



### **Abschlussbericht**

# Wärmeplan Schleswig-Holstein

Prof. Dr. Bernd Möller, Eva Wiechers 2019

#### Gefördert durch:





In Kooperation mit:



#### Zusammenfassung

Einerseits ist die Wärmebedarfskartierung mit Hilfe lokal z.B. in Quartieren erhobener Daten zeitaufwendig und liefert fragmentierte Datensätze. Auf der anderen Seite ist die regionale Modellierung von Wärmebedarfen datenintensiv. Auch aus diesen Gründen wurde bisher kein landesweiter, flächendeckender Wärmeatlas für Schleswig-Holstein im Internet bereitgestellt. Die im EU-Projekt "Heat Roadmap Europe" entwickelte Methodik des Pan-European Thermal Atlas (Peta) verwendet einen datenarmen Ansatz, in dem die Geschossflächen von Gebäuden innerhalb von 1-Hektar-Rasterzellen modelliert und nationale Wärmebedarfe über diese Flächen verteilt werden. Dies geschieht unter Berücksichtigung klimatischer und sozioökonomischer Faktoren. Die flächendeckend modellierten Wärmebedarfsdichten dienen dann der Abgrenzung prospektiver Wärmeversorgungsgebiete sowie der Berechnung von notwendigen Investitionskosten in Wärmeverteilungsnetze.

Ein datenarmer Ansatz hat den Vorteil, dass er bereits bestehende Datensätze öffentlicher Organisationen wie der Europakommission, der Europäischen Umweltagentur und anderer nutzt und damit wertschöpfend wirkt. Gleichzeitig vermeidet ein solcher Zugang datenschutzrechtliche Herausforderungen, da alle Daten durch das 100m Raster automatisch anonym sind. Schließlich erlaubt ein datenarmer Ansatz die Gewinnung von flächendeckenden und kurzfristig verfügbaren Ergebnissen.

Ziel des Projektes "Wärmeplan Schleswig-Holstein" ist es, die Peta-Methodik an schleswig-holsteinische Verhältnisse anzupassen, um eine Alternative zur aufwendigeren Wärmebedarfskartierung aufzuzeigen und gleichzeitig ein analytisches Werkzeug für die Formulierung von Wärmeversorgungsstrategien vorzustellen.

Zunächst werden bestehende Methoden und Wärmeatlasse beschrieben, um den Wissensstand auf diesem Gebiet zu dokumentieren. Danach erfolgt die Anpassung des europäischen Modells an regionale Verhältnisse auf Basis einer ersten Validierung. Zur Validierung erfolgen Vergleiche mit den Ergebnissen der bestehenden Modellierungsmethoden, mit Daten aus den diversen Klimaschutzkonzepten im Land, sowie mit Wärmebedarfen bereit gestellt von kooperierenden Wärmeversorgungsunternehmen für größere Städte sowie für existierende Nahwärmenetze in ländlichen Räumen. Es zeigt sich, dass bis auf wenige Ausnahmen der modifizierte Peta-Ansatz zu akzeptablen Ergebnissen führt. Der Vergleich bestehender Methoden lässt erkennen, dass kommunale Wärmebedarfe im Schnitt weniger als 10% voneinander entfernt liegen.

Die regionalisierte, aber immer noch dem Ansatz der mageren Daten folgende Wärmebedarfskarte wird dann verwendet, um prospektive Nah- und Fernwärmeversorgungsgebiete zu kartieren, und deren Wärmebedarfe und mögliche Wärmenetzpotentiale zu quantifizieren und zu verorten.

Die flächendeckende Modellierung von Investitionskosten der lokal erforderlichen Wärmenetzinfrastrukturen wurde im Projekt "Heat Roadmap Europe" zum ersten Mal im größeren Maßstab erprobt. Es wurde erkennbar, dass die Berücksichtigung der Geschoßflächendichte und der Wärmebedarfsdichte ausreicht, um mittels empirisch ermittelter Kostenfunktionen die Investitionskosten pro Hektar zu berechnen. Die Anpassung der in Schweden entwickelten Methodik an schleswig-holsteinische Verhältnisse konnte durch die Einbindung des Partnerunternehmens Gottburg Energie- und Wärmetechnik realisiert werden, da es umfassende Erfahrungen mit der Etablierung von Wärmeversorgungsnetzen hatte. Das bestehende Kostenmodell wurde auf diese Weise durch die Ergänzung von wirtschaftlichen Kenngrößen aus 26 lokalen Nahwärmenetzen bereichert. Eine Schwierigkeit war

hierbei der wesentlich geringere Anschlussgrad im Vergleich zu skandinavischen Wärmenetzen. Darüber hinaus machte die geringe Ausbreitung der bestehenden Netze eine räumlich-statistische Gewinnung neuer wirtschaftlicher Kenngrößen schwierig. Dennoch konnte ein regional angepasstes Kostenmodell gewonnen werden, welches die räumliche, ressourcenökonomische Bewertung potentieller Wärmeversorgungsgebiete für Schleswig-Holstein möglich macht.

Die ressourcenökonomische Analyse erfolgt auf Basis von Angebotskurven für individuelle Wärmeversorgungsgebiete, welche das kumulative Nah- bzw. Fernwärmepotential ins Verhältnis zu den durchschnittlichen, annualisierten Investitionskosten in Wärmeverteilungsnetze stellen. Damit ist es annäherungsweise möglich, unter Vernachlässigung der Wärmegestehungskosten das lokale, ökonomische Potential für Nahwärmenetze zu bestimmen.

Es folgt eine Aufstellung von Vorschlägen für die Kartierung von Wärmequellen. Ein Praxistest wurde durch einen Workshop mit beteiligten Unternehmen und Wissenschaftlern realisiert, in dem die Ergebnisse des Projektes vorgestellt wurden, der Anwendungsbezug untersucht wurde und konkrete Anwendungsfälle diskutiert werden konnten.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in einen Online-Wärmeatlas übertragen, welcher nun für ganz Schleswig-Holstein einen Wärmeplan im Sinne einer großmaßstäblichen Kartierung von Wärmebedarfen, prospektiven Wärmenetzen und deren ressourcenökonomischer Bewertung darstellt.

## Inhalt

1	Einf	führu	ng: Wärmeplan Schleswig-Holstein	10
	1.1	Bes	chreibung des Vorhabens	10
	1.2	Auf	oau dieses Berichts	11
	1.3	Abg	renzung des Projekts	11
2	Hin	tergrı	und und Grundlagen: Wärmepläne und –atlanten	12
	2.1	Hist	orik ausgewählter Wärmepläne und –atlanten	12
	2.2	Defi	nition von Begrifflichkeiten	14
	2.3	Unt	ersuchte Wärmebedarfskarten	15
	2.3.	.1	Wärmeatlas Kiel	15
	2.3.	.2	SH-Wärmebedarfskarte von Malte Schwanebeck	15
	2.3.	.3	Pan-Europäischer Thermischer Atlas (Peta)	16
	2.3.	.4	Hotmaps Project - Open Data Set for the EU28	19
	2.3. Arg		Einsichten aus der Darstellung der vorhandenen Wärmebedarfskarten und ite für den datenarmen Modellierungsansatz	20
	2.4	Met	hoden zur Berücksichtigung der Klima-Einflüsse	20
	2.5	Wäı	meversorgung und weitere Aspekte eines Wärmeatlas'	22
3	Anp	oassu	ng der europäischen Wärmebedarfskartierungsmethode an die Region	23
	3.1	Einl	eitende Überlegungen	23
	3.2	Wäı	meplan.SH-Varianten	24
	3.2.	.1	Wohngebäude	24
	3.2.	.2	Gebäude von Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD)	24
	3.2.	.3	Weiterführende Anmerkungen	25
4	Ver	gleich	n unterschiedlicher Wärmebedarfsschätzungen	26
	4.1	Lan	desebene	26
	4.2	Krei	sebene	27
	4.3	Verl	oräuche in bestimmten Netzen	36
	4.3.	.1	Kiel	36
	4.3.	.2	Flensburg	43
	4.3.	.3	Lübeck	54
	4.3.	.4	Ausgewählte Nahwärmenetze	64
5	Fest	tlegui	ng des Wärmebedarfsmodells für Schleswig-Holstein	72

	5.1	Anpassung des Modells der Wärmebedarfskartierung	72
	5.1.	1 Wärmebedarf der Wohngebäude	72
	5.1.	2 Wärmebedarfe von Gewerbe, Handel, Dienstleistung	74
	5.2	Darstellung der WP.SH-Wärmebedarfskartierung	76
6	Мо	dellierte Wärmenetz-Gebiete	78
7	Unt	ersuchung und Anpassung des Kostenmodells	80
	7.1	Validierung der Peta4.2 –Kosten(-Methodik) mithilfe von Daten bestehender Netze	80
	7.2	Anpassung des Kosten-Modells und dessen Ergebnis	83
	7.2.	1 Implementierte Anpassung der Kosten-Methodik	83
	7.2.	2 Ergebnis der Modellanpassung	83
	7.3	Resultierende Angebotskurven	86
8	Pra	xistest	88
9	Onl	ine-Atlas und seine Bestandteile	89
	9.1	Einleitung	89
	9.2	Inhalt des Online-Atlas'	89
	9.2.	1 Willkommen-Fenster	89
	9.2.	2 Wärmebedarfsdichte	90
	9.2.	3 Wärmenetz-Kosten	91
	9.2.	4 Wärmemarkt in potentiellen Wärmenetzgebieten	91
	9.2.	5 Bioenergie-Potentiale	92
	9.2.	6 Potentielle Abwärmequellen (Peta)	93
	9.2.	7 Potentielle Abwärmequellen (Hotmaps)	94
	9.2.	8 Wärmenetzkarte Schleswig-Holstein	94
10	0 D	viskussion	96
	10.1	Wärmebedarfsmodellierung	96
	10.2	Kostenmodell	97
	10.3	Abschließende Diskussion	98
1	1 L	iteratur	100

