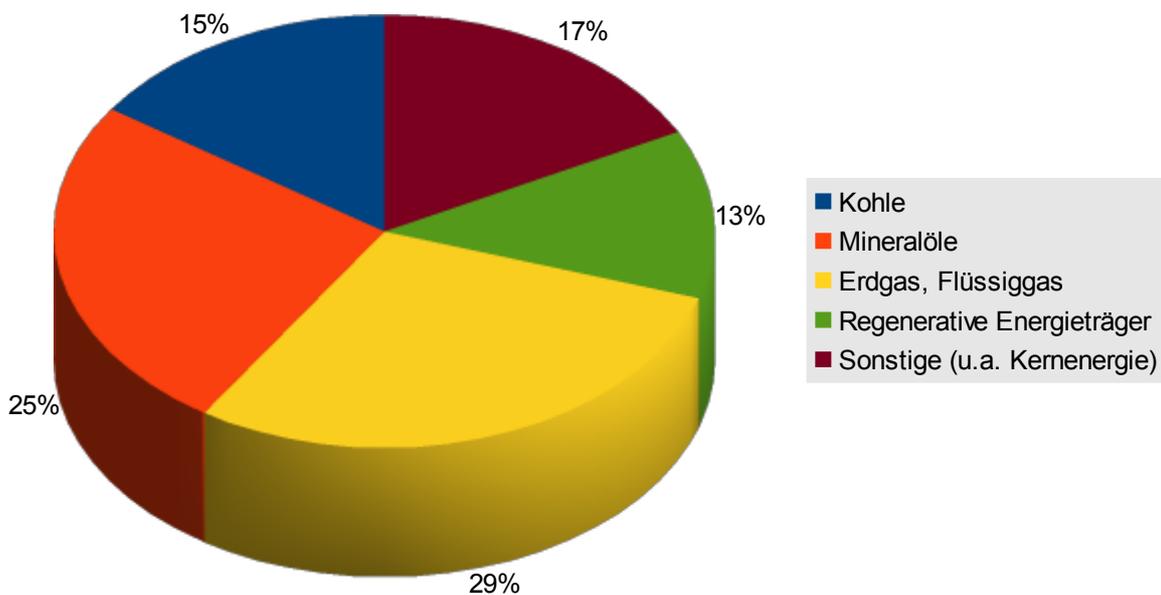


Abbildung 4: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in Niedersachsen 2011 [15]

Bei der Betrachtung der Abbildung 4 ist zu berücksichtigen, dass unter „Regenerative Energien“ für Photovoltaik-, Windkraft- und Wasserkraftanlagen der Endenergieträger Strom subsumiert ist. Für diese Anteile entfallen also die Umwandlungsverluste zur Endenergie.

Der größte Teil der Endenergie wird in Deutschland für die Bereitstellung von Wärme eingesetzt (siehe Abbildung 5, für Niedersachsen liegen keine Daten vor).

3. Hintergrund

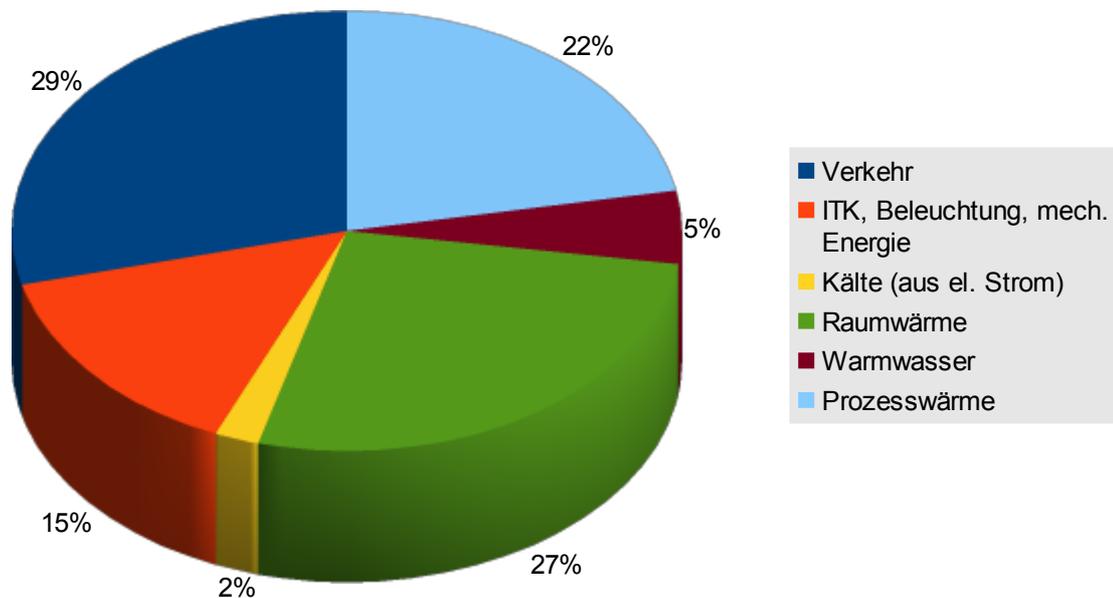


Abbildung 5: Endenergieverbrauch in Deutschland nach Anwendungen 2011 [16]

Ein Teil der Wärmebereitstellung für Heizung (Raumwärme), Warmwasser und Prozesswärme erfolgt über Fernwärmenetze. Fernwärme wird dabei als Wärmeversorgung über Grundstücksgrenzen hinweg definiert. Die Fernwärmeversorgung hat sich seit Ende des 19. Jahrhunderts in den großen Städten Europas und Nordamerikas etabliert. Das erste bekannte öffentliche Fernwärmenetz wurde 1878 in Lockport im US-Bundesstaat New York in Betrieb genommen. Das erste deutsche Fernwärmenetz, ein Dampfnetz, wurde 1900 in Dresden zur Beheizung von Schloss, Zwinger und Semperoper errichtet. 1924 wurde in Braunschweig das erste Fernwärmenetz im heutigen Niedersachsen errichtet. Später folgten die großen Fernwärmenetze in Hannover und Wolfsburg mit Netzlängen von jeweils etwa 200 km. Bis auf einige Abschnitte in Braunschweig werden diese Netze mit Heißwasser betrieben. Zunächst wurde die Wärme für die ersten Fernwärmenetze in kohlegefeuerten Kesseln erzeugt. Heute kommen zusätzlich verschiedenste andere Energieträger wie Abfälle, nachwachsende Rohstoffe (Nawaro), Erdgas oder industrielle Abwärme zur Fernwärmeerzeugung zum Einsatz. So ist die Fernwärmemenge in Niedersachsen von 4.694 GWh im Jahr 1990 auf 6.556 GWh im Jahr 2011 angestiegen, was einer Steigerung des Endenergieanteils von 1,8 % auf 2,6 % bedeutet. Clausen stellt in [17] ein Szenario für die weitere Verbreitung von Fernwärmenetzen in den ländlichen Bereichen in Deutschland vor. Darin werden 35 % der Einfamilienhäuser, 45 % der Doppelhäuser und 60 % der Mehrfamilienhäuser im Jahr 2050 über Wärmenetze mit Wärme versorgt. [18][19][15]

Diese Wärmenetze können eine wichtige Rolle zur Deckung des Raumheiz- und Trinkwarmwasserbedarfs bei dem Wechsel zu erneuerbaren Energien einnehmen. Hierbei müssen die Versorgungsstrukturen wirtschaftlich und energetisch effizient bleiben. Zudem müssen die Wärmeversorgungssysteme den Wärmebedürfnissen der Kunden über viele Jahrzehnte gerecht werden. Parallel werden die elektrischen Versorgungsnetze zur Aufnahme der regenerativ erzeugten Energien ausgebaut. Über Kraft-Wärmekopplungsanlagen, Wärmepumpenanlagen, Kältemaschinen und „Power-to-heat“-Anlagen werden elek-

trische und thermische Versorgungsnetze miteinander verbunden.

Der mit der Energiewende einhergehende technologische Wandel der Wärmeerzeugung sowie der Wärmeverteilung führen zu der Verbreitung von Wärmenetzen auch in ländlichen Bereichen. Diese Wärmenetze reichen von kleinen innerbetrieblichen Wärmenetzen landwirtschaftlicher Betriebe bis zu größeren Fernwärmenetzen. Die in Niedersachsen weit verbreitete Nutzung von Biomasse über Biogasanlagen zur Fernwärmebereitstellung nimmt bei der Wärmeversorgung aus technischer Sicht eine Sonderstellung ein: Für die anaerobe Erzeugung des Biogases sind zum Einen relevante Wärmemengen zum Betrieb notwendig und zum Anderen kann die Biogasproduktion in den derzeit genutzten Biogasanlagen nur in geringem Umfang gesteuert werden. Das Hauptprodukt, der in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) erzeugte elektrische Strom, kann jeder Zeit über das europäische Verbundnetz einer sinnvollen Nutzung zugeführt werden. Die abfallende Wärme ist hingegen nur in räumlicher Nähe zur KWK-Anlage einer Nutzung zuzuführen.

Die ab Beginn der 2000er Jahre politisch gesteuerte Energiewende, mit dem Ziel bis 2050 mindestens 60 % des Endenergiebedarfs aus regenerativen Energien zu decken, lässt sich in mehrere Phasen unterteilen. Die einzelnen Phasen werden hinsichtlich der eingesetzten Technologien sowie Versorgungsstrukturen maßgeblich durch Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), Energie-Einspar-Verordnung (EnEV) und Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz (EEWärmeG) beeinflusst. Da sich Planung und Bau der Anlagen über Monate bis Jahre hinziehen, können die einzelnen Phasen zeitlich nur grob von einander abgegrenzt werden.

3. Hintergrund

In der ersten Phase der Energiewende bis etwa 2004 werden die Versorgung mit elektrischer Energie und Wärme getrennt voneinander betrachtet. Abbildung 6 zeigt die 1. Phase der Energiewende mit Fokus auf die Versorgungsstrukturen ländlicher Gebiete. Biogasanlagen, Windkraftanlagen (WKA) und Photovoltaikanlagen (PV) speisen in dieser Phase elektrische Energie in das Verbundnetz ein. Abwärme der Biogasanlagen wird ausschließlich zur Prozessbeheizung genutzt und ansonsten an die Umgebung abgeführt.

In Abbildung 6 sowie im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden solarthermische Anlagen nicht weiter berücksichtigt, da Solarthermieanlagen annähernd zeitgleich mit Biogasanlagen die höchste nutzbare thermische Leistung bereitstellen während die meisten Wärmeabnehmer die geringste Last im Jahresverlauf aufweisen. Die Verbindung von Solarthermie- und Biogasanlagen über Wärmenetze für Sonderanwendungen oder temporär betriebene Netze könnte Thema weiterführender wissenschaftlicher Arbeiten werden.

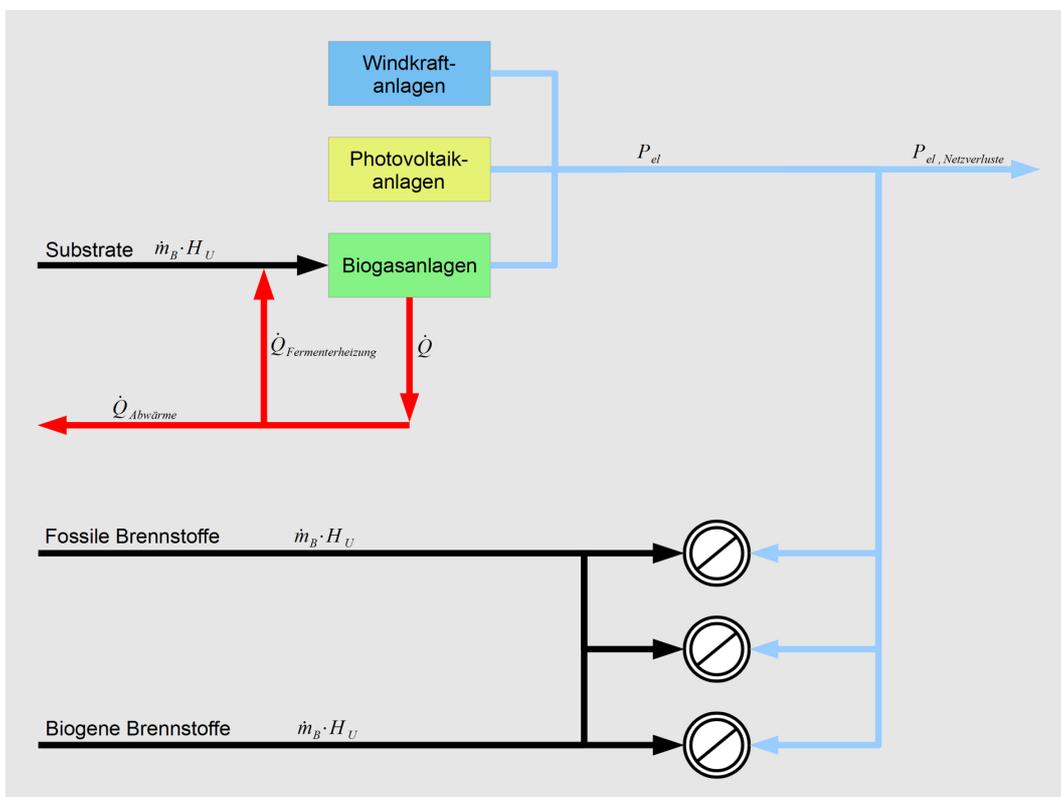


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Energieflussbetrachtung im Zuge der Energiewende – 1. Phase

Die 2. Phase der Energiewende (Abbildung 7) ist durch die zunehmende Abwärmenutzung aus Biogasanlagen gekennzeichnet. Über die Wärmenutzung im direkten Umfeld der Biogasanlagen werden Nah-/Fernwärmenetze zur weiteren Wärmeverteilung errichtet. Als Spitzenlastwärmeerzeuger werden in dieser 2. Phase der Energiewende Kessel mit fossilen oder biogenen Energieträgern eingesetzt. Überschüssige Wärme aus der Biogasanlage wird an die Umgebung abgegeben.

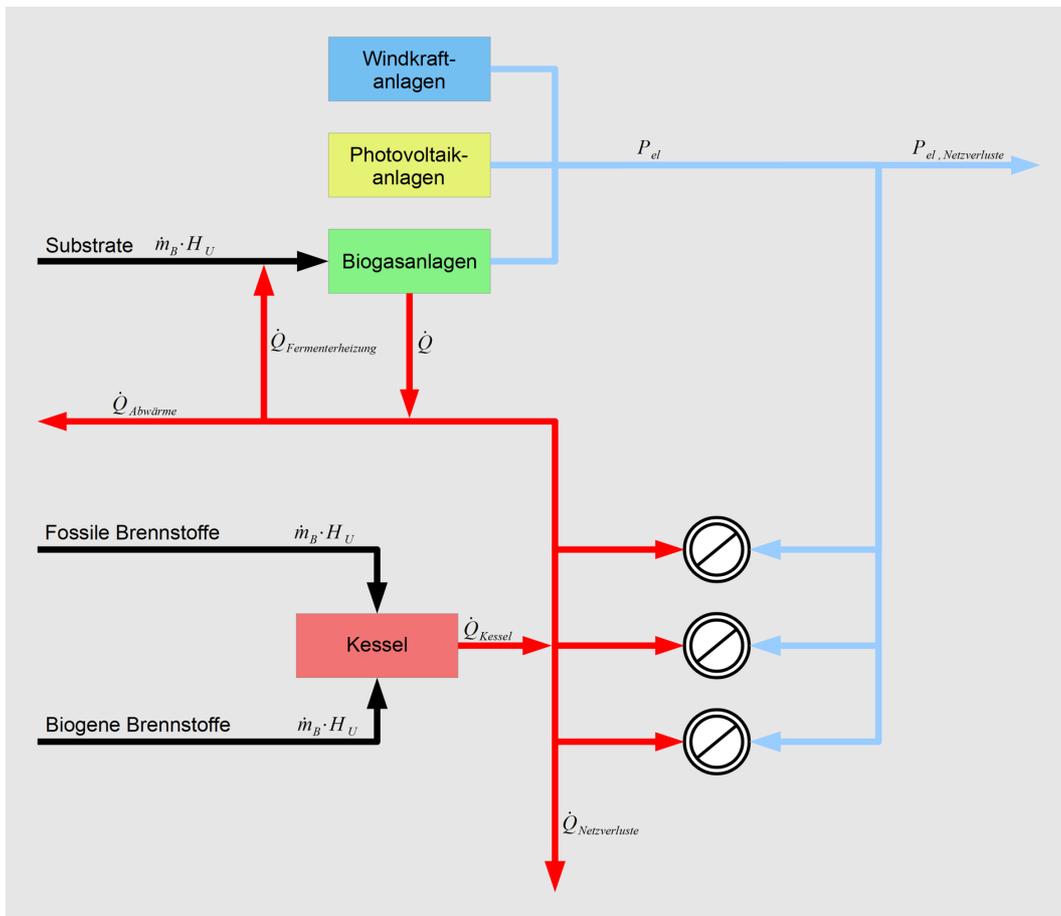


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Energieflussbetrachtung im Zuge der Energiewende – 2. Phase

Ab etwa 2012 beginnt die 3. Phase der Energiewende mit hohen Anteilen regenerativ erzeugter elektrischer Energie in den deutschen Versorgungsnetzen. Nun wird die Netzstabilisierung sowie Nutzung elektrischer Energie in räumlicher Nähe zu den Erzeugungssystemen wichtiger. Zur Stabilisierung der elektrischen Versorgungsnetze kommen neben der Flexibilisierung der Biogasanlagenfahrweise elektrisch betriebene Großwärmepumpen und elektrische Heizstäbe in den Wärmenetzen hinzu. Parallel nimmt die Ressourcenkonkurrenz um für energetische Nutzung geeignete Flächen sowie die Biomasse zu.

3. Hintergrund

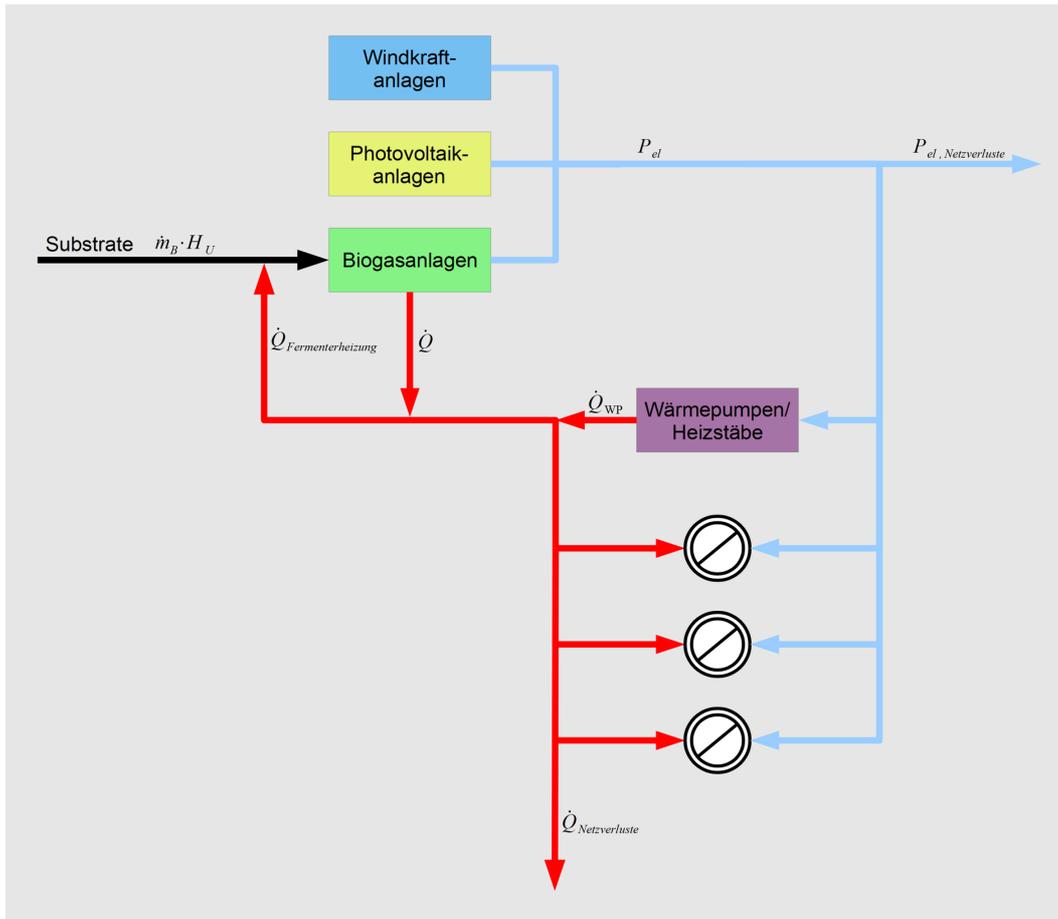


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Energieflussbetrachtung im Zuge der Energiewende – 3. Phase

Mit zunehmendem Anteil erneuerbarer Energien kommt der Verknüpfung zwischen Wärme- und elektrischer Energieversorgung, wie oben dargestellt, eine immer größere Bedeutung zu, um kurzzeitige und saisonale Lastschwankungen auszugleichen und vorhandene Ressourcen optimal zu nutzen. Aus Sicht der Elektrizitätsversorgung wird die Umstellung von Biogasanlagen weg vom Grundlastbetrieb hin zu einem flexiblen Betrieb vorangetrieben. Zusätzlich wird der Einsatz von Power-to-Heat – also Niedertemperaturwärmeerzeugung aus elektrischem Strom direkt oder über Luft- beziehungsweise Erdreichwärmepumpen – sowie Power-to-Gas (PTG) – der Erzeugung von Wasserstoff oder synthetischem Methan – diskutiert und in ersten Pilotprojekten umgesetzt.

Wird das Ziel einer zu über 60 % mit erneuerbaren Primärenergieträgern gedeckten Endenergieversorgung angestrebt, müssen die vorhandenen Energieträger weitestgehend ausgenutzt werden. In Abbildung 9 sind mögliche Verknüpfungen zwischen elektrischer Energie und Wärme mit den regenerativen Energieträgern dargestellt. Die unterschiedlichen Strichstärken symbolisieren darin die energetische Relevanz der einzelnen Verbindungen. Sind bei einem Prozess oder Energieform unterschiedliche Nutzungsmöglichkeiten der Ausgangsprodukte gegeben, so ist jene Verbindung mit der höchsten Relevanz (geringste Exergieabnahme) am dicksten eingezeichnet. Mit abnehmender Relevanz werden die Strichstärken kleiner.

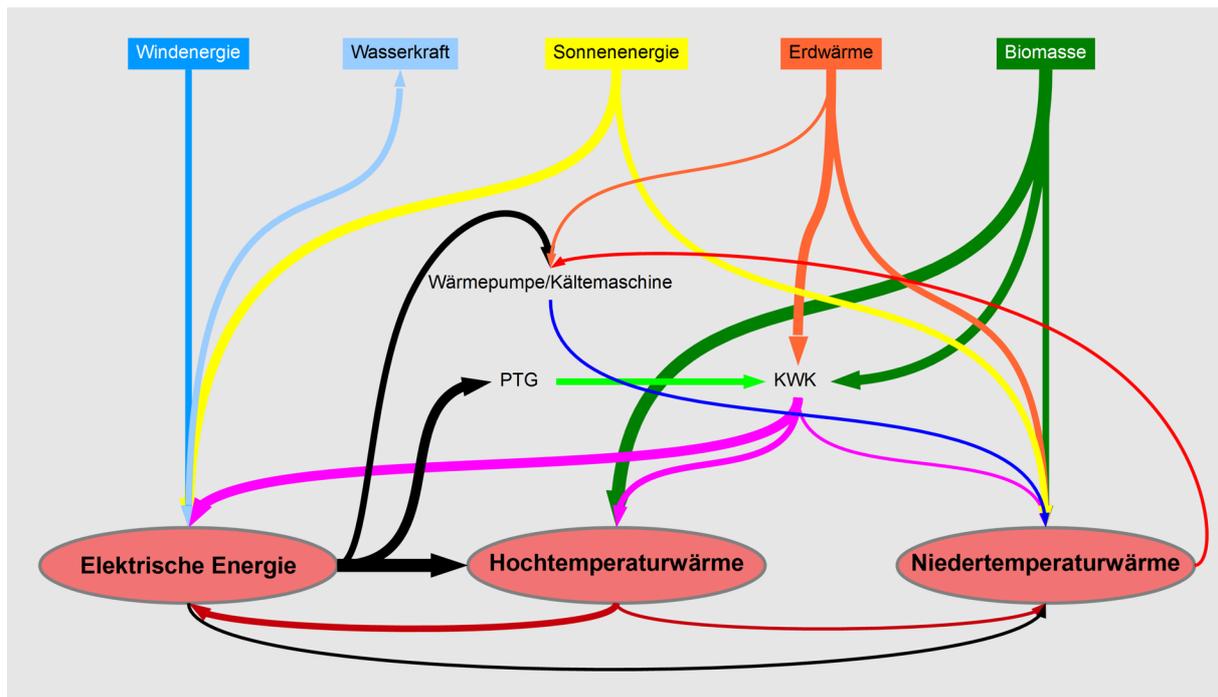
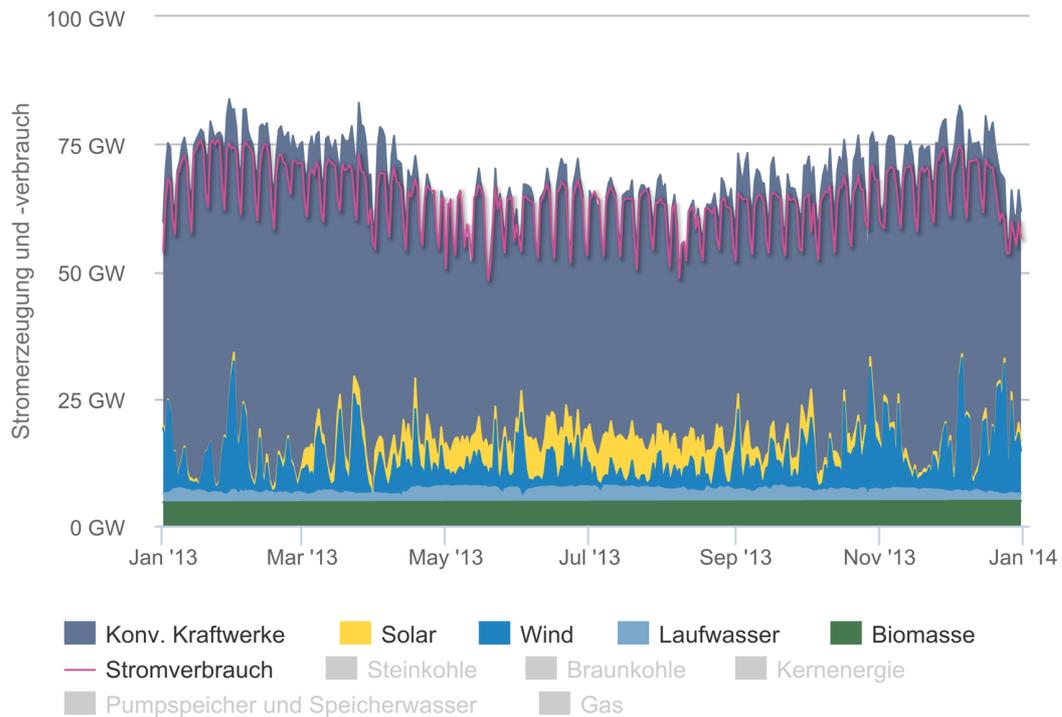


Abbildung 9: Energiekaskade

Zu sehen ist insbesondere, dass die Hochtemperaturanwendungen (im Rahmen dieser Arbeit: Alle Anwendungen über 100 °C wie z.B. Kochen, Stahlschmelzen) bei 100 % regenerativer Energieversorgung ausschließlich auf Biomasse und elektrischen Strom zurückgreifen können. Niedertemperaturwärme ist hingegen mehr oder weniger ein „Abfallprodukt“ und kann über viele verschiedene Wege bereitgestellt werden. Der Aufbau von Fernwärmesystemen kann die Nutzbarmachung dieser verschiedensten Angebote erleichtern. Insbesondere bei der Nutzung von Abwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung und Industrieprozessen sowie Tiefengeothermie ist die Nutzung von Fernwärmenetzen nahezu unumgänglich. In Verbindung mit solarthermischer Energie kann Fernwärme zu einem Ausgleich der lokal oder regional verfügbaren Energieträger beitragen. Hierbei müssen wie bereits oben angedeutet die verschiedenen Lastgänge der Wärmequellen und Wärmeabnehmer berücksichtigt werden.

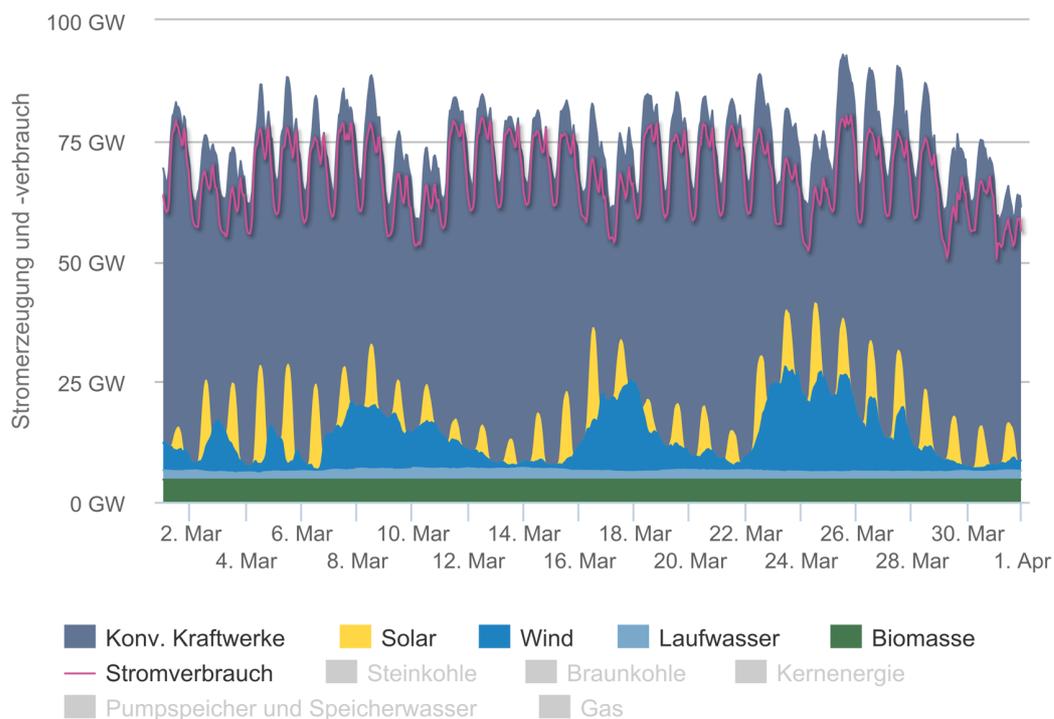
Der Nutzenergieverbrauch und in der Folge der Endenergieverbrauch sind im Jahresverlauf nicht konstant. So weist die Heizwärmenutzung eine Außentemperaturabhängigkeit auf, während der elektrische Stromverbrauch zusätzlich durch die jahreszeitlichen Schwankungen des Kunstlichtbedarfes beeinflusst wird. Überlagert werden die jahreszeitlichen Schwankungen durch Nutzenergieverbrauchsänderungen im Wochen- und Tagesverlauf. Parallel ändert sich im Jahresverlauf die Verfügbarkeit von Wind-, Wasser- und Solarenergie. Deutlich werden die Schwankungen im elektrischen Strombereich zum Beispiel am Spotmarkt der europäischen Strombörse EEX in Leipzig. Dort wird seit Inkrafttreten der „Verordnung zur Weiterentwicklung des bundesweiten Ausgleichsmechanismus (AusglMechV) [20] am 01. Januar 2010 der gesamte nach EEG (Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien – Erneuerbare-Energien-Gesetz) vergütete Strom gehandelt.

3. Hintergrund



Agora Energiewende; Stand: 17.12.2014, 08:45

Abbildung 10: Jahreslastgänge der elektrischen Energieversorgung in Deutschland 2013 [21]



Agora Energiewende; Stand: 17.12.2014, 09:30

Abbildung 11: Monatslastgang der elektrischen Energieversorgung in Deutschland im März 2013 [21]

Auf Basis der an der EEX gehandelten elektrischen Energiemengen erstellt „Agora Energiewende“ (www.agora-energiewende.de) Stromerzeugungs- und Verbrauchskurven für Deutschland. Die Abbildung 10 zeigt den Stromlastgang im Jahr 2013. In der Abbildung 11 ist daraus der Monat März vergrößert dargestellt. (Detailausschnitte für eine Woche sowie einen Tag siehe Anhang B) [21].

Die in den Abbildungen 10 und 11 dargestellten Stromlastkurven enthalten keine Angaben über den Eigenverbrauch von Strom am Ort der Erzeugung wie zum Beispiel an Industriekraftwerken oder PV-Anlagen auf Privathäusern. Ebenso fehlen die elektrischen Energiemengen aus erneuerbaren Energien, die nicht dem EEG unterliegen. Der BDEW gibt für 2011 in [22] (neuere Zahlen liegen nicht vor) an, dass weniger als 15 % der regenerativ erzeugten elektrischen Energie nicht dem EEG unterliegen. Damit sind die oben vorgestellten Lastprofile als repräsentativ anzusehen.

Gut zu sehen ist in den Abbildungen, dass die maximalen Solarerträge immer zu den Zeiten mit den höchsten elektrischen Lasten auftreten. Die Windkraftanlagen stellen hingegen völlig unregelmäßig Energie zur Verfügung. Biomasse- und Laufwasserkraftwerke erzeugen Grundlaststrom und liefern ganzjährig annähernd gleichmäßig elektrischen Strom.

Gegenüber der Stromversorgung ist die Datenbasis im Bereich der Wärmeversorgung klein. Neben den vielen Einzelfeuerstätten, Wärmepumpen und Solaranlagen bestehen noch zahlreiche Wärmenetze. Diese Wärmenetze sind teilweise regional miteinander vernetzt. Ein europäisches Verbundnetz für Wärme existiert jedoch nicht, da Wärme auf Grund der hohen Netzverluste nicht über große Distanzen transportiert werden kann. Diese Dezentralität ohne übergreifende Vernetzung der Wärmequellen lässt derzeit keine Angaben von, für ein Bundesland oder gar ganz Deutschland, repräsentativen Lastkurven zu.

Teile der regionalen elektrischen Last- sowie Erzeugungsleistungsschwankungen können durch das europäische Verbundnetz, einer Verknüpfung elektrischer Teilnetze von Niederspannungs- bis auf Höchstspannungsebene, ausgeglichen werden. Daneben werden Lastschwankungen verbreitet im Stromnetz, vereinzelt aber auch in Wärmenetzen, durch gezielte An- und Abschaltung von Großkunden ausgeglichen. Im Wärmebereich haben sich für kurzzeitige Schwankungen im Tagesverlauf sowie über wenige Tage thermische Speicher verschiedenster Ausführungen etabliert. Erste Langzeitspeicher existieren ebenfalls (vgl. Clausen [17], Seite 26 ff.). Elektrische Energie wird derzeit (2015) in Pumpspeicherkraftwerken in größeren Mengen für den Ausgleich tageszeitlicher Schwankungen gespeichert. An neuen elektrischen Speichersystemen wie adiabaten Druckluftspeichern wird geforscht [23].

Die unterschiedlichen Akteure der Energiewende verfolgen unterschiedliche Interessen. Während institutionelle Anleger das Ziel eines maximalen kurz- bis mittelfristigen Gewinnes verfolgen und ortsansässige Landwirte mittel- bis langfristig gesicherte Gewinne anstreben, streben Einzelnutzer und Nutzergesellschaften (z.B. Genossenschaften) das Ziel möglichst langfristiger, niedriger Energiepreise an. Zusätzlich haben die verschiedenen politischen Ebenen von den Kommunen über die Bundesländer bis zum Bund unterschiedliche Vorstellungen von der zukünftigen Ausrichtung der Energiesysteme. Unabhängig von den politischen und wirtschaftlichen Interessen ergibt sich hier die Fragestellung, wie die verschiedenen Energieträger aus betrieblicher und gesamtgesellschaftlicher Sicht sinnvoll vernetzt werden können.

3.3. Zielsetzung

Die in dem vorangehenden Abschnitt beschriebenen Phasen „eins“ und „zwei“ der Energiewende sind hinreichend ingenieurwissenschaftlich untersucht. Nun gilt es den Umbruch von Phase „zwei“ zu „drei“ ingenieurwissenschaftlich zu begleiten.

Vor dem Hintergrund einer Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien im Strom- und Wärmebereich soll die Effizienz der Erzeugung und Verteilung möglichst hoch werden. Sowohl im elektrischen als auch im thermischen Bereich wird dazu auf lokale oder regionale Erzeugung und Netze gesetzt. Bei der elektrischen Energieversorgung gilt es dabei den lokal erzeugten Strom aus erneuerbaren Energien möglichst vor Ort unter Meidung von Hoch- und Höchstspannungsnetzen zu nutzen. Im Bereich der Wärmeversorgung gilt es die lokal vorhandenen Energieträger über Wärmenetze einer Nutzung zuzuführen und dabei die Verteilverluste durch optimierte Anordnung der Wärmequellen zu minimieren. Daraus ergibt sich die Fragestellung, ob eine Kombination von elektrisch angetriebenen Großmotorwärmepumpen mit Biogasanlagen zur zentralen Wärmeversorgung im ländlichen Raum energetisch sinnvoll ist. Die elektrische Antriebsenergie der Wärmepumpen soll zur Erreichung größt möglicher Autarkie aus lokalen regenerativen Quellen bezogen werden.

In dieser Arbeit soll die Verknüpfung von Wärme- und Stromversorgung aus Sicht der netzgebundenen Wärmeversorgung in ländlichen Siedlungen in Niedersachsen beleuchtet werden. Da hinsichtlich der Wärmebedarfs- und Lastgangermittlung im ländlichen Raum kaum ingenieurwissenschaftlich abgesicherte Erkenntnisse vorliegen, sind grundlegende Analysen der Wärmeabnehmer- und Ortsstrukturen der ländlichen Siedlungen in Niedersachsen voranzustellen. Hier ist vertiefend der Frage nach einer Typisierung der Wärmeabnehmer sowie der eingesetzten Wärmenutzungssysteme nachzugehen. Einen Schwerpunkt bildet eine gesamtenergetische Betrachtung von Biogasanlagen unter Berücksichtigung des stündlichen Eigenwärmebedarfs.

Als Hauptwärmequelle für die zentralen Wärmeversorgungssysteme in ländlichen niedersächsischen Kommunen sollen Biogasanlagen in der Grundlast eingesetzt werden. Die temporäre Unterdeckung des Wärmebedarfs soll durch Wasser-Sole-Wärmepumpen beziehungsweise einer Kombination aus Heizstab und Wärmepumpe ausgeglichen werden. Dabei ist zu klären, inwieweit lokal erzeugter Strom aus Photovoltaik- oder Windkraftanlagen den Endenergiebedarf von Wärmepumpe und Heizstab im Zeitgang decken kann. Wärmespeicher sind netzseitig nicht vorzusehen. Sie sollen ausschließlich in Form von Trinkwarmwasserspeichern mit Speicherladesystemen in den Kundenanlagen berücksichtigt werden. Zum Vergleich der unterschiedlichen Ansätze hinsichtlich Wärmeerzeugungssystemen und deren Standorte innerhalb von Wärmenetzen sind Kennzahlen (Netzauslastung, Wärmeverluste, Ausnutzung vorhandener erneuerbarer Energieträger) zu erarbeiten. Die Auswirkungen der Standort- und Wärmeerzeugervariation sind an Beispielwärmenetzen zu demonstrieren.

Im Hinblick auf die quantitative Belegung der anstehenden energietechnischen Aufgaben gliedert sich die vorliegende Arbeit in vier Hauptabschnitte:

1. Typisierung der Wärmeverbraucherstruktur
2. Ermittlung der Wärmeauskopplungspotenziale von Biogasanlagen
3. Bestimmung der Wärmeverluste in ländlichen Wärmenetzen
4. Energetische Gesamtbetrachtung der zentralen Wärmeversorgung in ländlichen Kommunen

4. Wärmeabnehmer

4. **Wärmeabnehmer**

4.1. Einführung Wärmeabnehmer

Die an ein Wärmenetz angeschlossenen Gebäude können sowohl gemäß ihrer Baustruktur als auch nach ihrer Nutzung typisiert werden. In Abhängigkeit der Heißwassertemperatur im Vorlauf des Wärmenetzes kann Wärme für unterschiedliche Anwendungen eingesetzt werden. Hier einige Beispiele:

- Beheizung von Wohnräumen, landwirtschaftlichen Gebäuden, Gewerbe- und Industriebauten sowie öffentlichen Gebäuden
- Beheizung von Prozessen (z.B. Kälteerzeugung, Destillation)
- Trink- und Brauchwarmwasserbereitung
- Trocknung (z.B. Getreidetrocknung, Lacktrocknung)

Die vorhandenen Modelle zur Ermittlung von Wärmebedarfen und Lastkurven wie zum Beispiel von Ueli Roth [24] oder Markus Blesl [25] basieren darauf, dass die Siedlungen in größere Teilbereiche mit in sich homogener Bau- und Nutzungsstruktur aufgeteilt werden können. Für die Wärmebedarfe und Lastgänge der einzelnen Gebäude wird auf Tabellenwerte zurückgegriffen. Individuelle Unterschiede durch die Gebäudenutzung werden durch die Anzahl der in jedem Teilbereich betrachteten Gebäude und die daraus resultierenden Gleichzeitigkeitsfaktoren nivelliert. Die einzelnen Teilbereiche werden nach diesen Modellen schließlich zusammengefügt. Dass diese Modelle für viele ländliche Siedlungen in Niedersachsen nicht anwendbar sind, zeigt schon ein erster Blick in Abbildung 12.

In Abbildung 12 ist für sechs kleine Beispielwärmenetze die unterschiedliche Struktur der Wärmeabnehmer nach Nutzungsklassen aufgetragen. Die Klassen der Wärmeabnehmer werden wie folgt definiert:

- **Wohnen:** Überwiegende Wohnnutzung (z.B. Reine Wohngebäude, Wohngebäude mit individuellem Büroraum innerhalb einer Wohnung)
- **Landwirtschaft:** Landwirtschaftliche Betriebe mit Wohn- und Betriebsgebäuden wie Stallungen und Fahrzeugwerkstätten
- **Öffentliche Einrichtungen:** Alle öffentlichen Einrichtungen wie Schulen, Krankenhäuser, Schwimmbäder, öffentliche Verwaltungsgebäude, Bauhöfe
- **Gewerbe, Handel Dienstleistungen (GHD):** Alle Gebäude mit überwiegend Gewerbe-, Handels- und Dienstleistungsnutzung (z.B. Handwerksbetriebe, Einzelhandelsbetriebe, Bürogebäude)

Für die jeweiligen Klassen sind die jeweiligen Anteile an der Wärmeabnehmeranzahl (N) und dem Jahreswärmebedarf (Q) angegeben. Die Wärmenetze sind nach der Anzahl der Wärmeabnehmer aufsteigend sortiert (Lautzen: Stadt, 12 Wärmeabnehmer; Hannover: Stadt, 16 Wärmeabnehmer; Heitlingen: Ländliche Siedlung, 24 Wärmeabnehmer; Wunstorf: Stadt, 29 Wärmeabnehmer; Kolenfeld: Ländliche Siedlung, 46 Wärmeabnehmer; Steyerberg: Ländliche Siedlung, 280 Wärmeabnehmer)

4. Wärmeabnehmer

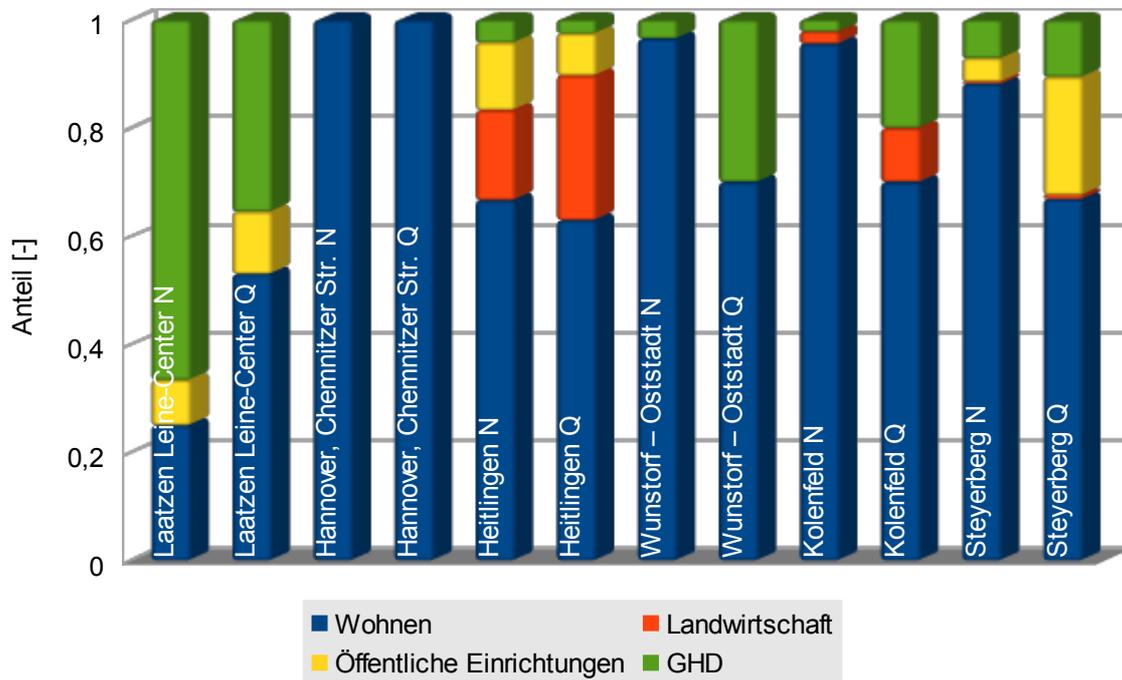


Abbildung 12: Vergleich der Wärmeabnehmerstruktur von Wärmenetzen

Die Struktur der Wärmeabnehmer in den Beispielnetzen deckt sich mit der von Seedorf et. al. in [12] dargestellten Gebäudenutzung in Niedersachsens ländlichen Siedlungen. Außerhalb von Wohnen, Handwerk, Gastronomie, Tourismus sowie Land- und Forstwirtschaft beschränkt sich diese weitestgehend auf die Grundzentren. Hier kommen noch Einrichtungen der öffentlichen Daseinsvorsorge und Grundversorgung wie Kirchen, Feuerwehr, Schule und Kindergarten, sowie Sparkassen und/oder Banken, Industrie und verarbeitendes Gewerbe hinzu.

Die oben angeführten Klassen sind für die Planung von Wärmenetzen sehr ungenau. Daher gibt es verschiedene feinere Klassifizierungssysteme, die je nach vorhandener Datenlage genutzt werden können.

4.2. Typologie der Wärmeabnehmer

In Wohngebäuden der Dörfer wird Wärme überwiegend für Raumwärme und Trinkwarmwasserbereitung genutzt. Die über Wärmenetze bereitstellbare Wärme wird in den Nichtwohngebäuden wie in Wohngebäuden zur Bereitstellung von Trinkwarmwasser und Gebäudebeheizung genutzt. Daneben gibt es verbreitet auch die Wärmebereitstellung für Trocknungen (z.B. für Gärreste, Holz, Getreide, Lacke) und Brauchwasseranwendungen (z.B. für Fahrzeugwaschanlagen). Theoretisch wäre auch die Klimatisierungs- und Prozesskältebereitstellung für Wohn- und Nichtwohngebäude mittels Ab- oder Adsorptionskältemaschinen aus Fernwärme denkbar, was in der Praxis aber nicht verbreitet ist. Hier kommen elektrisch angetriebene Kompressionskältemaschinen zum Einsatz.

Für Wohngebäude hat das Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) seit 1989 eine deutsche Gebäudetypologie mit Angaben zu typischen Bauteilaufbauten, Flächen und Bewohnern entwickelt [26]. Zusätzlich wurden durch verschiedene Ingenieurbüros und Forschungseinrichtungen für einzelne Regionen wie dem Landkreis Nienburg oder den Städten Hannover und Langenhagen [27] erweiterte Gebäudetypologien unter Berücksichtigung der lokalen Baustrukturen entwickelt. Die Daten der verschiedenen Studien sind für städtisch geprägte Bebauung in die europäische Gebäudetypologie-Datenbank Tabula eingeflossen [28].

Tabelle 1: Überblick über die Gebäudetypen verschiedener Gebäudetypologien auf Basis von [26][27][28]

Gebäudetypen		Deutschland	Tabula	Hannover
Einfamilienhaus		EFH	SFH...Gen	E
	Kaffeemühlenhaus			E...-K
Reihenhaus		RH	TH...Gen	R
	Flachdachgebäude			R...-F
Mehrfamilienhaus	Westdeutschland	MFH	MFH...Gen	M
	Flachdachgebäude			M...-F
	Ostdeutschland		East.MFH...Gen	-
Großes Mehrfamilienhaus	Westdeutschland	GMH	AB...Gen	-
	Ostdeutschland		East.AB...Gen	-
Hochhaus	Westdeutschland	HH	AB...HR	H
	Ostdeutschland		East.AB...HR	-
Fertighaus		F	-	-

Neben den Klassifizierungen hinsichtlich Größe und Kubatur enthalten die Typologien auch Klassifizierungen hinsichtlich Bauart und Alter (siehe Tabelle 2). Zu jedem Typgebäude enthalten die Typologien Basisdaten zum Aufbau der Gebäude und teilweise auch Daten zu typischen sowie möglichen energetischen Sanierungsmaßnahmen. Mit diesen Daten kann für vergleichbare Gebäude unter Kenntnis der Flächen der einzelnen Gebäude eine Grobabschätzung der zu erwartenden maximalen Lasten und Jahreswärmebedarfe erfolgen.

4. Wärmeabnehmer

Tabelle 2: Klassifizierung von Gebäuden nach Baualter und Bauart in verschiedenen Gebäudetypologien (gekürzte Darstellung der Charakteristika) aus [26][27][28]

Deutschland – Deutsche Gebäudetypologie				Tabula Deutschland				Hannover			
Baualter-klasse	von	bis	Charakteristikum	Baualter-klasse	von	bis	Charakteristikum	Baualter-klasse	von	bis	Charakteristikum
A		1918	Fachwerk	1		1859	Vorindustrielle Zeit, Fachwerk				
B		1918	Massivmauerwerk	2	1860	1918	Gründerzeit, Massivmauerwerk	18		1918	Gründerzeit, Massivmauerwerk, teilweise Holzbalkendecken
C	1919	1948		3	1919	1948	Mauerwerk, teilweise Holzbalkendecken	48	1919	1948	Mauerwerk, teilweise Holzbalkendecken
D	1949	1957		4	1949	1957	Nachkriegsbauwerke, Mauerwerk, teilweise Holzbalkendecken, ab 1952 normative Wärmeschutzvorgaben	57	1949	1957	Nachkriegsbauwerke, Mauerwerk, teilweise Holzbalkendecken, teilweise Innendämmung
E	1958	1968		5	1958	1968	Industrialisierung des Hochbaus, Mauerwerk oder Beton, Betondecken, Normative Wärmeschutzvorgaben	68	1958	1968	Mauerwerk, teilweise Holzbalkendecken, teilweise Innendämmung
F	1969	1978		6	1969	1978	Verbreitung industrielle Bauweise, verbesserter Wärmeschutz nach Ölkrise	77	1969	1977	Mauerwerk, Betondecke, ungedämmt
G	1979	1983		7	1979	1983	Verbesserter Wärmeschutz, 1. Wärmeschutzverordnung	83	1978	1983	Mauerwerk aus Porenbeton oder Lochstein mit Fassadendämmung
H	1984	1994		8	1984	1994	Verbesserter Wärmeschutz Markteinführung Niedrigenergiehäuser	84	1984	1994	Mauerwerk aus Porenbeton oder Lochstein mit Fassadendämmung
I	1995	2001		9	1995	2001	Verbesserter Wärmeschutz, Verbreitung Niedrigenergiehäuser				
J	2002			10	2002	2009	Verbesserung Wärmeschutz, Einführung EnEV, Verbreitung Passivhausbau				
				11	2010		Mindeststandard Niedrigenergiehaus				
NBL_D	1946	1960	industrieller Wohnungsbau								
NBL_E	1961	1969	industrieller Wohnungsbau								
NBL_F	1970	1980	industrieller Wohnungsbau								
NBL_G	1981	1985	industrieller Wohnungsbau								
NBL_H	1986	1990	industrieller Wohnungsbau								

Viele historische Bauten aus Niedersachsen können in die Deutsche Gebäudetypologie, Tabula oder die hannoverschen Gebäudetypologie eingeordnet werden. Auf Grund der deutlichen Abweichungen hinsichtlich Größe, Bauform und Bauart können die Gutshäuser und Adelssitze sowie die Hallenhäuser jedoch keinem der Typgebäude aus den Gebäudetypologien zugeordnet werden. Bei den Hallenhäusern verhindern hier insbesondere die sehr hohen Decken in der Diele (vielfach über 4 m Deckenhöhe) eine Zuordnung. In den Gutshäusern und Adelssitzen sind ebenfalls die hohen Decken die auffälligste Abweichung zu den Typgebäuden. Große Hallenhäuser sowie Gutshäuser und Adelssitze werden zudem vielfach nicht vollständig beheizt.

Die Typisierung von Nichtwohngebäuden erfolgt aufgrund der Vielfalt an Kombinationen aus Gebäudetyp und Nutzung bisher nur sehr grob (z.B. Typisierung statistisches Bundesamt) oder unvollständig (Typisierungen des BBSR [29][30]). Für das Forschungsprojekt „Nahwärmenetze im Ländlichen Raum“¹ wurde von Freier, Janßen und Kahle eine neue Typologie für Gebäude im ländlichen Raum entworfen, die bisher nicht veröffentlicht wurde (Stand Dezember 2014).

¹ EFRE-Forschungsprojekt „Möglichkeiten und Grenzen von Nahwärmenetzen in ländlich strukturierten Gebieten unter Einbeziehung regenerativer Wärmequellen – Vernetzung von dezentralen Kraft- und Wärmeerzeugungs-Systemen unter Berücksichtigung von Langzeitwärmespeicherung“; Projektleitung Hochschule Hannover Prof. Dr.-Ing. Holger Janßen; 2010 bis 2013

In den folgenden Abschnitten wird eine grobe Typisierung des Gebäudebestandes in ländlichen Kommunen Niedersachsens vorgenommen.

4.2.1. Gebäude mit Wohnnutzung

Der Altbaubestand der ländlichen Siedlungen wird in weiten Teilen Niedersachsens durch unterschiedliche Typen landwirtschaftlich oder ehemals landwirtschaftlich genutzte Gebäude geprägt. Gegenüber städtischer Bebauung sowie der ländlichen Bebauung in den meisten anderen Bundesländern beschränkt sich Zeilen- oder Blockbebauung auf wenige Haufendörfer und Hufensiedlungen sowie Hüttensiedlungen und Fischerdörfer. Stattdessen sind die Gebäude meist freistehend oder einseitig an andere Gebäuden auf dem selben Grundstück angebaut.

Die vorgenannten, prägenden Altbauten bestehen jeweils aus einem (ehemaligen) Stall- und Scheunenteil (Wirtschaftstrakt) sowie einem Wohnteil (Wohntrakt). In Niedersachsen und den angrenzenden Bundesländern Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern sowie im nördlichen Teil Nordrhein-Westfalens und im nordwestlichen Teil Hessens dominieren Varianten von Zwei-, Drei- und Vierständerhäusern (Niederdeutsches Hallenhaus) sowie des Gulfhauses. Bei diesen Gebäuden wird der Wirtschaftstrakt über Dielen in Gebäudelängsrichtung erschlossen. [12]

In Gulfhäusern sind die Dielen asymmetrisch angeordnet, so dass teilweise eine Durchfahrt möglich ist/war. Die Außenwände sind aus Ziegelsteinen gemauert.

*Abbildung 13:
Kleines Gulfhaus
mit Mischung aus
Betonpfannen- und
Reetdach im
Landkreis Aurich*



Die Hallenhäuser weisen hingegen meist eine entlang der Firstlinie verlaufende Diele mit einem mittig angeordneten Tor auf. Alle Wände sind in Fachwerk mit Ausmauerung oder Lehm Schlag ausgeführt. Teilweise sind vor die Fachwerkwände Mauerwerksschalen gesetzt.

4. Wärmeabnehmer



Abbildung 14: Kleines Hallenhaus (Vierständlerhaus) mit zum Wohnbereich ausgebautem Wirtschaftstrakt im Wendland



Abbildung 15: Hallenhaus im Wendland - Wohntrakt

Im Bereich der Lößböden kommen zahlreiche „Rübenburgen“ aus dem 19. und beginnenden 20. Jh. hinzu. In den weiteren Bereichen Niedersachsens wurden bis Ende des 2. Weltkrieges ebenfalls größere an städtische Bauweisen angelehnte reine Wohnhäuser mit äußerem Sichtmauerwerk oder in verputzter Bauweise errichtet. [12] Zusätzlich sind in den ländlichen Siedlungen Niedersachsens zahlreiche Gutshöfe und Adelssitze mit den zugehörigen Arbeiterhäusern vorhanden. Diese sind jeweils der Mode zum Zeitpunkt der Errichtung oder Umgestaltung entsprechend gestaltet.



Abbildung 16: Gutshaus in der Region Hannover



Abbildung 17: „Rübenburg“ im Wendland

Die Altbaubestände landwirtschaftlicher Gehöfte in Südniedersachsens Dörfern werden vom mitteldeutschen oder fränkischen Haus dominiert. Die Höfe sind hier meist als Streckhöfe in Form von Zwei- und Mehrseitenhöfen ausgebildet. Diese sind Fachwerkbauten mit teilweiser Schiefer- oder Holzverkleidung. [31]

Neben den aktuell oder ursprünglich zu landwirtschaftlichen Betrieben gehörenden Wohngebäuden, sind im Bereich südlich des Mittellandkanals und insbesondere im Harz zahlreiche historische Wohnhäuser für Berg- und Industriearbeiter aus der Zeit vor 1918 erhalten. Im Harz sind diese Gebäude häufig aus Holz oder als Fachwerkbauten mit Holz- oder Schieferverkleidung errichtet.



Abbildung 18: Streckhof im Landkreis Osterode



Abbildung 19: Großes Hüttensiedlungshaus im Harz

An der Nordseeküste, entlang von Weser und Ems sowie an den größeren Binnenseen sind zudem zahlreiche Siedlungen mit ehemaligen Fischer-, Handwerker- und Händlerhäusern vorhanden.

*Abbildung 20:
Ehemalige Fischer-
und Händlerhäuser
im Kreis Aurich*



4. Wärmeabnehmer

Nach dem 2. Weltkrieg wurden Neubausiedlungen mit Gebäuden für Nebenerwerbslandwirte und Landarbeiter errichtet. [12] Später kamen überwiegend Einfamilien- und kleine Mehrfamilienhäuser hinzu. Teilweise sind in diesen Wohngebäuden Arztpraxen und Büros integriert.



Abbildung 21: Siedlungshaus aus den 1950er Jahren mit Anbau aus den 1970er Jahren im Landkreis Schaumburg

(Foto: Archiv Sebastian Kahle)



Abbildung 22: Reihenhhaus aus den 1970er Jahren im Landkreis Osterholz-Scharmbeck

*Abbildung 23:
Einfamilien- und
Mehrfamilienhaus
aus den 1990er
Jahren in der
Region Hannover
[32]*



4.2.2. Gebäude ohne Wohnnutzung

Gebäude ohne Wohnnutzung werden in den Dörfern Niedersachsens zu großen Teilen für eine landwirtschaftliche Nutzung als Stallungen oder Scheunen errichtet. Hinzu kommen verschiedenste Gebäude für Handwerksbetriebe und Gastronomie sowie in größeren Orten mit Funktionen eines Grundzentrums auch Banken beziehungsweise Sparkassen sowie Einzel- und Landhandel. Daneben sind häufig noch öffentliche Gebäude wie Feuerwehren, Gemeinde- und Dorfgemeinschaftshäuser sowie Kindergärten, Grundschulen, Kirchen und Friedhofskapellen vorhanden. Weiterführende Schulen sind aufgrund der rechtlichen Rahmenbedingungen nur noch selten in niedersächsischen Orten mit weniger als 2.000 Einwohnern zu finden. Die folgenden Bilder zeigen Beispiele für unterschiedlichste Nichtwohngebäude in niedersächsischen Dörfern. [12][33]



Abbildung 24: Grundschule aus den 1950er Jahren mit Anbauten aus den 1960er bis 2000er Jahren im Landkreis Schaumburg



Abbildung 25: Feuerwehr und Dorfgemeinschaftshaus im Landkreis Aurich



Abbildung 26: Landhandel mit Getreidetrocknung im Landkreis Schaumburg



Abbildung 27: Hähnchenmaststall im Landkreis Oldenburg mit Baujahr nach 2000

4. Wärmeabnehmer

4.3. Wärmenutzung und Übergabe

4.3.1. Wärmeübergabestationen

Wärmeübergabestationen stellen die Verbindung zwischen Fernwärmenetz und Kundenanlage her. In Verbindung mit der installierten Regelung weisen sie spezifische Übertragungsverhalten zwischen primärer und sekundärer Seite auf. So beeinflussen der Aufbau der einzelnen Übergabestationen sowie die Einbindung der Trinkwarmwasserbereitung maßgeblich die Rücklauftemperatur sowie die primärseitige Last.

Die Übergabestationen können grob in zwei bis drei Teile gegliedert werden. In Abbildung 28 ist eine Übergabestation für die Bereitstellung von Trinkwarmwasser und Raumheizwärme skizziert. Abgewandelte Stationen wären auch für die Bereitstellung von Prozesswärme nutzbar.

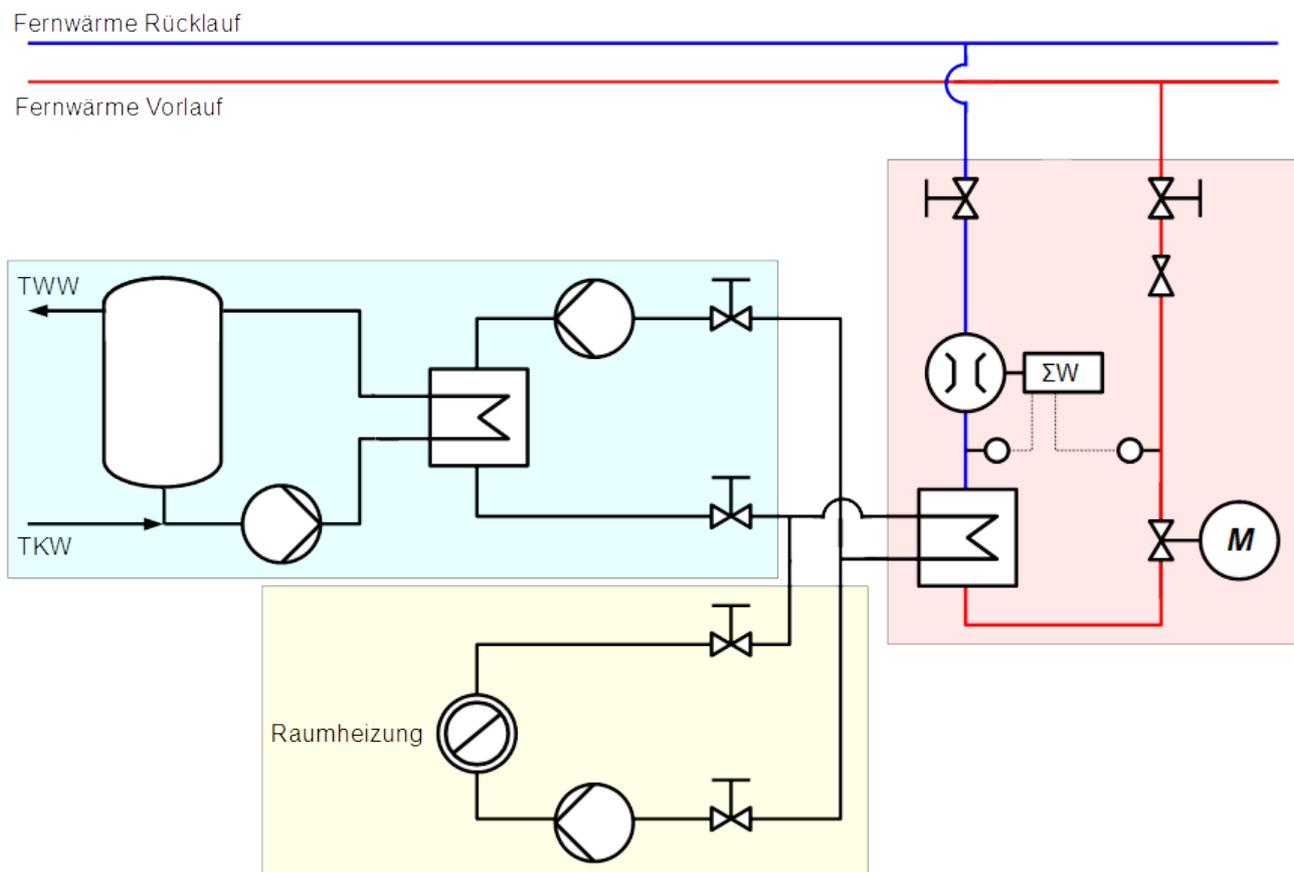


Abbildung 28: Gliederung von Fernwärmeübergabestationen

In der Abbildung 28 zeigt der rechte Bereich die Trennung zwischen der Verantwortung des Netzbetreibers (primäre Seite) und des Kunden (sekundäre Seite). Hier befindet sich der Wärmemengenzähler und bei indirekten Stationen die hydraulische Trennung (Wärmeübertrager). [34]

Der linke, obere Kasten grenzt die Trinkwarmwasser- oder Brauchwarmwasserbereitung ab. Diese ist in Deutschland immer über Wärmeübertrager von der Fernwärme getrennt. Im dargestellten Fall ist sie als Speicherladesystem skizziert. Dieses lässt minimale Rücklaufemperaturen oberhalb von 30 °C erwarten, da die Trinkwarmwasserbereitung hier über einen Wärmeübertrager auf der Sekundärseite in Verbindung mit einem Wärmespeicher erfolgt. Durch Einsatz von primärseitig angeschlossenen Frischwasserstationen und passenden Regelungen kann die Netzurücklaufemperatur im Sommer auf unter 30 °C reduziert werden. [35]

Der unterste Kasten umfasst die Raumwärmebereitstellung. Bei direkt angeschlossenen Kundenanlagen werden die Heizkörper ohne hydraulische Trennung vom Fernwärmenetz direkt mit Fernwärmewasser durchströmt.

In Anhang A sind weitere Möglichkeiten der Systemtrennung zwischen Fernwärmenetz und Kundenanlage schematisch dargestellt. Die Aufstellung ist dabei nicht abschließend.

4.3.2. Wärmenutzung

Neben dem Übertragungsverhalten der Übergabestationen wird die Rücklaufemperatur im Kundenanschluss maßgeblich durch die installierten Wärmenutzungssysteme beeinflusst. Bei der Vorstellung der Nutzertypologie wurde schon auf die Hauptanwendungen von Fernwärme im dörflichen Bereich eingegangen. Für die Anwendungen gibt es jeweils typische Systeme.

Tabelle 3: Übersicht über typische Heizsysteme

Trink-/Brauchwarmwasserbereitung	Raumwärmebereitstellung
Wärmespeicher mit innenliegendem Wärmeübertrager	Radiatoren (z.B. Gussheizkörper)
Speicherladesystem	Konvektoren
Frischwasserstation	Rohrheizkörper (z.B. Handtuchhalterheizung)
	Plattenheizkörper
	Flächenheizung (z.B. Wandheizungen, Fußbodenheizungen, Betonkernaktivierungen)
	Strahlungsheizungen (z.B. Deckenstrahlungsplatten)
	Luftheizungen

Die Vorlauftemperaturen im Fernwärmenetz an den Übergabestationen ändern sich im Jahresverlauf durch Variation der Einspeisetemperaturen sowie mit der sich in Abhängigkeit der Wärmelast ändernden Auskühlung im Netz (siehe Kapitel 6). Bei den Heizsystemen zur Raumwärmebereitstellung besteht ein enger Zusammenhang zwischen Vorlauf-temperatur, Heizleistung und Rücklaufemperatur. Daher ist hier ein tiefer gehender Blick erforderlich.

4.3.2.1. Statische Heizungen

Die meisten Wohngebäude sowie Teile der Nichtwohngebäude werden über statische Heizungen mit Raumwärme versorgt. Dabei geben statische Heizungen die Wärme über freie Konvektion und Strahlung an die Raumluft ab. In Altbauten sind die Heizungssysteme bei Raumheizkörpern vielfach auf 90/70 °C (sprich 90 °C Vorlauftemperatur und 70 °C Rücklauftemperatur) oder 70/55 °C sowie bei Fußbodenheizungen auf 45/35 °C ausgelegt. Für den Auslegungszustand werden im Rahmen dieser Arbeit 90/70 °C für Raumheizkörper und 45/35 °C für Fußbodenheizungen angesetzt.

Die Rücklauftemperaturen in Fernwärmenetzen sollen möglichst niedrig liegen. Eine Möglichkeit bietet hier die Rücklauf Temperaturbegrenzung. In Verbindung mit einer gegenüber dem Auslegungszustand der statischen Heizung reduzierten Vorlauftemperatur ändert sich hierdurch die maximale Heizleistung wie in Abbildung 14 dargestellt (Berechnungsverfahren siehe Anhang A).

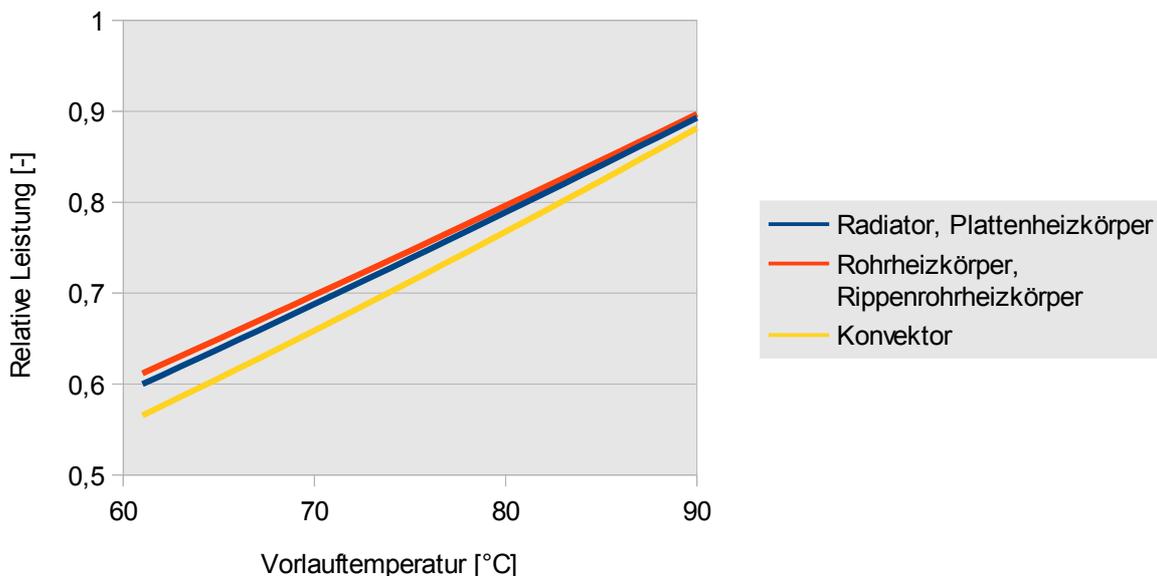


Abbildung 29: Zusammenhang zwischen der Vorlauftemperatur und der maximalen Heizflächenleistung bei konstanter Rücklauftemperatur von 60 °C

Parallel ändert sich mit den Temperaturen der Heizmittelmassenstrom. Am Beispiel von Radiator und Fußbodenheizung ist in Abbildung 15 der Zusammenhang zwischen Massenstrom und Vorlauftemperatur bei konstanten Rücklauftemperaturen von 60 °C und 70 °C beim Radiator sowie 25 °C und 35 °C bei der Fußbodenheizung aufgetragen.

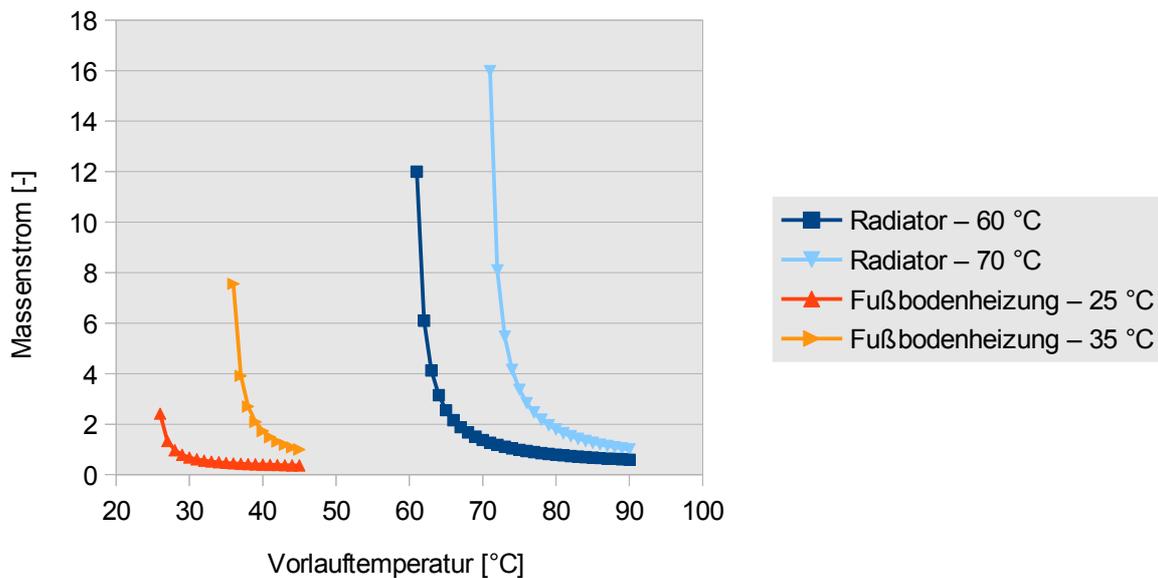


Abbildung 30: Auf den Auslegungszustand normierter Massenstrom über der Vorlauftemperatur für Radiator und Fußbodenheizung bei jeweils zwei konstanten Rücklauftemperaturen

Gut zu erkennen ist der degressive Zusammenhang zwischen steigender Vorlauftemperatur und sinkendem Massenstrom in den Heizflächen. Der in den vorangehenden Abbildungen dargestellte Zusammenhang werden in der Praxis nur bei Einsatz von Rücklauftemperaturbegrenzern relevant. Andernfalls wird der Massenstrom durch die hydraulische Auslegung des Heizungssystems begrenzt, sodass hier eine stärkere Begrenzung der Heizleistung bei abgesenkten Vorlauftemperaturen im Fernwärmenetz zu erwarten ist.

Wie unter anderem von Wolff und Jagnow in [36] angegeben wird, ist die installierte Heizleistung in Gebäuden zum Beispiel auf Grund nachträglicher Dämmarbeiten oder architektonischer Gründe für die Wahl der Heizkörper oder Heizflächen vielfach deutlich zu hoch. Zusätzlich werden Heizungssysteme überwiegend im Teillastbereich betrieben. Die vorangehend beschriebene Begrenzung der Heizleistung durch die verfügbare Vorlauftemperatur verliert so an Relevanz. In Abbildung 31 ist der Zusammenhang zwischen Vorlauftemperatur und Rücklauftemperatur unter der Annahme konstanter Leistungen in Höhe von 50% beziehungsweise 70% der Auslegungsleistung dargestellt.

4. Wärmeabnehmer

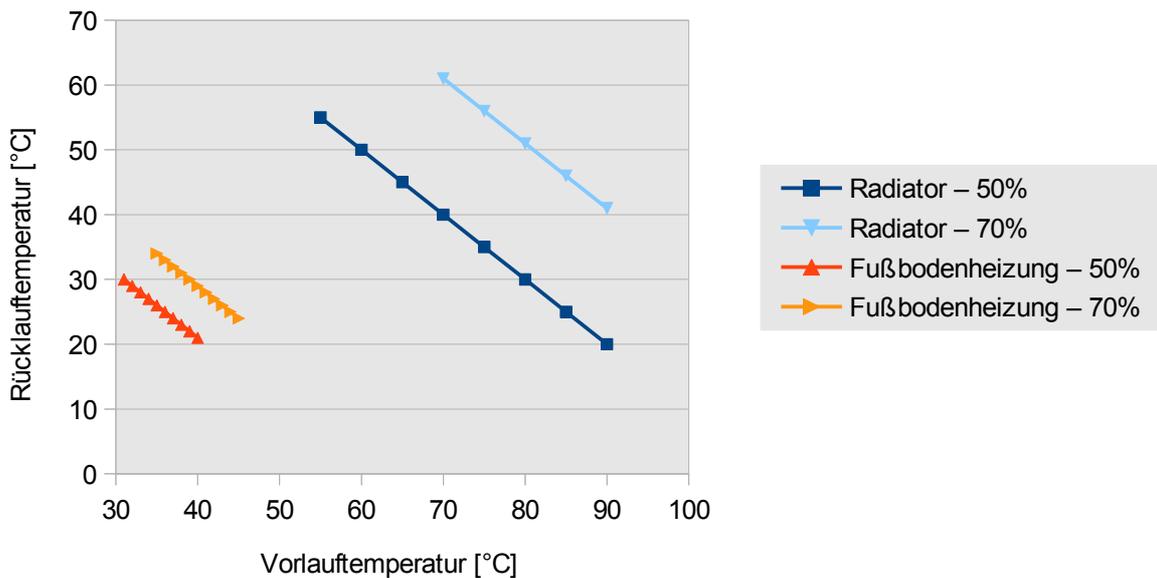


Abbildung 31: Rücklauftemperaturen in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur am Beispiel eines Radiators und einer Fußbodenheizung bei verschiedenen Leistungen

Aus den oben dargestellten Zusammenhängen ergibt sich, dass das Ziel einer möglichst niedrigen Rücklauftemperatur im Wärmenetz nur erreicht werden kann, wenn bei angeschlossenen Wärmeabnehmern mit statischen Heizflächen die Vorlauftemperaturen hoch gehalten werden.

4.3.2.2. Luftheizungen

Nichtwohngebäude mit großen Deckenhöhen wie Landmaschinenwerkstätten, Sporthallen oder Handwerksbetriebe werden vielfach mit dezentralen Luftheizsystemen beheizt. Ebenso werden vollklimatisierte Gebäude sowie Neubauten im Passivhausstandard über dezentrale oder zentrale Luftheizsysteme beheizt. Zentrale- und dezentrale Luftheizsysteme werden je nach örtlichen Anforderungen mit Heizregistern für einen Umluft-, Mischluft- oder Außenluftbetrieb ausgerüstet.

Neben der Bereitstellung von warmer Luft für die Beheizung von Räumen werden Luftheizregister auch in Trocknungsanlagen eingesetzt. Im ländlichen Bereich sind dies beispielsweise Trocknungsanlagen für Getreide, Holz oder Gärreste.

Die Luftheizregister können unterschiedlich betrieben werden. Es werden Systeme mit konstantem oder variablem Luftvolumenstrom sowie fester oder variabler Heizwassertemperaturspreizung eingesetzt. In Abbildung 32 ist beispielhaft der Zusammenhang zwischen Leistung und Rücklauftemperatur bei einem Luftheizer mit einem festen Luftvolumenstrom von $7.500 \text{ m}^3/\text{h}$ und einer variablen Lufttemperaturspreizung bei einer festen Heizwassertemperaturspreizung von 20 K dargestellt (Annahmen und Gleichungen siehe Anhang A).

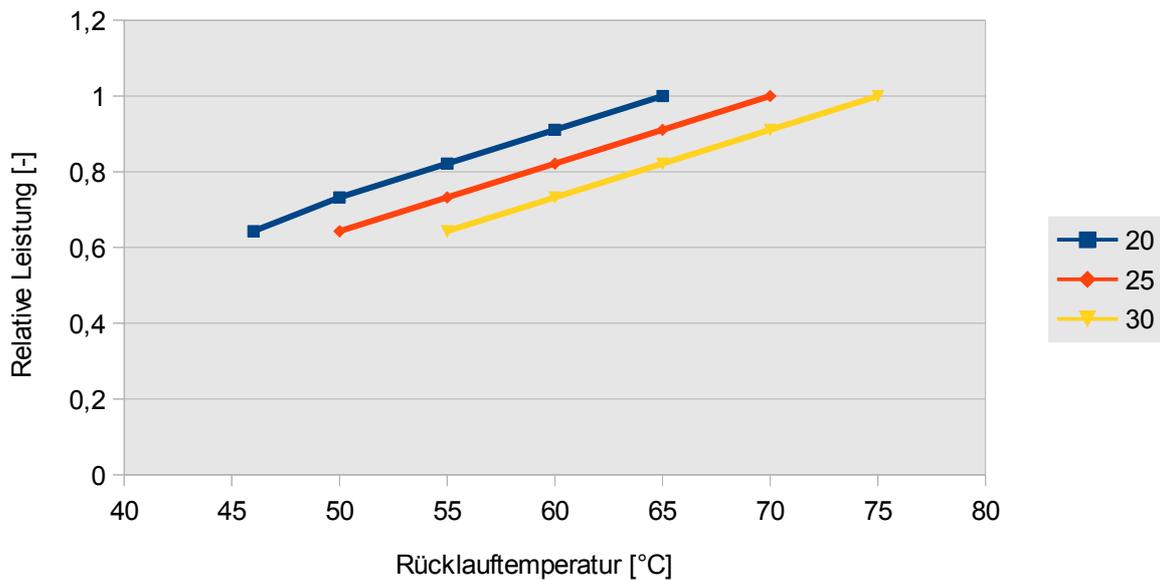


Abbildung 32: Leistung über der Rücklauftemperatur bei konstantem Luftvolumenstrom und fester Heizwassertemperaturspreizung in Abhängigkeit der mittleren Lufttemperatur

Ist die Spreizung variabel, ergibt sich ein deutlich abweichender Zusammenhang zwischen Rücklauftemperatur und Heizregisterleistung wie in Abbildung 33 dargestellt. Die Vorlauftemperatur ist dazu auf 90 °C festgelegt.

Wird der Luftvolumenstrom bei konstanter Luft- und Heizwassertemperaturspreizung variiert, so ergibt sich ein dritter Zusammenhang, der in Abbildung 34 gezeigt wird. Die Lufttemperaturspreizung wurde dafür auf 2 K und die Heizwassertemperaturspreizung auf 20 K festgelegt.

4. Wärmeabnehmer

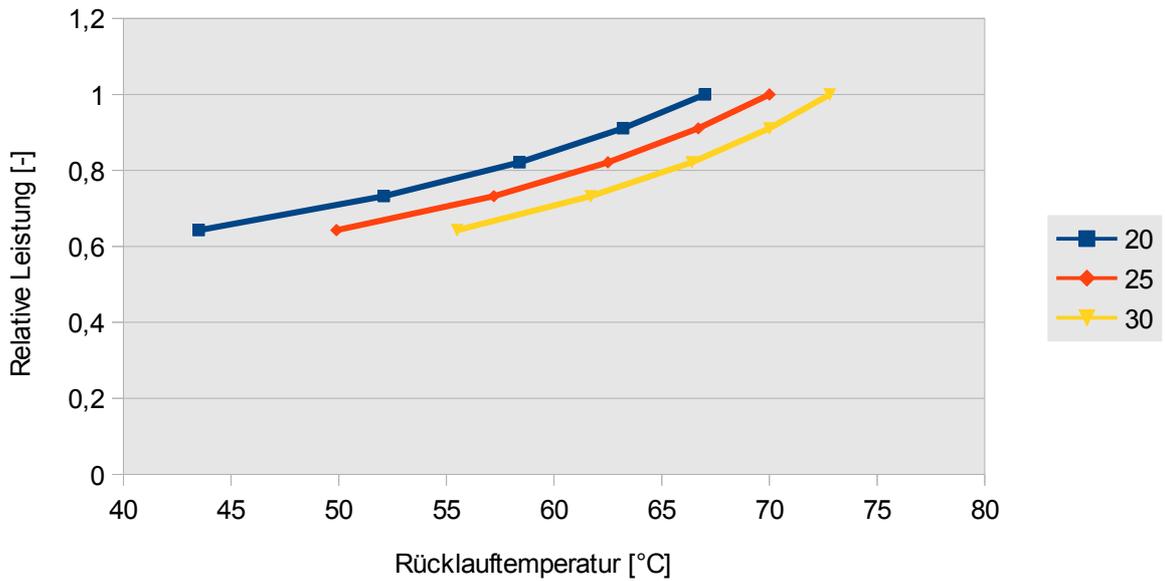


Abbildung 33: Leistung eines Luftheizregisters über der Rücklaufftemperatur bei konstantem Luftvolumenstrom und konstanter Vorlauftemperatur von 90°C in Abhängigkeit der mittleren Lufttemperatur

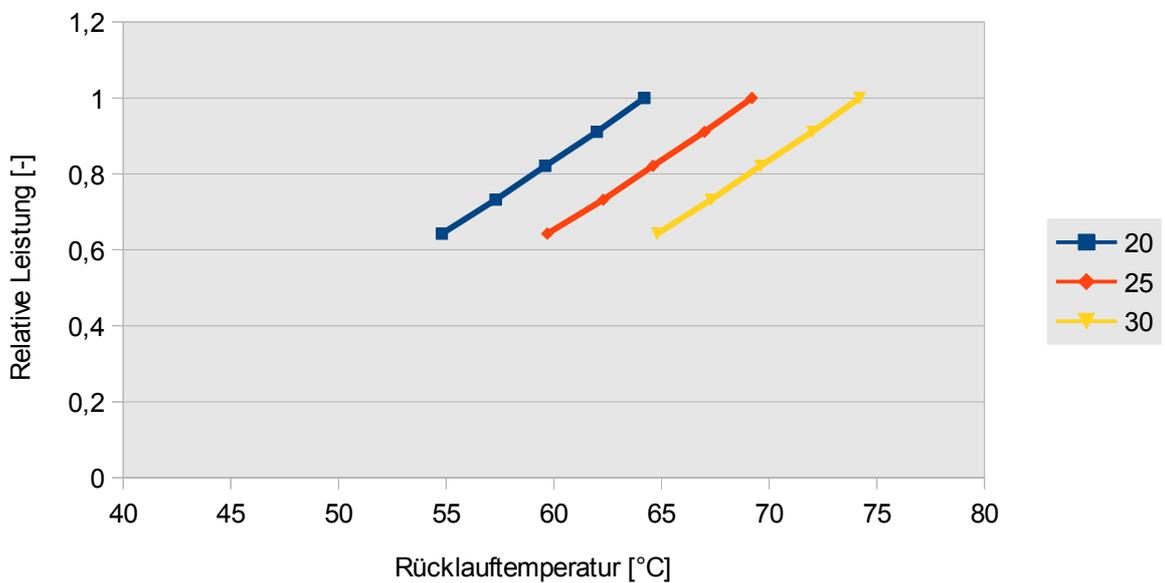


Abbildung 34: Leistung eines Luftheizregisters über der Rücklaufftemperatur bei konstanter Luft- und Heizwassertemperaturspreizung in Abhängigkeit der mittleren Lufttemperatur

In allen Fällen reduziert sich die Rücklaufftemperatur mit der relativen Leistung des Luftheizregisters (bezogen auf die maximale Leistung des Heizregisters). Werden niedrige

Rücklauftemperaturen benötigt, sollte demnach wie bei statischen Heizflächen, eine hohe Vorlauftemperatur vorgehalten werden.

4.3.3. Ermittlung von Jahreslastgängen

Jahreslastgänge oder Jahresdauerlinien dienen der Auslegung von Wärmeerzeugungssystemen und Speichern. Sie zeigen die Wärmelast der einzelnen Gebäude oder eines Wärmenetzes im Jahresverlauf. Grundlage der Jahreslastgänge zur Auslegung von Wärmenetzen bilden die Jahreswärmebedarfe der einzelnen Wärmeabnehmer. Wärmebedarfe sind die rechnerischen Wärmemengen, die sich in einem definierten Bezugsjahr auf Grund der bauphysikalischen Gegebenheiten in Verbindung mit der Standardgebäudenutzung einstellen würden. Wärmeverbräuche sind hingegen gemessenen Wärmemengen.

Für eine vereinfachte Auslegung von Wärmenetzen ist die Kenntnis der Anschlussleistungen und der Gleichzeitigkeitsfaktoren ausreichend.

Nach Winter et. al. [37] werden Gleichzeitigkeitsfaktoren über

$$GLF = \frac{\sum_{i=1}^m \dot{Q}_i(t)}{\sum_m \dot{Q}_{N,i}} \quad (1)$$

für den Zeitpunkt der maximalen Last mit

$$\dot{Q}_i(t) = \dot{Q}_i(t_{max}) \quad (2)$$

definiert. Gleichzeitigkeitsfaktoren müssen dazu für jede einzelne Leistungsklasse separat ermittelt werden, sofern weniger als 75 Wärmeabnehmer im Wärmenetz vorhanden sind. Eine Leistungsklasse umfasst dabei Wärmeabnehmer mit einem Anschlussleistungsunterschied von Faktor 2. Als Näherungsfunktion für Wärmenetze mit überwiegender Wohnnutzung haben Winter et. al.

$$GLF(n) = a + \frac{b}{1 + \left(\frac{n}{c}\right)^d} \quad (3)$$

mit den Parametern

4. Wärmeabnehmer

$a=0,449677646267461$, $b=0,551234688$, $c=53,84382392$, $d=1,762743268$

bestimmt. [37]

In Abbildung 35 ist die von Winter et. al. ermittelte Näherungsfunktion zur Bestimmung von Gleichzeitigkeitsfaktoren grafisch dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass sich der Gleichzeitigkeitsfaktor oberhalb von 150 Wärmeabnehmern kaum verändert und gegen rund 0,47 läuft.

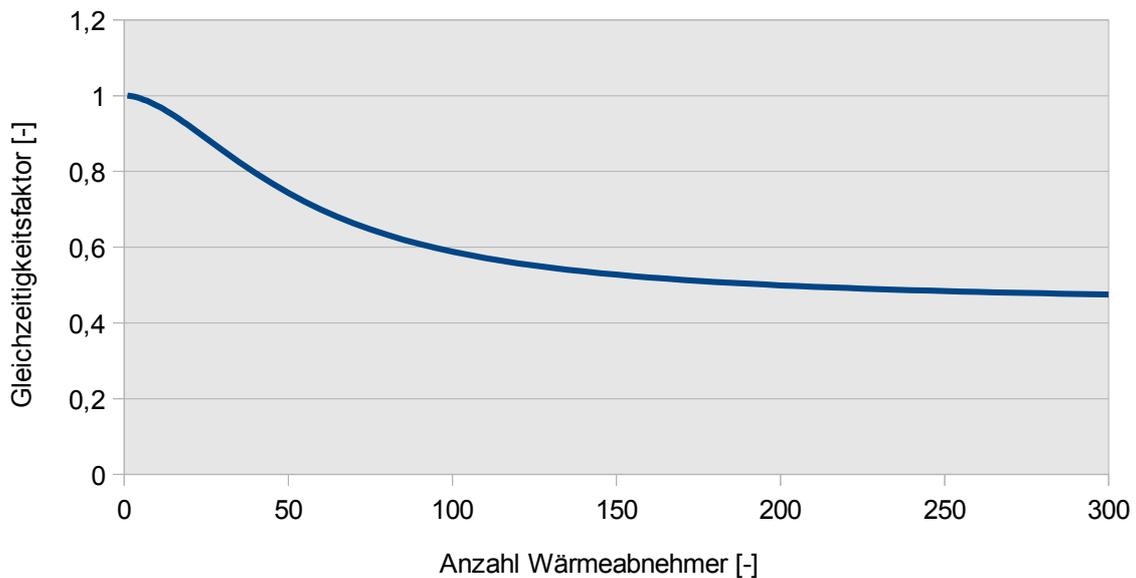


Abbildung 35: Gleichzeitigkeitsfaktor in Abhängigkeit der Anzahl an Wärmeabnehmern

Mit den ermittelten Gleichzeitigkeitsfaktoren folgt für die erforderliche Gesamtleistung im Wärmenetz unter Kenntnis der Anschlussleistung der einzelnen Wärmeabnehmer \dot{Q}_i

$$\dot{Q}_{\text{Netz,max}} = \sum_{i=1}^m GLF_i \cdot \dot{Q}_i \quad (4)$$

Für die optimale Auslegung von Wärmeerzeugungsanlagen und Wärmespeichern ist diese vereinfachte Berechnung der maximalen Leistung nicht ausreichend. Hierzu ist die Kenntnis der Jahresdauerlinie im Wärmenetz erforderlich. Diese setzt sich unter Berücksichtigung von Gleichzeitigkeitsfaktoren aus den Jahreslastgängen der einzelnen anzuschließenden Gebäude sowie der Netzverluste zusammen.

Die Jahreslastgänge der einzelnen Gebäude können auf verschiedenen Wegen bestimmt werden, die jeweils eigene Vor- und Nachteile aufweisen. In Tabelle 4 sind verschiedene grundlegende Verfahren zur Ermittlung der Jahreslastgänge mit Bewertungen aufgelistet.

Tabelle 4: Übersicht über gängige Verfahren zur Ermittlung von Jahreslastgängen für Gebäude

	Messung des Wärmelastgangs	Wärmebedarfsberechnung + VDI 4655	Jahreswärmeverbrauchserfassung + VDI 4655	Wärmebedarfsberechnung + Hellwig	Jahreswärmeverbrauchserfassung + Hellwig	Gebäude-simulation
Vorteile	Gebäude- und nutzerindividuelle Besonderheiten können berücksichtigt werden	Kann auch auf geplante Gebäude angewendet werden	Einfache Datenerhebung; Geringer Rechenaufwand	Kann auch auf geplante Gebäude angewendet werden; Vergleichsweise kleine Sprünge zwischen Tagen	Einfache Datenerhebung; Geringer Rechenaufwand, Vergleichsweise kleine Sprünge zwischen Tagen	Gebäude- und nutzerindividuelle Besonderheiten können berücksichtigt werden
Nachteile	Hoher messtechnischer Aufwand, falls keine Smartmeter vorhanden sind; Kann nur auf Bestandsgebäude angewendet werden	Nur auf reine Wohngebäude anwendbar; Hohe Unsicherheit bei Gebäuden mit sehr hohen und sehr niedrigen Wärmebedarfen; Hoher Arbeits- und Rechenaufwand; Sprünge zwischen Typtagen	Unsicherheit hinsichtlich Nutzerverhaltensänderungen; Nur auf bestehende Wohngebäude anwendbar; Sprünge zwischen Typtagen	Extremwerte in der Literatur werden durch Mittelwertbildung über tausende Wärmeabnehmer stark abgemildert; Hoher Arbeits- und Rechenaufwand	Unsicherheit hinsichtlich Nutzerverhaltensänderungen; Nur auf bestehende Gebäude anwendbar; Extremwerte in der Literatur werden durch Mittelwertbildung über tausende Wärmeabnehmer stark abgemildert	Sehr hoher Arbeits- und Rechenaufwand

Weitere analytische und synthetische Verfahren haben Blesl et. al. in [38] analysiert. Die grundlegenden Strukturen der Simulation von Gebäuden zur Lastgangermittlung stellt Pedersen in [39] vor.

Für Gebäude, deren Wärmebedarf maßgeblich durch den Aufenthalt von Menschen bestimmt wird, kann für die Jahreswärmebedarfsberechnung auf standardisierte Verfahren, wie in der DIN EN 832 [40] (zurückgezogene Norm), DIN V 4108 [41] und der EnEV (Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden – Energieeinsparverordnung) [42] beschrieben, zurückgegriffen werden.

Wärmenutzungen, deren Jahreswärmebedarf maßgeblich durch Art und Umfang der Gebäude- und Anlagennutzung bestimmt wird, wie in Stallungen, Gewächshäusern, Aquakulturen oder Trocknungen, werden nicht von diesen Normen und Verordnungen erfasst. Die von Hellwig [43] und in der BGW P2007/13 [34] veröffentlichten Referenzlastprofile für landwirtschaftliche Betriebe berücksichtigen die nutzungsabhängigen Lastunterschiede ebenfalls nicht. In der Praxis schwankt beispielsweise der Jahreswärmebedarf von Stallungen in Abhängigkeit der gehaltenen Tiere, der Betriebsweise und der Bauart der Stallungen. Zudem ändern sich die Lastgänge von Stallungen unabhängig von den Wetterbedingungen allein auf Grund der sich über die Lebensdauer der Tiere wandelnden erforderlichen Haltungsbedingungen. [44][45]

Intensive Literatur- und Internetrecherchen sowie Telefonate, Gespräche und E-Mailaustausch mit Landwirten, Landwirtschaftskammern und Anlagenherstellern haben keine Hinweise auf veröffentlichte Referenzlastprofile für Stallungen, die als Wärmeabnehmer in

4. Wärmeabnehmer

Wärmenetzen relevant sind, ergeben. Die Jahreslastgänge werden in der Praxis, sofern keine unternehmensinternen Messdaten vorliegen, entweder durch Simulation oder quasi-stationäre Berechnung der Stallungen ermittelt. Als Grundlage können die DIN 18910-1 „Wärmeschutz geschlossener Ställe – Wärmedämmung und Lüftung – Teil 1: Planungs- und Berechnungsgrundlagen für geschlossene zwangsbelüftete Ställe“ [46] oder verschiedene wissenschaftliche Veröffentlichungen genutzt werden. So hat zum Beispiel Freier die grundlegende Vorgehensweise bei der Berechnung des Jahreswärmebedarfs sowie von Heiz- und Kühllasten bei Schweinemastställen mit Hinweisen auf mögliche Fehlerquellen bei der Berechnung in [47] dargelegt.

In den folgenden Abschnitten werden einzelne Verfahren zur Wärmebedarfs- und Lastkurvenermittlung bei überwiegend für Wohnzwecke genutzte Gebäude im dörflichen Bereich detaillierter betrachtet.

4.3.4. Wärmebedarfsermittlung aus Messdaten

Bei der Planung von Wärmenetzen in den Altbaubeständen der niedersächsischen Dörfer kann vielfach auf die Jahresenergieverbrauchsdaten über mehrere Jahre zurückgegriffen werden. Neben den baulichen Gegebenheiten geben diese Daten auch das Nutzerverhalten wieder. Für eine Verwendung der Messdaten ergibt sich daraus die Notwendigkeit, dass die Nutzung im Messzeitraum sowie im Prognosezeitraum nicht wesentlich voneinander abweicht (was wesentlich ist, muss für jedes Projekt getrennt bewertet werden). Da insbesondere lagerfähige Brennstoffe wie Holz und Heizöl zu Verzerrungen zwischen einzelnen Jahren führen können, sind die Daten zusätzlich auf Plausibilität zu prüfen.

Unter Berücksichtigung der Jahresbrennstoffnutzungsgrade der Wärmeerzeuger werden die Verbrauchswerte auf einheitliche Einheiten (z.B. kWh, MJ) umgerechnet. Aus Projekten des Fernwärme-Forschungsinstitutes und der Hochschule Hannover haben sich folgende Werte für die Jahresbrennstoffnutzungsgrade als sinnvoll herausgestellt:

Baujahr der Kesselanlage	vor 1994 oder unbekannt	0,65
	1994 bis 2000	0,76
	ab 2001	0,87

[48]

Die umgerechneten Verbrauchsdaten werden zunächst in Trinkwarmwasserwärmeverbräuche und Heizwärmeverbräuche aufgeteilt. Für die Trinkwarmwasserverbräuche können dazu beispielsweise die Annahmen aus der VDI 4655 (500 kWh/Person und Jahr für bis zu 3 Wohneinheiten und 1.000 kWh/Wohneinheit und Jahr für mehr als 3 Wohneinheiten je Gebäude [49]) genutzt werden. Anschließend werden die Heizwärmeverbräuche witterungsbereinigt und für jedes einzelne Gebäude über die Jahre gemittelt.

Liegen für jeden einzelnen Monat über einen zusammenhängenden Zeitraum von mindestens 36 Monaten Daten vor, kann der Jahreswärmebedarf deutlich genauer ermittelt werden. Für diesen Fall haben Jagnow und Wolff ein Verfahren entwickelt und in [50] veröffentlicht.

4.3.5. Wärmebedarfsberechnung nach EnEV

In der Energieeinsparverordnung (EnEV) wurden 2002 die Heizungsanlagen-Verordnung (HeizAnV) und die Wärmeschutzverordnung (Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden, WärmeschutzV) zusammengeführt. Ziel ist die Reduzierung des Energieverbrauchs in Neubauten und im Gebäudebestand, wobei sich der Geltungsbereich mit wenigen Ausnahmen sowohl auf alle Wohn- als auch auf Nichtwohngebäude erstreckt. Die Ausnahmen finden sich jedoch überwiegend im dörflichen Bereich. Hier eine Auswahl (EnEV §1 (3) [42]):

- Stallungen
- Gewächshäuser
- Kirchen und andere Gebäude, die Gottesdiensten oder anderen religiösen Zwecken dienen
- sonstige Betriebsgebäude, die auf eine Innentemperatur von weniger als 12 °C beheizt oder jährlich weniger als vier Monate beheizt sowie weniger als zwei Monate gekühlt werden
- „Wohngebäude, die für eine Nutzungsdauer von weniger als vier Monaten jährlich bestimmt sind oder für eine begrenzte jährliche Nutzungsdauer bestimmt sind, wenn der zu erwartende Energieverbrauch der Wohngebäude weniger als 25 Prozent des zu erwartenden Energieverbrauchs bei ganzjähriger Nutzung beträgt“ (EnEV §1, Absatz 3, Nummer 8 [42])

Die Berechnung des Heizwärmebedarfs und des Primärenergiebedarfs nach der im Jahr 2014 gültigen EnEV 2013 beruhen auf DIN V 18599:2011-12 berichtigt durch DIN V 18599-5 Berichtigung 1:2013-05 und DIN V 18599-8 Berichtigung 1:2013-05, DIN V 18599-1:2011-12, DIN V 18599-1:2011-12, DIN V 18599-9:2011-12, DIN V 18599-10:2011-12, DIN V 4108-6:2003-06 und DIN V 4701-10:2003-08 mit Änderung A1:2012-07. Als Hilfsmittel zur einheitlichen Bilanzierung der Gebäude im Anwendungsbereich der Verordnung sind in der EnEV zahlreiche Regelungen zu den anzusetzenden Randbedingungen enthalten. [42]

Für Wohngebäude, deren Heizwärmebedarf nach DIN 4108-6:2003-06 berechnet wird, gilt eine Raumtemperatur von 19 °C. Bei Berechnung nach DIN V 18599 ff. gilt eine Raumtemperatur von 20 °C. Die Raumtemperatur für Nichtwohngebäude kann entsprechend DIN V 18599-10 und den realen Anforderungen an die Beheizung bei einer Mindestraumtemperatur von 12 °C gewählt werden.

Für Wohngebäude ist die als Energiebezugsfläche genutzte Gebäudenutzfläche aus dem beheizten Gebäudevolumen über

$$A_N = 0,32 \text{ m}^{-1} \cdot V_e \quad (5)$$

sowie bei Geschosshöhen unter 2,5 m oder über 3 m mit

$$A_N = \left(\frac{1}{h_G} - 0,04 \text{ m}^{-1} \right) \cdot V_e \quad (6)$$

zu verwenden. Bei Nichtwohngebäuden entspricht die Energiebezugsfläche der beheizten Nettogrundfläche (Nettogrundfläche wird allgemein als „die Nettogrundfläche nach anerkannten Regeln der Technik, die beheizt oder gekühlt wird“, [42] §2, Nummer 15). Für den Trinkwarmwasserbedarf werden bei Einfamilienhäusern 11 kWh/(m²•a) und bei Mehrfamilienhäusern 15 kWh/(m²•a) angesetzt [51].

4.3.6. Wärmebedarfsberechnung nach EN 832:1995 mit PHPP

Das PHPP (Passivhaus-Projektierungspaket [52]) ist ein Werkzeug zur statischen Berechnung von Jahresenergiebedarfen, Heizlasten und Monatsheizwärmebedarfen. Das PHPP wurde vom Passivhausinstitut in Darmstadt für die Auslegung und Nachweisführung von Niedrigenergie- und Passivhäusern entwickelt. Die Anwendbarkeit des PHPP erstreckt sich sowohl auf Wohn- als auch auf Nichtwohngebäude. Wobei die Gültigkeit des Berechnungsverfahrens bei Wohngebäuden auf eine Belegungsdichte zwischen 20 und 50 m²/Person begrenzt ist. Die Nutzung des PHPPs für Gebäude mit stark variierenden Anforderungen an Temperaturen und Zuluftzufuhr (z.B. Ferkelställe oder Hähnchenmastställe) ist jedoch nicht möglich.

Die Berechnung der durchschnittlichen monatlichen Heizwärmebedarfe beruht auf dem Monatsverfahren nach EN 832:1995 in Verbindung mit der EN 13790. Das Monatsverfahren nach EN 832:1995 wurde ergänzt um die Einflüsse aus Verschattung und Gebäudeausrichtung. Standardmäßig wird dazu auf die im Programm hinterlegten Klimadaten aus der DIN V 4108-6 zurückgegriffen. Alternative Klimadaten können ebenfalls genutzt werden. Durch Aufsummierung der Monatswerte sind die Jahresheizwärmebedarfe ermittelbar. Für Gebäude mit einem Jahresheizwärmebedarf ab 8 kWh/(m²a) kann auch das Jahresverfahren nach EN 13790 (im Programm auswählbar) genutzt werden. Für alle Gebäude gilt im PHPP eine Auslegungstemperatur der beheizten Räume von 20 °C.

Die Bezugsfläche im PHPP ist die Wohn- beziehungsweise Nettogrundfläche eines Gebäudes. Für Wohngebäude wird die Bezugsfläche gemäß Wohnflächenverordnung (Verordnung zur Berechnung der Wohnfläche, WoFIV [53]) für Räume innerhalb der thermischen Hülle ermittelt. Zu den nach WoFIV ermittelten Flächen können Keller- und Nebenräume, die innerhalb der thermischen Hülle eine Mindestdeckenhöhe von 2 m aufweisen, zu 60 % zur Energiebezugsfläche gezählt werden. Die Energiebezugsfläche für Nichtwohngebäude ist die beheizte Nettogrundfläche nach DIN 277-2 (Grundflächen und Rauminhalte von Bauwerken im Hochbau – Teil 2: Gliederung der Netto-Grundfläche (Nutzflächen, Technische Funktionsflächen und Verkehrsflächen) [54]). Der tägliche Trinkwarmwasserbedarf eines Wohngebäudes wird im PHPP mit 25 l/Person und im Bürogebäude mit 12 l/Person 60-gradiges Wasser angenommen. Bei einer Kaltwassertemperatur von 10 °C entspricht das einem Jahrestrinkwarmwasserbedarf von rund 530 kWh/Person im Wohngebäude und 255 kWh/Person im Bürogebäude. Im PHPP sind für andere Gebäudenutzungen keine Trinkwarmwassermengen vorgegeben. [52]

4.3.7. Berechnung von Lastkurven nach VDI 4655

Die VDI-Richtlinie VDI 4655:2008 wurde für die Abschätzung von Tages- und Jahreslastgängen bei kleinen KWK-Anlagen bis 70 kW in Wohngebäuden erstellt. Eine ausführliche Beschreibung der Vorgehensweise und der Rahmenbedingungen zur Erstellung der VDI-Richtlinie sowie deren Anwendung ist im VDI-Fortschrittsbericht „Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen“ enthalten. [55]

Gemäß des VDI-Fortschrittsberichts basieren die Daten der Richtlinie auf Messungen des Strom-, Heizwärme- und Trinkwarmwasserverbrauchs an fünf Ein- und Zweifamilienhäusern sowie drei Mehrfamilienhäusern. Die Daten für die Einfamilienhäuser stammen von fünf Gebäuden in Nordrhein-Westfalen. Für Mehrfamilienhäuser mit mehr als drei Wohneinheiten stammen die Messdaten von einem Achtfamilienhaus und einem 16-Familienhaus in Nordrhein-Westfalen sowie einem Achtfamilienhaus in Niedersachsen.

Tabelle 5: Kenndaten der Gebäude für die Ermittlung der Datenbasis der VDI 4655 [55]

Gebäude	EFH 1	EFH 2	EFH 3	EFH 4	EFH 5	MFH 1	MFH 2	MFH 3
Bauart	Freistehendes Einfamilienhaus	Zweifamilienhaus	Zweifamilienhaus	Reihenmittelhaus	Reihenendhaus			
Wohnfläche	150 m ²	175 m ²	195 m ²	140 m ²	140 m ²	1170 m ²	770 m ²	560 m ²
Baujahr	1991	1997	1997	1979	1999	1983	1999	
Standort	Oberhausen	Oberhausen	Oberhausen	Dortmund	Oberhausen	Baunatal	Remscheid	Oldenburg
Anzahl der Bewohner	4	2	3	4	4	k.A.	k.A.	k.A.
Anzahl der Wohneinheiten	1	2	2	k.A.	k.A.	16	8	8
Heizwärmebedarf	114 kWh/m ²	129 kWh/m ²	92 kWh/m ²	38 kWh/m ²	93 kWh/m ²	73 kWh/m ²	53 kWh/m ²	104 kWh/m ²
TWW	423 kWh/Pers.	600 kWh/Pers.	425 kWh/Pers.	295 kWh/Pers.	227 kWh/Pers.	910 kWh/WE	1.320 kWh/WE	1.546 kWh/WE

Als Einfamilienhäuser gelten in der VDI-Richtlinie alle reinen Wohngebäude mit bis zu drei Wohneinheiten und einer gemeinsamen Heizungsanlage. Für Einfamilienhäuser gilt weiterhin eine maximale Belegung mit 12 Personen. Die Gültigkeit der Richtlinie beschränkt sich bei Mehrfamilienhäusern auf maximal 40 Wohneinheiten sowie einer maximalen Brennstoffleistung der Kraft-Wärmekopplungsanlage von 70 kW.

Bei der Zuordnung von Wochentagen zu den Typtagen werden Samstage zu den Werktagen gezählt und Feiertage mit den Sonntagen zusammengefasst. In Tabelle 6 sind die in dem Fortschrittsbericht und der Richtlinie verwendeten Bedingungen für die einzelnen Typtage zusammengestellt. Hingewiesen wird in dem Fortschrittsbericht auf die möglicherweise notwendigen Anpassungen hinsichtlich der Heizgrenztemperaturen und der daraus resultierenden Anzahl von Typtagen bei der Anwendung auf Passiv- und Niedrigenergiehäuser sowie auf Gebäude mit sehr hohen Wärmebedarfen.

4. Wärmeabnehmer

Tabelle 6: Typtage nach VDI 4655 [49]

Kurzbezeichnung	Bezeichnung	Bedingung
SSX	Sommer, Sonntag	$\vartheta_{M7} > 15^\circ C$, Sonntag
SWX	Sommer, Werktag	$\vartheta_{M7} > 15^\circ C$, Werktag
ÜSB	Übergangszeit, Sonntag, bedeckt	$5 \leq \vartheta_{M7} \leq 15^\circ C$ Sonntag, $\theta > \frac{5}{8}$
ÜWB	Übergangszeit, Werktag, bedeckt	$5 \leq \vartheta_{M7} \leq 15^\circ C$, Werktag, $\theta > \frac{5}{8}$
ÜSH	Übergangszeit, Sonntag, heiter	$5 \leq \vartheta_{M7} \leq 15^\circ C$, Sonntag, $\theta \leq \frac{5}{8}$
ÜWH	Übergangszeit, Werktag, heiter	$5 \leq \vartheta_{M7} \leq 15^\circ C$, Werktag, $\theta \leq \frac{5}{8}$
WSB	Winter, Sonntag, bedeckt	$\vartheta_{M7} < 5^\circ C$, Sonntag, $\theta > \frac{5}{8}$
WWB	Winter, Werktag, bedeckt	$\vartheta_{M7} < 5^\circ C$, Werktag, $\theta > \frac{5}{8}$
WSH	Winter, Sonntag, heiter	$\vartheta_{M7} < 5^\circ C$, Sonn- oder Feiertag, $\theta \leq \frac{5}{8}$
WWH	Winter, Werktag, heiter	$\vartheta_{M7} < 5^\circ C$, Werktag, $\theta \leq \frac{5}{8}$

Über die Zuordnung zu entsprechenden Klimazonen sind nach der VDI 4655 Wärmebedarfsverteilungen im Jahresgang für Deutschland ermittelbar. Für die Tageslastgänge wird angenommen, dass keine Klimazonenabhängigkeit besteht. Individuelle Verschattungen der Fassaden, Ausrichtungen der Gebäude und Lage der Gebäude (ländlicher oder städtischer Raum) werden ebenfalls nicht berücksichtigt. Der Heizwärmebedarf für die Lastgangermittlung nach VDI 4655 soll mit dem Berechnungsverfahren der DIN EN 832 bestimmt werden. Für den jährlichen Trinkwarmwasserbedarf sind in der VDI-Richtlinie für Einfamilienhäuser 500 kWh/Person und für Mehrfamilienhäuser 1.000 kWh/Person angegeben.

Mit den vorgenommenen Annahmen können über die Gleichungen (7) und (8) die Tagesenergiebedarfe für die einzelnen Typtage abgeschätzt werden (entsprechend [49] Abschnitt 6.4).

$$Q_{\text{Heiz, TT}} = Q_{\text{Heiz, a}} \cdot F_{\text{Heiz, TT}} \quad (7)$$

$$Q_{TWW, TT} = Q_{TWW, a} \cdot \left(\frac{1}{365} + N_{Pers/WE} \cdot F_{TWW, TT} \right) \quad (8)$$

Diese werden mit den in der Richtlinie enthaltenen normierten Tageslastgängen – im Minutenraster für Einfamilienhäuser und im 15-Minutenraster für Mehrfamilienhäuser – multipliziert. Durch Aneinanderreihung der Tageslastgänge für die einzelnen Typtage sind die Jahresdauerlinien generierbar. [49]

4.3.8. Berechnung von Lastkurven nach Hellwig und BGW P2007/13

An der Technischen Universität München entwickelten Geiger und Hellwig im Auftrag des BGW (Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft) und des VKU (Verband kommunaler Unternehmen) für nicht-leistungsgemessene Erdgaskunden Standardlastprofile (siehe [56][57]). 2003 hat Hellwig die Vorgehensweise und Ergebnisse in seiner Dissertation ausführlich dargelegt [43]. Auf Basis der Arbeiten an der Technischen Universität München wurden in den Folgejahren vom BGW, dem BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.) und dem VKU Leitfäden für die Anwendung von Standardlastprofilen bei der Erdgasversorgung veröffentlicht (siehe [34][58][59][60]).

Basis dieses Verfahrens bilden Sigmoidfunktionen $h(\vartheta_D)$, die den Zusammenhang zwischen normiertem Tageswärmeverbrauch und über vier Tage geometrisch gemittelter Außentemperatur ϑ_D herstellen. Bezugszeitraum ist dabei immer der Gastag von 6:00 Uhr bis 6:00 Uhr des Folgetages.

$$h(\vartheta_D) = \frac{A}{\left[1 + \left(\frac{B}{\vartheta_D - \vartheta_0} \right) \right]^C} + D \quad (9)$$

Die Standardlastprofile, bestehend aus den Sigmoidfunktionen und Stundenfaktoren, wurden von Geiger und Hellwig auf Basis von gemessenen Lastgängen aus mehr als 400 Haushaltskunden und 130 Erdgaskunden aus den Bereichen Gewerbe, Handel und Dienstleistungen ermittelt [43]. Für die Ermittlung der Standardlastprofile wurden die Gaskunden Nutzergruppen zugeordnet: 18 in den Studien von Geiger und Hellwig ([56] und [57]), 17 in der Dissertation von Hellwig [43] und 13 in den Leitfäden des BGW [34].

In der Anwendung werden die Lastprofile ausgehend von den Kundenwerten KW ermittelt.

$$KW = \frac{Q_N}{\sum_{i=1}^n (F(D_i) \cdot h(\vartheta_{D_i}))} \quad (10)$$

Darin enthalten ist zunächst die Gesamtwärmemenge über einen längeren Zeitraum Q_N (zum Beispiel ein Jahr). Diese wird durch die Summe der Produkte aus tabellierten Tagesfunktionen $F(D)$ und berechneten Tagessigmoidfunktionswerten $h(\vartheta_D)$ geteilt. Mit den Kundenwerten können anschließend die Tageswärmeverbräuche Q_D berechnet werden.

$$Q_D = KW \cdot F(D) \cdot h(\vartheta_D) \quad (11)$$

Aus diesen kann mit Hilfe der Stundenfaktoren SF der stündliche Wärmeverbrauch Q_{Stunde} ermittelt werden.

$$Q_{Stunde} = SF(Stunde, \vartheta_D) \cdot Q_D \quad (12)$$

Durch Aneinanderreihung der einzelnen Stundenwerte ergibt sich die Jahresdauerlinie.

Die grundlegende Anwendbarkeit des Verfahrens für die Erstellung von Jahresdauerlinien bei Fernwärmenetze haben Meskempner et. al. in [61] und Blesl et. al. in [38] dargelegt. Abweichend von Hellwig und dem BGW wird dabei die Abweichung zwischen Tagesmitteltemperatur des Deutschen Wetterdienstes und der Tagesmitteltemperatur über den Gas-tag nicht berücksichtigt. Die Standardlastprofile von Hellwig mit großen Anteilen an Hochtemperatur-Prozesswärme wie in Bäckereien oder Großküchen können allerdings nicht für die Lastgangermittlung in Wärmenetzen genutzt werden, da die Prozesswärme nicht über Wärmenetze bereitgestellt werden kann.

4.3.9. Ermittlung eigener Standardlastprofile

Die in der BGW P2007/13 enthaltenen Lastprofile weisen sehr kleine Gleichzeitigkeitsfaktoren auf, die in dörflichen Wärmenetzen in der Mehrzahl nicht erreicht werden. Mit VDI 4655 können Lastprofile für einzelne Wohngebäude erstellt werden. Unter Berücksichtigung von Gleichzeitigkeitsfaktoren und Netzverlusten können daraus auch für ganze Wärmenetze Lastprofile ermittelt werden. Die landwirtschaftlichen Wärmeabnehmer sowie große historische Wohngebäude werden mit den vorhandenen Referenzlastprofilen jedoch nicht abgedeckt.

Daher wurden im Rahmen des Projektes „Möglichkeiten und Grenzen von Nahwärmenetzen in ländlich strukturierten Gebieten unter Einbeziehung regenerativer Wärmequellen – Vernetzung dezentraler Kraft- und Wärmeerzeugungssysteme unter Berücksichtigung von Langzeitwärmespeicherung“ eigene Wärmemengenummessungen in Garbsen-Heitlingen durchgeführt. Neben einem Wärmemengenzähler im Fermenterheizkreislauf wurden Wärmemengenzähler in vier Gebäuden installiert. In der folgenden Tabelle 7 sind Charakteristika der Gebäude aufgeführt.² Details sind in Anhang B enthalten.

Tabelle 7: Charakteristika der Gebäude mit Messstellen

Gebäude	Ackerbaubetrieb	Viehhaltungsbetrieb	Wohnsitz	Landmaschinenwerkstatt
Bauart	Niederdeutsches Hallenhaus mit zum Wohnbereich ausgebautem Stall- und Scheunenteil sowie seitlichem Anbau für Büros	Zweifamilienhaus mit zwei Vollgeschossen und seitlich angebautem Stalltrakt (teilweise zu Wohn- und Büroflächen umgenutzt)	Wohnsitz in gemischter Fachwerk- und Massivmauerwerksbauweise mit zwei Vollgeschossen und ausgebautem Dachgeschoss; Deckenhöhe im Erdgeschoss >> 3 m	Landmaschinenwerkstatt in Leichtbauweise
Beheizte Wohn-/Nutzfläche	350 m ²	300 m ²	1.100 m ²	400 m ²
Baujahr	1900	ca. 1930	1750 bis vor 1927	2008
Anzahl der Bewohner/Nutzer	8	6	10	-
Anzahl der Wohneinheiten	1	2	3	-
Heizwärmebedarf	140 kWh/(m ² a)	200 kWh/(m ² a)	149 kWh/(m ² a)	k.A..

Der Messzeitraum erstreckte sich von März 2012 bis April 2013 mit ergänzenden Daten aus einer Woche im Juli 2013 sowie je einer Woche im November und Dezember 2013. In diesem Zeitraum wurden in den Gebäuden Daten mit Wärmemengenzählern im 15-Minutentakt aufgezeichnet. Die aufgezeichneten Daten wurden regelmäßig mit einem Optokopf ausgelesen.

In dem Ackerbaubetrieb und im Viehhaltungsbetrieb befanden sich jeweils ein Wärmemengenzähler auf der Primärseite der elektronisch geregelten Übergabestationen sowie ein zusätzlicher Wärmemengenzähler in den Heizkreisläufen der Trinkwarmwasserbereitung.

² Die angegebenen Heizwärmebedarfe beruhen auf denen für eine Machbarkeitsstudie im Auftrag des Bioenergie Heitlingen e.V. ermittelten aber nicht gebäudescharf veröffentlichten Daten. Die übrigen Angaben stammen von den Gebäudeeigentümern.

4. Wärmeabnehmer

gen. Der Wohnsitz wurde über zwei getrennte Übergabestationen mit Wärme versorgt. In einer der Übergabestationen erfolgte die Trinkwarmwasserbereitung über Fernwärme mit Speicherladesystemen. Der andere Gebäudeteil verfügte über eine von der Fernwärme unabhängige Trinkwarmwasserbereitung. In beiden Wohnsitzteilen sowie in der Landmaschinenwerkstatt wurden ausschließlich auf der Primärseite die Gesamtwärmeverbräuche gemessen.

Die erfassten Wärmeverbräuche mussten bereinigt werden. Daten von unvollständig erfassten Tagen wurden verworfen. Ebenfalls wurden Daten von Tagen, an denen Änderungen im Fernwärmenetz oder in den Gebäudeanlagen vorgenommen wurden, in den Auswertungen nicht berücksichtigt. Erste Ergebnisse der Messdatenauswertung wurden bereits auf dem „13th International Symposium on district heating and Cooling“ [62] vorgestellt.

Die Messdaten der Landmaschinenwerkstatt wurden auf Grund von Mängeln in der Übergabestation und der Kundenanlage vollständig verworfen (siehe Abbildung 36).

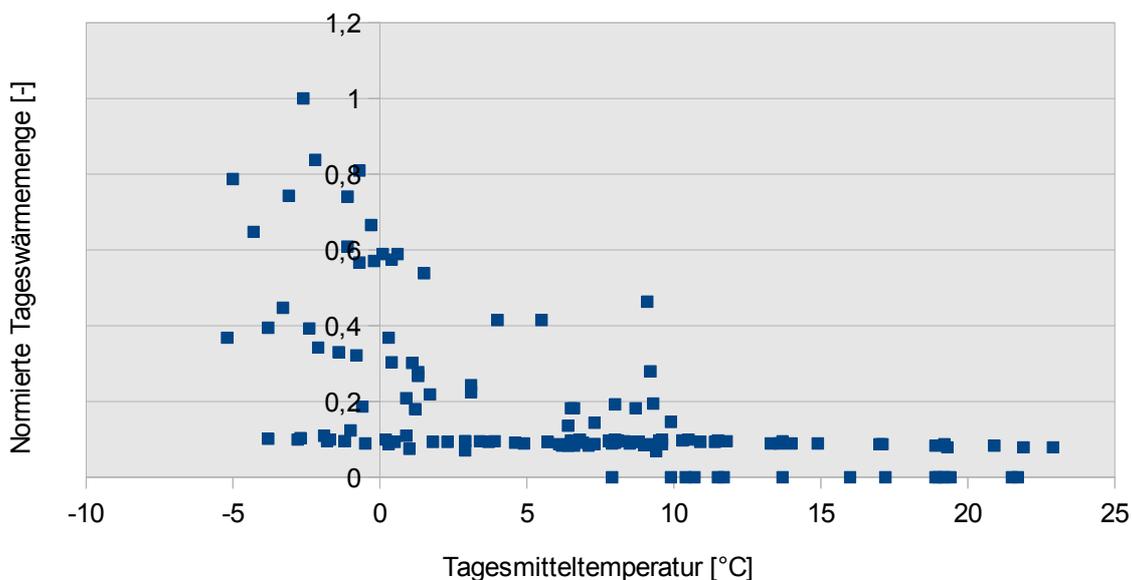


Abbildung 36: Gemessener und normierter Tageswärmeverbrauch der Landmaschinenwerkstatt über der geometrischen Viertagemitteltemperatur

In Abbildung 37 sind die auf den maximalen Tagesverbrauch normierten Tageswärmeverbräuche des Wohnsitzteils mit Trinkwarmwasserbereitung über der geometrischen Viertagemitteltemperatur aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass der Tageswärmeverbrauch über den gesamten Außentemperaturbereich stark variiert. Das Bestimmtheitsmaß zwischen geometrischer Viertagemitteltemperatur und Tageswärmemenge ist wie bei der Landmaschinenwerkstatt im Vergleich zu den anderen vermessenen Wärmeabnehmern entsprechend klein (siehe Abschnitt 4.3.9.1.).

Neben Umbaumaßnahmen an der Kundenanlage im Messzeitraum sind in dem Wohnsitzteil hier verstärkt die Nutzereinflüsse als Ursache für den nicht sehr ausgeprägten

Zusammenhang zwischen Außentemperatur und Tageswärmeverbrauch zu vermuten. Mangels stetiger, schriftlicher Erfassung des Nutzerverhaltens ist hierzu jedoch keine qualifizierte Aussage möglich.

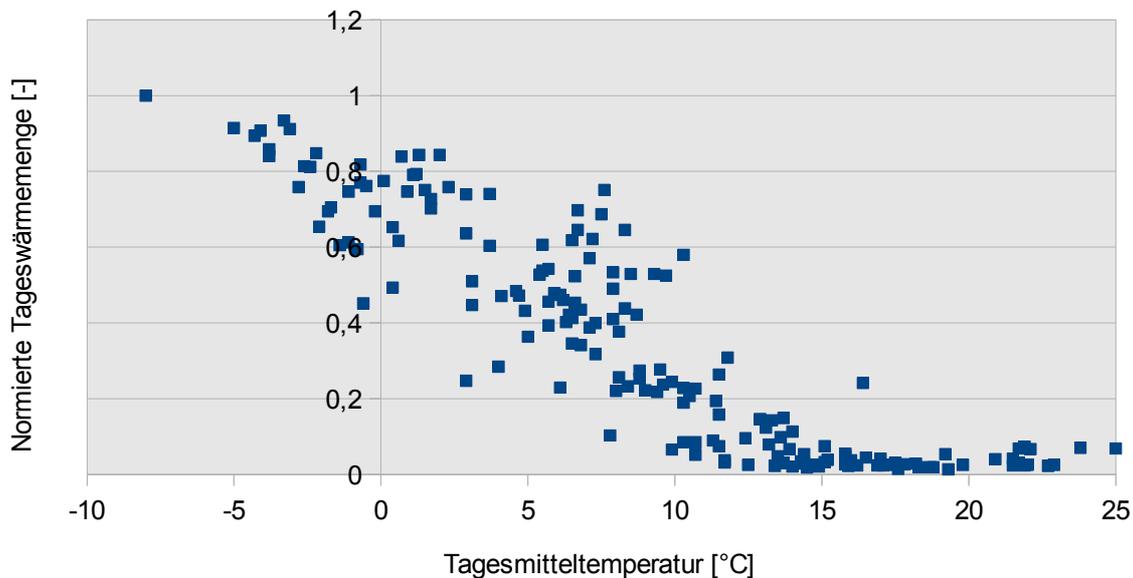


Abbildung 37: Gemessener und normierter Tageswärmeverbrauch des Wohnsitzteils mit Trinkwarmwasserbereitung über der Tagesmitteltemperatur

Für den Ackerbaubetrieb, die Viehwirtschaft und den Wohnsitzteil mit Trinkwarmwasserbereitung wurden nutzbare Lastprofile erstellt. An den nicht weiter verwendbaren Referenzlastprofilen für den Wohnsitzteil ohne Trinkwarmwasserbereitung werden die Auswirkungen eines kleinen Bestimmtheitsmaßes auf Referenzlastprofile gezeigt.

4.3.9.1. Ermittlung von Standardlastprofilen nach Hellwig

Für jedes der verbliebenen Gebäude wurden eigene Referenzlastprofile in Anlehnung an Hellwig erstellt. Gegenüber den von Hellwig ermittelten beziehungsweise den nach seiner Vorlage für die BGW P2007/13 erarbeiteten Referenzlastprofile wurden zusätzlich zu den Tagesfaktoren für jedes einzelne Gebäude insgesamt drei Referenzlastprofile für die Heizlast erstellt (siehe Anhang B). Ein Referenzlastprofil deckt jeweils Werktagen (definiert als Montag bis Freitag, die nicht Feiertage sind), ein weiteres die Samstage und ein drittes Sonn- und Feiertage ab. Zusätzlich wurden Stundenfaktoren jeweils von 0 Uhr bis 24 Uhr gebildet. Für die Berechnung der geometrischen Viertagemitteltemperatur wurde auf die Tagesmitteltemperaturen des deutschen Wetterdienstes zurückgegriffen und entsprechend die Unterschiede zum von Hellwig verwendeten Gastag vernachlässigt.

In der Tabelle 8 sind alle ermittelten Sigmoidfunktionskoeffizienten mit den dazugehörigen Konvergenz-Toleranzen und Bestimmtheitsmaßen zusammengestellt. Die Bestimmtheits-

4. Wärmeabnehmer

maße beziehungsweise Korrelationskoeffizienten (wie bei Hellwig [43] nach Bravais-Pearson ermittelt) zeigen an, ob zwischen der geometrischen Viertagemitteltemperatur und dem Tageswärmeverbrauch ein Zusammenhang besteht. Bei einem linearen Zusammenhang würde das Bestimmtheitsmaß den Wert 1 erreichen. Bei fehlendem Zusammenhang würde das Bestimmtheitsmaß den Wert 0 annehmen.

Tabelle 8: Ermittelte Sigmoidfunktionskoeffizienten

Gebäude	Tag	A	B	C	D	Konvergenz Toleranz	Bestimmtheitsmaß
Ackerbaubetrieb	Mo-Fr	2,432	-32,558	7,786	0,0165352	3,57E-006	0,93719
	Sa	2,76	-34,525	6,676	0,0214308	9,65E-006	0,93144
	So	2,494	-33,248	7,589	0,0209365	5,36E-006	0,933396
	Mo-So	2,446	-32,981	7,407	0,01628431	7,72E-006	0,93467
Ackerbaubetrieb (nur Heizung)	Mo-Fr	2,445	-32,607	8,232	0	1,23E-006	0,91004
	Sa	2,917	-34,879	6,693	0	4,81E-006	0,93911
	So	2,564	-33,264	7,791	0	2,73E-006	0,93124
	Mo-So	2,491	-32,929	7,828	0	9,23E-006	0,91562
Viehwirtschaft	Mo-Fr	2,319	-33,1	7,593	0,0751496	1,67E-006	0,90550003
	Sa	2,28448	-33,23629	7,9437	0,09162	2,65E-006	0,92341208
	So	2,457	-33,996	6,829	0,0822261	9,55E-006	0,9100585
	Mo-So	2,32046	-33,21377	7,55493	0,08149	2,34E-006	0,88850481
Viehwirtschaft (nur Heizung)	Mo-Fr	2,607	-33,497	7,467	0	4,18E-006	0,90313125
	Sa	2,536	-33,311	7,838	0	7,07E-006	0,92173718
	So	2,774	-34,388	6,74	0	3,72E-006	0,9064378
	Mo-So	2,608	-33,538	7,531	0	6,00E-006	0,9051575
Wohnsitz (nur Heizung)	Mo-Fr	2,62	-33,703	6,431	0	1,00E-006	0,9543164651
	Sa	2,899	-34,932	6,144	0	2,07E-006	0,9263518731
	So	3,063	-35,732	5,89	0	1,63E-006	0,680700607
	Mo-So	2,695	-34,066	6,337	0	5,73E-006	0,9507304
Wohnsitz (Heizung+TWW)	Mo-Fr	2,54581	-33,35271	9,89859	0,01658	4,92E-006	0,831573873
	Sa	3,085	-35,296	7,617	0	3,89E-006	0,827794878
	So	2,99267	-34,98862	9,14286	0,02349	8,59E-006	0,817705745
	Mo-So	2,68493	-33,7938	9,28542	0,00438	3,29E-006	0,827395478

Das kleinste Bestimmtheitsmaß wurde für den Wohnsitz ohne Trinkwarmwasserbereitung an Sonntagen ermittelt. Über die gesamte Woche gemittelt zeigt dieser Wärmeabnehmer dagegen ein Bestimmtheitsmaß von über 0,95 und damit einen fast linearen Zusammenhang. Der Wohnsitzteil mit Trinkwarmwasserbereitung weist im Gegensatz dazu unabhängig vom Wochentag immer Bestimmtheitsmaße unter 0,9 auf. Die durchgeführte Korrektur der Verbrauchswerte nach Hellwig, bei der die Datenpaare aus gemessenem Verbrauch und geometrischer Viertagemitteltemperatur auf ein Standardjahr mit einer Jahresmitteltemperatur von 9,1 °C umgerechnet werden, führt bei den niedrigen Bestimmtheitsmaßen zu teilweise physikalisch unsinnigen Ergebnissen, wie in Abbildung 38 zu sehen ist.

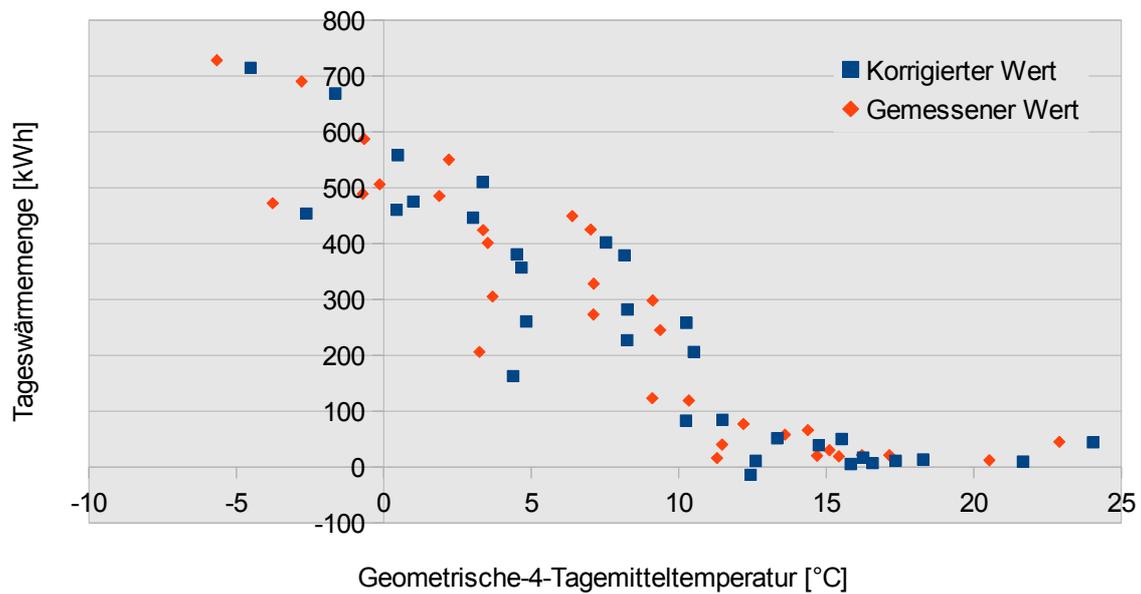


Abbildung 38: Im Wohnsitzteil mit Trinkwarmwasserbereitung gemessene Tageswärmemengen an Samstagen und zugehörige korrigierte Werte

Zum Vergleich sind in den Abbildungen 39 und 40 die Messwerte beziehungsweise die korrigierten Messwerte mit den zugehörigen Sigmoidfunktionen für den Ackerbaubetrieb an Werktagen aufgetragen.

4. Wärmeabnehmer

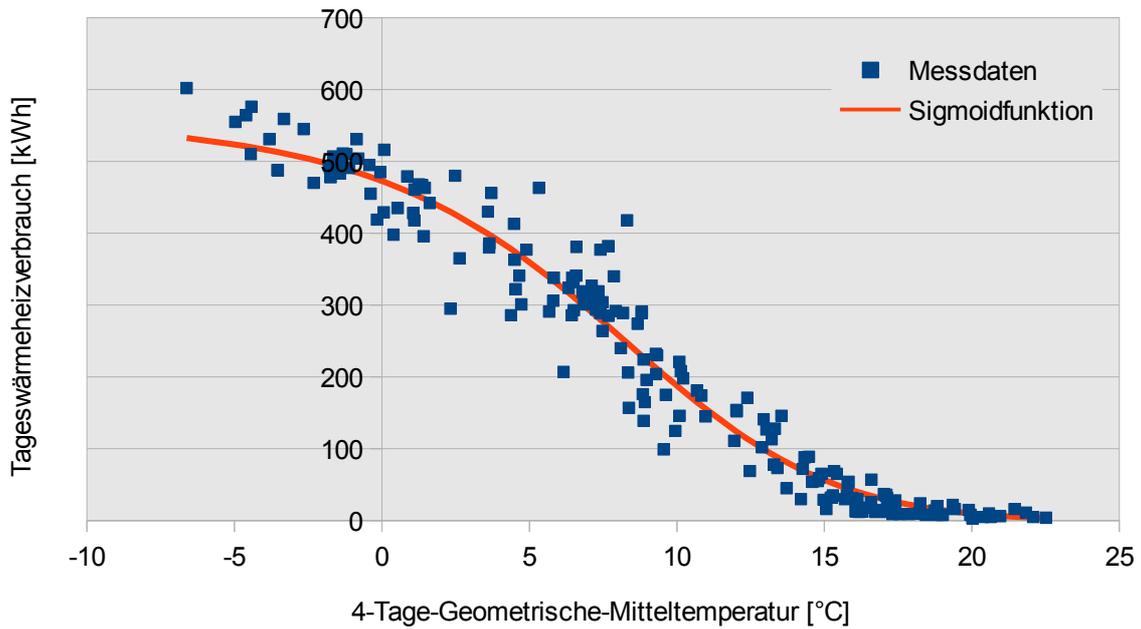


Abbildung 39: Messwerte und Sigmoidfunktion für Ackerbaubetrieb (nur Heizwärme) an Werktagen Montag bis Freitag

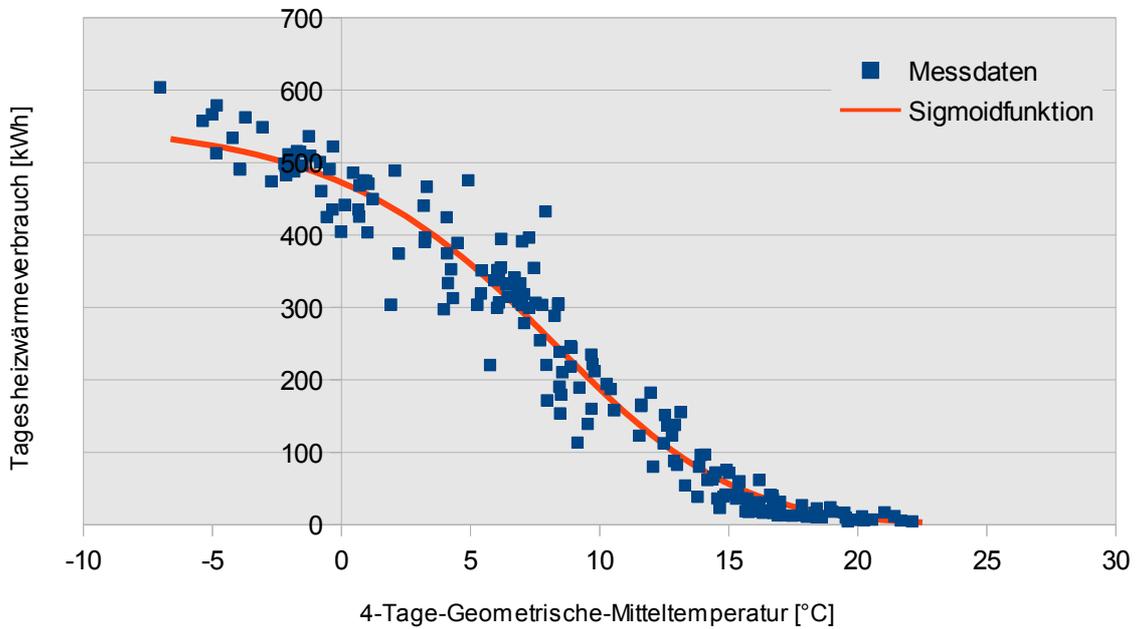


Abbildung 40: Korrigierte Messwerte und Sigmoidfunktion für Ackerbaubetrieb (nur Heizwärme) an Werktagen

Die in Tabelle 8 aufgelisteten und in Abbildung 41 am Beispiel des Ackerbaubetriebes grafisch dargestellten Sigmoidfunktionen weisen insbesondere bei Temperaturen unterhalb von 0 °C deutliche Abweichungen voneinander auf. Dagegen sind die Abweichungen bei Temperaturen oberhalb von 0 °C sowohl absolut als auch relativ deutlich geringer. Diese Unterschiede zwischen den Tagen haben zu der Entscheidung für die Verwendung von wochentagsabhängigen Sigmoidfunktionen geführt.

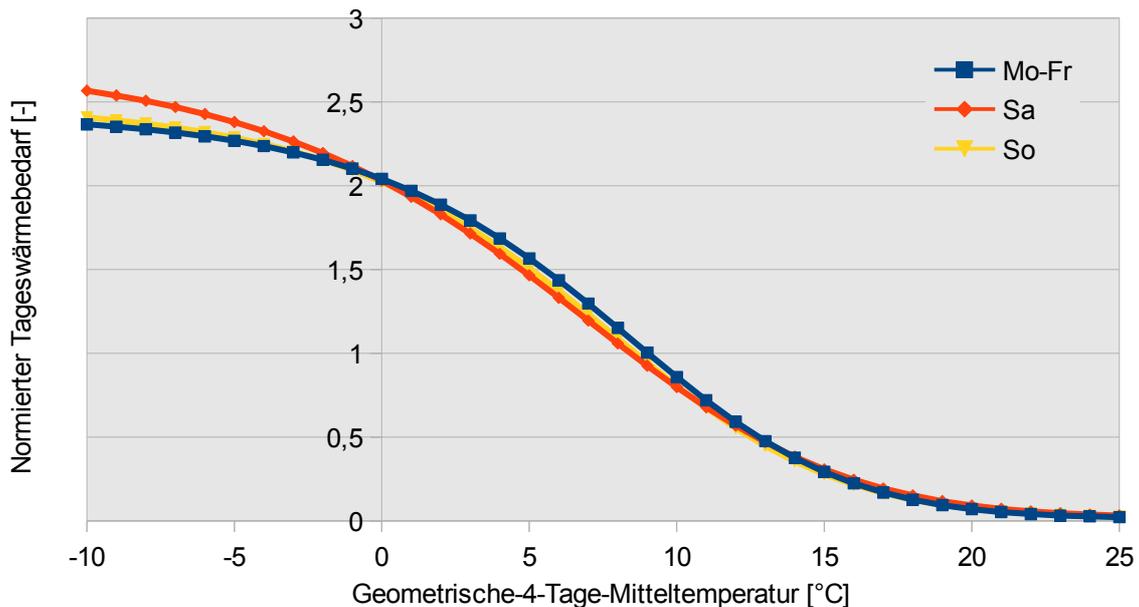


Abbildung 41: Sigmoidfunktionen des Gesamtwärmebedarfs des Ackerbaubetriebes für verschiedene Tage im Vergleich

Die zu den einzelnen Wochentagen gehörenden Wochentagsfaktoren wurden nach Hellwig ermittelt. Ein Vergleich der nach Hellwig ermittelten Faktoren mit den mittleren korrigierten Tageswärmeverbräuchen zeigen deutliche Abweichungen im Verhältnis zwischen den Tagen. Daher ist in Tabelle 9 zusätzlich eine Spalte mit den auf das Wochenmaximum normierten, mittleren, korrigierten Tagesverbräuchen enthalten.

4. Wärmeabnehmer

Tabelle 9: Wochentagsfaktoren

Gebäude	Tag	Wochentagsfunktion nach Hellwig	Wochentagsfunktion über Max. Mittelwert
Ackerbaubetrieb	Mo-Fr	0,9804	1,0000
	Sa	1,0884	0,9628
	So	1,0094	0,9876
	Mo-So	1	1
Ackerbaubetrieb (nur Heizung)	Mo-Fr	0,9353	1,0000
	Sa	1,3269	0,9435
	So	0,9965	0,9739
	Mo-So	1	1
Viehwirtschaft	Mo-Fr	0,9882	1,0000
	Sa	1,0194	0,9750
	So	1,0398	0,9750
	Mo-So	1	1
Viehwirtschaft (nur Heizung)	Mo-Fr	0,9846	1,0000
	Sa	0,8922	0,9770
	So	1,1848	0,9828
	Mo-So	1	1
Wohnsitz (nur Heizung)	Mo-Fr	0,9805	0,9913
	Sa	1,0233	1,0000
	So	1,0740	0,9652
	Mo-So	1	1
Wohnsitz (Heizung+TWW)	Mo-Fr	1,0115	0,9664
	Sa	0,7077	1,0000
	So	1,2350	0,9874
	Mo-So	1	1

Unabhängig von den Tagesfaktoren und den Sigmoidfunktionen wurden die Tageslastgänge ermittelt. Am Beispiel des Ackerbaubetriebes zeigt die Abbildung 42 die Tageslastgänge für Werkzeuge in den unterschiedlichen Temperaturklassen. Tabellen mit allen ermittelten Tageslastgängen befinden sich im Anhang B.

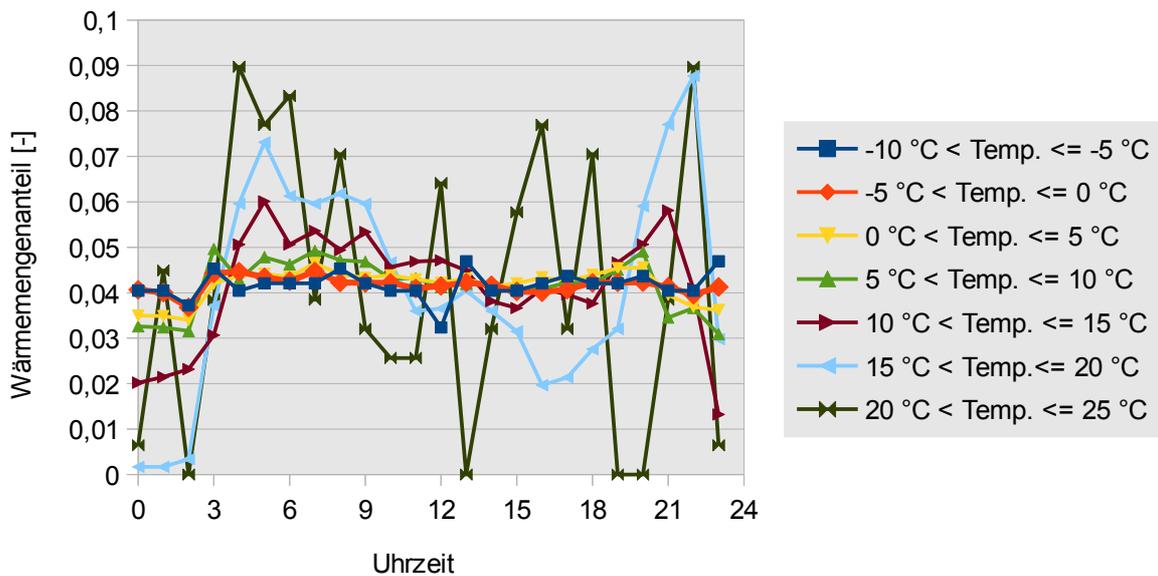


Abbildung 42: Beispiel Tageslastprofile für die Heizwärmebereitstellung des Ackerbaubetriebes an Werktagen

Die in Abbildung 42 zu sehenden starken Schwankungen im Tagesverlauf bei Tagesmitteltemperaturen oberhalb von 10 °C resultieren zum einen aus der geringen Anzahl an Messwerten, die zur Mittelwertbildung herangezogen wurden und zum anderen aus den an diesen Tagen insgesamt sehr niedrigen Wärmeverbräuchen, sodass zum Beispiel das kurzzeitige Aufdrehen der Badezimmerheizung schon zu großen Laständerungen führt. Zusätzliche Spitzen treten durch die Wärmeverluste in der Übergabestation während und nach der Trinkwarmwasserbereitung auf.

4.3.9.2. Ermittlung von Standardlastprofilen in Anlehnung an VDI 4655

Parallel zu den Standardlastprofilen nach Hellwig wurden für die beiden landwirtschaftlichen Betriebe und einen Teil des Wohnsitzes Standardlastprofile in Anlehnung an die VDI 4655 gebildet. In dem VDI Fortschritt-Bericht „Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen“ beschreiben Dubielzig et. al. [55] die Erstellung der Referenzlastprofile für die VDI 4655. Dubielzig et. al. gehen dabei von einem linearen Zusammenhang zwischen Außentemperatur und Heizwärmeverbrauch aus. Wie in Abbildung 39 zu erkennen ist und von Hellwig in seiner Dissertation ausführlich dargelegt wird ([43], S. 37 ff.), ist dieser Zusammenhang nur abschnittsweise gültig. Für diese Arbeit wird daher auf eine Korrektur des Heizwärmebedarfs verzichtet. (Details zur Vorgehensweise sind in Anhang A beschrieben.)

Tabelle 10 ist zu entnehmen, dass für einige Typtage nur wenige Messungen vorliegen. Die erstellten Standardlastprofile/Referenzlastprofile sind daher statistisch nicht abgesichert. Für eine Anwendung der Profile in der Praxis müssten zuerst noch weitere Messdaten aufgenommen werden.

4. Wärmeabnehmer

Tabelle 10: Anzahl der Messtage je Gebäude und Typtag

Typtag	Ackerbaubetrieb	Viehwirtschaft	Wohnsitz
ÜWH	53	47	47
ÜWB	41	48	32
ÜSH	10	10	7
ÜSB	10	9	8
SWX	74	80	47
SSX	11	12	6
WWH	28	22	20
WWB	40	34	37
WSH	4	4	3
WSB	9	7	8

In Tabelle 11 sind die ermittelten Typtagfaktoren für die Typtage sowie die zugrunde liegende Anzahl an Tagen je Typtag nach VDI 4655 [49] zusammengefasst.

Tabelle 11: Anzahl Typtage für Region Hannover nach VDI 4655 und ermittelte Typtagfaktoren für ländliche Gebäude

Typtag	Anzahl Tage im TRY	Ackerbaubetrieb		Viehwirtschaft		Wohnsitz
		Heizung	TWW	Heizung	TWW	Heizung
ÜWH	33	0,0018846	-3,75E-005	0,0021875	-2,15E-005	0,0018546
ÜWB	87	0,0023531	2,02E-005	0,0026109	-3,70E-006	0,0020883
ÜSH	8	0,0017200	-1,08E-004	0,0019806	-8,39E-005	0,0012162
ÜSB	19	0,0027571	3,25E-005	0,0027184	5,22E-006	0,0025216
SWX	71	0,0002842	-7,87E-005	0,0002940	-1,00E-004	0,0003328
SSX	10	0,0002207	-9,52E-005	0,0003539	-9,64E-005	0,0003091
WWH	28	0,0049269	1,60E-005	0,0045507	1,75E-004	0,0051402
WWB	83	0,0046510	6,96E-005	0,0043751	5,34E-005	0,0047739
WSH	5	0,0040294	2,84E-005	0,0038183	1,23E-004	0,0045423
WSB	21	0,0047822	-4,57E-006	0,0047195	-1,26E-005	0,0052323

Ebenfalls wurden für die Gebäude Stundenfaktoren ermittelt. In den Abbildungen 43 und 44 sind als Beispiele die Tageslastprofile für den Ackerbaubetrieb grafisch dargestellt.

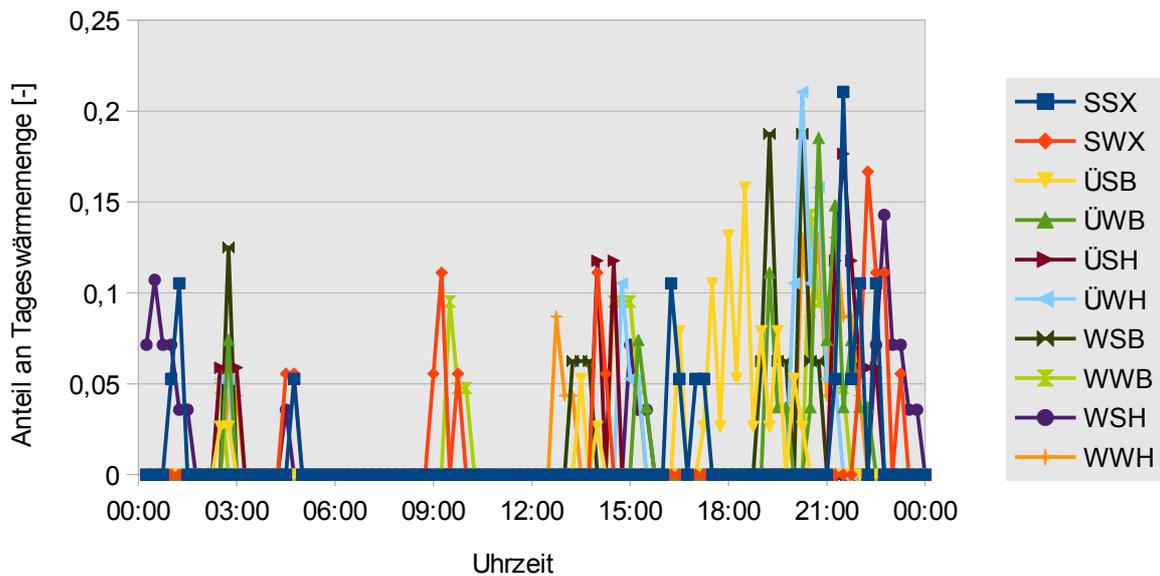


Abbildung 43: Referenzlastprofile für die Trinkwarmwasserwärmenutzung des Ackerbaubetriebes - 15-Minutenwerte

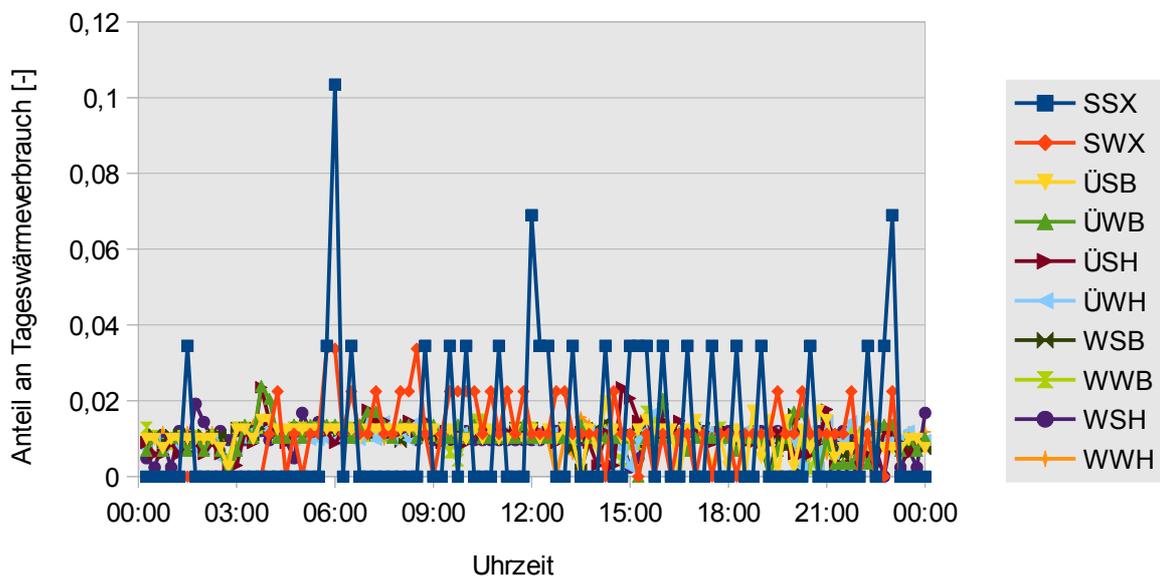


Abbildung 44: Referenzlastprofile für die Heizwärmenutzung des Ackerbaubetriebes - 15-Minutenwerte

An den Lastkurven für die Trinkwarmwasserwärmenutzung ist gut die Wirkung des Wärmespeichers zu erkennen. Nach einem relativ kurzen Zeitraum mit hoher Leistung wird über längere Zeit keine weitere Wärme zur Trinkwarmwasserbereitung benötigt. Die zeitliche Verschiebung der Einschaltpunkte für die Speicherladung ergibt sich aus dem hier

4. Wärmeabnehmer

verwendeten Speicherladesystem mit kombinierter Aktivierung der Speicherladung zu vorgegebenen Zeiten und bei Unterschreitung von Speicherladeständen.

Im Referenzlastprofil für die Heizwärmenutzung fallen zunächst die starken Ausschläge der Kurven für die Sommertage (SSX und SWX) auf. Diese Ausschläge beruhen auf dem minimalen Volumenstrom, mit dem die Station zur Warmhaltung bei unterschreiten einer Mindesttemperatur durchströmt wird. Dieser Volumenstrom ist so klein, dass der Wärmemengenzähler nur alle 45 bis 75 Minuten eine Wertänderung ausgibt. In der Übergangszeit und in den Wintermonaten wird dagegen die Überschreitung der Mindesttemperatur durch die Bereitstellung von Heizwärme gesichert.

4.3.10. Vergleich Wärmebedarfe und Wärmeverbräuche

Viele der Bestandsbauten mit Wohnnutzung weisen nur einen geringen Wärmedämmstandard und damit hohe flächenspezifische und absolute Wärmebedarfe auf. In der Realität werden diese durch eine an die Außentemperaturen angepasste Nutzung der Räume reduziert. So werden beispielsweise die Dielen und Stuben großer Bauernhöfe oder Herrenhäuser bei Temperaturen unter der Heizschwelle nur zu besonderen Anlässen höher als frostfrei beheizt. Ebenso werden bei großen einfach-verglasten Fenstern die vorhandenen schweren Vorhänge nur temporär in den gerade genutzten und beheizten Räumen zur Seite gezogen.

Als ein Ergebnis des Optimusprojekts hat Wolff in [63] die Unterschiede zwischen nach EnEV berechnetem Heizenergiebedarf und realem, bereinigtem Heizenergieverbrauch für verschiedene Wohngebäude ermittelt. Er gibt für Altbauten (bis 1977) an, dass deren Heizenergiebedarf 35 % zu hoch und für Neubauten (ab 1995) 10 % zu niedrig abgeschätzt werden würde.

Für einige Beispiele wurden eigene Heizwärmebedarfsrechnungen mit dem PHPP 2003 oder 2007/9 [52] durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 im Vergleich zu den gemessenen Verbrauchswerten, die nach dem in 4.3.4. beschriebenen Verfahren ermittelt wurden, dargestellt.

Tabelle 12: Vergleich gemessener Verbräuche und berechneter Wärmebedarfe

Bezeichnung	Baujahr	Heizwärmebedarf PHPP [kWh]	TWW-Bedarf PHPP [kWh]	Gesamtwärmebedarf PHPP [kWh]	Gesamtwärmeverbrauch gemessen standardisiert [kWh]
Tischlerei	1910	75.435	3.474	78.909	115.155
Landwirtschaftlicher Betrieb mit Viehhaltung	1948	39.136	6.546	45.682	50.083
Einfamilienhaus	1986	19.284	4.861	24.145	20.255
Einfamilienhaus	1995	14.791	3.610	18.401	20.863

Wie in der Tabelle ersichtlich ist, stimmen auch bei Verwendung des PHPP die realen und gemessenen Verbräuche nicht überein. Die Differenzen liegen bei den Wohngebäuden zwischen 10 und 20 % und für den Handwerksbetrieb bei über 40 %. Der Fehler der

PHPP-Ergebnisse liegt damit in der gleichen Größenordnung, wie der von Wolff für die EnEV-Berechnungen festgestellte.

Nach der Wahl des Verfahrens zur Jahreswärmebedarfsermittlung stellt sich die Frage nach dem zu wählenden Verfahren zur Lastgangermittlung. Da zwischen einzelnen Tagen, wie weiter oben dargestellt, durchaus größere Schwankungen auf Grund individueller Einflüsse der Nutzer auftreten, soll hier der Fokus auf die Monatsverbräuche gelegt werden. In den Abbildungen 45 bis 47 sind die gemessenen Monatswärmeverbräuche für den Ackerbaubetrieb, die Viehwirtschaft sowie den Wohnsitz den in Anlehnung an Hellwig berechneten Monatswärmeverbräuchen gegenübergestellt.

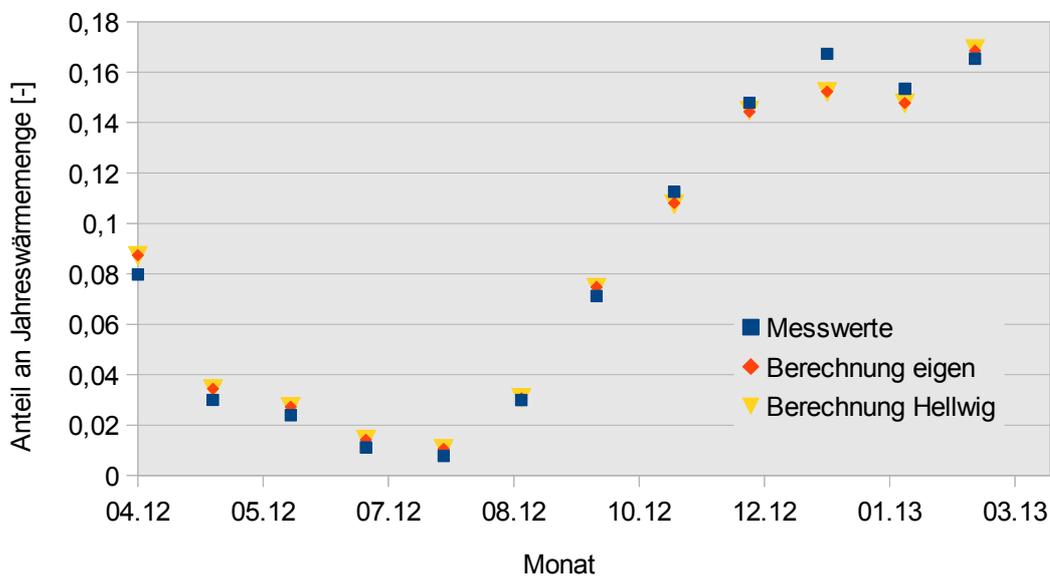


Abbildung 45: Berechnete und gemessene auf das Messjahr normierte Monatswärmeverbräuche für den Ackerbaubetrieb

4. Wärmeabnehmer

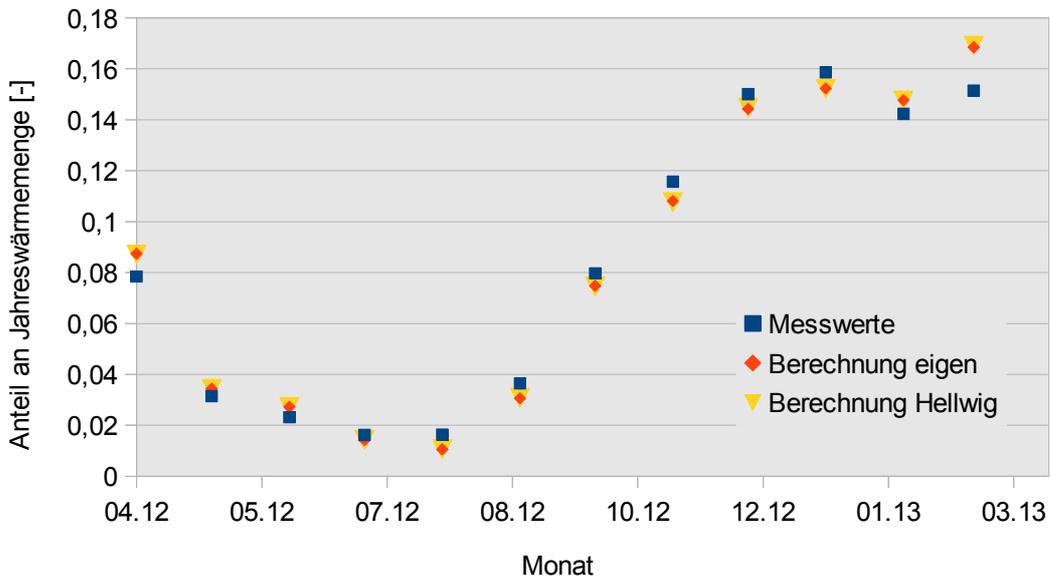


Abbildung 46: Berechnete und gemessene auf das Messjahr normierte Monatswärmeverbräuche für die Viehwirtschaft

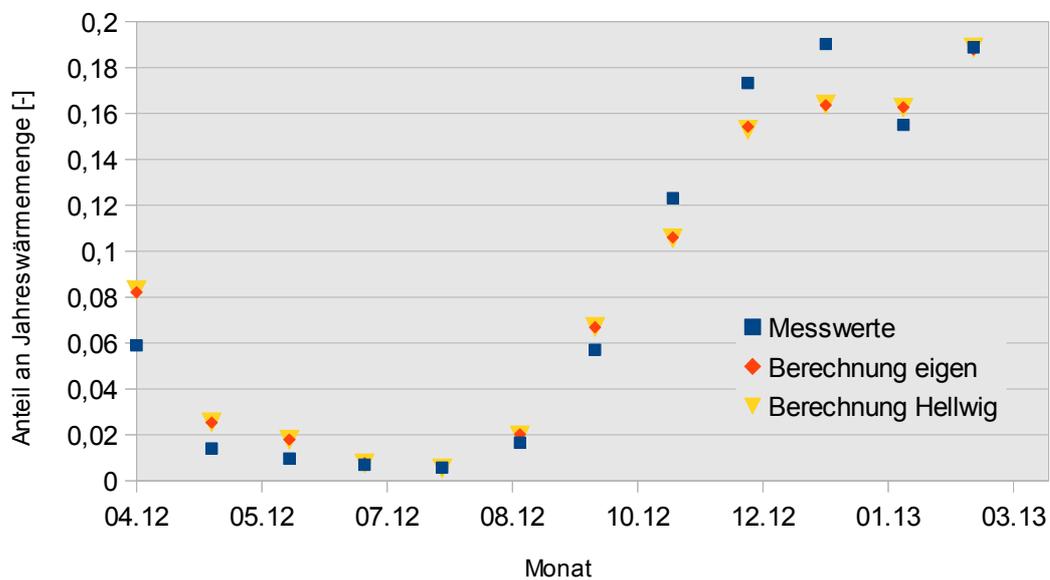


Abbildung 47: Berechnete und gemessene auf das Messjahr normierte Monatswärmeverbräuche für den Wohnsitzteil mit Trinkwarmwasserbereitung

Insgesamt ist festzustellen, dass die berechneten Monatswerte bei Viehwirtschaft und Ackerbaubetrieb im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) maximal rund 37 % von den Messwerten abweichen. Im Winterhalbjahr ist die maximale Abweichung kleiner 10 %. Der Wohnsitzteil zeigt dagegen ganzjährig Abweichungen zwischen minimal 5 % und maximal

85 % zwischen berechneten und gemessenen Monatswärmeverbräuchen. Dabei ist kein relevanter Unterschied (kleiner 2 % Differenz) festzustellen, ob die Wochentagsfaktoren über den Mittelwert („Berechnung Hellwig“) oder das Maximum („Berechnung Eigen“, siehe Abschnitt 4.3.9.1.) ermittelt wurden. Ursächlich für den im Messzeitraum gegenüber dem berechneten Wert teilweise zurückgehenden Wärmeverbrauch könnten die nach jeder Datenauslesung erfolgten Rückmeldungen an die Gebäudenutzer sein. Für eine Bestätigung dieser These liegen derzeit jedoch keine ausreichenden Daten vor.

Die Abbildung 48 zeigt am Beispiel des Ackerbaubetriebes den Lastverlauf über zwei Wochen im März 2013.

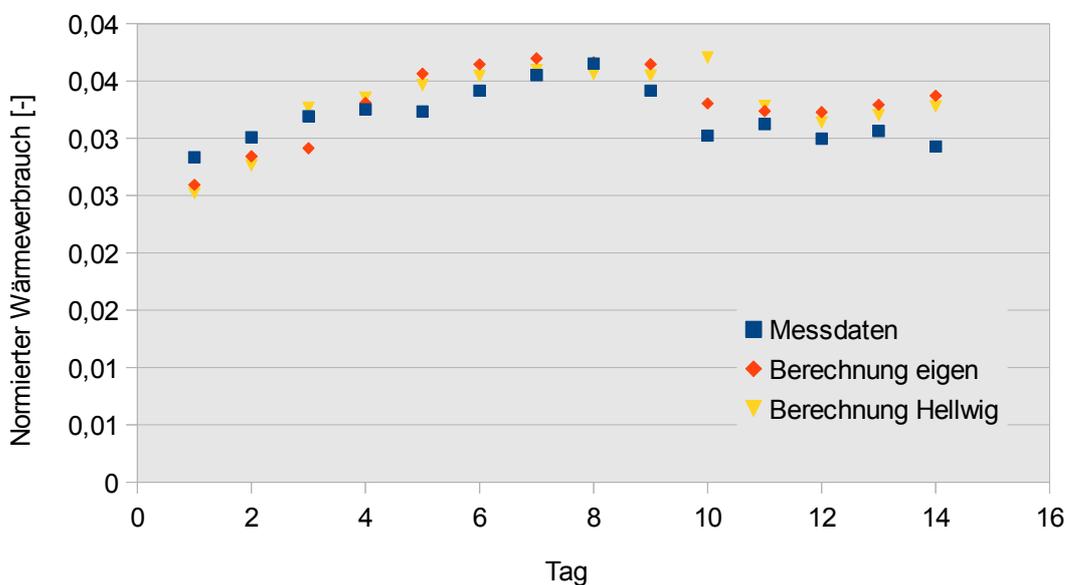


Abbildung 48: Normierter Wärmeverbrauch gemessen und berechnet für den Ackerbaubetrieb im März 2013 (Donnerstag bis Mittwoch)

Die Genauigkeit der berechneten Tages- und Stundenwerte ist gegenüber den Monatswerten deutlich geringer. So weichen die berechneten Werte für die Beispielwoche, die in dem Monat mit der besten Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Werten liegt, zwischen 0,2 % und 15 % bei der Normierung der Wochentagsfaktoren über das Maximum sowie zwischen 2 und 23 % bei Normierung über die mittlere Sigmoidfunktion ab. Die Stundenwerte für den Tag mit der geringsten Abweichung zwischen Messwerten und berechneten Werten, der als Beispiel in Abbildung 49 gezeigt wird, weichen bis zu 20 % von den Messwerten ab (im Mittel 9 % Abweichung).