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Definition Endenergie, Nachgefragte Energie und Nutzenergie	18
Abbildung 4-1: Modellierte Wärmebedarfe von Wohngebäuden in Endenergie aggregiert pro K bzw. kreisfreier Stadt	
Abbildung 4-2: Modellierte Wärmebedarfe von Nicht-Wohngebäuden in Endenergie aggregiert Kreis bzw. kreisfreier Stadt	t pro
Abbildung 4-3: Modellierte Wärmebedarfe von Wohn- und Nicht-Wohngebäuden in Endenergiaggregiert pro Kreis bzw. kreisfreier Stadt	
Abbildung 4-4: Geschätzte Wärmebedarfe von Wohngebäuden in Kieler PLZ-Gebieten in Ender	_
Abbildung 4-5: Abschätzungen der Wärmebedarfe von Nicht-Wohngebäuden in Kieler PLZ-Gebin Endenergie	
Abbildung 4-6: Schätzungen der Gesamt-Wärmebedarfe in Kieler PLZ-Gebieten in Endenergie .	39
Abbildung 4-7: Wärme-Endenergiebedarfe (EEB) von Wohngebäuden in Kiel	42
Abbildung 4-8: Wärme-Endenergiebedarfe (EEB) von Wohngebäuden in Flensburg	47
Abbildung 4-9: Wärme-Endenergiebedarfe vom Service-Sektor (GHD) bzw. von Nicht- Wohngebäuden in Flensburg	48
Abbildung 4-10: Gesamt-Wärme-Endenergiebedarfe in Flensburg	49
Abbildung 4-11: Schätzungen der Wärmebedarfe von Wohngebäuden in Flensburger PLZ-Gebi	
Abbildung 4-12: Schätzungen der Wärmebedarfe von Nicht-Wohngebäuden in Flensburger PLZ Gebieten in Endenergie	
Abbildung 4-13: Schätzungen der Gesamt-Wärmebedarfe in Flensburger PLZ-Gebieten in Ende	_
Abbildung 4-14: Schätzungen der Wärmebedarfe von Wohngebäuden in Lübecker PLZ-Gebiete Endenergie	
Abbildung 4-15: Schätzungen der Wärmebedarfe von Nicht-Wohngebäuden in Lübecker PLZ- Gebieten in Endenergie	58
Abbildung 4-16: Schätzungen der Gesamt-Wärmebedarfe in Lübecker PLZ-Gebieten in Endenen	gie 59
Abbildung 4-17: Wärme-Endenergiebedarfe von Wohngebäuden in Lübeck	61
Abbildung 4-18: Wärme-Endenergiebedarfe (EEB) vom Service-Sektor (GHD) bzw. von Nicht-	
Wohngebäuden in Lübeck	62
Abbildung 4-19: Gesamt-Wärme-Endenergiebedarfe in Lübeck	63
Abbildung 4-20: Wärmeatlas - Darstellung der Wärmedichten aus dem Klimaschutzteilkonzept Wärme der Stadt Lübeck	
Abbildung 4-21: Vergleich Nahwärmebedarf modelliert von Malte Schwarnebeck und Peta	65
Abbildung 4-22: Geplante und geschätzte Wärmebedarf von Nahwärme-Netzen	68
Abbildung 4-23: Untersuchte, reale Wärmenetze und von Peta4.2 modellierte Wärmenetze in Nordfriesland	70
Abbildung 4-24: Gesamt-Wärme-Endenergiebedarfe in einem Ausschnitt von Nordfriesland	
Abbildung 5-1: Exemplarischer Auszug aus der Wärmebedarfskartierung von WP.SH für Kiel Abbildung 6-1: Vergleich der modellierten potentiellen Wärmenetzgebiete am Beispiel von	
Flonchurg	70

Abbildung 7-1: Investitionskosten-Funktion nach Persson und Werner	81
Abbildung 7-2: Leitungsdurchmesser in Abhängigkeit von der linearen Wärmedichte	82
Abbildung 7-3: Effektive Breite	83
Abbildung 7-4: Berechnete Investitionskosten von Wärmeverteilungsnetzen (WP.SH)	85
Abbildung 7-6: Grenzkosten und durchschnittliche Kosten und kumulativer Wärmebedarf	86
Abbildung 9-1: Übersicht: Wärmeatlas Schleswig-Holstein 1.0 (online)	89
Abbildung 9-2: Willkommen-Fenster vom Wärmeatlas Schleswig-Holstein 1.0	90
Abbildung 9-3: Wärmebedarfs-Layer des Online-Atlas'	90
Abbildung 9-4: Wärmenetz-Investitionskosten-Layer des Online-Atlas'	91
Abbildung 9-5: Layer: Potentielle Wärmenetzgebiete	92
Abbildung 9-6: Wärmemarktübersicht und Angebotskurve im Pop-up-Fenster des "Potentielle	
Wärmenetze"-Layers	92
Abbildung 9-7: BioBoost-Bioenergie-Layer	93
Abbildung 9-8: Layer mit Abwärme-Potentialen (Peta)	93
Abbildung 9-9: Layer mit Abwärme-Potentialen (Hotmaps)	94
Abbildung 9-10: Informationen der Wärmenetz-Karte Schleswig-Holstein	95

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 2-1: Beispiele von Online-Wärmeatlanten	13
Tabelle 2-2: Methodik des Wärmeatlasses der Stadtwerke Kiel	15
Tabelle 2-3: HRE4-Umrechnungsfaktoren: Endenergie - Nachgefragte Energie	18
Tabelle 2-4: Klassifizierung von Wärmebedarfsklassen	19
Tabelle 2-5: Heizgradtage in Deutschland und Schleswig-Holstein	21
Tabelle 2-6: Zeitreihe Heizgradtage in Schleswig-Holstein (2008-2017)	21
Tabelle 3-1: Endenergie-Wärmebedarfe von Wohngebäuden für Wärmeatlas SH	24
Tabelle 3-2: Endenergie-Wärmebedarfe von GHD-Gebäuden für Wärmeatlas SH	25
Tabelle 3-3: Endenergie-Wärmebedarfe von Wohn- und GHD-Gebäuden für Wärmeatlas SH	25
Tabelle 4-1: Vergleich in Endenergie auf Landesebene	26
Tabelle 4-2. Kreise in Schleswig-Holstein: Vergleich diverser Schätzungen des Gesamt-Wärmeb	
Tabelle 4-3: Kreise in Schleswig-Holstein: Vergleich diverser Schätzungen des Wärmebedarfs von Wohngebäuden	
Tabelle 4-4: Kreise in Schleswig-Holstein: Vergleich diverser Schätzungen des Wärmebedarfs von Nicht-Wohngebäuden	
Tabelle 4-5: Quellenangaben für die Werte aus den "Klimaschutz-Konzepten"	31
Tabelle 4-6: Schätzungen des Wärmebedarfs von Wohngebäuden im Stadtgebiet Kiel in GWh Endenergie	40
Tabelle 4-7: Schätzungen des Wärmebedarfs von Wohn- und Service-Gebäuden im Stadtgebie in MWh Endenergie	
Tabelle 4-8: Schätzungen der Wärmebedarfe von Wohngebäuden in Kieler PLZ-Gebieten in M\ Endenergie	
Tabelle 4-9: Schätzungen des Wärmebedarfs von Haushalten in Flensburg in GWh Endenergie.	44
Tabelle 4-10: Schätzungen des Wärmebedarfs von Haushalten und Service in Flensburg in GWI Endenergie	
Tabelle 4-11: Schätzungen der Wärmebedarfe von Wohngebäuden und GDH in Flensburger PL Gebieten in MWh Endenergie	
Tabelle 4-12: Schätzungen des Wärmebedarfs von Wohngebäuden im Lübecker Stadtgebiet in Endenergie	
Tabelle 4-13: Schätzungen des Gesamtwärmebedarfs von Wohngebäuden und Nicht- Wohngebäuden im Lübecker Stadtgebiet in GWh Endenergie	
Tabelle 4-14: Schätzungen des Wärmebedarfs von Wohn- und Nicht-Wohngebäuden in Lübeck PLZ-Gebieten in MWh Endenergie	ker
Tabelle 4-15: Vergleich von geplantem und geschätztem Wärmebedarf in Nahwärme-Netzen	
Tabelle 4-16: Anteile des Service-Sektors am Wärmebedarf in Nahwärme-Netz-Gebieten	
Tabelle 5-1: Durchschnittliche Wohnfläche pro Person differenziert nach Gebäudetyp	
Tabelle 5-2: Spezifischer Wärmebedarf und Nutzfläche differenziert nach Gebäudetyp in SH	
Tabelle 6-1: Mindest-Wärmebedarf für Wärmenetze	
Tabelle 7-1: Formelzeichen-Erläuterungen	
Tabelle 7-2: Investitionsheisniel	84

#### Abkürzungsverzeichnis

ArGe Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e. V. BMUB ehemaliges Bundesministerium für Umwelt und Bauen

BMWi Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

CAD Computer-Aided-Design

CAU Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Dtl. Deutschland

DWD Deutscher Wetterdienst

EEB bzw. EEV Endenergiebedarf bzw. -verbrauch

EHI European Heating Index
ESM European Settlement Map

EU Europäische Union

EUF Europa-Universität Flensburg

FED Final energy demand = Endenergiebedarf

FL Flensburg

GHD Gewerbe, Handel, Dienstleistung
GHS(L) Global Human Settlement (Layer)