4. Wärmeabnehmer

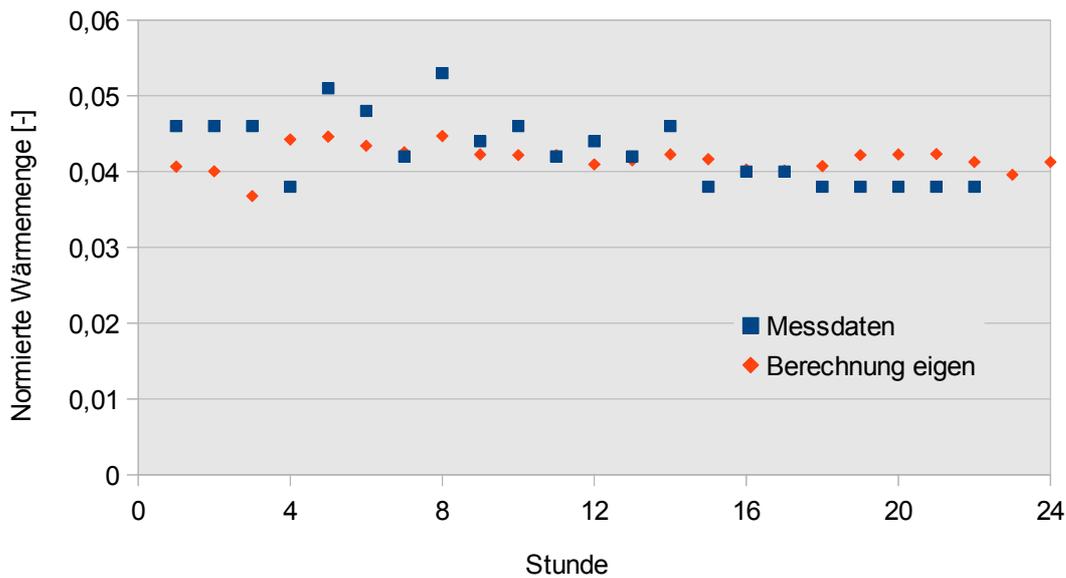


Abbildung 49: Beispiel für den Lastverlauf über einen Mittwoch des Ackerbaubetriebes bei Außentemperaturklasse 4

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass bei der Analyse oder Planung von Wärmenetzen so viele Daten wie möglich über die Wärmeabnehmer genutzt werden sollten. Die geringe Anzahl von Wärmeabnehmern in den ländlichen Wärmenetzen erfordert die individuelle Betrachtung jedes einzelnen Gebäudes. Sind für die einzelnen Gebäude keine Wärmeverbrauchsdaten vorhanden oder sind diese nicht schlüssig, so kann bei der Ermittlung der Jahreswärmeverbräuche unter Berücksichtigung der bekannten Abweichungen sowohl auf Berechnungen nach EnEV als auch nach PHPP zurückgegriffen werden. Vorhandene, in sich schlüssige Lastkurven sollten genutzt werden. Andernfalls sind Referenzlastprofile für Einzelgebäude unter Berücksichtigung der Wochentags- und Temperatureinflüsse, wie zum Beispiel im Rahmen dieser Arbeit in Anlehnung an Hellwig ermittelt, nutzbar. Die Anwendbarkeit der in BGW P2007/13 veröffentlichten Referenzlastprofile für größere Gruppen ähnlicher Energienutzer auf kleine Wärmenetze ist offen. Es ist weiterhin nicht geklärt, ob Lastprofile aus der VDI 4655 oder, die in Anlehnung an die Richtlinie erstellt wurden, als Basis für die Ermittlung eines Jahreslastgangs eines Wärmenetzes eingesetzt werden können. Insbesondere die von Krimmling et. al. in [64] dargelegten Ungenauigkeiten bei der Lastprofilsynthese lassen hier begründete Zweifel aufkommen.

5. Wärmeezeuger

5.1. Einführung Wärmequellen für Fernwärmenetze

In den großen städtischen Fernwärmenetzen in Deutschland stellen Großwärmequellen mit Kraft-Wärmekopplung (KWK) die Hauptwärmequellen dar. Diese können wie folgt gegliedert werden [65]:

- Dampfentnahme-Kondensations-Turbinenanlagen
- Gegendruckdampfturbinen-Anlagen
- Gasturbinenanlagen mit Abhitzeessel
- Gasturbinen mit nachgeschalteten Dampfentnahme-Kondensationsturbinen
- Gasturbinen mit nachgeschalteten Gegendruckdampfturbinen

Hinzu kommt Abwärme aus industriellen Prozessen sowie vereinzelt Wärme aus geothermischen oder solarthermischen Anlagen. Als Spitzenlastkessel werden sowohl große Festbrennstoff-, Gas- und Ölkessel auf Basis fossiler Brennstoffe und Müll als auch in geringem Umfang biologische Brennstoffe und nicht weiter definierte Brennstoffe eingesetzt. [65]

Für kleine Fernwärmenetze (Nahwärmenetze) sind diese vorgenannten Wärmeerzeugungssysteme im Leistungsbereich mehrerer Megawatt im Betrieb zu aufwändig. So brauchen all diese Systeme zum Beispiel ständige Überwachung durch Personal. Die kleineren KWK-Systeme sind einfacher aufgebaut und benötigen im Betrieb nur stichprobenartige Überwachung durch Personal. Ansonsten arbeiten diese Systeme vollautomatisiert. Gegenüber den großen Wärmeerzeugern für städtische Fernwärmenetze sind die Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen für Nahwärmenetze zudem Serienprodukte. Die gängigen Systeme auf Basis fossiler Brennstoffe sind:

- Gasotomotor-Blockheizkraftwerke
- Zündstrahlmotoren-Blockheizkraftwerke
- Mikrogasturbinen-Blockheizkraftwerke

Weiterhin sind vereinzelt auch Brennstoffzellen-, Stirlingmotor- und Dampfmotor-Blockheizkraftwerke (BHKW) sowie Mikrodampfturbinenheizkraftwerke zu finden.

In ländlichen Bereichen kommen zusätzlich vermehrt Blockheizkraftwerke mit Gasotomotoren oder Zündstrahlmotoren in Verbindung mit Biogasanlagen zum Einsatz. Die Abdeckung von Spitzen- und Mittellasten erfolgt in Nahwärmenetzen in städtischen Gebieten ebenso wie in ländlichen Gebieten über Gas-, Heizöl oder Biomassefestbrennstoffkessel.

Alle weiteren Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit beziehen sich auf Anlagen mit einer Leistung größer oder gleich 100 kW thermisch. In Abbildung 50 sind Wirkungsgrade verschiedener gebräuchlicher Wärmeerzeugungssysteme, die sowohl in urbanen Bereichen als auch in ländlichen Bereichen eingesetzt werden, bei Vollast sowie einer Rücklauftemperatur von 60 °C und einer Vorlauftemperatur von 80 °C dargestellt³ (Definition der

³ Leistungsbereich der ausgewerteten Daten bei Motor-BHKW von 100 kW_{el} bis 18.320 kW_{el} und bei Mikrogasturbinen von 100 bis 200 kW_{el}, sowie bei Kesseln von 400 bis 800 kW_{th} und von 2.000 bis 3.000 kW_{th}.

Wirkungsgrade siehe Anhang A).

Gut zu erkennen ist, dass die heute eingesetzten Gas- und Ölkessel nahe des thermodynamisch Möglichen betrieben werden können. Holzhackschnitzelkessel und Kraftwärmekopplungsanlagen erreichen hingegen bei Volllast nur knapp über 90% Gesamtwirkungsgrad. Bei den Motor-Blockheizkraftwerken werden die höchsten elektrischen Wirkungsgrade bei den größten Modulen erreicht. Motor-Blockheizkraftwerke im elektrischen Leistungsbereich um die 100 kW erreichen hingegen die höchsten thermischen und Gesamtwirkungsgrade.

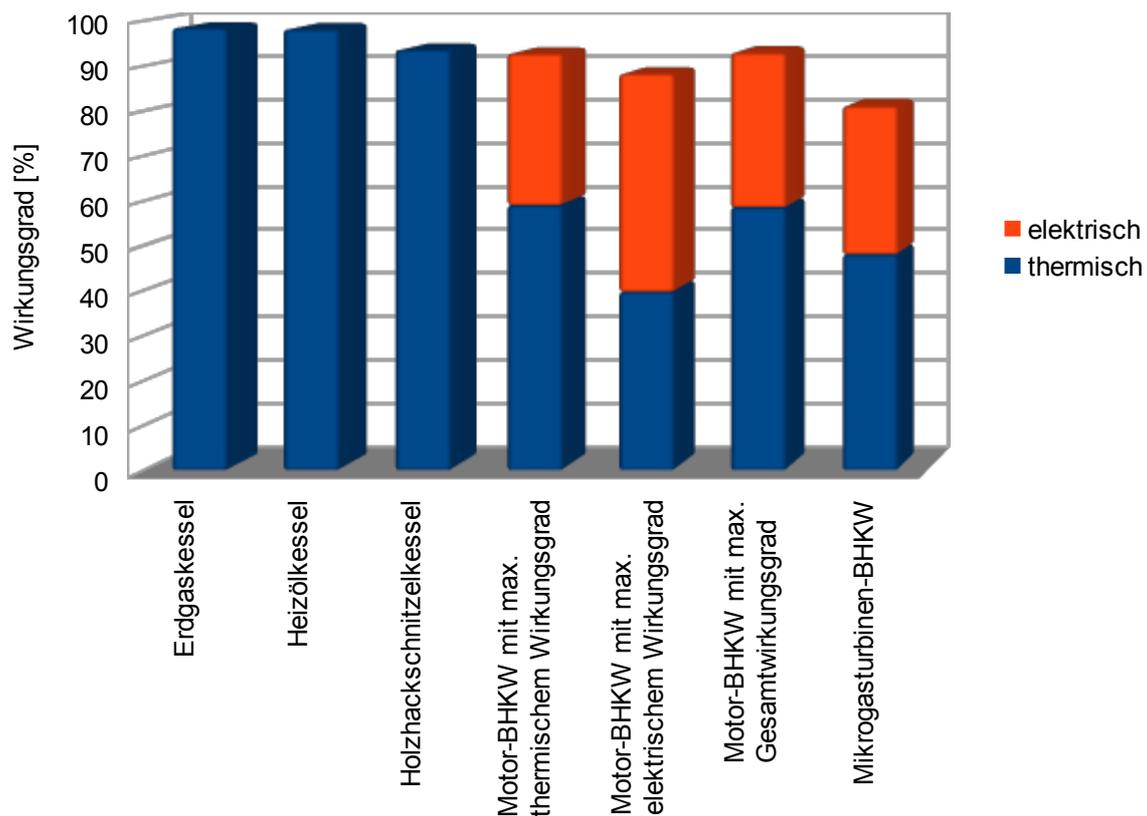


Abbildung 50: Maximale Wirkungsgrade von Wärmeerzeugungssystemen bei Volllast (Datenbasis: [66], [67], [68], [69], [70], [71], eigene Auswertung von Datenblättern für rund 180 Kessel)

Außer Wärmequellen, die zur Grundlastabdeckung betrieben werden, werden alle anderen Anlagen diskontinuierlich betrieben. Für einen aussagekräftigen Vergleich von Wärmeerzeugungssystemen ist daher nicht nur der Wirkungsgrad bei Volllast zu betrachten. Neben der Geschwindigkeit der Laständerung sind hier insbesondere die erreichbaren Leistungen, Wirkungsgrade und Temperaturen im Teillastfall von Interesse. Diese können in Abhängigkeit des einzelnen Wärmeerzeugers sehr unterschiedlich ausfallen.

Zusätzlich treten bei taktender Fahrweise Bereitschaftsverluste auf. Diese Wärmeverluste werden in dem thermischen Jahresbrennstoffnutzungsgrad berücksichtigt. [72]

5. Wärmeerzeuger

$$\bar{\eta}_{th} = \frac{\eta_{th}}{\left(\frac{1}{\phi} - 1\right) \cdot q_B + 1} \quad (13)$$

Hierin enthalten ist der Belastungsgrad

$$\phi = \frac{\dot{Q}_{H,i}}{\eta_V \cdot \dot{Q}_K \cdot t_B} \quad (14)$$

und der Bereitschaftswärmeaufwand

$$q_B \approx q_{B70} \frac{\vartheta_{mK} - \vartheta_u}{70^\circ C - \vartheta_u} \quad (15)$$

Bei der Berechnung des Jahresbrennstoffnutzungsgrades einer KWK-Anlage muss zusätzlich die während der Bereitschaftszeit aufzuwendende elektrische Energie berücksichtigt werden. Zusammengeführt ergibt sich daraus der Jahresbrennstoffnutzungsgrad einer KWK-Anlage.

$$\bar{\eta}_{ges} = \bar{\eta}_{th} + \bar{\eta}_{el} \quad (16)$$

Wärmeerzeugungsanlagen ohne Kraft-Wärmekopplung weisen auch einen elektrischen Energieverbrauch in den Bereitschaftszeiten auf. Dieser wird mangels Datenbasis in den folgenden Abschnitten und Kapiteln nicht weiter berücksichtigt.

5.2. Biogasanlagen

5.2.1. Grundlagen

Biogasanlagen werden in erster Linie zur Produktion von Gas für die Stromerzeugung errichtet. Hierbei ist zwischen Biogasanlagen mit einer Gasaufbereitung zur Einspeisung des erzeugten Gases in das Erdgasnetz und der direkten Biogasnutzung zu unterscheiden. Von den rund 7.300 Biogasanlagen in Deutschland stehen etwa 1.500 Anlagen mit einer elektrischen Gesamtleistung von rund 780 MW in Niedersachsen. Im Jahr 2011 speisten davon 21 Anlagen aufbereitetes Biogas in das Erdgasnetz ein. Circa 70% der Anlagen mit direkter Gasnutzung verfügten 2011 über eine Wärmenutzung. Die über Wärmenetze genutzte Wärmemenge ist nicht bekannt. [73][74]

Als Substrate zur Biogaserzeugung werden sowohl nachwachsende Rohstoffe wie Mais-silage, Hirse, Grünschnitt-Roggen oder Zuckerrüben als auch Reststoffe aus Landwirtschaft, Industrie, kommunalen Einrichtungen und privaten Haushalten genutzt. Als Reststoffe sind insbesondere Schweine- und Rindergülle zu nennen.

In Abbildung 51 ist der Aufbau einer Biogasanlage mit Nassfermentation in einem volldurchmischten Nassfermenter und direkter Gasnutzung schematisch dargestellt.⁴

Die feste Biomasse wird in einem Substratlager zwischengelagert und nach Bedarf mit einem Radlader (A) dem Vorlagenbehälter der Substrataufbereitung zugeführt. Über Rohrleitungen (B) kann zusätzlich Gülle oder andere flüssige Biomasse aus einem Vorratsbehälter schubweise zur Substrataufbereitung transportiert werden. In der Substrataufbereitung erfolgt (mehrmals täglich oder kontinuierlich) die Zerkleinerung, Dosierung und Vermischung der Substrate, Recyklate (über Rohrleitungen (D) rückgeführte Flüssigkeit mit Feststoffanteilen aus dem Fermenter), Wasser, Spurenelementen und/oder Enzyme sowie Bakterienkulturen zu einer Maische. Die Maische wird in den Fermenter gepumpt (E).

Im gleichen Maße wie neue Maische in den Fermenter gepumpt wird, wird altes Material aus dem Fermenter abgezogen und als Recykat genutzt oder in den Gärrestebehälter (auch als Gärrestlager bezeichnet) zur weiteren Nutzung außerhalb der Biogasanlage gepumpt (C).

⁴ Anmerkung: Neben dem gezeigten Anlagenaufbau existieren viele weitere herstellereinspezifische Anlagenstrukturen. Auf Grund der Vielfalt können diese im Rahmen dieser Arbeit nicht dargestellt werden.

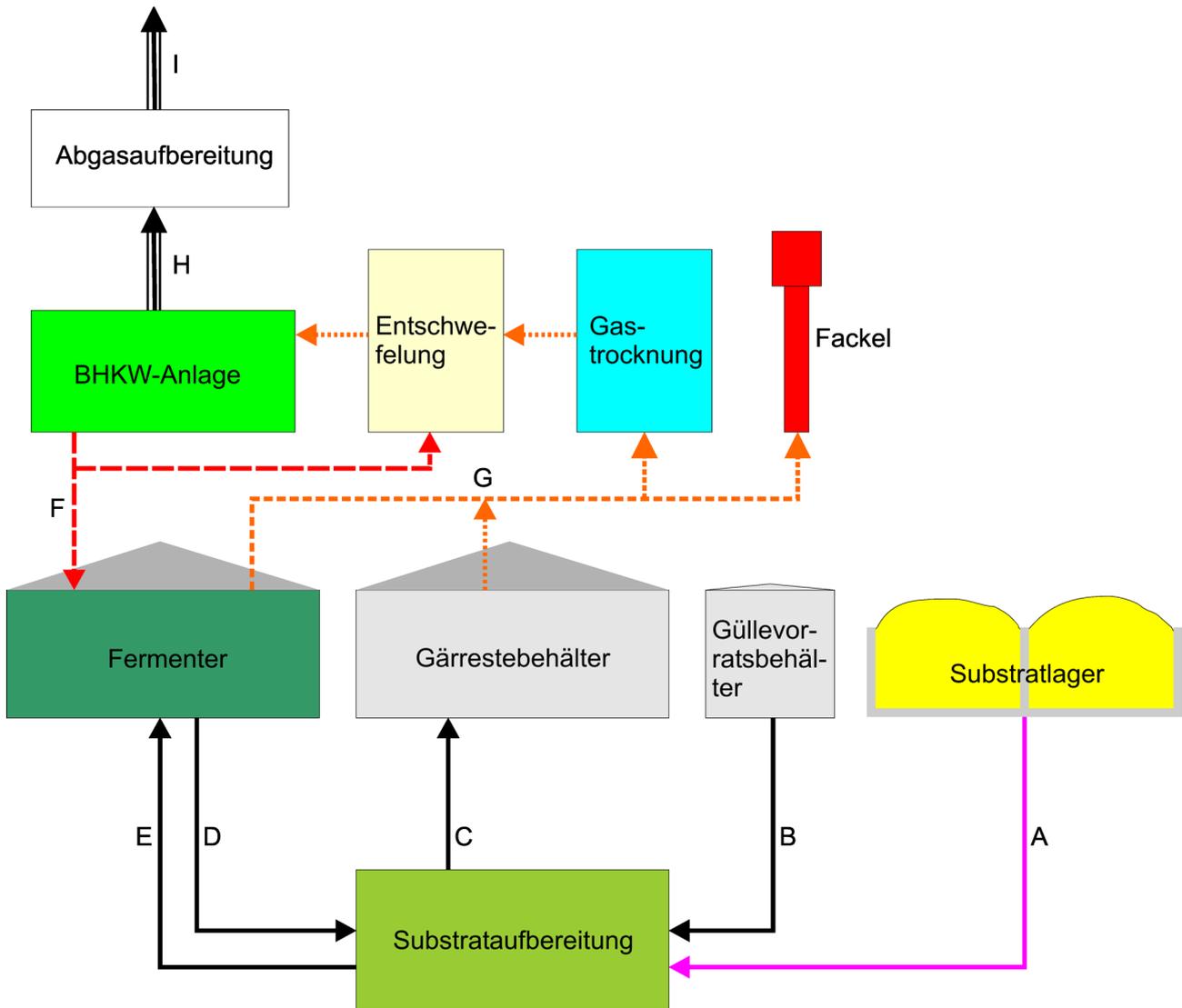


Abbildung 51: Schema Biogasanlage

Im Fermenter produzieren Bakterien entweder im mesophilen Temperaturbereich zwischen 37 °C und 42 °C oder im thermophilen Temperaturbereich zwischen 50 °C und 60 °C aus der Biomasse Methan [77]⁵. Hierzu wird der Fermenter entsprechend beheizt (F). Das Flüssigkeit-Feststoffgemisch im Nassfermenter wird kontinuierlich durchmischt um eine gleichmäßige Temperatur- und Nährstoffverteilung zu erreichen sowie um die Bildung einer schwer gasdurchlässigen Schwimmschicht zu vermeiden.

Oberhalb der flüssigen Phase in Nassfermenter und Gärrestebehälter sammelt sich das Rohbiogas. Über Rohrleitungen (G) kann das Rohbiogas zunächst einer Gasreinigung zugeführt werden. Gasreinigungen werden insbesondere eingesetzt, um Korrosion im BHKW-Modul zu vermeiden. Gängige Gasreinigungen sind unter anderem die Gastrocknung über erdverlegte Rohrleitungen oder Gastrockner sowie Aktivkohlefilter zur Entschwefelung. Bei Störungen wird das Rohbiogas direkt abgefackelt.

⁵ Ältere Literaturquellen geben für die mesophile Methanproduktion 30 °C bis 45 °C und für thermophile Methanproduktion 45 °C bis 60 °C [75] beziehungsweise 48 °C bis 55 °C [76] an.

Das aufbereitete Biogas wird über eine Gasregelstrecke mit Verdichter dem BHKW-Modul zugeführt. In Abhängigkeit der Anlage kann überschüssiges Biogas auch in einem zusätzlichen Gaskessel verbrannt werden. Der im BHKW-Modul erzeugte Strom wird in der Regel in das öffentliche Stromnetz eingespeist. Einige BHKW-Module sind jedoch auch inselbetriebsfähig. Die Abwärme der Module wird zu einem Teil für die Beheizung des oder der Fermenter sowie der Gasaufbereitung genutzt (Rohrleitungen (F)). Überschüssige Wärme kann einer anderen Nutzung zugeführt oder über einen Notkühler an die Umgebung abgegeben werden.

Das Abgas muss nach Verlassen des BHKW-Moduls (H) den gesetzlichen Anforderungen genügen. Zur Abgasnachbehandlung marktverfügbar sind Oxydationskatalysatoren und Aktivkohlefilter zur Reduktion organischer Verbindungen wie Formaldehyde, Kohlenmonoxid und Methan (aus unvollständiger Verbrennung). Das gereinigte Abgas wird über ein Abgasrohr (I) an die Umgebung abgegeben.

5.2.2. Hauptkomponenten einer Biogasanlage

5.2.2.1. Fermenter

Der oder die Fermenter sind die zentralen Bestandteile einer Biogasanlage. In den Fermentern wird durch anaerobe Vergärung Biogas erzeugt. Anlagenabhängig können nach dem Hauptfermenter noch ein oder mehrere Nachgärer geschaltet werden. Das Biogas besteht überwiegend aus Methan (50 bis 75 Vol.-%), Kohlendioxid (25 bis 45 Vol.-%) und Wasser (2 bis 7 Vol.-%). Zusätzlich nehmen Stickstoff und Sauerstoff mit jeweils unter 2 Vol.-% sowie Wasserstoff mit unter 1 Vol.-% und Schwefelwasserstoff mit 20 bis 20.000 ppm noch relevante Anteile ein. Die Zusammensetzung des Biogases wird durch die Substratzusammensetzung und die hinzugefügten Spurenelemente in Verbindung mit der Raumbelastung und der hydraulischen Verweilzeit sowie der Fermentertemperatur bestimmt. [77]

Trockenfermentationsanlagen (Trockenmassegehalt im Fermenter > 15 – 16 %) werden als Batchanlagen oder als Pfropfenstromanlagen ausgeführt. Bei Batchanlagen, auch Garagenanlagen genannt, wird das Substrat mit einem Radlader mit Gärresten vermengt und in einen Container oder einen Stahlbetonkasten geschüttet. Während der Gärzeit von mehreren Wochen (in der Biogasanlage Brese z.B. vier Wochen) findet kein weiterer Substrateintrag in die Fermenter statt. Ebenfalls kann auf eine Durchmischung des Fermenterinhalt verzichtet werden. Je nach Anlage ist zusätzlich nur eine einmalige Aufheizung des Fermenters nach der Substrateinbringung notwendig. Anschließend produzieren die Bakterien ausreichend Wärme zur Aufrechterhaltung der Prozesse. Nach Ende der Gärzeit werden die Gärreste mit einem Radlader aus den Fermentern geholt.

In Pfropfenstromanlagen wird das Substrat jeweils kontinuierlich oder quasikontinuierlich dem meist liegenden Fermenter zugeführt. Mittels Rührwerken wird das Substrat durchgemengt und während der Vergärung langsam von einem Ende des Fermenters zum anderen transportiert.

Nassfermentationsanlagen werden üblicherweise in Form stehender, volldurchmischer

5. Wärmeerzeuger

Fermenter errichtet. Wie in Abschnitt 5.2.1. dargestellt, werden diese in kurzen Abständen mit angemaischem Substrat gefüttert, während gleichzeitig Gärreste abgezogen werden. Bei Bedarf können mehrere Nassfermenter als Hauptfermenter und Nachgärer zur Optimierung der biologischen Abbauprozesse eingesetzt werden. Hauptfermenter und Nachgärer werden beheizt und meist stetig durchmischt (es existieren auch Anlagen mit einem Intervallbetrieb der Rührwerke).

In den Fermentern setzen Bakterien die Biomasse in Methan, Kohlendioxid und weitere Substanzen um. Der Biomasseabbau erfolgt dabei in vier Schritten [77][78]:

1. Hydrolyse:

Komplexe organische Verbindungen wie Eiweiße, Fette und Kohlenhydrate werden durch Enzyme in kürzerkettige organische Verbindungen wie Zucker, Aminosäuren und Fettsäuren umgewandelt. Die Enzyme werden von hydrolytischen Bakterien produziert.

2. Acidogenese:

Die Produkte der Hydrolyse werden durch fermentative (säurebildende) Bakterien in anorganische Substanzen (Wasserstoff, Kohlendioxid) oder niedere organische Fettsäuren und Alkohole umgewandelt.

3. Acetogenese:

Bei der Acetogenese leben acetogene (essigsäurebildende) Bakterien und methanogene Archaeen symbiotisch. Die acetogenen Bakterien bauen die niederen organischen Fettsäuren zu Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid ab.

4. Methanogenese:

Die methanogenen Archaeen bilden aus Wasserstoff und Kohlendioxid Methan. Acetoclastische Bakterien spalten aus der Essigsäure Methan ab.

Der Wärmebedarf für Fermenter variiert zwischen einzelnen Anlagen. Einflussfaktoren hierauf sind maßgeblich die Raumbelastung, die Substratzusammensetzung und die Temperaturen, der Aufbau des Fermenters und der Fermenterheizung sowie die Betriebsweise. In der Literatur sind unter anderem die in Tabelle 13 dargestellten Werte für die Wärmebedarfe von Nassfermentationsanlagen zu finden. Die angegebene Bruttowärmeproduktion ist dabei die Wärmemenge, die ein BHKW-Modul ohne Eigenverbräuche liefern kann.

Tabelle 13: Literaturangaben zum Wärmebedarf von Fermentern

Quelle	Literaturwert
Hans Bachmeier et al. [79]	4 % bis 17 % der Bruttowärmeproduktion
Simone Besgen [75]	19 % bis 36 % der Bruttowärmeproduktion
Baerbel Hundt [80]	2,5 % der Bruttowärmeproduktion
Bernhard Feller [44]	40 % der Bruttowärmeproduktion
Matthias Heschl [81]	5 % der Bruttowärmeproduktion
Kerstin Jäkel [82]	35 % der Bruttowärmeproduktion
Michael Köttner [83]	30 % bis 50 % der Bruttowärmeproduktion
Ulrich Keymer [84]	< 20 % bis 50 % der Bruttowärmeproduktion
Bernd Rau [85]	15 % der Bruttowärmeproduktion für industrielle Biogasanlage mit thermischer Substrathygienisierung
Gottfried Peter, Ronny Rother, Thomas Warecka [86]	30 % bis 40 % der Bruttowärmeproduktion

Die Veröffentlichungen von Besgen und Feller enthalten zusätzlich noch grafische Darstellungen der täglichen Fermenterwärmebedarfe im Jahresverlauf.

Auffällig bei den in Tabelle 13 aufgeführten Wärmemengen zur Fermenterbeheizung ist die Angabe von Hundt. Diese ausschließlich auf theoretischen Betrachtungen basierende Angabe von 2,5 % des Jahreswärmebedarfes lässt sich mit den anderen Literaturwerten nicht in Einklang bringen. Einzig eine der von der Forschungsgruppe um Hans Bachmeier untersuchten Pilotbiogasanlagen weist einen sehr geringen Eigenwärmebedarf von 4 % auf. Dieser wird auf eine starke Eigenerwärmung der Biomasse im Fermenter sowie „dem günstigen Oberfläche-Volumen-Verhältnisses“ ([79], S. 51) des Fermenters und eines unbeheizten Nachgärbehälters zurückgeführt. Die von Heschl untersuchte Biogasanlage weist mit einem Fermenterwärmebedarf von 5 % der Bruttowärmeproduktion ebenfalls einen vergleichsweise niedrigen Wert auf. Heschl gibt keine Erklärungen für den niedrigen Fermenterwärmebedarf an. Der Aufbau der Anlage ist jedoch atypisch. Die mit Nawaros und Gülle als Substrate betriebene Anlage verfügt über Haupt- und Nachfermenter, die jeweils bis etwa 2 m unterhalb der Oberkante der Betonbehälter eingegraben sind. Zusätzlich beträgt die Sollfermentertemperatur nur 38 °C.

Neben oben genannten Einflussfaktoren auf den relativen Fermenterwärmebedarf wird dieser auch durch die Raumbelastung (Anteil der organischen Trockenmasse pro Volumen und Zeit in $kg\ oTSI(m^3 \cdot d)$ oder $kg\ TSI(m^3 \cdot d)$, die dem Fermenter zugeführt werden) beeinflusst. Wird ein Fermenter mit einer hohen Raumbelastung betrieben, steigt der Bio-

5. Wärmeerzeuger

gasertrag auf das Fermentervolumen bezogen gegenüber einem gleichgroßen Fermenter mit niedriger Raumbelastung. Minimale und maximale Raumbelastung werden durch biologische Prozesse und die Rührwerksmechanik begrenzt. Literaturwerte für die maximale Substratzufuhr für Fermenter reichen von 2 bis 10 Kilogramm Trockenmasse pro Kubikmeter Fermentervolumen und Tag. [76][82]

5.2.2.2. Biogas-BHKW

2004 waren die Biogasanlagen in Deutschland überwiegend mit Gas-Ottomotor-BHKW (>55%) ausgerüstet. Zusätzlich hatten Zündstrahlmotoren mit rund 35% einen relevanten Marktanteil. Fast 10% aller Biogasanlagen verfügten über BHKW mit Gas-Ottomotoren und Zündstrahlmotoren. Im Jahr 2010 hatte sich der Anteil der Gas-Ottomotoren für neue Biogas-BHKW auf Grund geänderter politischer Rahmenbedingungen – der Einsatz von fossilen Brennstoffen als Zündöl wurde im EEG als Ausschlusskriterium für eine Vergütung aufgenommen – auf rund 66% erhöht. [87][88]

In Abbildung 53 ist der Aufbau eines Biogas-Blockheizkraftwerkes mit einem Gas-Ottomotor dargestellt. Die wesentlichen Unterschiede gegenüber der in Abbildung 52 dargestellten fossil betriebenen BHKW-Anlage bestehen in dem Notkühler (I) und der Rücklauffemperaturanhebung. Notkühler und Rücklauffemperaturanhebung werden auf Grund des kontinuierlichen oder stromgeführten Betriebes des Biogas-BHKW benötigt. Fossil betriebene BHKW in Wärmenetzen werden hingegen auf einen wärmegeführten Betrieb ausgelegt.

Der Motor (F) ist über eine Kupplung meist mit einem Drehstrom-Synchron-Generator (G) verbunden. Die Drehzahl des Motors passt sich bei diesem Generatortyp im laufenden Betrieb automatisch an die Netzfrequenz an.

Das Biogas-Luftgemisch wird mit einem Abgasturbolader (J) verdichtet und anschließend in den Gemischkühlern (A) und (K) abgekühlt. Nach der Verbrennung des Gemisches im Motor treibt das heiße Abgas den Abgasturbolader (J) an. Die vorhandene Restwärme im Abgas kann mit einem Abgaswärmeübertrager (D) genutzt werden. In dem Abgaswärmeübertrager wird das Abgas auf minimal 180 °C abgekühlt (bei niedrigeren Temperaturen besteht die Gefahr des Ausfalls von Sulfatasche oder Säuren). [89][90]

Die Kühlung des Blockheizkraftwerkes und die Nutzwärmeauskopplung erfolgt überwiegend über einen Wasser-Glykolkreislauf als Primärkreislauf. Zunächst wird im Gemischkühler (A) Wärme aus dem Gemisch aufgenommen. An den Gemischkühler (A) schließt sich der Öl-Kühler für die Schmiermittelkühlung an (B). In einem weiteren Kühler wird die Wärme aus dem Motorkühlwasser aufgenommen (C).

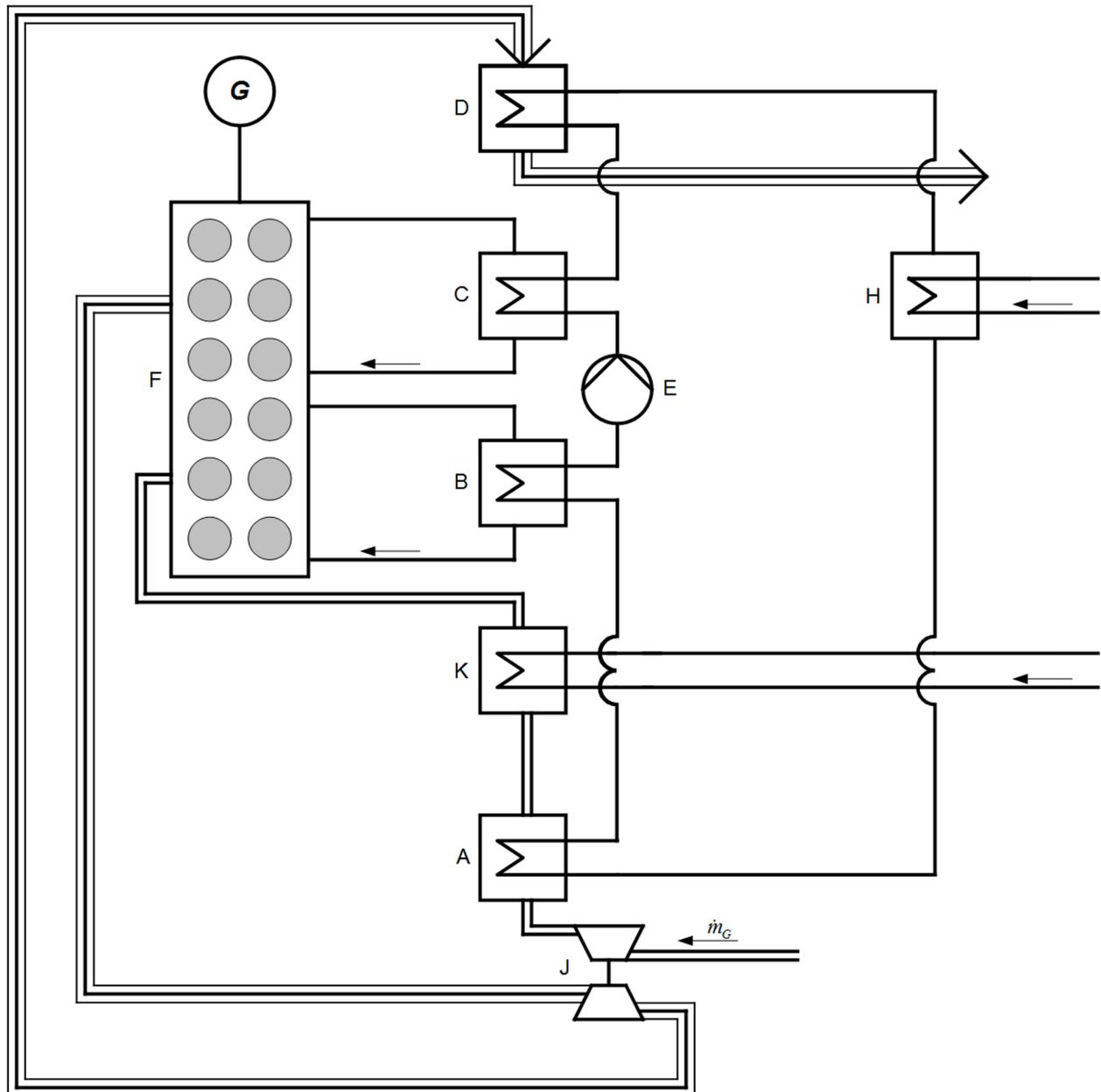


Abbildung 52: Schematischer Aufbau eines Motor-Blockheizkraftwerkes

Daran kann sich ein Abgaswärmeübertrager (D) anschließen. Für Hochtemperaturwärme (Anwendungen bis 400 °C sind bekannt) wird dieser Abgaswärmeübertrager in einem gesonderten Thermoölkreislauf betrieben. Bei entsprechend niedrigen Rücklauftemperaturen kann zusätzliche Wärme aus dem Niedertemperaturgemischkühler (K) nutzbar gemacht werden.

Der Primärkreislauf ist über einen Wärmeübertrager (H) mit dem Fernwärmenetz oder einem anderen Sekundärkreislauf verbunden. Wird hier die geforderte Kühlwasserrücklauf-temperatur überschritten, wird überschüssige Wärme über einen Notkühler (I) an die Umgebung abgegeben. Bei Unterschreitung der Soll-Kühlwasserrücklauf-temperatur wird die Temperatur über eine Vorlaufbeimischung angehoben.

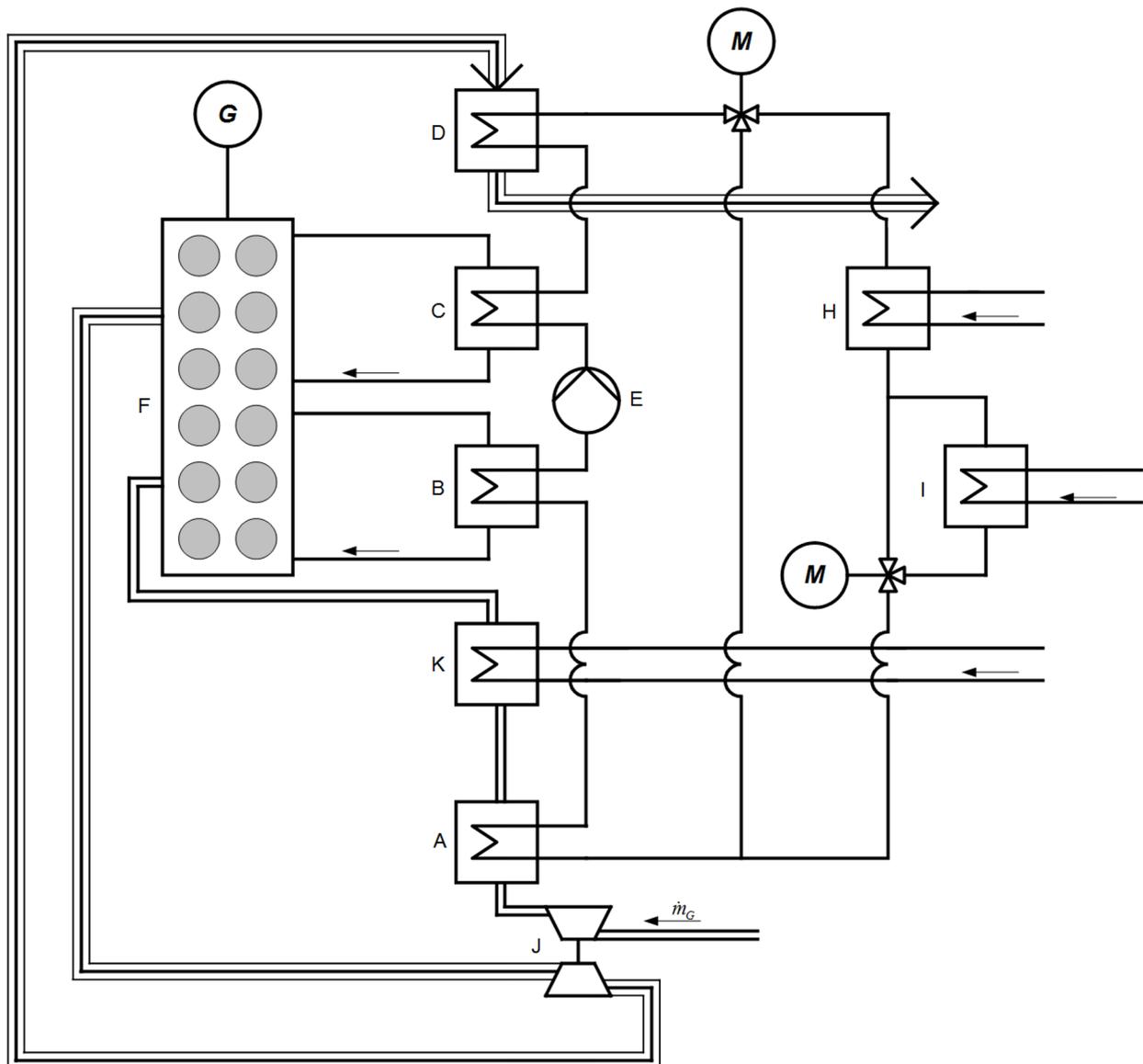


Abbildung 53: Anlagenskizze eines Biogas-Motor-BHKW

In der Literatur wird auf optionale zusätzliche Abgaswärmeübertrager zur Brennwertnutzung bei Biogas-Motor-BHKW hingewiesen. Diese bestehen zur Vermeidung von Korrosion aus keramischen Materialien oder Carbon (Bschor GmbH, SGL Group). Die zusätzlichen Wärmeübertrager sollen direkt in den Fernwärmekreislauf eingebunden werden. Ein verbreiteter Einsatz in der Praxis ist nicht bekannt. [91][92]

Ohne Brennwertwärmeübertrager zeigen Biogas-Blockheizkraftwerke zum Beispiel den im Folgenden dargestellten Zusammenhang zwischen Netztemperaturen und Thermischer Leistung. Abbildung 54 zeigt zunächst das Temperatur-/Leistungsdiagramm für die Zwischenkreise des in Abbildung 53 skizzierten Biogas-BHKW.

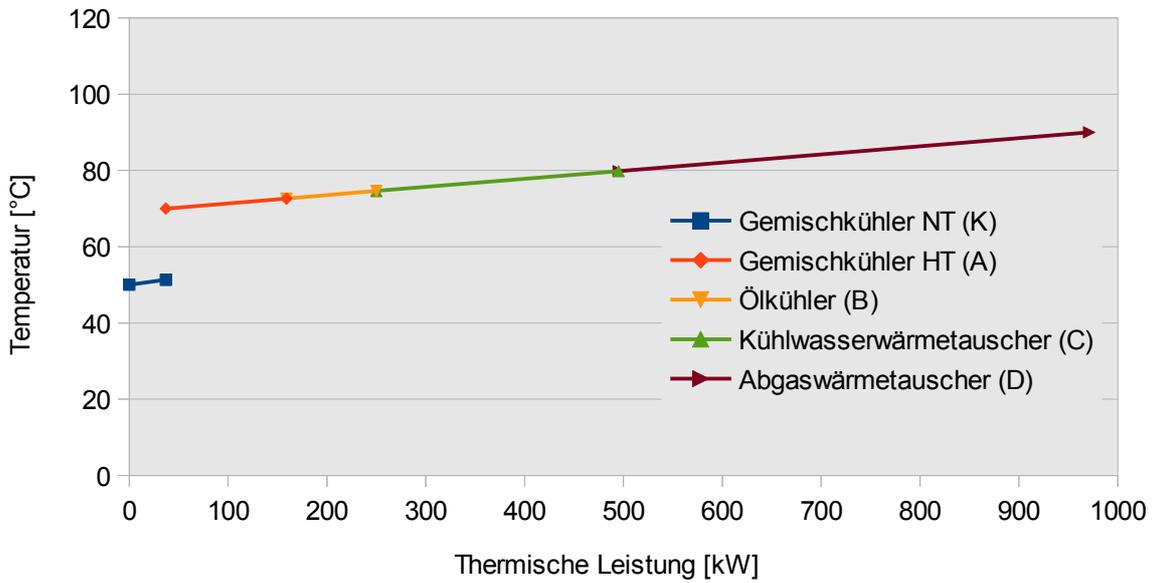


Abbildung 54: Zusammenhang zwischen Vorlauftemperatur und thermischer Leistung in den Zwischenkreisen eines BHKW
 Beispiel: 2G Biogas-BHKW Modul JMS 316. Die Buchstaben hinter den Wärmeübertragerbezeichnungen entsprechen den Bezeichnungen in Abbildung 53

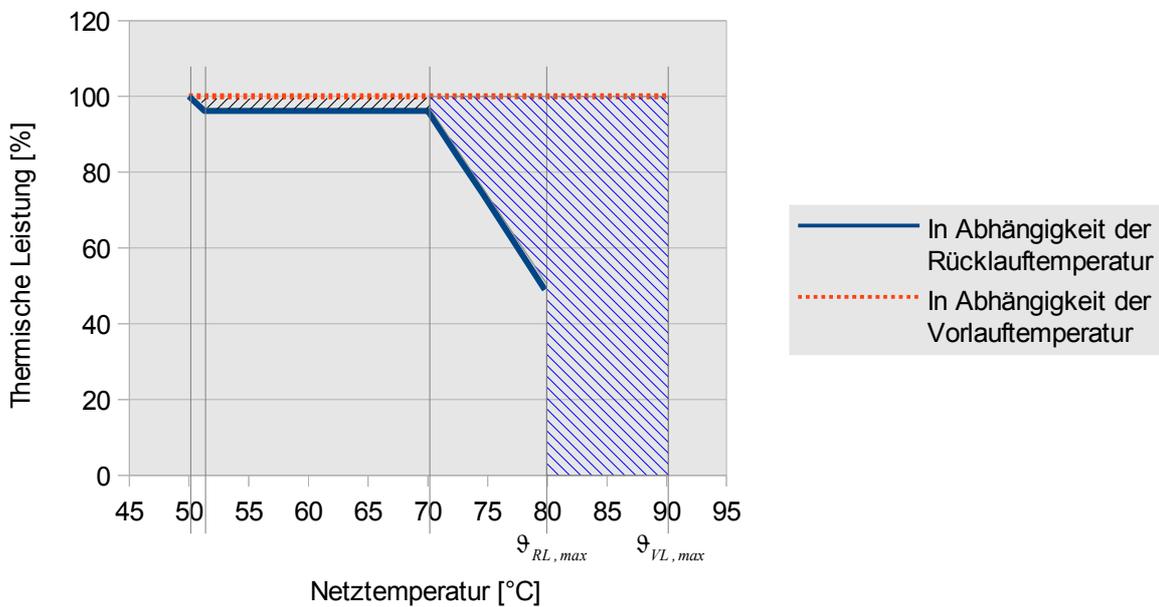


Abbildung 55: Zusammenhang zwischen Netztemperaturen und thermischer Leistung
 Beispiel: 2G Biogas-BHKW Modul JMS 316

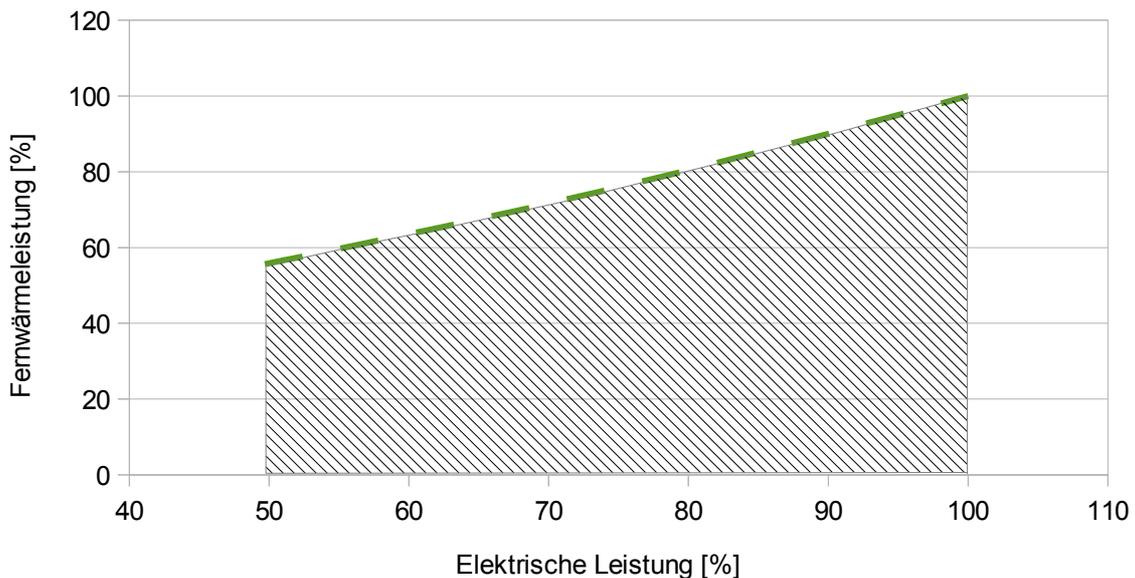
5. Wärmeerzeuger

Für den Betrieb von Wärmenetzen ist der in Abbildung 55 dargestellte Zusammenhang zwischen der Rücklauftemperatur und der auskoppelbaren Leistung (bei gegen Null gehender Grädigkeit in den Wärmeübertragern zwischen Fernwärmenetz und BHKW-Zwischenkreis) wichtig. Zu sehen ist, dass insbesondere oberhalb einer Rücklauftemperatur von 70 °C die auskoppelbare thermische Leistung deutlich sinkt. Oberhalb der Grenztemperatur von 51,3 °C wird die Wärme des Niedertemperaturgemischkühlers vollständig an die Umgebung abgegeben (schwarze 45° Schraffur). Oberhalb von 70 °C wird ergänzend Wärme aus dem Zwischenkreis über den Notkühler an die Umgebung abgegeben (blaue 315°-Schraffur). Fossil befeuerte BHKW, wie in Abbildung 52 dargestellt, schalten bei Überschreiten der oberen Grenztemperatur vollständig ab oder gehen in den Notbetrieb. Die angegebenen Temperaturen können in Abhängigkeit des jeweiligen Blockheizkraftwerkes variieren.

In der Praxis sollte eine Rücklauftemperatur von 70 °C nie erreicht werden. Auslegungstemperaturen für die Nahwärmenetze an Biogasanlagen liegen überwiegend im Vorlauf um 80 °C und im Rücklauf zwischen 40 °C und 65 °C. Auf Grund der in Kapitel 4 dargestellten Zusammenhänge zwischen Vor- und Rücklauftemperaturen können jedoch bei Wärmenetzen mit vielen Altbauten an kalten Tagen auch Rücklauftemperaturen oberhalb von 70 °C auftreten. Entsprechend kann temporär weniger benötigte thermische Leistung ausgekoppelt werden als zur Verfügung steht. Möglichkeiten zur Optimierung der Wärmeauskoppelung werden in 5.2.6 gezeigt.

Neben den Netztemperaturen hängt der Brennstoffnutzungsgrad eines Blockheizkraftwerkes im Betrieb hauptsächlich von der Brennstoffzusammensetzung, der Gemischtemperatur und der Betriebsführung ab. In Abhängigkeit des Energieinhalts des Brennstoffes bzw. der Brennstoffe beim Zündstrahlmotor werden die Brennstoffeinspritzung und der Zündzeitpunkt in Verbindung mit den Kühlmittelströmen so gesteuert, dass die Temperaturen von Zylinderwänden, Kolben und Ventilen im Sollbereich liegen. Der Einsatz klopfeserer und energiereicherer Brennstoffe (höherer Methangehalt) ermöglicht die Erreichung höherer elektrischer Wirkungsgrade, während bei konstanter Brennstoffleistung die nutzbare Wärmeleistung sinkt. [93]

Sowohl bei dem in Abbildung 52 skizzierten BHKW für fossile Brennstoffe als auch bei dem in Abbildung 53 skizzierten BHKW für eine Biogasanlage können durch Variation der eingespritzten Brennstoffmenge in begrenztem Maße die thermische und die elektrische Leistung an den Bedarf beziehungsweise an die verfügbare Brennstoffmenge beim Biogas-BHKW angepasst werden. Wie in Abbildung 56 dargestellt ist, ist jeder aus dem fossil befeuerten BHKW (grün gestrichelte Linie) auskoppelbaren Fernwärmeleistung jeweils eine elektrische Leistung zugeordnet. Jeder elektrischen Leistung ist also eine feste Stromkennzahl zugeordnet. Auf Grund des vorhandenen Notkühlers kann das oben skizzierte BHKW an einer Biogasanlage thermisch flexibler gesteuert werden (schraffierte Fläche in Abbildung 56). Bei jeder elektrischen Leistung können verschiedene Fernwärmeleistungen ausgekoppelt werden. Die Stromkennzahl des Blockheizkraftwerkes an einer Biogasanlage kann also in weitem Rahmen entsprechend der betrieblichen Anforderungen eingestellt werden.



*Abbildung 56: Elektrische Leistung und ausgekoppelte Fernwärmeleistung eines BHKW
(grün gestrichelt: Regelbereich eines BHKW nach Abbildung 52; schraffiert: Regelbereich eines BHKW nach Abbildung 53)*

5.2.3. Allgemeine Betriebsweisen von Biogasanlagen

Aus der Konstruktion, der in den vorhergehenden Abschnitten vorgestellten Technologie einer Biogasanlagen mit Nassfermentation in einem Fermenter, mit direkter Gasnutzung in einem BHKW, ergibt sich eine nur geringe Anpassbarkeit der Leistung. Die meisten Biogasanlagen werden daher mit weitestgehend konstanter elektrischer Leistung betrieben. Sie erreichen hiermit jährlich teilweise über 8.000 Vollbenutzungsstunden.

Es bestehen folgende Ansätze der Leistungssteuerung:

- Gaszwischenspeicherung: Das Biogas wird in einem vergrößerten Gasraum oberhalb des Fermenters oder in separaten Gasspeichern zwischengespeichert. Durch Einsatz größerer oder zusätzlicher BHKW können hiermit Stundenspitzen über einen Tag hinweg dem Strombedarf entsprechend abgefahren werden.
- Trennung der unterschiedlichen Stufen des Biomasseabbaus auf verschiedene Fermenter: Die Methanogenese, der langsamste und empfindlichste Schritt der Biogaserzeugung, wird von den anderen Stufen der Biogaserzeugung getrennt in einem Festbettreaktor durchgeführt. Dies ermöglicht die Erhöhung oder Reduzierung der erzeugten Biogasmenge innerhalb weniger Stunden. [94]
- Die für eine Wärmenutzung verfügbare Leistung lässt sich über die Änderung der Fermentertemperatur im Stundenbereich ohne Veränderung der BHKW-Leistung variieren. Jäkel und Mau geben an, dass Temperaturschwankungen von maximal 3 bis 4 °C keinen Einfluss auf die Biologie hätten. Mesophile Bakterien stürben jedoch bei Temperaturen oberhalb von 45 °C ab. [82]

5. Wärmeerzeuger

- Eine stärkere Reduzierung der Fermentertemperatur über mehrere Tage hinweg führt zu einer reduzierten Gasproduktion und damit niedrigeren BHKW-Leistung, die nach Wiederaufheizen wieder auf die Ausgangsleistung steigt. [82]
- Jahreszeitliche Anpassung der Fütterung: Reduzierung der Fütterung im Sommer und langsame Erhöhung der Substratzufuhr im Herbst bis auf Auslegungskapazität im Winter. Im Frühjahr langsame Reduzierung der Fütterungsmenge. Dies ermöglicht eine saisonale Anpassung der BHKW-Leistung an den Wärmebedarf.

5.2.4. Beispiel Biogasanlage Heitlingen

Am Beispiel der Biogasanlage Heitlingen werden eine Gesamtenergiebilanz für eine Biogasanlage aufgestellt und Optimierungsmöglichkeiten dargelegt. Die Biogasanlage in Garbsen-Heitlingen wurde 2006 in Betrieb genommen und verfügt über ein Gas-Ottomotor-Blockheizkraftwerk mit einer maximalen elektrischen Leistung von 549 kW und einer thermischen Leistung von etwa 553 kW. Als Substrate werden Mais, Hühnertrockenkot, Rindergülle und Roggen-Ganzpflanzensilage (Roggen-GPS) eingesetzt. Das Biogas wird bei einer Solltemperatur von 41,2 °C in einem vollaufmischtem Nassfermenter mit einem Nutzvolumen von 2.650 m³ zuzüglich eines Gasraumes von 650 m³ bei einer Raumbelastung von $B_R = 3,6 \text{ kg oTSl} / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$ erzeugt. Die Wärme des BHKW wird zu einem Teil zur Beheizung von Fermenter und Aktivkohlefilter sowie zu einem anderen Teil zur Versorgung des angeschlossenen Wärmenetzes genutzt. Die Gärreste werden in einem geschlossenen Gärrestebehälter mit einem Nutzvolumen von 3.500 m³ zwischengelagert und anschließend landwirtschaftlich verwertet. Die Gastrocknung erfolgt über eine im Erdreich verlegte Rohrleitung, an die sich der Aktivkohlefilter zur Entschwefelung anschließt.

Der Fermenter wird über in der Betonwand liegende Heizschlangen beheizt, die mit einer minimalen Grädigkeit zwischen Substrat und Heizwasserrücklauf kleiner 5 K und einer maximalen Spreizung größer 25 K betrieben wird. Die Fermenterheizung arbeitet dabei diskontinuierlich. Das Heißwasser wird aus der hydraulischen Weiche im Technikgebäude mit einer getaktet betriebenen Pumpe entnommen. In regelmäßigen Abständen wird die Pumpe aktiviert, und jeweils so lange betrieben bis die erforderlichen Temperaturen im Fermenter erreicht werden. Über eine Rücklaufbeimischung (3-Wegeventil) wird die notwendige Vorlauftemperatur eingestellt.

Der Primärkühlkreislauf des BHKW wird mit Pumpen mit konstanter Drehzahl betrieben. Die Pumpe im sekundären Kreislauf des BHKW ist einstellbar. Die Wärmenetzpumpe ist ebenfalls einstellbar. Alle weiteren Pumpen sind drehzahl geregelt.

2010 wurde ein Fernwärmenetz zur Abwärmenutzung der Biogasanlage in Betrieb genommen. Zusätzlich wurde in dem Technikgebäude der Biogasanlage ein Gaskessel mit 500 kW thermischer Leistung installiert. In den Abbildungen 57 und 58 ist die Verschaltung der Hauptkomponenten in der Technikzentrale der Biogasanlage vor und nach einem Umbau im Sommer 2012 dargestellt.

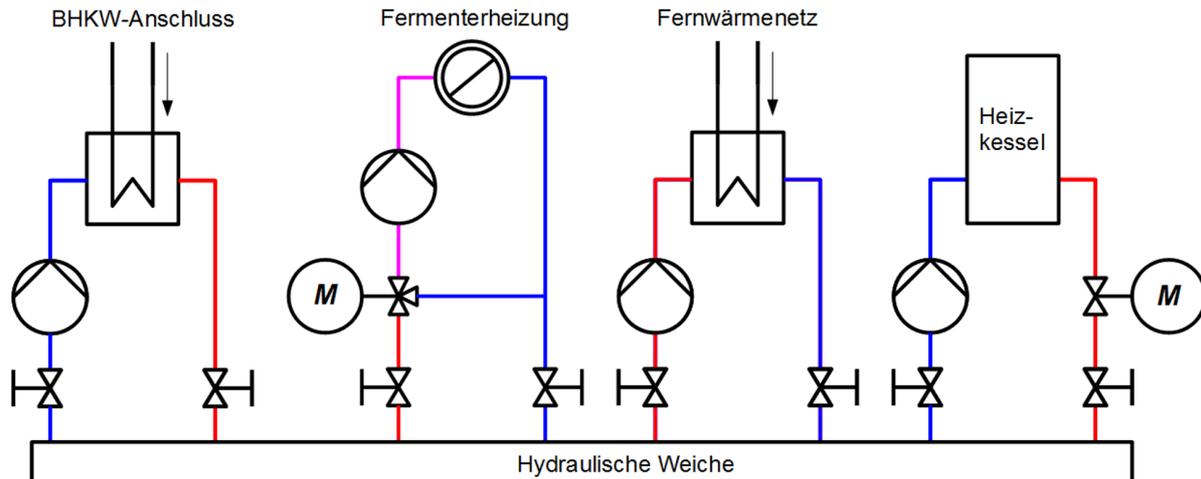


Abbildung 57: Wärmetechnische Verschaltung der Hauptkomponenten der Biogasanlage Heitlingen vor dem Umbau

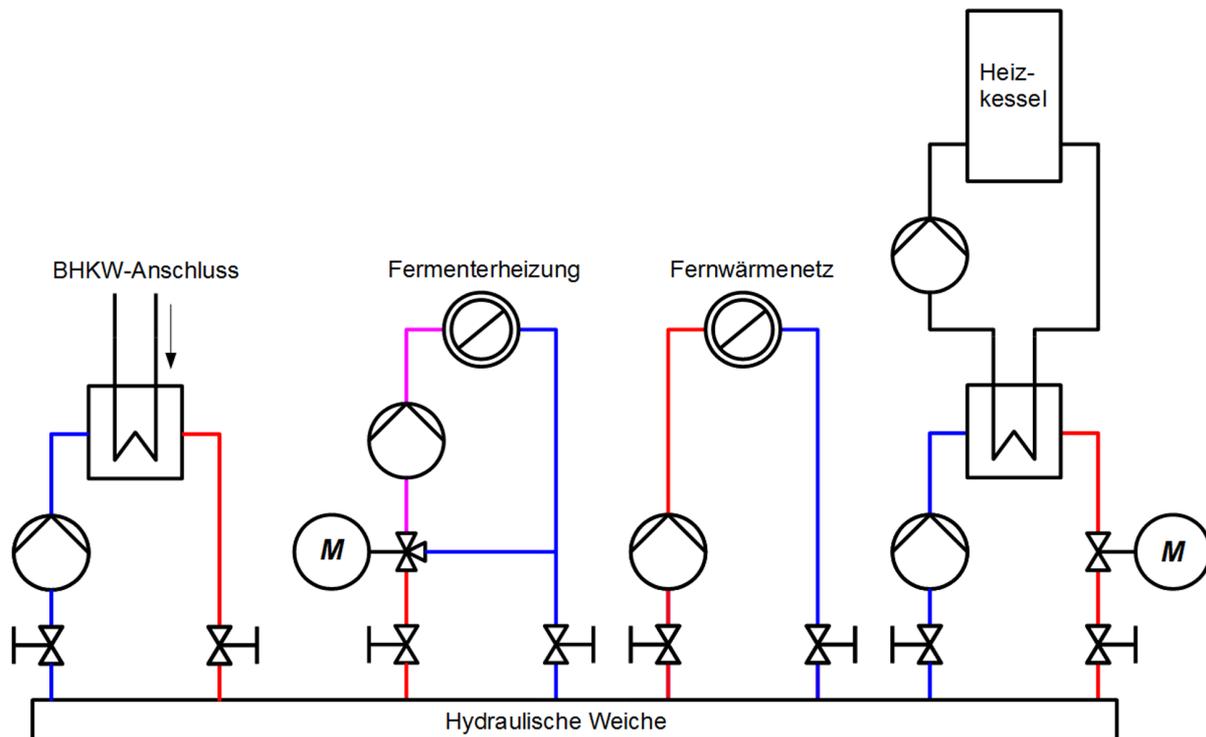


Abbildung 58: Hydraulische Verschaltung der Hauptkomponenten der Biogasanlage Heitlingen nach dem Umbau 2012

Mit dem Ausbau des Wärmeübertragers zwischen dem Zwischenkreis im Technikgebäude und dem Fernwärmenetz reduziert sich die Grädigkeit zwischen BHKW und Fernwärmenetz. Die Einspeisetemperaturen im Fernwärmenetz können damit erhöht und alle Wärmeabnehmer ganzjährig mit Vorlauftemperaturen von mehr als 70 °C versorgt werden (Ergebnis eigener Messungen beim entferntesten Wärmeabnehmer). Die Zeiten höchster Wärmelast im Netz, in denen die in Abbildung 55 dargestellte Grenztemperatur für die

5. Wärmeerzeuger

Rücklaufemperatur am BHKW-Anschluss überschritten wird und der Notkühler Wärme an die Umgebung abgibt, können durch den Umbau ebenfalls reduziert werden. Insbesondere in den Wintermonaten, in denen auf Grund der in Kapitel 4 dargestellten Zusammenhänge hohe Rücklaufemperaturen im Fernwärmenetz auftreten, kann nun mehr Wärme ausgekoppelt werden.

5.2.4.1. Messungen an der Biogasanlage

Seit dem 10. März 2012 werden in der Biogasanlage mit einem geeichten Wärmemengenzähler Last- und Temperaturprofile der Fermenterheizung aufgezeichnet. Auf Grund der begrenzten Speicherkapazität und des notwendigen Personaleinsatzes bei der Messdatenauslesung kann bei Datenaufzeichnungen im 15-Minutentakt kein kontinuierlicher Verlauf aufgezeichnet werden. Insgesamt konnten im Fermenterheizkreis bis Juli 2013 mehr als 27.000 Datensätze aufgezeichnet werden.

Im Messzeitraum wurden die Messergebnisse neben dem Wetter und dem Nutzerverhalten durch folgende das gesamte Wärmenetz sowie die Fermenterheizung betreffende Ereignisse bzw. Eingriffe deutlich beeinflusst:

- Ausfall oder geplante Abschaltung der Biogasanlage an 3 Tagen im Jahr 2012
- Nutzung der Speicherkapazität des Fermenters zur kurzzeitigen Erhöhung der im Fernwärmenetz verfügbaren KWK-Wärmemenge (manuelle Reduktion der Fermentersolltemperatur an einzelnen kalten Tagen)
- Direkte Anbindung der hydraulischen Weiche in der Heizzentrale an das Fernwärmenetz durch Ausbau eines Wärmeübertragers
- Einbau eines Bypassventils in der letzten Übergabestation

Durch den Ausbau des Wärmeübertragers sowie Einbau des Bypassventils konnte die Verfügbarkeit von Vorlaufemperaturen oberhalb von 70°C in allen Übergabestationen deutlich erhöht werden.

5.2.4.2. Energieflüsse in der Biogasanlage

Da Biogasanlagen gegenüber anderen Wärmeerzeugungssystemen deutlich komplexere Energieströme aufweisen, sind diese in einem Sankey-Diagramm in Abbildung 59 dargestellt. Neben den eigenen Messdaten wurden Fermentertemperaturen aus der Prozessüberwachung und ein von den Anlagenbetreibern bereitgestelltes Gutachten mit Angaben zu Substraten sowie verkauften Strom- und Wärmemengen für die Aufstellung des Sankey-Diagramms genutzt. Fehlende Daten wurden über Literaturangaben abgeschätzt.

In dem Diagramm ist zu erkennen, dass ein großer Teil der eingesetzten Energie nicht genutzt wird. Neben den Energieverlusten über den Fermenter und die Gärreste sind hier insbesondere die Wärmeverluste über den Notkühler zu nennen. Diese beruhen auf der

mangelnden Gleichzeitigkeit von Wärmeerzeugung und Wärmenutzung. In den kommenden Abschnitten und Kapiteln wird dies verdeutlicht.

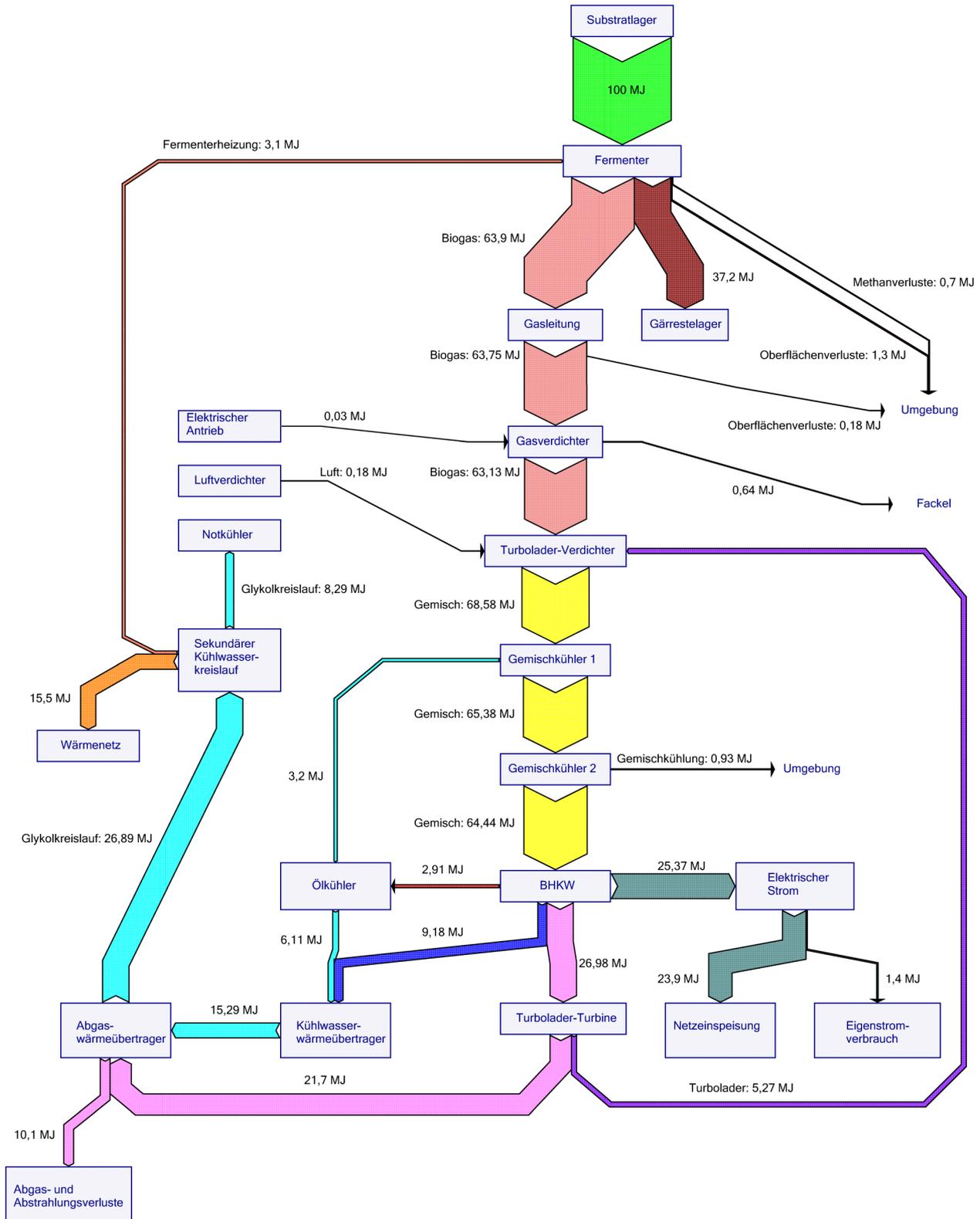


Abbildung 59: Sankey-Diagramm für die Biogasanlage Heitlingen

5.2.4.3. Standardlastprofile für die Fermenterheizung – Temperaturklassenverfahren

Die Wärmeverbräuche der Fermenter von Biogasanlagen schwanken im Jahres- und Tagesverlauf. Gerber stellt in [95] ein Verfahren zur Simulation von Fermentern vor. Hiermit ließen sich auch Lastkurven für die Fermenterheizung erstellen. Dieses Verfahren ist auf Grund der notwendigen komplexen Berechnungen derzeit nicht zur Vorhersage der zu erwartenden Heizlasten im laufenden Betrieb einsetzbar. Im Gebäudebereich hat sich die Nutzung von Standardlastprofilen als praktikable Lösung zur Vorhersage von Wärmelasten etabliert. Bisher sind für Fermenter keine Standardlastprofile vorhanden.

Um die Anwendbarkeit der Standardlastprofile zu erleichtern, wurde für diese Arbeit entschieden, die Standardlastprofile für Fermenter in Anlehnung an zwei bestehende Verfahren zur Bestimmung von Lastprofilen für Wohngebäude zu erstellen. Die Standardlastprofile beruhen bei Anlehnung an die VDI 4655 auf 15 Minuten-Werten für Typtage und bei Anlehnung an die VKU BGW Praxisinformation P2007/13 auf Stundenwerten für nach geometrischer Viertagemitteltemperatur klassifizierte Tage. [49][34]

Die gemessenen Tageswärmeverbräuche wurden vor der detaillierten Auswertung über der Tagesmitteltemperatur (siehe Abbildung 60) und der Zeit (siehe Abbildung 61) aufgetragen. Dabei sind einige Unstimmigkeiten aufgefallen.

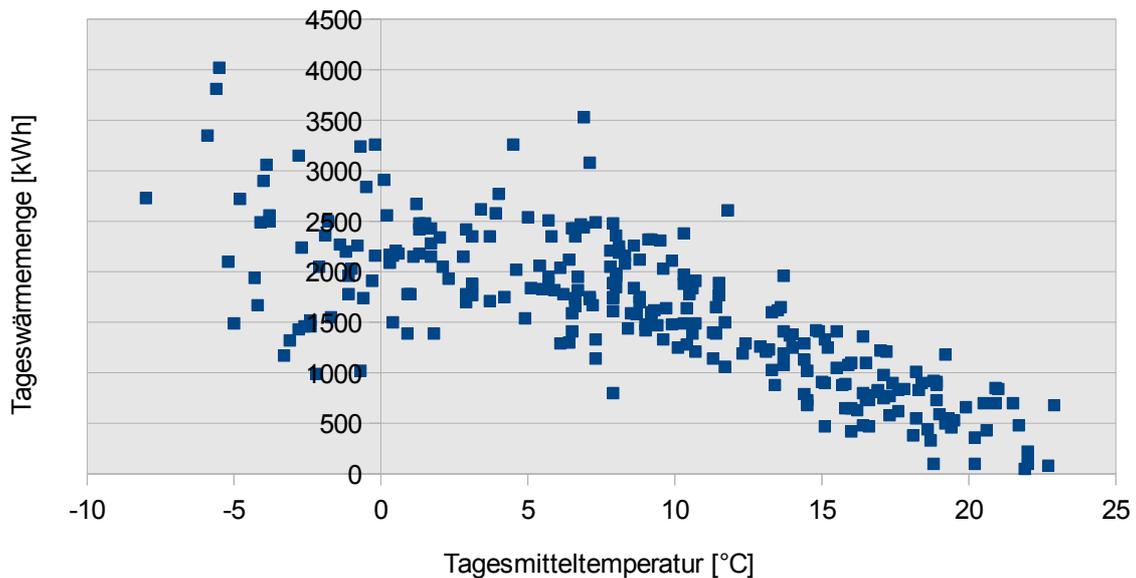


Abbildung 60: Gemessene Tageswärmeverbräuche des Fermenters

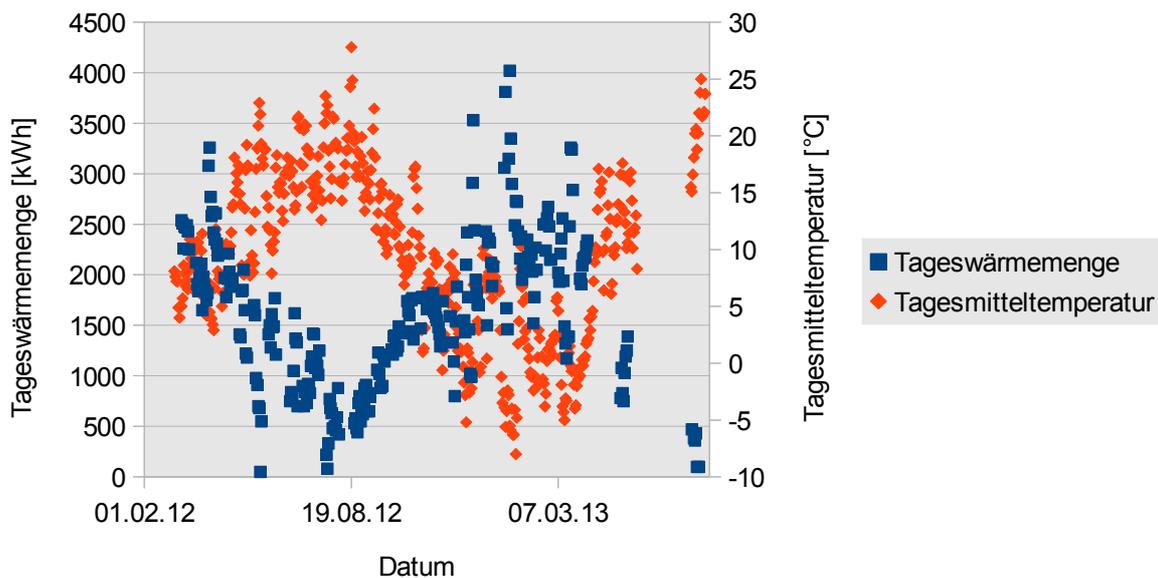


Abbildung 61: Gemessene Tageswärmeverbräuche des Fermenters und Tagesmitteltemperaturen über die Zeit (Tagesmitteltemperaturen vom DWD für Standort Flughafen Hannover-Langenhagen [96])

Wie in den Abbildungen 60 und 61 zu sehen ist, variiert die Tageswärmemenge bei vergleichbaren Tagesmitteltemperaturen im Winter deutlich stärker als im Sommer. Gespräche mit den Anlagenbetreibern sowie Betrachtungen der Fermentertemperaturprotokolle haben ergeben, dass die Fermentersolltemperatur in Abhängigkeit des Wärmebedarfs im Fernwärmenetz variiert wurde. Eine reduzierte Fermentersolltemperatur führte somit für einen begrenzten Zeitraum zu einem verringerten Wärmebedarf des Fermenters. Entsprechend führte eine spätere Erhöhung der Solltemperatur während der Aufheizzeit zu einem erhöhten Wärmeverbrauch des Fermenters. Erfasste Unterschiede im Wärmeverhaltensverhalten des Fermenters zwischen den Zeiten mit den niedrigsten Fermentertemperaturen (minimale gemessene Temperatur 35,5 °C) und den höchsten aufgezeichneten Fermentertemperaturen (41,6 °C) können somit auf manuelle Einflüsse zurückgeführt werden.

Für die Bestimmung der Standardlastprofile wurden die Tage mit erfassten Änderungen an den Solltemperaturen sowie allen weiteren Tagen mit dokumentierten manuellen Eingriffen in den Fermenterwärmebedarf nicht berücksichtigt. Nach der Bereinigung bleiben je 96 Datensätze an 208 Messtagen übrig.

Die Verwendung der Sigmoidfunktion in wärmeren oder kälteren Jahren sowie die Anwendung auf andere Fermenter erfordert eine Klimabereinigung und Normierung. Mit diesen nach Hellwig [43] normierten Daten wird in Anlehnung an die Regeln der VKU BGW Praxisinformation P2007/13 mittels nichtlinearer Regression (Details zur Berechnung siehe Anhang A) die Näherungsfunktion

5. Wärmeerzeuger

$$h(\vartheta_D) = \frac{A}{\left[1 + \left(\frac{B}{\vartheta_D - \vartheta_0}\right)^C\right]} + D \quad (17)$$

mit den Koeffizienten und Konstanten $A=1,599$, $B=-26,744^\circ\text{C}$, $C=5,193$, $D=0$, $\vartheta_0=40^\circ\text{C}$ bestimmt. Die Konvergenztoleranz der Sigmoidfunktion beträgt $6,59 \cdot 10^{-7}$ und das Residuum der Fehlerquadrate $7,059$.

In Abbildung 62 sind die verwendeten Messdaten sowie die berechnete Sigmoidfunktion dargestellt.

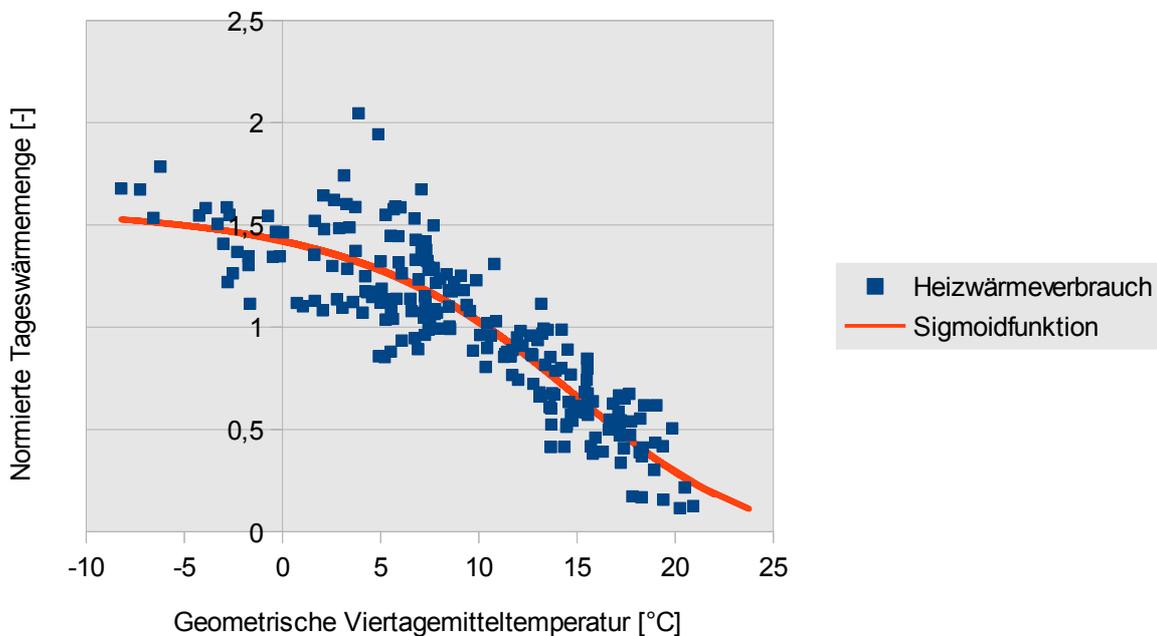


Abbildung 62: Klimabereinigte und normierte Heizwärmeverbräuche und Sigmoidfunktion für den Fermenter über der Geometrischen Viertagemitteltemperatur

Für die Tageslastgänge wurden in Anlehnung an die Praxisinformation entsprechende Stundenfaktoren für den Tagesmitteltemperaturbereich von -10°C bis $+25^\circ\text{C}$ ermittelt. In Abbildung 63 sind drei berechnete Tageslastgänge für unterschiedliche Temperaturklassen aufgetragen.

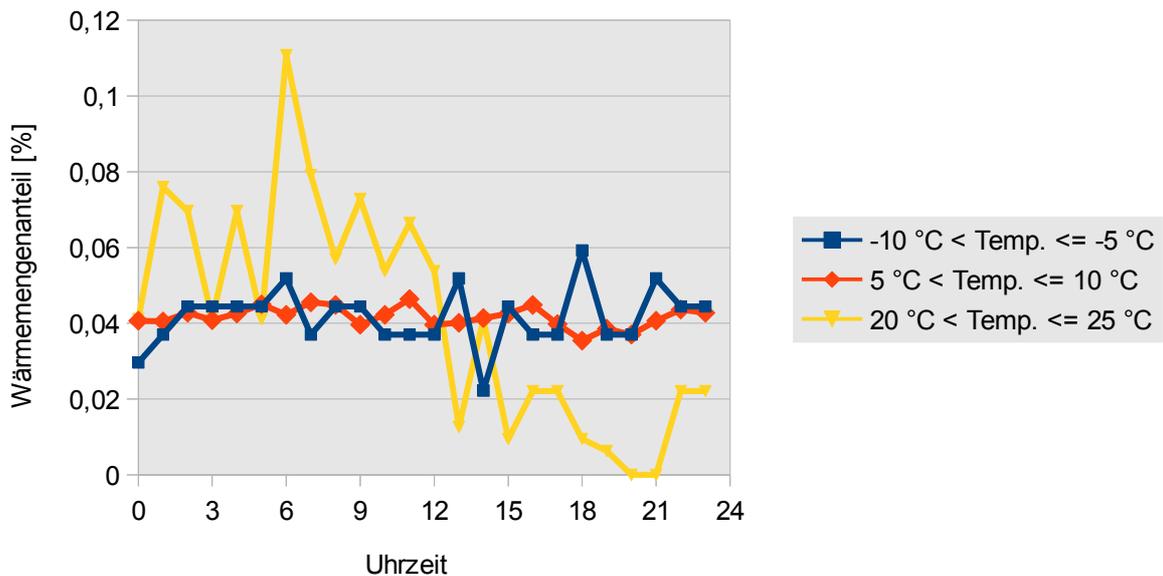


Abbildung 63: Beispiele für Tageslastgänge der Fermenterheizung für drei Temperaturklassen

Dort ist zu erkennen, dass in der höchsten Temperaturklasse die größten relativen Wärmemenschwankungen im Tagesverlauf auftreten. Hierbei spielen insbesondere die geringe absolute stündliche Wärmemenge sowie die Häufigkeit der nutzbaren Werte in dieser Temperaturklasse eine Rolle. Die Tage mit den verschiedenen Temperaturklassen traten im Messzeitraum sehr unterschiedlich häufig auf (Übersicht siehe Anhang A). Des Weiteren wurde die eingesetzte Fermenterheizungspumpe im Taktbetrieb eingesetzt. Bei Außentemperaturen oberhalb von etwa 25 °C lief sie stets im Bereich der minimalen Takt-dauer. Eine präzise Steuerung der Wärmemenge war hier kaum möglich. Zusätzlich konnte der eingebaute Wärmemengenzähler nur auf 10 kWh genau messen, sodass teilweise für einen Zeittakt keine Wärmemengen ausgegeben wurden, obwohl Volumenstrom und Temperaturdifferenz nicht null waren.

5.2.4.4. Standardlastprofile für die Fermenterheizung – Typtagverfahren

Die zweite gängige Methode zur Bestimmung von Standardlastprofilen ist in der VDI 4655 [49] dargestellt. Diese Richtlinie wurde für Wohngebäude entwickelt. Dementsprechend sind in der Richtlinie Standardlastprofile für Ein- und Mehrfamilienhäuser getrennt nach Heiz- und Trinkwarmwasserbedarfen sowie für elektrische Energie enthalten. Zusätzlich sind Angaben zu der Anzahl der Typtage je Jahr (Testreferenzjahr) in Abhängigkeit der Klimazone und dem damit verbundenen relativen Wärmebedarf je Tag vorhanden. Für die Standardlastprofile nach VDI 4655 werden die Tage eines Jahres auf 10 Typtage aufgeteilt (siehe auch Kapitel 8).

5. Wärmeerzeuger

Bei der Bestimmung der Zugehörigkeit eines Tages zu einem bestimmten Typtag wird auf die 7-Tage-Mitteltemperatur zurückgegriffen. In Abbildung 64 sind die gemessenen Wärmeverbräuche getrennt nach heiteren und bedeckten Tagen über die 7-Tage-Mitteltemperatur aufgetragen.