GJ Gigajoule

GWh Gigawattstunden

ha Hektar

HRE4 Heat Roadmap Europe-Project, Laufnummer 4

km² Quadratkilometer kWh Kilowattstunde

KWK Kraftwärmekopplung

LiDAR Light Detection And Ranging, eine Methode zur optischen Fernmessung

LoD Level of Detail

LVermGeo Landesamt für Vermessung und Geoinformation MFH Mehrfamilienhäuser, englisch: multi-family houses

MWh Megawattstunden

NUTS Systematik der Gebietseinheiten für die Statistik,

französisch: "Nomenclature des unités territoriales statistiques"

osm Open Streetmap

Peta Pan-Europäischer thermischer Atlas

S. Seite

SFH Einfamilienhäuser, englisch: single family houses

SH Schleswig-Holstein

TJ Terajoule

WP.SH Wärmeplan Schleswig-Holstein-Projekt

#### 1 Einführung: Wärmeplan Schleswig-Holstein

#### 1.1 Beschreibung des Vorhabens

Die europäische Forschungsinitiative Heat Roadmap Europe arbeitet seit 2012 an der Formulierung von Wärmeversorgungsstrategien für Europa. Sie untersucht den in Bezug auf Datenlage und systematischer Analyse bisher übergangenen Wärmesektor, der signifikante Potentiale der Energieeffizienz im Endenergiebereich sowie der strukturellen Effizienz bietet. Abwärme und regenerative Wärmequellen können zum Beispiel kosteneffektiv in Nah- und Fernwärmenetzen genutzt werden. Allerdings fehlt es an quantifizierten und geografisch bestimmten Potential-Abschätzungen für solche Effizienzmaßnahmen. Eine lokale Erfassung ist mit großem Aufwand und hohen Kosten verbunden, und auch die Frage des Datenschutzes stellt sich bei der Erstellung von Wärmekatastern. Als mögliche Lösung bietet sich ein datenarmer Ansatz an, der es mittels generischer und frei verfügbarer Daten erlaubt, belastbare Aussagen für die landesweite Planung zu machen.

Der für die Mitgliedsländer der Europäischen Union (EU) entwickelte Pan-Europäische Thermische Atlas (Peta) wurde im Rahmen dieses Projektes für die Anwendung innerhalb Schleswig-Holsteins weiterentwickelt.

Die Peta-Methode basiert auf der kartografischen Modellierung dreierlei geografisch abbildbarer Phänomene: der Wärmebedarfsdichte, der Investitionskosten für die Wärmenetz-Infrastruktur, sowie der Demarkation möglicher Versorgungsgebiete. Hinzu kommen verfügbare Energiequellen und Informationen über bestehende Fernwärmesysteme. Durch die räumliche Verschneidung von technischen und ökonomischen Wärmenetz-Potentialen, Kosten und Grenzen lassen sich lokale Angebotskurven erstellen, welche Aussagen über kumulative Potentiale und marginale Kosten des Wärmenetz-Ausbaus erlauben. Durch die Verbindung mit verfügbaren Energiequellen und deren geografische Allokation lassen sich lokale Energiemixe bestimmen. Die Peta 4-Methode ist anwendungsorientiert, indem sie die für die Energiesystemanalyse nötigen Verschneidungen von Potentialen mit geografischer Lage und mit resultierenden Kosten liefert.

Bekannte Methoden wie die quartiersweise Kartierung oder die Modellierung mit hochaufgelösten Geodaten bieten bisher keine praktischen Lösungen für die Herausforderungen der schnellen und flächendeckenden Abschätzung von technisch-wirtschaftlichen Wärmeversorgungsstrategien. Gegenstand des Projektes Wärmeplan Schleswig-Holstein ist es daher, eine Alternative zu erproben, welche flächendeckend, reduziert auf Basisdaten und mittels einer konsistenten Methode der Potentialabschätzung ein Screening der Möglichkeiten für Fern- und Nahwärmenetze erlaubt.

Die für Schleswig-Holstein regionalisierte Version von Peta 4 behält daher die auf europäischer Ebene entwickelte und bewährte Methodik bei. Im Rahmen des Entwicklungsprozesses wurde sie aber zunächst einer Validierung und einem lokalen Anwendungstest unterzogen: lokal wurden Ergebnisse aus Peta 4.2 mit vorhandenen Daten, Studien und Expertenaussagen verglichen. Daraufhin wurde untersucht, welche Erweiterungen und Änderungen in der Datengrundlage notwendig bzw. möglich sind, sowie welche Geodaten und Energiedaten regional vorhanden sind. Mögliche Verbesserungen waren die Regionalisierung der Methode der Wärmebedarfsdichtenberechnung, welche in Peta 4.2 wegen fehlender kleinräumiger Daten über die Gebäudestruktur auf geostatistischen Methoden und nationalen Daten beruht, sowie eine Anpassung der Kostenfunktionen der Fernwärmenetzinfrastruktur an regionale Gegebenheiten. Schließlich wurden die Ergebnisse mit lokalen Studien

verglichen und validiert. Zuallerletzt wurde die regionale Version, in deutscher Sprache, als Online-Screening-Werkzeug zugänglich gemacht, wie schon Peta 4 (Europa-Universität Flensburg et al., 2018): <a href="https://heatroadmap.eu/peta4/">https://heatroadmap.eu/peta4/</a>. Der Wärmeatlas Schleswig-Holstein ist unter folgender Adresse erreichbar: <a href="https://tinyurl.com/WPSH-EUF">https://tinyurl.com/WPSH-EUF</a>.

Die Aufgaben des entwickelten Wärmeatlases für Schleswig-Holstein liegen einerseits in der Visualisierung des Status-Quo im Wärmemarkt sowie der zukünftigen Möglichkeiten, um etwa Fragen nach der möglichen CO<sub>2</sub>-Einsparung und der Machbarkeit von lokalen Wärmenetzen zu beantworten, aber auch in der bildhaften Darstellung des Wärmeverbrauchs auf digitalen Karten mit kontextbezogenen Hintergründen. Andererseits bietet sich durch die geografisch-quantitative Methodik ein Reichtum an entscheidungsrelevanten Daten für Projektentwickler, die Kommunen und die Forschung.

An diesem Projekt waren die Europa-Universität Flensburg und als Industriepartner das Unternehmen Gottburg Energie- und Wärmetechnik GmbH & Co. KG aus Leck beteiligt. Finanziell ermöglicht wurde dieses Projekt durch die HWT-Projektförderung der Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein (EKSH).

#### 1.2 Aufbau dieses Berichts

Innerhalb diese Projektberichts wird zunächst der Hintergrund von Wärmeatlanten näher erläutert, dabei wird auf die verschiedenen vorhandenen Wärmebedarfsdichten-Kartierungen eingegangen. Anschließend werden Anpassungsmöglichkeiten für die Wärmebedarfsdichten-Berechnung aufgezeigt. Darauf folgt der Vergleich verschiedener Wärmebedarfsberechnungen mit möglichen Modellanpassungen. Hier weicht der Aufbau des Berichts von der Abfolge der Projekt-Arbeitspakete ab und stellt eine Zusammenfassung dar. Im Anschluss daran werden das neue Wärmebedarfsdichten-Modell und die Ermittlung der potentiellen Wärmenetzgebiete vorgestellt. Es folgt die Validierung des Kosten-Modells. Am Ende des Berichts werde Erfahrungen aus einem Praxisworkshop wiedergegeben und erweiterte Analysen in Richtung lokaler Wärmeversorgungsstrategien beschrieben. Der Online-Atlas mit seinen Layers wird erläutert, bevor der Bericht mit einer Diskussion der Ergebnisse abschließt.

#### 1.3 Abgrenzung des Projekts

Bei den hier vorgestellten Methoden handelt es sich um Modelle, mit anderen Worten um Abschätzungen der Wärmebedarfsverteilung und der daraus resultierenden Wärmenetz-Kosten und -Ausbaupotentiale. Der vorgestellte Wärmeatlas ist daher kein Wärmekataster, welches eine verbindliche, in Umfang und Lage dem jetzigen Zustand entsprechende Wiedergabe des Wärmebedarfes und der Wärmenetze enthält. Trotz einer Regionalisierung ist es nicht möglich und nicht angestrebt alle lokalen Gegebenheiten abzubilden, wenn dafür punktuell korrigierend in die Methodik eingegriffen werden müsste, um eine lokale Verbesserung der Ergebnisse zu erreichen. Im Bereich der Wärmebedarfsdichten-Ermittlung gibt es große Unsicherheiten, welche die Bewertung der Methoden erschwert. Daher ist das Projekt als Versuch zu verstehen, unter Beibehaltung des Magere-Daten-Ansatzes möglichst anwendungsorientierte Ergebnisse zu liefern.

#### 2 Hintergrund und Grundlagen: Wärmepläne und -atlanten

#### 2.1 Historik ausgewählter Wärmepläne und -atlanten

Seit den Ölkrisen der 1970er Jahre hat es Bemühungen gegeben, den Wärmesektor als geografische Einheit zu verstehen und planerisch zu erfassen. Dies ergab sich aus der hohen Abhängigkeit des Wärmesektors von importiertem Heizöl, welches in den 1960er Jahren zum vorherrschenden Energieträger des Wärmesektors wurde. Unter den möglichen Lösungen stellt die Technologie der Fernwärme die höchsten Anforderungen an die Informationen über die geografische Verteilung des Wärmebedarfes und seiner Intensität (Wärmebedarfsdichte). Viele Städte erarbeiteten in den späten 1970er und 1980er Jahren Wärmeatlanten, die den Wärmebedarf nach Wärmeerzeugungstechnologie und Verbrauchertyp quantifizierten. Ziel war es, Alternativen zu individueller Heizung mit Öl zu finden. In den 1990er Jahren forderten Aktionsprogramme wie die Agenda 21 der Vereinten Nationen zum lokalen Handeln im Bereich der nachhaltigen Energieversorgung auf, und Technologien wie die Kraft-Wärmekopplung gewannen an Bedeutung. Hierfür war es nötig, lokale Wärmemärkte zu quantifizieren. Auch für Schleswig-Holstein wurde in dieser Zeit ein Wärmeatlas entwickelt, der allerdings wenig Einfluss auf die Landes-, Regional- und Lokalplanung hatte und im Zuge der Liberalisierung der Energiemärkte Ende der 1990er fast in Vergessenheit geriet. In Dänemark dagegen gibt es seit 1979 ein Gesetz, welches Kommunen und Regionen verpflichtet, Wärmeversorgungsgebiete nach Versorgungsart zu kartieren (Christensen et al., 1982). Seit 1990 erfolgt die planerische und ordnungsrechtliche Einteilung von Siedlungsflächen in Fernwärme, Erdgas und andere Versorgungsarten nach gesamtwirtschaftlichen Kriterien, nach denen jedes Wärmeversorgungsprojekt einzeln bewertet werden muss.

Vor dem Hintergrund des Klimawandels und der Endlichkeit der fossilen Energieträger werden die Umstellung auf erneuerbare Energien und die Steigerung der Energieeffizienz zunehmend thematisiert und vorangetrieben. In Deutschland und auch in Schleswig-Holstein werden ca. 50% des Endenergieverbrauchs für Raum- und Prozesswärme einschließlich Warmwasser verwendet. Über 40% des bundesweiten Endenergieverbrauchs werden den Gebäuden der Haushalte und des Gewerbe-Handel-Dienstleistungssektors zugerechnet. Diese Angaben (siehe Schleswig-Holsteinischer Landtag, 2018, S. 80) zeigen die Bedeutung des Wärmesektors für die Energiewende. Im Vergleich zur Energiewende bei der Stromerzeugung ist die Umstellung auf erneuerbare Energien bei der Wärme nicht sehr weit vorangeschritten. In Schleswig-Holstein wurden im Jahr 2016 rund 14% des Wärme-Endenergieverbrauchs mit erneuerbarer Wärme gedeckt (Versorgungsbeitrag, siehe Schleswig-Holsteinischer Landtag, 2018, S. 140). Der Nah- und Fernwärmeanteil in Schleswig-Holstein lag 2015 dabei bei ca. 13% des Endenergieverbrauchs (Schleswig-Holsteinischer Landtag, 2018, S. 80). Der Anteil der Kohle als Energieträger für die Fernwärmeerzeugung ist in den letzten Jahren gesunken, lag aber 2016 noch vor Erdgas und Biogas (Schleswig-Holsteinischer Landtag, 2018, S. 135). Der Kohleausstieg betrifft die drei großen KWK-Kraftwerke in Schleswig-Holstein und ist auf dem Weg bzw. geplant (siehe unter anderem Schleswig-Holsteinischer Landtag, 2018, S. 134). Deshalb wird der Anteil von Kohle am Fernwärme-Mix sinken, während der Anteil von Erdgas voraussichtlich steigen wird.

Die sogenannte Wärmewende kann mit folgenden beiden Strategien/Herangehensweisen umgesetzt werden:

• individuellen Lösungen aus Passivhaus- und Niedrigenergiebauweise, Wärmepumpen und regenerativer Wärme-Erzeugung (bei Neubau und Sanierung) auf der einen Seite,

 sowie der moderaten Energieeffizienz im Gebäudebestand und der Bereitstellung von Fern- und Nahwärme zunehmend aus Abwärme und aus regenerativen Energiequellen, vorwiegend mit niedriger Enthalpie wie der Solarthermie und Geothermie, auf der anderen Seite.

Wärmenetze, die mit niedrigen Temperaturen betrieben werden (sogenannte Wärmenetze 4.0), sollen es zukünftig ermöglichen, durch niedrige Vor- und Rücklauftemperaturen Abwärme (zum Beispiel von industriellen Prozessen oder der Stromerzeugung (Kraft-Wärmekopplung)) und erneuerbare Wärme aus Niedrigenthalpie-Quellen für die Beheizung von Gebäuden und für die Warmwasser- und Prozesswärmeerzeugung einzusetzen. Darüber hinaus bietet die Kopplung von Strom-, Wärme- und Verkehrssektor Synergieeffekte beispielweise bei der Speicherung von überschüssigem Strom als Wärme. Allerdings erfordert diese umfassende "Wärmewende" den Ausbau einer Wärmeversorgungsinfrastruktur in Form von Fern- und Nahwärmenetzen in Städten und im ländlichen Bereich. Damit der Bau und der Ausbau von Wärmenetzen (ökonomisch) sinnvoll sind, ist eine gewisse Wärmebedarfsdichte Vorsetzung. Außerdem ist planerisches Handeln und die Einbeziehung der lokalen Akteure wichtig, um Gebäudesanierungsmaßnahmen und Infrastrukturmaßnahmen aufeinander abzustimmen und um mindestens vertretbare Wärmenetz-Anschlussgrade zu erzielen.

Wissen über die Wärmebedarfsdichten und die potentiellen Versorgungsgebiete fehlt auf Landesniveau. Weder Wirtschaft noch Politik haben Werkzeuge zur Hand, welche es erlauben, die Konsequenz energiepolitischer Entscheidungen für den Wärmesektor insgesamt und flächendeckend zu bewerten.

Tabelle 2-1: Beispiele von Online-Wärmeatlanten

Land bzw. Region	Link	Kommentar
Europa	https://www.hotmaps.hevs.ch/map	
14 EU-Staaten	https://heatroadmap.eu/peta4/	
Österreich	http://www.austrian-heatmap.gv.at/karte/	
Luxemburg	www.heatmap.lu	Außer Funktion
Irland	http://maps.seai.ie/heatdemand/	
Dänemark	http://maps.plan.aau.dk/maps/DKfieHA.php	
Vereinigtes Königreich	https://www.cse.org.uk/projects/view/1183	Außer Betrieb
Schottland	http://heatmap.scotland.gov.uk/	
London	https://maps.london.gov.uk/heatmap/	
Baden-Württemberg	https://www.energieatlas-bw.de/	
Nordrhein-Westfalen	https://www.energieatlas.nrw.de/site/waerme	
Saarland	http://geoportal.saarland.de/portal/de/fachanwen-	
	dungen/waermekataster-saarland.html	
Hamburg	https://geoportal-hamburg.de/waermekataster/	

In mehreren Ländern und Regionen (siehe dazu auch Tabelle 2-1 und Abschnitt 2.3) gab es immer wieder Bestrebungen, den durch individuelle Entscheidungsträger und divergierende Beweggründe zuhöchst heterogenen Wärmesektor zu erfassen. Die Energieeffizienz-Richtlinie der EU (2012, Artikel 14) schreibt mittlerweile den Mitgliedsländern der EU vor, Wärmebedarf und Wärmeversorgungsstrategien zu kartieren. Das ist allerdings noch nicht gleichbedeutend mit ihrer europaweiten Verfügbarkeit. In den letzten Jahren haben sich die durch internationale Organisationen entwickelten und frei verfügbaren Geodaten in Umfang und Qualität stark verbessert und so die Kartierung/Modellierung des Wärmesektors erleichtert. Gleichzeitig hat die Liberalisierung des Energiesektors zur weiteren Zersplitterung von Entscheidungsprozessen, der datenerfassenden und –haltenden Stellen und

der verfügbaren Daten, insbesondere der Verbrauchs- und Installationsdaten, beigetragen. Im Rahmen von Forschungsprojekten wie Stratego, Hotmaps und Heat Roadmap Europe hat man sich der europaweiten Kartierung des Wärmemarktes mithilfe der verfügbaren Daten gewidmet. Außerdem gibt es nichtöffentlich zugängliche Atlanten für Deutschland und Teilgebiete davon, wie zum Beispiel den Wärmeatlas Deutschland 2.0 der Firma geomer (kein Jahr) und den Wärmeatlas Kiel der Stadtwerke Kiel.

Für Schleswig-Holstein gab es bisher keinen Online-Wärmeatlas. Es wird aber eine Wärmenetz-Karte und Liste zur Verfügung gestellt (siehe Landesportal Schleswig-Holstein, 2017).

#### 2.2 Definition von Begrifflichkeiten

Die Begrifflichkeiten Wärmekataster, Wärmeatlas und Wärmeplan werden im vorliegenden Bericht parallel verwendet, lassen sich aber wie folgt differenzieren:

- Ein Wärmekataster verortet räumlich erhobene Daten und stellt sie mittels geografischer Informationssysteme (GIS) dar. Fokus ist also die Sammlung, das Management und die Visualisierung erhobener Daten. Diese kann aus technischen und datenschutzrechtlichen Gründen auf mehreren Aggregationsniveaus geschehen. Das Problem ist üblicherweise, dass detaillierte Daten entweder nicht vorhanden sind oder nicht im Einzelnen dargestellt werden können.
- Ein Wärmeatlas ist eine Sammlung thematischer Layers (visualisierter geografischer Datensätze) und Karten, welche zueinander in einem thematischen oder zweckgerichteten Zusammenhang stehen. Dieser Zusammenhang ist oft schwer zugänglich, da ein Wärmeatlas oft aus mehreren mehr oder weniger zufällig vorhandenen Datenquellen zusammengestellt wird. Im Folgenden wird der Begriff Wärmeatlas (mit Ausnahme des Wärmeatlases der Stadtwerke Kiel) für die methodisch geordnete Darstellung kohärenter, thematischer Layers verwendet, welche Wärmenachfrage, Ausbaukosten für Wärmeverteilnetze, sowie potentielle oder bestehende Versorgungsgebiete umfassen.
- Der Begriff Wärmeplan ist der Kartografie entlehnt, wo ein Plan eine großmaßstäbige und detailreiche Karte beschreibt, welche Objekte ohne Generalisierung oder Vereinfachung dargestellt. Ein Wärmeplan enthält also für eine ganze Region die für die Wärmeplanung erforderlichen Datengrundlagen ohne, dass diese aus Datenschutzgründen etc. abstrahiert werden müssen. In Dänemark wird der Begriff Wärmeplan (varmeplan) auch für die planerische Handlungsempfehlung verwendet, etwa in Form eines kommunalen Wärmeversorgungsplanes. Wegen der fehlenden Tradition für die Planung der Wärmeversorgung in Deutschland wird der Begriff Wärmeplan im Folgenden ausschließlich für die kartografische Definition verwendet.
- Nachfolgend beschreibt der Begriff Wärmeplanung den Prozess der Planung von Nah- und Fernwärmenetzen, darunter die Abschätzung des Wärmebedarfes, der Ausbaukosten für Wärmeversorgungsinfrastrukturen, der Abgrenzung möglicher Versorgungsgebiete, des Zuganges zu möglichen Wärmequellen, sowie der Koordination zwischen Beteiligten eines Wärmeversorgungsprojektes. Diese Tätigkeiten finden überwiegend in spezialisierten Planungsbüros statt. Man kann sich aber vorstellen, dass ein bereitgestellter Online-Wärmeatlas auf mehreren Ebenen Verwendung finden kann: bei den Bürgern, lokale Initiativen, in den Branchen des Wärmesektors, sowie bei den politischen und administrativen Einheiten auf lokaler und regionaler Ebene.