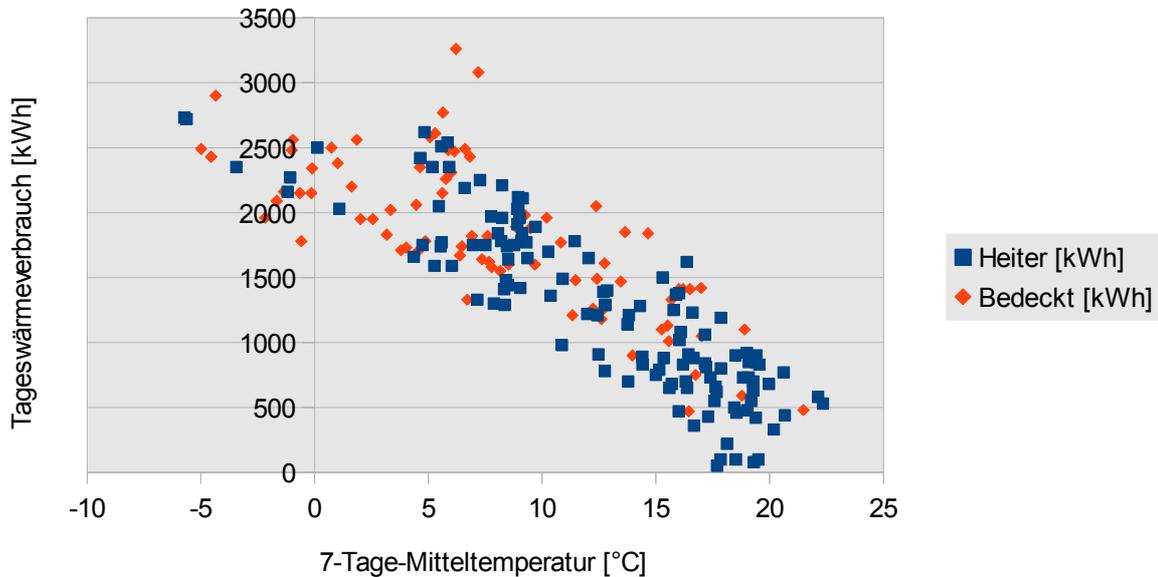


Abbildung 64: Tageswärmeverbrauch des Fermenters in Abhängigkeit der 7-Tage-Mitteltemperatur, aufgeteilt nach heiteren und bedeckten Tagen

In der Abbildung wird wieder, wie bereits in 5.2.4.3. dargelegt, die große Streuung der Messdaten deutlich. Da die Biogasanlage in Heitlingen unabhängig von Wochen- und Feiertagen kontinuierlich betrieben wird, ist die Anzahl unterschiedlicher Typtage bei Anwendung der Systematik der VDI 4655 auf die Fermenterheizung reduzierbar (vergleiche Kapitel 8).

Tabelle 14: Für Fermenterheizung modifizierte Typtage im Raum Hannover

Typtag	Bezeichnung	Bedingung	Anzahl
SXX	Sommer	$\vartheta_{M7} > 15^\circ C$	81
ÜXB	Übergangszeit, bedeckt	$\vartheta \leq T_{M7} \geq 15^\circ C$, $\theta > \frac{5}{8}$	106
ÜXH	Übergangszeit, heiter	$5 \leq \vartheta_{M7} \geq 15^\circ C$, $\theta \leq \frac{5}{8}$	41
WXB	Winter, bedeckt	$\vartheta_{M7} < 5^\circ C$, $\theta > \frac{5}{8}$	104
WXH	Winter, heiter	$\vartheta_{M7} < 5^\circ C$, $\theta \leq \frac{5}{8}$	33

Wie bereits weiter oben beschrieben liegen nur für insgesamt 208 Tage verwertbare Messdaten vor. Nach Aufteilung auf die Typtage ergibt sich folgendes Bild:

Tabelle 15: Gemessene Wärmemengen des Fermenters nach Typtagen

Typtag	Anzahl Messwerte	Minimale Wärmemenge [kWh]	Durchschnittliche Wärmemenge [kWh]	Maximale Wärmemenge [kWh]
SXX	71	50	787	1620
ÜXB	40	900	1898	3260
ÜXH	59	700	1623	2540
WXB	27	1700	2181	2900
WXH	11	1660	2292	2730

In Tabelle 15 ist zu sehen, dass nur für wenige Typtage ausreichende Messdaten für die Erstellung statistisch abgesicherter Referenzlastprofile zur Verfügung stehen. Die Erstellung von Standardlastprofilen in Anlehnung an die VDI 4655 ist damit nicht möglich. Daher wird an dieser Stelle abgebrochen.

In Abbildung 65 sind beispielhaft Tageslastgänge für die einzelnen Typtage aufgetragen. Gegenüber Abbildung 63 beruhen diese kumulierten Tageslastgänge direkt auf Messwerten jeweils eines Tages.

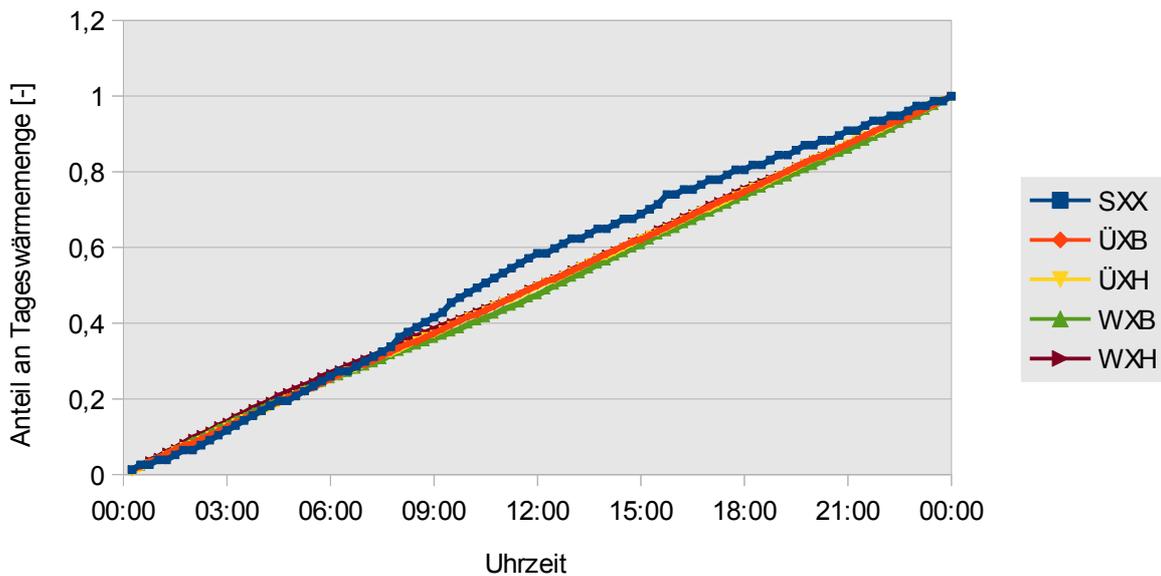


Abbildung 65: Beispiele für mögliche Tages-Referenzlastprofile in Anlehnung an VDI 4655 für Fermenterheizung. Darstellung mit kumuliertem relativem Wärmeverbrauch

5.2.4.5. Bewertung der Verfahren zur Bildung von Standardlastprofilen für Fermenter

Bei einer Fortführung der Datenaufzeichnung könnten für den Fermenter statistisch abgesicherte Tageslastprofile in Anlehnung an die VDI 4655 erstellt werden. Die Definition der Typtage erweist sich für die Fermenterheizung als nicht geeignet. So basieren die Temperaturgrenzen auf der Feststellung, dass bei der über sieben Tage gemittelten Außentemperatur oberhalb von etwa 15 °C außer in Mehrfamilienhäusern kein Heizwärmebedarf vorhanden ist. Bei Mitteltemperaturen unterhalb von etwa 5 °C treten bei Wohngebäuden Sprünge auf. Beides ist bei Fermentern nicht festzustellen. Wie in Abbildung 62 zu sehen, weist der Fermenterwärmebedarf einen kontinuierlichen Verlauf ohne Sprünge auf, der mit einer Sigmoidfunktion, bezogen auf die geometrische Mitteltemperatur über vier Tage, angenähert werden kann.

Die Herstellung eines linearen Zusammenhangs zwischen der Sieben-Tage-Mitteltemperatur und dem Tageswärmebedarf auf Basis der derzeit vorliegenden Daten, wie für das Typtagverfahren nach VDI 4655 erforderlich, erscheint nicht sinnvoll. Auf Grund der sehr starken Streuung des Wärmeverbrauchs aller Messtage, die einem Typtag zugeordnet werden, sind jedoch keine nutzbaren Voraussagen des Heizwärmebedarfs eines Tages bei Kenntnis des Jahresheizwärmebedarfs zu erwarten. Auch ohne diese Anpassung der Tageswärmebedarfe ließen sich Aussagen über die Uhrzeit des Auftretens des maximalen Fermenterheizwärmebedarfs an den Typtagen treffen.

An Hand der Daten scheint eine Unterscheidung zwischen bedeckten und heiteren Tagen jedoch durchaus sinnvoll zu sein (s. Tabelle 15). Für eine abschließende Bewertung müssten auch hier mehr Daten zur Verfügung stehen.

Die Bildung von Standardlastprofilen für den Fermenter über Sigmoidfunktionen in Anlehnung an die VKU BGW Praxisinformation P2007/13 [34] und die Arbeit von Hellwig [43] ist auch mit vergleichsweise wenigen Messdaten möglich. In den Abbildungen 66 und 67 sind jeweils mit der Sigmoidfunktion berechnete Wärmemengen den entsprechenden gemessenen Wärmemengen für unterschiedliche Zeiträume gegenübergestellt.

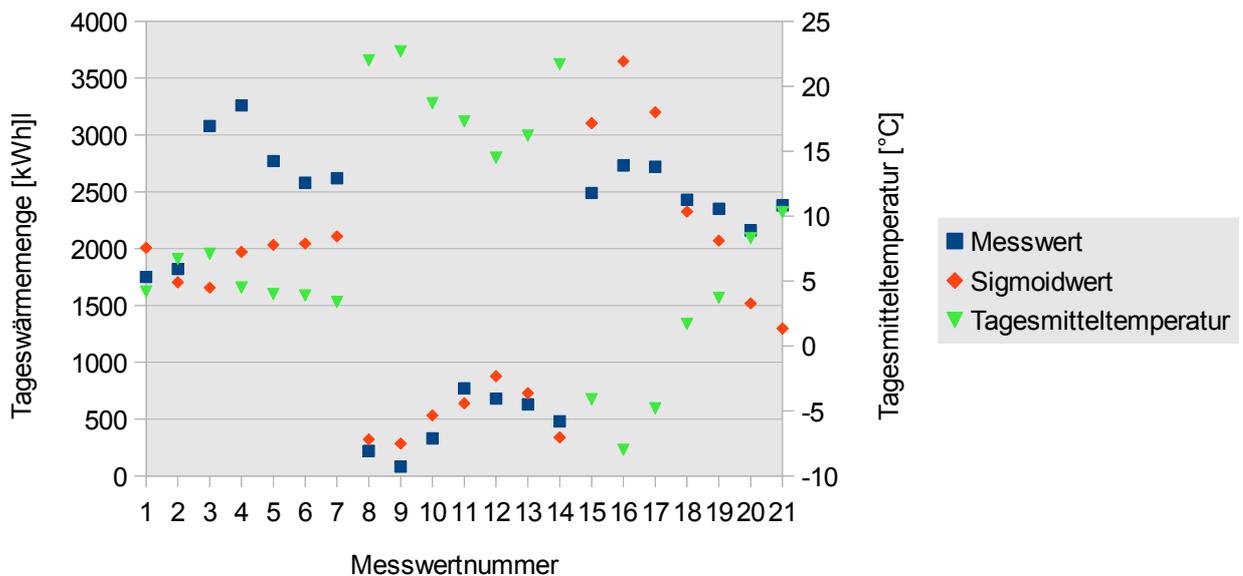


Abbildung 66: Vergleich von gemessenen und berechneten Tageswärmemengen bei unterschiedlichen Tagesmitteltemperaturen

Bei den Tageswärmeverbräuchen treten an vielen Tagen mehr als 50 % Abweichung auf. Neben dem Einfluss der Bewölkung werden diese Abweichungen möglicherweise durch nicht erfasste Änderungen im Fermenterbetrieb (z.B. Menge und Temperatur des Substrates) verursacht. Mit den vorliegenden Daten ist keine Systematik hinsichtlich des relativen Fehlers beim Tageswärmebedarf erkennbar. Für eine Verbesserung der Ergebnisse sind deutlich ausgeweitete Messzeiträume mit einer Erweiterung der Datensätze erforderlich.

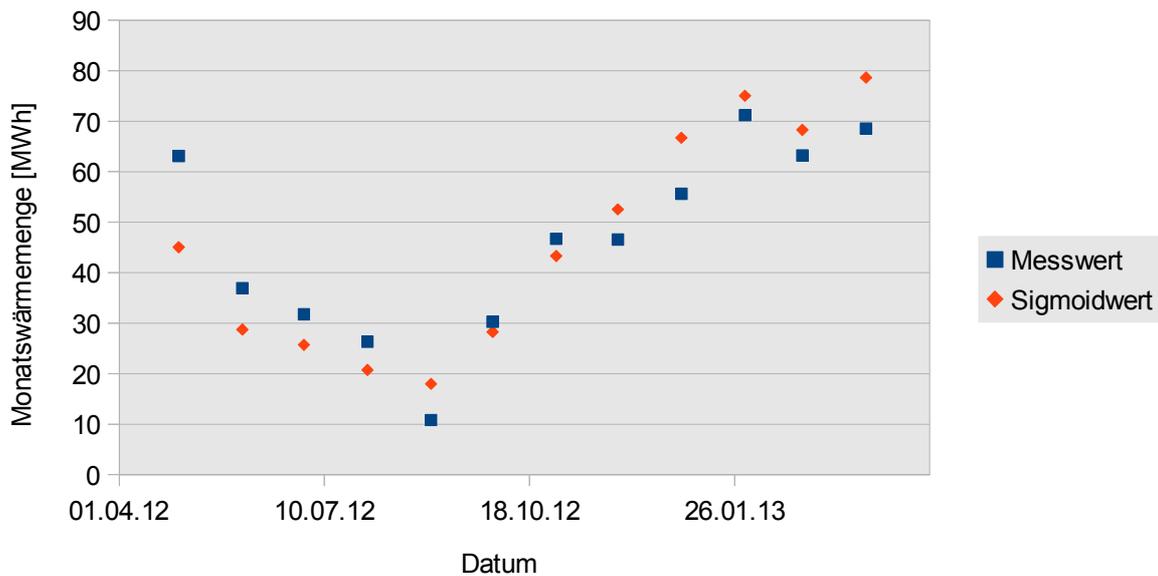


Abbildung 67: Vergleich von gemessenen und berechneten Monatswärmeverbräuchen

Der maximale relative Fehler bei der Berechnung der Monatsverbräuche beträgt 66 % (August 2012) und das Minimum 5 % (Januar 2013). Der größte relative Fehler tritt in dem Monat mit dem niedrigsten und der kleinste relative Fehler in dem Monat mit dem höchsten gemessenen Wärmeverbrauch auf. Dies ist auf Grund der weiter oben genannten Messunsicherheiten bei niedrigen Wärmeverbräuchen sowie der mangelnden Messwerte oberhalb von einer Tagesmitteltemperatur von 22,7 °C zu erwarten. Mehr Messpunkte können hier die Genauigkeit von auf den Standardlastprofilen basierenden Lastprognosen erhöhen.

5.2.5. Zusammenfassung Einflussfaktoren Fermenterenergieeffizienz

Zusammengefasst wird die energetische Effizienz von Fermentern durch verschiedenste bauliche und betriebliche Faktoren beeinflusst. In der Tabelle 16 sind die maßgeblichen baulichen Einflussfaktoren und in Tabelle 17 die maßgeblichen betrieblichen Einflussfaktoren aufgeführt. Der Fermenterheizungswirkungsgrad η_F wird dazu definiert als das Verhältnis von Heizenergieinhalt des produzierten Gasstromes $\dot{H}_{i, Gas}$ zu zugeführter Heizwärmemenge \dot{Q}_{FH} .

$$\eta_F = \frac{\dot{H}_{i, Gas}}{\dot{Q}_{FH}} \quad (18)$$

Tabelle 16: Bauliche Einflussfaktoren auf die energetische Effizienz von Fermentern

Komponente?	Wie wird beeinflusst?
Volumen	$V \uparrow \Rightarrow \dot{Q}_{FH} \uparrow, \eta_F \rightarrow, \eta_{Biogasanlage} \rightarrow$
Oberfläche- zu Volumenverhältnis	$\frac{A}{V} \uparrow \Rightarrow \dot{Q}_{FH} \uparrow, \eta_F \downarrow, \eta_{Biogasanlage} \downarrow$
Wärmedämmung	$u \uparrow \Rightarrow \dot{Q}_{FH} \uparrow, \eta_F \downarrow, \eta_{Biogasanlage} \downarrow$

Tabelle 17: Betriebliche Einflussfaktoren auf die energetische Effizienz von Fermentern

Einflussfaktor?	Wie wird beeinflusst?
Fermentertemperatur	$\vartheta \uparrow \Rightarrow \dot{Q}_{FH} \uparrow, \eta_F \uparrow, \eta_{Biogasanlage} \uparrow$
Umgebungstemperatur	$\vartheta \uparrow \Rightarrow \dot{Q}_{FH} \downarrow, \eta_F \uparrow, \eta_{Biogasanlage} \uparrow$
Bewölkung/Verschattung	$\theta \uparrow \Rightarrow \dot{Q}_{FH} \uparrow, \eta_F \uparrow, \eta_{Biogasanlage} \uparrow$
Raumbelastung	$B_R \uparrow \Rightarrow \dot{Q}_{FH} \uparrow, \eta_F \uparrow, \eta_{Biogasanlage} \downarrow$

5.2.6. Optimierte Wärmenutzung in der Biogasanlage

Wie in dem Sankeydiagramm in Abbildung 59 zu sehen ist, gehen in der Biogasanlage Heitlingen wie auch in anderen Biogasanlagen größere Wärmemengen ungenutzt verloren. Ein Ansatz zur Reduzierung ungenutzter Wärmemengen ist die Nutzung des Fernwärmerücklaufs zur Fermenterbeheizung. Die in Abbildung 68 aufgetragenen Messwerte aus der Biogasanlage Heitlingen weisen in der Mehrzahl der Tage tagesgemittelte Fermentervorlauftemperaturen im Bereich von 50 °C bis 60 °C auf.

Aus den Messungen in mehreren Gebäuden (siehe Kapitel 4) und Aufzeichnungen der Anlagenbetreiber ist bekannt, dass die Fernwärmerücklauftemperatur häufig über 50 °C liegt und somit für die Fermenterbeheizung ausreichend hoch ist.

5. Wärmeerzeuger

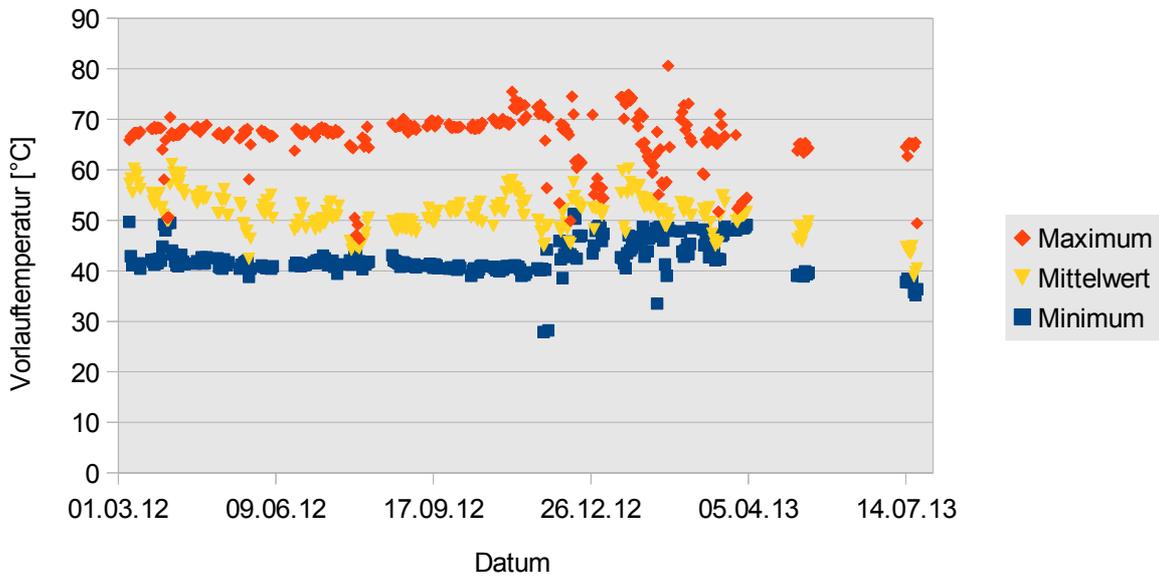


Abbildung 68: Vorlauftemperatur der Fermenterheizung – Tagesmittelwert, -maximum und -minimum

Für die Gesamteffizienz der Anlage bringt die Nutzung des Fernwärmerücklaufs zur Fermenterheizung keinen Vorteil, so lange die Mindesttemperatur im Rücklauf zum BHKW 75 °C beträgt. Für eine Erhöhung der nutzbaren Wärmemenge kann zusätzliche Wärme aus dem 2. Gemischkühler (s. Abbildung 53, Wärmeübertrager K) ausgekoppelt werden.

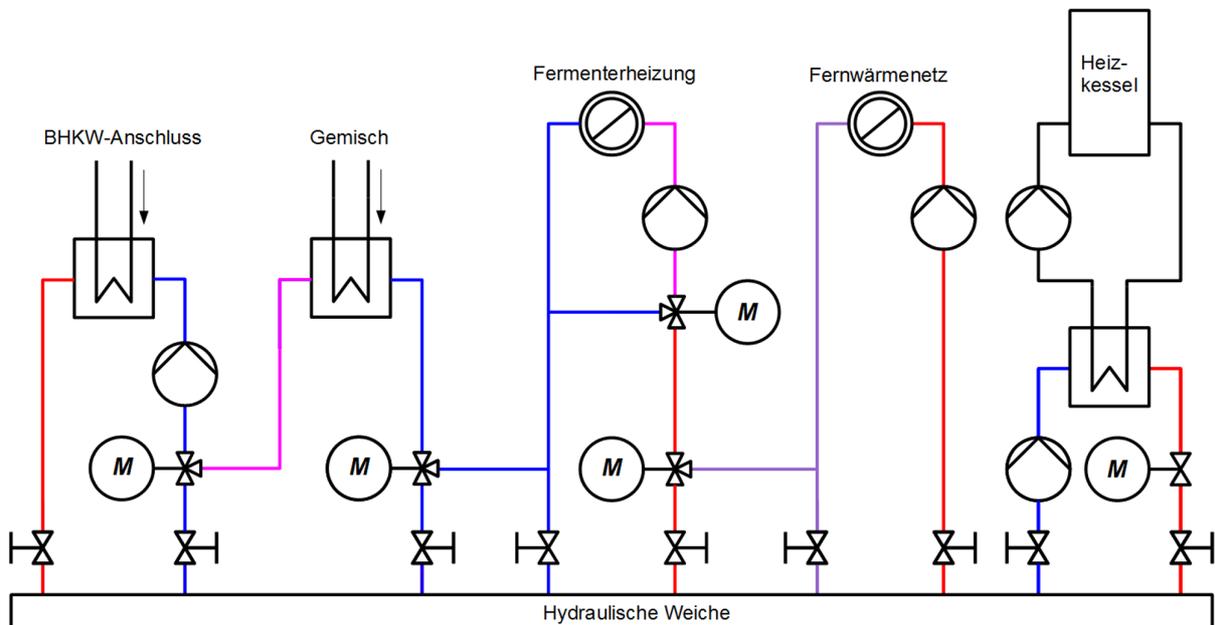


Abbildung 69: Beispiel für Nutzwärmeauskopplung aus dem 2. Gemischkühler

Mit der in Abbildung 69 gezeigten Verschaltung der Komponenten kann in Abhängigkeit

der Rücklaufemperatur bis zu etwa 19 kW zusätzlich ausgekoppelt werden. Unter den in Anhang A aufgeführten Annahmen ergibt sich für die auskoppelbare Wärmemenge der in Abbildung 70 dargestellte Zusammenhang.

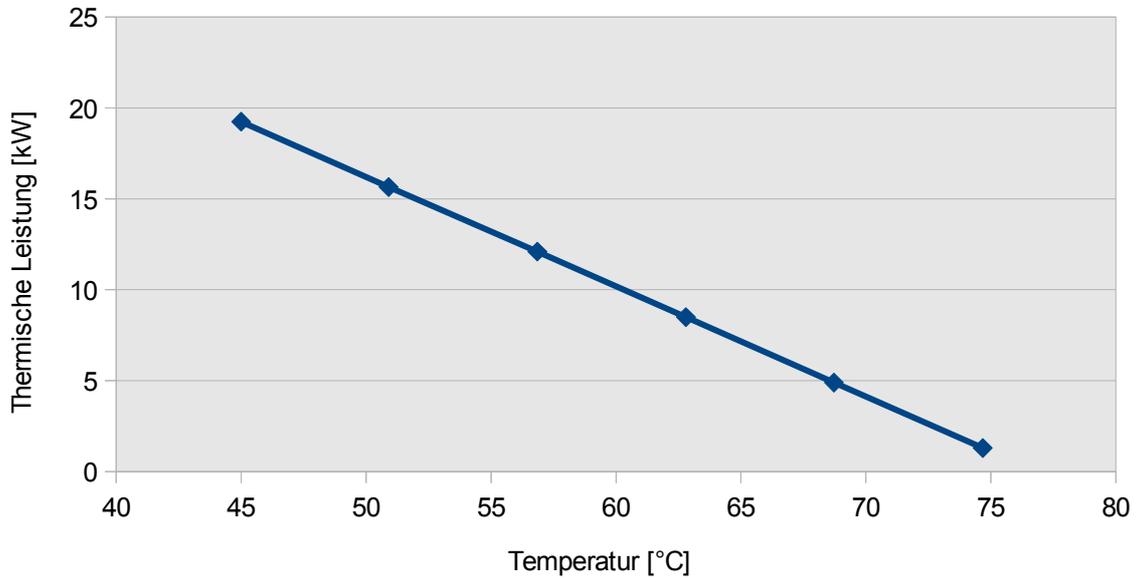


Abbildung 70: Aus dem 2. Gemischkühler auskoppelbare Wärmemenge in Abhängigkeit der Rücklaufemperatur

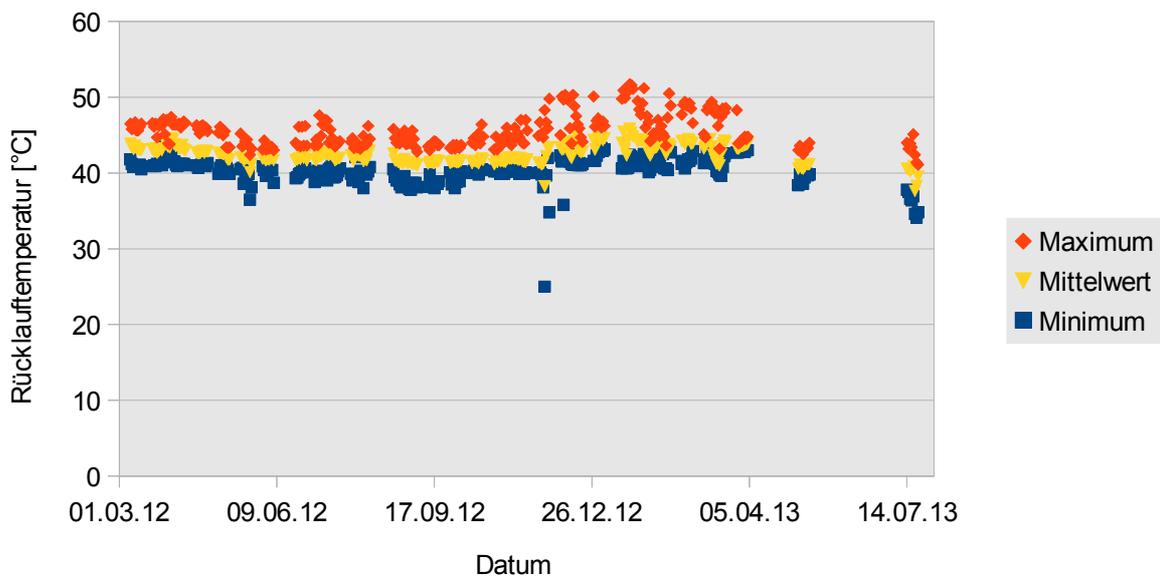


Abbildung 71: Rücklaufemperatur der Fermenterheizung – Tagesmittelwert, -maximum und -minimum

5. Wärmeerzeuger

Die gemessenen Fermenterrücklauftemperaturen (Abbildung 71) lassen erwarten, dass die Wärme aus dem 2. Gemischkühler größtenteils ausgekoppelt werden könnte. Für Übergangszeiten und Winter könnten somit ohne erhöhten Brennstoffeinsatz zusätzlich zwischen 15 und 19 kW Wärmeleistung bereitgestellt werden.

5.3. Wärmepumpen

Wärmepumpen sind im eigentlichen Sinne keine Wärmequellen wie Kessel, Motoren und Gasturbinen. In Wärmepumpen wird das Temperaturniveau eines Wärmestroms unter Einsatz mechanischer (Elektro- und Gasmotorwärmepumpen) oder thermischer Energie (Absorptionswärmepumpen) erhöht. Der Einsatz von Wärmepumpen erfolgt sowohl als ausschließliche Wärmebereitstellungseinheit als auch in Verbindung mit anderen Wärmequellen in der Grundlast oder in Abhängigkeit der aktuellen Wirtschaftlichkeit. In mehreren kleinen Wärmenetzen in Deutschland sowie in großen Fernwärmenetzen im Ausland werden oder wurden Elektro- und Gasmotorwärmepumpen eingesetzt (z.B. Klinikum Region Hannover in Wunstorf). Der Einsatz großer Absorptionswärmepumpen in Wärmenetzen ist nicht bekannt. Daher werden diese im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Maximale Leistung:	ca. 30 MW [97]
Maximale Vorlauftemperatur:	ca. 98 °C [98]
Maximale Leistungszahl:	< 12
Hilfsenergieträger:	Elektrische Energie, Erdgas, Propangas

5.3.1. Motorwärmepumpen

Motorwärmepumpen werden als ein- oder mehrstufige Kompressionswärmepumpen ausgeführt. Der Zusammenhang zwischen zugeführter Hilfsenergie $P_{zu, Verd}$ und nutzbarer Wärmemenge \dot{Q}_{ab} wird durch die Leistungszahl ε beziehungsweise den COP beschrieben.

$$\varepsilon = COP = \frac{\dot{Q}_{ab}}{P_{zu, Verd}} \quad (19)$$

In der Betriebsweise ist zwischen unter- und überkritischen Wärmepumpen zu unterscheiden. In unterkritischen Wärmepumpen strömt das warme Fluid (z.B. Sole oder Luft) von der Wärmequelle in die Primärseite des Verdampfers. Auf der Sekundärseite nimmt das Kältemittel der Wärmepumpe (z.B. NH₃, R134a – Tetrafluorethan) die Wärme aus dem Fluid auf und verdampft isotherm. Der Kältemitteldampf wird anschließend in dem Verdichter komprimiert, wobei sich das Kältemittel erhitzt. In dem folgenden Kondensator kühlt sich der Kältemitteldampf zunächst ab und kondensiert dann isotherm. Die frei werdende Wärme wird an das Wärmenetz abgegeben. Das flüssige Kältemittel strömt anschließend durch eine Drossel. Dort wird das Kältemittel entspannt, wodurch sich die Kältemitteltemperatur reduziert. Das abgekühlte Kältemittel wird wieder in den Verdampfer zurückgeführt. Durch den Verzicht auf einen Zwischenkreis zwischen Fernwärmenetz und Kältemittelkreislauf werden Energieverluste auf Grund der Grädigkeit des zusätzlichen Wärmeübertragers vermieden.

5. Wärmeerzeuger

Die Effizienz der unterkritischen Wärmepumpen hängt dabei maßgeblich von der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle (Punkt 1) und Vorlauftemperatur des Heizkreislaufes (Punkt 7) ab (siehe auch Anhang A, Abbildung 133). Bei genauer Betrachtung ist es der Quotient aus Enthalpiedifferenz zwischen Verdichterein- und austritt sowie Drosselein- und austritt, wie in Gleichung (20) dargestellt. [99]

$$\varepsilon = \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_4} \approx \frac{T_7}{T_7 - T_1} \quad (20)$$

Abbildung 72 zeigt den idealen Zusammenhang zwischen den Netztemperaturen und der relativen thermischen Leistung (normiertes Verhältnis von thermischer Leistung zu Antriebsleistung) einer einstufigen Wärmepumpe im unterkritischen Betrieb. Untere und obere Grenze des Arbeitsbereiches sind durch das eingesetzte Kältemittel sowie die Anlagenkonstruktion bedingt. Die zugrunde liegenden Daten sind in Anhang A hinterlegt.

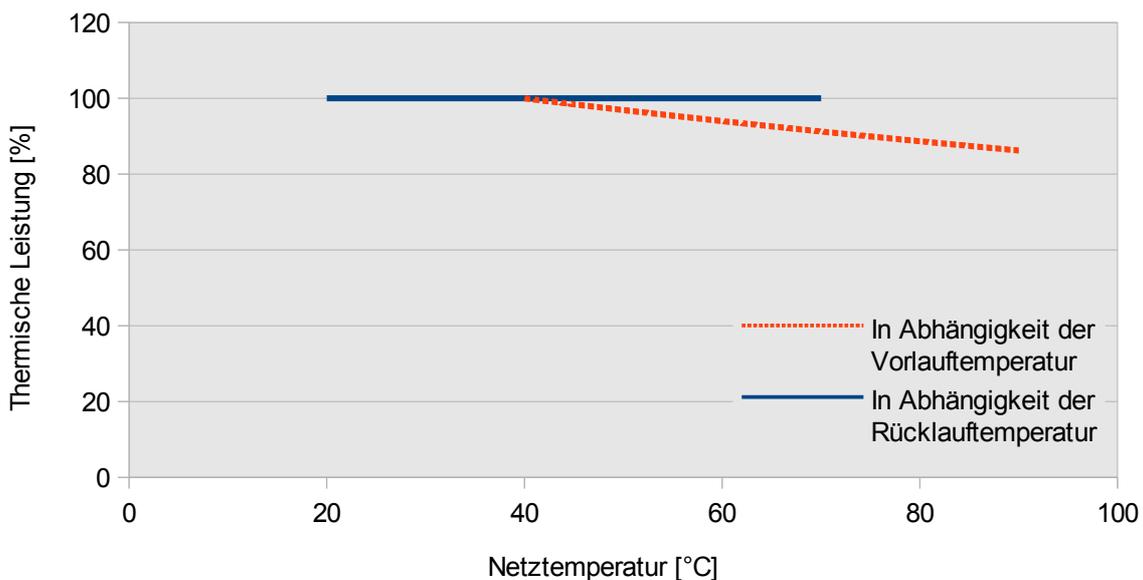


Abbildung 72: Relative thermische Leistung in Abhängigkeit der Netztemperaturen bei einer idealen, unterkritisch betriebenen Wärmepumpe (konstante Wärmequellentemperatur und konstante Vorlauf- oder Rücklauftemperatur)

Es ist in Abbildung 72 zu erkennen, dass die auf die elektrische Leistung bezogene thermische Leistung mit steigender Vorlauftemperatur sinkt. Dagegen ist die thermische Leistung bei der unterkritisch betriebenen Wärmepumpe unabhängig von der Netzrücklauftemperatur.

Überkritische Wärmepumpen weisen eine gegenüber unterkritischen Wärmepumpen abweichende Funktionsweise auf. Überkritische Wärmepumpen zum Beispiel mit dem Kältemittel Kohlendioxid (CO_2) werden mit Drücken und Temperaturen oberhalb des Tripelpunktes betrieben. Das warme Fluid der Wärmequelle gibt in einem Verdampfer die Wärmeenergie an das Kältemittel ab. Dabei verdampft das Kältemittel isotherm. Der Kältemitteldampf wird mit einem Verdichter auf einen höheren Druck verdichtet. Das dabei wärmer werdende Gas wird in einem anschließenden Wärmeübertrager ohne zu kondensieren abgekühlt. Die abgegebene Wärme wird von dem Wärmenetzwasser aufgenommen und einer Nutzung zugeführt. Das abgekühlte Kältemittel wird nach dem Wärmeübertrager in einer Drossel entspannt und dabei kondensiert. Das flüssige Kältemittel wird schließlich wieder dem Verdampfer zugeführt.

Für ideale Wärmepumpen, die im überkritischen Bereich betrieben werden, gilt die Leistungszahl für den modifizierten, idealen Lorenz-Prozess (siehe auch Anhang A, Abbildung 133). [100]

$$COP_{LZ} = \frac{T_5 - T_6}{T_5 - T_6 - T_4 \cdot \ln\left(\frac{T_5}{T_6}\right)} \quad (21)$$

Der Zusammenhang zwischen den Temperaturen und der erzielbaren relativen thermischen Leistung bei einer realen überkritisch betriebenen Wärmepumpe ist in Abbildung 73 dargestellt.

5. Wärmeerzeuger

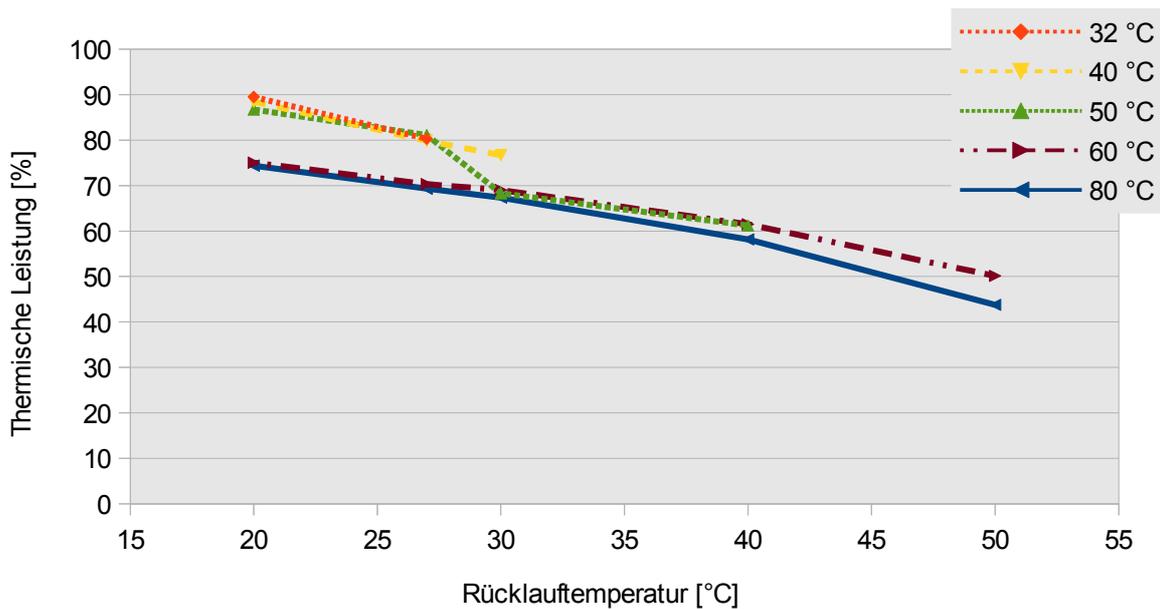


Abbildung 73: Relative thermische Leistung in Abhängigkeit der Rücklauftemperatur bei einer überkritisch betriebenen Wärmepumpe für fünf verschiedene Vorlauftemperaturen
(Beispielwärmepumpe Thermea HHR 1000-6(345), Eigene Berechnung auf Datenbasis [101], Quellentemperatur 6 °C)

Deutlich sind hier die Einflüsse der Vor- und Rücklauftemperaturen auf die nutzbare thermische Leistung zu erkennen. Niedrige Vor- und Rücklauftemperaturen führen bei Wärmepumpen im überkritischen Arbeitsbereich zu hohen Wärmegewinnen. Mit steigenden Temperaturen nehmen die Wärmegewinne ab. Die Grädigkeit zusätzlicher Wärmeübertrager beim Einsatz von Zwischenkreisen zwischen Kältemittelkreislauf und Fernwärmenetz würde somit die Leistungsfähigkeit der Wärmepumpen reduzieren. Die Wärmepumpen sind daher optimal direkt in das Wärmenetz einzubinden, wie auch für die folgenden Diagramme angenommen. Ebenfalls wird für die Diagramme eine direkte Einbindung der Wärmequelle angenommen.

Die Wärmepumpen können für unterschiedliche Quellentemperaturen ausgelegt werden. In Abbildung 74 ist der Zusammenhang zwischen thermischer Leistung der idealen Wärmepumpe sowie einer realen überkritisch betriebenen Wärmepumpe und der Quellentemperatur dargestellt. Wärmequellen mit niedrigstem Temperaturniveau sind beispielsweise Kühlhäuser (Bereich I). Im mittleren Temperaturbereich II befinden sich oberflächennahe Geothermieanlagen oder Abwasseranlagen. Höhere Temperaturniveaus (Bereich III) sind in der Abluft von Rechenzentren oder dem Kühlwasser von Industriebetrieben zu finden, die in ländlichen Regionen jedoch nur sehr vereinzelt vorzufinden sind.

Die Abbildung 74 wurde unter der Annahme einer konstanten Vorlauftemperatur von 80 °C und einer Rücklauftemperatur von 50 °C erstellt. Die normierte, relative thermische Leistung der idealen Wärmepumpe über der Quellentemperatur ist dabei unabhängig davon, ob die Wärmepumpe über- oder unterkritisch betrieben wird. Allerdings werden für die Normierung deutlich unterschiedliche Bezugswerte herangezogen. Für die unterkritisch betrie-

Die ideale Wärmepumpe beträgt die Leistungszahl 7,85 und für die überkritisch betriebene Wärmepumpe 11,35.

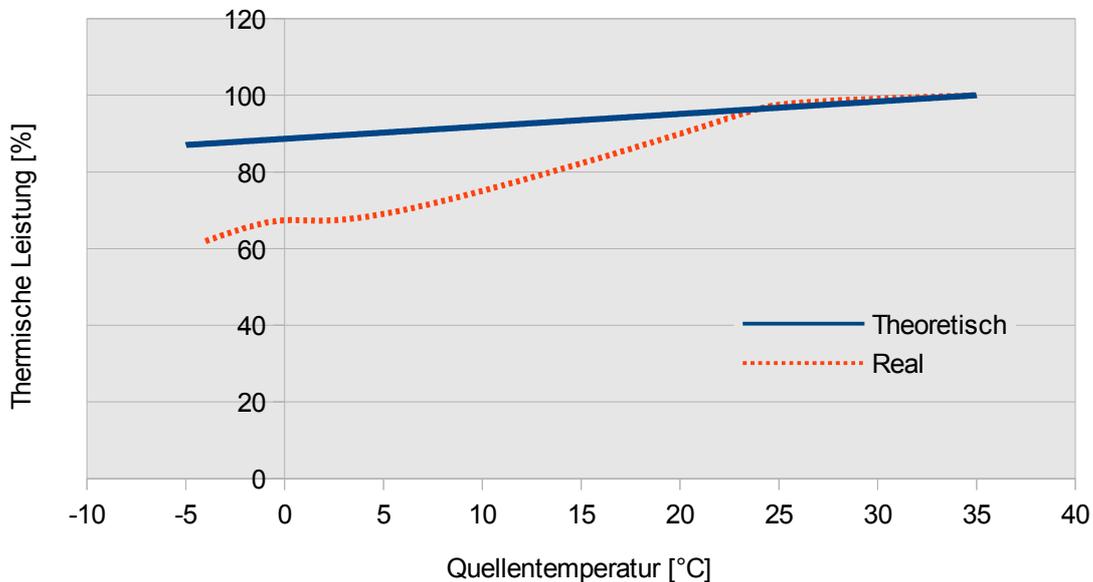


Abbildung 74: Relative thermische Wärmepumpenleistung in Abhängigkeit der Quelltemperatur (konstante Vor- und Rücklaufemperatur) (Eigene Berechnungen auf Datenbasis [101])

Die reale Wärmepumpe erreicht deutlich geringere Leistungszahlen als die theoretische. Den vorliegenden Daten ist die Ursache der Abweichung sowie der Zusammenhang zwischen realen und theoretischen Leistungszahlen nicht zu entnehmen. Lambauer et. al. [102] rechnen mit einem Faktor von 0,5 zwischen der Leistungszahl der theoretischen und der realen Wärmepumpe. Die realen, überkritisch betriebenen Wärmepumpen von Thermea zeigen ausweislich der Datenblätter deutlich größere und mit den Betriebsbedingungen variierende Unterschiede zwischen realer und theoretischer Leistungszahl. Für die überkritisch betriebene reale Wärmepumpe und die ideale Wärmepumpe ist in Abbildung 75 die Leistungszahl COP über der Wärmequellentemperatur aufgetragen. Der Abbildung liegen die gleichen Betriebsbedingungen wie Abbildung 74 zugrunde. [101]

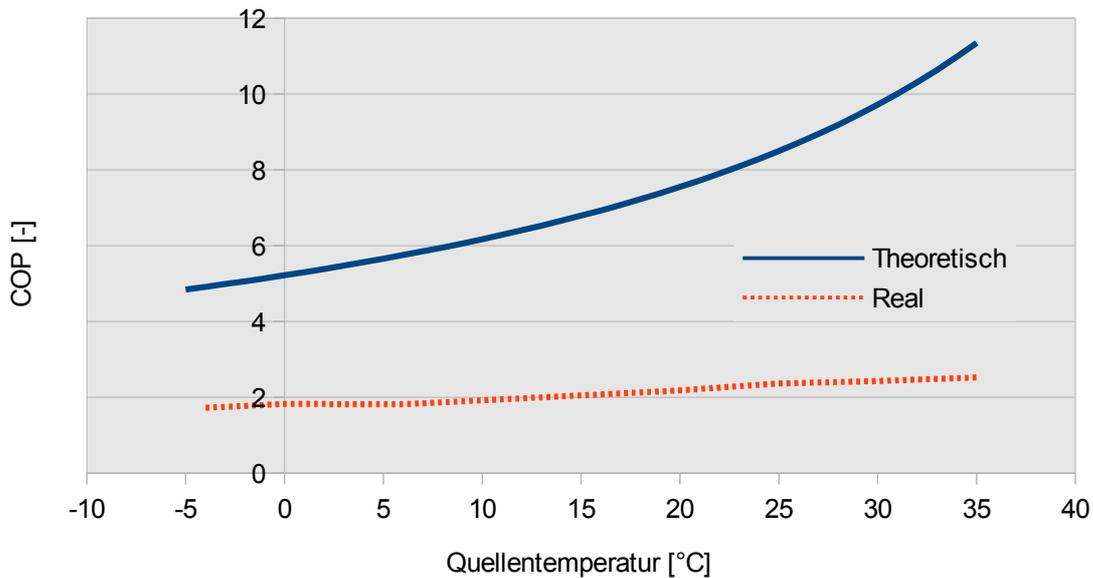


Abbildung 75: COP über Quelltemperatur von realer und idealer Wärmepumpe im überkritischen Bereich (Eigene Berechnungen auf Datenbasis [101])

Für den Betreiber einer Wärmepumpe ist neben den oben dargestellten Zusammenhängen der elektrische Energiebedarf beziehungsweise der elektrische Leistungsbedarf von hohem Interesse. Für die bereits oben als Beispiel verwendete überkritische Wärmepumpe ist der Zusammenhang zwischen Vorlauftemperatur der Wärmepumpe bei unterschiedlichen Rücklauftemperaturen in Abbildung 76 dargestellt.

Hier ist deutlich zu sehen, dass sowohl die Vorlauf- als auch die Rücklauftemperatur relevante Einflüsse auf die Leistungszahl (COP) und somit notwendige Antriebsleistung der Wärmepumpe haben. In dem für Wärmenetzen relevanten Vorlauftemperaturbereich von 60 °C bis 80 °C besteht jedoch kaum eine Vorlauftemperaturabhängigkeit der Leistungszahl. Hier überwiegt der Einfluss der Rücklauftemperatur, die in realen Nahwärmenetzen zwischen minimal etwa 35 °C im Sommer und über 50 °C im Winter liegen kann.

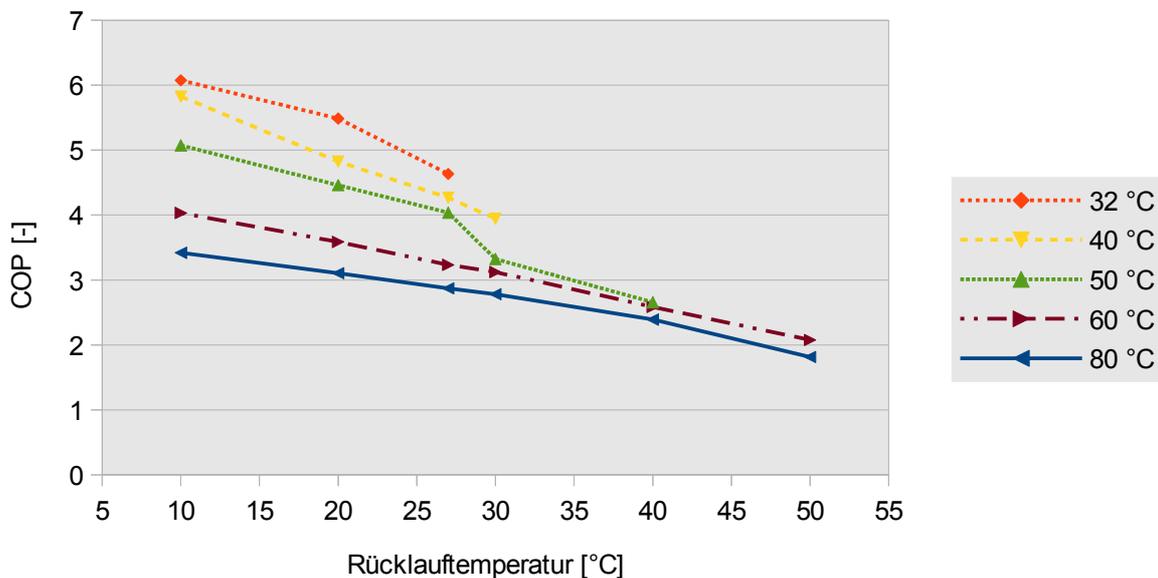


Abbildung 76: COP einer realen überkritischen Wärmepumpe über der Rücklauftemperatur für verschiedene Vorlauftemperaturen (Beispielwärmepumpe Thermea HHR 1000-6(345), Eigene Berechnung auf Datenbasis [101], Quelltemperatur 6 °C)

Die Firma Thermea Energiesysteme gibt für ihre Wärmepumpen an, dass diese im Teillastbereich eine Effizienzsteigerung aufweisen würden. [103] Quantitative Angaben zum Teillastverhalten bei großen Kompressionswärmepumpen in unterschiedlichen Lastbereichen sind mangels Datenbasis nicht möglich.⁶

5.3.2. Motorwärmepumpen mit elektrischer Nachheizung

Soll zur Investitionskostenminderung die Vorlauftemperatur einer Wärmepumpe unterhalb der Netztemperatur liegen, ist eine Nachheizung notwendig. Eine Möglichkeit ist dabei die Verwendung von Heizstäben wie in Abbildung 77 dargestellt. In Abbildung 78 ist der elektrische Leistungsbedarf der Wärmepumpe mit nachgeschaltetem Heizstab in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur der Wärmepumpe dargestellt. Die Gesamtwärmeleistung sowie die Vorlauftemperatur im Wärmenetz werden dabei konstant gehalten.

⁶ Da Hochtemperatur-Großmotorwärmepumpen nach Kundenwunsch hergestellt werden, liegen nach Herstellerangaben keine aufbereiteten Kennfelddaten vor. [104][105]

5. Wärmeerzeuger

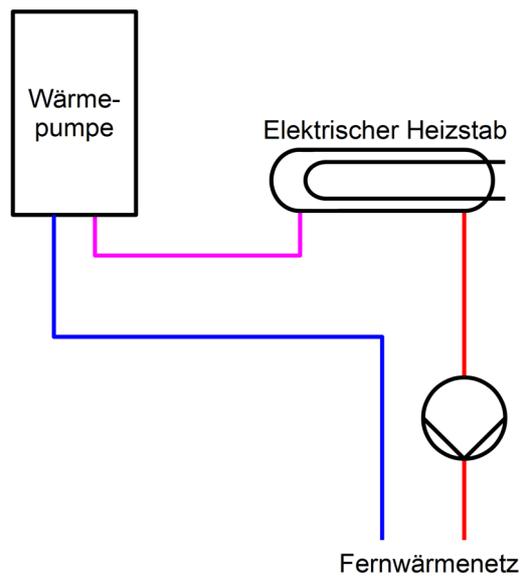


Abbildung 77: Fließschema Wärmepumpe mit Heizstab

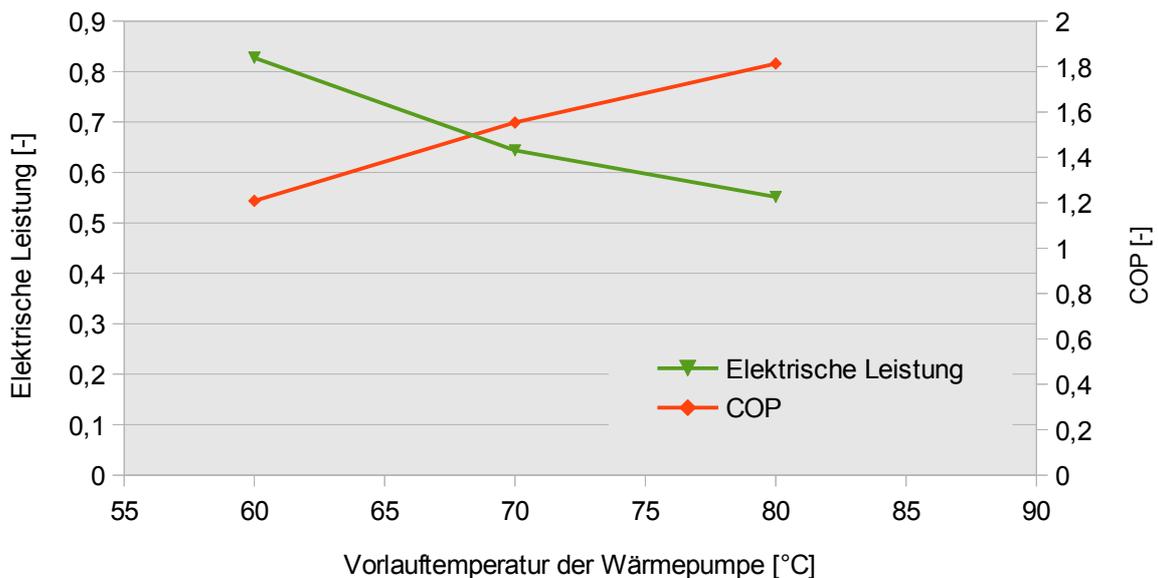
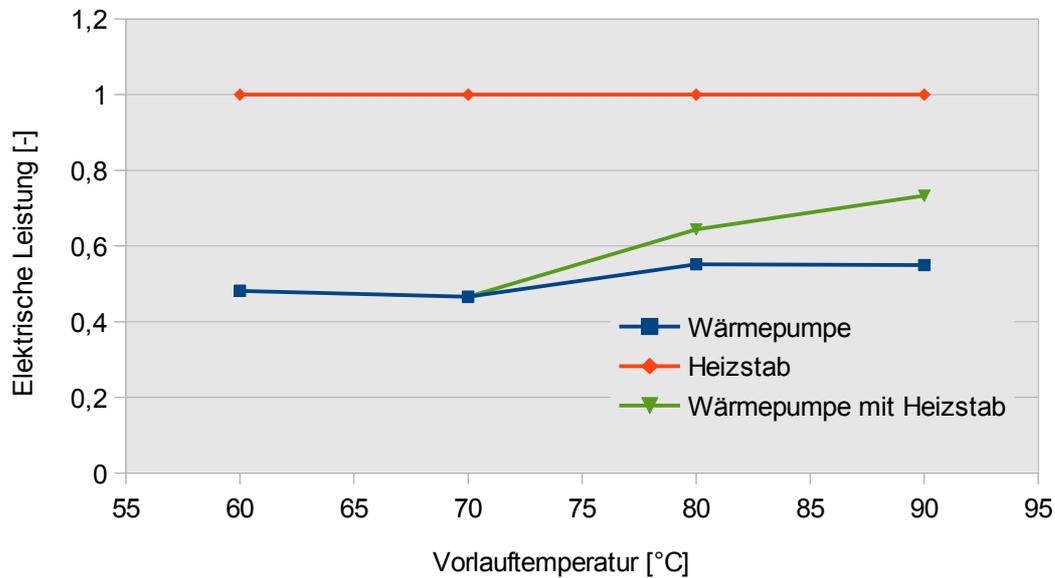


Abbildung 78: Elektrischer Leistungsbedarf einer realen Wärmepumpe mit nachgeschaltetem Heizstab in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur der Wärmepumpe (Beispielwärmepumpe Thermea HHR 1000-6(345), Eigene Berechnung auf Datenbasis [101])

Die angegebene elektrische Leistung ist die Leistung, die jeweils zur Bereitstellung einer Einheit thermischer Leistung notwendig ist. Zu erkennen ist in der Abbildung 78, dass mit zunehmender Vorlauftemperatur der Wärmepumpe – gleichbedeutend mit einem zunehmendem Anteil der von der Wärmepumpe bereitgestellten Wärmeleistung – der elektrische Leistungsbedarf sinkt. Die Änderungen des elektrischen Leistungsbedarfs über der

Vorlauftemperatur für Wärmepumpe, Heizstab und Reihenschaltung aus Wärmepumpe und Heizstab (Vorlauftemperatur der Wärmepumpe konstant 70 °C) ist in Abbildung 79 zu sehen.



*Abbildung 79: Wärmepumpe mit nachgeschaltetem Heizstab in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur
(Beispielwärmepumpe Thermea HHR 1000-6(345), Eigene Berechnung auf Datenbasis [101])*

In den oben gezeigten Abbildungen wird deutlich, dass der Einsatz einer Wärmepumpe mit nachgeschaltetem Heizstab aus energetischen Gründen nicht sinnvoll ist. Wie schon angegeben kann die Kombination aus wirtschaftlichen Gründen, die hier nicht untersucht werden, hingegen sinnvoll sein.

6. Wärmenetz

6.1. Grundlagen der Wärmenetze

Wärmenetze stellen die Verbindung zwischen einem oder mehreren dezentral angeordneten Wärmeerzeugern und den Wärmenutzern her. Die Netzstruktur in Verbindung mit Art und räumlicher Verteilung der Wärmeerzeuger und Speicher auf der einen Seite und Art und räumlicher Verteilung der Wärmenutzer auf der anderen Seite beeinflussen direkt die Netzauslastung und damit Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit.

Vielfach werden in der Literatur Wärmenetze mit einer transportierten Jahreswärmemenge von weniger als $140 \frac{kWh}{m \cdot a}$ oder teilweise sogar über $1.500 \frac{kWh}{m \cdot a}$ als aus technischer und wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll bezeichnet (siehe Reidhav et. al. [106], Fishedieck et. al. [107], Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) [108] und [109]). In die Richtlinie der KfW für die Förderung von Wärmenetzen wurde eine minimale Liniendichte des Wärmebedarfs von $500 \frac{kWh}{m \cdot a}$ aufgenommen [110]. Eine Unterscheidung hinsichtlich stark schwankender oder gleichförmiger Netzauslastung wird bei allen vorgenannten Quellen nicht vorgenommen. Für die Vergleichbarkeit von Wärmenetzen ist dies jedoch ein entscheidender Faktor.

6.1.1. Siedlungstypologien

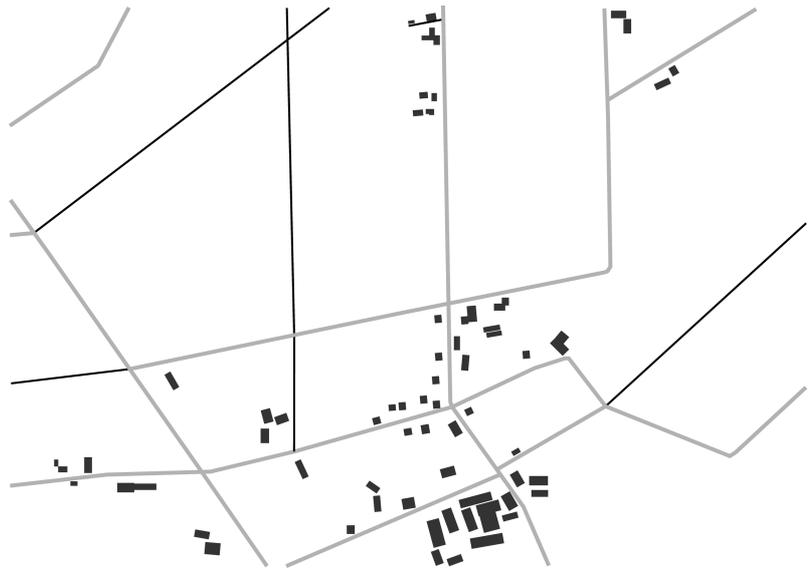
Die Struktur der Wärmenetze wird entsprechend der vorhandenen geographischen und topologischen Gegebenheiten sowie den Standorten von Wärmeerzeugern und Speichern angepasst. Die Siedlungsstrukturen in Niedersachsen verändern sich ebenso wie die Bebauung über die Jahrhunderte der Besiedlung. Ueli Roth [24] hat 1980 die Grundlage für eine Grobstrukturierung der Siedlungstypen in Deutschland für die Erstellung von Energieversorgungskonzepten gelegt. Der Schwerpunkt liegt hier aber auf städtischen Strukturen. Neben den acht städtischen Siedlungstypen wird nur ein Typ für dörfliche Siedlungen verwandt. Die darauf aufbauende Siedlungstypologie von Blesl aus dem Jahr 2002 unterscheidet insgesamt 18 Typen. Auf dörfliche oder besser ländliche Siedlungsstrukturen anwendbar sind „ST 0 – Freistehende Einzelgebäude“, „ST 1- Lockere offene Bebauung“, „ST 2 – Einfamilienhäuser- u. Doppelhäuser-Siedlung“ und „ST 3b – Ländlicher Dorfkern“. ([25], S. 137 f.)

Erhorn-Kluttig et al. unterscheiden 16 Siedlungstypen. Die Bezeichnung einzelner Siedlungstypen ist teilweise identisch mit jener von Blesl. Die Typen unterscheiden sich jedoch teilweise in den Definitionen. Neben den Typen „Lockere offene Bebauung“, „Einfamilienhäuser- und Doppelhäuser-Siedlung“ und „Ländlicher Dorfkern“ sind die Typen „Freifläche“ (Bauerwartungsland) sowie „öffentliche Sonderbauten“, „Industriegebiet“ und „Gewerbegebiet“ auch auf ländliche Siedlungen anwendbar. ([111], S. 36 ff.)

All diese Studien definieren ländliche Siedlungsstrukturen entsprechend der südlich der Mittelgebirge vorherrschenden Bebauungen und Siedlungen. Für weite Teile Niedersachsens ist diese Typisierung nicht anwendbar. Für diese ländlichen Siedlungen ist eine abweichende Typisierung notwendig.

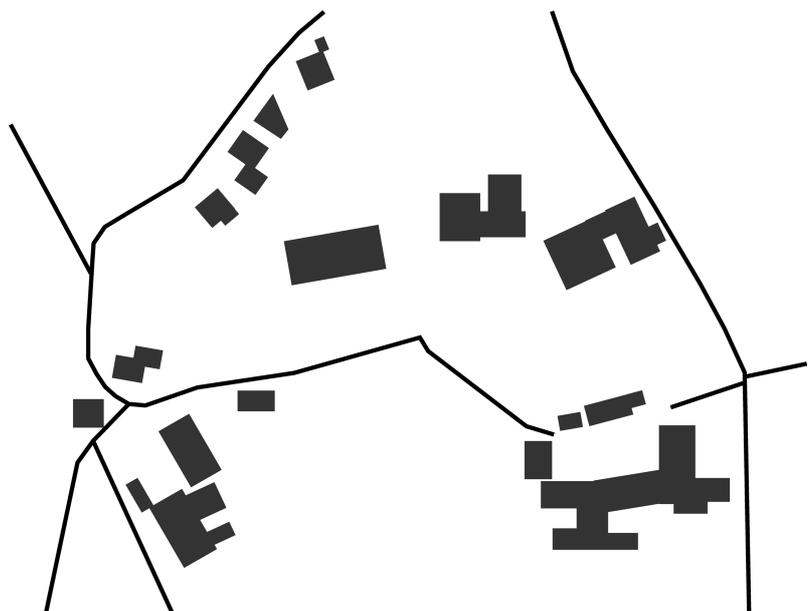
1. **Streusiedlung:** Streusiedlungen weisen kein geschlossenes Ortsbild auf, da der Abstand zwischen den einzelnen Höfen oder Doppelhöfen nach Definition mehr als 150 m beträgt. In die Landschaft eingebettete landwirtschaftliche Betriebe, Förstereien und Mühlen bestimmen das Bild der Streusiedlungen. Streusiedlungen sind überwiegend im westlichen Niedersachsen verbreitet (nördlich der Mittelgebirge und westlich der Weser). In den großen Moorgebieten des Emslands sind bis zum Inkrafttreten des niedersächsischen Moorschutzprogramms von 1984/86 Einzel- und Doppelhöfe in Nachbarschaftslage angelegt worden. [112][12][113]

Abbildung 80: Beispiel einer Streusiedlung – Ossenbeck (Landkreis Diepholz, Stadt Diepholz)



2. **Drubbel/Weiler:** Drubbel, in Süddeutschland auch als Weiler bezeichnet, bestehen aus einer Gruppe von 3 bis 20 Hofstellen. Diese Hofstellen sind meist unregelmäßig, locker verteilt. Neben diesen ungeplanten Ansiedlungen existieren auch Drubbel, die aus einer Reihung von Bauernhäusern um einen Dorfplatz bestehen. [112][12][114][115]

Abbildung 81: Beispiel eines Drubbels – Schöttlingen (Landkreis Schaumburg, Gemeinde Lindhorst)



3. **Haufendorf:** Lockere Haufendörfer stellen in Niedersachsen die am Häufigsten anzutreffende Siedlungsform dar. Insbesondere nördlich der Linie Osnabrück-Hannover wuchsen sie oft am Hang zu Flussauen zwischen feuchteren Weide- und trockeneren Ackerflächen ohne erkennbares Gestaltungsprinzip.

Abbildung 82: Beispiel für ein lockeres Haufendorf – Heitlingen (Region Hannover, Stadt Garbsen) (vorveröffentlicht in [62])



Im Bereich der Lößbörden und des Berglandes (südlich der Linie Osnabrück-Hannover) ist das enge Haufendorf der am weitesten verbreitete Siedlungstyp. Die engen Haufendörfer oder geschlossenen Haufendörfer bestehen aus einer dichten Anordnung der Höfe (Hofstellen). Innerhalb des Siedlungsgebietes besteht ein meist regelloses Wegenetz mit Tie- oder Angerplätzen, das häufig von der Topografie abgeleitet wurde.

Abbildung 83: Beispiel für ein enges Haufendorf – Hohnhorst (Landkreis Schaumburg) [62]



In vielen Fällen entstanden die engen Haufendörfer aus Drubbeln. Im Eichsfeld sind jedoch die meisten engen Haufendörfer aus ursprünglichen Straßendörfern entstan-

den. Allmählich entwickelte sich zum Beispiel durch seitliche Anlagerung weiterer bebauter Gebiete an einen Hauptstraßenzug der Dorfgrundriss des Haufendorfes. Einige Haufendörfer wurden auch planmäßig angelegt.

Die seit dem 2. Weltkrieg entstandenen Siedlungsgebiete entsprechen ihren Strukturen nach am ehesten Haufendörfern. Vereinzelt wurden auch die bisherigen Siedlungsstrukturen weiterentwickelt. So wurden z.B. in den 1950er Jahren zahlreiche Nebenerwerbssiedlungen mit Siedlerhäusern, die über Nebengebäuden oder Anbauten für Viehhaltung und Unterbringung landwirtschaftlichen Gerätes verfügen, errichtet (z.B. Bergkirchen in Form eines geschlossenen Haufendorfes, alter Dorfkern Straßenangerdorf – vgl. Abbildung 88). [116][117][12][31][113]

- 4. Rundling und Sackgassendörfer:** Rundlinge und Sackgassendörfer verfügen über nur eine Straße, die zum Dorfplatz führt. Rundlinge weisen dabei eine runde oder Birnenförmige Anlage von 4 bis 16 Hofstellen um den zentralen Dorfplatz auf. Dabei zeigen alle Haupthäuser zum zentralen Dorfplatz. Das Verbreitungsgebiet der Rundlinge in Niedersachsen erstreckt sich über die Landkreise Lüchow-Dannenberg, Uelzen, Gifhorn und Wolfsburg mit dem Schwerpunkt Wendland.

Abbildung 84: Beispiel für einen Rundling – Kremlin (Landkreis Lüchow-Dannenberg, Gemeinde Luckau)



Sackgassendörfer haben gegenüber den Rundlingen eine unregelmäßige Struktur und sind entlang der Zufahrtsstraße erweiterbar. Der Standort der Kirche befindet sich außerhalb des Dorfes. Die Haupthäuser zeigen mit dem Giebel zur einzigen Straße. [112][12]

5. **Rundangerdorf:** Rundangerdörfer entstanden durch nachträgliche Schaffung einer Durchfahrtsmöglichkeit aus Rundlingen. Ihr Verbreitungsgebiet in Niedersachsen ist daher ebenso wie jenes der Rundlinge auf das Wendland begrenzt.

Abbildung 85: Beispiel für ein Rundangerdorf – Schreyahn (Landkreis Lüchow-Dannenberg, Gemeinde Wustrow)



6. **Wurtensiedlung:** Wurtensiedlungen oder Wurtentrunddörfer, wie sie auch genannt werden, wurden auf künstlichen Anhöhen (Warften oder Wurtten) errichtet. Die Ortsstruktur ist durch eine enge um eine Kirche und einen Süßwasserteich angeordnete Bebauung ausgezeichnet. Die Ausrichtung der Giebel ist typischerweise zum Dorfmittelpunkt. Das Straßennetz besteht aus ringförmigen Straßen mit radialen Verbindungen. Sie sind der älteste Siedlungstyp im Bereich der Altmarschen Oldenburgs und Ostfrieslands. Der Siedlungsbereich der Wurtensiedlungen erstreckt sich über einen Höhenbereich von -0,5 bis +6,0 m über Normal Null (NN). [12][113][31]

Abbildung 86: Beispiel für eine kleine Wurtensiedlung – Woltzeten (Landkreis Aurich, Gemeinde Krummhörn)



7. **Straßendorf:** Die teilweise geplanten, teilweise aber auch aus Rundlingen entstandenen Straßendörfer stellen eine Form der Reihendörfer dar. Die Straßendörfer als lineare Dorfform der Tal- und Ebenendörfer entwickelten sich entlang eines Hauptstraßenverlaufes ohne ortsbildprägendes Zentrum. In Südniedersachsen (Eichsfeld, Südharz,...) stehen die vorderen Häuser auf den schmalen Grundstücken dicht am Straßenraum. In vielen Fällen ist hier der Straßenraum kaum breiter als die eigentliche Fahrbahn. Die Bebauung der Straßendörfer erfolgte in halboffener bis geschlossener Bauweise. [116] Im Wendland ist der Straßenraum hingegen teilweise mehr als 40 m breit. Hier beträgt allein die Fahrbahnbreite bis zu etwa 18m. Die Straßen werden hier in der Regel durch einen alleeartigen Baumbestand gesäumt. [112]

Abbildung 87: Beispiel für ein Straßendorf – Müggenburg (Landkreis Lüchow-Dannenberg, Stadt Lüchow (Wendland))



8. **Straßenangerdorf:** Straßenangerdörfer sind Straßendörfer mit einer linearen Aufweitung des Straßenraumes zu einer platzähnlichen Freifläche. [117]

Abbildung 88: Beispiel für ein Straßenangerdorf - Bergkirchen (Landkreis Schaumburg, Gemeinde Wölpinghausen)



9. **Hütten- und Reihensiedlungen:** Die Straßen in Hütten- und Reihensiedlungen verlaufen parallel zu den Hauptbächen in Tallage. Entlang der Straßen wurden teilweise nur einseitig Hofreiten und landwirtschaftliche Betriebe errichtet. Die Hauptgebäude liegen dabei direkt an den Straßen an. Die Nebengebäude sind hinterliegend. Hütten- und Reihensiedlungen wurden als Bergbausiedlungen im Harz errichtet. [117]

Abbildung 89: Beispiel für eine Reihensiedlung – Wildemann (Landkreis Goslar) [62]



10. **Hagenhufensiedlung:** Wie die anderen Hufendörfertypen sind auch Hagenhufensiedlungen geplant angelegte Siedlungen. Ein wichtiges Kennzeichen der Hufensiedlungen stellt die gleiche Breite aller Parzellen innerhalb einer Ortschaft dar. Historisch besitzen die Hufensiedlungen keine Seitenstraßen und keinen erkennbaren Ortsmittelpunkt.

Bei Hagenhufensiedlungen wurden die Höfe entlang von Bachläufen angelegt. Überwiegend wurden die Höfe einzeilig zwischen Bachlauf und Straße errichtet (z.B. Auhagen, Nordsehl). Selten sind zweireihige Bebauungen wie in Wiedensahl. Teilweise sind die Hauptgebäude weit zurückgesetzt mit großen Gärten zur Straße. Die Verbreitung der Hagenhufensiedlungen in Niedersachsen beschränkt sich weitestgehend auf das Gebiet des ehemaligen Fürstentums Schaumburg Lippe⁷ sowie die nördliche Region Hannover. [12][115][119][120]

⁷ Anmerkung: In der anthropogeographischen Literatur wird diskutiert, ob die Bezeichnung „Hagenhufensiedlung“ auf alle Siedlungen mit dieser Siedlungsform angewendet werden darf, oder ob noch zusätzliche rechtliche Eigenschaften der Siedlungsgründung vorliegen müssen. [118]

Abbildung 90: Beispiel für eine Hagenhufensiedlung – Nordsehl (Landkreis Schaumburg) [62]



11. **Waldhufensiedlung:** Waldhufensiedlungen stellen eine lineare Form der Bergdörfer dar. Von der Siedlungsstruktur her gleichen Waldhufensiedlungen in ihrer ursprünglichen Ausprägung Hagenhufensiedlungen. Der wesentliche Unterschied besteht in der Topografie. Hagenhufensiedlungen wurden ausschließlich im Flachland errichtet. Dagegen sind Waldhufensiedlungen auch entlang der Höhenlinien in bergigem oder hügeligem Gelände zu finden. Sie wurden entlang gerodeter Berghänge im heutigen Südniedersachsen sowie im Weserbergland angelegt. [12][116]

Abbildung 91: Beispiel für ein Waldhufendorf – Rannenberg (Landkreis Schaumburg, Gemeinde Auetal)



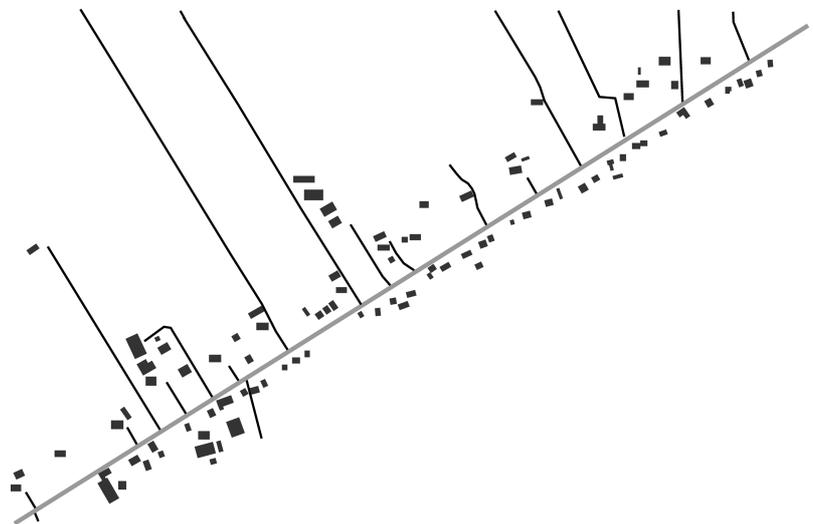
12. Marschhufensiedlung: Marschhufensiedlungen sind geplante Siedlungen entlang von Entwässerungsgräben beziehungsweise Entwässerungskanälen und Deichen. Ihre Verbreitungsgebiete beschränken sich bis auf wenige Ausnahmen auf die Marschen in Nordniedersachsen. [12][31]

Abbildung 92: Beispiel für Marschhufendörfer: Konau und Poppelau (Landkreis Lüneburg, Gemeinde Amt Neuhaus)



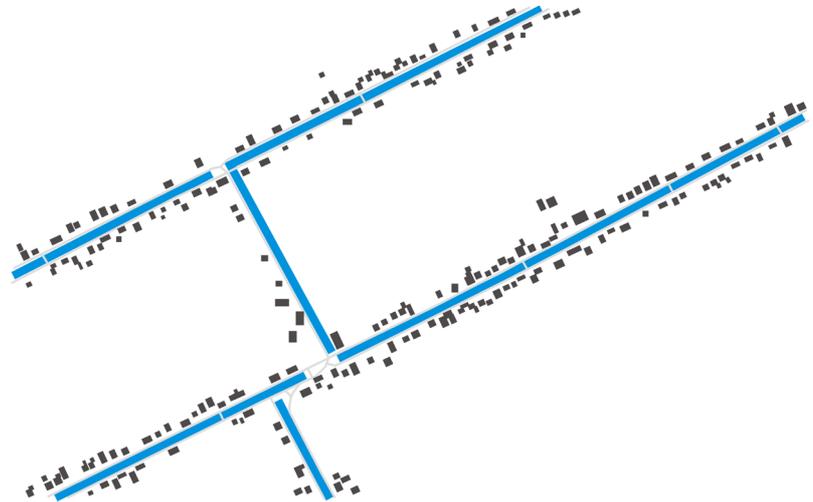
13. Moorkolonien, Findorff-Siedlungen: Die Moorkolonien weisen lineare Strukturen entlang von Kanälen und Straßen auf. Die ursprüngliche Bebauung war meist einreihig. Sie wurden im 18. Jh unter der Leitung von Jürgen Christian Findorff planmäßig im Teufelsmoor zwischen Elbe und Weser angelegt. [12][121]

Abbildung 93: Beispiel für eine Moorkolonie - Seehausen (Landkreis Osterholz, Gemeinde Grasberg)



14. **Fehnsiedlung:** Die Fehnsiedlungen wurden zur Erschließung der Moore entlang der Erschließungssysteme Straße oder Kanal beziehungsweise entlang eines Deiches im Bereich abgetorfter Moore angelegt. Auf schmalen Hufen wurden die meist giebelständigen Gebäude ein- oder doppelreihig errichtet. Fehnsiedlungen sind im Gebiet des heutigen Niedersachsens in den Mooren des Emslandes und Ostfrieslands zu finden. [12][31]

Abbildung 94: Beispiel für eine Fehnsiedlung – Großfehn (Landkreis Aurich) [62]



6.1.2. Innere Struktur dörflicher Siedlungen

Gegenüber Städten ist die Bebauung in ländlichen Siedlungen deutlich heterogener. In den Abbildungen 80 bis 94 ist zu erkennen, dass die Gebäudegröße innerhalb der Siedlungen stark variiert. Diese Variation der Gebäudegröße ist eng mit der unterschiedlichen Gebäudenutzung verbunden (siehe auch Abschnitt B). Entlang der Hauptsiedlungsachsen beziehungsweise in den alten Siedlungskernen liegen Gebäude mit unterschiedlichsten Nutzungen wie reine Wohngebäude und produzierende Handwerksbetriebe oder landwirtschaftliche Betriebe direkt nebeneinander.

Ausgehend von diesen Siedlungskernen sind seit dem Ende des 2. Weltkriegs Neubaugebiete nach städtischem Vorbild entstanden. Diese Neubaugebiete weisen üblicherweise eine klar nach wohnen, gewerblicher und landwirtschaftlicher Nutzung getrennte Bebauung auf. Für Gewerbe wurden meist gesonderte Gewerbegebiete in Ortsrandlage geschaffen. Ebenso wurden neue landwirtschaftliche Betriebe an den Ortsrändern angesiedelt oder, in Fortsetzung der Entwicklungen der 1930er Jahre, in die Flur ausgesiedelt.

Städte sind, wie von Roth [24] und Blesl [25] beschrieben, in ihren Strukturen deutlich stärker ausdifferenziert. So gehen alle auf der Systematik von Roth und Blesl basierenden Verfahren zur Abschätzung der technischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit von Wärmenetzprojekten davon aus, dass diese über die mittlere Wärmedichte der Siedlungstypen ermittelt werden kann (z.B. [122]). In der Mehrzahl der ländlichen Siedlungstypen in Niedersachsen spielt hingegen auf Grund der linearen Ausdehnung der Siedlungen die Siedlungsfläche gegenüber der notwendigen Trassenlänge nur eine untergeordnete Rolle. Dies ist auch in einem Vergleich der Flächenanteile für Verkehr und Bebauung zwischen ländlichen Siedlungen und Städten erkennbar. Daher sind hier die Liniendichten des Wärmebedarfs entscheidend.

6.1.3. Netzstrukturen

Zur Anpassung des Wärmetransportsystems an die örtlichen Gegebenheiten hinsichtlich verfügbarer Wärmequellen, benötigter Temperatur- und Druckniveaus sowie des verwendeten Wärmeträgermediums wurden verschiedene Wärmenetztypen entwickelt. Die Netze können nach der Anzahl der eingesetzten parallelen Rohre typisiert werden:

- **1-Leiter-Netz:** Bei 1-Leiternetzen wird ausschließlich eine Vorlaufleitung verlegt. Das abgekühlte Fernwärmewasser wird beim Kunden je nach Umgebung direkt in einen benachbarten Fluss/Bach oder den Abwasserkanal eingeleitet. Dieser System-Typ ist unter anderem auf Island im Einsatz. Auf Island hat das Fernwärmewasser häufig Trinkwasserqualität, so dass das Fernwärmewasser auch als Trinkwasser Verwendung findet.
- **2-Leiter-Netz:** Vor- und Rücklaufleitungen werden entweder in getrennten Wärmedämmungen oder als Doppelrohrsystem mit beiden Rohren in einer gemeinsamen Wärmedämmung verlegt. Über den Rücklauf wird das abgekühlte Fernwärmewasser den Wärmequellen wieder zugeführt. 2-Leiter-Netze sind der vorherrschende Typ in Deutschland.
- **3-Leiter-Netz:** 3-Leiter-Netze bestehen aus zwei Vorlaufleitungen und einem gemeinsamen Rücklauf. Eine mögliche Anwendung von 3-Leiter-Netzen ist die getrennte Versorgung von Anlagen zur Trink- und Brauchwarmwasserbereitung sowie zur Raumwärmebereitstellung. Der Vorlauf für die Trink- und Brauchwassererwärmung kann ganzjährig mit konstanter Temperatur gefahren werden. Die Vorlauftemperatur für die Raumwärmebereitstellung wird dem Bedarf entsprechend variiert. Bei entsprechenden hohen Außentemperaturen kann die Leitung für die Raumwärmebereitstellung auch vollständig abgeschaltet werden. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit von 3-Leiter-Netzen findet sich bei der dezentralen Wärmeerzeugung. Hier fungiert ein Leiter als Sammelleiter für die Wärme der Wärmeerzeuger. Die Wärme wird dann zentral in den eigentlichen Vorlauf eingespeist. [123][124]
- **4-Leiter-Netz:** Diese Netze verfügen über je zwei Vor- und Rücklaufleitungen. Neben der getrennten Versorgung mit Heiz- und Prozesswärme unterschiedlicher Temperaturen und Drücke (z.B. Dampf für die Prozesswärmebereitstellung und Heißwasser für die Raumheizungen) wird dieses System in Gebieten mit vielen dezentralen Wärmequellen eingesetzt. Eine Vor- und eine Rücklaufleitung dienen als Sammelleitungen für die Wärme. Die Wärme wird dann von einem oder mehreren zentralen Punkten in das parallele Versorgungsnetz eingespeist.

Die zu betrachtenden Nahwärmenetze in ländlichen Siedlungen Niedersachsens sind bis auf wenige Ausnahmen als Zweileiternetze ausgeführt. Dreileiternetze entstehen teilweise durch nachträgliche Verlegung einer weiteren Rohrleitung zur Erhöhung der Netzkapazitäten. Ausführungen als Vier- oder Mehrleiternetze beschränken sich auf Gebiete mit Sonderanwendungen wie parallel verlegten Dampf- und Kondensatleitungen, Trinkwarmwasserleitungen mit Zirkulationsleitungen sowie Sammelleitungen für verteilte Wärmequellen.

Eine weitere Möglichkeit zur Charakterisierung von Wärmenetzen besteht in der Unter-

6. Wärmenetz

scheidung hinsichtlich der räumlichen Wärmenetzstruktur. Alle Wärmenetze basieren auf einer der folgenden Grundstrukturen oder einer Kombination verschiedener Grundstrukturen (Anmerkung: Die Aussagen zu den Wärmeerzeugern beziehen sich auf Wärmeerzeuger, die zwischen Vor- und Rücklauf ohne Trennung des Netzes durch eine hydraulische Weiche eingebunden werden):

- **Sternnetz / Strahlennetz:** Alle Transportleitungen gehen von einem zentralen Punkt in radialer Richtung ab. Es existieren keine Vermaschungen. Jeder Punkt im Netz ist über genau eine Verbindung mit jedem anderen Punkt verbunden.

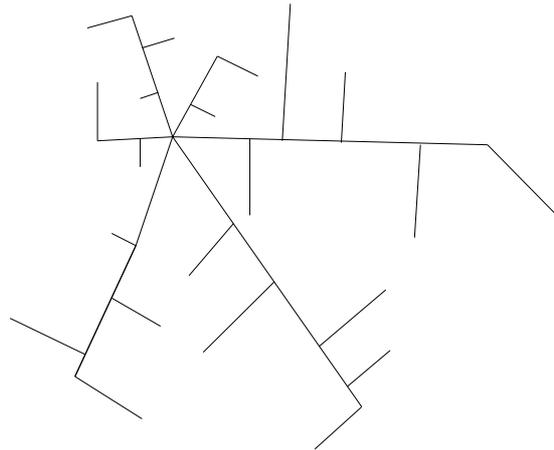


Abbildung 95: Stern/Strahlennetz

Für ein hydraulisch eindeutig bestimmtes Netz darf in jedem Strahl maximal ein Wärmeerzeuger eingebunden werden.