#### 2.3 Untersuchte Wärmebedarfskarten

Im vorliegenden Bericht werden Wärmebedarfsschätzungen, die sich auf Schleswig-Holstein bzw. Teile davon beziehen, untersucht. Das sind Peta 4.2 bzw. die aktuelle Version Peta 4.3 und eine Beta-Version von Hotmaps sowie die Masterarbeit von Malte Schwanebeck, die Grundlage für Weiterentwicklungen im Angus II Projekt ist, und der Wärmeatlas der Stadtwerke Kiel.

#### 2.3.1 Wärmeatlas Kiel

Unmittelbar nach Beginn des Projektes wurde Kontakt zu den Stadtwerken Kiel aufgenommen, die für interne Zwecke sowie für die städtische Planung einen Wärmeatlas entwickelt haben. Für diesen Wärmeatlas wurden den Stadtwerken vorliegende faktische Verbrauchsdaten normalisiert, datentechnisch aufbereitet, bei Lücken durch Modellierung ergänzt und geografisch dargestellt. Der nichtöffentlich zugängliche Wärmeatlas der Stadtwerke Kiel bezieht sich auf die Kieler Wohngebäude, die

- von den Stadtwerken Kiel mit Fernwärme,
- von den Stadtwerken Kiel mit Gas,
- von den Stadtwerken Kiel mit Fernwärme und Gas oder
- sonstig versorgt werden.

Der Wärmeatlas ermittelt den Wärmebedarf je nach Datenverfügbarkeit aus Verbrauchsdaten der vergangenen 10 Jahre bzw. modelliert diesen für Gebäude, bei denen keine Verbrauchsdaten vorliegen (siehe dazu auch Tabelle 2-2). Die Grundlage für diese Schätzungen basierend auf Verbrauchsdaten bilden die 10-Jahres-Mittelwerte in einem "Sicherheitsbereich", um Fehlwerte durch Ablesefehler, Zahlendreher und Zählerüberläufe etc. zu eliminieren. (Stadtwerke Kiel, Mail von Peer Bittner, 15.02.2018)

Tabelle 2-2: Methodik des Wärmeatlasses der Stadtwerke Kiel

Modellierter Wärmebedarf?	Bemerkung
Nein → Ermittelt aus Verbrauchsdaten	Wärmebedarf wird aus den Verbrauchsdaten ermittelt. Keine Modellierung des Wärmebedarfs.
Nein → Weiterversorgung ohne Daten	Gebäude wird über ein anderes Gebäude weiterversorgt. Allerding fehlen für dieses Gebäude wichtige Parameter, um den Anteil am Gesamtwärmebedarf zu ermitteln. Es kann kein gebäudespezifischer Wärmebedarf ermittelt werden. Keine Modellierung des Wärmebedarfs.
Ja	Für dieses Gebäude sind keine Verbrauchsdaten bekannt. Wärmebedarf wird modelliert.
Ja → Weiterversorgung	Das Gebäude wird weiterversorgt. Das "Versorgungsge- bäude" trägt die summierten Wärmebedarfe aller weiter- versorgten Gebäude. Anteilige Berechnung über die Wohnfläche der Gebäude.
Keine Aussage zum Wärmebedarf möglich	Aufgrund diverser Ursachen ist keine Aussage bezgl. des Wärmebedarfs möglich

Quelle: Stadtwerke Kiel, Mail von Peer Bittner, 15.02.2018

#### 2.3.2 SH-Wärmebedarfskarte von Malte Schwanebeck

Im Rahmen seiner Masterarbeit an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) hat Malte Schwanebeck (2016) den witterungsbereinigten Wärmebedarf von Wohn- und Nicht-Wohngebäu-

den für Raumwärme und Warmwasser in Schleswig-Holstein modelliert. Dabei wurde die Energiebezugsfläche mithilfe des landesweiten, LiDAR-basierten 3D-Gebäudemodells ("Level of Detail 1" (LoD1), aufbauend auf dem Amtlichen Liegenschaftskataster Informationssystem (ALKIS)) des Landesamtes für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein (LVermGeo) ermittelt. Anschließend wurde der Wärmebedarf der Ein- und Zweifamilienhäuser sowie der Mehrfamilienhäuser unter Verwendung von Endenergieverbrauchskennwerten (Durchschnitt der drei Heizperioden 2007 bis 2009) aus der Gebäudetypologie Schleswig-Holstein der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e. V. (ArGe) aus dem Jahr 2012 (S. 129) abgeschätzt. Der Wärmebedarf für die Nicht-Wohngebäude, identifiziert durch die Angabe entsprechender Gebäudefunktionen im 3D-Gebäudemodell, wurde mithilfe der Energieverbrauchskennwerte aus der Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchswerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand des BMWi und BMUB aus dem Jahr 2015 errechnet. Abschließend erfolgte die Aggregation im Raster. Hintergrund dieser Wärmebedarfsmodellierung war die Ermittlung von Gebieten, die sich aufgrund ihrer Wärmebedarfsdichte potenziell für Wärmenetze eignen, sowie die Identifikation von landesplanerischen Schwerpunkträumen für die Nutzung der tiefen, hydrothermalen Geothermie in Wärmenetzen. Siehe Schwanebeck (2016). Die Wärmebedarfskarte ist zurzeit nicht öffentlich zugänglich. Sie wird aber im Rahmen des Projektes Angus II weiterentwickelt und nach Möglichkeit veröffentlicht.

#### 2.3.3 Pan-Europäischer Thermischer Atlas (Peta)

Im Rahmen der Heat Roadmap Europe (HRE)-Projekt-Reihe wurde der Pan-Europäische Thermische Atlas (Peta) ab 2011 in Kooperation zwischen der Universität Aalborg (Dänemark) und der Universität Halmstad (Schweden) entwickelt. Die Europa-Universität Flensburg (EUF) ist federführend seit 2013 an der Weiterentwicklung von Peta beteiligt. Zurzeit liegt er in der Version 4.3 vor. Die Versionen 4.2 und 4.3 sind in Bezug auf Wärmebedarfsdichten und die Demarkation von potentiellen Wärmenetzen identisch; Version 4.3 enthält jedoch weitere und aktualisierte Layers. Die Versionen 4.x wurden im Rahmen des EU Horizon2020-Projekts "Heat Roadmap Europe 4" (HRE4) entwickelt und umfassen 14 Mitgliedsstaaten der EU, darunter auch Deutschland. Wie eingangs bereits beschrieben, enthält der Atlas Einschätzungen zu Wärmebedarfsdichten, Investitionskosten für die Wärmenetz-Infrastruktur und zu möglichen Versorgungsgebieten, verfügbaren Energiequellen sowie Informationen über bestehende Fernwärmesysteme. Peta war in der Version 3 im Jahr 2015 der erste EUweite Wärmeatlas mit einer geografischen Auflösung von 100mx100m (1 Hektar) Gitterzellengröße. Als methodisch aufgebauter Wärmeatlas umfasst Peta 4 ein räumlich kohärentes Modell zur Ermittlung von Wärmebedarfen, struktureller Energieeffizienz, Investitionskosten für Wärmeversorgungsnetze, möglichen, geografisch verbundenen Wärmeversorgungsgebieten und deren ökonomischem Potential, sowie von lokalen Wärmeversorgungsstrategien. Letztere beruhen auf der geografischen Allokation verfügbarer Wärmequellen. Siehe Möller et al. (2018) Möller et al. (2019).

Weil es innerhalb Europas keine in Umfang, Qualität und Methode einheitliche Erfassung des Wärmebedarfes von Gebäuden gibt, wurde für die Entwicklung von Peta ein datenarmer Ansatz gewählt, der auch "Lean Data" genannt werden kann. Das Prinzip Magerer Daten versucht, die extensive Sammlung von Daten des Gebäudebestandes und der individuellen Wärmebedarfe zu umgehen, indem der Gebäudesektor als eine Verteilung von Geschossflächen verschiedener Gebäudetypen pro Hektar Landfläche modelliert wird.

Die Wärmebedarfsdichten basieren daher auf mithilfe von multipler Regressionen ermittelten Geschossflächen-Schätzungen, um die Problematik fehlender bzw. nichtöffentlich zugänglicher und unterschiedlich erfassten Daten über den Gebäudebestand Europas zu umgehen. Die Geschossfläche wurde als Funktion von Bevölkerungsdichte, lokalem Bruttoinlandsprodukt, Bodenversiegelung und Bebauungsgrad sowie aus daraus abgeleiteten Größen beschrieben und auf diese Weise für bebaute Hektarzellen quantifiziert. Nationale Wärmebedarfe wurden mittels des FORECAST-Modells (Fleiter et al., 2017b) am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung für alle Sektoren und Mitgliedsstaaten der EU modelliert. Die Verteilung der nationalen Wärmebedarfe erfolgte dann auf Grundlage der Geschossflächen-Raster-Daten unter zur Hilfenahme des Bevölkerungsrasters sowie der nationalen Pro-Kopf-Wohnflächen, die aus Zensus-Daten ermittelt wurden. Siehe auch Persson et al. (2017). Der wesentliche Vorteil dieser Methode besteht darin, dass keine lokalen Daten zum Gebäudebestand gesammelt werden müssen, sondern dass aus Fernerkundung stammende und für ganz Europa verfügbare Daten genutzt werden. Darüber hinaus sind die resultierenden Wärmebedarfskarten und deren Methodik über Ländergrenzen hinweg anwendbar, und der Wärmeatlas liefert konsistenten Input für Energiesystemmodelle etc. Vorhersehbare Nachteile sind, dass konkrete Anwendungen stets eine lokale Validierung erfordern und dass vorhandene lokale Daten besserer Qualität nicht eingebracht werden können. Allerdings haben Anwendungen in verschiedenen Regionen Europas bisher keine gravierenden Fehlabschätzungen aufgezeigt und auch für vergleichbare Methoden gilt, dass lokale Wärmeversorgungsprojekte stets eine Validierung der Wärmemengen erfordern.

#### Endenergie, Nachgefragte Wärme und Nutzenergie

Im vorliegenden Bericht werden die Definitionen von Endenergie (Final Energy), "nachgefragter Energie" (Delivered Energy) und Nutzenergie (Useful energy) vom Heat Roadmap Projekt übernommen. Die Bezeichnung "nachgefragte Energie" beschreibt die Wärmemengen, die vom Heizungssystem bzw. Wärmespeicher an das Wärmeverteilungssystem im Gebäude geliefert wird. Im Gegensatz zur Nutzenergie beinhaltet die "nachgefragte Wärmemenge" folglich auch die Wärme, die innerhalb des Gebäudes bei der Wärmeverteilung verloren geht (Siehe Fleiter et al., 2017b, S. 9). Da sich die direkte Übersetzung von "Delivered Energy", "Gelieferte Energie", als sehr missverständlich herausgestellt hat, wird in diesem Projekt stattdessen die Bezeichnung "nachgefragte Wärme" verwendet. Der Begriff beschreibt folglich die vom Gebäude bzw. seinen Nutzern nachgefragte Wärme, unabhängig davon, ob diese von einer Fernwärmeübergabestation, einer Ölheizung, einem Gaskessel oder einer anderen Anlage geliefert wird. Wärmedämmmaßnahmen am/im Gebäude und eine Änderung des Nutzerverhaltens können die Menge der "nachgefragten Wärme" beeinflussen.

Mit der Orientierung an der nachgefragten Wärme wird gleichzeitig ein wesentliches Problem in der Modellierung von Wärmebedarfen umgangen, nämlich der oft erhebliche Unterschied zwischen dem aus Gebäudeeigenschaften errechneten Wärmebedarf und der faktisch angeforderten bzw. gelieferten und statisch erfassten Wärmemenge. Der Unterschied ergibt sich entweder aus Energiearmut, Sparsamkeit oder aus Energieverschwendung.

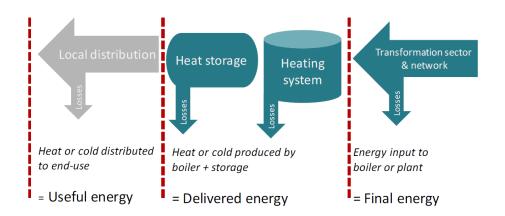


Abbildung 2-1: Definition Endenergie, Nachgefragte Energie und Nutzenergie Quelle: Fleiter et al. (2017b, S. 9)

Um die nachgefragten Wärmemengen mit den üblicherweise in Energiestatistiken enthaltenen Endenergie-Wärmebedarfen vergleichen zu können, wird ein Kesselwirkungsgrad angenommen. Wie sich später zeigen wird, ist die Annahme solcher Wirkungsgrade entscheidend für die entstehenden Fehler. Die im Projekt für die Umrechnungen verwendeten, durchschnittlichen Kesselwirkungsgrade in Deutschland, basierend auf den Berechnungen des Fraunhofer ISI (Fleiter et al., 2017a), sind in Tabelle 2-3 zu finden.

Tabelle 2-3: HRE4-Umrechnungsfaktoren: Endenergie - Nachgefragte Energie

Wohngebäude	Service/Gewerbe, Handel, Dienstleistung	Gesamt
76%	83%	79%

Quelle: Eigene Berechnung basierend auf Fleiter et al. (2017a)

#### Klassifizierung des Wärmebedarfs in Peta 4

Peta errechnet die Wärmebedarfe als kontinuierliche Ganzzahlen in GJ/ha. Diese sind einerseits kartografisch schlecht zu vermitteln, anderseits ermöglicht eine Einteilung in Intervalle eine allererste Abschätzung des Potentiales für Fern- und Nahwärme. Die Klassifizierung der Wärmebedarfsdichten in Peta 4.2 erfolgte mithilfe von vier Klassen. Diese basieren auf Daten in Dänemark realisierter Wärmenetze, die von der dänischen Energieagentur (Danish Energy Agency, 2013, S. 174–179) zu Szenarien zusammengestellt wurden. Die Klassen wurden 2016 im Rahmen des Projektes Heat Roadmap Europe daraus abgeleitet.

Im vorliegenden Bericht erfolgt der grafische Vergleich der unterschiedlichen Wärmebedarfsverteilungen im Raster mit der Einheit MWh Endenergie pro Hektar Landfläche. Daher wurden die Klassen umgerechnet (siehe Tabelle 2-4). Der Wärmeatlas Schleswig-Holstein stellt allerdings Nachgefragte Wärme dar.

Tabelle 2-4: Klassifizierung von Wärmebedarfsklassen

Modellierter Wärmebedarf in GJ / ha Nachgefragte Wärme	Wärmebedarf in TJ / km² Nachgefragte Wärme (Einheit der Klassen in Peta 4)	Bedeutung: Potentielle Eig- nung für Wärmenetze	Wärmebedarf in MWh / ha Endenergie
0 -200		Kein technisches Potential	0 -70
200 – 500	20 – 50	Empfehlung von Wärmenet- zen in Neubaugebieten	71 - 175
500 – 1200	50 – 120	Empfohlen für Niedrig-Tem- peratur-Wärmenetz im Ge- bäudebestand	175 - 415
1200 - 3000	120 - 300	Richtwert für konventionel- les Wärmenetz im Gebäude- bestand	> 415 - 1050
3000	300	Sehr hohes Wärmenetz-Po- tential	> 1050

#### 2.3.4 Hotmaps Project - Open Data Set for the EU28

Im Horizon2020-Projekt Hotmaps wurden ebenfalls Wärmebedarfsraster entwickelt. Die zugrundeliegende Geschossflächen-Ermittlung (gross floor area) basiert auf zwei unabhängigen Ansätzen: Zum einen werden aus Gebäudeumrissen von openstreetmap (osm) und aus dem Bebauungsgrad der European-Settlement-Map (ESM) die Gebäudegrundflächen ermittelt, die dann - unter Berücksichtigung der ggf. vorhandenen Unvollständigkeit der osm-Daten - mit einem Höhenmodell verrechnet werden. Zum anderen gibt es einen Ansatz, der aus einem Bevölkerungsraster mit Hektar-Auflösung sowie Gebäude-Zensus-Angaben zu den durchschnittlichen Geschossflächen der Wohnungen und zu den durchschnittlichen Personen pro Haushalt auf NUTS3-Ebene die Geschossfläche modelliert. Diese Vorgehensweise eignet sich besonders für Gebiete mit einem hohen Wohngebäude-Anteil. Deshalb wird sie bei der Ermittlung der Flächen von Wohngebäuden hoch gewichtet. Bei der Modellierung der Flächen von Nicht-Wohngebäuden wird neben der Bevölkerungsverteilung auch die Pro-Kopf-Wertschöpfung der Region berücksichtigt. Bei der Gewichtung der beiden Ansätze werden sowohl bei den Wohn- als auch bei den Nicht-Wohngebäuden die Corine-Land-Cover-Klassen einbezogen.

Die Wärmebedarfe, die auf nationaler Ebene mithilfe umfassender Literaturrecherche ermittelt wurden, wurden unter zur Hilfenahme verschiedener Indikatoren demografischer, gebäudespezifischer und klimatischer Natur (z. B. Bevölkerung, Gebäudetypen und –alter, Heizgradtage etc.) auf NUTS3-Ebene, also auf Ebene der Kreise und kreisfreien Städte., verteilt. Anschließend erfolgte die Verteilung auf Hektarzellen. Das Hotmaps-Projekt stellt die Hektar-Raster der modellierten Geschossflächen (gross floor areas) von Wohngebäuden und Nicht-Wohngebäuden sowie deren Summe zum Herunterladen unter der Creative Commons Attribution 4.0 International-Lizenz (CC-BY-4.0) zur Verfügung. Das Gleiche gilt für die daraus abgeleiteten Wärmebedarfsraster, die Endenergiebedarfe (final energy demand (FED), Definition siehe auch Abschnitt 2.3.3) darstellen. Siehe: Pezzutto et al. (2018a, S. 32–40) und Pezzutto et al. (2019a).