- **Lineares Netz:** Alle Verteilleitungen gehen von einer zentralen Transportleitung ab. In der extremsten Ausführung sind alle Wärmequellen und Wärmeabnehmer direkt an die Transportleitung, die in diesem Fall auch die Funktion einer Verteilleitung übernimmt, angebunden. Es existieren keine Vermaschungen. Jeder Punkt im Netz ist über genau eine Verbindung mit jedem anderen Punkt verbunden.

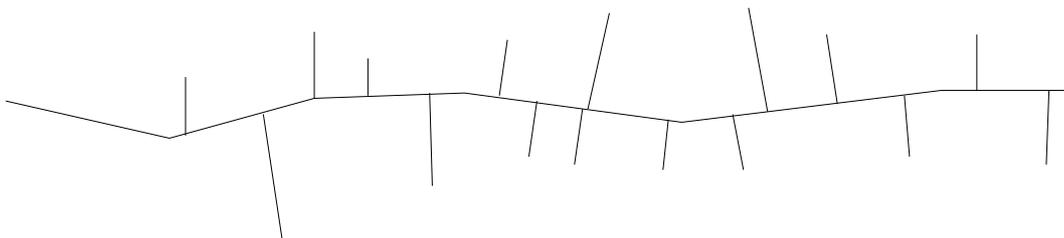


Abbildung 96: Lineares Netz

Das Netz ist für maximal zwei Wärmeerzeuger hydraulisch bestimmt.

- **Ringnetz:** Die Transportleitung, die gleichzeitig die Funktion einer Verteilleitung hat, verläuft ringförmig. Jeder Punkt im Ring hat genau zwei Verbindungen zu jedem anderen Punkt im Ring.

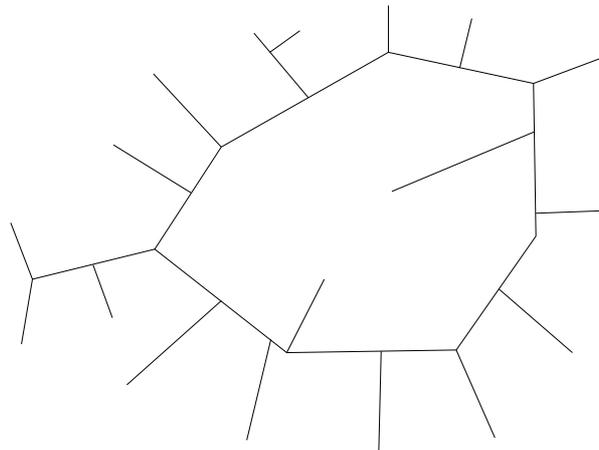


Abbildung 97: Ringnetz

Das Ringnetz kann aus beliebig vielen Wärmequellen, die direkt an die Transportleitung angebunden werden, versorgt werden, ohne dass das Netz hydraulisch unbestimmt wird.

- **Vermaschtes Netz:** Transportleitungen und Verteilleitungen bilden ein Netz mit mehreren Verknüpfungen. Jeder Punkt im Netz hat mindestens eine Verbindung zu jedem anderen Punkt im Netz.

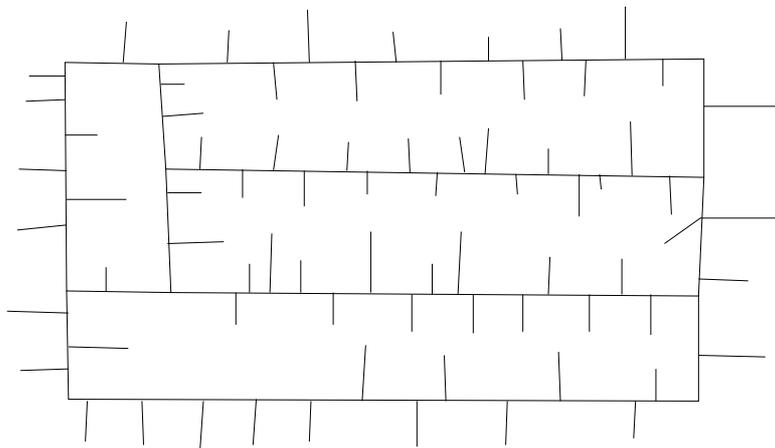


Abbildung 98: Vermaschtes Netz

Bei direkter Anbindung der Wärmeerzeuger an eine Masche, ist das Netz unabhängig von der Anzahl der Wärmeabnehmer hydraulisch bestimmt.

6.2. Netzauslastung

Die im Auslegungszustand über ein Wärmenetz transportierbare Wärmeleistung wird nur an den wenigsten Tagen innerhalb der Nutzungsdauer eines Wärmenetzes auftreten. Ebenso werden sich Änderungen der Jahreswärmemenge ergeben. Durch Umnutzung, Sanierung oder Abriss von Gebäuden sowie befristete Änderungen in Produktionsprozessen treten weitere Abweichungen vom Auslegungszustand auf.

In der technischen Gebäudeausrüstung wird die sich im Jahresverlauf ändernde Auslastung der Heizwärmesysteme mit der Definition der thermischen Belastung β_D erfasst.

$$\beta_D = \frac{\sum_i Q_{1,i}}{t_H \cdot \sum_i \phi_{erf}} \quad (22)$$

Darin enthalten sind die über das Jahr abgegebenen Heizwärmengen $Q_{1,i}$, die Dauer eines Jahres in Stunden t_H und die Auslegungsleistung der Wärmeerzeuger ϕ_{erf} . Daraus abgewandelt kann die Auslastung eines Wärmenetzes im Jahresmittel mit dem Jahresauslastungsgrad ω_N als Quotient aus der real im Wärmenetz transportierten Wärmemenge Q_t und der theoretisch im Jahr transportierbaren Wärmemenge $\dot{Q}_0 \cdot t$ beschrieben werden.

$$\omega_N = \frac{Q_t}{\dot{Q}_0 \cdot t} \quad (23)$$

Bei separater Betrachtung einzelner Netzabschnitte kann mit Gleichung (23) auch eine Engpassbetrachtung vorgenommen werden. Sollen in der Planung verschiedene Netzstrukturen mit variierenden Wärmeerzeuger- und Speicherstandorten in ihrer Gesamtheit verglichen werden, so liefert der Jahresauslastungsgrad für das Wärmenetz alleine keine Aussage. Um eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Netzstrukturen herzustellen, wird zusätzlich der mittlere Jahresauslastungsgrad eingeführt

$$\bar{\omega}_N = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{Q_{t,i}}{\dot{Q}_{0,i} \cdot t} \quad (24)$$

Mit der Gleichung (22) kann der Jahresauslastungsgrad von sternförmigen Netzen mit identischen Wärmeabnehmern in jedem Strang und identischer Stranglänge berechnet werden. Für reale Netze beliebiger Struktur ist daher die Einfügung von Gewichtungsfaktoren erforderlich mit denen der gewichtete mittlere Jahresauslastungsgrad

$$\bar{\omega}_N = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (l_i \cdot \dot{m}_{0,i})} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_{t,i} \cdot l_i \cdot \dot{m}_{0,i}}{\dot{Q}_{0,i} \cdot t} \right) \quad (25)$$

berechnet werden kann. Über den Anteil der Auslegungsmassenströme $\dot{m}_{0,i}$ werden die unterschiedlichen Nennweiten der Rohrleitungen berücksichtigt. Die Länge der einzelnen Stränge l_i fließen als weitere Gewichtungsfaktoren in den gewichteten mittleren Jahresauslastungsgrad ein.

6.3. Wärmeverluste

Die Wärmeverluste wirken sich gegenüber der Netzstruktur direkt auf die energetische und wirtschaftliche Effizienz im Betrieb von Wärmenetzen aus. Im Laufe der Betriebszeit eines Wärmenetzes ändern sich die Wärmeverluste durch die Änderung der Umgebungstemperatur und der Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Bodens/Erdreichs sowie die Alterung der Wärmedämmung. Die absoluten Wärmeverluste je Rohrkilometer zwischen Wärmenetzen in urbanen Siedlungsgebieten und ländlichen Siedlungsgebieten weisen keine großen Unterschiede auf. Da die Dichte der Wärmeabnehmer (Abgenommene Wärmemenge je Trassenkilometer) in ländlichen Siedlungen deutlich geringer als in urbanen Siedlungen ist, unterscheiden sich hier die relativen Wärmeverluste erheblich. Die AGFW weist in ihrem Hauptbericht der Fernwärme, der auf Angaben von meist in städtischen Bereichen operierenden Mitgliedsunternehmen der AGFW basiert, für Niedersächsische Wärmenetze Wärmeverluste von im Mittel 13 % aus [65]. In ländlichen Fernwärmenetzen liegen die Wärmeverluste häufig oberhalb von 20 % und in einigen Fällen sogar oberhalb von 50 % der abgenommenen Wärmemenge (Definition der relativen Wärmeverluste nach EEG 2009 [125]). Somit kommt der Betrachtung der Wärmeverluste in ländlichen Regionen sowohl aus energetischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht eine deutlich höhere Bedeutung zu als in urbanen Wärmenetzen.

Für den Vergleich verschiedener Netzstrukturen im Rahmen von Netzvorentwürfen hinsichtlich Wärmeverlusten wird bevorzugt auf analytische Verfahren zurückgegriffen, um den technischen und personellen Aufwand zu begrenzen. Es existieren mehrere analytische Modelle zur Wärmeverlustberechnung, von denen die bekannten in Anhang A ausführlich dargestellt werden. Allen Modellen liegen Annahmen zur Vereinfachung der Berechnung zu Grunde (siehe Tabelle 18).

Diese führen zu teilweise deutlichen Abweichungen bei den Berechnungsergebnissen. Einige dieser sehr unterschiedlich aussehenden Verfahren führen jedoch auch zu gleichen – Zeitler und Obernberger – oder fast gleichen Ergebnissen – z.B. Isoplus und Tarco sowie Anheyer und Wallentén –, wie in den Abbildungen 99 bis 101 zu sehen ist. In allen angeführten Verfahren zur Abschätzung der Netzwärmeverluste wird die Beeinflussung der Oberflächentemperatur durch die warm gehenden Leitungen nicht berücksichtigt. Mes-

6. Wärmenetz

sungen von Herbst und Kraft (Ergebnisse veröffentlicht in [126]) haben gezeigt, dass diese Vereinfachung zulässig ist.

Tabelle 18: Vergleich der in unterschiedlichen Verfahren berücksichtigten Einflussfaktoren bei der Berechnung der Wärmeverluststromdichte

Parameter	Anheyer	Bøhm	EN 13941	Isoplus	Lögstör Rör	Tarco Energi	Wallentén	Zeitler	Zinko
Vorlauftemperatur	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Rücklauftemperatur	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Oberflächentemperatur							x	x	
Konstanterdreichtemperatur	x								
Erdreichtemperatur auf Rohrachsenhöhe		x	x	x	x	x			x
Erdreichwärmeleitfähigkeit	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Dämmstoffwärmeleitfähigkeit	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Wärmeleitfähigkeit des Mantelrohres	x	x		x	x				
Wärmeleitfähigkeit des Mediumrohres	x			x	x				
Wärmeübergangskoeffizient an der Erdoberfläche		x	x						x
Verlegetiefe bis zur Rohrachse / bis zum Rohrscheitel	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Tiefe konstanter Erdreichtemperatur	x								
Abstand zwischen den Mänteln von Vor- und Rücklauf / Abstand zwischen den Rohrachsen	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Mediumrohräußendurchmesser / -außenradius	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Mediumrohrinnendurchmesser	x			x	x				
Mantelrohräußendurchmesser	x	x	x	x	x				
Mantelrohrinnendurchmesser / -innenradius	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Die folgenden Abbildungen 99 bis 101 zeigen jeweils die Wärmeverluste für das Gesamtsystem aus Vor- und Rücklaufleitung. Sofern nicht anders angegeben, werden für die Abbildungen sowie die weiteren Abschnitte die Verfahren für Wallentén verwendet. Diese ermöglichen sowohl für Einzel- als auch Doppelrohrsysteme analytische Lösungen mit hinreichender Genauigkeit für die hier angestellten Grobbetrachtungen sowie dynamische Simulationen. Dabei werden die wesentlichen Parameter berücksichtigt.

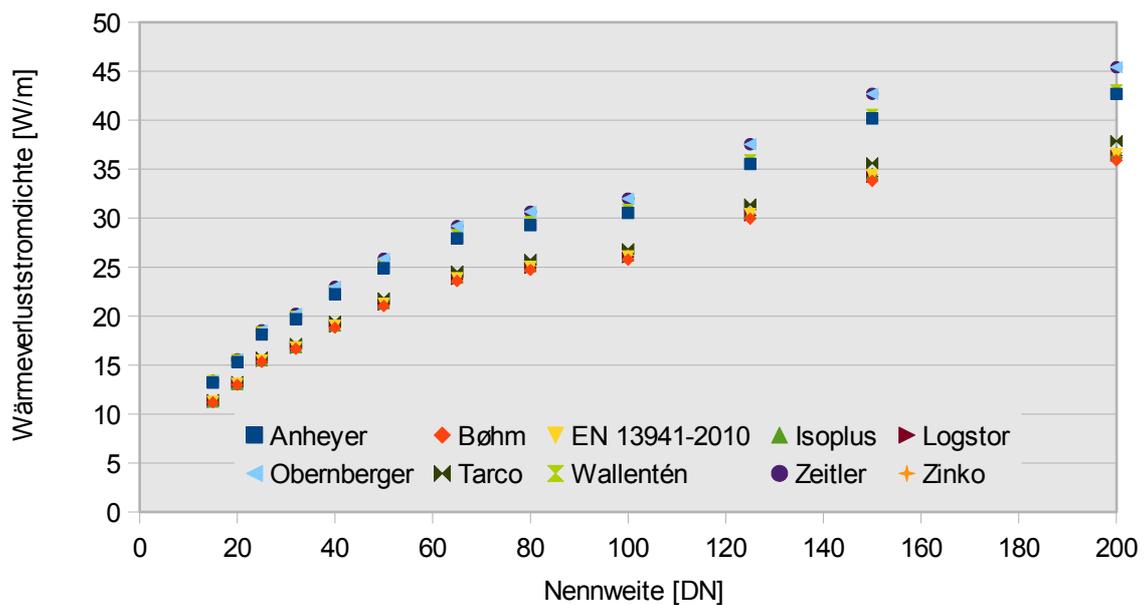


Abbildung 99: Wärmeverluststromdichte über der Nennweite berechnet nach verschiedenen Verfahren (Netztemperaturen 80/50 °C, Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von 0,0275 W/(m·K))

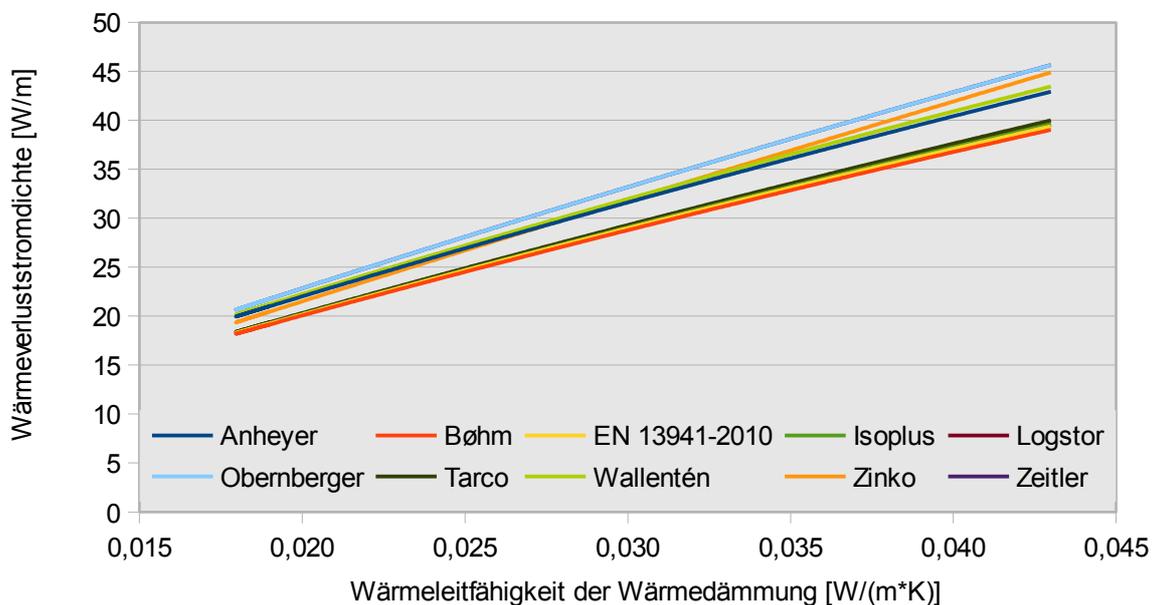


Abbildung 100: Wärmeverluststromdichte in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung (Netztemperaturen 80/50 °C, Nennweite DN 80/160)

Einen Unsicherheitsfaktor bei der Berechnung der Wärmeverluste stellt immer die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs sowie der Bettung der Rohrleitung dar, da hier nicht auf Mess-

6. Wärmenetz

daten sondern auf Standardwerte zurückgegriffen wird (zum Beispiel Daten von Markert [127]). In Abbildung 101 ist diese Abhängigkeit dargestellt.

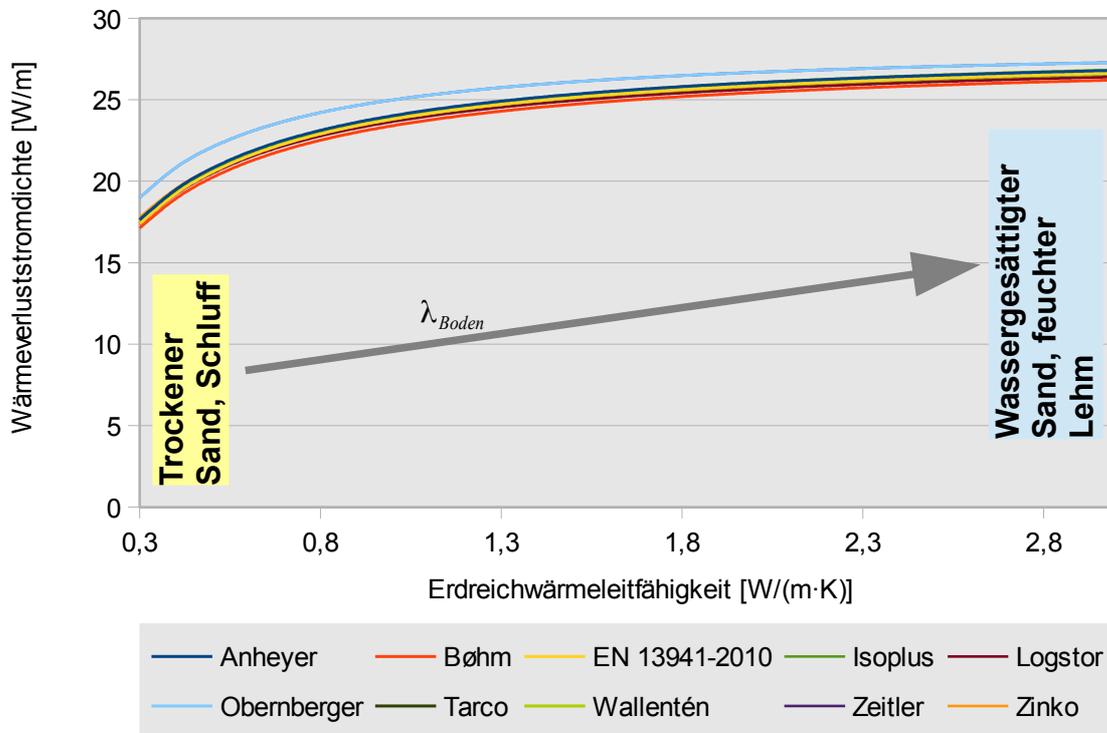


Abbildung 101: Wärmeverluststromdichte in Abhängigkeit der Erdreichwärmeleitfähigkeit
(Netztemperaturen 80/50 °C, Nennweite DN 80/160)

In der Praxis variiert die Wärmeleitfähigkeit des Bodens je nach Standort. So sind beispielsweise im Bereich südlich und westlich von Hannover schwere Lehm- und Tonböden zu finden. In dem Bereich zwischen Lüneburg und Celle dominieren hingegen trockene Sandböden und zwischen Ems und Weser wechseln sich trockene Sandböden mit nassen Torfflächen und feuchten, lehmigen Böden ab. Innerhalb von Siedlungsflächen oder Wüstungen sind diese natürlichen Böden zudem durch den Bau von Verkehrswegen, Versorgungsleitungen und Gebäuden vielfach verändert. Die Herstellung der Bettung für die Verlegung der Fernwärmeleitungen sorgt für zusätzliche Inhomogenitäten. Daher können weder für erdverlegte Wärmeleitungen in urbanen oder ländlichen Siedlungen noch im Bereich von Ackerland oder Grünland allgemeinverbindliche Angaben zur Erdreichwärmeleitfähigkeit getätigt werden.

Neben den Unsicherheiten bei der Wärmeleitfähigkeit wird bei allen vorgestellten Berechnungsverfahren, die die Lufttemperatur berücksichtigen, der Wärmeübergangskoeffizient an der Erdoberfläche als konstant angesehen. Die Einflüsse der Oberflächenbeschaffenheit sowie von Schnee, Bauwerken oder Bepflanzungen in der Umgebung auf den

Wärmeübergangskoeffizienten werden entsprechend nicht berücksichtigt. Zusätzlich wird der Strahlungsaustausch der Erdoberfläche nicht berücksichtigt. Bøhm gibt in [128] als Ergebnis seiner Literaturrecherchen eine Bandbreite der Wärmeübergangskoeffizienten von

$13,0-14,6 \frac{W}{m \cdot K}$ an, die nach seinen Angaben in der Realität deutlich breiter ausfallen

können. Kürten beschreibt in [129] ein analytisches Verfahren zur Berechnung der Erdoberflächentemperatur unter Berücksichtigung der Einflüsse von Strahlungsaustausch (Sonne, Wolken), erzwungener Konvektion (Wind) und Bodenbedeckung (Schnee oder Gras) sowie umgebender Bebauung. Eine Anwendbarkeit auf die Berechnung der Wärmeverluste von Fernwärmeleitungen ist bisher nicht nachgewiesen.

Weiterhin werden Einflüsse aus unterirdischen Wasserströmungen bei der Berechnung der Wärmeverluste von Wärmeleitungen aktuell nicht berücksichtigt. Aus dem Hochbaubereich ist bekannt (z.B. [130]), dass Grund- und Schichtenwasserströmungen im Bauwerksbereich oder darunter auf Grund konvektiver Wärmeübergänge zu deutlichen höheren Wärmeverlusten führen als bei stehendem Wasser zu erwarten wäre.

Eine Möglichkeit die Baukosten von Fernwärmenetzen zu reduzieren, ist der Einsatz von Twin-Pipes (Doppelrohrsysteme) oder Tripple-Pipes (Dreifachrohrsystem). Bei diesen befinden sich Vor- und Rücklaufrohr in einer gemeinsamen Dämmung, was zu einer Änderung der Wärmeverluste führt.

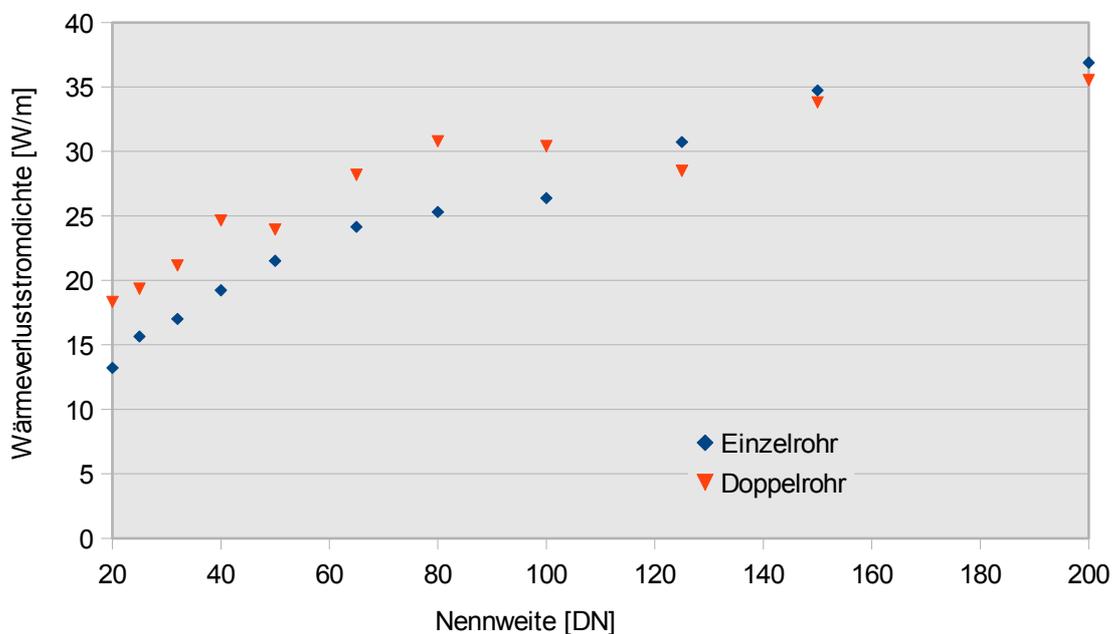


Abbildung 102: Vergleich der Wärmeverluste von Einzel- und Doppelrohren in Abhängigkeit der Nennweite
(Geometrie entsprechend Logstor-Rohren Dämmstärke 2 mit Wärmeleitfähigkeit $0,0275 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ bei Netztemperaturen $80/50 \text{ }^\circ\text{C}$)

6. Wärmenetz

Doppelrohrsysteme sind bis zur Nennweite DN 200 als starre Rohre und entsprechend Nennweite 110 mm als flexible PEX-, PB-, oder Stahlwellrohre auf dem Markt erhältlich. In Abbildung 102 sind zum Vergleich die Wärmeverluste, berechnet nach Wallentén, für Einzel- und Doppelrohrsysteme in Abhängigkeit der Nennweite dargestellt.

Tripple-Pipes verfügen über ein Rohr mit größerem Durchmesser für den Rücklauf und zwei Rohre kleineren Durchmessers für den Vorlauf in einer gemeinsamen Wärmedämmung. Durch die Asymmetrie ist eine analytische Berechnung der Wärmeverluste nicht möglich. Für einzelne Typen haben Bøhm und Kristjansson [123] auf Basis numerischer Berechnungen Modelle zur Abschätzung der Wärmeverluste erstellt.

Abschließend im Bereich der Wärmenetze noch eine Betrachtung der Auswirkungen reduzierter Vorlauftemperaturen bei gleichbleibender Mitteltemperatur zwischen Vor- und Rücklauf. In Abbildung 82 ist zu sehen, dass mit steigender Vorlauftemperatur die Wärmeverluste konstant bleiben und die Wärmetransportkapazität steigt. Daraus folgt, dass die relativen Wärmeverluste sinken.

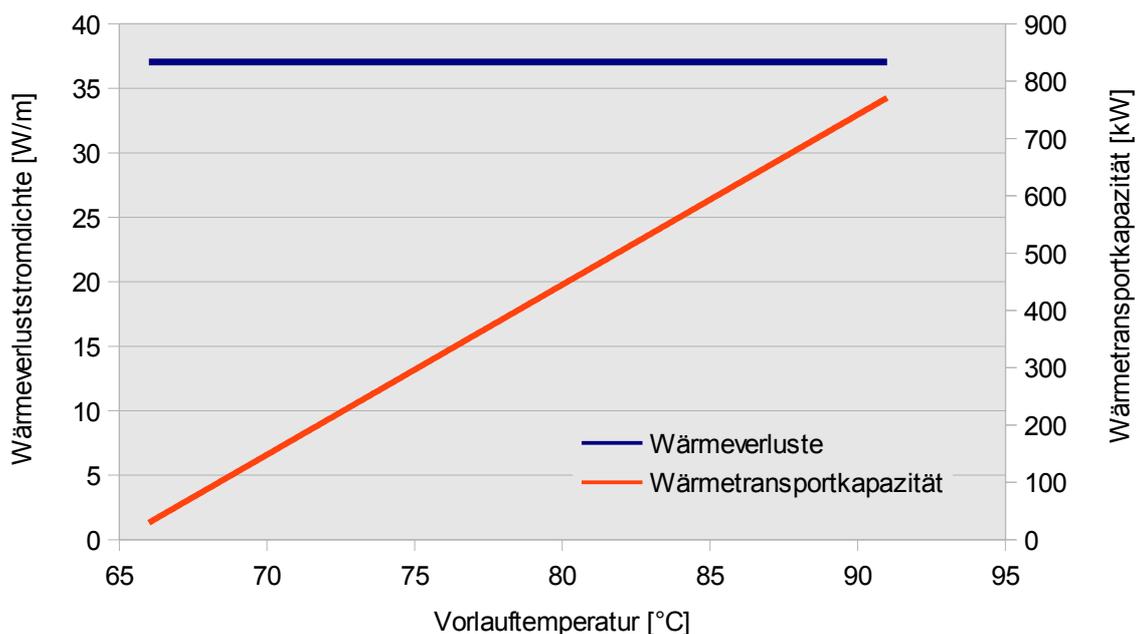
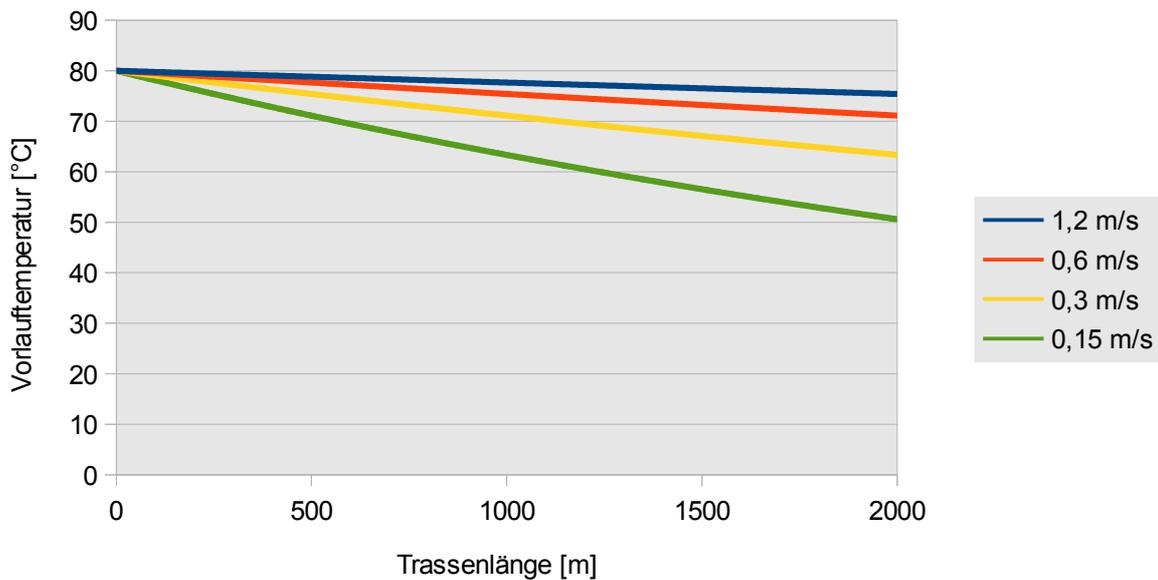


Abbildung 103: Wärmeverluststromdichte und Wärmetransportkapazitäten bei gleichbleibender Mitteltemperatur und veränderlicher Vorlauftemperatur

Die vorangehend dargestellten Wärmeverluste im Netz stellen nicht nur wirtschaftlich eine Herausforderung dar sondern bewirken auch Temperaturänderungen zwischen Wärmequellen und Wärmeabnehmern. Diese hängen im Betrieb neben den vorgenannten Faktoren von der momentanen Leistung beziehungsweise der Strömungsgeschwindigkeit ab.



*Abbildung 104: Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Trassenlänge
(Einspeisetemperatur an der Wärmequelle 80 °C, Rücklauftemperatur am
Hausanschluss Wärmeabnehmer 50 °C, Nennweite DN 80/160)*

Änderungen der Last bewirken bei gleichbleibender Rohrnetzinfrastruktur Änderungen der Temperaturen im Wärmenetz. Wie in Abbildung 104 ersichtlich ist, nimmt die Vorlauftemperatur über die Trassenlänge umso stärker ab, je niedriger die aus einer Lastreduzierung folgende Strömungsgeschwindigkeit ist. Ein Faktor 8 zwischen höchster und niedrigster Strömungsgeschwindigkeit im Jahresverlauf tritt in Nahwärmenetzen durchaus auf. Bei der Standortsuche für Wärmequellen kann die Kenntnis über die Auskühlung genutzt werden.

7. Zusammenführung

Nach den qualitativen Vorüberlegungen zu den Bestandteilen eines Nahwärmenetzes von der Wärmequelle über das Netz hin zum Kunden geht es jetzt um das Zusammenwirken einzelner Faktoren. Ausgehend von Wärmenetzen mit einer Biogasanlage als Hauptwärmequelle werden an Hand von Beispielen die quantitativen Auswirkungen der Standortwahl der Spitzenlasterzeuger gezeigt. Weitergehend werden im Hinblick auf die 3. Phase der Energiewende die Auswirkungen der Wahl der Endenergiequellen für die Spitzenlastwärmeerzeuger auf die Ausnutzung des lokalen Endenergieaufkommens dargelegt. Die Ausnutzung des lokalen Endenergieaufkommens ist eng verbunden mit der Frage nach den veräußerbaren elektrischen Energiemengen. Für eine quantitative, analytische Betrachtung der Zusammenhänge, bei der es um die Darstellung von Größenordnungen geht, sind Vereinfachungen notwendig. Es wird angenommen, dass die Netztemperaturen im Jahresverlauf und räumlich konstant sind und im Wärmenetz keine Speichereffekte auftreten.

7.1. Einfluss des Wärmeerzeugerstandortes auf die Netzverluste

Für den Wärmenetzbetreiber ist es von großem Interesse die Versorgung seiner Kunden mit möglichst geringem Aufwand bei Bau und Betrieb sicherzustellen. Entsprechend ist eine möglichst gute Ausnutzung des Wärmenetzes, verbunden mit – auf den Wärmeabsatz bezogen – geringen Wärmeverlusten bei geringer Spitzenlastwärmeerzeugernutzung anzustreben. In Kapitel 6 wurde die Berechnung der Netzverluste und der Netzauslastung dargelegt. Ebenso wurden die theoretischen Netzstrukturen, die sich aus unterschiedlichen Siedlungstypologien ergeben, vorgestellt. An zwei konkreten Beispielorten sollen die Einflüsse der Wärmeerzeugerstandorte auf die Netzverluste und die benötigten Wärmemengen aus den Spitzenlastwärmeerzeugern gezeigt werden.

Hierzu werden jeweils drei Szenarien gerechnet:

- Szenario 1: Ein einzelner Wärmeerzeugerstandort ist am Rand des Versorgungsgebietes angeordnet.
- Szenario 2: Ein einzelner Wärmeerzeugerstandort ist zentral im Netz angeordnet.
- Szenario 3: Dezentrale Anordnung der Wärmeerzeuger; Ein Wärmeerzeugerstandort ist am Rand des Versorgungsgebietes angeordnet und ein weiterer an zentraler Stelle im Netz.

Die räumliche Anordnung der Wärmeerzeuger erfolgt in den Beispielnetzen entsprechend der verfügbaren Flächen. Ein „Wärmeerzeugerstandort am Rand“ ist dabei außerhalb des Versorgungsgebietes angesiedelt. „Wärmeerzeugerstandorte zentral im Netz“ befinden sich entsprechend in unmittelbarer räumlicher Nähe der Wärmeabnehmer.

Für alle Szenarien gelten folgende Annahmen:

- Nur Wärmeerzeuger am Fermenterstandort werden für die Fermenterbeheizung herangezogen. Die fehlenden Wärmemengen zur Fermenterbeheizung bei BHKW-Abschaltung werden auf die nachfolgenden Stunden verschoben, wenn am Fermenterstandort kein Spitzenlastkessel vorhanden ist.
- Die Gesamtleistung aller BHKW eines Netzes ist in allen Szenarien gleich. Die

7. Zusammenführung

BHKW werden in der Grundlast mit 8.619 Betriebsstunden je Jahr betrieben.

- Die Temperaturen im Netz sind konstant.
- Es gelten die Wetterdaten des Testreferenzjahres „kalter Winter“ für Hannover des BBR [131]
- Die Trinkwarmwasserbereitung in den angeschlossenen Gebäuden erfolgt vollständig über Speicherladesysteme
- Netzseitig sind keine Pufferspeicher vorhanden

7.1.1. Beispielnetz 1 – Heitlingen

Für das erste Beispielnetz wurde der Ort Heitlingen gewählt. Heitlingen ist ein kleines lockeres Haufendorf mit mehreren landwirtschaftlichen Betrieben, die überwiegend Ackerbau betreiben. Intensivtierhaltung in beheizten Stallungen ist nicht vorhanden. Das Wärmenetz ist mit PEX-Rohren⁸ ausgeführt. Die Hauptleitung in Einzelrohrausführung erstreckt sich linear entlang der Hauptsiedlungsachse und verfügt nur über wenige längere Verzweigungen, die überwiegend mit PEX-Doppelrohren realisiert sind. Von den Verzweigungen gehen teilweise weitere kurze Stichleitungen ab. Von der Topografie des Ortes und der Nutzertopologie ist Heitlingen typisch für viele kleine Dörfer in den Ackerbauregionen Niedersachsens. Die Wärmeerzeugung im realen Wärmenetz erfolgt über eine Biogasanlage mit Gasspitzenlastkessel an einem Ende des Netzes. Alle Anschlüsse mit Trinkwarmwasserbereitung verfügen über Speicherladesysteme. Das Netz ist für im Mittel 75 °C im Vorlauf und 55 °C im Rücklauf ausgelegt.

Folgende Rahmendaten sind gegeben:

Jahreswärmeabsatz im Netz 1:	1.001 MWh
Einfamilienhäuser:	13 Anschlüsse
Mehrfamilienhäuser:	1 Anschluss
Wohnsitze:	2 Anschlüsse
Landwirtschaftliche Betriebe (Viehhaltung):	2 Anschlüsse
Landwirtschaftliche Betriebe (Ackerbau):	2 Anschlüsse
Gewerbebetriebe:	1 Anschluss
Kindergarten:	1 Anschluss
Sonstige öffentliche Gebäude:	3 Anschlüsse

Für alle Gebäude liegen jeweils einzeln gemessene Jahreswärmeverbräuche vor. Diese können aus Datenschutzgründen jedoch nicht einzeln veröffentlicht werden.

8 PEX: Vernetztes Polyethylen

Berechnete Daten:

Anschlussleistung Wärmenetz: 600 kW

Anschlussleistung Fermenterheizung: 300 kW

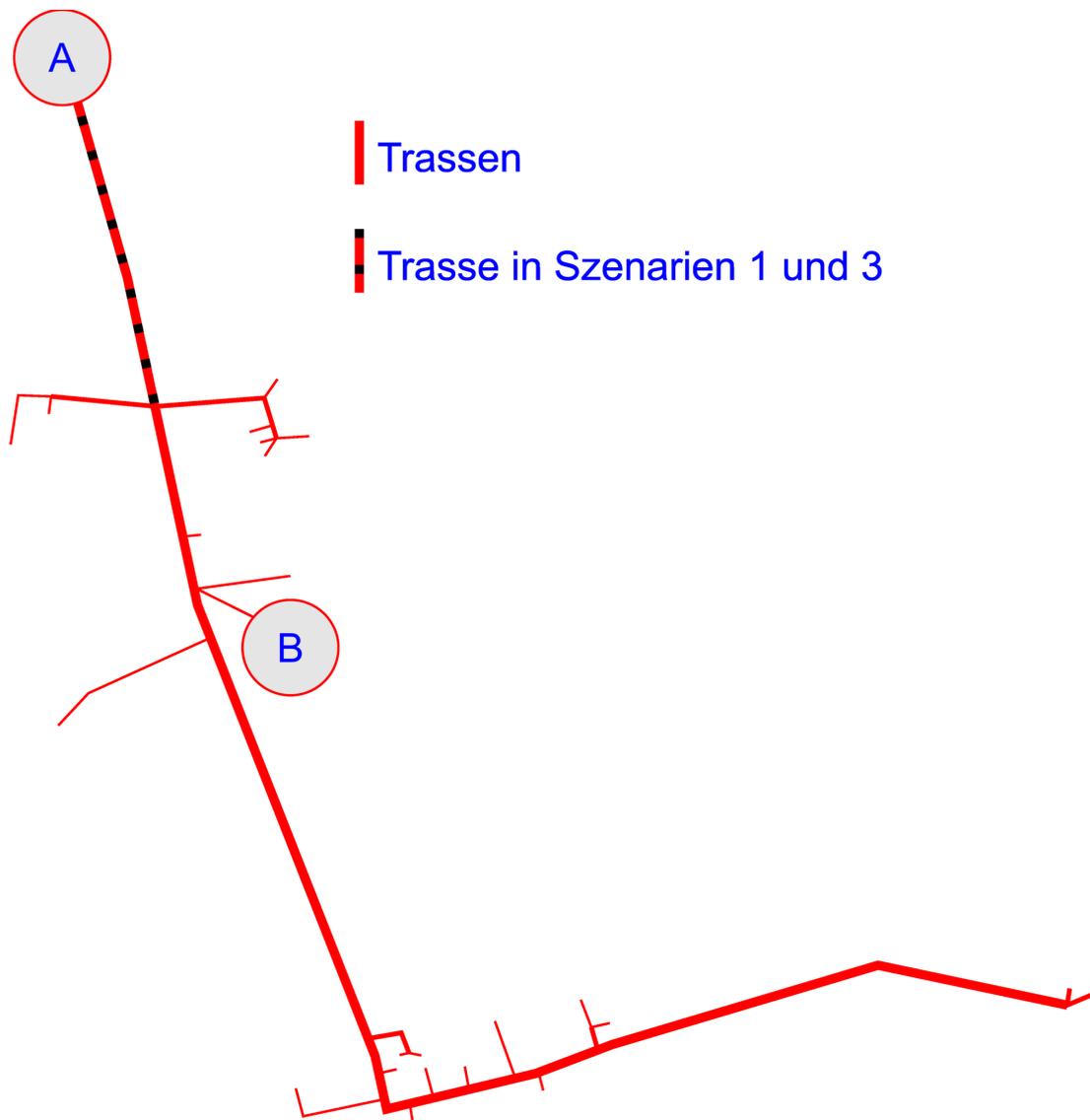


Abbildung 105: Nichtmaßstäbliche Netzskizze des Netzes 1 – Heitlingen

Szenario 1 – Einspeisung an einem Netzende:

Die Wärmeerzeuger – Biogas-BHKW und Spitzenlastwärmeerzeuger – befinden sich am Standort A und versorgen von hier das Wärmenetz sowie die Fermenterheizung.

7. Zusammenführung

Szenario 2 – Zentrale Einspeisestelle (Sternnetz):

Kurzbeschreibung: Am Standort B befinden sich ein Biogas BHKW (thermische Leistung 253 kW) und ein Spitzenlastwärmeerzeuger für die Speisung des Wärmenetzes. Die Fermenterbeheizung erfolgt über ein davon unabhängiges Biogas-BHKW am Standort A.

Szenario 3 – Verteilte Wärmeerzeugung:

Ein Biogas-BHKW befindet sich am Standort A und versorgt von hier aus das Wärmenetz sowie die Fermenterheizung. Der Spitzenlastwärmeerzeuger befindet sich am Standort B. Der Fermenter kühlt bei abgeschaltetem BHKW aus und muss anschließend wieder aufgeheizt werden.

Tabelle 19: Zusammenfassung Szenarien Netz 1, Heitlingen

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Netzlänge [m]	2.964	2.085	2.984
Maximale Netzlast [kW]	436	382	433
Bereitzustellende Gesamtleistung [kW]	566	642	592
Zu installierende Wärmeerzeugerleistung [kW]	1.022	884	919
Thermische Belastung der Wärmeerzeuger	0,258	0,266	0,288
Ort der größten Last	Anschluss Biogasanlage	Anschluss Wärmeerzeuger	Anschluss Biogasanlage
Gewichteter, mittlerer Jahresauslastungsgrad	0,25	0,16	0,25

Wie der Tabelle 19 zu entnehmen ist, sind bei dem Bestandsnetz nur kleine Unterschiede zwischen der bisherigen Netzstruktur und einer dezentralen Anordnung des Spitzenlastwärmeerzeugers auszumachen. Eine Verlagerung der gesamten Wärmeerzeugung in Richtung Wärmeabnehmer führt hingegen zu deutlich reduzierter maximaler Netzlast bei jedoch gleichzeitig sinkender Netzauslastung.

7.1.2. Beispielnetz 2 – Steyerberg

Der Ort Steyerberg ist in seiner Grundstruktur ein geschlossenes Haufendorf mit der Funktion eines Grundzentrums. Neben den Hauptverkehrsstraßen in Nord-Süd- und Ost-West-Ausrichtung bestehen zahlreiche vermaschte Nebenstraßen. Nördlich der eigentlichen Ortslage besteht eine seit den 1930er Jahren angelegte Siedlung mit Wohn- und Gewerbebauten – der Lebensgarten –, die ebenfalls die Struktur eines geschlossenen Haufendorfes aufweist. Wohnbebauung und viele gewerbliche Bauten sowie einige öffent-

liche Bauten bestimmen das teilweise urban wirkende Ortsbild. Landwirtschaft spielt nur noch eine untergeordnete Rolle. Damit ist Steyerberg mit Ausnahme des zusätzlichen Siedlungsschwerpunktes typisch für viele Grundzentren des ländlichen Raumes in Niedersachsen.

In Steyerberg existiert real nur ein kleines Wärmenetz zur Versorgung der Waldschule. Für die Versorgung weiter Teile des Ortes mit Abwärme des Chemiewerkes oder der Biogasanlage wurde eine Machbarkeitsstudie [48] erstellt, in der eine lineare Netzstruktur mit einem Ring vorgesehen ist. Für die Ausführung sind KMR-Doppelrohrsysteme⁹ vorgesehen. In der Machbarkeitsstudie ist die Spitzenlastwärmeversorgung über die vorhandenen Kessel der Waldschule sowie ein kleines BHKW im Bereich Lebensgarten vorgesehen. Das Netz ist auf eine mittlere Vorlauftemperatur von 80 °C und eine Rücklauftemperatur von 50 °C ausgelegt.

Die Wärmenetzstruktur der Machbarkeitsstudie sowie die vorliegenden Angaben zu den Wärmeverbräuchen der Einzelanschlüsse werden im Folgenden in Verbindung mit den für Heitlingen erarbeiteten Standardlastprofilen eingesetzt. Auf Grund der bisher nicht realisierten Anlage werden der Fermenterwärmebedarf sowie die Fahrweise der Fermenterheizung aus den Daten der Biogasanlage Heitlingen hochgerechnet.

Die folgenden für die Machbarkeitsstudie erhobenen Daten werden für die Szenarien verwendet¹⁰:

Jahreswärmeabsatz im Netz:	7.851 MWh
Einfamilienhäuser:	193 Anschlüsse
Mehrfamilienhäuser:	19 Anschlüsse
Landwirtschaftliche Betriebe (Viehhaltung):	1 Anschluss
Landwirtschaftliche Betriebe (Ackerbau):	1 Anschluss
Gartenbaubetriebe:	1 Anschluss
Gewerbebetriebe:	15 Anschlüsse
Kindergärten:	2 Anschlüsse
Schule:	1 Anschluss
Sonstige öffentliche Gebäude:	2 Anschlüsse

Für alle Gebäude liegen jeweils einzeln gemessene Jahreswärmeverbräuche vor. Diese können aus Datenschutzgründen jedoch nicht veröffentlicht werden.

⁹ KMR: Kunststoffmantelverbundrohr

¹⁰ Hinweis: Die hier aufgelisteten Daten weichen teilweise von den in der Machbarkeitsstudie veröffentlichten ab, da in der Machbarkeitsstudie aus wirtschaftlichen Gründen nicht berücksichtigte Anschlüsse in die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Szenarien mit einbezogen werden.

7. Zusammenführung

Berechnete Daten:

Anschlussleistung Wärmenetz:	4.289 kW
Anschlussleistung Fermenterheizung:	900 kW

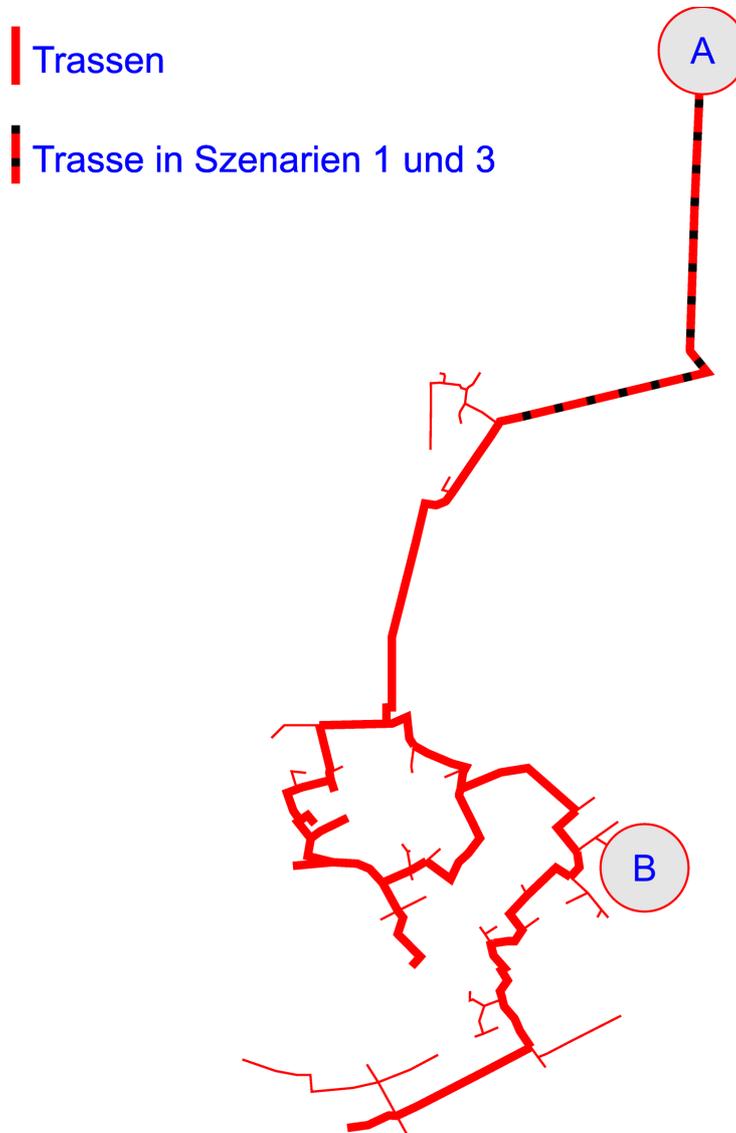


Abbildung 106: Netzstrukturskizze Netz 2 – Steyerberg (ohne Darstellung der Hausanschlüsse)

Auf Basis der für die Machbarkeitsstudie erhobenen Daten und der Netzstruktur werden wie im Beispiel Heitlingen drei Szenarien durchgerechnet:

Szenario 1 – Einspeisung an einem Netzende:

Die Wärmeerzeuger befinden sich am Standort A und versorgen von hier das Wärmenetz sowie die Fermenterheizung. Bei Ausfall des BHKW versorgt der Spitzenlastwärmeerzeuger auch die Fermenterheizung.

Szenario 2 – Zentrale Einspeisestelle (Sternnetz):

Am Standort B befinden sich ein Biogas BHKW (thermische Leistung 1.110 kW) und ein Spitzenlastwärmeerzeuger für die Speisung des Wärmenetzes. Die Fermenterbeheizung erfolgt über ein davon unabhängiges Biogas-BHKW am Standort A mit einer thermischen Leistung von 890 kW.

Szenario 3 – Verteilte Wärmeerzeugung:

Ein Biogas-BHKW befindet sich am Standort A und versorgt von hier das Wärmenetz sowie die Fermenterheizung. Der Spitzenlastwärmeerzeuger befindet sich am Standort B. Bei Ausfall des BHKW kühlt der Fermenter aus und muss nach Wiederinbetriebnahme des BHKW wieder aufgeheizt werden.

Tabelle 20: Zusammenfassung Szenarien Netz 2, Steyerberg

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Netzlänge [m]	16.850	15.169	16.850
Maximale Netzlast [kW]	3.026	3.001	3.086
Bereitzustellende Gesamtleistung [kW]	3.422	3.411	3.496
Zu installierende Wärmeerzeugerleistung [kW]	4.283	4.246	4.395
Thermische Belastung der Wärmeerzeuger	0,336	0,331	0,333
Ort der größten Last	Anschluss Biogasanlage	Anschluss Wärmeerzeuger	Anschluss Wärmeerzeugerstandort B
Gewichteter, mittlerer Jahresauslastungsgrad	0,133	0,146	0,230

Indem das Beispielnetz 2 am Standort Steyerberg ohne vorhandenes Netz „frei“ geplant werden kann, sind gegenüber dem Netz 1 (Heitlingen) deutlichere Unterschiede zwischen den Szenarien 1 und 3 auszumachen. Hier ist insbesondere die in Szenario 3 (verteilte Wärmequellen) gegenüber Szenario 1 um über 70 % höhere Netzauslastung festzustellen.

7.1.3. Zusammenfassung Einfluss der Wärmeerzeugerstandorte

Die Variation der Wärmeerzeugerstandorte verändert in den Szenarien 1 und 2 nur die Nennweite der Rohrleitungen sowie die Einsetzbarkeit der Spitzenlastkessel zur Fermenterbeheizung. In dem Szenario 3 fällt zudem die Leitung zwischen erstem Wärmeabnehmer und Biogasanlage weg. An ihre Stelle tritt eine Biogasleitung zwischen Biogasanlage und Standort B.

Die sich aus diesen Änderungen im Wärmenetz ergebenden Änderungen der Netzverluste sind in Abbildung 107 dargestellt.

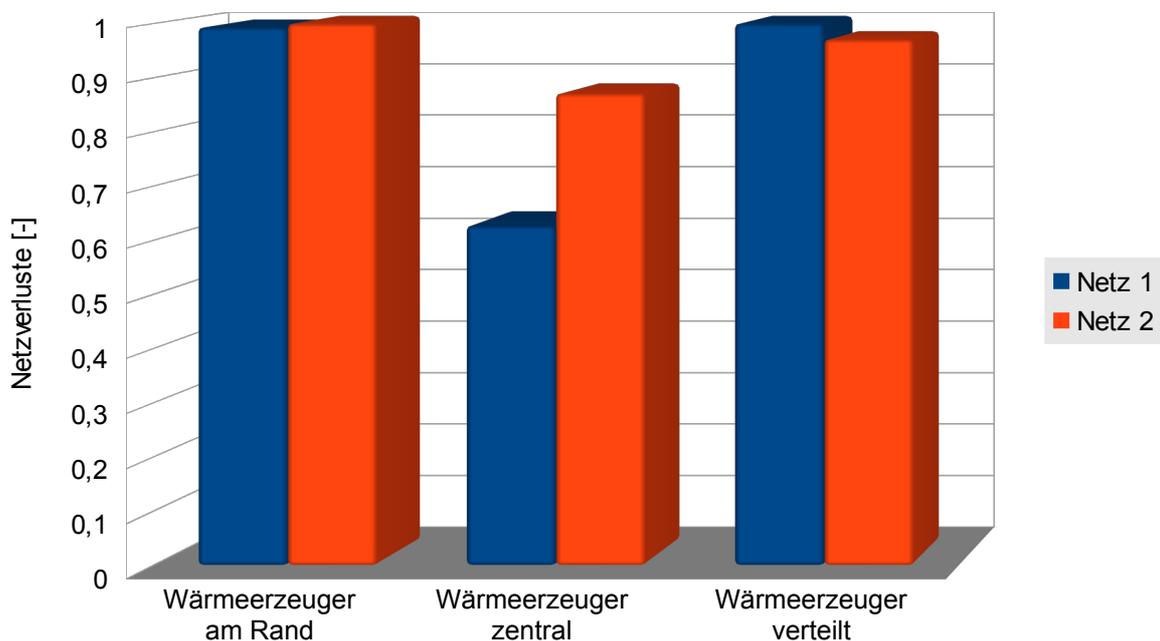


Abbildung 107: Resultierende Netzverluste im Vergleich

Die Änderung der Wärmeverluste im Netz sowie die zeitliche Änderung des Fermenterheizbedarfes in den verschiedenen Szenarien wirken sich direkt auf den Wärmebedarf, der über den Spitzenlastwärmeerzeuger gedeckt werden muss aus. In Abbildung 108 ist die relative Veränderung des über den Spitzenlastwärmeerzeuger zu deckenden Wärmebedarfs dargestellt.

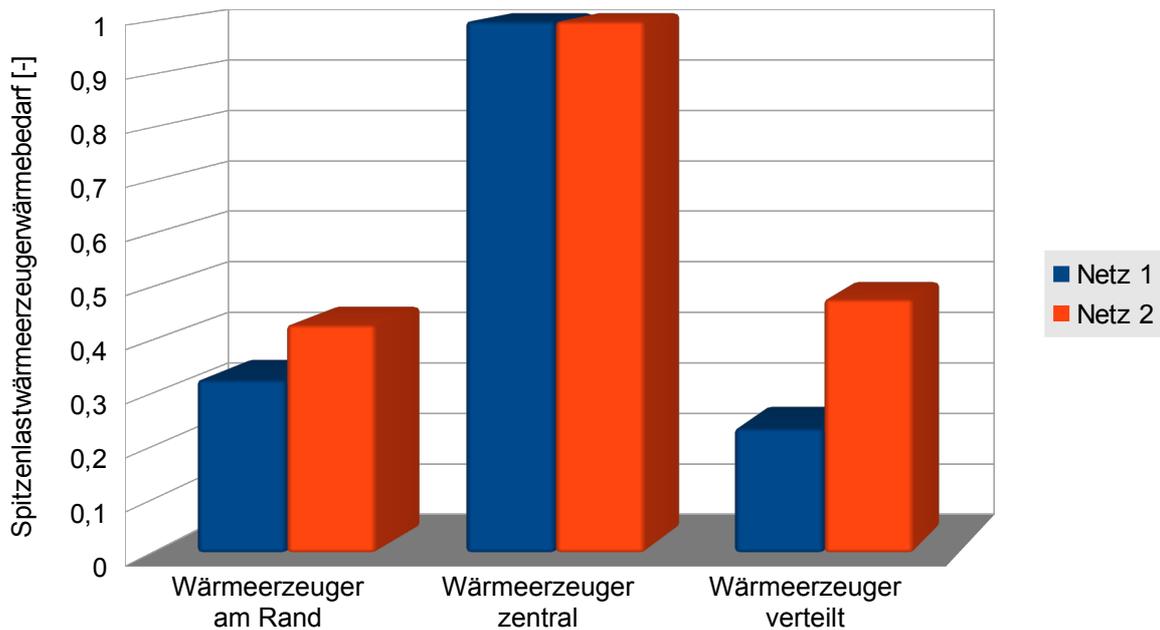


Abbildung 108: Resultierender Spitzenlastwärmeerzeugerbedarf

Eine Aussage, welcher Standort für die Wärmeerzeuger der Richtige ist, ist bei den beiden Beispielen an Hand der vorangehenden beiden Szenarienvergleiche nicht eindeutig zu treffen. Sind die Netzverluste für den Netzbetreiber die relevante Größe, so wäre in beiden Orten der zentrale Wärmeerzeugerstandort vorzuziehen.

Sind die Netzverluste jedoch nur nachrangig und der Spitzenlastkesselwärmebedarf das entscheidende Kriterium, ist in Heitlingen die verteilte Wärmeerzeugung und in Steyerberg die Bereitstellung der gesamten Wärmemenge am Standort der Biogasanlage vorzuziehen. Auf technischer Seite kann hier eine Betrachtung der Endenergieeffizienz bei der Entscheidungsfindung weiterhelfen.

7.2. Endenergieeffizienz

Die Bewertung unterschiedlicher Wärmeerzeugungs- und Verteilungssysteme hinsichtlich ihrer Endenergieeffizienz ist ein relativ neuer Ansatz zum Vergleich von Wärmeversorgungssystemen in der dritten Phase der Energiewende, der sowohl bei Betrachtung aus Sicht der Wärmenetzbetreiber als auch aus volkswirtschaftlicher Sicht relevante Impulse in der Entscheidungsfindung bringen kann. Traditionell werden in der thermischen Energietechnik die Primärenergieeffizienzen und Anlagenwirkungsgrade als Vergleichsmaßstab herangezogen. In ländlichen Gebieten sind regenerative Energien wie Wind, Sonne und Biomasse in großen Mengen vorhanden. Wind wird fast ausschließlich zur Gewinnung elektrischer Energie genutzt (im Bestand existieren daneben noch direkt angetriebene Pumpen und Mühlen). Biomasse und Sonne werden ebenfalls primär zur Gewinnung von elektrischer Energie eingesetzt (siehe auch [132]).

Aus Sicht des Wärmenetzbetreibers im ländlichen Bereich, der neben einer Biogasanlage auch Windkraftanlagen (WKA) und Photovoltaikanlagen (PV) mit fester EEG-Vergütung

7. Zusammenführung

betreibt, soll die in das öffentliche Stromnetz einzuspeisende elektrische Energiemenge möglichst groß und die zuzukaufende Endenergiemenge für den Spitzenlastwärmeerzeuger möglichst klein sein.

Aus volkswirtschaftlicher Sicht ist die elektrische Einspeiseleistung möglichst optimal an den elektrischen Bedarfslastgang anzupassen. Da Sonne und Wind nicht steuerbar sind, sind zum Ausgleich die Leistungen der Biomasse(heiz-)kraftwerke sowie der großen elektrischen Energieabnehmer zu regeln.

Für das Beispielnetz 1 (siehe Abbildung 105) mit dem Szenario 1 (Wärmeerzeuger am Rand) werden neben dem Ausgangsszenario drei Unterszenarien für die Bereitstellung von Spitzenlastwärme mit überkritischen Großmotorwärmepumpen am Standort der Biogasanlage gerechnet. Für das Szenario 3 (Verteilte Wärmeerzeugung) wird ein weiteres Unterszenario gerechnet. In dem Ausgangsszenario A wird eine typische Konstellation aus der 2. Phase der Energiewende (siehe Abbildung 7) dargestellt. Die weiteren Unterszenarien zeigen mögliche Verknüpfungen zwischen Wärme- und Elektrizitätsversorgung in der 3. Phase der Energiewende (siehe Abbildung 8).

Der Fokus der Szenarien liegt dabei darauf, in wie weit Kessel mit fossilen Energieträgern (als Beispiel wird im Szenario Propangas angenommen) durch Sole-Wasser-Wärmepumpen und Heizstäbe mit vor Ort gewonnenem Strom aus Wind- oder Sonnenenergie ersetzt werden können. Die Grundlast wird jeweils durch eine Biogasanlage, die über ein BHKW mit 427 kW thermischer und 400 kW elektrischer Gesamtleistung verfügt, bereitgestellt. Die BHKW-Betriebszeiten sowie die Lastkurven der Fermenterheizung und des Wärmenetzes entsprechen den in Abschnitt 7.1.1. vorgestellten Szenarien 1 und 3. Die Bereitstellung der elektrischen Antriebsenergie für den Einsatz von Wärmepumpen und Heizstäben erfolgt in den Unterszenarien jeweils über eine Photovoltaikanlage oder eine Windkraftanlage mit einer Peakleistung von 1.025 kW. Bei Windkraftanlagen entspricht eine Peakleistung von 1.025 kW der halben maximalen Leistung einer Enercon E82, die über einen Rotor mit einem Durchmesser von 82 m und einer maximalen Nabenhöhe von 106 m verfügt [133]. Für die gleiche Peakleistung werden rund 6.400 m² Photovoltaikanlagen benötigt.

Wie in den vorangehenden Kapiteln dargestellt, zeigen Wärmepumpen und Biogasblockheizkraftwerke eine deutliche Abhängigkeit der auskoppelbaren thermischen Leistung und der Netzurücklauftemperatur. Zusätzlich weisen die überkritischen Wärmepumpen eine Abhängigkeit der benötigten elektrischen Antriebsenergie von der Vorlauftemperatur auf. Niedrige Vorlauftemperaturen führen bei den Wärmeabnehmern, wie in Kapitel 4 dargestellt, zu hohen Rücklauftemperaturen und umgedreht. In der Praxis müssten für die Ermittlung der optimalen Betriebstemperaturen wirtschaftliche und energetische Optimierungsrechnungen durchgeführt werden. Für die Unterszenarien dieser Arbeit wird vereinfachend eine konstante Netzurücklauftemperatur von 80 °C bei einer Rücklauftemperatur von 50 °C festgelegt. Da bis 70 °C Vorlauftemperatur zahlreiche Wärmepumpen auf dem Markt verfügbar sind, wird für die Szenarien B, C und E festgelegt, dass die Wärmepumpe mit einer konstanten Vorlauftemperatur von 70 °C betrieben wird. Die Temperatur der Wärmequelle für die Wärmepumpe wird konstant auf 12 °C gehalten.

7.2.1. Ausgangsszenario A – Propangasspitzenlastkessel

Mit einem Propangasspitzenlastkessel am Standort der Biogasanlage wird die Spitzenlastwärme mit einer Temperatur von 80 °C bereitgestellt. Der Kessel ist dabei parallel zum BHKW eingebunden.

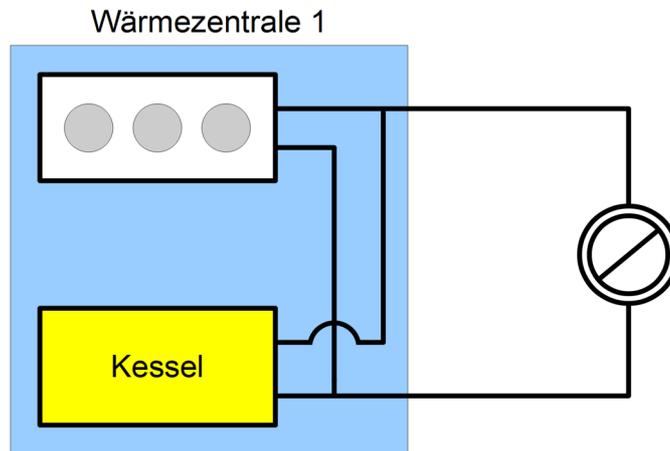


Abbildung 109: BHKW mit parallel geschaltetem Spitzenlastkessel

In der folgenden Abbildung sind die zugehörigen Lastgänge von BHKW und Kessel dargestellt.

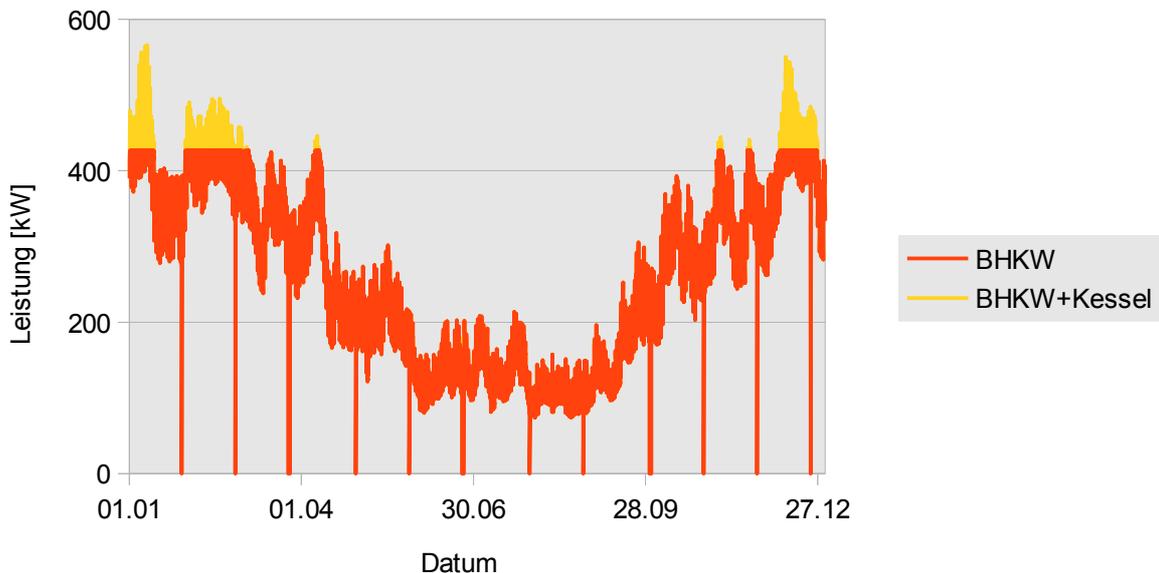


Abbildung 110: Thermische Kesselleistung und Wärmelast

7. Zusammenführung

Der für das Beispiel auf 475 kW thermische Leistung ausgelegte Kessel kann nach Bedarf angefordert werden und ganzjährig Spitzenlasten abdecken sowie die thermische Ersatzleistung bei einem Ausfall oder geplanter Abschaltung des Blockheizkraftwerkes übernehmen.

7.2.2. Unterszenario B – Wärmepumpe mit Heizstab

Am Standort des Biogas-BHKW wird eine oberflächennahe Geothermieanlage mit einer Wärmepumpe installiert. Der Wärmepumpe mit einer Vorlauftemperatur von 70 °C wird gemäß Abbildung 111 ein Heizstab nachgeschaltet. Die Netztemperaturen an der Einspeisestelle werden auf 80 °C im Vorlauf und 50 °C im Rücklauf festgelegt. Auf Grund der hydraulischen Verschaltung sowie der festgelegten Vorlauftemperaturen ist eine Variation des Verhältnisses der Wärmebereitstellung zwischen Wärmepumpe und Heizstab nicht möglich. (Für eine an das elektrische Energieangebot angepasste Fahrweise müsste die Schaltung geändert werden.) Wie in Kapitel 5 dargestellt ist, ist die Wärmezahl von Wärmepumpen abhängig von der Vorlauftemperatur. Heizstäbe weisen dagegen über den gesamten Temperaturbereich einen Wirkungsgrad von ungefähr eins auf.

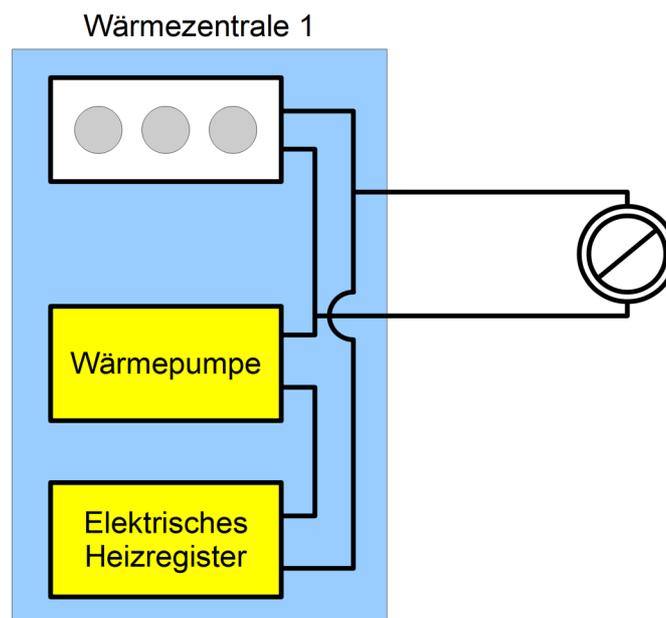


Abbildung 111: Wärmepumpe mit nachgeschaltetem elektrischen Heizstab in der Wärmezentrale der Biogasanlage (Parallelschaltung von Wärmepumpe und BHKW)

In den Abbildungen 112 und 113 sind die Jahresdauerlinien der elektrischen Energieproduktion aus der Windkraftanlage und der Photovoltaikanlage sowie der Energiebedarf für die Wärmepumpen und den Heizstab aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass sowohl bei der WKA als auch bei der PV im Winterhalbjahr (22. September bis 21. März) entsprechend etwa der Stunden 6300 bis 1.900) immer wieder Zeiten mit unzureichender Bedarfsdeckung auftreten. In der Praxis müsste dann elektrische Energie aus dem Verbundnetz zugekauft oder elektrische Energie aus dem Biogas-BHKW genutzt werden.

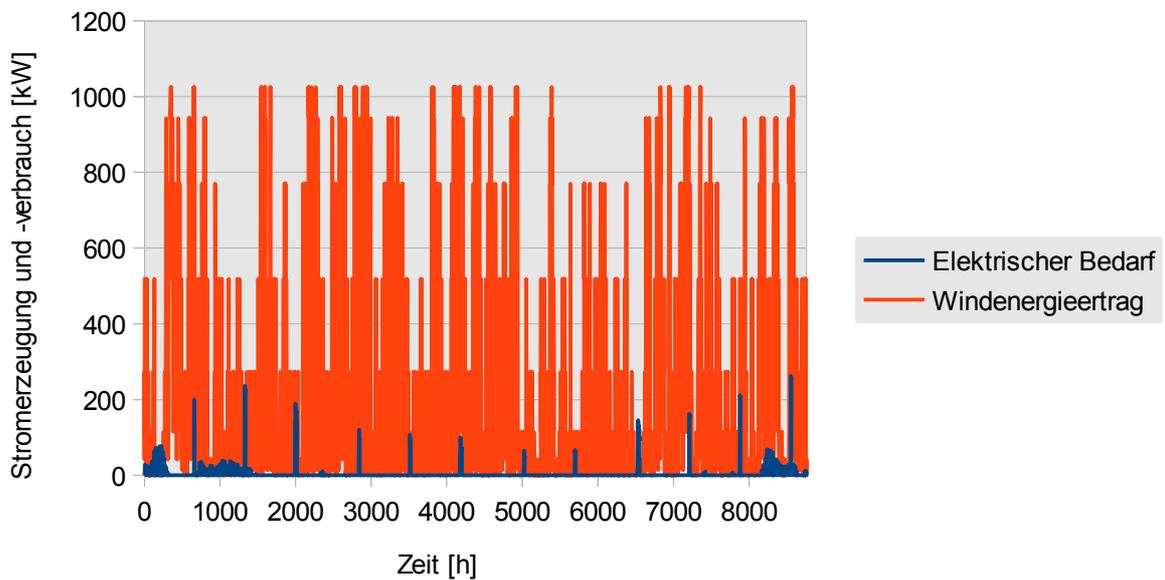


Abbildung 112: Wärmepumpe mit Heizstab an der Biogasanlage bei elektrischer Energiebereitstellung durch WKA

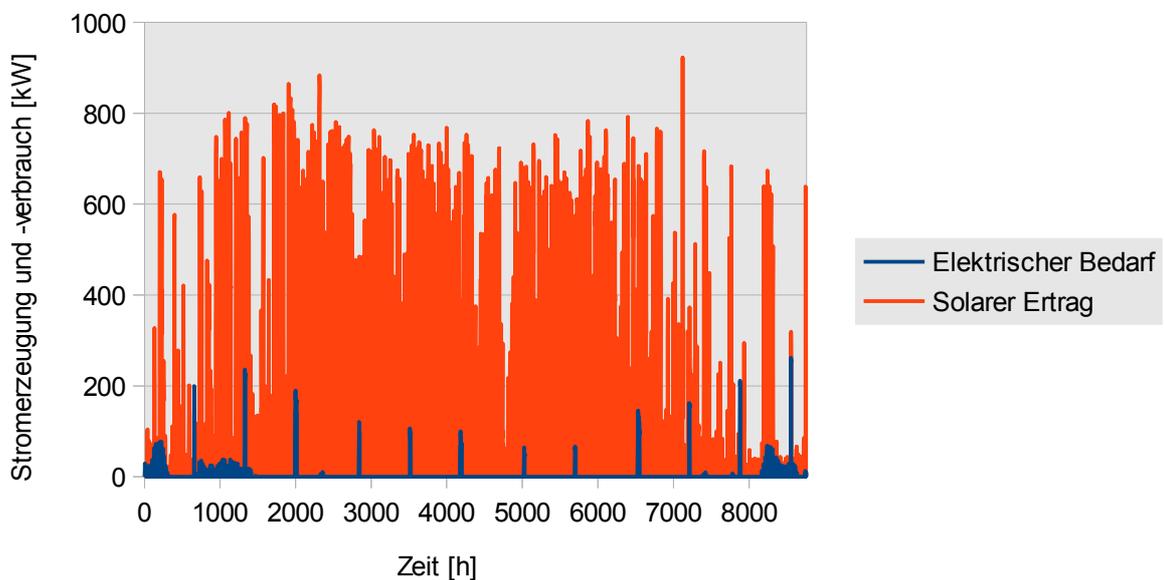


Abbildung 113: Wärmepumpe mit Heizstab an der Biogasanlage bei elektrischer Energiebereitstellung durch PV

In den Abbildungen 114 und 115 ist das Winterhalbjahr mit den Wärmebedarfen und der jeweiligen Bedarfsdeckung dargestellt.

7. Zusammenführung

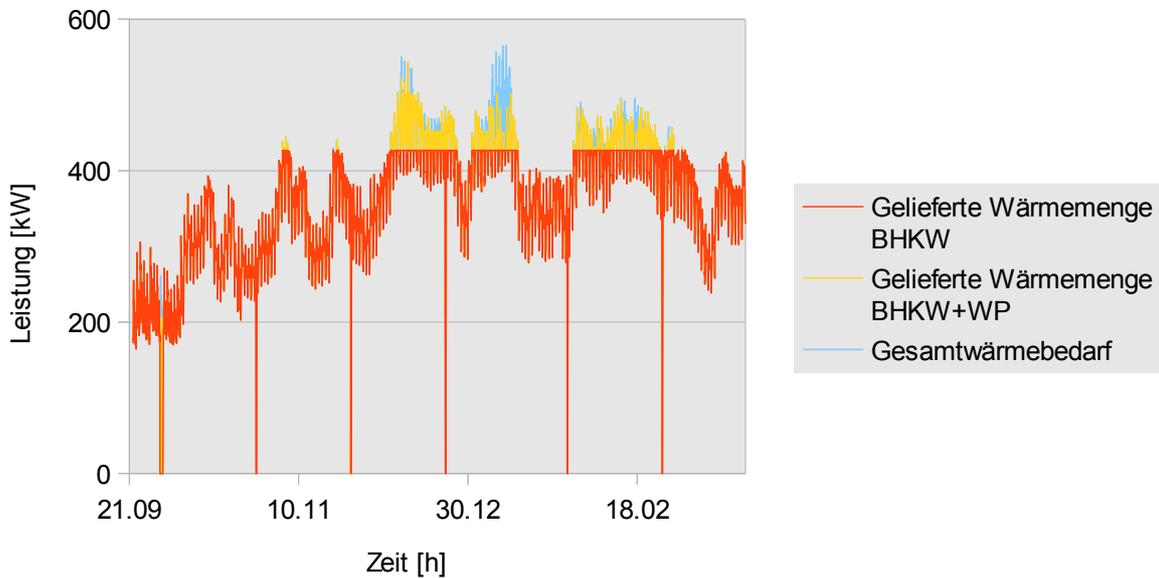


Abbildung 114: Detailbetrachtung Wärmelast und Wärmeverfügbarkeit im Winterhalbjahr mit Antriebsenergie aus WKA

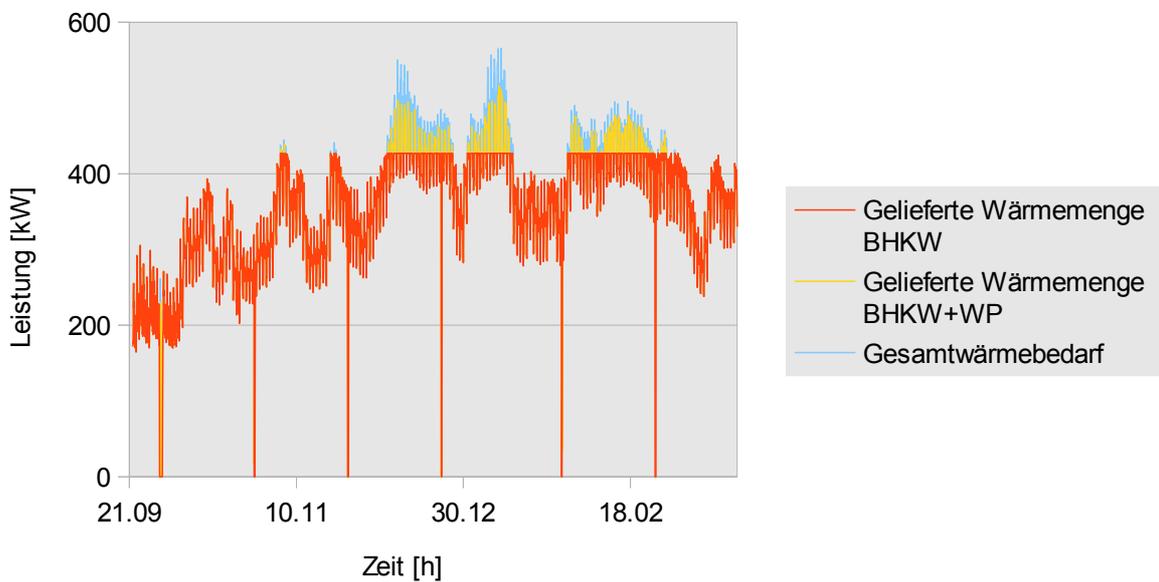


Abbildung 115: Detailbetrachtung Wärmelast und Wärmeverfügbarkeit im Winterhalbjahr mit Antriebsenergie aus PV

Die blauen Flächen zeigen, dass zeitweise mit den zugrunde gelegten Wind- oder Photovoltaikanlagen nicht ausreichend elektrische Energie zum Betrieb der Wärmepumpen und Heizstäbe (WP) bereitgestellt werden kann.

7.2.3. Unterszenario C – Wärmepumpe am BHKW (Reihenschaltung)

Die Spitzenlastwärmeversorgung erfolgt über eine Sole-Wasser-Wärmepumpe am Standort der Biogasanlage. Die Wärmepumpe erhöht mit Wärme aus oberflächennahen Geothermiebohrungen bei Betrieb des BHKW die Rücklauftemperatur des Fernwärmekreislaufes auf die Sollrücklauftemperatur des Motorkühlwassers von 70 °C. Bei Ausfall des BHKW wird die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe auf 80 °C angehoben.

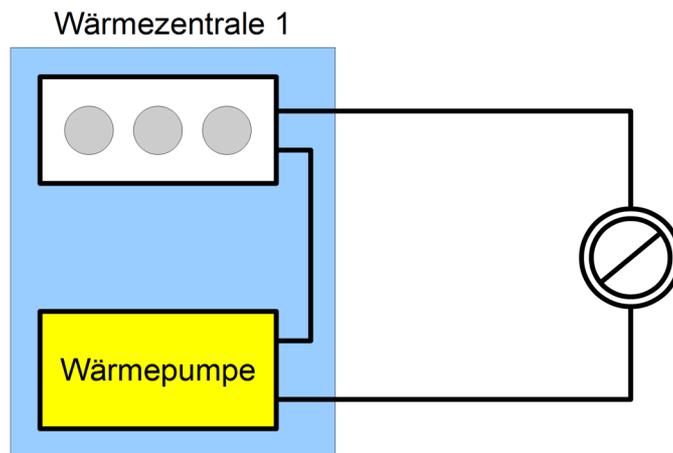


Abbildung 116: Wärmepumpe in Reihe zum BHKW geschaltet

Die Abbildungen 117 und 118 zeigen den elektrischen Energiebedarf der Wärmepumpe und die verfügbare elektrische Leistung aus Windkraftanlage und Photovoltaik.