# 2.3.5 Einsichten aus der Darstellung der vorhandenen Wärmebedarfskarten und Argumente für den datenarmen Modellierungsansatz

Bei allen vorgestellten Methoden zur Wärmebedarfskartierung ergibt sich die Schwierigkeit, sowohl die vollständige Deckung des zu untersuchenden Gebiets als auch Genauigkeit - im Sinne eines Breite und Tiefe vermittelnden Wärmeplanes - zu erreichen. Ansätze zur Steigerung der Präzision bringen in der Regel einen höheren Aufwand bei der Datensammlung und dem nachfolgenden Datenmanagement mit sich, ohne jedoch Abweichungen zum realen Wärmebedarf völlig vermeiden zu können. Die vorgestellten Ansätze mit größerer geografischer Deckung hingegen verdeutlichen die Herausforderungen in den datenmäßig unterrepräsentierten Bereichen, etwa dem ländlichen Bereich.

Wärmebedarfskarten im Sinne von Wärmeatlanten sind mit der Verpflichtung verbunden, zugrundeliegende Datensätze regelmäßig zu aktualisieren. Dies bedingt einen immensen Aufwand des Datenmanagements sowie ungelöste datenschutzrechtliche Probleme mit sich, insbesondere, wenn frei verfügbare und aus dem Umfeld von Firmen stammende Daten vermischt werden.

Die Verfügbarkeit von Daten entwickelt sich rasant im Takt der Digitalisierung. Neu erscheinende Datensätze aus besseren Satelliten, mittels "Machine Learning" interpretierte fernerkundete Daten, sowie mit freien Lizenzen bereitgestellte Datensammlungen lassen den Versuch, für eine Region ein Wärmekataster dauerhaft zu betreiben als unmöglich erscheinen, denn ständig ändern sich Datengrundlagen, technische Voraussetzungen und Verordnungen. Regelmäßige Updates können dann zu Neuentwicklungen mutieren, während ineffiziente Redundanzen aufgebaut werden. Besser ist es wahrscheinlich, sich von einem gewissen Pragmatismus leiten zu lassen, der die Anwendung in den Vordergrund stellt und die Vervollkommnung von Daten hintanstellt. Eine nicht auf größtmögliche Präzision zielende Wärmebedarfskartierung wäre außerdem wegen der noch nicht ausreichend definierten Ziele einer möglichen landesweiten Wärmeplanung einschließlich ihres energiepolitischen Rahmens, sowie wegen des langen Zeithorizonts und der somit oben skizzierten optimistischen Erwartung besserer Daten zurzeit noch die zielführendere Lösung.

In diesem Sinne hat das Projekt Wärmeplan.SH den Zweck, die anwendungsorientierte Entwicklung eines regionalen Wärmeatlasses auf der Basis eines "Lean Data Approach", also einer datenarmen Methode, zu skizzieren und zu erkunden. Vorteile eines solchen Verfahrens sind die kostengünstige und schnelle Bereitstellung eines Wärmeplans, der für Stadt und Land ein vergleichbares und universell anwendbares Verfahren zum Screening von Wärmeversorgungsstrategien liefert. Die aus dem europäischen Peta-Atlas gewonnenen Erfahrungen, so soll durch Validierung mittels schleswig-holsteinischer Daten gezeigt werden, könnten die Basis eines kostengünstigen Wärmeplanes sein.

#### 2.4 Methoden zur Berücksichtigung der Klima-Einflüsse

Die Berücksichtigung klimatischer Unterschiede verschiedener Jahre geschieht üblicherweise mithilfe von Heizgradtagen. Für die darüber hinaus gehende Berücksichtigung von sozioökonomischen Faktoren und Verhaltensunterschieden wie dem Heizverhalten in verschiedenen Ländern und Regionen, welche oft Abweichungen vom streng klimatisch orientierten Verfahren der Heizgradtage auslösen, bedarf es hingegen empirischer Methoden. Der in Peta 4 verwendete Europäische Heiz-Index (EHI), vorgeschlagen von Werner (2006), basiert auf empirisch ermittelten Wärmebedarfen in europäischen Städten, welche über die Fläche und die Bevölkerung gemittelt wurden. Er schließt neben den klimatischen Bedingungen auch die schwer zu ermittelnden sozioökonomischen Faktoren und das Verbraucherverhalten mit ein.

Genannt seien hier auch die Klimafaktoren des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Ihre Verwendung dient der Witterungsbereinigung von Energieverbrauchskennwerten für Energieverbrauchsausweise und hilft die Energieverbrauchskennwerte unterschiedlicher Betrachtungszeiträume und von Gebäuden in Gebieten mit verschiedenen klimatischen Bedingungen innerhalb Deutschlands (zumindest überschlägig) vergleichbar zu machen (siehe Deutscher Wetterdienst, ohne Jahr).

Die Klimaschutzkonzepte, die in Kapitel 4 zitiert werden, weisen teilweise witterungsbereinigte Wärmebedarfe aus, aber nicht immer gibt es klare Angaben zur verwendeten Methodik. Deshalb wurden die Angaben grundsätzlich nicht witterungsreinigt. Die Werte von Malte Schwanebeck basieren auf witterungsbereinigten Wärmebedarfen von Gebäuden und bleiben bei der Validierung unverändert. Die Daten von Peta 4.2, aus dem Hotmaps-Projekt und die Summen aus der Landesstatistik wurden für den Zweck der Validierung und des Vergleiches der unterschiedlichen Wärmeatlasmethoden in Kapitel 4 witterungsbereinigt. Dazu wurden die Heizgradtage des Jahres 2015 und das 10-Jahres-Mittel der Heizgradtage von 2008-2017 verwendet. Auf diese Weise wurde bei der Berücksichtigung der Witterungsbedingungen von der Methodik des Fraunhofer ISIs (Fleiter et al., 2017b) insofern abgewichen, als dass (in Anlehnung an den Kieler Wärmeatlas) nicht der Heizgradtage-Durchschnitt von 6 Jahren (2010-2015) sondern von 10 Jahren sowie die schleswig-holsteinischen Heizgradtage (Eurostat, 2018), und nicht die deutschen, benutzt wurden. Damit wird der erfolgten Berücksichtigung des European Heating Indexes (EHI), also der regionalen Unterschiede innerhalb Deutschlands, bei der Verteilung der Wärmebedarfe für Peta 4.2 (Persson et al., 2017) Rechnung getragen. Tabelle 2-5 zeigt, dass bei den Heizgradtagen zwischen Deutschland und Schleswig-Holstein keine großen Unterschiede festzustellen sind.

Tabelle 2-5: Heizgradtage in Deutschland und Schleswig-Holstein

	Durchschnitt 2010-2015	Durchschnitt 2008-2017	2015
Deutschland	3077	nicht verwendet	2908
Schleswig-Holstein	3152	3081	2947

Quelle: Eigene Tabelle basierend auf Daten von Eurostat (2018)

Vereinfachend wurde der gesamte Wärmebedarf witterungsbereinigt, das heißt auch der nicht witterungsabhängige Brauchwasser- und der Prozesswärme-Anteil. Dieser Anteil ist nicht an allen Orten gleich. Im HRE4-Projekt wurde für Deutschland ein Heizwärme-Anteil von 80% für Wohngebäuden und von 89% für die Gebäude des Service-Sektors ermittelt (Fleiter et al., 2017a). Laut Landesstatistik sind es bei den Wohngebäuden 84% und bei den Service-Gebäuden 81% (Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein & Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein, 2017). Durch den geringen Unterschied zwischen 10-Jahres-Mittel und 2015-Wert der Heizgradtage sowie relativ hohen Heizwärme-Anteilen ist die entstehende Ungenauigkeit gering (weniger als 1%).

Tabelle 2-6: Zeitreihe Heizgradtage in Schleswig-Holstein (2008-2017)

2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
2.927	3.085	3.750	2.978	3.249	3.298	2.691	2.947	2.983	2.901

Quelle: Eurostat (2018)

#### 2.5 Wärmeversorgung und weitere Aspekte eines Wärmeatlas'

Neben der räumlichen Verteilung von Wärmebedarfen soll ein Wärmeatlas auch Möglichkeiten der Wärmeversorgung aufzeigen. Dies umfasst primär die technisch-ökonomische Analyse der Etablierung von Wärmeverteilungsnetzen innerhalb von prospektiven Wärmeversorgungsgebieten. Hier wird der lokale, innerhalb einer Hektarzelle berechnete Wärmebedarf in Bezug zum umgebenden Wärmebedarf gestellt. Nur durch die flächendeckende Kartierung können solch kumulative, sich aus dem Prinzip Nähe ergebenden Potentiale erkannt werden. Somit können auch zunächst weniger attraktiv erscheinende Gebiete erschlossen werden, deren Wirtschaftlichkeit kurzfristig fehlt, die aber auf längere Sicht Bestandteil einer integrierten Wärmeversorgungsstrategie sein können.

Auf der Angebotsseite umfasst ein Wärmeatlas die Kartierung von Wärmewerken, Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen und von Erneuerbare-Energien-Anlagen bzw. -Potentialen, von Abwärmequellen oder von bestehenden oder potentiellen Wärmenetzorten- bzw. -gebieten. Mit diesen Aspekten befasst sich dieser Bericht ab Kapitel 6.

Darüber hinaus können in Wärmeatlanten Aspekte wie Klimatisierungsbedarfe oder Energiearmut dargestellt werden. Sie sind nicht Teil der hier vorgenommenen Untersuchungen.