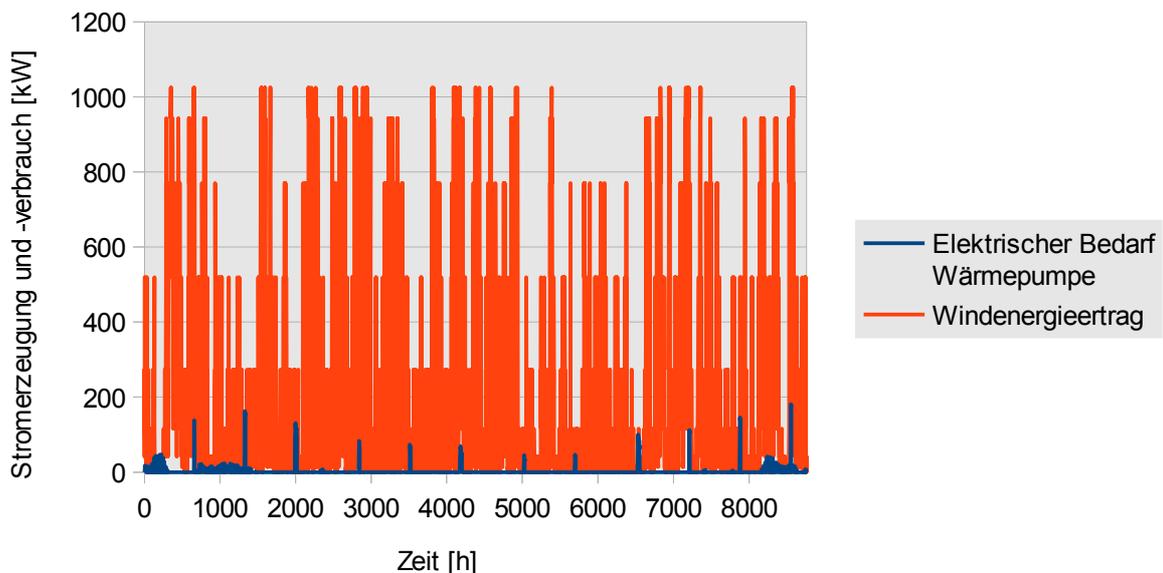


Abbildung 117: Wärmepumpe am BHKW bei elektrischer Energiebereitstellung durch WKA

7. Zusammenführung

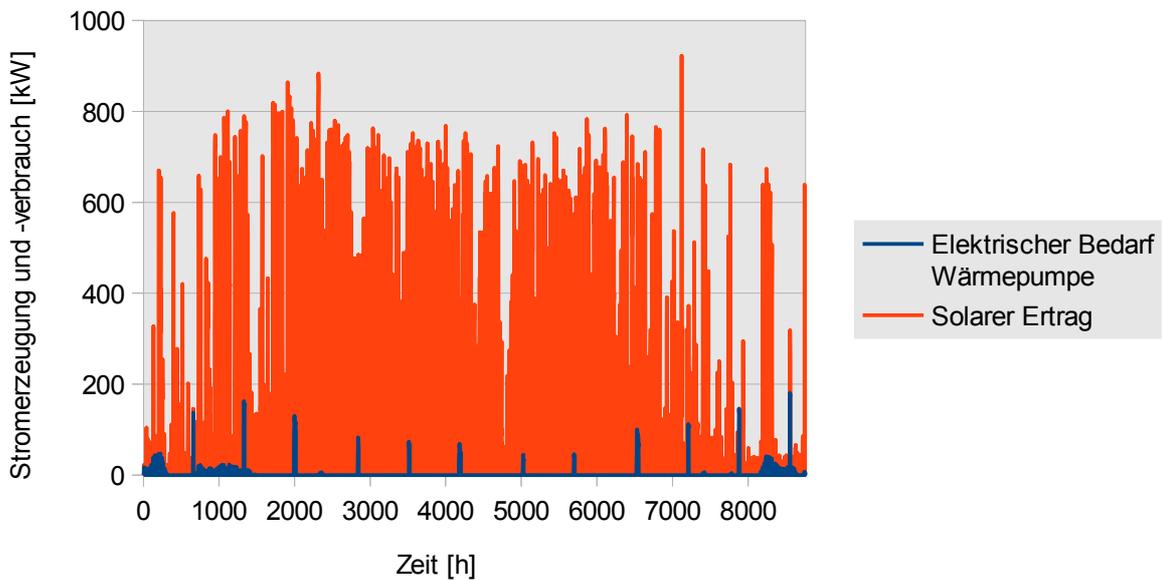


Abbildung 118: Wärmepumpe am BHKW bei elektrischer Energiebereitstellung durch PV

In Abbildung 119 und Abbildung 120 sind die benötigten Wärmemengen und die verfügbaren Wärmemengen im Winterhalbjahr dargestellt.

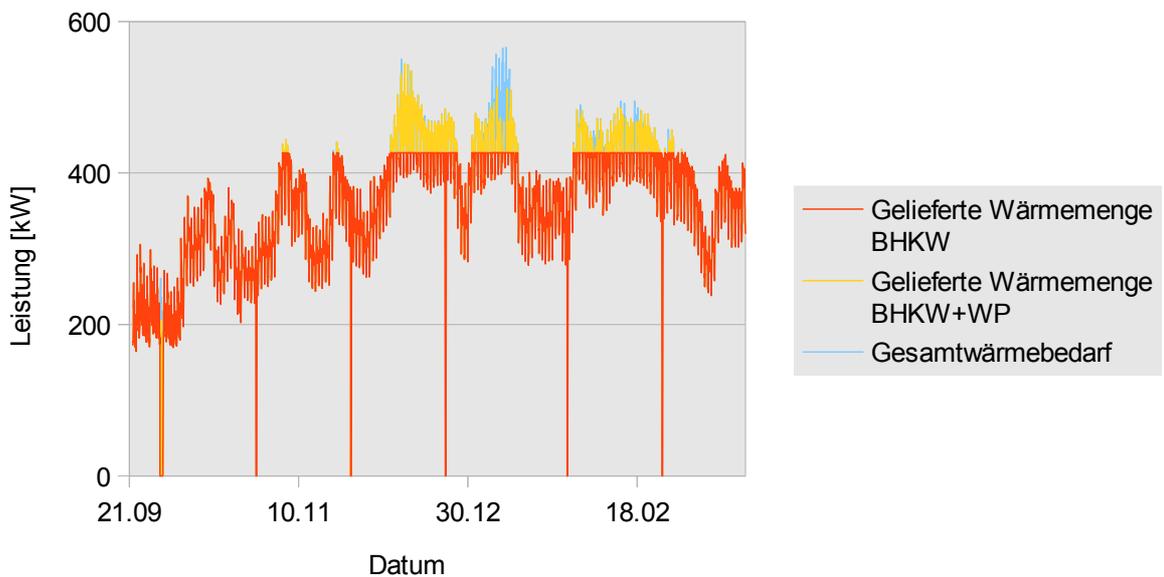


Abbildung 119: Detailbetrachtung Wärmelast und Wärmeverfügbarkeit im Winterhalbjahr mit Antriebsenergie aus WKA

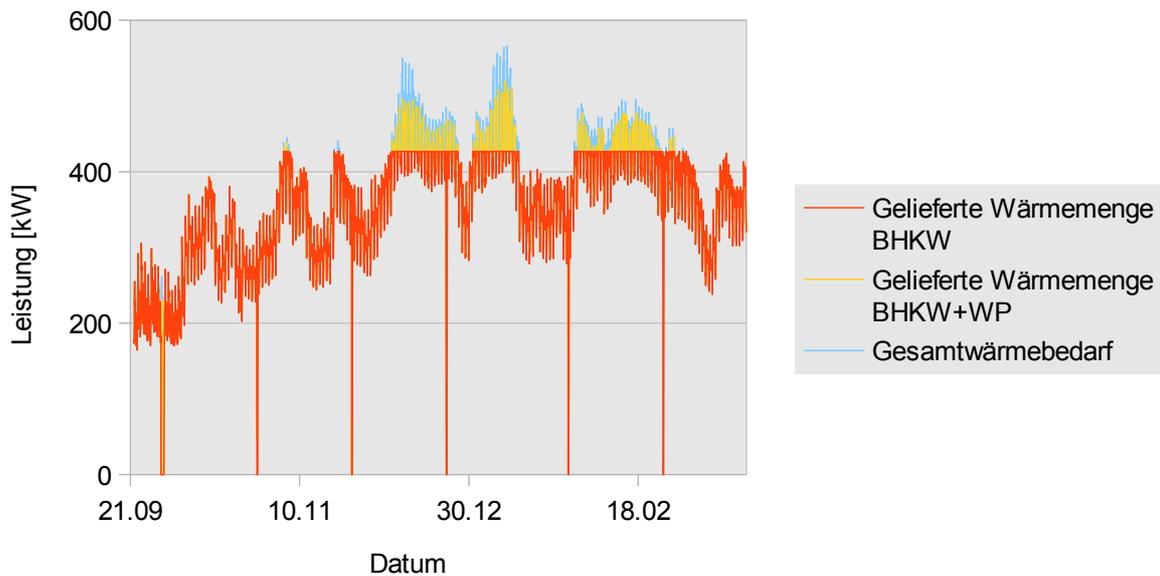


Abbildung 120: Detailbetrachtung Wärmelast und Wärmeverfügbarkeit im Winterhalbjahr mit Antriebsenergie aus PV

Dabei zeigt sich erneut, dass in diesem Beispiel die Sonnenenergie den elektrischen Energiebedarf der Wärmepumpe schlechter abdecken kann, als die Windenergie. Bei beiden Energiequellen steht jeweils zum Zeitpunkt des höchsten Bedarfs keine ausreichende elektrische Leistung zum Antrieb der Wärmepumpen zur Verfügung. Gegenüber dem Szenario B kann bei gleicher Erzeugerleistung allerdings ein größerer Teil des gesamten elektrischen Energiebedarfs zum Antrieb des Spitzenlasterzeugers Wärmepumpe gedeckt werden.

7.2.4. Unterszenario D – Wärmepumpe dezentral im Netz

In diesem Unterszenario befindet sich die Wärmepumpe mit den Geothermiebohrungen dezentral im Netz am Standort B (siehe Abbildung 105). Die kurze Distanz zu den Wärmeabnehmern ermöglicht hier eine Reduzierung der Einspeisetemperatur auf 75 °C. Die Vorlauftemperatur an der Biogasanlage liegt bei 80 °C.

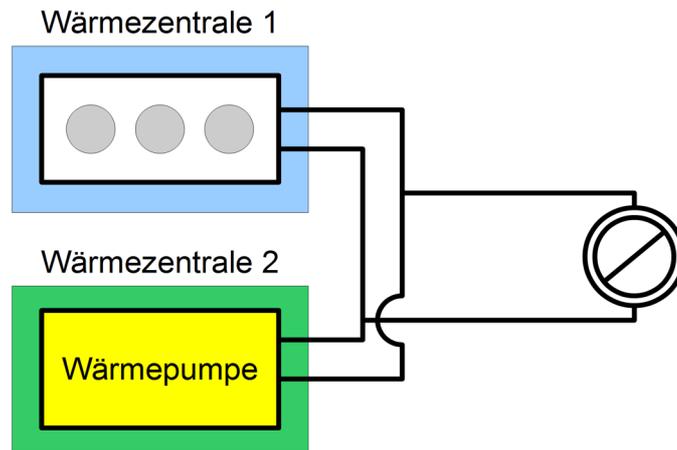


Abbildung 121: Wärmepumpe in eigener Heizzentrale dezentral im Netz

Die folgenden Abbildungen zeigen den elektrischen Energiebedarf der dezentral im Netz platzierten Wärmepumpe und die verfügbare elektrische Leistung aus Windkraftanlage und Photovoltaik.

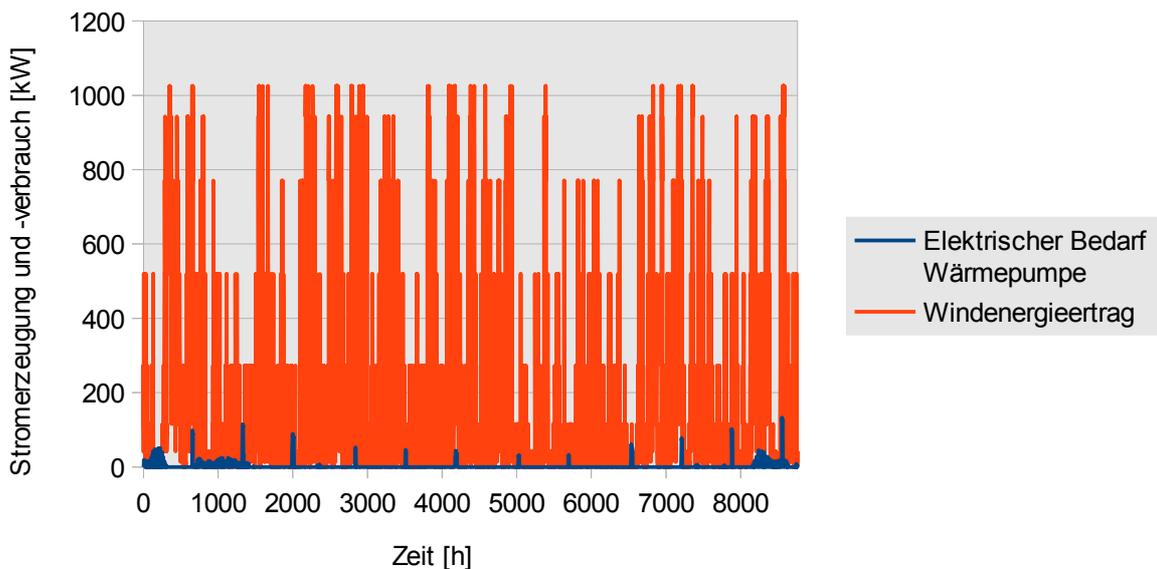


Abbildung 122: Wärmepumpe dezentral im Wärmenetz bei elektrischer Energiebereitstellung durch WKA

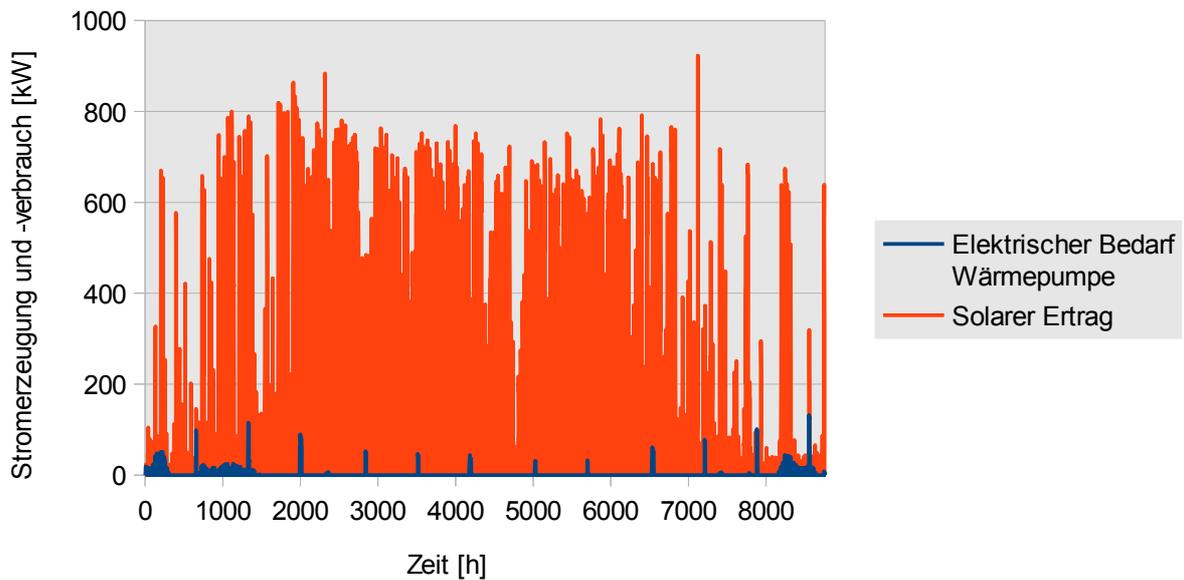


Abbildung 123: Wärmepumpe dezentral im Wärmenetz bei elektrischer Energiebereitstellung durch PV

Wie in den Abbildungen 122 und 123 ersichtlich ist, treten auch im Unterszenario D in den Wintermonaten Zeiten mit unzureichender elektrischer Leistungsbereitstellung durch PV und WKA für den Betrieb der Wärmepumpe auf. Für eine weitergehende Bewertung sind wie für die Unterszenarien A bis C erneut Detailbetrachtungen der Wintermonate erforderlich.

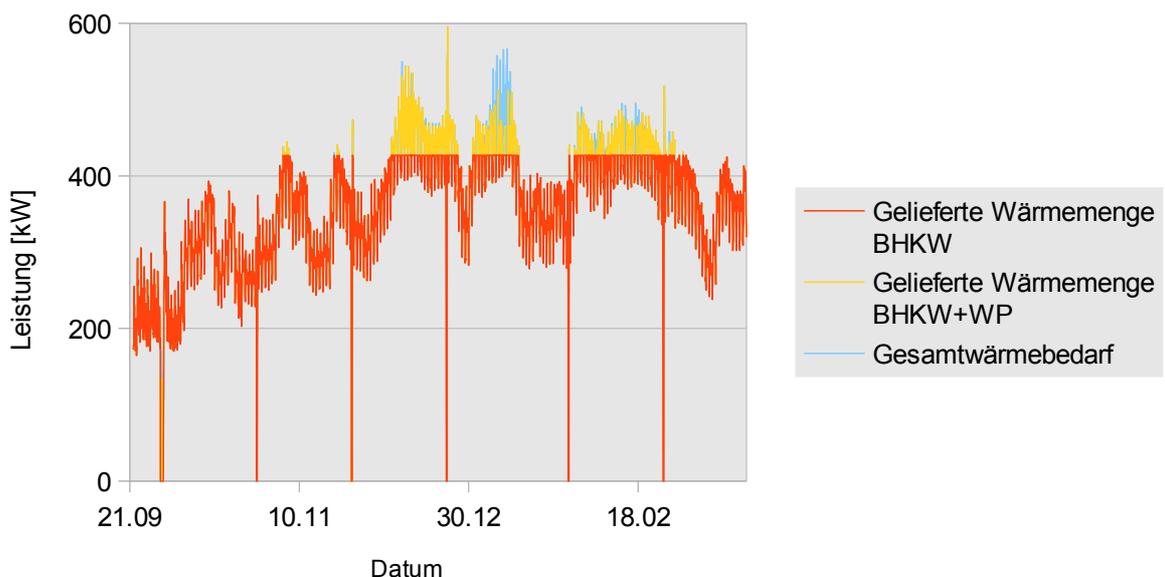


Abbildung 124: Detailbetrachtung Wärmelast und Wärmeverfügbarkeit im Winterhalbjahr mit Antriebsenergie aus WKA

7. Zusammenführung

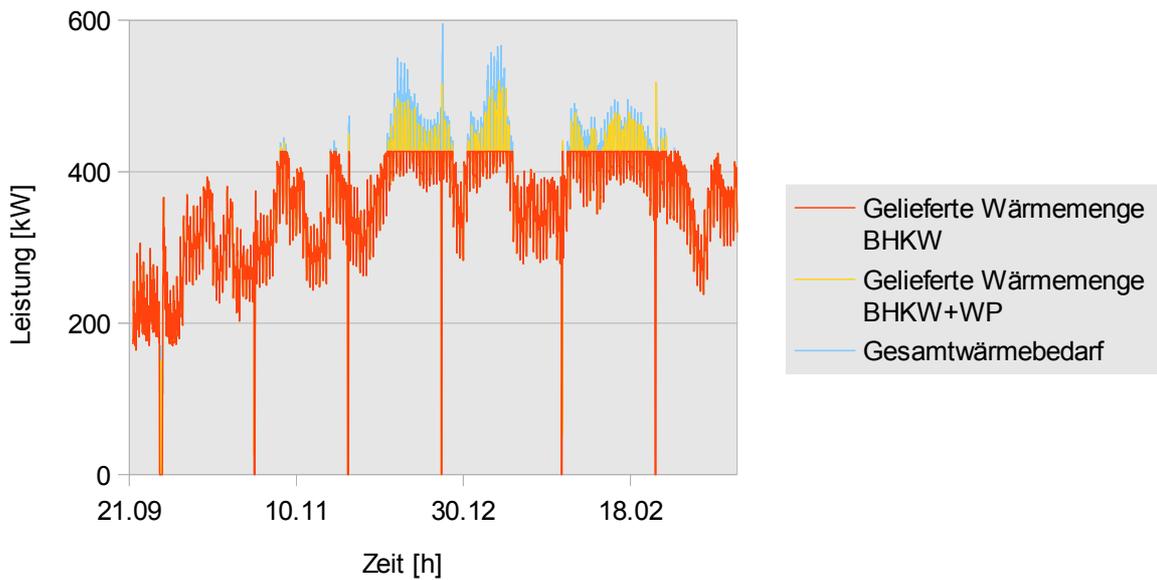


Abbildung 125: Detailbetrachtung Wärmelast und Wärmeverfügbarkeit im Winterhalbjahr mit Antriebsenergie aus PV

Auch hier ist wieder deutlich zu erkennen, dass die Photovoltaik in den Wintermonaten deutlich weniger zur Bereitstellung der Antriebsenergie für die Wärmepumpen beitragen kann als die Windkraft. Gerade an Tagen mit hohem Wärmeleistungsbedarf fehlt Sonneneinstrahlung. Zumindest an einigen Tagen mit sehr hohen Wärmeleistungsbedarfen steht hier ausreichend Windenergie zum Betrieb der Wärmepumpen zur Verfügung.

7.2.5. Unterszenario E – Wärmepumpe mit BHKW als Endenergiequelle

Ein weiterer Ansatz zur Reduzierung der zuzukaufenden Endenergiemenge für die Bereitstellung von Wärme über das Wärmenetz wäre die Nutzung der elektrischen Energie aus dem BHKW mit einer Wärmepumpe. Die hydraulische Einbindung der Wärmepumpe erfolgte analog zu Unterszenario C.

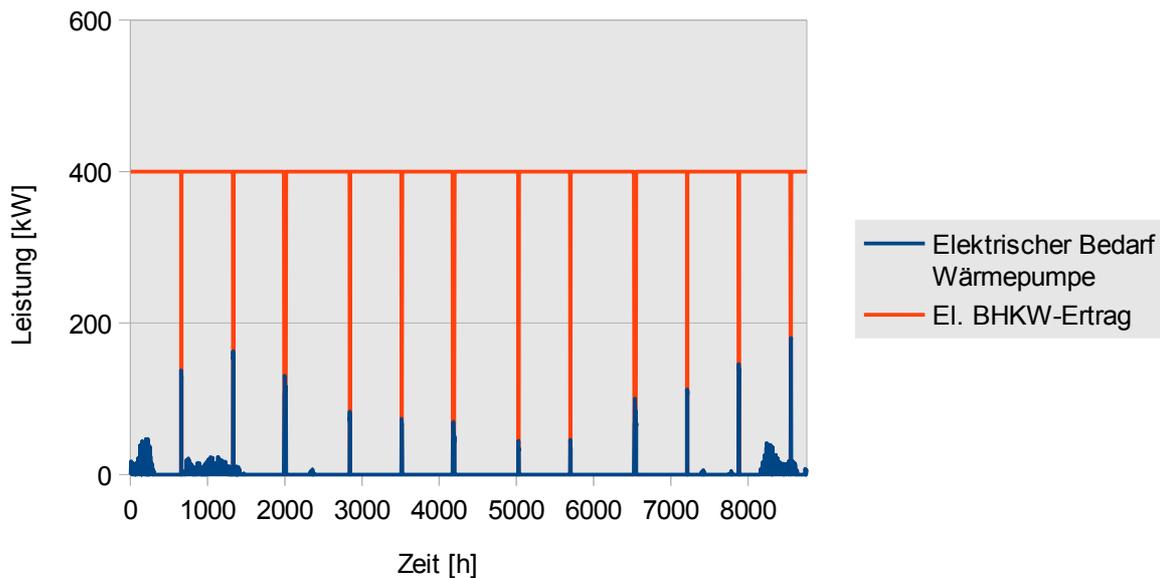


Abbildung 126: Wärmepumpe in Reihe zum BHKW bei elektrischer Energiebereitstellung durch BHKW

In Abbildung 126 ist zu sehen, dass der Wärmepumpe immer dann, wenn ein hoher elektrischer Leistungsbedarf besteht, dieser nicht durch das BHKW zur Verfügung gestellt werden kann. Dies beruht darauf, dass zu diesen Zeiten das BHKW für Wartungszwecke außer Betrieb genommen wird. Außer während der BHKW-Abschaltzeiten steht fortwährend ausreichend elektrische Energie zum Betrieb der Wärmepumpe bereit.

7.2.6. Vergleich der Unterszenarien

In dem vorangehenden Abschnitt wurde gezeigt, dass in den gewählten Kombinationen aus Windkraftanlagen oder Photovoltaikanlagen mit Wärmepumpe ohne Speicher keine vollständige Abdeckung des Spitzenlastwärmebedarfs möglich ist. Insbesondere in den Wintermonaten treten häufiger Zeiten mit deutlicher Unterdeckung auf. Begrenzender Faktor ist die lokal mit WKA, PV oder BHKW erzeugte elektrische Endenergie.

Die Abbildung 127 zeigt den Deckungsgrad des Spitzenlastwärmebedarfs sowie der Spitzenlastleistung, die mit der Wärmepumpe beziehungsweise der Wärmepumpe und dem Heizregister über das Jahr erreicht werden können. Auffallend ist der hier sichtbar werdende Unterschied zwischen den Szenarien mit Einspeisung am Rand (Unterszenario C) und verteilter Einspeisung (Unterszenario D). Neben der bei verteilter Einspeisung niedrigeren benötigten Vorlauftemperatur macht sich hier die Änderung der Fahrweise der Fermenterheizung bemerkbar.

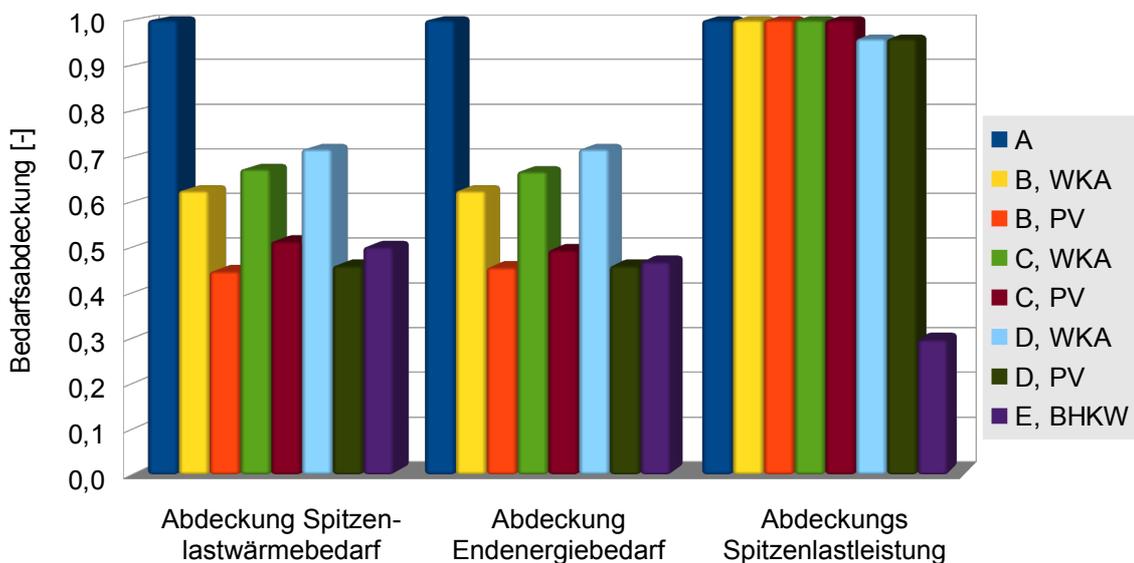


Abbildung 127: Vergleich der Unterszenarien hinsichtlich Abdeckung Spitzenlastwärmebedarf und -leistung sowie Endenergiebedarf

Die Unterszenarien ergeben für die Photovoltaik Deckungsgrade des Wärmebedarfs von knapp über 40 bis rund 50 %. Bei Betrachtung des Deckungsgrades in Verbindung mit den Jahresdauerlinien in den Abschnitten 7.2.2. bis 7.2.5. wird ersichtlich, dass hier gerade an den Tagen mit geringem Angebot an erneuerbaren Energien und damit hohem zu erwartendem Börsenstrompreis, elektrische Energie aus dem Verbundnetz zugekauft werden müsste. Alternativ käme ein saisonaler Speicher in Frage.

Die Nutzung des Windstroms führt zu Deckungsanteilen zwischen rund 60 und 70 %. Hier macht sich bemerkbar, dass in den Wintermonaten viele Tage mit hohen Windgeschwindigkeiten vorhanden sind. Gleichzeitig gibt es in den Wintermonaten aber Tage mit gerin-

gen Windgeschwindigkeiten (in Niedersachsen verbreitet unter stabilen Hochdrucklagen mit Nebelbildung). Der häufige Wechsel zwischen Tagen mit hohen und geringen Windenergieerträgen könnte hier bei einer Optimierung der Fahrweise der Fermenterheizung zu einem weiter erhöhten Deckungsanteil führen. Eine vollständige Abdeckung des Wärmebedarfs bei Windenergienutzung aus lokalen Energiequellen könnte durch den Einsatz von zusätzlichen Kurzzeitspeichern erreicht werden. Abbildung 128 zeigt, dass hierfür bilanziell ausreichend Energie zur Verfügung steht.

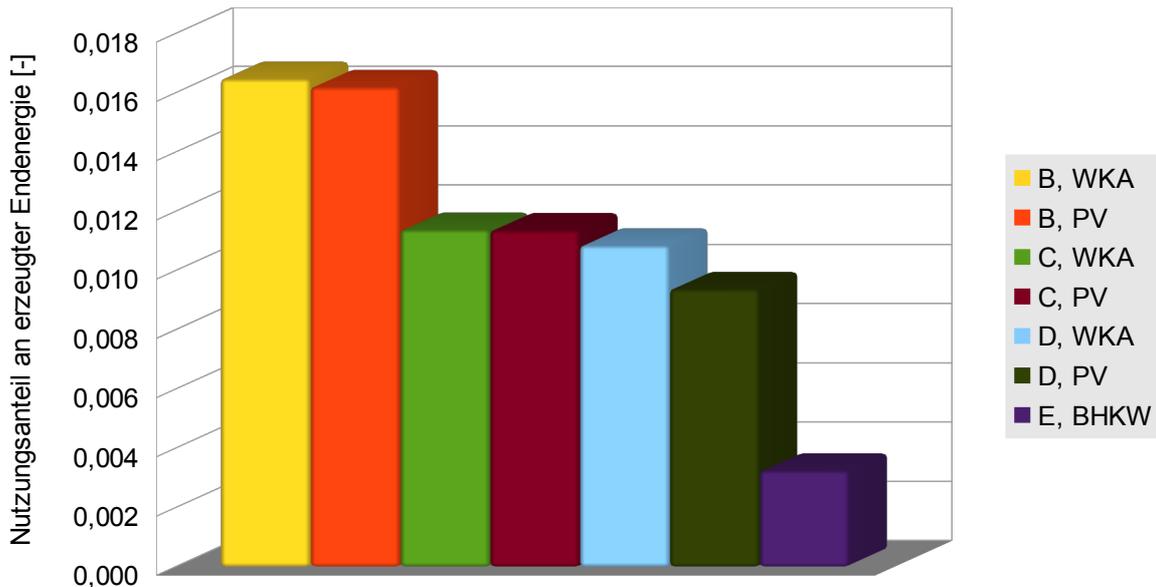


Abbildung 128: Vergleich der Unterszenarien hinsichtlich Ausnutzung der verfügbaren Endenergie

Der große Unterschied in der Ausnutzung der elektrischen Energie zwischen Photovoltaik- und Windkraftanlagen mit jeweils 1.025 kW Peak auf der einen Seite und dem BHKW mit 400 kW auf der anderen Seite ergibt sich aus den unterschiedlichen Volllaststunden. Das BHKW erreicht 8.600 Volllaststunden während die Windkraftanlage 1.367 Volllaststunden und die Photovoltaikanlage 1.014 Volllaststunden erreicht. Das bei Photovoltaik und Windenergie gegenüber dem Blockheizkraftwerk zeitlich bessere Zusammentreffen von verfügbaren elektrischen Energiemengen und Bedarfen vergrößert diese Differenz.

Ein abschließender Vergleich der Szenarien hinsichtlich des benötigten energetischen Aufwandes ergibt das in Abbildung 129 ersichtliche Bild. Hier wird deutlich, dass in dem betrachteten Beispiel der energetische Aufwand bei Einsatz einer Wärmepumpe gegenüber dem klassischen Propangaskessel am Standort der Biogasanlage um mehr als 60 % reduziert werden könnte. In Verbindung mit der Stromerzeugung durch eine Windkraftanlage im Umkreis des Wärmenetzes könnte zudem die fremdbezogene Energiemenge um mehr als 90 % reduziert werden.

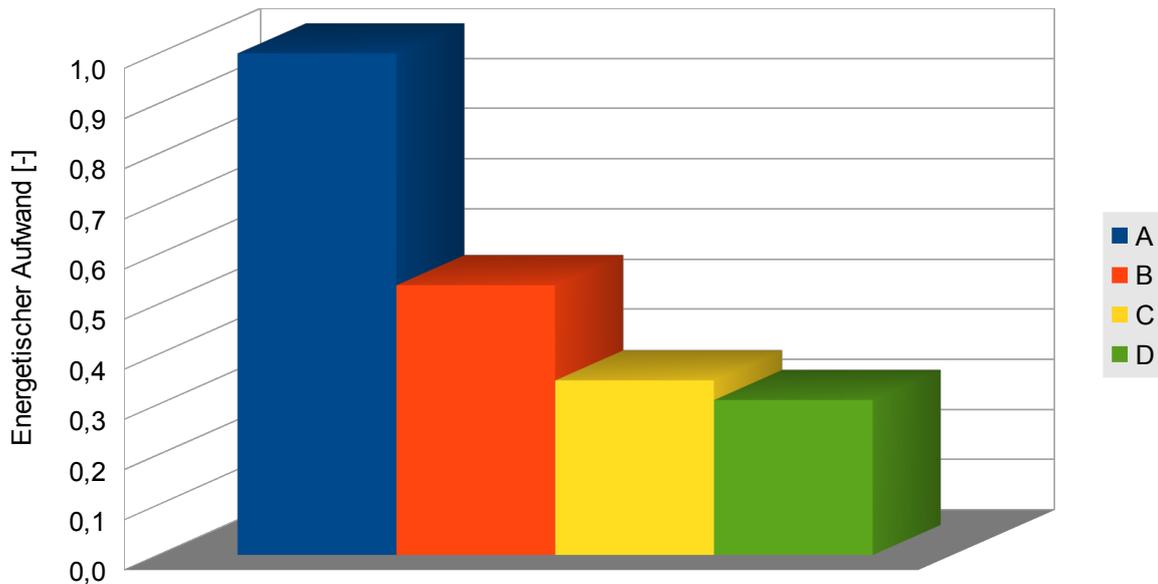


Abbildung 129: Vergleich des energetischen Aufwands verschiedener Wärmepumpenszenarien (Unterszenarien B bis D) gegenüber Propangaskessel (Unterszenario A)

Es zeigt sich in allen untersuchten energetischen Aspekten, dass das Unterszenario B mit Wärmepumpe und Heizregister in Reihe stets schlechter als das räumlich gleich angesiedelte Unterszenario C abschneidet. Das Unterszenario B kann daher nur aus wirtschaftlichen Gründen (Investitionskostendifferenz) tragbar sein.

7.3. Fazit und Ausblick

Wie in Abschnitt 7.2. gezeigt, liefern Photovoltaikanlagen bei entsprechender Ausrichtung (Ausrichtung Süd mit $\geq 50^\circ$ Neigung gegen die Horizontalen bei Standort Region Hannover) auch im Winter erhebliche Strommengen, sodass zentrale Wärmepumpen betrieben werden können. Im Ergebnis kann Photovoltaik sinnvoll mit einer Biogasanlage oder anderen ganzjährig verfügbaren aber nicht/kaum steuerbaren Wärmequellen (z.B. industrielle Abwärme) kombiniert werden.

Ebenso konnte gezeigt werden, dass Windkraftanlagen in Verbindung mit Wärmepumpen im Winter wesentliche Spitzenlastwärmemengen bereitstellen können. Sowohl bei den Szenarien mit Photovoltaik als auch mit Windkraftanlagen können einerseits große Endenergiemengen (Strommengen) nicht für die Spitzenlastwärmeproduktion genutzt werden und andererseits fehlen zeitweise relevante Endenergiemengen. Im Ergebnis müssen also für eine vollständige Deckung des Wärmebedarfs aus lokalen Energiequellen Speicher eingesetzt werden. Die Deckungslücke bei der Photovoltaik erstreckt sich über mehrere Wochen, sodass hier saisonale Speicher eingesetzt werden müssten. Bei der Windenergie treten hingegen zahlreiche Lücken mit einer maximalen Länge von jeweils etwa fünfeinhalb Tagen in einem Zeitraum von zwei Wochen auf, sodass Wochenspeicher genutzt wer-

den müssten. Hier wäre weitergehend zu untersuchen, wie eine Kombination aus flexibler Fahrweise der Biogasanlage mit Gasspeicher, elektrischen Speichern und thermischen Speichern optimal aussehen könnte.

Offen bleibt bei dieser Arbeit zudem, wie mit bestehenden Solarthermieanlagen umgegangen werden soll. In zahlreichen ländlichen Siedlungen sind in die bestehenden Heizungsanlagen Solarthermieanlagen eingebunden. Hier besteht teilweise der Wunsch, die Anlagen weiter zu betreiben. Solarthermieanlagen zeigen eine Abnahme der Wärmeleistung mit abnehmenden Außentemperaturen wie Gassel et. al. in [134] messtechnisch und Würz in [135] theoretisch darlegen. Bei Betrieb der Biogasanlage in der Grundlast würde dies zu einer verstärkten Überproduktion an Wärme in den Sommermonaten und nur einem geringen Beitrag in den Wintermonaten führen. Hier wäre in folgenden Arbeiten zusätzlich zu klären, ob die Anpassung der Biogasproduktionsmengen im Jahresverlauf und daraus resultierende Wärmeerzeugungsmengen am BHKW in Verbindung mit den dezentralen Solarthermieanlagen ein technisch und energetisch sinnvolles Konzept ergeben können. Könnten mit dem saisonal variierenden Betrieb der Biogasanlagen möglicherweise auch derzeitige Versorgungsgaps mit regenerativen Energien an kalten, windstillen Wintertagen im elektrischen Verbundnetz kompensiert werden?

Zum Schluss bleibt noch die Frage nach der Übertragbarkeit der an den Beispielen Heitlingen und Steyerberg untersuchten Szenarien auf andere Siedlungen in Niedersachsen und darüber hinaus. Heitlingen und Steyerberg liegen beide in der Mitte Niedersachsens. Die klimatischen Bedingungen zum Beispiel an der Küste sowie in Südniedersachsen und dem Harz weichen hiervon teilweise deutlich ab. Auch die Wärmenutzungsstrukturen weisen, wie in dieser Studie dargelegt, teilweise deutliche Unterschiede auf. Hier wäre die Übertragbarkeit der Szenarienergebnisse weiter zu untersuchen. Wichtig ist jedoch festzuhalten, dass die Heterogenität der ländlichen Siedlungen in Niedersachsen keine pauschale Aussage zu einer energetisch sinnvollen Wärmeversorgungsstruktur (u.a. nach zentraler Wärmeerzeugung oder verteilter Wärmeerzeugung) zulässt. Die optimale Struktur ist im jeweiligen Einzelfall zu untersuchen.

8. Zusammenfassung

Wärmeversorgung und elektrische Energieversorgung werden bisher im Rahmen der Energiewende weitestgehend getrennt voneinander betrachtet. Im ländlichen Raum Niedersachsens bilden Biogasanlagen eine der Stützen der Energiewende und stellen sowohl elektrische Energie als auch thermische Energie zur Verfügung. Parallel werden Windkraft- und Photovoltaikanlagen errichtet, deren elektrische Energie über Wärmepumpen lokal genutzt werden könnte. Die Wärmeerzeugung aus elektrischer Energie ist einer der Pfeiler der 3. Phase der Energiewende.

In der vorliegenden Arbeit werden offene Fragen bei der Nutzung von elektrischen Großmotorwärmepumpen und Biogasanlagen in ländlichen Nahwärmenetzen aufgegriffen und ingenieurwissenschaftlich betrachtet. Bis Kapitel sechs werden die Grundlagen der Wärmenutzung, Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung dargelegt. In dem folgenden Kapitel fließen die Kenntnisse aus den vorangehenden Kapitel in der energetischen Gesamtbetrachtung der zentralen Wärmeversorgung in ländlichen Kommunen zusammen.

Für die Erstellung dieser Arbeit konnte auf die Daten verschiedener am Fernwärme-Forschungsinstitut und der Hochschule Hannover erstellter Studien sowie in deren Zuge erhobenen Daten zurückgegriffen werden. Weitere, teilweise bisher nicht veröffentlichte Daten, wurden von Anlagenbetreibern und Komponentenherstellern zur Verfügung gestellt. Zusätzliche Informationen wurden gedruckter oder digitaler Literatur sowie öffentlicher Statistiken entnommen. Weiterhin wurden für die Erweiterung der Datenbasis zu Gebäudestrukturen (Bauphysik und Gebäudenutzung) sowie Ortsstrukturen Begehungen oder Befahrungen der in den Kapiteln 4 bis 6 genannten Siedlungen vorgenommen.

Zunächst wurden für die Einzelelemente Biogasanlage und Wärmepumpe sowie Wärmenetz und Wärmeabnehmer, die aus den unterschiedlichen Verbraucher- und Erzeugerstrukturen resultierenden, grundlegenden Auswirkungen auf die Effizienz der Wärmeversorgungssysteme dargestellt. Für mehrere Gebäude in einem Wärmenetz standen für diese Arbeit aus einem teilweise parallel an der Hochschule Hannover durchgeführten Forschungsprojekt Wärmeverbrauchsdaten zur Verfügung. Für drei typische Gebäude mit aktueller oder ehemals landwirtschaftlicher Nutzung konnten Standardlastprofile nach unterschiedlichen Verfahren erstellt werden. Dabei hat sich herausgestellt, dass das von Hellwig [43] für eine größere Gruppe an Gasverbrauchern entwickelte Verfahren prinzipiell auch für die Erstellung von Standardlastprofilen einzelner Gebäude oder Nutzer eingesetzt werden kann. Eine gegenüber Hellwig abweichende Normierung der Wochentagsfaktoren über die Wochenmaxima hat für die wenigen vorliegenden Messtage zu einer Verbesserung der Abbildungsgüte geführt. Eine abschließende statistische Bewertung der Anwendbarkeit kann im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht gegeben werden.

Für den Vergleich von berechneten und gemessenen Wärmeverbräuchen stellten mehrere Gebäudeeigentümer Bauzeichnungen, Gebäudebeschreibungen und zugehörige Jahreswärmeverbrauchsdaten ihrer Gebäude in Haste und Laderholz zur Verfügung. Zum Vergleich wurden die Wärmebedarfe mit dem Passivhaus-Projektierungspaket (PHPP) berechnet. Es konnte gezeigt werden, dass für den untersuchten Gebäudebestand die Unterschiede zwischen berechneten Wärmebedarfen und realen Verbräuchen den Literaturangaben für Berechnungen nach EnEV [42] entsprechen.

Bisherige energetische Bilanzierungen bei Biogasanlagen beschränken sich auf einzelne Elemente wie die Fermenter oder bilden die Gesamtanlage nur sehr grob ab (z.B. [95][136][137]). So wurde für Biogasanlagen ein ganzheitlicher Ansatz für die Erstellung einer Energiebilanz in einem Sankeydiagramm unter Berücksichtigung der (energetisch)

8. Zusammenfassung

wesentlichen Komponenten gebildet sowie Referenzlastprofile für die Beheizung eines Nassfermenters mit innen liegender Heizung erstellt. Optimierungsmöglichkeiten, die sich aus der Analyse der Biogasanlage ergaben, wurde ergänzend dargelegt.

Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse über den Eigenwärmebedarf einer Biogasanlage und die entwickelten Standardlastprofile wurde an Hand zweier Beispiele in ländlichen Gebieten untersucht, wie die Netzauslastung und die Energieeffizienz der Wärmeversorgung in Kennzahlen gefasst und durch gezielte Änderungen in der räumlichen Anordnung der Wärmeerzeuger erhöht werden kann. Zur Erstellung der Wärmenetzscenarien musste ein Berechnungsverfahren für Wärmeverluste gewählt werden. Hierzu wurden Literaturquellen mit teilweise unterschiedlichen Randbedingungen und Schwerpunkten ausgewertet. Die einzelnen analytischen Verfahren wurden hinsichtlich ihrer Struktur unter Einbeziehung eigener Rechenergebnisse verglichen. Die Entscheidung fiel zugunsten der Verfahren von Wallentén [138] aus, da nur Wallentén vergleichbare Verfahren für Einzel- und Doppelrohrsysteme veröffentlicht hat.

Für Beispielwärmenetze wurden in Szenarien die rechnerischen Veränderungen in der Netzauslastung und der Effizienz der gesamten Wärmeversorgungssysteme bei Änderung des Standortes der Spitzenlastwärmeerzeuger untersucht. An einem Referenzwärmenetz, das sich in Planung befindet, wurden die Auswirkungen der Variation der Wärmeerzeugerstandorte auf die Netzdimensionierung dargestellt. Für ein bestehendes Referenzwärmenetz wurden ebenfalls die Auswirkungen der Variation der Wärmeerzeugerstandorte beleuchtet. Des Weiteren wurde für eines der Referenzwärmenetze der Ansatz, elektrischen Strom aus Wind- und Solarenergie über Großmotorwärmepumpen und Heizstäbe in Verbindung mit der Biogasanlage zu nutzen, näher betrachtet. Für erste quantitativ belegte Aussagen im Zuge der Realisierung der 3. Phase der Energiewende wurden die Spitzenlastwärmeerzeuger in den Szenarien auf eine um Faktor 1,1 größere Wärmeleistung als das BHKW ausgelegt. Die elektrische Auslegungsleistung der lokalen Photovoltaik- und Windkraftanlagen zur Bereitstellung der elektrischen Antriebsenergie für Wärmepumpe und Heizstab wurde um den Faktor 2,4 größer als die elektrische Leistung des Biogas-BHKW angesetzt.

Es zeigte sich, dass gerade zu den Zeiten mit der geringsten elektrischen Einspeisung aus Wind- und Sonnenenergie der höchste Bedarf in dem untersuchten Wärmenetz besteht. Zu den Zeiten mit den höchsten Spitzenlastwärmebedarfen kann der Wärmebedarf in den Szenarien nicht vollständig gedeckt werden. Im Gegenzug wurde für die Szenarien gezeigt, dass über Wärmepumpe und Heizstab je nach Szenario nur zwischen 0,9 und 1,6 % der im Jahresmittel mit Photovoltaik- und Windkraftanlagen erzeugten elektrischen Energie genutzt werden können. Im Ergebnis ist festzuhalten, dass eine vollständige lokale Wärmeversorgung energetisch nur sinnvoll erfolgen kann, wenn die Biogasanlage entweder saisonal variabel betrieben wird oder Energie in großen Mengen gespeichert wird. Die Dimensionierung der notwendigen Wärme- und Gasspeicher sowie elektrischer Speicher bleibt an dieser Stelle eine offene Frage.

9. Quellenverzeichnis

- [1] 100 % erneuerbare Energien für Strom und Wärme in Deutschland, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, 2012
- [2] Barzantny, Katja; Achner, Sigrid et. al.: Klimaschutz: Plan B 2050 - Energiekonzept für Deutschland (Langfassung), Greenpeace e.V., Hamburg, 2010
- [3] Energiewende 2.0 - Handlungsempfehlungen der "Kleinen Energierunde" zur Energiewende, Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, Hannover, Oktober 2013
- [4] Jung, Hans-Ulrich; Böttcher, Fabian und Schiller, Daniel: Regionalmonitoring Niedersachsen Regionalreport 2012 - Positionierung und Entwicklungstrends ländlicher und städtischer Räume, Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz und Landesentwicklung, Hannover, 2012
- [5] LSN-Online, www.statistik.niedersachsen.de, Letzter Zugriff 12.12.2014
- [6] Statistisches Jahrbuch - Deutschland und Internationales 2014, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2014
- [7] Fromme, Jörg: Räumliche Implikationen von Regenerativ-Energieszenarien für die langfristige Entwicklung des deutschen Stromversorgungssystems, Fakultät für Raumplanung der Universität Dortmund, Dortmund, 2005
- [8] Barth, Rüdiger: Ökonomische und technisch-betriebliche Auswirkungen verteilter Elektrizitätserzeugung in Verteilungsnetzen - eine modellgestützte Analyse am Beispiel eines Mittelspannungsnetzes, Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2013
- [9] Biogas in Niedersachsen - Inventur 2014, 3N Kompetenzzentrum Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe e.V., Werlte, 2014
- [10] Foederal-Erneuerbar Landesinformation Niedersachsen, www.foederal-erneuerbar.de, letzter Zugriff 18.06.2015

9. Quellenverzeichnis

- [11] First Installation of Siemens' 6 megawatt wind turbine in Germany, www.siemens.com, letzter Zugriff 01.04.2015
- [12] Seedorf, Hans Heinrich und Meyer, Hans-Heinrich: Landeskunde Niedersachsen - Natur und Kulturgeschichte eines Bundeslandes - Band II: Niedersachsen als Wirtschafts- und Kulturräum - Bevölkerung, Siedlung, Wirtschaft, Verkehr und kulturelles Leben, Wachholtz Verlag, Neumünster, 1996
- [13] Schneider, Karl: Dorf und Landesgeschichte in Niedersachsen, Lernwerkstatt Geschichte, Universität Hannover, Papenburg, 28.05.2007
- [14] The new degree of urbanisation, EUROSTAT, Luxembourg, 2011
- [15] Niedersächsische Energie- und CO₂-Bilanz 2011, Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, Hannover, 2013
- [16] Zahlen und Fakten Energiedaten - Nationale und Internationale Entwicklung, www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/energiedaten.html, 2014
- [17] Clausen, Jens: Wärmenetze und Langzeitwärmespeicher als Schlüsseltechnologien der nachhaltigen Wärmeversorgung - Entwicklungspotenziale und Handlungsoptionen, Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit, Berlin, 2013
- [18] History, www.elockport.com, letzter Zugriff: 30.04.2014
- [19] Gietzelt, Manfred; Kraatz, M.; Herbig, C.; Vesting, H. und Wittorf, J.: Wärmetransportsystematlas für Niedersachsen - Ist-Zustandsaufnahme von niedersächsischen Nah- und Fernwärmenetzen, Fernwärme-Forschungsinstitut, Hemmingen, 1996
- [20] Verordnung zur Weiterentwicklung des bundesweiten Ausgleichsmechanismus (AusglMechV) vom 17. Juli 2009 (BGBl. I S.2101), zuletzt geändert durch Art. 16 des Gesetzes vom 12. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066)
- [21] Stromerzeugungs- und Verbrauchskurven, www.agora-energiewende.de, letzter Zugriff 17.12.2014

- [22] Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2013), BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, Berlin, 2013
- [23] projektinfo 05/07 Druckluftspeicher-Kraftwerke, FIZ Karlsruhe, Eggenstein-Leopoldshafen, 2007
- [24] Roth, Ueli: Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen, Schriftenreihe Raumordnung des Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn, 1980
- [25] Blesl, Markus: Räumlich hochaufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme zur Deckung des Niedertemperaturwärmebedarfs, Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart, 2002
- [26] Deutsche Gebäudetypologie - Systematik und Datensätze, Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2003
- [27] Siepe, Benedikt; Schulz, Wolfgang; Tech, Thomas und Schlusche, Kai-H.: Einsparmöglichkeiten beim Raumwärmebedarf des Wohngebäudebestandes in Hannover und Langenhagen Band 1 - Teile I+III, Stadtwerke Hannover AG, Hannover, 1992
- [28] Loga, Tobias; Diefenbach, Nikolaus und Born, Rolf: Deutsche Gebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2011
- [29] Karopka, Lars und Klöffel, Andreas et. al. (Bruchköbel) und Schettler-Köhler, Horst-Peter und Vilz, Andrea (Bundesamt für Bau-, Stadt- und Raumforschung): Benchmarks für die Energieeffizienz von Nichtwohngebäuden - Vergleichswerte für Energieausweise; BBSR-Online-Publikation, Nr. 09/2009, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn, 2009
- [30] Dirlich, Stefan et. al (Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung) und Petereit, Ralp et. al. (Ingenieurbüro Petereit) und Hempel, André (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) und Markfort, Dirk (Bundesinstitut für Bau-,

9. Quellenverzeichnis

- Stadt- und Raumforschung): Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland; BMVBS-Online-Publikation 16/2011, BMVBS, Berlin, 2011
- [31] Bombeck, Henning; Heimansberg, Frauke; Nikulski, Silvia und Rippin, Meike: Substanz auf Abruf - Bedeutung der Bausubstanz und der Siedlungsstruktur als Entwicklungspotenzial ländlicher Wohnstandorte in Niedersachsen, Universität Hannover, Hannover, 1994
- [32] Zapke, Wilfried; Andres, Sven-Frederic; Janßen, Holger und Kahle, Matthias: Wirtschaftlichkeit eines Nahwärmenetzes in Heitlingen - Osterwald o.E. - Machbarkeitsstudie, Kompetenzzentrum für Energieeffizienz, Hannover, 2008
- [33] Schulen, www.nibis.de, Letzter Abruf 21.10.2014
- [34] Praxisinformation P 2007/13 Gastransport/Betriebswirtschaft - Abwicklung von Standardlastprofilen, Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft (BGW), Berlin, 2007
- [35] Christiansen, Christian Holm; Dalla Rosa, Alessandro; Brand, Marek; Olsen, Peter Kaarup und Thorsen, Jan Eric: Results and experiences from a 2-year study with measurements on a new low-temperature district heating system for low-energy buildings, 13th international symposium on district heating and cooling, Stockholm, 3. bis 4. September 2014
- [36] Jagnow, Kati und Wolff, Dieter: Optimus - Kurzbericht Technische Optimierung und Energieeinsparung, Innung für Sanitär- und Heizungstechnik Wilhelmshaven, Wilhelmshaven, 2005
- [37] Winter, Walter; Haslauer, Thomas und Obernberger, Ingwald: Untersuchung der Gleichzeitigkeit in kleinen und mittleren Nahwärmenetzen, Euroheat & Power, 09&10, S. 53-57, Frankfurt am Main, 2001
- [38] Blesl, M.; Ohl, S.; Fahl, U. et. al.: Wärmeatlas Baden-Württemberg - Erstellung eines Leitfadens und Umsetzung für Modellregionen, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, Stuttgart, 2008

- [39] Pedersen, Linda: Load Modelling of Buildings in Mixed Energy Distribution Systems, University of Science and Technology, Faculty Engineering Science and Technology, Department of Energy and Process Engineering, Trondheim, 2007
- [40] DIN EN 832:2003-06; Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung des Heizenergiebedarfs - Wohngebäude, Deutsches Institut für Normung, Berlin, Juni 2003
- [41] DIN V 4108-6; Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs, Deutsches Institut für Normung, Berlin, Juni 2003 mit Berichtigung 1 von März 2004
- [42] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV) vom 24.07.2007 (BGBl. I S. 1519), zuletzt geändert durch Art. 1 der Verordnung vom 18.11.2013 (BGBl. I S. 3951)
- [43] Hellwig, Mark: Entwicklung und Anwendung parametrisierter Standard-Lastprofile, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik an der Technischen Universität München, München, 2003
- [44] Feller, Bernhard: Wärme aus Biogas - Strategie zur Nutzung, Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, N.N., 2005
- [45] Kath, Friederike Annette: Technische und betriebswirtschaftliche Analyse von Konzepten zur ganzjährigen Nutzung der Abwärme einer Biogasanlage im dezentralen ländlichen Raum, Justus-Liebig Universität Giessen, Gießen, 2012
- [46] DIN 18910-1; Wärmeschutz geschlossener Ställe - Wärmedämmung und Lüftung - Teil 1: Planungs- und Berechnungsgrundlagen für geschlossene zwangsbelüftete Ställe, Deutsches Institut für Normung, Berlin, November 2004
- [47] Freier, Sebastian: Energetische Optimierung eines Schweinemaststalls, Hochschule Hannover, Institut für Energie und Klimaschutz, Hannover, 2011

9. Quellenverzeichnis

- [48] Grage, Thomas und Kahle, Matthias: Machbarkeitsstudie für ein Fernwärmenetz in Steyerberg, Fernwärme-Forschungsinstitut in Hannover e.V., Hemmingen, 2011
- [49] VDI 4655 Mai 2008, Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2008
- [50] Jagnow, Kati und Wolff, Dieter: Auswertung von Verbrauchswerten, Ostfalia Hochschule, Wolfenbüttel, 2009
- [51] DIN V 18599-10; Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten, Deutsches Institut für Normung, Berlin, Dezember 2010
- [52] PHPP - Passivhaus Projektierungs Paket - Planungswerkzeug zur Projektierung und Qualitätssicherung von Passivhäusern, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2007
- [53] Verordnung zur Berechnung der Wohnfläche (Wohnflächenverordnung - WoFIV) vom 25.11.2003 (BGBl. I S. 2346)
- [54] DIN 277-2, Grundflächen und Rauminhalte von Bauwerken im Hochbau - Teil 2: Gliederung der Netto-Grundfläche (Nutzflächen, Technische Funktionsflächen und Verkehrsflächen), Deutsches Institut für Normung, Berlin, 2005-2
- [55] Dubielzig, Guido und Frey, Helmut et.al.: Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2007
- [56] Geiger, Bernd und Hellwig, Mark: Entwicklung von Lastprofilen für die Gaswirtschaft im Auftrag des Bundesverbandes der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft e.V. und des Verbandes kommunaler Unternehmen e.V. - Haushalte, Lehrstuhl Energiewirtschaft und Anwendungstechnik im Institut für Energietechnik an der Technischen Universität München, München, 2002
- [57] Geiger, Bernd und Hellwig, Mark: Entwicklung von Lastprofilen für die Gaswirtschaft im Auftrag des Bundesverbandes der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft e.V.

und des Verbandes kommunaler Unternehmen e.V. - Gewerbe, Handel und Dienstleistungen, Lehrstuhl Energiewirtschaft und Anwendungstechnik im Institut für Energietechnik an der Technischen Universität München, München, 2002

- [58] Praxisinformation P 2006/8 - Anwendung von Standardlastprofilen zur Belieferung nicht-leistungsgemessener Kunden, Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft (BGW), Berlin, 2006
- [59] Ergänzungsblatt zu Praxisinformation P 2006/8, Anhang, Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft, Berlin, 2006
- [60] BDEW/VKU/GEODE-Leifaden - Abwicklung von Standardlastprofilen Gas, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Berlin, 2011
- [61] Meskempner, Joshua; Ritter, Peter; Nicklaus, Lars und Filzek, Dirk: Regenerative Modellregion Harz - Wärmelastprognose, CUBE Engineering, N.N., 2012
- [62] Kahle, Matthias: District heating in rural areas in lower saxony, 13th international symposium on district heating and cooling, Kopenhagen, 3. September bis 4 September 2012
- [63] Wolff, Dieter: Effizienzsteigerung von Heizungsanlagen, Fachtagung, Öl-Effizienz-Initiative, Stuttgart, 21. Juli 2006
- [64] Krimmling, Jörn; Grötzschel, Janek et. al.: Auslegungs- und Betriebsoptimierung gasbetriebener Mini-BHKW, Hochschule Zittau/Görlitz, Zittau, 2012
- [65] Schmitz, Karin: AGFW - Hauptbericht 2010, AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Frankfurt am Main, 2011
- [66] BHKW-Kenndaten 2011 - Module, Anbieter, Kosten, ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., Berlin, 2011
- [67] Marktübersicht Hackschnitzel-Heizungen, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow-Prüzen, 2012

9. Quellenverzeichnis

- [68] C200 Mikrogasturbine zur Erzeugung von Strom und Wärme, E-quad Power Systems, Herzogenrath, 2011
- [69] QIP - Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage, Babcock Borsig Steinmüller, Oberhausen, 2013
- [70] MTB Cogeneration Microturbines, www.directindustry.com, letzter Zugriff: 22.01.2014
- [71] MikroTurbinen-Anlage MTA 200, Wels Strom, Wels, Österreich, N.N.
- [72] Burkhart, Wolfgang; Kraus, Roland und Ziegler, Franz Josef: Projektierung von Warmwasserheizungen, 8. Auflage, Oldenbourg Industrieverlag, München, 2006
- [73] Höher, Gerd Carsten: Auswirkungen der Bioenergie auf die Landwirtschaft in Niedersachsen, Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz und Landesentwicklung, Hannover, 2012
- [74] Biogas in Niedersachsen - Entwicklung, Stand und Perspektiven, Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz und Landesentwicklung sowie Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, Hannover, 2012
- [75] Besgen, Simone: Energie- und Stoffumsetzung in Biogasanlagen - Ergebnisse messtechnischer Untersuchungen an landwirtschaftlichen Biogasanlagen im Rheinland, Hohe Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelm-Universität zu Bonn, Bonn, 2005
- [76] Aschmann, Volker und Mathias Effenberger et al.: Grundlagen und Technik, Biogashandbuch Bayern - Materialienband, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2007
- [77] Friehe, Jörg; Weiland, Peter und Schattauer, Alexander: Grundlagen der Anaeroben Fermentation, Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow-Prüzen, 2010

- [78] Poste, J.; Jung, U. et.al.: Anlagentechnik zur Biogasbereitstellung, Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow-Prüzen, 2010
- [79] Bachmeier, Hans; Ebertseder, Florian; Effenberger, Mathias et. al.: Wissenschaftliche Begleitung der Pilotbetriebe zur Biogasproduktion in Bayern - Fortsetzung 2008-2010, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising-Weihenstephan, 2011
- [80] Hundt, Bärbel: Energie- und Klimateffizienz von Biogasanlagen mit Biogasaufbereitung und -einspeisung unter Nutzung von Silomais - Untersuchungen am Beispiel der Biogasanlage der HSE AG in Darmstadt-Wixenhausen -, Boden und Landschaft - Schriftenreihe zur Bodenkunde, Landeskultur und Landschaftsökologie - Band 55, Justus-Liebig-Universität, Gießen, 2010
- [81] Heschl, Mathias: Biogasanlage Wallsee: Auswertung von Betriebsergebnissen und Berechnungen des Brennstoffnutzungsgrades, Fachhochschule Oberösterreich, Amstetten, 2010
- [82] Jäkel Kerstin und S. Mau: Biogaserzeugung und -verwertung, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden, 2003
- [83] Köttner, Michael: Passt eine Biogasanlage in meinen Betrieb, Biogas Strom aus Gülle und Biomasse, Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 2002
- [84] Keymer, Ulrich: Wie rechnet sich Biogas?, Biogas Strom aus Gülle und Biomasse, Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 2002
- [85] Rau, Bernd: Industrielle Großanlagen: Größe allein ist nicht alles, Biogas Strom aus Gülle und Biomasse, Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 2002
- [86] Peter, Gottfried; Rother, Ronny und Warecka, Thomas: Verschenken Sie die Abwärme nicht!, Biogas Strom aus Gülle und Biomasse, Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 2002

9. Quellenverzeichnis

- [87] Gemmeke, Burga; Rieger, Christa; Schröder, Jens und Weiland Peter: Biogas-Messprogramm II - 61 Biogasanlagen im Vergleich, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow, 2009
- [88] Weithäuser, Marco; Frank Scholwin et al.: Gasaufbereitung und Verwertungsmöglichkeiten, Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow-Prüzen, 2010
- [89] Herdin, G.; Gruber, F. und Schiliro, M.: Verstromung von Biogas, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Österreich, Wien, 2006
- [90] Aufbau von Energieanlagen mit Gas- und Dieselmotor-Antrieb (Planungs- und Montagehinweise), MWM GmbH, Mannheim, 2012
- [91] Lohrmann, Martin: Optimierung der Wärmeerträge von Biogas-BHKW - energiebilanziell, betriebstechnisch, vertraglich-geschäftlich, Fachverband Biogas e.V., Hohenheim, 17.07.2013
- [92] Seyfert, Ulrike; Bunzel, Katja et. al.: DBFZ Report Nr. 8 - Kompakt, Deutsches BiomasseForschungsZentrum, Leipzig, 2011
- [93] Herdin, Guenther: Increasing Gas Engine Efficiency, World Energy Engineering Congress, Atlanta, USA, 2000
- [94] Ganagin, W.; Loewen, K.; Loewen A. und R. Wallmann: Flexible Biogasproduktion zur Erzeugung von Spitzenlaststrom, 20. Biogas Jahrestagung und Fachmesse, Nürnberg, 2011
- [95] Gerber, Mandy: Ganzheitliche stoffliche und energetische Modellierung des Biogasbildungsprozesses, Fakultät für Maschinenbau der Ruhruniversität Bochum, Bochum, 2009
- [96] Klimadaten, www.dwd.de, letzter Zugriff 25.02.2014
- [97] Värtan Ropsten - The largest sea water heat pump facility world wide, with 6 Unitop 50FY and 180 MW total capacity, Friotherm AG, Winterthur, Schweiz, 2005

- [98] Wärmepumpen für große Leistungen, Ochsner Wärmepumpen, Linz, Österreich, 2014
- [99] Planungshandbuch Wärmepumpen, Viessmann Deutschland GmbH, Allendorf (Eder), 2011
- [100] Stene, J.: Integrated CO₂ heat pump systems for space heating and hot water heating in low-energy houses and passive houses, International Energy Agency (IEA) Heat Pump Program - Annex 32 - Workshop, Kyoto, Japan, 06.12.2007
- [101] Leistungstabellen HHR, Thermea. Energiesysteme GmbH, Ottendorf-Okrilla, 2013
- [102] Lambauer, J.; Fahl, U.; Ohl, M.; Blesl, M. und Voß, A.: Industrielle Großwärmepumpen - Potenziale, Hemmnisse und Best-Practice-Beispiele, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart, 2008
- [103] Produktinformation Hochtemperaturwärmepumpen und Flüssigkühlsätze Baureihethermeco₂ HHR 45 - HHR 1000, thermea.Energiesysteme GmbH, Ottendorf-Okrilla, 2013
- [104] Wojtan, Leszek: Friotherm AG, E-Mail vom 23.05.2014
- [105] Kretzschmar, Thomas: thermea. Energiesysteme GmbH, Ottendorf-Okrilla, Telefonat am 30.06.2014
- [106] Reidhøy, Charlotte und Werner, Sven: Profitability of sparse district heating, Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Göteborg, 2008
- [107] Fischeck, Manfred; Schüwer, Dietmar et. al.: Anforderungen an Nah- und Fernwärmenetze sowie Strategien für Marktakteure in Hinblick auf die Erreichung der Klimaschutzziele der Bundesregierung bis zum Jahr 2020, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal, 2006
- [108] Nutzung von Biomasse in Kommunen - Ein Leitfaden, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin, 2003

9. Quellenverzeichnis

- [109] Jagnow, Kati und Wolff, Dieter: Überlegungen zu Einsatzgrenzen und zur Gestaltung einer zukünftigen Fern- und Nahwärmeversorgung - Untersuchung von Nah- und Fernwärmenetzen, Ostfalia Hochschule, www.delta-q.de, 2011
- [110] Merkblatt Erneuerbare Energien - KfW-Programm Erneuerbare Energien "Premium", KfW, Frankfurt am Main, 23.12.2014
- [111] Erhorn Kluttig, Heike; Jank, Reinhard et. al.: Energetische Quartiersplanung - Methoden - Technologien - Praxisbeispiele, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2011
- [112] Kulke, Erich: Wendlanddörfer - gestern und heute, Niedersächsisches Sozialministerium, Hannover, 1986
- [113] Landzettel, Wilhelm; Bartels, Annette et. al.: Ländliche Siedlungen in Niedersachsen, Niedersächsisches Sozialministerium, Hannover, 1981
- [114] Bißdorf, Christine: Ländliche Siedlungsstrukturen, Naturschutz-Info, 1/2007, 39-44, Karlsruhe, 2007
- [115] Wiborg, Jan Peter: Dörfer im Schaumburger Land, Niedersächsisches Sozialministerium, Hannover, 1989
- [116] Braun, Ulrich Leander und Brundnio, Hans-Joachim: Dörfer auf dem Eichsfeld, Niedersächsisches Sozialministerium, Hannover, 1994
- [117] Grube, Joachim: Dörfer des Südharzes, Niedersächsisches Sozialministerium, Hannover, 1990
- [118] Reuschel, Andreas: Hagenhufensiedlungen oder "Hägerhufensiedlungen" in der Ithbörde? Ein Beitrag zur Ausdifferenzierung eines Siedlungsgeographischen Terminus und Phänomens, Rheinische Friedrich-Wilhelm-Universität, Bonn, 2009
- [119] Kaemling, Werner und Kaemling, Sabine: Atlas zur Geschichte Niedersachsens, Gerd J. Holtzmeier Verlag, Braunschweig, 1987
- [120] Heinberg, Heinz: Einführung in die Anthropogeographie/Humangeographie, 3. Auflage, Ferdinand Schöningh, Paderborn, 2007

- [121] Schreckenber, Karl-Peter; Wendt, Hans-Heinrich; Kohlrausch, Dietmar und Koch, Klaus: Finndorf-Siedlungen in den Mooren zwischen Weser und Elbe, Niedersächsisches Sozialministerium, Hannover, 1991
- [122] Wunsch, Marco; Eikmeier, Bernd; Jochem, Eberhard und Gailfuß, Markus: Potenzial- und Kosten-Nutzen-Analyse zu den Einsatzmöglichkeiten von Kraft-Wärme-Kopplung (Umsetzung der EU-Energieeffizienzrichtlinie) sowie Evaluierung des KWKG im Jahr 2014, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin, 2014
- [123] Kristjansson, Halldor und Bøhm, Benny: Optimum design of distribution and service pipes, AGFW, Hannover, 03.-05.09.2006
- [124] Dötsch, Christian; Taschenberger, Jan und Schönberg, Ingo: Leitfaden Nahwärme, Fraunhofer Umsicht, Oberhausen, 1998
- [125] Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG) vom 25.10.2008 (BGBl. I S. 2074), zuletzt geändert durch Art. 12 des Gesetzes vom 22.12.2009 (BGBl. I S. 3950)
- [126] Tödter, Jens und Schröder, Christian: Generische Zustandsanalyse von Fernwärmenetzen - Entwicklung und Validierung einer Parametermatrix zur Auswertung von TIR-Bildern im Hinblick auf die Zustandsbewertung von Fernwärmeleitungen, Fernwärme-Forschungsinstitut in Hannover e.V., Hemmingen, 2011
- [127] Markert, Arvid: Einfluss von Substrateigenschaften auf die Wärmeleitfähigkeit von Böden - Bodenphysikalische Nutzungsaspekte von Erdwärmekollektoren, Technische Universität Berlin, Berlin, 2012
- [128] Bøhm, Benny: On transient heat losses from buried district heating pipes, International Journal of Energy Research, Vol. 24, 1311-1334, London, 2000
- [129] Kürten, Sylvia: Zur thermischen Nutzung des Untergrundes mit flächigen thermoaktiven Bauteilen, Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen, 2014

9. Quellenverzeichnis

- [130] Dahlem, Karl-Heinz: Der Einfluß des Grundwassers auf den Wärmeverlust erdreichberührender Bauteile, Prof. Dr. Hermann Heinrich, Kaiserslautern, 2000
- [131] Aktualisierte und erweiterte Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Der neue Testreferenzjahr-Datensatz 2011 mit Softwaretool,
http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2008/Testreferenzjahre/TRY2011_Datensatz.html, Letzter Zugriff 08.01.2015
- [132] Ziesig, Hans-Joachim: Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2013, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., Berlin, 2014
- [133] E82, Enercon, Aurich, 2005
- [134] Gassel, Andreas; Doltze, Thomas et. al.: Messtechnische Überwachung der Solar- und Haustechnik im Wohngebiet Freiburger Straße in Oederan, Technische Universität Dresden, Institut für Thermodynamik und Technische Gebäudeausrüstung, Dresden, 1998
- [135] Würz, Matthias: Regenerative Wärmeversorgung der niedersächsischen Landeshauptstadt Hannover, Technische Hochschule Mittelhessen, Fachbereich 03: Maschinenbau und Energietechnik, Gießen, 2014
- [136] Born, Jens und Casaretto, Rainer: Die theoretischen 100% geerntete Energie, Biogas Journal, 2-2012, 88-91, Freising, 2-2012
- [137] Pfeifer, Jörg und Obernberger, Ingwald: Detaillierte Stoff- und Energiebilanzierung der Erzeugung und Nutzung von Biogas in einer landwirtschaftlichen Biogasanlage sowie deren verfahrenstechnische Bewertung, Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift, 151. Jahrgang, Heft 10-12, 311-326, Wien, 2006
- [138] Wallentén, Petter: Steady-state heat loss from insulated pipes, Lund Institute of Technology, Lund, 1991

- [139] Recknagel, Herrmann; Sprenger, Eberhard; Schramek, Rudolf et. al.: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 03/04, 71. Auflage, Schramek, Universität Dortmund, Dortmund, 2003
- [140] Recknagel, Hermann; Sprenger, Eberhard; Schramek, Ernst-Rudolf et. al.: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 2013 | 2014, 76. Auflage, Schramek, Universität Dortmund, Dortmund, 2013
- [141] Heatmaster 3V/4V, Big Dutchman International, Vechta, 2014
- [142] Silcox, Geoffrey: air_prop.xls, University of Utah, Department of Chemical Engineering, Salt Lake City, USA, 2007
- [143] Holmgren, Magnus: XSteam_v.2.6.ods, Wyatt Enterprises, LLC, Los Altos, USA, 2007
- [144] Gnielinski, Volker und Kabelac, Stefan et. al.: VDI-Wärmeatlas - Zehnte, bearbeitete und erweiterte Auflage, Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC), Berlin, 2006
- [145] Bartens, Mirko: Eigenschaften von Pellets aus biogenen Reststoffen für energetische Nutzung, Hochschule für Angewandte Wissenschaften und Kunst, Göttingen, 2011
- [146] Friehe, Jörg; Weiland, Peter und Schattauer, Alexander: Beschreibung ausgewählter Substrate, Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow, 2010
- [147] Wetter, Christian und Brüggling, Elmar: Leitfaden zum Bau einer Biogasanlage - Band IV Inbetriebnahme, Kreis Steinfurt - Umweltamt, Steinfurt, 2005
- [148] Reinhold, G.: Masse- und Trockensubstanzbilanz in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt, Erfurt, 2005
- [149] Biogashandbuch Bayern - Materialband, Kapitel 1.7, Bayerisches Landsamt für Umwelt, Augsburg, Stand Mai 2007

9. Quellenverzeichnis

- [150] Gradtagszahlen Deutschland, IWU Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 03.05.2013
- [151] Setzmann, U. und Wagner, W.: New Equation of State and Tables of Thermodynamic Properties for Methane Covering the Range from Melting Line to 625 K at Pressure up to 1000 MPa, Journal of Physical and Chemical Reference Data, Vol. 20, No.6, 1061-1155, USA, 1991
- [152] Span, Roland und Lemmon, Eric W. et. al.: A Reference Equation of State for the Thermodynamic Properties of Nitrogen for Temperatures from 63.151 to 1000 K and Pressure to 2200 MPa, Journal of Physical and Chemical Reference Data, Vol. 29, No. 6, 1361-1433, USA, 2000
- [153] Stewart, Richard B.; Jacobsen, Richard T. und Wagner, Wolfgang: Thermodynamic Properties of Oxygen from Triple Point to 300 K with Pressures to 80 MPa, Journal of Physical and Chemical Reference Data, Vol. 20, No. 5, 917-1021, USA, 1991
- [154] Tegeler, Ch.; Span, N. und Wagner, W.: A New Equation of State for Argon Covering the Fluid Region for Temperature from the Melting Line to 700 K at Pressure up to 1000 MPa, Journal of Physical and Chemical Reference Data, Vol. 28, No. 3, 799-850, USA, 1999
- [155] Span, Roland und Wagner, Wolfgang: A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from Triple-Point Temperature to 1100 K at Pressure up to 800 MPa, Journal of Physical and Chemical Reference Data, Vol. 25, No. 6, 1509-1596, USA, 1996
- [156] Nist Chemistry Webbook, <http://webbook.nist.gov/chemistry/>, letzter Zugriff 12.03.2014
- [157] Oehmichen, Katja und Majer, Stefan: Nachhaltigkeit von Biogasanlagen - Ansätze zur Treibhausgasbilanzierung, 13. NRW Biogastagung Landwirtschaftszentrum Haus Düsse, Bad Sassendorf, 22.03.2012
- [158] DIN 6280-14, Stromerzeugungsaggregate - Stromerzeugungsaggregate mit Hubkolben-Verbrennungsmotoren - Teil 14: Blockheizkraftwerke (BHKW) mit

- Hubkolbenverbrennungsmotoren; Grundlagen, Anforderungen, Komponenten, Ausführungen und Wartung, Deutsches Institut für Normung, Berlin, 1997-08
- [159] Vollmer, Gerd-Rainer: Gutachterliche Stellungnahme zum Betrieb der Biogasanlage Schkölen, BTN Biotechnologie Nordhausen, Nordhausen, 2008
- [160] Hertzsch, Torsten: Auslastung und Eigenstrombedarf Biogasanlage, Hertzsch, Torsten, Reinsdorf, 2011
- [161] Dachs, Gregor; Rehm, Wolfgang et. al.: Der Eigenstromverbrauch von Biogasanlagen und Potenziale zu dessen Reduzierung, Solarenergieförderverein Bayern e.V., München, 2006
- [162] Bandel, J. und Blomert, J. et al.: VDI Wärmeatlas - Berechnungsblätter für den Wärmeübergang - Zweite, verbesserte und erweiterte Auflage, Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC), Düsseldorf, 1974
- [163] Bofinger, Stefan und Degner, Thomas und Glotzbach, Thomas et. al.: Studie: Rolle der Solarstromerzeugung in zukünftigen Energieversorgungsstrukturen - Welche Wertigkeit hat Solarstrom? -, Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V. - ISET, Kassel, 2008
- [164] Holbert, Keith E.: Solar Calculations, Arizona State University, Tempe, USA, 2007
- [165] Gasch, Robert; Twele, Jochen; Bade, P. und weitere: Windkraftanlagen - Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb - 7., aktualisierte Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011
- [166] Zschernig, Joachim; Gietzelt, Manfred et. al.: Optimierung der Netzstruktur und des Betriebes von Fernwärmenetzen bei integrierten Absorptionskältemaschinen zur Klimatisierungskälteerzeugung, Fernwärme-Forschungsinstitut, Hemmingen, 1996
- [167] Auslegung und Installation von werkmäßig gedämmten Verbundmantelrohren für die Fernwärme, DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin, 2010

9. Quellenverzeichnis

- [168] DIN EN 13941:2003-10; Berechnung und Verlegung von werkmäßig gedämmten Verbundmantelrohren für Fernwärme, Deutsches Institut für Normung, Berlin, 2003
- [169] Isoplus Planungshandbuch - Kapitel Projektierung, Isoplus Fernwärmetechnik, N.N., 2006
- [170] Løgstør Rør, Løgstør Rør, Løgstør, Mai 1993
- [171] Obernberger, Ingwald: Möglichkeiten der technologischen und wirtschaftlichen Optimierung von Biomasse-Nahwärme- und Mikronetzen, Altener Konferenz "Mikronetze - Gebäudeübergreifende Wärmeversorgung auf Biomasse", Salzburg; Energieverwertungsagentur, Wien, 16./17.10.1997
- [172] Produktkatalog 1998/99, Tarco Energi A/S, Fredericia, Dänemark, 1998
- [173] Zeitler, Martin: Berechnungsverfahren zur Bestimmung des Wärmeverlustes von verschiedenen erdverlegten Rohrleitungen, Fernwärme International, Jahrgang 9, Heft 3, 170-179, Frankfurt a. Main, 1980
- [174] Zinko, Heimo; Bjärklev, Johan et. al.: IEA District Heating and Cooling - Quantitative Heat Loss Determination by means of Infrared Thermography - The TX model, Netherlands Agency for Energy and Environment, Sittard, Niederlande, 1996

10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über die Gebäudetypen verschiedener Gebäudetypologien auf Basis von [26][27][28].....	31
Tabelle 2: Klassifizierung von Gebäuden nach Baualter und Bauart in verschiedenen Gebäudetypologien (gekürzte Darstellung der Charakteristika) aus [26][27][28].....	32
Tabelle 3: Übersicht über typische Heizsysteme.....	39
Tabelle 4: Übersicht über gängige Verfahren zur Ermittlung von Jahreslastgängen für Gebäude.....	47
Tabelle 5: Kenndaten der Gebäude für die Ermittlung der Datenbasis der VDI 4655 [55].....	51
Tabelle 6: Typtage nach VDI 4655 [49].....	52
Tabelle 7: Charakteristika der Gebäude mit Messstellen.....	55
Tabelle 8: Ermittelte Sigmoidfunktionskoeffizienten.....	58
Tabelle 9: Wochentagsfaktoren.....	62
Tabelle 10: Anzahl der Messtage je Gebäude und Typtag.....	64
Tabelle 11: Anzahl Typtage für Region Hannover nach VDI 4655 und ermittelte Typtagfaktoren für ländliche Gebäude.....	64
Tabelle 12: Vergleich gemessener Verbräuche und berechneter Wärmebedarfe.....	66
Tabelle 13: Literaturangaben zum Wärmebedarf von Fermentern.....	79
Tabelle 14: Für Fermenterheizung modifizierte Typtage im Raum Hannover.....	95
Tabelle 15: Gemessene Wärmemengen des Fermenters nach Typtagen.....	95
Tabelle 16: Bauliche Einflussfaktoren auf die energetische Effizienz von Fermentern.....	99

10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 17: Betriebliche Einflussfaktoren auf die energetische Effizienz von Fermentern..	99
Tabelle 18: Vergleich der in unterschiedlichen Verfahren berücksichtigten Einflussfaktoren bei der Berechnung der Wärmeverluststromdichte.....	128
Tabelle 19: Zusammenfassung Szenarien Netz 1, Heitlingen.....	138
Tabelle 20: Zusammenfassung Szenarien Netz 2, Steyerberg.....	141
Tabelle 21: Heizkörperexponenten nach [139].....	197
Tabelle 22: Übersicht über die Typtagkategorien (Quellen für alle Typtagkategorien, die nicht mit „nur Fermenter“ gekennzeichnet sind, ist [55]).....	207
Tabelle 23: Eigenschaften von Substraten [78][145][137][136][146][147].....	214
Tabelle 24: Weitere Eigenschaften von Substraten [148][95][137].....	214
Tabelle 25: Eigenschaften von Wasser und Gärresten [148][95][137].....	215
Tabelle 26: Eigenstrombedarf von Biogasanlagen - Literaturübersicht.....	224
Tabelle 27: Anzahl auswertbarer Messtage je Temperaturklasse für den Fermenter.....	267
Tabelle 28: Parameter für die Sigmoidfunktion des Fermenters.....	267
Tabelle 29: Stundenfaktoren für Fermenterheizung.....	268
Tabelle 30: Anzahl auswertbarer Messtage je Temperaturklasse für einen Wohnsitzteil (nur Heizwärme).....	269
Tabelle 31: Anzahl auswertbarer Messtage je Temperaturklasse für einen Wohnsitzteil (Heizwärme und Trinkwarmwasser).....	269
Tabelle 32: Stundenfaktoren Wohnsitz – Heizwärme, Werktags.....	270
Tabelle 33: Stundenfaktoren Wohnsitz – Heizwärme, Samstags.....	270
Tabelle 34: Stundenfaktoren Wohnsitz – Heizwärme, Sonn- und Feiertags.....	270

Tabelle 35: Stundenfaktoren Wohnsitz – Heizwärme und Trinkwarmwasser, Werktags. .	271
Tabelle 36: Stundenfaktoren Wohnsitz – Heizwärme und Trinkwarmwasser, Samstags. .	271
Tabelle 37: Stundenfaktoren Wohnsitz – Heizwärme und Trinkwarmwasser, Sonn- und Feiertags.....	271
Tabelle 38: Anzahl auswertbarer Messtage je Temperaturklasse der Viehwirtschaft.....	272
Tabelle 39: Stundenfaktoren Viehwirtschaft – Heizwärme, Werktags.....	273
Tabelle 40: Stundenfaktoren Viehwirtschaft – Heizwärme, Samstags.....	273
Tabelle 41: Stundenfaktoren Viehwirtschaft – Heizwärme, Sonn- und Feiertags.....	273
Tabelle 42: Stundenfaktoren Viehwirtschaft – Gesamtwärmeverbrauch, Werktags.....	274
Tabelle 43: Stundenfaktoren Viehwirtschaft – Gesamtwärmeverbrauch, Samstags.....	274
Tabelle 44: Stundenfaktoren Viehwirtschaft – Gesamtwärmeverbrauch, Sonn- und Feiertags.....	274
Tabelle 45: Anzahl auswertbarer Messtage je Temperaturklasse des Ackerbaubetriebes	275
Tabelle 46: Stundenfaktoren Ackerbaubetrieb – Heizwärme, Werktags.....	276
Tabelle 47: Stundenfaktoren Ackerbaubetrieb – Heizwärme, Samstags.....	276
Tabelle 48: Stundenfaktoren Ackerbaubetrieb – Heizwärme, Sonn- und Feiertags.....	276
Tabelle 49: Stundenfaktoren Ackerbaubetrieb – Gesamtwärmeverbrauch, Werktags.....	277
Tabelle 50: Stundenfaktoren Ackerbaubetrieb – Gesamtwärmeverbrauch, Samstags.....	277
Tabelle 51: Stundenfaktoren Ackerbaubetrieb – Gesamtwärmeverbrauch, Sonntags.....	277

11. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bevölkerungsverteilung in Niedersachsen 2012 (eigene Darstellung, Datenbasis [5])..... 15

Abbildung 2: Räumliche Gliederung in Niedersachsen 2013 (eigene Darstellung; Datenbasis [4][5])..... 16

Abbildung 3: Räumliche Gliederung in Niedersachsen 2013, normierte Darstellung (eigene Darstellung; Datenbasis [4][5])..... 16

Abbildung 4: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in Niedersachsen 2011 [15] 17

Abbildung 5: Endenergieverbrauch in Deutschland nach Anwendungen 2011 [16]..... 18

Abbildung 6: Schematische Darstellung der Energieflussbetrachtung im Zuge der Energiewende – 1. Phase..... 20

Abbildung 7: Schematische Darstellung der Energieflussbetrachtung im Zuge der Energiewende – 2. Phase..... 21

Abbildung 8: Schematische Darstellung der Energieflussbetrachtung im Zuge der Energiewende – 3. Phase..... 22

Abbildung 9: Energiekaskade..... 23

Abbildung 10: Jahreslastgänge der elektrischen Energieversorgung in Deutschland 2013 [21]..... 24

Abbildung 11: Monatslastgang der elektrischen Energieversorgung in Deutschland im März 2013 [21]..... 24

Abbildung 12: Vergleich der Wärmeabnehmerstruktur von Wärmenetzen..... 30

Abbildung 13: Kleines Gulfhaus mit Mischung aus Betonpfannen- und Reetdach im Landkreis Aurich..... 33

Abbildung 14:	Kleines Hallenhaus (Vierständerhaus) mit zum Wohnbereich ausgebautem Wirtschaftstrakt im Wendland.....	34
Abbildung 15:	Hallenhaus im Wendland - Wohntrakt.....	34
Abbildung 16:	Gutshaus in der Region Hannover.....	34
Abbildung 17:	„Rübenburg“ im Wendland.....	34
Abbildung 18:	Streckhof im Landkreis Osterode.....	35
Abbildung 19:	Großes Hüttensiedlungshaus im Harz.....	35
Abbildung 20:	Ehemalige Fischer- und Händlerhäuser im Kreis Aurich.....	35
Abbildung 21:	Siedlungshaus aus den 1950er Jahren mit Anbau aus den 1970er Jahren im Landkreis Schaumburg.....	36
Abbildung 22:	Reihenhaus aus den 1970er Jahren im Landkreis Osterholz-Scharmbeck	36
Abbildung 23:	Einfamilien- und Mehrfamilienhaus aus den 1990er Jahren in der Region Hannover [32].....	36
Abbildung 24:	Grundschule aus den 1950er Jahren mit Anbauten aus den 1960er bis 2000er Jahren im Landkreis Schaumburg.....	37
Abbildung 25:	Feuerwehr und Dorfgemeinschaftshaus im Landkreis Aurich.....	37
Abbildung 26:	Landhandel mit Getreidetrocknung im Landkreis Schaumburg.....	37
Abbildung 27:	Hähnchenmaststall im Landkreis Oldenburg mit Baujahr nach 2000.....	37
Abbildung 28:	Gliederung von Fernwärmeübergabestationen.....	38
Abbildung 29:	Zusammenhang zwischen der Vorlauftemperatur und der maximalen Heizflächenleistung bei konstanter Rücklauftemperatur von 60 °C.....	40

11. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 30:	Auf den Auslegungszustand normierter Massenstrom über der Vorlauf­temperatur für Radiator und Fußbodenheizung bei jeweils zwei konstanten Rücklauf­temperaturen.....	41
Abbildung 31:	Rücklauf­temperaturen in Abhängigkeit der Vorlauf­temperatur am Beispiel eines Radiators und einer Fußbodenheizung bei verschiedenen Leistungen.....	42
Abbildung 32:	Leistung über der Rücklauf­temperatur bei konstantem Luftvolumenstrom und fester Heizwassertemperaturspreizung in Abhängigkeit der mittleren Lufttemperatur.....	43
Abbildung 33:	Leistung eines Luftheizregisters über der Rücklauf­temperatur bei konstantem Luftvolumenstrom und konstanter Vorlauf­temperatur von 90°C in Abhängigkeit der mittleren Lufttemperatur.....	44
Abbildung 34:	Leistung eines Luftheizregisters über der Rücklauf­temperatur bei konstanter Luft- und Heizwassertemperaturspreizung in Abhängigkeit der mittleren Lufttemperatur.....	44
Abbildung 35:	Gleichzeitigkeitsfaktor in Abhängigkeit der Anzahl an Wärmeabnehmern	46
Abbildung 36:	Gemessener und normierter Tageswärmeverbrauch der Landmaschinenwerkstatt über der geometrischen Viertagemitteltemperatur.....	56
Abbildung 37:	Gemessener und normierter Tageswärmeverbrauch des Wohnsitzteils mit Trinkwarmwasserbereitung über der Tagesmitteltemperatur.....	57
Abbildung 38:	Im Wohnsitzteil mit Trinkwarmwasserbereitung gemessene Tageswärmemengen an Samstagen und zugehörige korrigierte Werte...	59
Abbildung 39:	Messwerte und Sigmoidfunktion für Ackerbaubetrieb (nur Heizwärme) an Werktagen Montag bis Freitag.....	60
Abbildung 40:	Korrigierte Messwerte und Sigmoidfunktion für Ackerbaubetrieb (nur Heizwärme) an Werktagen.....	60

Abbildung 41:	Sigmoidfunktionen des Gesamtwärmebedarfs des Ackerbaubetriebes für verschiedene Tage im Vergleich.....	61
Abbildung 42:	Beispiel Tageslastprofile für die Heizwärmebereitstellung des Ackerbaubetriebes an Werktagen.....	63
Abbildung 43:	Referenzlastprofile für die Trinkwarmwasserwärmenutzung des Ackerbaubetriebes - 15-Minutenwerte.....	65
Abbildung 44:	Referenzlastprofile für die Heizwärmenutzung des Ackerbaubetriebes - 15-Minutenwerte.....	65
Abbildung 45:	Berechnete und gemessene auf das Messjahr normierte Monatswärmeverbräuche für den Ackerbaubetrieb.....	67
Abbildung 46:	Berechnete und gemessene auf das Messjahr normierte Monatswärmeverbräuche für die Viehwirtschaft.....	68
Abbildung 47:	Berechnete und gemessene auf das Messjahr normierte Monatswärmeverbräuche für den Wohnsitzteil mit Trinkwarmwasserbereitung.....	68
Abbildung 48:	Normierter Wärmeverbrauch gemessen und berechnet für den Ackerbaubetrieb im März 2013 (Donnerstag bis Mittwoch).....	69
Abbildung 49:	Beispiel für den Lastverlauf über einen Mittwoch des Ackerbaubetriebes bei Außentemperaturklasse 4.....	70
Abbildung 50:	Maximale Wirkungsgrade von Wärmeerzeugungssystemen bei Vollast (Datenbasis: [66], [67], [68], [69], [70], [71], eigene Auswertung von Datenblättern für rund 180 Kessel).....	73
Abbildung 51:	Schema Biogasanlage.....	76
Abbildung 52:	Schematischer Aufbau eines Motor-Blockheizkraftwerkes.....	81
Abbildung 53:	Anlagenskizze eines Biogas-Motor-BHKW.....	82

11. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 54:	Zusammenhang zwischen Vorlauftemperatur und thermischer Leistung in den Zwischenkreisen eines BHKW.....	83
Abbildung 55:	Zusammenhang zwischen Netztemperaturen und thermischer Leistung.	83
Abbildung 56:	Elektrische Leistung und ausgekoppelte Fernwärmeleistung eines BHKW.....	85
Abbildung 57:	Wärmetechnische Verschaltung der Hauptkomponenten der Biogasanlage Heitlingen vor dem Umbau.....	87
Abbildung 58:	Hydraulische Verschaltung der Hauptkomponenten der Biogasanlage Heitlingen nach dem Umbau 2012.....	87
Abbildung 59:	Sankey-Diagramm für die Biogasanlage Heitlingen.....	89
Abbildung 60:	Gemessene Tageswärmeverbräuche des Fermenters.....	90
Abbildung 61:	Gemessene Tageswärmeverbräuche des Fermenters und Tagesmitteltemperaturen über die Zeit	91
Abbildung 62:	Klimabereinigte und normierte Heizwärmeverbräuche und Sigmoidfunktion für den Fermenter über der Geometrischen Viertagemitteltemperatur.....	92
Abbildung 63:	Beispiele für Tageslastgänge der Fermenterheizung für drei Temperaturklassen.....	93
Abbildung 64:	Tageswärmeverbrauch des Fermenters in Abhängigkeit der 7-Tage-Mitteltemperatur, aufgeteilt nach heiteren und bedeckten Tagen.....	94
Abbildung 65:	Beispiele für mögliche Tages-Referenzlastprofile in Anlehnung an VDI 4655 für Fermenterheizung. Darstellung mit kumuliertem relativem Wärmeverbrauch.....	96
Abbildung 66:	Vergleich von gemessenen und berechneten Tageswärmemengen bei unterschiedlichen Tagesmitteltemperaturen.....	97
Abbildung 67:	Vergleich von gemessenen und berechneten Monatswärmeverbräuchen	98

Abbildung 68:	Vorlauftemperatur der Fermenterheizung – Tagesmittelwert, -maximum und -minimum.....	100
Abbildung 69:	Beispiel für Nutzwärmeauskopplung aus dem 2. Gemischkühler.....	100
Abbildung 70:	Aus dem 2. Gemischkühler auskoppelbare Wärmemenge in Abhängigkeit der Rücklauftemperatur.....	101
Abbildung 71:	Rücklauftemperatur der Fermenterheizung – Tagesmittelwert, -maximum und -minimum.....	101
Abbildung 72:	Relative thermische Leistung in Abhängigkeit der Netztemperaturen bei einer idealen, unterkritisch betriebenen Wärmepumpe.....	104
Abbildung 73:	Relative thermische Leistung in Abhängigkeit der Rücklauftemperatur bei einer überkritisch betriebenen Wärmepumpe für fünf verschiedene Vorlauftemperaturen.....	106
Abbildung 74:	Relative thermische Wärmepumpenleistung in Abhängigkeit der Quelltemperatur (konstante Vor- und Rücklauftemperatur) (Eigene Berechnungen auf Datenbasis [101]).....	107
Abbildung 75:	COP über Quelltemperatur von realer und idealer Wärmepumpe im überkritischen Bereich (Eigene Berechnungen auf Datenbasis [101])....	108
Abbildung 76:	COP einer realen überkritischen Wärmepumpe über der Rücklauftemperatur für verschiedene Vorlauftemperaturen.....	109
Abbildung 77:	Fließschema Wärmepumpe mit Heizstab.....	110
Abbildung 78:	Elektrischer Leistungsbedarf einer realen Wärmepumpe mit nachgeschaltetem Heizstab in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur der Wärmepumpe	110
Abbildung 79:	Wärmepumpe mit nachgeschaltetem Heizstab in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur.....	111

11. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 80:	Beispiel einer Streusiedlung – Ossenbeck (Landkreis Diepholz, Stadt Diepholz).....	114
Abbildung 81:	Beispiel eines Drubbels – Schöttlingen (Landkreis Schaumburg, Gemeinde Lindhorst).....	114
Abbildung 82:	Beispiel für ein lockeres Haufendorf – Heitlingen (Region Hannover, Stadt Garbsen) (vorveröffentlicht in [62]).....	115
Abbildung 83:	Beispiel für ein enges Haufendorf – Hohnhorst (Landkreis Schaumburg) [62].....	115
Abbildung 84:	Beispiel für einen Rundling – Kremlin (Landkreis Lüchow-Dannenberg, Gemeinde Luckau).....	116
Abbildung 85:	Beispiel für ein Rundangerdorf – Schreyahn (Landkreis Lüchow-Dannenberg, Gemeinde Wustrow).....	117
Abbildung 86:	Beispiel für eine kleine Wurtensiedlung – Woltzeten (Landkreis Aurich, Gemeinde Krummhörn).....	117
Abbildung 87:	Beispiel für ein Straßendorf – Müggenburg (Landkreis Lüchow-Dannenberg, Stadt Lüchow (Wendland)).....	118
Abbildung 88:	Beispiel für ein Straßenangerdorf - Bergkirchen (Landkreis Schaumburg, Gemeinde Wölpinghausen).....	118
Abbildung 89:	Beispiel für eine Reihensiedlung – Wildemann (Landkreis Goslar) [62]..	119
Abbildung 90:	Beispiel für eine Hagenhufensiedlung – Nordsehl (Landkreis Schaumburg) [62].....	120
Abbildung 91:	Beispiel für ein Waldhufendorf – Rannenberg (Landkreis Schaumburg, Gemeinde Auetal).....	120
Abbildung 92:	Beispiel für Marschhufendörfer: Konau und Poppelau (Landkreis Lüneburg, Gemeinde Amt Neuhaus).....	121

Abbildung 93: Beispiel für eine Moorkolonie - Seehausen (Landkreis Osterholz, Gemeinde Grasberg).....	121
Abbildung 94: Beispiel für eine Fehnsiedlung – Großefehn (Landkreis Aurich) [62].....	122
Abbildung 95: Stern/Strahlennetz.....	124
Abbildung 96: Lineares Netz.....	124
Abbildung 97: Ringnetz.....	125
Abbildung 98: Vermaschtes Netz.....	125
Abbildung 99: Wärmeverluststromdichte über der Nennweite berechnet nach verschiedenen Verfahren.....	129
Abbildung 100: Wärmeverluststromdichte in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung.....	129
Abbildung 101: Wärmeverluststromdichte in Abhängigkeit der Erdreichwärmeleitfähigkeit	130
Abbildung 102: Vergleich der Wärmeverluste von Einzel- und Doppelrohren in Abhängigkeit der Nennweite.....	131
Abbildung 103: Wärmeverluststromdichte und Wärmetransportkapazitäten bei gleichbleibender Mitteltemperatur und veränderlicher Vorlauftemperatur	132
Abbildung 104: Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Trassenlänge.....	133
Abbildung 105: Nichtmaßstäbliche Netzskizze des Netzes 1 – Heitlingen.....	137
Abbildung 106: Netzstrukturskizze Netz 2 – Steyerberg (ohne Darstellung der Hausanschlüsse).....	140
Abbildung 107: Resultierende Netzverluste im Vergleich.....	142
Abbildung 108: Resultierender Spitzenlastwärmeerzeugerbedarf.....	143

11. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 109: BHKW mit parallel geschaltetem Spitzenlastkessel.....	145
Abbildung 110: Thermische Kesselleistung und Wärmelast	145
Abbildung 111: Wärmepumpe mit nachgeschaltetem elektrischen Heizstab in der Wärmezentrale der Biogasanlage (Parallelschaltung von Wärmepumpe und BHKW).....	146
Abbildung 112: Wärmepumpe mit Heizstab an der Biogasanlage bei elektrischer Energiebereitstellung durch WKA.....	147
Abbildung 113: Wärmepumpe mit Heizstab an der Biogasanlage bei elektrischer Energiebereitstellung durch PV.....	147
Abbildung 114: Detailbetrachtung Wärmelast und Wärmeverfügbarkeit im Winterhalbjahr mit Antriebsenergie aus WKA.....	148
Abbildung 115: Detailbetrachtung Wärmelast und Wärmeverfügbarkeit im Winterhalbjahr mit Antriebsenergie aus PV.....	148
Abbildung 116: Wärmepumpe in Reihe zum BHKW geschaltet.....	149
Abbildung 117: Wärmepumpe am BHKW bei elektrischer Energiebereitstellung durch WKA.....	149
Abbildung 118: Wärmepumpe am BHKW bei elektrischer Energiebereitstellung durch PV	150
Abbildung 119: Detailbetrachtung Wärmelast und Wärmeverfügbarkeit im Winterhalbjahr mit Antriebsenergie aus WKA.....	150
Abbildung 120: Detailbetrachtung Wärmelast und Wärmeverfügbarkeit im Winterhalbjahr mit Antriebsenergie aus PV	151
Abbildung 121: Wärmepumpe in eigener Heizzentrale dezentral im Netz.....	152
Abbildung 122: Wärmepumpe dezentral im Wärmenetz bei elektrischer Energiebereitstellung durch WKA.....	152

Abbildung 123: Wärmepumpe dezentral im Wärmenetz bei elektrischer Energiebereitstellung durch PV.....	153
Abbildung 124: Detailbetrachtung Wärmelast und Wärmeverfügbarkeit im Winterhalbjahr mit Antriebsenergie aus WKA.....	153
Abbildung 125: Detailbetrachtung Wärmelast und Wärmeverfügbarkeit im Winterhalbjahr mit Antriebsenergie aus PV.....	154
Abbildung 126: Wärmepumpe in Reihe zum BHKW bei elektrischer Energiebereitstellung durch BHKW.....	155
Abbildung 127: Vergleich der Unterszenarien hinsichtlich Abdeckung Spitzenlastwärmebedarf und -leistung sowie Endenergiebedarf.....	156
Abbildung 128: Vergleich der Unterszenarien hinsichtlich Ausnutzung der verfügbaren Endenergie.....	157
Abbildung 129: Vergleich des energetischen Aufwands verschiedener Wärmepumpenszenarien (Unterszenarien B bis D) gegenüber Propangaskessel (Unterszenario A).....	158
Abbildung 130: Direkter Anschluss der Kundenanlage ohne Trink- oder Brauchwarmwasserbereitung.....	195
Abbildung 131: Indirekter Anschluss der Kundenanlage mit Trinkwarmwasservorheizung	195
Abbildung 132: Indirekter Anschluss der Kundenanlage mit Pufferspeicher im Fernwärmeanschluss und Frischwasserstation zur Trinkwarmwasserbereitung.....	195
Abbildung 133: Aufbau einer einstufigen Kompressionswärmepumpe.....	229
Abbildung 134: Stromlastkurven für die Woche vom 04. bis zum 10. März 2013 sowie im Detail für den 06. März 2013 [21].....	266
Abbildung 135: Stundenfaktoren für die Fermenterheizung – grafisch aufgetragen.....	268

Anhang A

A.1. Übergabestationen

In den Abbildungen 130 bis 132 sind verschiedene Konfigurationen von Fernwärme-Übergabestationen dargestellt.

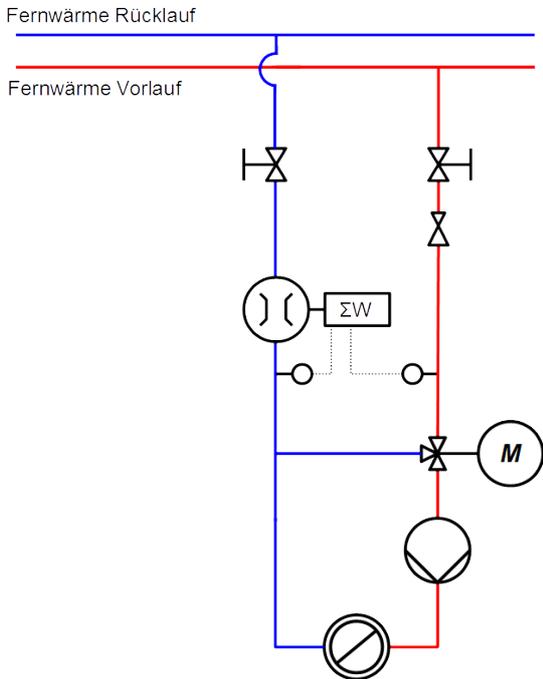


Abbildung 130: Direkter Anschluss der Kundenanlage ohne Trink- oder Brauchwarmwasserbereitung

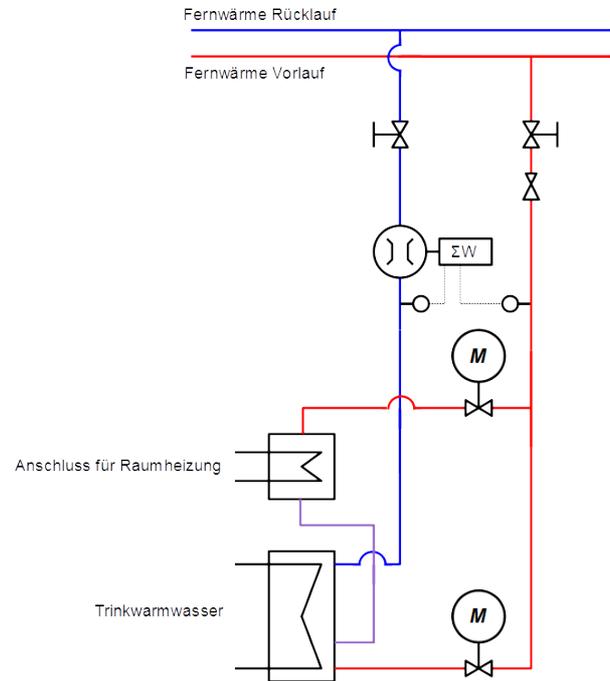


Abbildung 131: Indirekter Anschluss der Kundenanlage mit Trinkwarmwasservorheizung

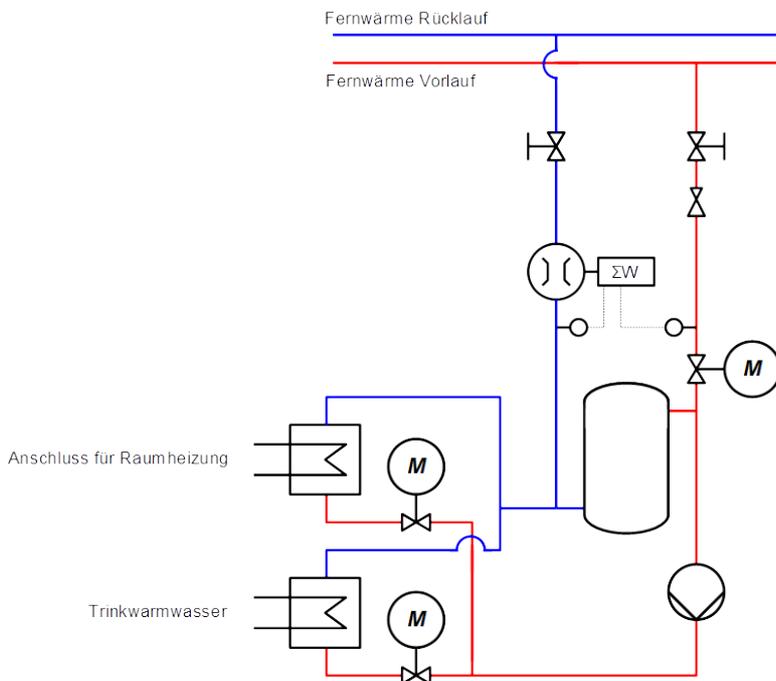


Abbildung 132: Indirekter Anschluss der Kundenanlage mit Pufferspeicher im Fernwärmeanschluss und Frischwasserstation zur Trinkwarmwasserbereitung

Bei entsprechender Speicherdimensionierung ermöglicht die in Abbildung 132 skizzierte Übergabestation eine vollständige Trennung der Lastkurve im Gebäude von der im Wärmenetz. Bei allen anderen skizzierten Übergabestationen wirkt die Raumheizlastkurve direkt auf das Fernwärmenetz ein. Die Trinkwarmwasserbereitung kann jeweils durch den Einbau von Trinkwarmwasserspeichern im Lastgang vom Fernwärmenetz entkoppelt werden.

Die in den Abbildungen 130 und 131 dargestellten Stationen ermöglichen zumindest während der Trinkwarmwasserbereitung mit entsprechender Leistung ganzjährig Rücklauftemperaturen unterhalb von 30 °C. Die in der Abbildung 130 dargestellt Station ermöglicht dies auch im kombinierten Betrieb von Trinkwarmwasserbereitung und Heizung. Im reinen Heizungsbetrieb liegen die Rücklauftemperaturen immer oberhalb der Raumtemperatur.

A.2. Heizkörper

Für Heizkörper und Flächenheizungen existieren Näherungsgleichungen zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen abgegebener Leistung und Temperaturen. In dieser Arbeit wird die von Recknagel et. al. in [139] beschriebene Heizkörpergleichung

$$\dot{Q} = \dot{Q}_N \left(\frac{\Delta t}{\Delta t_N} \right)^n \quad (26)$$

verwendet. Darin enthalten ist die arithmetische Temperaturdifferenz

$$\Delta t = \frac{t_v + t_r}{2} - t_L \quad (27)$$

bei einem Massenstrom von

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{c_p \cdot (t_v - t_r)} \quad (28)$$

Die möglichen Heizkörperexponenten n sind in Tabelle 21 aufgeführt.

Tabelle 21: Heizkörperexponenten nach [139]

Heizkörpertyp	Heizkörperexponent
Radiator	1,3
Rohrheizkörper	1,25
Rippenrohrheizkörper	1,25
Plattenheizkörper	1,2 ... 1,3
Konvektor	1,25 ... 1,45
Fußbodenheizung	1,1

Die Rücklauftemperatur in Abhängigkeit von Vorlauftemperatur und aktueller Leistung ergäbe sich daraus zu

$$t_r = 2 \cdot t_L + 2 \cdot \Delta t_N \cdot \left(\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_N} \right)^{\frac{1}{n}} - t_v \quad (29)$$

Für geringe Leistungen ergeben sich mit dieser Gleichung negative Rücklauftemperaturen. Somit sind die oben durchgeführten rein mathematischen Umformungen physikalisch nicht zulässig.

Um physikalisch korrekte Rücklauftemperaturen zu erhalten muss auf Iterationsverfahren zurückgegriffen werden.

Formelzeichen

\dot{Q}	aktuelle Heizleistung
\dot{Q}_N	Auslegungsheizleistung
Δt	arithmetische Temperaturdifferenz
Δt_N	arithmetische Temperaturdifferenz im Auslegungsfall
t_v	Vorlauftemperatur
t_r	Rücklauftemperatur
t_L	Raumtemperatur
n	Heizkörperexponent
\dot{m}	Massenstrom
c_p	Wärmekapazität des Mediums

A.3. Luftheizregister

Luftheizregister werden zur Aufheizung von Luft in zentralen Lüftungsanlagen oder dezentral in Räumen installiert. Für die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Leistungsabgabe, Temperaturen und Volumenströmen existieren Näherungsgleichungen. Hier werden die Näherungsgleichungen von Recknagel et. al. in der 76. Auflage [140] genutzt.

Für die Erstellung der Grafiken in Kapitel 4 wurde der Zusammenhang zwischen Leistung und mittlerer Lufttemperatur aus [141] übernommen. Für die Berechnungen wird angenommen, dass die Luft absolut trocken ist und einem idealen Gas entspricht. Zusätzlich wurden für die Heizwasser- und Lufteigenschaften auf folgende Quellen zurückgegriffen:

- Lufteigenschaften: Berechnet mit air_prop.xls [142]
- Wassereigenschaften: Berechnet mit Xsteam.ods [143]

Basis der Darstellung der Beziehung zwischen den Temperaturen in der Lüftungsanlage bildet die Aufwärmzahl

$$\phi = \frac{\Delta t_1}{\vartheta} = \frac{1}{\tau} \cdot (1 - e^{-\tau(1-e^{-\tau})}) \quad (30)$$

mit dem Wärmekapazitätsverhältnis

$$\tau = \frac{W_1}{W_2} = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \quad (31)$$

und der Leistungskennzahl

$$\kappa = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_m} = \frac{k \cdot A}{W_1} \quad (32)$$

Die Temperaturdifferenz im Luftstrom Δt_1 ist definiert als

$$\Delta t_1 = t_{1a} - t_{1e} \quad (33)$$

und die Temperaturdifferenz im Heizwasserstrom als

$$\Delta t_2 = t_{2a} - t_{2e} \quad (34)$$

Die maximal im Luftheizregister auftretende Temperaturdifferenz wird beschrieben mit

$$\vartheta = t_{2e} - t_{1e} \quad (35)$$

und die mittlere logarithmisch gemittelte Temperaturdifferenz im Heizregister über

$$\Delta t_m = \frac{(t_{2e} - t_{1e}) - (t_{2a} - t_{1a})}{\ln \frac{t_{2e} - t_{1e}}{t_{2a} - t_{1a}}} \quad (36)$$

Mit der Gleichung für die Energiebilanz

$$\dot{Q} = W_1 \cdot \Delta t_1 = W_2 \cdot \Delta t_2 = k \cdot A \cdot \Delta t_m \quad (37)$$

können dann die gewünschten Werte iterativ ermittelt werden.

Formelzeichen:

A	Wärmeübertragende Fläche	[m ²]
c_p	Wärmekapazität des Mediums	[J/(kg*K)]
k	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/(m ² *K)]
\dot{Q}	Wärmestrom	[J/s]
Δt	Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Ausgang	[K]
W	Wärmekapazitätsstrom	[J/(s*K)]
ϑ	Maximale Temperaturdifferenz im Heizregister	[K]
κ	Leistungskennzahl des Wärmeübertragers	[-]
τ	Wärmekapazitätsverhältnis	[-]
ϕ	Aufwärmzahl	[-]

Indizes

1	Kaltes Medium
2	Warmes Medium
<i>a</i>	Ausgangsseite
<i>e</i>	Eingangsseite
<i>m</i>	Mittelwert

A.4. Messdatenfilterung für Standardlastprofile

Für die Berechnung von Standardlastprofilen der Fermenterheizung wurden die gewonnenen Messdaten wie folgt gefiltert:

- Aussortieren aller Tage mit unvollständigen Messdaten
- Aussortieren aller Messdaten, die an Tagen mit Änderung der Fermentersolltemperatur gewonnen wurden
- Aussortieren aller Messdaten von Tagen mit manueller Abschaltung der Fermenterheizung

Für alle anderen Gebäude werden ausschließlich unvollständige Tage sowie Tage, an denen Arbeiten an der Kundenanlage oder dem Fernwärmenetz vorgenommen wurden aussortiert. Es werden die Wetterdaten der Wetterstation am Flughafen Hannover genutzt.

A.4.1. Ermittlung Standardlastprofil in Anlehnung an VKU BGW Praxisinformation P 2007/13

Die Standardlastprofile für den Fermenter sowie die weiteren Gebäude werden in Anlehnung an die von Hellwig entwickelte und in der VKU BGW Praxisinformation P 2007/13 veröffentlichte Vorgehensweise ermittelt. [43][34]

Da der Tageswärmeverbrauch nicht nur von der Tagesmitteltemperatur des aktuellen Tages sondern auch von den Temperaturen der vorangehenden Tage beeinflusst wird, kann nach Hellwig besser die gleitende geometrische Viertagemitteltemperatur als Bezugstemperatur genutzt werden.

$$\vartheta_D = \frac{\vartheta_0 + \vartheta_{-1} \cdot 0,5 + \vartheta_{-2} \cdot 0,25 + \vartheta_{-3} \cdot 0,125}{1 + 0,5 + 0,25 + 0,125} \quad (38)$$

Bei der Berechnung der Sigmoidfunktionen nach Hellwig [43] beziehungsweise der daraus abgeleiteten VKU BGW Praxisrichtlinie P 2007/13 werden Bedarfsänderungen in Abhängigkeit der Wochentage über Wochentagsfaktoren F beschrieben. Abweichend davon werden im Rahmen dieser Arbeit bei den Gebäuden mit Wohnnutzung für Werkzeuge, Samstage sowie Sonn- und Feiertage getrennte Sigmoidfunktionen $h(\vartheta_D)$ bestimmt, da die Sigmoidfunktionen für die einzelnen Tage unterschiedliche Formen aufweisen, die nicht allein durch einen konstanten Faktor aufeinander abgebildet werden können (Vergrößerung der Unterschiede zwischen den einzelnen Tagen mit abnehmender Temperatur, siehe Kapitel 4).

$$h(\vartheta_D) = \frac{A}{\left[1 + \left(\frac{B}{\vartheta_D - \vartheta_0}\right)^C\right]} + D \quad (39)$$

Abweichend von Hellwig wird weiterhin für den Gesamtwärmeverbrauch des Ackerbaubetriebes und des Viehzuchtbetriebes der Faktor D der Sigmoidfunktion als auf den mittleren Tagesgesamtwärmeverbrauch normierte Minima der Tagestrinkwarmwasserverbräuche festgelegt, da ansonsten rein rechnerisch negative Trinkwarmwasserverbräuche bei Tagesmitteltemperaturen oberhalb von 20 °C zu erhalten wären.

Die Berechnung der Sigmoidfunktionen erfolgt mit dem Paket „nls2“ in dem Programm „R“ (Nicht lineare Funktionsbestimmung nach dem Prinzip des kleinsten Fehlerquadrates). zunächst mit den gemessenen und bereinigten Daten. Hier das Beispiel für die Berechnung der Sigmoidfunktion für den Fermenter (Für die anderen Wärmeabnehmer mit geänderten Dateibezeichnungen analog):

```
FermB<-read.table(file="...\\Biogas_DB_red.csv",sep=",")
xsym<-FermB[,1]
ysym<-FermB[,2]
library(nls2)
modelFermB<-ysym ~ A/(1+(B/(xsym-40))^C)
st0 <- expand.grid(A = seq(0.5, 1, len = 10), B=seq(-50, -20, len=10), C=1)
modeFB <- nls2(modelFermB, start=st0, algorithm="brute-force")
modeFB
nls2(modelFermB,start=modeFB)
```

Für die Übertragung der Sigmoidfunktion auf andere, gleichartige Wärmeabnehmer bei Kenntnis des Wärmeverbrauchs über einen längeren Zeitraum, ist die Sigmoidfunktion zu normieren. Hierzu muss nach Hellwig [43] eine Temperaturverschiebung auf die Mitteltemperatur eines Standardjahres durchgeführt werden.

$$\Delta \vartheta = \bar{\vartheta}_{Mess} - \bar{\vartheta}_{Ref} \quad (40)$$

Damit kann für jeden Tag die korrigierte Tagesmitteltemperatur berechnet werden.

$$\vartheta_{korr} = \vartheta_{korr, Mess} + \Delta \vartheta \quad (41)$$

Der Wärmeverbrauch in Abhängigkeit der Tagesmitteltemperatur ist entsprechend zu korrigieren mit

$$Q_{j, korr} = H(\vartheta_{D, korr}) - H(\vartheta_{D, Mess}) + Q_{j, Mess} \quad (42)$$

Daraus kann dann der mittlere Tageswärmeverbrauch als Bezugsgröße für die Normierung bestimmt werden.

$$\bar{Q}_{korr} = \frac{\sum_{j=1}^N Q_{j,korr}}{N} \quad (43)$$

Mit dem normierten Verbrauch

$$h = \frac{Q_{j,korr}}{\bar{Q}_{korr}} \quad (44)$$

Mit diesen normierten Wärmeverbräuchen sowie den zugehörigen korrigierten Temperaturen werden die Parameter für die Sigmoidfunktion (siehe Gleichung 39) erneut bestimmt.

Für die Berechnung der Tageswärmemengen aus der Jahreswärmemenge müssen jetzt noch Typtagfaktoren bestimmt werden. Diese können im ersten Schritt nach Hellwig wie in Gleichung (45) beschrieben über eine mittlere Sigmoidfunktion ermittelt werden.

$$F_{Wochentag}(\vartheta_D) = \frac{h_{Wochentag}(\vartheta_D)}{h_{Wochenmittel}(\vartheta_D)} \quad (45)$$

Dazu muss über alle Messtage hinweg eine zusätzliche Sigmoidfunktion $h_{Wochenmittel}(\vartheta_A)$ bestimmt werden. Wenn die vorliegenden Messdaten, wie die im Rahmen dieser Arbeit erhobenen, in ihrer Anzahl je Wochentag deutlich von einem Jahr abweichen (siehe Anhang B), würde die entstehende mittlere Sigmoidfunktion übermäßig in Richtung eines Tages geprägt werden. Daher wird hier auf eine selbst erstellte Näherung zurückgegriffen.

Für jeden Wochentag (Werktag, Samstag sowie Sonn- oder Feiertag) wird die Tageswärmemenge bei der Mitteltemperatur des Standardjahres $\bar{\vartheta}_{Ref}$ berechnet.

Jeder Messtag wird an Hand der gleitenden geometrischen Mitteltemperatur ϑ_D über vier Tage einer Temperaturklasse zugeordnet. In den Temperaturklassen werden für alle Stunden Mittelwerte des Wärmeverbrauchs $\bar{Q}_{Stunde}(\vartheta_D)$ gebildet. Diese Mittelwerte fließen mit dem mittleren Tageswärmeverbrauch einer Temperaturklasse $\bar{Q}_{Tag}(\vartheta_D)$ in die Berechnung der Stundenfaktoren ein

$$SF(Stunde, \vartheta_D) = \frac{\bar{Q}_{Stunde}(\vartheta_D)}{\bar{Q}_{Tag}(\vartheta_D)} \cdot 100\% \quad (46)$$

Um aus über längeren Zeiträumen gemessene Wärmeverbräuchen Lastgänge zu berechnen, müssen zunächst die Tagesbedarfe ermittelt werden. Für die Berechnung der Tagesbedarfe wird die ermittelte Sigmoidfunktion in die Gleichung

$$Q_D = KW \cdot F(D) \cdot h(\vartheta_D) \quad (47)$$

mit

$$KW = \frac{Q_N}{\sum_{j=1}^n (F(D_j) \cdot h(\vartheta_{D_j}))} \quad (48)$$

eingesetzt.

Mit einer Umformung der Gleichungen (26) nach $\bar{Q}_{Stunde}(\vartheta_D)$ kann daraus dann der stündliche Wärmebedarf ermittelt werden.

Formelzeichen:

A	Parameter A	[-]
B	Parameter B	[-]
C	Parameter C	[-]
D	Parameter D	[kWh]
F	Wochentagsfaktor	[-]
$h(\vartheta_D)$	Tageswärmemenge aus Sigmoidfunktion	[kWh] oder [-]
KW	Kundenwert	[kWh]
Q	Wärmebedarf	[kWh]
\bar{Q}	Mittlere Wärmemenge	[kWh]
SF	Stundenfaktor	[%]
ϑ_D	Gleitende geometrische 4-Tage-Mitteltemperatur	[°C]

Indizes:

0	Bezugszustand
<i>D</i>	Tag
<i>j</i>	Zählindex
<i>N</i>	Im Messzeitraum
<i>Stunde</i>	Stundenwert
<i>Tag</i>	Tageswert

A.4.2. Ermittlung von Standardlastprofilen in Anlehnung an VDI 4655

Die Standardlastprofile für die Gebäude und den Fermenter können in Anlehnung an die Lastprofilerstellung zur VDI 4655 ermittelt werden. [55]

Folgende Abweichungen werden im Rahmen dieser Arbeit vorgenommen:

- Die Gebäude werden jeweils unabhängig voneinander betrachtet.
- Eine Anpassung an einen linearen Zusammenhang zwischen 7-Tages-Mitteltemperatur und Tagesheizwärmebedarf wird nicht vorgenommen.
- Beim Fermenter erfolgen keine Unterscheidungen zwischen den Wochentagen.
- Für den Wohnsitz werden Trinkwarmwasserwärmeverbrauch und Heizwärmeverbrauch in einem gemeinsamen Lastprofil entsprechend der Vorgaben für Heizlastprofile zusammengefasst.

Die 7-Tage-Mitteltemperatur wird berechnet über

$$\vartheta_{M7,0} = \frac{1}{7} \cdot \sum_{j=-6}^0 \vartheta_{M,j} \quad (49)$$

Die 7-Tage-Mitteltemperatur bildet in Verbindung mit dem Bedeckungsgrad *B* sowie den Wochentagen die Basis für die Typtagbildung. Jeder Tag eines Jahres wird einer, der in Tabelle 22 aufgeführten Kategorien, zugeordnet (Definition der Typtage gemäß Dubielzig et. al. [55] mit Ausnahme der Typtage ÜXH, ÜXB, SXX, WXH und WXB).

Tabelle 22: Übersicht über die Typtagkategorien (Quellen für alle Typtagkategorien, die nicht mit „nur Fermenter“ gekennzeichnet sind, ist [55])

Typtagkategorie	Wochentag	Bewölkung	Temperatur
ÜSH	Sonn-/Feiertage	heiter, $B \leq \frac{5}{8}$	$5^{\circ}C \leq T_{M7} \leq 15^{\circ}C$
ÜSB	Sonn-/Feiertage	bedeckt, $B > \frac{5}{8}$	$5^{\circ}C \leq T_{M7} \leq 15^{\circ}C$
ÜWH	Werktag	heiter, $B \leq \frac{5}{8}$	$5^{\circ}C \leq T_{M7} \leq 15^{\circ}C$
ÜWB	Werktag	bedeckt, $B > \frac{5}{8}$	$5^{\circ}C \leq T_{M7} \leq 15^{\circ}C$
ÜXH (nur Fermenter)	alle Wochentage	heiter, $B \leq \frac{5}{8}$	$5^{\circ}C \leq T_{M7} \leq 15^{\circ}C$
ÜXB (nur Fermenter)	alle Wochentage	bedeckt, $B > \frac{5}{8}$	$5^{\circ}C \leq T_{M7} \leq 15^{\circ}C$
SSX	Sonn-/Feiertage	alle Tage	$5^{\circ}C \leq T_{M7} \leq 15^{\circ}C$
SWX	Werktag	alle Tage	$T_{M7} > 15^{\circ}C$
SXX (nur Fermenter)	alle Wochentage	alle Tage	$T_{M7} > 15^{\circ}C$
WSH	Sonn-/Feiertage	heiter, $B \leq \frac{5}{8}$	$T_{M7} < 5^{\circ}C$
WSB	Sonn-/Feiertage	bedeckt, $B > \frac{5}{8}$	$T_{M7} < 5^{\circ}C$
WWH	Werktag	heiter, $B \leq \frac{5}{8}$	$T_{M7} < 5^{\circ}C$
WWB	Werktag	bedeckt, $B > \frac{5}{8}$	$T_{M7} < 5^{\circ}C$
WXH (nur Fermenter)	alle Wochentage	heiter, $B \leq \frac{5}{8}$	$T_{M7} < 5^{\circ}C$
WXB (nur Fermenter)	alle Wochentage	bedeckt, $B > \frac{5}{8}$	$T_{M7} < 5^{\circ}C$

Für alle Typtagkategorien werden jeweils abnehmerspezifische Mittelwerte für die Heizwärmeverbäuche

$$Q_{Heiz, TT} = \left(\sum_{j=1}^n Q_{Heiz, TT, j} \right) \cdot \frac{1}{n} \quad (50)$$

und die Trinkwarmwasserwärmeverbräuche $Q_{TWW, TT}$

$$Q_{TWW, TT} = \left(\sum_{j=1}^n Q_{TWW, TT, j} \right) \cdot \frac{1}{n} \quad (51)$$

gebildet.

Abweichend von Dubielzig et. al. [55] wird der Jahresheizwärmeverbrauch eines Testreferenzjahres durch Summierung der einzelnen Typtage berechnet. Dieser bildet die Bezugsgröße für die Ermittlung der normierten Typtagfunktionen.

$$F_{Heiz, TT} = \frac{Q_{Heiz, TT}}{\sum_{j=1}^o Q_{Heiz, TT, j} \cdot n_{TT, j}} \quad (52)$$

Die Typtagfunktionen für den Trinkwarmwasserwärmebedarf $F_{TWW, TT}$ wird gemäß Dubielzig et. al. [55] als Abweichung vom über das Jahr gemittelten Tagestrinkwarmwasserbedarf definiert. Aus der in der VDI 4655 angegebenen Gleichung ([49], Abschnitt 6.4, Seite 16)¹¹

$$Q_{TWW, TT} = Q_{TWW, a} \cdot \left(\frac{1}{365} + N_{PerslWE} \cdot F_{TWW, TT} \right) \quad (53)$$

ergibt sich durch Umformung

$$F_{TWW, TT} = \frac{1}{N_{PerslWE}} \cdot \left(\frac{Q_{TWW, TT}}{Q_{TWW, a}} - \frac{1}{365} \right) \quad (54)$$

mit

¹¹ Anmerkung: Die Gleichung in der VDI-Richtlinie VDI 4655:2008, Abschnitt 7.4 ist falsch.

$$Q_{TWW,a} = \sum_{j=1}^n Q_{TWW,TT,j} \cdot n_{TT,j} \quad (55)$$

Für die Bestimmung der Tagesganglinie werden nach Dubielzig die viertelstündlichen, gemessenen Wärmeverbräuche auf den maximalen täglichen Viertelstundenverbrauch bei Mehrfamilienhäusern normiert. Bei Einfamilienhäusern werden nach Dubielzig die minütlichen Wärmeverbräuche verwendet. Da bei den eigenen Messungen nur viertelstündliche Werte aufgenommen wurden, werden für die Tagesganglinien der Gebäude nur viertelstündliche Werte berechnet. Die typische Tagesganglinie eines Typtages ist dabei diejenige, die die geringste quadratische Abweichung zum Mittelwert aller Ganglinien dieses Typtages nach [55], Seite 31, hat. Abweichend von Dubielzig wird hier die nicht kumulierte Variante gewählt¹²:

$$\Delta_{TWW,TL} = \sum_{t=0:00}^{24:00} \Delta_{TWW,TL}(t) \quad (56)$$

mit

$$\Delta_{Heiz|TWW,TL}(t) = (Q_{TWW,TL}(t) - Q_{TWW,M}(t))^2 \quad (57)$$

Formelzeichen:

$F_{Heiz,TT}$	Typtagfunktion für Heizwärme	[-]
$F_{TWW,TT}$	Typtagfunktion für Trinkwarmwasserwärme	[-]
n	Anzahl	[-]
$N_{Pers,WE}$	Anzahl der Personen oder Wohneinheiten	[-]
q	normierte Wärmemenge	[-]
Q	Wärmemenge	[kWh]
Δ	Differenz normierter Wärmemengen	[kWh]
ϑ	Temperatur	[°C]

Indizes:

a	Jahr
j	Zählindex
$Heiz$	Heizung

¹² Anmerkung: Die nicht kumulierten Tageslastgänge lassen sich gegenüber den kumulierten Lastgängen einfacher über ganze Wärmenetze zu Jahreslastkurven aufaddieren.

Anhang A

<i>M</i>	Mittelwert
<i>M7</i>	Sieben-Tage-Mittelwert
<i>t</i>	Uhrzeit
<i>TL</i>	Tageslastgang
<i>TT</i>	Typtag
<i>TWW</i>	Trinkwarmwasser

A.5. Wirkungsgraddefinitionen

Wirkungsgrade beschreiben den Zusammenhang zwischen zugeführter Energie und nutzbarer Energie von technischen Systemen. So beschreibt der elektrische Wirkungsgrad

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{Br}} \quad (58)$$

den Anteil nutzbarer elektrischer Leistung P_{el} an der zugeführten Brennstoffleistung \dot{Q}_{Br} (bezogen auf den Heizwert). Entsprechend des elektrischen Wirkungsgrades kann für ein reines Wärmeerzeugungssystem oder ein Wärmeerzeugungssystem mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ein thermischer Wirkungsgrad

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{th}}{\dot{Q}_{Br}} \quad (59)$$

als Quotient aus nutzbarer Wärmeleistung \dot{Q}_{th} und Brennstoffleistung \dot{Q}_{Br} angegeben werden. Damit kann der Gesamtwirkungsgrad von KWK-Anlagen als Summe aus elektrischem und thermischem Wirkungsgrad definiert werden.

$$\eta_{ges} = \eta_{th} + \eta_{el} = \frac{\dot{Q}_{th} + P_{el}}{\dot{Q}_{Br}} \quad (60)$$

Alle vorgenannten Wirkungsgrade können maximal den Wert 1 beziehungsweise 100 % erreichen. Der Wirkungsgrad von mechanischen Wärmepumpen wird, da er immer über 1 liegen soll, als Coefficient of Performance – COP oder Leistungszahl ε bezeichnet.

$$\varepsilon = COP = \frac{\dot{Q}_{ab}}{P_{zu, Verd}} \quad (61)$$

Für Kraftwerksprozesse ist als weitere Kennzahl für den Vergleich verschiedener Systeme der Brennstoffnutzungsgrad von Interesse. Der Brennstoffnutzungsgrad einer Biogasanlage oder eines Heizkraftwerkes wird als das Verhältnis von nutzbarer Wärme und elektrischer Energie zu zugeführter chemischer Energie des Substrates beziehungsweise Brennstoffs definiert.

$$\bar{\eta} = \frac{Q_{Nutz} + W_{el}}{H_{i, Br} \cdot m_{Br}} \quad (62)$$

Neben dem Wirkungsgrad und dem Brennstoffnutzungsgrad ist für den Vergleich von Kraft-Wärmekopplungsanlagen das Verhältnis zwischen Strom- und Wärmeleistung relevant. Dieses wird über die Stromkennzahl dargestellt.

$$S = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{th}} \quad (63)$$

Formelzeichen:

COP	Coefficient of Performance	[-]
$H_{i, Br}$	Heizwert	[kWh/kg]
m_{Br}	Brennstoff-/Substratmasse	[kg]
P_{el}	Elektrische Leistung	[kW]
$P_{zu, Verd}$	Verdichterantriebsleistung	[kW]
Q_{Nutz}	Nutzwärmemenge	[kWh]
\dot{Q}_{ab}	Abgeführte Wärmeleistung	[kW]
\dot{Q}_{Br}	Brennstoffleistung	[kW]
\dot{Q}_{th}	Thermische Leistung	[kW]
S	Stromkennzahl	[-]
W_{el}	Elektrische Energie	[kWh]
ε	Leistungszahl	[-]
η	Wirkungsgrad	[-]
$\bar{\eta}$	Brennstoffnutzungsgrad	[-]

Indizes:

th	Thermisch
el	Elektrisch

A.6. Biogasanlage

A.6.1. Sankeydiagramm

Folgende Daten der Biogasanlage Heitlingen standen für die Bilanzierung zur Verfügung:

- Wärmemengen des Fermenterheizung für die Monate April 2012 bis März 2013 (eigenen Messungen)
- Eingesetzte Substratmengen für den Zeitraum Januar bis Dezember 2012 (Gutachten des TÜV Nord)
- Maximale Feuerungsleistung des BHKW (Gutachten des TÜV Nord)
- Erzeugte Strommenge für den Zeitraum Januar bis Dezember 2012 (Gutachten des TÜV Nord)
- In das Wärmenetz eingespeiste Wärmemenge für den Zeitraum Januar bis Dezember 2012 (Gutachten des TÜV Nord)
- Leistungen der Wärmeübertrager für Gemischkreislauf, Ölkreislauf, Kühlwasserkreislauf und Abgas (Biogas Heitlingen GmbH)

Für die Erstellung des Sankeydiagramms für die Biogasanlage Heitlingen werden zusätzlich folgende grundlegende Annahmen getroffen:

Daten für die Berechnungen:

BHKW

Feuerungswärmeleistung	1.300 kW
Leistung Gemischkühler 1	66 kW (Angabe Anlagenbetreiber)
Leistung Ölkühler	60 kW (Angabe Anlagenbetreiber)
Leistung Kühlwasserwärmetauscher	189 kW (Angabe Anlagenbetreiber)
Leistung Abgaswärmeübertrager	238 kW (Angabe Anlagenbetreiber)
Turboladerverdichtungsverhältnis	1:4,49
Ausgangsdruck Luftansauggebläse	1,113 bar
Ausgangsdruck Gasverdichter	1,113 bar
Austrittstemperatur Gemischkühler 2	50 °C
Luftverhältnis	1,47
Eigenstromverbrauch	5,6 %

Verbrennungsluftzusammensetzung [144]:

Molanteile Stickstoff	0,7812
Molanteile Sauerstoff	0,2096

Anhang A

Molanteile Argon 0,0092

Fermenter

Fermentertemperatur 41,2 °C (konstant)

Fermentergasdruck 1,028 bar

Trockenmasseanteil am Fermentergemisch 12 % [78]

Substrate

Tabelle 23: Eigenschaften von Substraten [78][145][137][136][146][147]

Substrat	Trockensub- stanzanteil [%]	Organischer Anteil [%TS]	Heizwert [MJ/kg _{TS}]	Methanausbeute [Nm ³ _{Methan} /t _{oTS}]
Rindergülle	8	80	12,6	210
Maissilage	32	96	18,02	352
Hühner- trockenkot	45	75	13	280
Roggen-GPS	40	95	17,5	324

Tabelle 24: Weitere Eigenschaften von Substraten [148][95][137]

Substrat	Masseabbau [kg/t _{FM}]	Trockensub- stanzanteil [%]	Wärmekapazität [kJ/(kg*K)]
Rindergülle	23	5,8	3,951
Maissilage	240	10,6	2,265
Hühner- trockenkot	194	31,7	4,200 ¹³
Roggen-GPS	257	19,2	2,831

¹³ Es liegen keine Informationen über die Wärmekapazität von Hühnertrockenkot vor. Es wird daher auf Grundlagen der Aussagen in [149] angenommen, dass der Wärmekapazitätsunterschied zu Wasser auf Grund der starken notwendigen Verdünnung vernachlässigbar ist.

Sonstiges

Umgebungstemperatur	9,2 °C ¹⁴
Umgebungsdruck	1,0135 bar
Bezugstemperatur	9,2 °C
Molvolumen der Gase bei Normbedingungen ¹⁵	24,465433 l/mol

Tabelle 25: Eigenschaften von Wasser und Gärresten [148][95][137]

Material	Wärmekapazität [kJ/(kg*K)]	Mittlerer Heizwert [MJ/kg _{TS}]
Wasser	4,2	0
Gärrest	3,84	15,67

Annahmen

- Der Wasserdampfanteil im Biogas kann nach der Gastrocknung (Kondensation des Wasserdampfes in der im Erdreich verlegten Biogasleitung) vernachlässigt werden
- Die Erwärmung oder Abkühlung in Rohrleitungen ist mit Ausnahme der Biogasleitung im Erdreich vernachlässigbar
- Der Energieeintrag in den Fermenter durch das Rückwerk sowie die Pumpen ist vernachlässigbar
- Im Motor erfolgt eine vollständige Verbrennung
- Die erzeugte elektrische Strommenge sowie des Substrateinsatzes des BHKW im Zeitraum Januar 2012 bis Dezember 2012 ist gleich der erzeugten Strommenge im Zeitraum April 2012 bis März 2013
- Alle Gase und Gasgemische können als ideale Gase betrachtet werden. Es gelten die ideale Gasgleichung

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (64)$$

sowie für die isobare Wärmekapazität c_p und die isochore Wärmekapazität c_v von Gasgemischen

$$c_{ges} = \sum_{j=1}^n c_j \cdot n_j \quad (65)$$

¹⁴ Jahresmitteltemperatur für Hannover im Zeitraum April 2012 bis März 2013 [150]
¹⁵ 0 °C und 1,01325 bar

Rechenweg:

Zunächst werden die Trockensubstanzmasse

$$m_{TS, Substrat} = \sum_{j=1}^n m_{FM, j} \cdot TS_j \quad (66)$$

und die Wassermasse im Substrat berechnet

$$m_{H_2O, Substrat} = \sum_{j=1}^n m_j \cdot \varphi_j \quad (67)$$

Da der errechnete mittlere Trockenmassegehalt der Substrate höher als der Sollwert von 12 % liegt, wird dem Substrat-Gemisch Wasser zugesetzt. Die benötigte Wassermasse errechnet sich über

$$m_{H_2O, Zusatz} = m_{TS, Substrate} \cdot \frac{TS_{Soll}}{1 - TS_{Soll}} \quad (68)$$

Hieraus ergibt sich ein Zusatzwasserbedarf in Höhe von rund 90,7 % der Substratmasse.¹⁶

Im Fermenter kann nicht die gesamte Biomasse biologisch zu Biogas abgebaut werden. Mit oben genannten Annahmen kann die Stoffbilanz für den Fermenter gebildet werden

$$\sum_{j=1}^n m_{FM, j} + m_{H_2O} = m_{Gas, feucht} + m_{Gär} \quad (69)$$

worin die Masse des Wasserdampf-gesättigten Biogases

$$m_{Gas, feucht} = M_{Gas} \cdot n_{Gas} + M_{H_2O} \cdot n_{H_2O} = M_{CH_4} \cdot n_{CH_4} + M_{CO_2} \cdot n_{CO_2} + M_{H_2O} \cdot n_{H_2O} \quad (70)$$

und die Gärrestemasse

¹⁶ Im Jahr 2012 wurde die zugeführte Wassermenge durch die Anlagenbetreiber gegenüber dem Sollwert um 71 % reduziert. Für die Bilanzaufstellung wird mit diesem reduzierten Wert gerechnet.

$$m_{Gär} = \sum_{j=1}^n \left[m_{FM,j} \cdot (1 - \Delta m_j) \right] \quad (71)$$

berücksichtigt werden. Die Molanzahl Methan wird über die angenommene Methanausbeute und das Molvolumen bestimmt

$$n_{CH_4} = \sum_{j=1}^n v_{CH_4,j} \cdot m_{oTS,j} \cdot \frac{1}{v_{mol}} \quad (72)$$

Über die Dampfdruckkurve (hier berechnet mit X-Steam) kann der Partialdruck für den Wasserdampf im feuchten Biogas berechnet werden. Der Wasserdampfgehalt wird damit unter Kenntnis des Absolutdruckes im Fermenter sowie unter Zuhilfenahme der Partialdrücke ermittelt. Der Absolutdruck im Fermenter wird festgelegt auf 1,028 bar (0,015 bar Überdruck). Für die Berechnung des im feuchten Biogas enthaltenen Wasserdampfs gilt

$$n_{Gas, feucht} = n_{Gas} + n_{H_2O, Gas} \quad (73)$$

und

$$P_{Gas, feucht} = P_{Gas} + P_{H_2O, Gas} \quad (74)$$

sowie

$$\frac{P_{H_2O, Gas}}{P_{Gas, feucht}} = \frac{n_{H_2O, Gas}}{n_{Gas, feucht}} \quad (75)$$

und

$$\frac{P_{Gas}}{P_{Gas, feucht}} = \frac{n_{Gas}}{n_{Gas, feucht}} \quad (76)$$

Mit der Stoffbilanz lässt sich unter der Bedingung, dass

$$\Delta h = c_{p, Gas} \cdot (T_{Ferm} - T_U) \quad (77)$$

gilt, jetzt auch eine Energiebilanz über den Fermenter aufstellen

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n \left[H_{i, TS, j} + c_{p, j} \cdot (T_{Ferm} - T_U) \right] \cdot m_{TS, j} + m_{H_2O} \cdot c_{p, H_2O} \cdot (T_{Ferm} - T_U) + Q_{FH} \\ & = H_{i, CH_4} \cdot m_{CH_4} + H_{i, Gär} \cdot m_{Gär} + \left(m_{Gas} \cdot c_{p, Gas, trocken} + m_{Gär} \cdot c_{p, Gär} \right) \cdot (T_{Ferm} - T_U) \\ & \quad + m_{H_2O, Gas} \cdot (h_{H_2O, Ferm} - h_{H_2O, U}) + Q_{OV} \end{aligned} \quad (78)$$

Hierfür wird die Wärmekapazität des trockenen Biogases über die molaren Wärmekapazitäten der Hauptkomponenten, Kohlendioxid und Methan, abgeschätzt werden

$$c_{p, Gas, trocken} = \frac{(c_{p, mol, CH_4} \cdot n_{CH_4} + c_{p, mol, CO_2} \cdot n_{CO_2})}{(n_{CH_4} + n_{CO_2}) \cdot M_{Gas}} \quad (79)$$

Die Werte für die Reinstoffe können nach [151][152][153][154][155] berechnet werden oder Tabellenwerken entnommen werden. Auf Grund der großen sonstigen Ungenauigkeiten bei der Bilanzierung der Biogasanlage Heitlingen wird auf linear interpolierte Tabellenwerte aus den vorgenannten Quellen für Kohlendioxid, Methan, Stickstoff, Sauerstoff und Argon zurückgegriffen. Fehlende Daten werden dem Onlinetabellenwerk des NIST (National Institute of Standards and Technology [156]) entnommen. [95]

Da eine vollständige Gasdichtigkeit des Fermenters der Biogasanlage Heitlingen nicht garantiert werden kann, wird in Anlehnung an Literaturwerte angenommen, dass der Methanverlust rund 1 % der Jahresgasproduktion beträgt [157]

Die Verluste an chemischer Energie an die Umgebung über die Leckagen kann abgeschätzt werden mit

$$\Delta H_{Gas, Leck} = N_{Gas, Leck} \cdot H_{Gas} \quad (80)$$

und

$$H_{Gas} = m_{CH_4} \cdot H_{i, CH_4} \quad (81)$$

In die Biogasleitung zum Gasverdichter gelangen somit nur etwa 99 % des erzeugten Biogases. Die Gesamtwärmeabgabe an die Umgebung von der Biogasleitung sowie über die Leckagen am Fermenter lässt sich unter Annahme einer isobaren Temperaturänderung von der Fermentertemperatur (41,2 °C) auf die Jahresmitteltemperatur (9,2 °C) abschätzen mit

$$\Delta Q_{Gas} = m_{Gas} \cdot c_{p, Gas} \cdot (T_{Ferm} - T_U) + m_{H_2O, Gas} \cdot (h_{H_2O, Ferm} - h_{H_2O, U}) \quad (82)$$

Zu berücksichtigen ist dabei, dass bei Abkühlung auf mittlere Umgebungstemperatur Kondensat ausfällt und somit für $h_{H_2O, U}$ die Mischenthalpie für Gas- und Flüssigphase verwendet werden muss. Da die in der Gasphase enthaltene Wasserdampfmasse nach der Kondensation unter 1 Promille der Gesamtmasse beträgt, wird für alle folgenden Bilanzierungen angenommen, dass die thermischen Eigenschaften des feuchten Biogases identisch mit jenen des trockenen Biogases sind.

Der Gasverdichter erhöht den Druck des Biogases auf 100 mbar über Umgebungsdruck. Die Energiezufuhr unter Annahme einer isentropen Verdichtung wird ermittelt mit

$$T_{Gas, GV} = T_U \cdot \left(\frac{p_{GV}}{p_{gas, feucht}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (83)$$

und

$$W_{GV} = m_{Gas, GV} \cdot (h_{Gas, GV} - h_{Gas, U}) \quad (84)$$

mit dem Isentropenexponenten für Biogas

$$\kappa = \frac{c_{p, Gas}}{c_{v, Gas}} \quad (85)$$

Schwankungen in der Gasproduktion sowie geplante und ungeplante Abschaltungen des Blockheizkraftwerkes bedingen eine Nutzung der Fackel. Da keine Aufzeichnungen über die dort verbrannten Gasmengen vorliegen, wird angenommen, dass 1 % der jährlich erzeugten Biogasmenge in der Fackel verbrannt wird. Somit gilt für die Energiebilanz der Fackel

$$Q_{Fackel} = N_{Gas, Fackel} \cdot m_{Gas} \cdot (H_{i, Gas} + w_{GV}) \quad (86)$$

mit

$$w_{GV} = \frac{W_{GV}}{m_{Gas, GV}} \quad (87)$$

Vor dem Turboladereintritt werden vorverdichtete Verbrennungsluft und Biogas gemischt. Im Turbolader wird das Gemisch um angenommene 3,99 bar verdichtet. Bei isentroper Verdichtung im Turbolader ergeben sich dann folgende Bilanzgleichungen für die Verdichterseite des Abgasturboladers

$$T_{AT, ein} = \frac{m_{Luft, AT} \cdot c_{p, Luft} \cdot T_{Luft, AT} + m_{Gas, AT} \cdot c_{p, Gas} \cdot T_{Gas, AT}}{m_{Luft, AT} \cdot c_{p, Luft} + m_{Gas, AT} \cdot c_{p, Gas}} \quad (88)$$

und der Gleichung für die Ausgangstemperatur

$$T_{AT, aus} = T_{AT, ein} \cdot \left(\frac{p_{AT}}{p_{GV}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (89)$$

sowie

$$W_{AT} = n_{Gem} \cdot (h_{Gem, ATein} - h_{Gem, ATaus}) \quad (90)$$

mit dem Isentropenexponenten für das Gemisch

$$\kappa = \frac{c_{p, Gem}}{c_{v, Gem}} \quad (91)$$

und der Temperatur der Verbrennungsluft bei der Mischung

$$T_{Luft} = T_U \cdot \left(\frac{p_{GV}}{p_U} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (92)$$

Mit der Annahme einer Luftüberschusszahl $\lambda=1,47$ und der bekannten Reaktionsgleichung für Methan mit Sauerstoff



ergibt sich für die Berechnung der für die Verbrennung benötigten Sauerstoffmenge

$$n_{O_2} = 2 \cdot \lambda \cdot \left(1 - N_{Gas, Leck} - N_{Gas, Fackel} \right) \cdot n_{CH_4} \quad (94)$$

Die anderen Molmengen werden anschließend gemäß der Annahme für die molare Zusammensetzung von Luft berechnet. Die Molanzahl für das Gemisch

$$n_{Gem} = n_{Gas, AT} + n_{Luft} \quad (95)$$

ergibt sich aus der Molanzahl für das Biogas

$$n_{Gas, AT} = \left(1 - N_{Gas, Leck} - N_{Gas, Fackel} \right) \cdot n_{Gas} \quad (96)$$

und der Molanzahl für die Verbrennungsluft

$$n_{Luft} = n_{O_2} + n_{N_2} + n_{Ar} \quad (97)$$

Damit kann die Enthalpie des Biogas-Luftgemisches aus der molaren Ethalpie für das Biogas

$$h_{Gas} = h_{CH_4} \cdot n_{CH_4} + h_{CO_2} \cdot n_{CO_2} \quad (98)$$

und der Luft

$$h_{Luft} = h_{N_2} \cdot n_{N_2} + h_{O_2} \cdot n_{O_2} + h_{Ar} \cdot n_{Ar} \quad (99)$$

zu

$$h_{gem} = h_{CH_4} \cdot n_{CH_4} + h_{CO_2} \cdot n_{CO_2} + h_{N_2} \cdot n_{N_2} + h_{O_2} \cdot n_{O_2} + h_{Ar} \cdot n_{Ar} \quad (100)$$

berechnet werden.

Der hinter dem Abgasturbolader angeordnete Gemischkühler kann bei einer Kühlwassertemperatur von 75 °C das Gemisch isobar auf etwa 77 °C herunterkühlen, um die bei der Biogasanlage Heitlingen bekannte mittlere Leistung des Wärmeübertragers von 66 kW zu erreichen. Die thermische Energiebilanz für den Gemischkühler lautet damit

$$Q_{GK} = n_{Gem} \cdot (h_{Gem, GK, ein} - h_{Gem, GK, aus}) \quad (101)$$

Die zweite Gemischkühlerstufe, deren Wärme an die Umgebung abgeführt wird, ist entsprechend mit einer für den Motor erforderlichen Gemischtemperatur von 50 °C zu berechnen.

Das BHKW-Aggregat¹⁷ bestehend aus Motor und Generator, weist eine Feuerungsleistung von 1.300 kW auf. Mit der bekannten zugeführten chemischen Energiemenge kann auf die Vollbenutzungsstunden des BHKW geschlossen werden

$$t_{Vollast} = \frac{H_{Gas} - \Delta H_{Gas, Leck} - Q_{Fackel}}{\dot{Q}_{Br}} \quad (102)$$

Damit können die Jahreswärmemengen, die über den Ölkühler (60 kW),

$$Q_{Öl} = \dot{Q}_{Öl} \cdot t_{Vollast} \quad (103)$$

den Kühlwasserwärmeübertrager (189 kW)

$$Q_{KW} = \dot{Q}_{KW} \cdot t_{Vollast} \quad (104)$$

¹⁷ Definition siehe DIN 6280-14:1997-08 [158]

und den Abgaswärmeübertrager

$$Q_{AW} = \dot{Q}_{AW} \cdot t_{Vollast} \quad (105)$$

ausgekoppelt werden, abgeschätzt werden.

Die nicht genutzte Wärmemenge, die über das Abgas und die Oberfläche des BHKW an die Umgebung abgegeben wird, ergibt sich dann zu

$$Q_U = Q_{Br} - W_{el} - Q_{Öl} - Q_{KW} - W_{AT} - Q_{AW} \quad (106)$$

Die über die Notkühler abgeführte Wärmemenge lässt sich mit der bekannten, in das Wärmenetz eingespeisten Wärmemenge abschätzen

$$Q_{Notkühler} = Q_{GK} + Q_{Öl} + Q_{KW} + Q_{AW} - Q_{Netz} - Q_{FH} \quad (107)$$

Da keine Messdaten zum Eigenstrombedarf der Biogasanlage vorliegen, muss hier auf Literaturwerte zurückgegriffen werden. Wie in der folgenden Tabelle zu sehen, variieren die relativen Eigenstrombedarfe (Eigenstromverbrauch bezogen auf die erzeugte Strommenge) deutlich.

Tabelle 26: Eigenstrombedarf von Biogasanlagen - Literaturübersicht

Quelle	Literaturwert	Anmerkung
Gerd-Rainer Vollmer [159]	6,9 bis 8,0 %	Zweistufige Biogasanlage, $P_{el}=1.000 kW$
Torsten Hertzsch [160]	4,4 bis 5,6 %	Einstufige Biogasanlage mit Beregnung statt mechanischem Rührwerk $P_{el}=527 kW$
Gregor Dachs et al. [161]	3,5 bis 17,5 % ø Gas-Ottomotor: 8,4 % ø Zündstrahlmotor: 7,6 %	Messungen an 35 Biogasanlagen unterschiedlicher Leistung und Technologie
Jörg Pfeifer et al. [137]	5,6 %	Zweistufige Biogasanlage $P_{el}=500 kW$
Burga Gemmeke et al. [87]	5,0 bis 20,6 %	Messungen an 46 Anlagen unterschiedlicher Leistung und Technologie

Für die Biogasanlage in Heitlingen wird auf Grund der Ähnlichkeiten zu den Biogasanlagen in Reinsdorf [160] und in der Steiermark [137] ein Eigenstrombedarf von 5,6 % angesetzt. Auf Grund des Baujahrs der von Dachs et. al. [161] untersuchten Anlagen (1990er Jahre bis 2005) und der von ihnen aufgezeigten mutmaßlichen Abnahme des durchschnittlichen Eigenstromverbrauchs mit den Baujahren (jüngere Anlagen haben einen niedrigeren Eigenstromverbrauch als ältere Anlagen) erscheinen diese Werte nicht auf die zu betrachtende Biogasanlage anwendbar. Zudem weisen sie daraufhin, dass die von ihnen getroffene Stichprobe nicht repräsentativ sei.

Somit wird der Eigenstromverbrauch mit

$$W_{el,eigen} = N_{eigen} \cdot W_{el} \quad (108)$$

und die für dritte Verbraucher verfügbare Strommenge mit

$$W_{el,Netz} = (1 - N_{eigen}) \cdot W_{el} \quad (109)$$

abgeschätzt.

Formelzeichen:

c_p	isobare Wärmekapazität	[J/(kg•K)]
c_v	isochore Wärmekapazität	[J/(kg•K)]
h	Spezifische Enthalpie	[J/kg]
H	Absoluter Heizenergieinhalt	[kWh]
H_i	Spezifischer Heizwert	[J/kg]
m	Masse	[kg]
M	Molmasse	[g/mol]
n	Molanzahl	[mol]
N	Prozentualer Anteil	[N]
p	Druck	[bar]
Q	Wärmemenge	[kWh]
R	Gaskonstante	[J/(mol•K)]
$t_{Vollast}$	Volllaststundenzahl	[h]
T	Temperatur	[K]
TS	Trockensubstanzgehalt	[%]
V	Volumen	[m ³]
v_{CH_4}	Methanausbeute	[Nm ³ /t _{oTS}] ¹⁸
v_{mol}	Molvolumen	[m ³ /mol]
w	Spezifische Mechanische Arbeit	[kWh/kg]
W	Mechanische Arbeit	[kWh]
κ	Isentropenexponent	[-]
λ	Luftüberschusszahl	[-]
φ	Wassergehalt	[%]

Indizes:

Ar	Argon
AT	Abgasturbolader, Verdichterseite
aus	Ausgangsseite
AW	Nutzbare Wärme aus Abgaswärmeübertrager
Br	Feuerung

¹⁸ Hinweis: Die Einheit ist nicht ISO-gerecht. Auf Grund der verbreiteten Anwendung im Zusammenhang mit Biogasanlagen wird sie hier dennoch verwendet.

Anhang A

CH_4	Methan
CO_2	Kohlendioxid
<i>ein</i>	Eingangsseite
<i>el</i>	Elektrisch
<i>Fackel</i>	Gasfackel
<i>feucht</i>	Mit Wasserdampfanteil
<i>FH</i>	Fermenterheizung
<i>FM</i>	Frischmasse
<i>Gas</i>	Biogas
<i>Gär</i>	Gärreste
<i>Gem</i>	Gemisch
<i>ges</i>	Gesamt
<i>GK</i>	Gemischkühler
<i>GV</i>	Gasverdichter
H_2O	Wasser
<i>j</i>	Zählindex
<i>KW</i>	Kühlwasserwärmetauscher
<i>Leck</i>	Leckage
<i>Luft</i>	Luft
<i>mol</i>	Molar
N_2	Stickstoff
<i>Netz</i>	Wärmenetz
<i>Notkühler</i>	Notkühler
O_2	Sauerstoff
<i>Öl</i>	Ölkühler
<i>oTS</i>	Organische Trockensubstanz
<i>OV</i>	Oberflächenverluste
<i>Soll</i>	Sollwert
<i>Substrat</i>	Substrat
<i>TS</i>	Trockensubstanz
<i>trocken</i>	Ohne Wasserdampfanteil
<i>U</i>	Umgebung
<i>Zusatz</i>	Zugegeben/Zugesetzt

A.6.2. Optimierte Wärmeauskopplung aus einer Biogasanlage

Für präzise Berechnungen der Wärmetransportvorgänge in Plattenwärmeübertragern stehen umfangreiche numerische und iterative Verfahren zur Verfügung (siehe z.B. [144]). Im Rahmen dieser Arbeit soll nur eine einfache Abschätzung der Auswirkungen einer optimierten Wärmeauskopplung dargestellt werden. Hierzu wird auf ein älteres Näherungsverfahren aus dem VDI-Wärmeatlas von 1974 [162] zurückgegriffen.

Daten und Annahmen für die Berechnungen:

- Der Wärmeübertrager ist ein reiner Gegenstromwärmeübertrager
- Wärmedurchgangskoeffizient und Wärmeübertragerfläche sind konstant
- Kühlwassermassenstrom ist konstant (2,5 m³/h)
- Wärmekapazität des Kühlwassers ist konstant

Für das Produkt aus Wärmedurchgangskoeffizient $u_{GK,NT}$ und Wärmeübertragerfläche $A_{GK,NT}$ gilt

$$u_{GK,NT} \cdot A_{GK,NT} = 1,53 \frac{kW}{K} \quad (110)$$

Hiermit kann gemäß [162] in Näherung angesetzt werden

$$\dot{Q}_{GK,NT} = u_{GK,NT} \cdot A_{GK,NT} \cdot \Delta \vartheta_{GK,m} \quad (111)$$

mit

$$\Delta \vartheta_{GK,m} = \frac{\Delta \vartheta_{gr} - \Delta \vartheta_{kl}}{\ln \left(\frac{\Delta \vartheta_{gr}}{\Delta \vartheta_{kl}} \right)} \quad (112)$$

und

$$\Delta \vartheta_{gr} = \vartheta_{Gem, ein} - \vartheta_{GK, VL} \quad (113)$$

sowie

$$\Delta \vartheta_{kl} = \vartheta_{Gem, aus} - \vartheta_{GK, RL} \quad (114)$$

Formelzeichen:

A	Fläche	[m ²]
\dot{Q}	Wärmestrom/Wärmeleistung	[kW]
u	Wärmedurchgangskoeffizient	[kW/(m ² •K)]
ϑ	Temperatur	[°C]
$\Delta \vartheta$	Temperaturdifferenz	[K]

Indizes:

Gem, aus	Gemisch, Austritt Gemischkühler
Gem, ein	Gemisch, Eintritt Gemischkühler
GK, m	Gemischkühler, Mittelwert
GK, NT	Niedertemperaturgemischkühler
GK, RL	Gemischkühler, Kühlwassereintritt
GK, VL	Gemischkühler, Kühlwasseraustritt
gr	Gemischkühlerseite mit den höheren Temperaturen
kl	Gemischkühlerseite mit den niedrigeren Temperaturen

A.7. Wärmepumpe

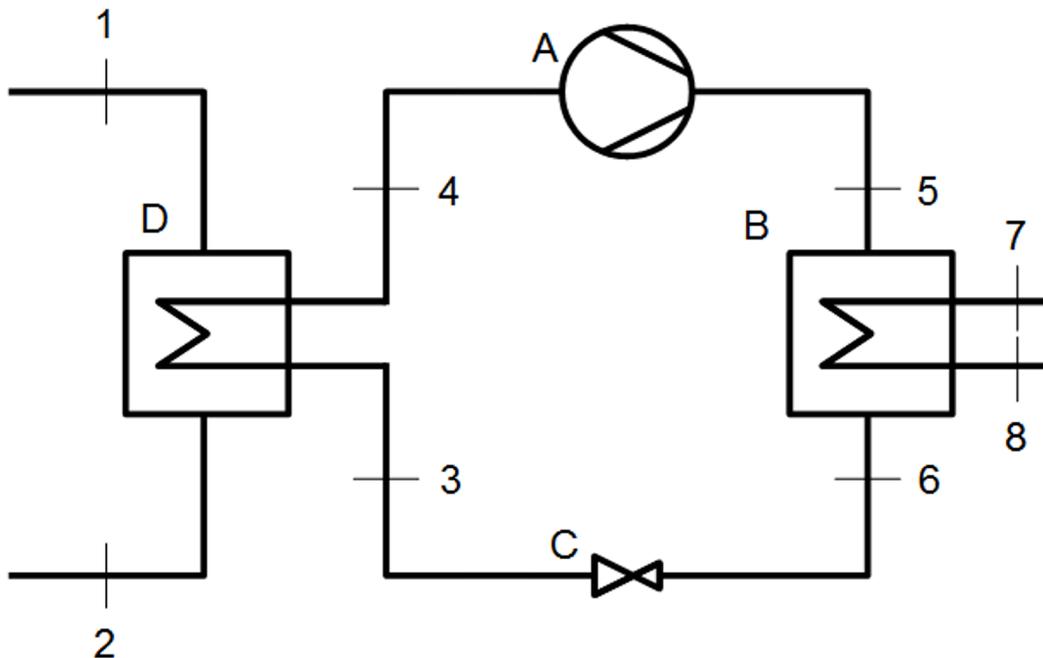


Abbildung 133: Aufbau einer einstufigen Kompressionswärmepumpe

Für die Leistungszahl einer unterkritisch betriebenen Wärmepumpe gilt gemäß [99]

$$\varepsilon = COP = \frac{\dot{Q}_{ab}}{P_{zu, Verd}} = \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_4} \approx \frac{T_7}{T_7 - T_1} \quad (115)$$

Entsprechend gilt nach [100] für die Leistungszahl der überkritisch betriebenen Wärmepumpe

$$COP_{LZ} = \frac{\dot{Q}_{ab}}{P_{zu, Verd}} = \frac{T_5 - T_6}{T_5 - T_6 - T_4 \cdot \ln\left(\frac{T_5}{T_6}\right)} \quad (116)$$

Wird eine Wärmepumpe mit Nachheizregister betrieben so fließt in die Leistungszahl des gesamten Wärmeerzeugungssystems die elektrische Leistung des Heizregisters $P_{el, HZ}$ ein

$$COP_{WP+HZ} = \frac{\dot{Q}_{ab}}{P_{zu, Verd} + P_{el, HZ}} \quad (117)$$

Formelzeichen:

ϵ	Leistungszahl	[-]
COP	Coefficient of Performance / Leistungszahl	[-]
\dot{Q}	Wärmeleistung	[kW]
P	Elektrische Leistung	[kW]
h	Enthalpie	[J/kg]
T	Temperatur	[K]

Indizes:

ab	Nutzwärmeseite
$zu, Verd$	Zugeführt über Verdichter
$Verd$	Verdichter
LZ	Lorenz-Prozess
$WP + HZ$	Wärmepumpe und Verdichter
el, HZ	Elektrischer Anschluss Heizregister
4	Verdichtereingang
5	Verdichterausgang
6	Kodensatorausgang
7	Nutzwärmeverlauf

A.8. Photovoltaik

Photovoltaikanlagen wandeln solare Strahlungsenergie direkt in elektrische Energie um. Den in Kapitel 7 gezeigten Grafiken liegen für Photovoltaikanlagen folgende Daten zu Grunde:

Standort:	Garbsen OT Heitlingen, 52,468° Nord, 9,618° Ost
Gewählte Anlagen:	Polykristalline Zellen, Richtung Süd
Aufstellhöhe:	0 m über Grund
Neigung der Kollektorfläche:	50°
Nennleistung:	1.025 kW _p
Modulfläche:	7.046 m ²
Wetterdaten:	TRY kalter Winter des DWD [131]

Anlagenkonstanten nach Bofinger et. al. [163]

$k = 20^\circ C$ für Freifläche und aufgeständert auf Flachdach

$k = 30^\circ C$ für Aufdach, aufgeständert auf Schrägdach

$k = 45^\circ C$ für Dach- und fassadenintegriert

Elektrischer Verlustparameter der Module $R = 0,027 \left(\frac{kW_p}{kW} \right)^2$

Mittlerer Albedo: $\rho = 0,3$

Normwirkungsgrad Wechselrichter: $\eta_{WR, max} = 95,3$

Wechselrichterverlustparameter $p_{selbst} = 0,0024 \frac{kW}{kW_p}$

$p_V = 0,000056$

$p_R = 0,0000019 \frac{kW_p}{kW}$

Normwirkungsgrad der Module $\eta_{STC} = 16\%$

Die Berechnung der aktuellen Leistung erfolgt nach Bofinger et. al. [163].

Zunächst ist die genaue Position der Sonne zu dem Solarmodul zu bestimmen. Begonnen wird hierzu mit der Berechnung des Tageswinkels.

$$\Gamma = 2\pi \cdot (d - 1) / 365 \quad (118)$$

Anhang A

Dieser ist definiert mit

Tag 1 (01.01.)	0:00 Uhr	→	0°	(im Bogenmaß 0)
Tag 366 (01.01.)	0:00 Uhr		360°	(im Bogenmaß 2π)

Mit dem Tageswinkel kann die Deklination der Sonne – der Breitengrad, über dem sich die Sonne befindet – ermittelt werden.

$$\begin{aligned}\delta = & 0,006918 - 0,399912 \cdot \cos(\Gamma) + 0,070257 \cdot \sin(\Gamma) \\ & - 0,006758 \cdot \cos(2 \cdot \Gamma) + 0,000907 \cdot \sin(2 \cdot \Gamma) \\ & - 0,002697 \cdot \cos(3 \cdot \Gamma) + 0,00148 \cdot \sin(3 \Gamma)\end{aligned}\quad (119)$$

Da Bofinger auf eine Darlegung der Berechnung des Ortsstundenwinkels verzichtet, wird auf das Verfahren von Holbert¹⁹ [164] zurückgegriffen. Holbert nimmt an, dass Tagesfaktor und Zeitgleichung unabhängig vom betrachteten Jahr sind. Der Tagesfaktor

$$D = 360 \circ \cdot \frac{(N - 81)}{365}\quad (120)$$

wird in die Zeitgleichung

$$Z = 9,87 \cdot \sin(2 \cdot D) - 7,53 \cdot \cos(D) - 1,5 \cdot \sin(D)\quad (121)$$

eingesetzt. Diese beschreibt die zeitliche Verschiebung der Sonnenbahn im Jahresverlauf. Dies entspricht der Differenz zwischen der Sonnenzeit und der mittleren Sonnenzeit.

Die von Holbert angegebene Gleichung für die wahre Ortszeit ist nur für westliche Längen gültig. Aus der Betrachtung der Definition der Zeitgleichung und der Geometrie kann eine Gleichung für die wahre Ortszeit (Zeit, die auch von Sonnenuhren am betrachteten Standort angegeben wird)

$$t_{woz} = t - \Delta t_{UTC} + \frac{\lambda}{360 \circ} \cdot 12 + Z\quad (122)$$

auf jedem Längengrad λ erstellt werden. Westliche Längen werden dabei mit positiven

¹⁹ Es existieren alternative Verfahren mit höherer Genauigkeit. Da im Rahmen dieser Arbeit nur der prinzipielle zeitliche Verlauf der Verfügbarkeit solarer Energie dargestellt werden soll, wird zur Begrenzung des Rechenaufwands auf das vergleichsweise einfache Verfahren von Holbert zur Berechnung des Sonnenwinkels zurückgegriffen.

Vorzeichen und östliche Längen mit negativem Vorzeichen versehen.

Mit der wahren Ortszeit kann schließlich der Ortsstundenwinkel berechnet werden

$$\omega = \frac{t_{WOZ} - 12}{\frac{4h}{60^\circ}} \quad (123)$$

Bofinger et. al. [163] folgend kann dann der Zenitwinkel, definiert als Winkel zwischen Sonneneinstrahlungswinkel und der Lotrechten, bestimmt werden

$$\Theta_Z = \arccos[\sin(\delta) \cdot \sin(\phi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\omega)] \quad (124)$$

Bei Kollektoren, die direkt auf der Erdoberfläche in Meereshöhe aufgestellt werden, sind für die Ertragsberechnung aus direkter Strahlung als Annahme nur Zenitwinkel zwischen -90° und $+90^\circ$ zu berücksichtigen. Alle anderen Zenitwinkel bewirken eine zumindest teilweise Verschattung der Kollektoren durch die Erde. Zusätzliche Verschattungen durch natürliche Erhebungen, Pflanzen und Bauwerke werden in der Praxis auch bei höheren Sonnenständen für eine vollständige Verschattung sorgen.

Der Normalenvektor der Kollektorfläche wird aus den Winkelfunktionen für den Azimut der Kollektorfläche γ (Winkel zwischen der Ausrichtung des Kollektors und Süd) sowie dem Neigungswinkel des Kollektors β bestimmt.

$$\vec{e}_{NE} = \begin{bmatrix} e_{NE,x} \\ e_{NE,y} \\ e_{NE,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) \\ \sin(\beta) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) \\ \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (125)$$

Zusätzlich wird der Tangentialvektor der Sonneneinstrahlung zur Horizontalen ermittelt.

$$\vec{e}_{TS} = \begin{bmatrix} e_{TS,x} \\ e_{TS,y} \\ e_{TS,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\Theta_Z) \cdot \cos(\omega) \\ \sin(\Theta_Z) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \omega\right) \\ \cos(\Theta_Z) \end{bmatrix} \quad (126)$$

Aus diesen beiden Vektoren ergibt sich der Einfallswinkel der direkten Strahlung auf die Kollektorfläche

$$\Theta = \arccos \left(\frac{\vec{e}_{NE} \cdot \vec{e}_{TS}}{|\vec{e}_{NE}| \cdot |\vec{e}_{TS}|} \right) \quad (127)$$

Falls die Globalstrahlung, wie von Bofinger et. al. vorausgesetzt, auf die horizontale Ebene nicht gegeben ist, kann diese als Summe aus diffuser und direkter Strahlung

$$G_h = G_{bh} + G_{dh} \quad (128)$$

berechnet werden.

Üblicherweise sind Solarkollektoren geneigt angeordnet. Die Strahlungsdaten für die horizontale Ebene müssen entsprechend auf die geneigte Kollektorebene umgerechnet werden. Für die direkte Strahlung erfolgt dies mit

$$G_{bt} = G_{bh} \frac{\cos(\Theta)}{\cos(\Theta_Z)} \quad (129)$$

und für die diffuse Strahlung mit

$$G_{dt} = \frac{1}{2} G_{dh} (1 + \cos \beta) + \frac{1}{2} \rho G_h (1 - \cos \beta) \quad (130)$$

Die gesamte zur Verfügung stehende solare Leistung wird dann aus diffuser und direkter Strahlung in Kollektorebene aufsummiert.

$$G_t = G_{bt} + G_{dt} \quad (131)$$

Entscheidend für den Modulwirkungsgrad ist die Modultemperatur.

$$\vartheta_{mod}(t) = \vartheta_u(t) + \frac{k}{1000 \frac{W}{m^2}} \cdot G_t(t) \quad (132)$$

Der Modulwirkungsgrad

$$\eta_{MPP}(G_t(t), \vartheta_{mod}(t)) = \left[a_1 + a_2 \cdot G_t(t, \vartheta = 25^\circ C) + a_3 \cdot \ln(G_t(t, \vartheta = 25^\circ C)) \right] \cdot \left[1 + \alpha (\vartheta_{mod}(t) - 25^\circ C) \right] \quad (133)$$

kann dann mit den Parametern für mono- und polykristalline PV-Module:

$$\begin{aligned} a_1 &= 0,06 & a_2 &= -0,00002 \frac{m^2}{W} \\ a_3 &= 0,016 & \alpha &= -0,4 \frac{\%}{^\circ C} \end{aligned}$$

angenähert werden.

Die aktuelle Leistung der einzelnen Module lässt sich dann aus der eingestrahltten Sonnenenergie in Kollektorebene $G_t(t)$ und den Wirkungsgraden η_{MPP} und η_{STC} bestimmen.

$$P_{DC, Mod}(t) = \frac{\eta_{MPP}(G_t(t), T_{mod}(t))}{\eta_{STC}} \cdot \frac{G_t(t)}{1000 \frac{W}{m^2}} \quad (134)$$

Zwischen den Modulen und dem Wechselrichtereingang treten Energieverluste auf. So, dass sich die Leistung am Wechselrichtereingang auf

$$P_{DC}(t) = P_{DC, Mod}(t) - R \cdot (P_{DC, Mod}(t))^2 \quad (135)$$

reduziert.

Die Verlustleistung des Wechselrichters hängt von systemspezifischen Parametern und der aktuellen Leistung ab

$$P_{verl}(t) = p_{selbst} + p_V \cdot P_{AC}(t) + p_R \cdot (P_{AC}(t))^2 \quad (136)$$

So ergibt sich für die elektrische Einspeiseleistung der Photovoltaikanlage bei einer Auslegung des Wechselrichters auf 90% der Modulnennleistung, entsprechend einem Dimensionierungsfaktor von $P_{Dim} = 0,9$

$$P_{AC}(t) = \frac{-(1 + p_V \cdot P_{Dim}) + \sqrt{(1 + p_V \cdot P_{Dim})^2 - 4 \cdot p_R \cdot P_{Dim} \cdot (p_{selbst} \cdot P_{Dim} - P_{DC}(t))}}{2 \cdot p_R \cdot P_{Dim}} \quad (137)$$

Die Grenzfälle sind

falls $P_{AC}(t) < 0$ dann $P_{AC}(t) = 0$

und

falls $P_{AC}(t) > P_{Dim}$ dann $P_{AC}(t) = P_{Dim}$

Formelzeichen:

a	Modulparameter	[-]
d	Tag	[-]
D	Tagesfaktor	[°]
\vec{e}	Einheitsvektor	[-]
G	Strahlung	[W/m ²]
k	Anlagenkonstante	[°C]
p	Wechselrichterverlustparameter	[-]
$P_{AC}(t)$	Relative Einspeiseleistung	[kW/kW _p]
$P_{DC}(t)$	Relative Leistung Wechselrichtereingang	[kW/kW _p]
$P_{DC,Mod}(t)$	Relative Elektrische Modulleistung	[kW/kW _p]
P_{Dim}	Dimensionierungsfaktor	[-]
R	Elektrischer Verlustparameter	[(kW _p /kW) ²]
t	Zeit	[h]
Z	Zeitgleichung	[-]
β	Neigungswinkel der Kollektorfläche zur Horizontalen	[°]
γ	Azimut der Kollektorfläche	[°]
Γ	Tageswinkel	[°]
δ	Deklination	[°]
η	Wirkungsgrad	[-]
ϑ	Temperatur	[°C]
Θ	Einfallswinkel der direkten Strahlung auf Kollektorebene	[°]
Θ_z	Zenitwinkel	[°]

λ	Längengrad	[°]
ρ	Albedo	[-]
ϕ	Breitengrad	[°]
ω	Ortsstundenwinkel	[°]

Indizes:

<i>AC</i>	Wechselstrom
<i>bh</i>	direkt, auf horizontale Fläche
<i>bt</i>	direkt, in Kollektorebene
<i>DC</i>	Gleichstrom
<i>dh</i>	diffus, auf horizontale Fläche
<i>dt</i>	diffus, in Kollektorebene
<i>h</i>	global auf horizontaler Fläche
<i>mod</i>	Modul
<i>MPP</i>	Modul
<i>NE</i>	Normal
<i>u</i>	Umgebung
<i>UTC</i>	Coordinated Universal Time (Koordinierte Weltzeit)
<i>t</i>	in Kollektorebene
<i>TS</i>	Tangential
<i>STC</i>	Normwert
<i>verl</i>	Verluste
<i>WOZ</i>	Wahre Ortszeit
<i>x, y, z</i>	Ortsrichtungen

A.9. Windkraftanlagen

Windkraftanlagen wandeln kinetische Energie der Luft in elektrische Energie um. Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Annahmen und Berechnungsverfahren genutzt:

Annahmen:

Anlagentyp	Enercon EN82
Nennleistung	2.000 kW
Nabenhöhe	108 m
Standort	Region Hannover, Ackerland, 50 m über NN

In den Datensätzen für die Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes²⁰ sind die Windgeschwindigkeiten w_r in einer Referenzhöhe von $z_r=10\text{ m}$ enthalten [131]. Die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe weicht hiervon ab. Mit der Höhe z über Grund ändern sich die Windgeschwindigkeiten. Gasch und Twele geben in [165] für das Windprofil über Ackerflächen folgende Gleichung für ein Windprofil

$$w = w_r \cdot \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (138)$$

mit einer Rauigkeitslänge über Ackerland von $z_0=0,03\text{ m}$ an.

Für die näherungsweise Bestimmung der Leistungskurve einer Windkraftanlage in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit werden aus Herstellerdaten vier Gleichungen für den Arbeitsbereich bestimmt:

Für den Bereich unterhalb der Anlaufgeschwindigkeit

$$P_{el}(w)=0 \quad (139)$$

²⁰ Hinweis: Auf Grund der Verfügbarkeit wird das Testreferenzjahr des Deutschen Wetterdienstes für den Raum Hannover zur prinzipiellen Darstellung der Zusammenhänge in dieser Arbeit verwendet. Die Daten des Testreferenzjahres des deutschen Wetterdienstes sind jedoch nicht für die Auslegung von Windkraftanlagen entwickelt worden. Vor einer Anwendung in der Praxis muss die Anwendbarkeit erst verifiziert werden.

den Bereich zwischen Anlaufgeschwindigkeit und Abregelgeschwindigkeit

$$P_{el}(w) = \frac{A}{1 + \left(\frac{B}{w + w_{Max}} \right)^C} \quad (140)$$

und den Bereich zwischen Abregelgeschwindigkeit und Abschaltgeschwindigkeit:

$$P_{el}(w) = konst. \quad (141)$$

sowie den Bereich oberhalb der Abschaltgeschwindigkeit

$$P_{el}(w) = 0 \quad (142)$$

In dem Datenblatt der Enercon E82 [133] sind folgende Grenzwerte angegeben

Anlaufgeschwindigkeit	$w_{Min} = 2 \frac{m}{s}$
Abregelgeschwindigkeit	$w_{Ab} = 13 \frac{m}{s}$
Abschaltgeschwindigkeit	$w_{Max} = 25 \frac{m}{s}$

Mit den ebenfalls angegebenen Leistungen über die Windgeschwindigkeiten werden nach dem nichtlinearen Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate mit dem Programm „nls2“ in „R“ (siehe auch Anhang A, Abschnitt A.4.1.) die Parameter für den Funktionsbereich zwischen Anlaufgeschwindigkeit und Abregelgeschwindigkeit bestimmt:

$$A = 2.222,01 \text{ kW}$$

$$B = 33,65 \frac{m}{s}$$

$$C = 22,97$$

Dabei wurden nur Daten unterhalb der Abregelgeschwindigkeit in die nichtlineare Regression einbezogen.²¹

²¹ Hinweis: Die Gleichung (140) wurde durch probieren ermittelt. Daher kann die Anwendbarkeit auf andere Windkraftanlagentypen nicht sichergestellt werden!

Formelzeichen:

A	Leistungsparameter	[kW]
B	Leistungsparameter	[m/s]
C	Leistungsparameter	[-]
P_{el}	Elektrische Leistung	[kW]
w	Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe	[m/s]
w_{Ab}	Abregelgeschwindigkeit	[m/s]
w_r	Windgeschwindigkeit in Referenzhöhe	[m]
z	Höhe über Grund	[m]
z_0	Rauhigkeitslänge	[m]
z_r	Referenzhöhe	[m]

A.10. Wärmeverlustberechnungen für Rohrleitungen

Alle folgenden Berechnungsverfahren sind aus der Literatur entnommen. Die in A.10.4., A.10.5. und A.10.7. gezeigten Berechnungsverfahren stammen aus Prospektmaterial beziehungsweise Planungshandbüchern von Fernwärmeleitungsherstellern. Da die Autoren nicht bekannt sind, werden diese Verfahren in dieser Arbeit nach den veröffentlichenden Unternehmen benannt.

A.10.1. Anheyer, Kruse, Rühling, Wünsche (FFI, TU Dresden)

Zunächst sind nach Anheyer et. al. [166] die Temperatur des ungestörten Erdreichs in der Verlegetiefe der Fernwärmeleitung

$$t_u = (t_k - t_a) \cdot \frac{h}{h_k} + t_a \quad (143)$$

mit der Konstanterdreichtemperatur $t_k = 11^\circ\text{C}$ sowie die Wärmeleitwiderstände der einzelnen Komponenten zu berechnen. Dies sind für das Mediumrohr

$$R_{med} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{med}} \cdot \ln \left(\frac{d_a}{d_i} \right) \quad (144)$$

und die Wärmedämmung

$$R_{iso} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{iso}} \cdot \ln \left(\frac{D_i}{d_a} \right) \quad (145)$$

sowie für das Mantelrohr

$$R_{man} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{man}} \cdot \ln \left(\frac{D_a}{D_i} \right) \quad (146)$$

und das Erdreich

$$R_{erd} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{erd}} \cdot \ln \left[\frac{4 \cdot (h + 0,0685 \cdot \lambda_{erd})}{D_a} \right] \quad (147)$$

Ergänzend ist der rechnerische Verlegeabstand

$$C = D_a + D \quad (148)$$

für die Berechnung des Wärmeleitwiderstandes zwischen Vor- und Rücklaufleitung

$$R_{duo} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{erd}} \cdot \ln \left[1 + \frac{4 \cdot (h + 0,0685 \cdot \lambda_{erd})^2}{C^2} \right] \quad (149)$$

zu ermitteln. Die einzelnen Wärmeleitwiderstände werden zu dem Gesamtwiderstand

$$R_{KMR} = R_{med} + R_{iso} + R_{man} + R_{erd} + R_{duo} \quad (150)$$

aufsummiert. Mit dem Kehrwert des Gesamtwiderstandes

$$k = \frac{1}{R_{KMR}} \quad (151)$$

kann schließlich die Wärmeverluststromdichte

$$\dot{q} = k \cdot [(t_{VL} + t_{RL}) - 2 \cdot t_u] \quad (152)$$

berechnet werden.

Formelzeichen:

- C Rechnerischer Verlegeabstand zwischen den Rohrachsen [m]
- d_a Außendurchmesser Mediumrohr [m]

d_i	Innendurchmesser Mediumrohr	[m]
D	Abstand zwischen den Mänteln von Vor- und Rücklauf	[m]
D_i	Mantelrohrinnendurchmesser	[m]
D_a	Mantelrohraußendurchmesser	[m]
h	Verlegetiefe bis zur Rohrachse	[m]
h_K	Tiefe konstanter Erdreichtemperatur	[m]
k	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/(m*K)]
\dot{q}	Wärmeverlustrsdichte der Trasse	[W/m]
R	Wärmeleitwiderstand	[(m*K)/W]
t	Temperatur	[°C]
t_E	Erdreichtemperatur	[°C]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/(m*K)]

Indizes:

<i>erd</i>	Erdreich
<i>iso</i>	Wärmedämmung
<i>k</i>	Konstanterdreich
<i>KMR</i>	Kunststoffmantelrohr
<i>man</i>	Mantel
<i>med</i>	Mediumrohr
<i>RL</i>	Rücklauf
<i>VL</i>	Vorlauf

A.10.2. Bøhm

Bøhm hat verschiedene analytische und numerische Verfahren zur Ermittlung der Wärmeverluste von Fernwärmeleitungen aus bestehenden Verfahren weiterentwickelt. Hier wird nur das analytische Verfahren aus [128] vorgestellt.

Auf der Basis des Isolationsparameters

$$\beta = \frac{\lambda_g}{\lambda_i} \ln \left(\frac{D_i}{D_p} \right) \quad (153)$$

und der rechnerischen Verlegetiefe

$$H = H' + \frac{\lambda_g}{h_{gs}} \quad (154)$$

werden der Wärmeleitwiderstand des Erdreichs

$$R_g = \frac{1}{2\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4H}{D_c}\right) - \frac{\left(\frac{D_c}{2E}\right)^2 + \left(\frac{D_c}{4H}\right)^2 + \frac{D_c^2}{4(4H^2 + E^2)}}{\frac{(1+\beta)}{(1-\beta)} - \left(\frac{D_c}{2E}\right)^2} \right] \quad (155)$$

der Wärmeleitwiderstand der Wärmedämmung

$$R_i = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{D_i}{D_p} + \frac{1}{2\pi\lambda_c} \ln \frac{D_c}{D_i} + R_{hi} \quad (156)$$

mit $R_{hi}=0$ für Verbundmantelrohre sowie der Wärmeleitwiderstand zwischen Vor- und Rücklauf

$$R_m = \frac{1}{4\pi\lambda_g} \ln \left[1 + \left(\frac{2H}{E} \right)^2 \right] \quad (157)$$

berechnet. Die Wärmeleitwiderstände werden in die Gleichungen für die Wärmeleitkoeffizienten

$$U_1 = \frac{R_g + R_i}{(R_g + R_i)^2 - R_m^2} \quad (158)$$

und

$$U_2 = \frac{R_m}{(R_g + R_i)^2 - R_m^2} \quad (159)$$

eingesetzt. Mit den Wärmeleitkoeffizienten können die Wärmeverluststromdichten für die Einzelleitungen

$$\dot{q}_s = (U_1 - U_2) \left[\frac{T_s + T_r}{2} - T_g \right] + (U_1 + U_2) \left[\frac{T_s - T_r}{2} \right] \quad (160)$$

$$\dot{q}_r = (U_1 - U_2) \left[\frac{T_s + T_r}{2} - T_g \right] - (U_1 + U_2) \left[\frac{T_s - T_r}{2} \right] \quad (161)$$

und das System aus Vor- und Rücklauf

$$\dot{q}_{tot} = \dot{q}_s + \dot{q}_r = 2(U_1 + U_2) \left[\frac{T_s + T_r}{2} - T_g \right] \quad (162)$$

ermittelt werden.

Formelzeichen:

D_c	Mantelrohräußendurchmesser	[m]
D_i	Mantelrohrinnendurchmesser	[m]
D_p	Mediumrohräußendurchmesser	[m]
E	Abstand zwischen den Mänteln von Vor- und Rücklauf	[m]
h_{gs}	Wärmeübergangskoeffizient an der Erdoberfläche	[W/(m ² *K)]
H	Rechnerischer Verlegetiefe der Rohrachsen	[m]
H'	Verlegetiefe bis zur Rohrachse	[m]
\dot{q}	Wärmeverluststromdichte	[W/m]
R_g	Wärmeleitwiderstand des Erdreichs	[(m*K)/W]
R_i	Wärmeleitwiderstand des Rohres	[(m*K)/W]
R_m	Wärmeleitwiderstand bei Nebeneinanderverlegung von Vor- und Rücklaufleitungen	[(m*K)/W]
T	Temperatur	[°C]
T_g	Temperatur des ungestörten Erdreichs	[°C]

Anhang A

U_1, U_2	Wärmeleitkoeffizienten	$[(m \cdot K)/W]$
β	Isolationsparameter	$[-]$
λ	Wärmeleitfähigkeit	$[W/(m \cdot K)]$

Indizes:

c	Mantelrohr
g	Erdreich
i	Wärmedämmung
r	Rücklauf
s	Vorlauf
tot	Gesamt

A.10.3. EN 13941:2010-12

In der EN 13941:2010-12, Anhang D [167], wurde das Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Wärmeverluste gegenüber der EN 13941:2003 [168] geändert.

Begonnen wird nach EN 13941:2010-12 [167] mit der Bestimmung der korrigierten Tiefe bis zur Rohrachse

$$Z_c = Z + R_o \lambda_s \quad (163)$$

mit dem Oberflächenübergangswärmeleitwiderstand $R_o = 0,0685 \frac{m^2 \cdot K}{W}$. Das Ergebnis fließt in die Berechnung des Wärmeleitwiderstandes des Erdreichs

$$R_s = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_s} \cdot \ln 4 \frac{Z_c}{D_c} \quad (164)$$

und des Wärmeleitwiderstandes zwischen den gleichartigen Rohrleitungen bei Nebeneinanderverlegung (vertikale Symmetrieachse)

$$R_h = \frac{1}{4\pi \cdot \lambda_s} \ln \left[1 + \left(2 \frac{Z_c}{C} \right)^2 \right] \quad (165)$$

ein. Parallel wird der Wärmeleitwiderstand der Wärmedämmung

$$R_i = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_i} \ln \frac{D_{PUR}}{d_o} \quad (166)$$

berechnet. Die Zusammenführung der Wärmeleitwiderstände führt zu den Wärmeleitkoeffizienten 1

$$U_1 = \frac{R_s + R_i}{(R_s + R_i)^2 - R_h^2} \quad (167)$$

und 2

$$U_2 = \frac{R_h}{(R_s + R_i)^2 - R_h^2} \quad (168)$$

Mit diesen können die Wärmeverluststromdichten des Vorlaufs

$$\phi_f = U_1 \cdot (T_f - T_s) - U_2 \cdot (T_f - T_s) \quad (169)$$

und des Rücklaufs

$$\phi_r = U_1 \cdot (T_r - T_s) - U_2 \cdot (T_r - T_s) \quad (170)$$

sowie des Systems aus Vor- und Rücklauf

$$\phi_f + \phi_r = 2 \cdot (U_1 - U_2) \left(\frac{t_f + t_r}{2} - t_s \right) \quad (171)$$

ermittelt werden.

Formelzeichen:

C	Abstand zwischen den Rohrachsen	[m]
D_C	Mantelrohräußendurchmesser	[mm]
d_o	Mediumrohräußendurchmesser	[mm]
D_{PUR}	Mantelrohrinnendurchmesser	[mm]
R	Wärmeleitwiderstand	[(m*K)/W]
t	Temperatur	[°C]
t_s	Temperatur des ungestörten Bodens in Tiefe Z	[°C]
U	Wärmeverlustkoeffizienten	[W/(m*K)]
Z	Verlegetiefe bis zur Rohrachse	[m]
Z_c	Korrigierte Verlegetiefe	[mm]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/(m*K)]
ϕ	Wärmeverluststromdichte	[W/(m*K)]

Indizes:

1,2	Zählindizes
f	Vorlauf
h	Zwischen Vor- und Rücklauf
i	Wärmedämmung
o	Oberfläche
r	Rücklauf
s	Boden

A.10.4. Isopius

Isopius hat in seinem Planungshandbuch [169] ein Verfahren zur Berechnung von Wärmeverlusten veröffentlicht. Mit dem Wärmeleitwiderstand der Einzelrohrleitungen

$$\frac{1}{\Lambda_R} = \frac{1}{\Lambda_{St}} \cdot \ln\left(\frac{d_a}{d_i}\right) + \frac{1}{\lambda_{PUR}} \cdot \ln\left(\frac{D_i}{d_a}\right) + \frac{1}{\lambda_{PE}} \cdot \ln\left(\frac{D_a}{D_i}\right) \quad (172)$$

wird der Wärmeleitwiderstand der Rohrleitungen

$$R_{\Lambda} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\Lambda_R} \quad (173)$$

berechnet. Dazu kommt die Berechnung des Wärmeleitwiderstandes des Erdreichs

$$\frac{1}{\Lambda_E} = \frac{1}{\lambda_E} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot h_m}{D_a}\right) \quad (174)$$

sowie des Einflusses zwischen Vor- und Rücklauf

$$\frac{1}{\Lambda_{RR}} = \frac{1}{2 \cdot \lambda_E} \cdot \ln\left[1 + \frac{(2 \cdot h_m)^2}{a^2}\right] \quad (175)$$

Die Wärmeleitwiderstände werden aufsummiert

$$\frac{1}{\Lambda_{\Sigma}} = \frac{1}{\Lambda_R} + \frac{1}{\Lambda_E} + \frac{1}{\Lambda_{RR}} \quad (176)$$

und das Ergebnis in die Gleichung zur Berechnung des Gesamtwärmeleitwiderstandes

$$R_{\Sigma_{ER}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\Lambda_{\Sigma}} \quad (177)$$

eingesetzt. Für die Berechnung der wirksamen Mitteltemperatur

$$T_M = \frac{T_{VL} + T_{RL}}{2} - T_E \quad (178)$$

setzt die Firma Isoplus eine konstante Erdreichtemperatur von 10 °C an. Damit kann schließlich die Wärmeverluststromdichte des Systems aus Vor- und Rücklauf

$$\dot{q} = \frac{T_M}{R_{\Sigma_{ER}}} \quad (179)$$

abgeschätzt werden.

Formelzeichen:

a	Abstand zwischen Vor- und Rücklaufleitung	[mm]
d	Mediumrohrdurchmesser	[mm]
D	Mantelrohrdurchmesser	[mm]
h_m	Abstand von der Rohrachse zur Geländeoberkante	[mm]
\dot{q}	Wärmeverluste pro Rohrmeter	[W/m]
R_Λ	Wärmeleitwiderstand	[(m*K)/W]
$R_{\Sigma ER}$	Gesamtwärmeleitwiderstand	[(m*K)/W]
T	Temperatur	[°C]
T_M	Wirksame Mitteltemperatur	[°C]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/(m*K)]
$\frac{1}{\Lambda_E}$	Wärmedurchlasswiderstand des Erdreichs	[(m*K)/W]
$\frac{1}{\Lambda_R}$	Wärmedurchlasswiderstand Rohr	[(m*K)/W]
$\frac{1}{\Lambda_{RR}}$	Einfluss zwischen Vor- und Rücklauf	[(m*K)/W]
$\frac{1}{\Lambda_\Sigma}$	Summe der Wärmedurchlasswiderstände	[(m*K)/W]

Indizes:

a	Außen
E	Erdreich
i	Innen
PUR	Wärmedämmung
PE	Mantelrohr
RL	Rücklauf
St	Mediumrohr
VL	Vorlauf

A.10.5. Løgstør Rør

In dem Katalog von Løgstør Rør aus dem Mai 1993 ist ein Verfahren zur Berechnung der Wärmeverluste von Fernwärmeleitungen enthalten. [170]

In einem ersten Schritt werden die Wärmeleitwiderstände der Wärmedämmung

$$R_i = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \cdot \ln\left(\frac{D_i}{d}\right) \quad (180)$$

des Mediumrohres

$$R_M = \frac{1}{2\pi\lambda_M} \cdot \ln\left(\frac{d}{d_i}\right) \quad (181)$$

des Mantelrohres

$$R_K = \frac{1}{2\pi\lambda_K} \cdot \ln\left(\frac{D}{D_i}\right) \quad (182)$$

des Erdreichs zwischen Mediumrohren und Erdoberfläche

$$R_i = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \cdot \ln\left[\frac{4 \cdot (Z + 0,0685 \cdot \lambda_E)}{D}\right] \quad (183)$$

sowie des Erdreichs zwischen Vor- und Rücklaufleitung

$$R_i = \frac{1}{4\pi\lambda_E} \cdot \ln\left[1 + \frac{4 \cdot (Z + 0,0685 \cdot \lambda_E)^2}{C^2}\right] \quad (184)$$

berechnet. Daraus folgt die Ermittlung des Wärmeleitkoeffizienten

$$U = \frac{1}{R_i + R_M + R_K + R_E + R_H} \quad (185)$$

der in die Gleichung für die Wärmeverluststromdichte

$$\phi = U \cdot (t_V + t_r - 2 \cdot t_E) \quad (186)$$

eingesetzt wird.

Formelzeichen:

C	Rohrachsabstand	[m]
d	Außendurchmesser Mediumrohr	[m]
D	Mantelrohräußendurchmesser	[m]
d_a	Mediumrohräußendurchmesser	[m]
d_i	Innendurchmesser Mediumrohr	[m]
D_i	Mantelrohrinnendurchmesser	[m]
R_{erd}	Wärmeleitwiderstand des Erdreichs	[(m*K)/W]
R_H	Wärmeleitwiderstand zwischen Vor- und Rücklaufleitung	[(m*K)/W]
R_i	Wärmeleitwiderstand der Isolierung	[(m*K)/W]
R_K	Wärmeleitwiderstand des Mantelrohres	[(m*K)/W]
R_M	Wärmeleitwiderstand des Mediumrohres	[(m*K)/W]
t_E	Erdreichtemperatur	[°C]
t_r	Rücklauftemperatur	[°C]
t_V	Vorlauftemperatur	[°C]
U	Wärmeübertragungskoeffizient	[W/(m*K)]
Z	Verlegetiefe bis zur Rohrachse	[m]
λ_E	Erdreichwärmeleitfähigkeit	[W/(m*K)]
λ_i	Dämmstoffwärmeleitfähigkeit	[W/(m*K)]
λ_K	Wärmeleitfähigkeit des Mediumrohres	[W/(m*K)]
λ_M	Wärmeleitfähigkeit des Mantelrohres	[W/(m*K)]
ϕ	Wärmeverluststromdichte	[W/m]

A.10.6. Oberberger

Oberberger hat basierend auf bestehenden Verfahren ein einfaches Verfahren zur Abschätzung der Wärmeverluste in [171] vorgestellt. Grundlage bildet der Formkoeffizient,

$$S = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \cdot a \tan \frac{a \cdot \lambda_E}{h \cdot \lambda_{WD}} \right) \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\frac{\lambda_E}{\lambda_{WD}} \cdot \ln \frac{d_a}{d_i} + a \cosh \frac{2 \cdot h}{d_a}} \quad (187)$$

in dem die geometrischen Randbedingungen zusammengefasst werden. Dieser wird in die Gleichung für die Berechnung der Wärmeverluststromdichte

$$\dot{Q}_{Verlust}(t_a) = S \cdot \lambda_E \cdot \left[(t_{VL}(t_a) - t_{EO}(t_a)) + (t_{RL}(t_a) - t_{EO}(t_a)) \right] \quad (188)$$

eingesetzt.

Formelzeichen:

a	Mittelpunktabstand der Rohrleitungen	[m]
d_i	Innendurchmesser der Wärmedämmung	[m]
h	Verlegetiefe	[m]
$\dot{Q}_{Verlust}(t_a)$	Wärmeverluststromdichte	[W/m]
r_2	Mantelrohrinnenradius	[m]
S	Formkoeffizient für parallel verlegte Rohre	[-]
t_a	Außentemperatur	[°C]
$t_{EO}(t_a)$	Temperatur an der Erdoberfläche	[°C]
$t_{RL}(t_a)$	Rücklauftemperatur	[°C]
$t_{VL}(t_a)$	Vorlauftemperatur	[°C]
λ_E	Wärmeleitkoeffizient des Erdreichs	[W/(m*K)]
λ_{WD}	Wärmeleitkoeffizient der Wärmedämmung	[W/(m*K)]

A.10.7. Tarco

In dem Rohrleitungskatalog der Firma Tarco für die Jahre 1998 / 1999 ist ein Verfahren zur Berechnung der Wärmeverluste von direkt erdverlegten Fernwärmeleitungen enthalten. [172]

Zunächst sind der Dämmwert des Rohres

$$M_{PU} = \frac{1}{2\pi\lambda_{PU}} \cdot \ln\left(\frac{D_i}{d}\right) \quad (189)$$

und der Dämmwert des umgebenden Bodens

$$M_j = \frac{1}{2\pi\lambda_j} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot h}{D}\right) \quad (190)$$

unter Berücksichtigung der rechnerischen Verlegetiefe

$$h = H + 136\text{mm} \quad (191)$$

und $\lambda_j = 2 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ zu bestimmen.

Zusätzlich wird der Dämmwert zwischen den Rohren

$$M_2 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_j} \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{2h}{a+D}\right)^2\right] \quad (192)$$

berechnet. Die Dämmwerte werden in der Gleichung für die Berechnung der Wärmeverluststromdichte für das Rohrpaar

$$\phi = 2 \cdot \frac{1}{M_{PU} + M_j + M_2} \left(\frac{T_V + T_R}{2} - T_j \right) \quad (193)$$

zusammengeführt.

Formelzeichen:

a	Mantelrohrabstand	[mm]
d	Mediumrohraußendurchmesser	[mm]
D	Mantelrohraußendurchmesser	[mm]
D_i	Mantelrohrinnendurchmesser	[mm]
h	Rechnerische Verlegetiefe	[W/(m*K)]
H	Verlegetiefe bis zur Rohrachse	[mm]
M	Dämmwert des Rohres	[(m*K)/W]
M_2	Wärmedämmwert zwischen den Rohren	[(m*K)/W]
T	Temperatur	[°C]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/(m*K)]
ϕ	Wärmeverluststromdichte für Rohrpaar	[W/m]

Indizes:

j	Erdreich
PU	Wärmedämmung
R	Rücklauf
V	Vorlauf

A.10.8. Wallentén

Petter Wallentén hat in seiner Studie „Steady-state heat loss from insulated pipes“ [138] die Grundlagen für die modernen analytischen Verfahren zur wissenschaftlichen Berechnung der Wärmeverluste von Fernwärmeleitungen gelegt. Hier stellt er Näherungsverfahren für nebeneinander im Erdreich verlegte Einzelrohre sowie Mehrfachrohre (Doppelrohrsysteme und andere Systeme mit mehr als einem Mediumrohr in einem gemeinsamen Mantel) vor. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich Näherungsgleichungen erster Ordnung für Doppelrohrsysteme und zwei nebeneinander verlegte Einzelrohre genutzt.

A.10.8.1. Einzelrohrsysteme

Die von Wallentén [138] mit der Multipole Methode ermittelten Gleichungen erster Ordnung ermöglichen die getrennte Berechnung der Wärmeverluste von Vor- und Rücklauf. Zunächst wird der Isolationsparameter

$$\beta = \frac{\lambda_g}{\lambda_i} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \quad (194)$$

bestimmt. Mit diesem können der symmetrische Wärmeverlustkoeffizient

$$h_s^{-1} = \ln\left(\frac{2 \cdot H}{r_o}\right) + \beta + \ln\left[\sqrt{1 + \left(\frac{H}{D}\right)^2}\right] - \left[\frac{\left(\frac{r_o}{2 \cdot D}\right)^2 + \left(\frac{r_o}{2 \cdot H}\right)^2 + \frac{r_o^2}{4 \cdot (D^2 + H^2)}}{\frac{1 + \beta}{1 - \beta} - \left(\frac{r_o}{2 \cdot D}\right)^2} \right] \quad (195)$$

mit der zugehörigen Wärmeverluststromdichte

$$\dot{q}_s = \left(\frac{T_1 + T_2}{2} - T_o\right) \cdot 2 \pi \lambda_g \cdot h_s \quad (196)$$

und der asymmetrische Wärmeverlustkoeffizient

$$h_a^{-1} = \ln\left(\frac{2 \cdot H}{r_o}\right) + \beta - \ln\left[\sqrt{1 + \left(\frac{H}{D}\right)^2}\right] - \left[\frac{\left(\frac{r_o}{2 \cdot D}\right)^2 + \left(\frac{r_o}{2 \cdot H}\right)^2 + \frac{3r_o^2}{4 \cdot (D^2 + H^2)}}{\frac{1 + \beta}{1 - \beta} - \left(\frac{r_o}{2 \cdot D}\right)^2} \right] \quad (197)$$

mit der asymmetrischen Wärmeverluststromdichte

$$\dot{q}_a = \left(\frac{T_1 - T_2}{2}\right) \cdot 2 \pi \lambda_g \cdot h_a \quad (198)$$

berechnet werden. Zusammengeführt ergeben sich die Wärmeverluststromdichten für den Vorlauf

$$\dot{q}_1 = \dot{q}_s + \dot{q}_a \quad (199)$$

den Rücklauf

$$\dot{q}_2 = \dot{q}_s - \dot{q}_a \quad (200)$$

und die Gesamtwärmeverluststromdichte

$$\dot{q}_1 + \dot{q}_2 = 2\dot{q}_s \quad (201)$$

Formelzeichen:

$2 \cdot D$	Verlegeabstand zwischen den Rohrachsen	[m]
H	Verlegetiefe bis zur Rohrachse	[m]
h	Wärmeverluststromkoeffizient	[-]
\dot{q}	Wärmeverluststromdichte	[W/m]
r_i	Mediumrohr Außenradius	[m]
r_o	Mantelrohrinnenradius	[m]
T	Temperatur	[°C]
β	Isolationsparameter	[-]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/(m*K)]

Indizes:

1	Vorlauf
2	Rücklauf
a	Asymmetrisch
g	Erdreich
i	Wärmedämmung
O	Erdoberfläche
s	Symmetrisch

A.10.8.2. Doppelrohrsysteme

Die Berechnungsverfahren für Doppelrohrsysteme sind analog zu den Einzelrohrsystemen aufgebaut. Zusätzlich werden die dimensionslose Wärmeleitfähigkeit

$$\sigma = \frac{\lambda_i - \lambda_g}{\lambda_i + \lambda_g} \quad (202)$$

und der dimensionslose Wärmedurchgangskoeffizient

$$\gamma = \frac{2(1-\sigma^2)}{1-\sigma\left(\frac{r_c}{2H}\right)^2} \quad (203)$$

eingeführt. Anschließend erfolgt die Berechnung der Wärmeverluststromkoeffizienten

$$h_s^{-1} = 2 \frac{\lambda_i}{\lambda_g} \ln\left(\frac{2H}{r_c}\right) + \ln\left(\frac{r_c^2}{2 \cdot D r_i}\right) + \sigma \cdot \ln\left(\frac{r_c^4}{r_c^4 - D^4}\right) - \frac{\left(\frac{r_i}{2D} - \frac{\sigma 2 r_i D^3}{r_c^4 - D^4}\right)^2}{1 + \left(\frac{r_i}{2 \cdot D}\right) + \sigma \left(\frac{2 r_i r_c^2 D}{r_c^4 - D^4}\right)^2} \quad (204)$$

$$h_a^{-1} = \ln\left(\frac{2 \cdot D}{r_i}\right) + \sigma \ln\left(\frac{r_c^2 + D^2}{r_c^2 - D^2}\right) - \frac{\left(\frac{r_i}{2 \cdot D} - \gamma \frac{D r_i}{4 H^2} + \frac{2 \sigma r_i r_c^2 D}{r_c^4 - D^4}\right)^2}{1 - \left(\frac{r_i}{2 \cdot D}\right)^2 - \gamma \frac{r_i}{2 H} + 2 \sigma r_i^2 r_c^2 \cdot \frac{r_c^4 + D^4}{(r_c^4 - D^4)^2}} - \gamma \left(\frac{D}{2 H}\right)^2 \quad (205)$$

sowie der einzelnen Wärmeverluststromdichten

$$\dot{q}_s = \left(\frac{T_1 + T_2}{2} - T_o\right) \cdot 2 \pi \lambda_{foam} \cdot h_s \quad (206)$$

$$\dot{q}_a = \left(\frac{T_1 - T_2}{2}\right) \cdot 2 \pi \lambda_{foam} \cdot h_a \quad (207)$$

$$\dot{q}_1 = \dot{q}_s + \dot{q}_a \quad (208)$$

$$\dot{q}_2 = \dot{q}_s - \dot{q}_a \quad (209)$$

Zusammengeführt ergibt sich daraus die Gesamtwärmeverluststromdichte

$$q_{total} = \dot{q}_1 + \dot{q}_2 \quad (210)$$

Formelzeichen:

$2 \cdot D$	Verlegeabstand zwischen den Rohrachsen	[m]
h	Wärmeverluststromkoeffizient	[-]
H	Verlegetiefe bis zur Rohrachse	[m]
L	Länge des Rohres	[m]
\dot{Q}_{total}	Gesamtwärmeverluststrom der Trasse	[W/m]
r_c	Mantelrohrinnenradius	[m]
r_i	Mediumrohraußenradius	[m]
T	Temperatur	[°C]
β	Isolationsparameter	[-]
γ	Dimensionsloser Wärmedurchgangskoeffizient	[-]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/(m*K)]
σ	Dimensionslose Wärmeleitfähigkeit	[-]

Indizes:

1	Vorlauf
2	Rücklauf
a	Asymmetrisch
g	Erdreich
i	Wärmedämmung
O	Erdoberfläche
s	Symmetrisch

A.10.9. Zeitler

Die in [173] von Martin Zeitler vorgestellten Verfahren zur Ermittlung von Wärmeverlusten sind die ältesten in dieser Arbeit berücksichtigten. Sie wurden bereits im Jahr 1980 veröffentlicht. Neben dem Verfahren für nebeneinander verlegte, gedämmte Einzelrohre stellt Zeitler auch für ungedämmte Rohrleitungen sowie Rohrleitungen in Kanälen oder Vergussmassen Berechnungsverfahren vor. Das Verfahren zur Wärmeverlustberechnung an erdverlegten Einzelrohren von Zeitler ist eine Mischung aus analytischen Berechnungen und Iterationsverfahren.

Zunächst sind die Formzahlen

$$S_{BE} = f_B \cdot \frac{2\pi}{\operatorname{arcosh} 2 \left[\frac{a^2 - \frac{d_{1a}^2}{4} - \frac{d_{2a}^2}{4}}{d_{1a} \cdot d_{2a}} \right]} \quad (211)$$

$$S_{jE} = f_j \cdot \frac{2\pi}{\operatorname{arcosh} \frac{2h_a}{d_{ja}}} \quad (212)$$

und

$$S_{jWD} = f_j \cdot \frac{2\pi}{\ln \left(\frac{d_{ja}}{d_{ji}} \right)} \quad (213)$$

zu berechnen und in die Gleichungen für die Wärmeleitwiderstände R_{BE} , R_{jWD} , R_{jE}

$$R_j = \frac{1}{S_j \lambda_j} \quad (214)$$

einzusetzen. Damit können die Substitutionsgrößen

$$A_j = \frac{R_{BE}}{R_{jWD}} \quad (215)$$

$$B_j = 1 + R_{BE} \frac{R_{jWD} + R_{jE}}{R_{jWD} \cdot R_{jE}} \quad (216)$$

und

$$C_j = \frac{R_{BE}}{R_{jE}} \quad (217)$$

bestimmt werden. Parallel werden die Korrektionszahlen

$$f_B = \tanh \left[\frac{h_E \cdot d_{2a} \cdot \lambda_{WD}}{a \cdot d_{1a} \cdot \lambda_E} \right] \quad (218)$$

für $\frac{h_E}{d_{rj}} \geq 2$ und

$$f_j = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \cdot \arctan \frac{a \cdot d_{ji} \cdot \lambda_E}{h_E \cdot d_{3-j} \cdot \lambda_{WD}} \quad (219)$$

für $\frac{a}{h_E} \leq 1,5$ berechnet. Es folgt die Berechnung der Temperaturen an den Mantelrohren

$$\vartheta_{1a} = B_1 \vartheta_{2a} - (A_2 \vartheta_{2i} + C_2 \vartheta_{E0}) \quad (220)$$

und

$$\vartheta_{2a} = \frac{A_2 B_1 \vartheta_{2i} + A_1 \vartheta_{1i} + \vartheta_{E0} (C_1 + C_2 B_1)}{B_1 B_2 - 1} \quad (221)$$

Diese sind iterativ mit tabellierten oder empirisch ermittelten Wärmeleitfähigkeiten für Erdreich und Wärmedämmung in Abhängigkeit der Temperatur zu ermitteln.

Anhang A

Alle vorstehend ermittelten Werte fließen in die Berechnung der Temperaturdifferenzen

$$\Delta \vartheta_{jWD} = \vartheta_{ji} - \vartheta_{ja} \quad (222)$$

und schließlich der Wärmeverluststromdichten der Einzelrohre

$$\dot{q}_j = \lambda_{jWD} \cdot S_{jWD} \cdot \Delta \vartheta_{jWD} \quad (223)$$

und des Gesamtsystems

$$\dot{q}_{12} = \dot{q}_1 + \dot{q}_2 \quad (224)$$

ein.

Formelzeichen:

a	Verlegeabstand zwischen den Rohrachsen	[m]
A_j	Substitutionsgröße 1	[-]
B_j	Substitutionsgröße 2	[-]
C_j	Substitutionsgröße 3	[-]
d_{ja}	Mantelrohrinnendurchmesser	[m]
d_{ji}	Mediumrohraußendurchmesser	[m]
f_B	Korrektionszahl 1	[-]
f_j	Korrektionszahl 2	[-]
h_E	Verlegetiefe (Rohrachse)	[m]
\dot{q}_{12}	Gesamtwärmeverluststromdichte der Trasse	[W/m]
\dot{q}_j	Wärmeverluststromdichte der Einzelrohre	[W/m]
R_j	Wärmeleitwiderstände	[(m*K)/W]
S_{BE}	Formzahl 1	[-]
S_{jE}	Formzahl 2	[-]
S_{jWD}	Formzahl 3	[-]
$\Delta \vartheta_{jWD}$	Temperaturdifferenzen	[°C]

ϑ_{1a}	Manteltemperatur 1	[°C]
ϑ_{2a}	Manteltemperatur 2	[°C]
ϑ_{E0}	Erdoberflächentemperatur	[°C]
ϑ_{ji}	Mediumtemperatur	[°C]
λ_E	Erdreichwärmeleitfähigkeit	[W/(m*K)]
λ_{WD}	Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung	[W/(m*K)]

A.10.10. Zinko et. al.

Zinko et. al. haben in [174] ein Kurzverfahren zur Bestimmung von Wärmeverlusten bei nebeneinander verlegten Einzelrohren veröffentlicht.

Mit einer ersten Gleichung wird die rechnerische Verlegetiefe

$$H = h_f + \frac{\lambda_m}{\alpha} \quad (225)$$

bestimmt. Diese fließt in die Gleichung zur Ermittlung der Wärmeverluststromdichte

$$\dot{Q} = \frac{2 \cdot \left[\frac{T_f + T_r}{2} - T_o \right]}{\frac{1}{2\pi\lambda_i} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) + \frac{1}{2\pi\lambda_m} \cdot \ln\left[4 \cdot \left(\frac{H + \frac{D}{2}}{D} \right) \right] + \frac{1}{4\pi\lambda_m} \cdot \left[2 \cdot \left(\frac{H + \frac{D}{2}}{s} \right)^2 + 1 \right]} \quad (226)$$

ein.

Formelzeichen:

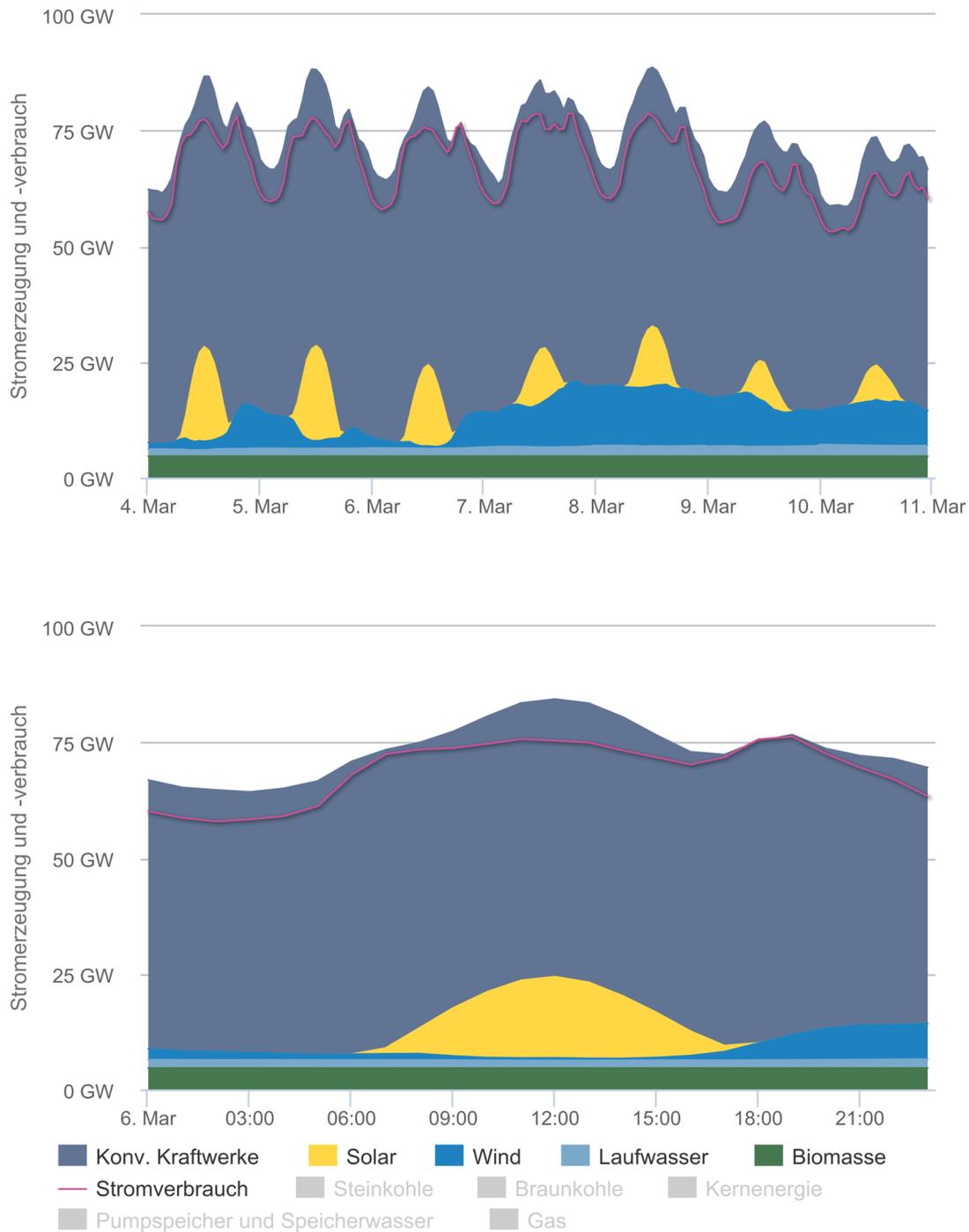
d	Mediumrohraußendurchmesser	[m]
D	Mantelrohrinnendurchmesser	[m]
H	Korrigierte Verlegetiefe	[m]
h_f	Verlegetiefe bis zur Rohroberkante	[m]
\dot{Q}	Wärmeverluststromdichte	[W/m]
s	Abstand zwischen Vor- und Rücklaufleitung	[m]
T_f	Vorlauftemperatur	[°C]

Anhang A

T_K	Konstanterdreichtemperatur	[°C]
T_r	Rücklauftemperatur	[°C]
T_O	Oberflächentemperatur	[°C]
α	Wärmeübergangskoeffizient an der Erdoberfläche	[W/(m ² *K)]
λ_i	Dämmstoffwärmeleitfähigkeit	[W/(m*K)]
λ_m	Erdreichwärmeleitfähigkeit	[W/(m*K)]

Anhang B

B.1. Stromlastgang in Deutschland



Agora Energiewende; Stand: 17.12.2014, 09:30

Abbildung 134: Stromlastkurven für die Woche vom 04. bis zum 10. März 2013 sowie im Detail für den 06. März 2013 [21]

B.2. Standardlastprofile

B.2.1. Fermenterheizung

Tabelle 27: Anzahl auswertbarer Messtage je Temperaturklasse für den Fermenter

Temperaturklasse		Anzahl Messtage
$\vartheta_d \leq -15 \text{ °C}$	1	0
$-15 \text{ °C} < \vartheta_d \leq -10 \text{ °C}$	2	0
$-10 \text{ °C} < \vartheta_d \leq -5 \text{ °C}$	3	2
$-5 \text{ °C} < \vartheta_d \leq 0 \text{ °C}$	4	14
$0 \text{ °C} < \vartheta_d \leq 5 \text{ °C}$	5	21
$5 \text{ °C} < \vartheta_d \leq 10 \text{ °C}$	6	65
$10 \text{ °C} < \vartheta_d \leq 15 \text{ °C}$	7	41
$15 \text{ °C} < \vartheta_d \leq 20 \text{ °C}$	8	55
$20 \text{ °C} < \vartheta_d \leq 25 \text{ °C}$	9	10
$\vartheta_d > 25 \text{ °C}$	10	0

Tabelle 28: Parameter für die Sigmoidfunktion des Fermenters

Sigmoidfunktion	mit Einheiten	normiert
A	2.611,606 kWh	0,8011
B	-26,705	-26,7046
C	5,238	5,237
D	0	0
Konvergenz-Tolleranz	3,0350E-06	2,87E-006
Residuum der Fehlerquadrate:	18.974.772	1,785

Tabelle 29: Stundenfaktoren für Fermenterheizung

Uhrzeit	Anteil am Tageswärmebedarf																										
	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	24.00	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	
$\vartheta_D \leq -15\text{ °C}$																											
$-15\text{ °C} < \vartheta_D \leq -10\text{ °C}$																											
$-10\text{ °C} < \vartheta_D \leq -5\text{ °C}$	0,04	0,03	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,03	0,03	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	
$-5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 0\text{ °C}$	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	
$0\text{ °C} < \vartheta_D \leq 5\text{ °C}$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
$5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 10\text{ °C}$	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
$10\text{ °C} < \vartheta_D \leq 15\text{ °C}$	0,06	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,02	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	
$15\text{ °C} < \vartheta_D \leq 20\text{ °C}$	0,07	0,05	0,06	0,05	0,05	0,04	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,03	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06	
$20\text{ °C} < \vartheta_D \leq 25\text{ °C}$	0,12	0,07	0,04	0,04	0,06	0,10	0,06	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	0,03	0,00	0,02	0,04	0,04	0,05	0,07	0,02	0,09	0,03			
$\vartheta_D > 25\text{ °C}$																											

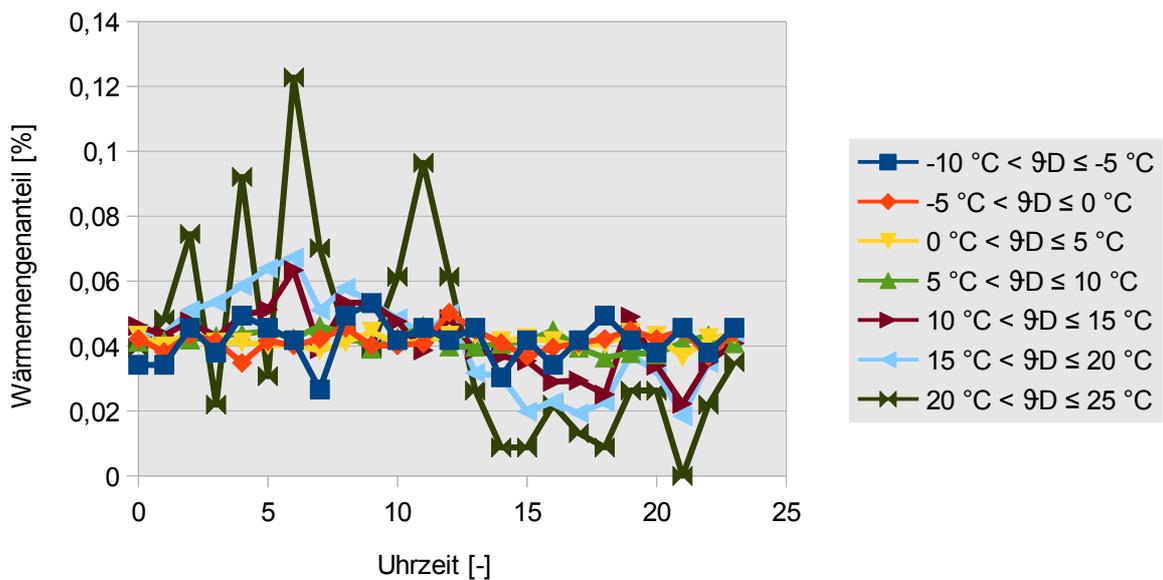


Abbildung 135: Stundenfaktoren für die Fermenterheizung – grafisch aufgetragen

B.2.2. Wohnsitz

Die Daten für einen ländlichen Wohnsitz basieren auf Messdaten eines herrschaftlichen Wohnsitzes, der abschnittsweise ab etwa 1750 bis vor 1927 errichtet wurde. Dieser verfügt über zwei getrennte Übergabestationen mit Wärmemengenzählern. In dem einen Bereich erfolgt die Trinkwarmwasserbereitung elektrisch, im anderen über ein Speicherladesystem mit Wärme aus dem Fernwärmenetz. Da im Wohnsitz keine gesonderten Wärmemengenzähler zur Erfassung des Wärmeverbrauchs für die Trinkwarmwasserbereitung installiert wurden, können für den Teil des Gebäudes nur Standardlastprofile für die Gesamtwärmeverbräuche und für den anderen Teil nur für die Heizwärmeverbräuche gebildet werden.

Tabelle 30: Anzahl auswertbarer Messtage je Temperaturklasse für einen Wohnsitzteil (nur Heizwärme)

Temperaturklasse		Anzahl Messtage Werktage	Anzahl Messtage Samstage	Anzahl Messtage Sonntage
$\vartheta_D \leq -15\text{ °C}$	1	0	0	0
$-15\text{ °C} < \vartheta_D \leq -10\text{ °C}$	2	0	0	0
$-10\text{ °C} < \vartheta_D \leq -5\text{ °C}$	3	1	1	0
$-5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 0\text{ °C}$	4	25	6	8
$0\text{ °C} < \vartheta_D \leq 5\text{ °C}$	5	24	4	4
$5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 10\text{ °C}$	6	43	6	13
$10\text{ °C} < \vartheta_D \leq 15\text{ °C}$	7	32	7	4
$15\text{ °C} < \vartheta_D \leq 20\text{ °C}$	8	30	4	6
$20\text{ °C} < \vartheta_D \leq 25\text{ °C}$	9	6	1	0
$\vartheta_D > 25\text{ °C}$	10	0	0	0

Tabelle 31: Anzahl auswertbarer Messtage je Temperaturklasse für einen Wohnsitzteil (Heizwärme und Trinkwarmwasser)

Temperaturklasse		Anzahl Messtage Werktage	Anzahl Messtage Samstage	Anzahl Messtage Sonntage
$\vartheta_D \leq -15\text{ °C}$	1	0	0	0
$-15\text{ °C} < \vartheta_D \leq -10\text{ °C}$	2	0	0	0
$-10\text{ °C} < \vartheta_D \leq -5\text{ °C}$	3	1	1	0
$-5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 0\text{ °C}$	4	22	5	6
$0\text{ °C} < \vartheta_D \leq 5\text{ °C}$	5	26	6	4
$5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 10\text{ °C}$	6	56	7	13
$10\text{ °C} < \vartheta_D \leq 15\text{ °C}$	7	32	7	4
$15\text{ °C} < \vartheta_D \leq 20\text{ °C}$	8	30	4	6
$20\text{ °C} < \vartheta_D \leq 25\text{ °C}$	9	11	2	2
$\vartheta_D > 25\text{ °C}$	10	0	0	0

Anhang B

Tabelle 32: Stundenfaktoren Wohnsitz – Heizwärme, Werktags

Uhrzeit	Anteil am Tagesverbrauch																								
	6.00 7.00	7.00 8.00	8.00 9.00	9.00 10.00	10.00 11.00	11.00 12.00	12.00 13.00	13.00 14.00	14.00 15.00	15.00 16.00	16.00 17.00	17.00 18.00	18.00 19.00	19.00 20.00	20.00 21.00	21.00 22.00	22.00 23.00	23.00 24.00	0.00 1.00	1.00 2.00	2.00 3.00	3.00 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00	
$\vartheta_D \leq -15^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$-15^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq -10^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$-10^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq -5^\circ\text{C}$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	
$-5^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 0^\circ\text{C}$	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
$0^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 5^\circ\text{C}$	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	
$5^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 10^\circ\text{C}$	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	
$10^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 15^\circ\text{C}$	0,08	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,08	
$15^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 20^\circ\text{C}$	0,12	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	
$20^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 25^\circ\text{C}$	0,20	0,10	0,15	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25		
$\vartheta_D > 25^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabelle 33: Stundenfaktoren Wohnsitz – Heizwärme, Samstags

Uhrzeit	Anteil am Tagesverbrauch																								
	6.00 7.00	7.00 8.00	8.00 9.00	9.00 10.00	10.00 11.00	11.00 12.00	12.00 13.00	13.00 14.00	14.00 15.00	15.00 16.00	16.00 17.00	17.00 18.00	18.00 19.00	19.00 20.00	20.00 21.00	21.00 22.00	22.00 23.00	23.00 24.00	0.00 1.00	1.00 2.00	2.00 3.00	3.00 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00	
$\vartheta_D \leq -15^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
$-15^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq -10^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
$-10^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq -5^\circ\text{C}$	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
$-5^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 0^\circ\text{C}$	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
$0^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 5^\circ\text{C}$	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	
$5^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 10^\circ\text{C}$	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	
$10^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 15^\circ\text{C}$	0,09	0,07	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,07	
$15^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 20^\circ\text{C}$	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	
$20^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 25^\circ\text{C}$	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
$\vartheta_D > 25^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabelle 34: Stundenfaktoren Wohnsitz – Heizwärme, Sonn- und Feiertags

Uhrzeit	Anteil am Tagesverbrauch																								
	6.00 7.00	7.00 8.00	8.00 9.00	9.00 10.00	10.00 11.00	11.00 12.00	12.00 13.00	13.00 14.00	14.00 15.00	15.00 16.00	16.00 17.00	17.00 18.00	18.00 19.00	19.00 20.00	20.00 21.00	21.00 22.00	22.00 23.00	23.00 24.00	0.00 1.00	1.00 2.00	2.00 3.00	3.00 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00	
$\vartheta_D \leq -15^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
$-15^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq -10^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
$-10^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq -5^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
$-5^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 0^\circ\text{C}$	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
$0^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 5^\circ\text{C}$	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	
$5^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 10^\circ\text{C}$	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05		
$10^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 15^\circ\text{C}$	0,11	0,08	0,07	0,07	0,05	0,06	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,04	0,06	0,04	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05		
$15^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 20^\circ\text{C}$	0,11	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,04	0,04	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,07	0,04	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11		
$20^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 25^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
$\vartheta_D > 25^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabelle 35: Stundenfaktoren Wohnsitz – Heizwärme und Trinkwarmwasser, Werktags

Uhrzeit	Anteil am Tagesverbrauch																								
	6.00 7.00	7.00 8.00	8.00 9.00	9.00 10.00	10.00 11.00	11.00 12.00	12.00 13.00	13.00 14.00	14.00 15.00	15.00 16.00	16.00 17.00	17.00 18.00	18.00 19.00	19.00 20.00	20.00 21.00	21.00 22.00	22.00 23.00	23.00 24.00	0.00 1.00	1.00 2.00	2.00 3.00	3.00 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00	
$\vartheta_D \leq -15\text{ °C}$																									
$-15\text{ °C} < \vartheta_D \leq -10\text{ °C}$																									
$-10\text{ °C} < \vartheta_D \leq -5\text{ °C}$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
$-5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 0\text{ °C}$	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
$0\text{ °C} < \vartheta_D \leq 5\text{ °C}$	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
$5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 10\text{ °C}$	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	
$10\text{ °C} < \vartheta_D \leq 15\text{ °C}$	0,06	0,08	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,02	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,06	0,05	0,05	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	
$15\text{ °C} < \vartheta_D \leq 20\text{ °C}$	0,04	0,15	0,05	0,04	0,04	0,02	0,04	0,05	0,02	0,03	0,02	0,03	0,06	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,08	0,01	0,04	
$20\text{ °C} < \vartheta_D \leq 25\text{ °C}$	0,04	0,07	0,06	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,05	0,03	0,06	0,02	0,05	0,03	0,04	0,06	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,05	0,06	
$\vartheta_D > 25\text{ °C}$																									

Tabelle 36: Stundenfaktoren Wohnsitz – Heizwärme und Trinkwarmwasser, Samstags

Uhrzeit	Anteil am Tagesverbrauch																							
	6.00 7.00	7.00 8.00	8.00 9.00	9.00 10.00	10.00 11.00	11.00 12.00	12.00 13.00	13.00 14.00	14.00 15.00	15.00 16.00	16.00 17.00	17.00 18.00	18.00 19.00	19.00 20.00	20.00 21.00	21.00 22.00	22.00 23.00	23.00 24.00	0.00 1.00	1.00 2.00	2.00 3.00	3.00 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00
$\vartheta_D \leq -15\text{ °C}$																								
$-15\text{ °C} < \vartheta_D \leq -10\text{ °C}$																								
$-10\text{ °C} < \vartheta_D \leq -5\text{ °C}$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
$-5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 0\text{ °C}$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04
$0\text{ °C} < \vartheta_D \leq 5\text{ °C}$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03
$5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 10\text{ °C}$	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05
$10\text{ °C} < \vartheta_D \leq 15\text{ °C}$	0,06	0,06	0,07	0,08	0,05	0,06	0,03	0,03	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	0,05	0,07	0,04	0,06	0,01	0,02	0,03	0,03	0,06	0,04	0,03
$15\text{ °C} < \vartheta_D \leq 20\text{ °C}$	0,02	0,00	0,02	0,20	0,20	0,07	0,10	0,00	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,05	0,02	0,07	0,00	0,00	0,00	0,05	0,05
$20\text{ °C} < \vartheta_D \leq 25\text{ °C}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	
$\vartheta_D > 25\text{ °C}$																								

Tabelle 37: Stundenfaktoren Wohnsitz – Heizwärme und Trinkwarmwasser, Sonn- und Feiertags

Uhrzeit	Anteil am Tagesverbrauch																							
	6.00 7.00	7.00 8.00	8.00 9.00	9.00 10.00	10.00 11.00	11.00 12.00	12.00 13.00	13.00 14.00	14.00 15.00	15.00 16.00	16.00 17.00	17.00 18.00	18.00 19.00	19.00 20.00	20.00 21.00	21.00 22.00	22.00 23.00	23.00 24.00	0.00 1.00	1.00 2.00	2.00 3.00	3.00 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00
$\vartheta_D \leq -15\text{ °C}$																								
$-15\text{ °C} < \vartheta_D \leq -10\text{ °C}$																								
$-10\text{ °C} < \vartheta_D \leq -5\text{ °C}$																								
$-5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 0\text{ °C}$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
$0\text{ °C} < \vartheta_D \leq 5\text{ °C}$	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
$5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 10\text{ °C}$	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04
$10\text{ °C} < \vartheta_D \leq 15\text{ °C}$	0,04	0,06	0,06	0,06	0,09	0,10	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,06	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,01	0,05	0,04	0,00	0,05	0,01	0,00
$15\text{ °C} < \vartheta_D \leq 20\text{ °C}$	0,07	0,05	0,04	0,07	0,06	0,09	0,03	0,03	0,00	0,04	0,00	0,03	0,02	0,10	0,06	0,02	0,03	0,03	0,05	0,04	0,01	0,00	0,05	0,06
$20\text{ °C} < \vartheta_D \leq 25\text{ °C}$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,02	0,07	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,02	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,02	0,07	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
$\vartheta_D > 25\text{ °C}$																								

B.2.3. Viehwirtschaft

Die Lastprofile für den Viehzuchtbetrieb beruhen auf Messdaten von dem Wohngebäude eines landwirtschaftlichen Betriebes mit Viehhaltung. Das Wohngebäude mit zwei Wohneinheiten wurde um 1930 errichtet. Die Trinkwarmwasserbereitung erfolgt über ein Speicherladesystem. Die Lastprofile für die Heizlast wurden aus den Differenzen von gemessenen Gesamtwärmeverbräuchen und gemessenen Wärmeverbräuchen für Trinkwarmwasserbereitung berechnet.

Tabelle 38: Anzahl auswertbarer Messtage je Temperaturklasse der Viehwirtschaft

Temperaturklasse		Anzahl Messtage Werktage	Anzahl Messtage Samstage	Anzahl Messtage Sonntage
$\vartheta_d \leq -15 \text{ °C}$	1	0	0	0
$-15 \text{ °C} < \vartheta_d \leq -10 \text{ °C}$	2	0	0	0
$-10 \text{ °C} < \vartheta_d \leq -5 \text{ °C}$	3	1	1	0
$-5 \text{ °C} < \vartheta_d \leq 0 \text{ °C}$	4	17	8	6
$0 \text{ °C} < \vartheta_d \leq 5 \text{ °C}$	5	26	13	5
$5 \text{ °C} < \vartheta_d \leq 10 \text{ °C}$	6	57	13	14
$10 \text{ °C} < \vartheta_d \leq 15 \text{ °C}$	7	32	11	4
$15 \text{ °C} < \vartheta_d \leq 20 \text{ °C}$	8	48	13	10
$20 \text{ °C} < \vartheta_d \leq 25 \text{ °C}$	9	14	5	2
$\vartheta_d > 25 \text{ °C}$	10	0	0	0

Tabelle 39: Stundenfaktoren Viehwirtschaft – Heizwärme, Werktags

Uhrzeit	Anteil am Tagesverbrauch																								
	6.00 7.00	7.00 8.00	8.00 9.00	9.00 10.00	10.00 11.00	11.00 12.00	12.00 13.00	13.00 14.00	14.00 15.00	15.00 16.00	16.00 17.00	17.00 18.00	18.00 19.00	19.00 20.00	20.00 21.00	21.00 22.00	22.00 23.00	23.00 24.00	0.00 1.00	1.00 2.00	2.00 3.00	3.00 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00	
$\vartheta_D \leq -15\text{ °C}$																									
$-15\text{ °C} < \vartheta_D \leq -10\text{ °C}$																									
$-10\text{ °C} < \vartheta_D \leq -5\text{ °C}$	0,03	0,03	0,06	0,03	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,02	0,04	0,04	
$-5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 0\text{ °C}$	0,04	0,05	0,04	0,05	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	
$0\text{ °C} < \vartheta_D \leq 5\text{ °C}$	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
$5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 10\text{ °C}$	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	
$10\text{ °C} < \vartheta_D \leq 15\text{ °C}$	0,05	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
$15\text{ °C} < \vartheta_D \leq 20\text{ °C}$	0,04	0,06	0,05	0,05	0,03	0,04	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05	0,03	0,04	0,04	0,08	0,04	
$20\text{ °C} < \vartheta_D \leq 25\text{ °C}$	0,02	0,07	0,04	0,02	0,04	0,01	0,04	0,03	0,05	0,04	0,06	0,03	0,08	0,04	0,08	0,08	0,06	0,04	0,07	0,00	0,01	0,00	0,10	0,01	
$\vartheta_D > 25\text{ °C}$																									

Tabelle 40: Stundenfaktoren Viehwirtschaft – Heizwärme, Samstags

Uhrzeit	Anteil am Tagesverbrauch																								
	6.00 7.00	7.00 8.00	8.00 9.00	9.00 10.00	10.00 11.00	11.00 12.00	12.00 13.00	13.00 14.00	14.00 15.00	15.00 16.00	16.00 17.00	17.00 18.00	18.00 19.00	19.00 20.00	20.00 21.00	21.00 22.00	22.00 23.00	23.00 24.00	0.00 1.00	1.00 2.00	2.00 3.00	3.00 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00	
$\vartheta_D \leq -15\text{ °C}$																									
$-15\text{ °C} < \vartheta_D \leq -10\text{ °C}$																									
$-10\text{ °C} < \vartheta_D \leq -5\text{ °C}$	0,04	0,06	0,03	0,06	0,03	0,05	0,02	0,04	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,07	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	
$-5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 0\text{ °C}$	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	
$0\text{ °C} < \vartheta_D \leq 5\text{ °C}$	0,04	0,05	0,04	0,05	0,03	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	
$5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 10\text{ °C}$	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	
$10\text{ °C} < \vartheta_D \leq 15\text{ °C}$	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05	0,02	0,04	0,03	0,04	0,02	0,05	0,03	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	
$15\text{ °C} < \vartheta_D \leq 20\text{ °C}$	0,02	0,05	0,08	0,02	0,08	0,03	0,07	0,01	0,05	0,02	0,04	0,02	0,03	0,05	0,06	0,04	0,05	0,05	0,06	0,02	0,02	0,04	0,07	0,03	
$20\text{ °C} < \vartheta_D \leq 25\text{ °C}$	0,00	0,05	0,00	0,10	0,00	0,00	0,05	0,00	0,10	0,00	0,05	0,00	0,05	0,10	0,15	0,00	0,10	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	
$\vartheta_D > 25\text{ °C}$																									

Tabelle 41: Stundenfaktoren Viehwirtschaft – Heizwärme, Sonn- und Feiertags

Uhrzeit	Anteil am Tagesverbrauch																								
	6.00 7.00	7.00 8.00	8.00 9.00	9.00 10.00	10.00 11.00	11.00 12.00	12.00 13.00	13.00 14.00	14.00 15.00	15.00 16.00	16.00 17.00	17.00 18.00	18.00 19.00	19.00 20.00	20.00 21.00	21.00 22.00	22.00 23.00	23.00 24.00	0.00 1.00	1.00 2.00	2.00 3.00	3.00 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00	
$\vartheta_D \leq -15\text{ °C}$																									
$-15\text{ °C} < \vartheta_D \leq -10\text{ °C}$																									
$-10\text{ °C} < \vartheta_D \leq -5\text{ °C}$																									
$-5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 0\text{ °C}$	0,03	0,05	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	
$0\text{ °C} < \vartheta_D \leq 5\text{ °C}$	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	
$5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 10\text{ °C}$	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	
$10\text{ °C} < \vartheta_D \leq 15\text{ °C}$	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,04	0,01	0,05	0,00	0,03	0,03	0,03	0,06	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,03	0,06	0,04	
$15\text{ °C} < \vartheta_D \leq 20\text{ °C}$	0,03	0,04	0,06	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,02	0,05	0,02	0,05	0,05	0,06	0,05	0,06	0,05	0,02	0,04	0,03	0,03	0,06	0,03	
$20\text{ °C} < \vartheta_D \leq 25\text{ °C}$	0,05	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,14	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,05	0,14	0,00	0,05	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,19	0,10	
$\vartheta_D > 25\text{ °C}$																									

Anhang B

Tabelle 42: Stundenfaktoren Viehwirtschaft – Gesamtwärmeverbrauch, Werktags

Uhrzeit	Anteil am Tagesverbrauch																								
	6.00 7.00	7.00 8.00	8.00 9.00	9.00 10.00	10.00 11.00	11.00 12.00	12.00 13.00	13.00 14.00	14.00 15.00	15.00 16.00	16.00 17.00	17.00 18.00	18.00 19.00	19.00 20.00	20.00 21.00	21.00 22.00	22.00 23.00	23.00 24.00	0.00 1.00	1.00 2.00	2.00 3.00	3.00 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00	
$\vartheta_D \leq -15^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$-15^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq -10^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$-10^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq -5^\circ\text{C}$	0,03	0,03	0,06	0,03	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,02	0,04	0,04	
$-5^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 0^\circ\text{C}$	0,04	0,05	0,04	0,05	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	
$0^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 5^\circ\text{C}$	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
$5^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 10^\circ\text{C}$	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	
$10^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 15^\circ\text{C}$	0,05	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
$15^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 20^\circ\text{C}$	0,04	0,06	0,05	0,05	0,03	0,04	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05	0,03	0,04	0,04	0,08	0,04	
$20^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 25^\circ\text{C}$	0,02	0,07	0,04	0,02	0,04	0,01	0,04	0,03	0,05	0,04	0,06	0,03	0,08	0,04	0,08	0,08	0,06	0,04	0,07	0,00	0,01	0,00	0,10	0,01	
$\vartheta_D > 25^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabelle 43: Stundenfaktoren Viehwirtschaft – Gesamtwärmeverbrauch, Samstags

Uhrzeit	Anteil am Tagesverbrauch																								
	6.00 7.00	7.00 8.00	8.00 9.00	9.00 10.00	10.00 11.00	11.00 12.00	12.00 13.00	13.00 14.00	14.00 15.00	15.00 16.00	16.00 17.00	17.00 18.00	18.00 19.00	19.00 20.00	20.00 21.00	21.00 22.00	22.00 23.00	23.00 24.00	0.00 1.00	1.00 2.00	2.00 3.00	3.00 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00	
$\vartheta_D \leq -15^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
$-15^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq -10^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
$-10^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq -5^\circ\text{C}$	0,04	0,06	0,03	0,06	0,03	0,05	0,02	0,04	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,07	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	
$-5^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 0^\circ\text{C}$	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	
$0^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 5^\circ\text{C}$	0,04	0,05	0,04	0,05	0,03	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	
$5^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 10^\circ\text{C}$	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	
$10^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 15^\circ\text{C}$	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05	0,02	0,04	0,03	0,04	0,02	0,05	0,03	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	
$15^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 20^\circ\text{C}$	0,02	0,05	0,08	0,02	0,08	0,03	0,07	0,01	0,05	0,02	0,04	0,02	0,03	0,05	0,06	0,04	0,05	0,05	0,06	0,02	0,02	0,04	0,07	0,03	
$20^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 25^\circ\text{C}$	0,00	0,05	0,00	0,10	0,00	0,00	0,05	0,00	0,10	0,00	0,05	0,00	0,05	0,10	0,15	0,00	0,10	0,00	0,15	0,00	0,00	0,10	0,00		
$\vartheta_D > 25^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabelle 44: Stundenfaktoren Viehwirtschaft – Gesamtwärmeverbrauch, Sonn- und Feiertags

Uhrzeit	Anteil am Tagesverbrauch																								
	6.00 7.00	7.00 8.00	8.00 9.00	9.00 10.00	10.00 11.00	11.00 12.00	12.00 13.00	13.00 14.00	14.00 15.00	15.00 16.00	16.00 17.00	17.00 18.00	18.00 19.00	19.00 20.00	20.00 21.00	21.00 22.00	22.00 23.00	23.00 24.00	0.00 1.00	1.00 2.00	2.00 3.00	3.00 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00	
$\vartheta_D \leq -15^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
$-15^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq -10^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
$-10^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq -5^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
$-5^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 0^\circ\text{C}$	0,03	0,05	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	
$0^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 5^\circ\text{C}$	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	
$5^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 10^\circ\text{C}$	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	
$10^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 15^\circ\text{C}$	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,04	0,01	0,05	0,00	0,03	0,03	0,03	0,06	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,03	0,06	0,04	
$15^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 20^\circ\text{C}$	0,03	0,04	0,06	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,02	0,05	0,02	0,05	0,05	0,06	0,05	0,06	0,05	0,02	0,04	0,03	0,03	0,06	0,03	
$20^\circ\text{C} < \vartheta_D \leq 25^\circ\text{C}$	0,05	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,14	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,05	0,14	0,00	0,05	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,19	0,10	
$\vartheta_D > 25^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

B.2.4. Ackerbaubetrieb

Die Lastprofile für einen Ackerbaubetrieb basieren auf Messdaten in einem modernisierten Wohn- und Verwaltungsgebäude (Niederdeutsches Hallenhaus mit seitlichem Anbau) aus dem Jahr 1900. Neben der Bewirtschaftung eigener Flächen werden Lohnunternehmer-tätigkeiten für andere Landwirte, Unternehmen, Privatleute und Kommunen ausgeführt. Die Trinkwarmwasserbereitung erfolgt über ein Speicherladesystem. Die Lastprofile für die Raumheizung wurden aus den gemessenen Differenzen von Gesamtwärmeverbrauch und Trinkwarmwasserverbrauch ermittelt.

Tabelle 45: Anzahl auswertbarer Messtage je Temperaturklasse des Ackerbaubetriebes

Temperaturklasse		Anzahl Messtage Werktage	Anzahl Messtage Samstage	Anzahl Messtage Sonntage
$\vartheta_D \leq -15 \text{ °C}$	1	0	0	0
$-15 \text{ °C} < \vartheta_D \leq -10 \text{ °C}$	2	0	0	0
$-10 \text{ °C} < \vartheta_D \leq -5 \text{ °C}$	3	1	1	0
$-5 \text{ °C} < \vartheta_D \leq 0 \text{ °C}$	4	25	6	7
$0 \text{ °C} < \vartheta_D \leq 5 \text{ °C}$	5	27	5	5
$5 \text{ °C} < \vartheta_D \leq 10 \text{ °C}$	6	49	7	14
$10 \text{ °C} < \vartheta_D \leq 15 \text{ °C}$	7	32	7	4
$15 \text{ °C} < \vartheta_D \leq 20 \text{ °C}$	8	44	8	10
$20 \text{ °C} < \vartheta_D \leq 25 \text{ °C}$	9	9	1	1
$\vartheta_D > 25 \text{ °C}$	10	0	0	0

Anhang B

Tabelle 46: Stundenfaktoren Ackerbaubetrieb – Heizwärme, Werktags

Uhrzeit	Anteil am Tagesverbrauch																							
	6.00 7.00	7.00 8.00	8.00 9.00	9.00 10.00	10.00 11.00	11.00 12.00	12.00 13.00	13.00 14.00	14.00 15.00	15.00 16.00	16.00 17.00	17.00 18.00	18.00 19.00	19.00 20.00	20.00 21.00	21.00 22.00	22.00 23.00	23.00 24.00	0.00 1.00	1.00 2.00	2.00 3.00	3.00 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00
$\vartheta_D \leq -15\text{ °C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$-15\text{ °C} < \vartheta_D = -10\text{ °C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$-10\text{ °C} < \vartheta_D \leq -5\text{ °C}$	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04
$-5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 0\text{ °C}$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
$0\text{ °C} < \vartheta_D \leq 5\text{ °C}$	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
$5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 10\text{ °C}$	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,04	0,05
$10\text{ °C} < \vartheta_D \leq 15\text{ °C}$	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,04	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05	0,06
$15\text{ °C} < \vartheta_D \leq 20\text{ °C}$	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,06	0,08	0,09	0,03	0,00	0,00	0,00	0,04	0,06	0,07
$20\text{ °C} < \vartheta_D \leq 25\text{ °C}$	0,08	0,04	0,07	0,03	0,03	0,03	0,06	0,00	0,03	0,06	0,08	0,03	0,07	0,00	0,00	0,04	0,09	0,01	0,01	0,04	0,00	0,04	0,09	0,08
$\vartheta_D > 25\text{ °C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 47: Stundenfaktoren Ackerbaubetrieb – Heizwärme, Samstags

Uhrzeit	Anteil am Tagesverbrauch																							
	6.00 7.00	7.00 8.00	8.00 9.00	9.00 10.00	10.00 11.00	11.00 12.00	12.00 13.00	13.00 14.00	14.00 15.00	15.00 16.00	16.00 17.00	17.00 18.00	18.00 19.00	19.00 20.00	20.00 21.00	21.00 22.00	22.00 23.00	23.00 24.00	0.00 1.00	1.00 2.00	2.00 3.00	3.00 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00
$\vartheta_D \leq -15\text{ °C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$-15\text{ °C} < \vartheta_D = -10\text{ °C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$-10\text{ °C} < \vartheta_D \leq -5\text{ °C}$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05
$-5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 0\text{ °C}$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
$0\text{ °C} < \vartheta_D \leq 5\text{ °C}$	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,05	0,04	0,03	0,04	0,05	0,05
$5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 10\text{ °C}$	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,05	0,05	0,05
$10\text{ °C} < \vartheta_D \leq 15\text{ °C}$	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,05	0,07
$15\text{ °C} < \vartheta_D \leq 20\text{ °C}$	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,06	0,06	0,04	0,02	0,01	0,09	0,08	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,06	0,07
$20\text{ °C} < \vartheta_D \leq 25\text{ °C}$	0,00	0,06	0,00	0,06	0,00	0,06	0,06	0,24	0,00	0,00	0,06	0,00	0,06	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,06	0,12	0,12	0,06	0,00	0,06
$\vartheta_D > 25\text{ °C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 48: Stundenfaktoren Ackerbaubetrieb – Heizwärme, Sonn- und Feiertags

Uhrzeit	Anteil am Tagesverbrauch																							
	6.00 7.00	7.00 8.00	8.00 9.00	9.00 10.00	10.00 11.00	11.00 12.00	12.00 13.00	13.00 14.00	14.00 15.00	15.00 16.00	16.00 17.00	17.00 18.00	18.00 19.00	19.00 20.00	20.00 21.00	21.00 22.00	22.00 23.00	23.00 24.00	0.00 1.00	1.00 2.00	2.00 3.00	3.00 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00
$\vartheta_D \leq -15\text{ °C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$-15\text{ °C} < \vartheta_D = -10\text{ °C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$-10\text{ °C} < \vartheta_D \leq -5\text{ °C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$-5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 0\text{ °C}$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04
$0\text{ °C} < \vartheta_D \leq 5\text{ °C}$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05
$5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 10\text{ °C}$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,04	0,05
$10\text{ °C} < \vartheta_D \leq 15\text{ °C}$	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,07	0,05
$15\text{ °C} < \vartheta_D \leq 20\text{ °C}$	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,02	0,02	0,10	0,10	0,03	0,00	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08
$20\text{ °C} < \vartheta_D \leq 25\text{ °C}$	0,18	0,09	0,09	0,09	0,05	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,14	
$\vartheta_D > 25\text{ °C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 49: Stundenfaktoren Ackerbaubetrieb – Gesamtwärmeverbrauch, Werktags

Uhrzeit	Anteil am Tagesverbrauch																								
	6.00 7.00	7.00 8.00	8.00 9.00	9.00 10.00	10.00 11.00	11.00 12.00	12.00 13.00	13.00 14.00	14.00 15.00	15.00 16.00	16.00 17.00	17.00 18.00	18.00 19.00	19.00 20.00	20.00 21.00	21.00 22.00	22.00 23.00	23.00 24.00	0.00 1.00	1.00 2.00	2.00 3.00	3.00 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00	
$\vartheta_D \leq -15\text{ °C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$-15\text{ °C} < \vartheta_D = -10\text{ °C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$-10\text{ °C} < \vartheta_D \leq -5\text{ °C}$	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04
$-5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 0\text{ °C}$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
$0\text{ °C} < \vartheta_D \leq 5\text{ °C}$	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
$5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 10\text{ °C}$	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,04	0,04	0,05
$10\text{ °C} < \vartheta_D \leq 15\text{ °C}$	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,04	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,05	0,06
$15\text{ °C} < \vartheta_D \leq 20\text{ °C}$	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,06	0,08	0,09	0,03	0,00	0,00	0,00	0,04	0,06	0,06	0,07
$20\text{ °C} < \vartheta_D \leq 25\text{ °C}$	0,08	0,04	0,07	0,03	0,03	0,03	0,06	0,00	0,03	0,06	0,08	0,03	0,07	0,00	0,00	0,04	0,09	0,01	0,01	0,04	0,00	0,04	0,09	0,08	0,08
$\vartheta_D > 25\text{ °C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 50: Stundenfaktoren Ackerbaubetrieb – Gesamtwärmeverbrauch, Samstags

Uhrzeit	Anteil am Tagesverbrauch																								
	6.00 7.00	7.00 8.00	8.00 9.00	9.00 10.00	10.00 11.00	11.00 12.00	12.00 13.00	13.00 14.00	14.00 15.00	15.00 16.00	16.00 17.00	17.00 18.00	18.00 19.00	19.00 20.00	20.00 21.00	21.00 22.00	22.00 23.00	23.00 24.00	0.00 1.00	1.00 2.00	2.00 3.00	3.00 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00	
$\vartheta_D \leq -15\text{ °C}$																									
$-15\text{ °C} < \vartheta_D = -10\text{ °C}$																									
$-10\text{ °C} < \vartheta_D \leq -5\text{ °C}$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05
$-5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 0\text{ °C}$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
$0\text{ °C} < \vartheta_D \leq 5\text{ °C}$	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05
$5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 10\text{ °C}$	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05
$10\text{ °C} < \vartheta_D \leq 15\text{ °C}$	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,05	0,03	0,04	0,05	0,04	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,07
$15\text{ °C} < \vartheta_D \leq 20\text{ °C}$	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,06	0,06	0,04	0,02	0,01	0,09	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,06	0,07	0,07
$20\text{ °C} < \vartheta_D \leq 25\text{ °C}$	0,00	0,06	0,00	0,06	0,00	0,06	0,06	0,24	0,00	0,00	0,06	0,00	0,06	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,12	0,06	0,00	0,06	
$\vartheta_D > 25\text{ °C}$																									

Tabelle 51: Stundenfaktoren Ackerbaubetrieb – Gesamtwärmeverbrauch, Sonntags

Uhrzeit	Anteil am Tagesverbrauch																								
	6.00 7.00	7.00 8.00	8.00 9.00	9.00 10.00	10.00 11.00	11.00 12.00	12.00 13.00	13.00 14.00	14.00 15.00	15.00 16.00	16.00 17.00	17.00 18.00	18.00 19.00	19.00 20.00	20.00 21.00	21.00 22.00	22.00 23.00	23.00 24.00	0.00 1.00	1.00 2.00	2.00 3.00	3.00 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00	
$\vartheta_D \leq -15\text{ °C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$-15\text{ °C} < \vartheta_D = -10\text{ °C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$-10\text{ °C} < \vartheta_D \leq -5\text{ °C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$-5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 0\text{ °C}$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04
$0\text{ °C} < \vartheta_D \leq 5\text{ °C}$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05
$5\text{ °C} < \vartheta_D \leq 10\text{ °C}$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05
$10\text{ °C} < \vartheta_D \leq 15\text{ °C}$	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,07	0,05
$15\text{ °C} < \vartheta_D \leq 20\text{ °C}$	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,02	0,02	0,10	0,10	0,03	0,00	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,08
$20\text{ °C} < \vartheta_D \leq 25\text{ °C}$	0,18	0,09	0,09	0,09	0,05	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,09	0,14	0,14
$\vartheta_D > 25\text{ °C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Lebenslauf von Matthias Kahle

20.04.1979	geboren in Hannover Vater: Manfred Kahle Mutter: Edda-Nora Kahle, geb. Mehlhase
1985 bis 1998	Schulbesuche: Grundschule am Bürgerpark, Wunstorf Grundschule Haste Orientierungsstufe Bad Nenndorf Hölty-Gymnasium Wunstorf Abschluss: Abitur
1998 bis 1999	Zivildienst: Diakonie-Sozialstation Meerbeck-Sülbeck
1999 bis 2006	Studium Maschinenbau Fachrichtungen Energieversorgungssysteme und Biomedizintechnik an der Gottfried-Wilhelm Leibniz Universität Hannover
2006 bis 2014	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fernwärme-Forschungsinstitut in Hannover e.V.
2010 bis 2013	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule Hannover
2014 bis 2014	Projektingenieur bei Energethik Ingenieurgesellschaft mbH
seit 2015	Projektleiter bei GWE Gesellschaft für Wärme- und Energietechnik GmbH & Co. KG