# 3 Anpassung der europäischen Wärmebedarfskartierungsmethode an die Region

#### 3.1 Einleitende Überlegungen

Bei der Anpassung der Wärmebedarfskartierungsmethode an Schleswig-Holstein können sowohl das Modell als auch die Input-Daten verändert werden. Grundsätzlich lassen sich folgende Aspekte anpassen:

- Wärmebedarfe: Datenquelle und Jahr (z.B. 2015 oder 2016), witterungsbereinigte oder nichtbereinigte Darstellung
- Bei der Verteilung berücksichtigte klimatische Unterschiede verschiedener Orte: EHI, Klimafaktoren, lokale Heizgradtage
- Geschossflächen-Verteilung: Peta 4 oder eine überarbeitete Version davon, Hotmaps, Zensus-Daten-basiert, Flächen basierend auf 3D-Modell á la Malte Schwanebeck
- Bei der Verteilung berücksichtigte Faktoren: Bevölkerungsraster, Wohnfläche pro Kopf, Arbeitsplätze etc.
- Einheit: GJ oder MWh, Endenergie oder nachgefragte Energie und entsprechende Wirkungsgrade
- Koordinaten-System und Projektion

Ein erster Vergleich der Ergebnisse der in Abschnitt 2.3 vorgestellten Wärmebedarfskartierungsmethoden zeigte zu Beginn des Projekts zum Teil deutliche Unterschiede. Die Vermutung bestand, dass die der Wärmebedarfsberechnung zu Grunde liegenden Gebäudeflächen, welche in Peta geostatistisch ermittelt werden, den regionalen Gebäudebestand nicht korrekt abbilden. Eine Neuermittlung der Wohnflächen und somit des Wärmebedarfs der Wohngebäude basierend auf den Zensus-Gebäude-Daten wurde erwogen, erschien aber nicht zielführend zu sein, weil der Datensatz ein unvollständiges Bild insbesondere in dünn besiedelten Gebieten ergab. Grund dafür ist, dass die Daten für den ländlichen Raum aus Datenschutzgründen verändert wurden, etwa durch Aggregieren und Auslassen von Daten mit besonders wenig Individuen, welches ja ländliche Räume charakterisiert.

Im Laufe des Projekts veröffentlichte das Hotmaps-Projekt eine neue Beta-Version ihrer Wärmebedarfskartierung, die sich deutlich von der vorherigen unterschied. Werden diese Daten berücksichtigt, ist die Modellierung der Wärmebedarfsdichten von Wohngebäuden von Peta4.2 basierend auf geschätzten Wohnflächen (siehe Kapitel 4) zufriedenstellend verlaufen und durch das Bevölkerungsraster und die Unterscheidung von Ein- und Mehrfamilienhäusern recht differenziert. Das Hotmaps-Projekt stellt die Wohnflächen nur als Summe aus Wohnflächen von Ein- und Mehrfamilienhäusern zur Verfügung, obwohl auch hier diese Unterscheidung gemacht wurde. Vor diesen Hintergrund stellten auch diese Flächen grundsätzlich keine geeignete, alternative Berechnungsgrundlage dar wurde der Wärmebedarf von Wohngebäuden mithilfe von Peta 4.2-Flächen ermittelt.

Die Untersuchung der Nahwärme-Netze von Firma Gottburg zeigte, dass diese Netze eine gewisse Anzahl von Hektar-Zellen versorgen, in denen die untersuchte Beta-Version von Hotmaps keine Wärmebedarfe vorgesehen hat. Da Peta 4.2 im ländlichen Raum vor allem Wärmebedarfe von Wohngebäuden platziert, wurde davon Abstand genommen, Maßnahmen gegen das "Ausufern" des Wärmebedarfs zu unternehmen. Dieses "Ausufern" ist verursacht durch die Einbeziehung des durchschnitt-

lichen Bebauungsgrades einer definierten Nachbarschaft von 300m in die multiple Regressionsanalyse, sowie durch das gewählte Bevölkerungs-Raster. Die hierdurch hervorgerufene Unschärfe kann allerdings in der Regel vernachlässigt werden, da es sich insgesamt um kleine Wärmemengen handelt.

Bei der Anpassung wurde untersucht, ob die Verwendung der Klimafaktoren des DWD eine realitätsnähere Verteilung der klimatisch bedingten Wärmebedarfe ergeben könnte als die Verwendung des EHI. Es zeigte sich, dass insgesamt nur ein geringes klimatisches Gefälle innerhalb Schleswig-Holsteins besteht, und auch der Einbezug sozioökonomischer Faktoren durch den EHI ergibt kaum Abweichungen. Daher wurden die auf den NUTS3-Gebieten beruhenden, flächen- und bevölkerungsgewichteten spezifischen Anpassungsfaktoren nicht verwendet.

#### 3.2 Wärmeplan.SH-Varianten

#### 3.2.1 Wohngebäude

Die Wohnflächen, die für Peta 4.2 ermittelt wurden, konnten übernommen werden. Angepasst wurde die Wärmebedarfsschätzung durch die Verwendung des schleswig-holsteinischen Wohngebäude-Wärmebedarfs für das Jahr 2016 (Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein & Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein, 2018) sowie durch die Ermittlung und Integration der durchschnittlichen Wohnfläche pro Person in Ein- und Mehrfamilienhäusern in den Kreisen und kreisfreien Städten Schleswig-Holsteins. Diese Durchschnitte wurden mithilfe von Zensus-Daten (Eurostat Census Hub 2, 2011a) ermittelt. Für detailliere Angaben siehe Abschnitt 5.1. Das Ergebnis ist eine landesweite Darstellung der Geschossflächendichte.

Tabelle 3-1: Endenergie-Wärmebedarfe von Wohngebäuden für Wärmeatlas SH nicht witterungsbereinigt, Peta 4.2-Werte in Endenergie umgerechnet

	Wohngebäude 2015	Wohngebäude 2016
Statistik	20.677 GWh	21.739 GWh
incl. der Zuschätzung EE Wärme		
Peta 4.2 (Jahr 2015)	21.399 GWh	-
nicht witterungsbereinigt		

Quellen: Eigene Aggregation von Daten aus Peta 4.2 und Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein & Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (2018, S. 26)

#### 3.2.2 Gebäude von Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD)

Analog zu den Wärmebedarfen der Wohngebäude, erfolgte die Anpassung der GHD-Wärmebedarfe mithilfe der schleswig-holsteinischen GHD-Wärmebedarfe aus dem Jahr 2016. Die Modellierung von Geschossflächen- als auch von Wärmebedarfsdichten für den tertiären Sektor ist schwieriger als die der Wohngebäude, weil sich aus den vorfügbaren Daten nicht so leicht verlässliche Anhaltspunkte über die faktischen Geschossflächen ableiten lassen. Vor diesem Hintergrund wurden vier Varianten entwickelt und verglichen.

Bei der erste Variante (v1) wird der schleswig-holsteinische GDH-Wärmebedarf auf die Flächen der Nicht-Wohngebäude von Hotmaps (Pezzutto et al., 2019b) verteilt, ohne dabei Gebäudealtersklassen oder ähnliches zu berücksichtigen. Bei der zweiten Variante (v2) wird der schleswig-holsteinische

GDH-Wärmebedarf direkt auf die Service-Sektor-Flächen von Peta 4.2 verteilt. Bei der dritten und vierten Variante wird er hingegen zunächst auf die Kreise und kreisfreien Städte entsprechend

- der Bevölkerungszahlen (GeoBasis-DE / BKG, 2016) (v3) und
- der Anzahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten am 30.06.2016 mit Arbeitsort in diesen Kreisen und kreisfreien Städten (Bundesagentur für Arbeit, 2016) (v4)

vorverteilt und anschließend mithilfe der Peta4-Service-Flächen weiter verteilt.

Tabelle 3-2: Endenergie-Wärmebedarfe von GHD-Gebäuden für Wärmeatlas SH nicht witterungsbereinigt, Peta 4.2-Werte in Endenergie umgerechnet

	GDH 2015	GHD 2016
Statistik	8.617 GWh	8.521 GWh
incl. der Zuschätzung EE Wärme		
Peta 4.2 (Jahr 2015)	7.182 GWh	-
nicht witterungsbereinigt		

Quellen: Eigene Aggregation von Daten aus Peta 4.2 und Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein & Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (2018, S. 25)

#### 3.2.3 Weiterführende Anmerkungen

Die folgende Tabelle 3-3 zeigt die Summe des Endenergie-Wärmebedarfs bzw. –verbrauchs von Wohn- und GDH-Gebäuden.

Tabelle 3-3: Endenergie-Wärmebedarfe von Wohn- und GHD-Gebäuden für Wärmeatlas SH nicht witterungsbereinigt, Peta 4.2-Werte in Endenergie umgerechnet

	0 0	
	Wohnen + GDH 2015	Wohnen + GHD 2016
Statistik	29.294 GWh	30.260 GWh
incl. der Zuschätzung EE Wärme		
Peta 4.2 (Jahr 2015)	28.291 GWh	-
nicht witterungsbereinigt		

Quellen: Eigene Aggregation von Daten aus Peta 4.2 und vom Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein & Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (2018, S. 25–26)

Im folgenden Kapitel 4 werden die unterschiedlichen Wärmebedarfsschätzungen miteinander verglichen und die vielversprechendste Variante wird bestimmt. Eine detaillierte Beschreibung der Modellierungsmethodik ist in Kapitel 5 zu finden.

#### 4 Vergleich unterschiedlicher Wärmebedarfsschätzungen

#### 4.1 Landesebene

Laut dem "Pan-Europäischen Thermischen Atlas" (Peta) Version 4.2 bzw. 4.3 wurden im Jahr 2015 von privaten Haushalten und dem Service-Sektor

28.291 GWh Endenergie in Form von Wärme (Heizung und Warmwassererzeugung) verbraucht.

Um die Peta-Ergebnisse mit Werten aus der Landesstatistik für das Jahr 2015 zu vergleichen, ist keine Witterungsbereinigung erforderlich, da die Verbräuche für die Raumheizung in Peta 4.2 auf nationaler Ebene mithilfe der Heizgradtage an die Witterungsbedingungen des Jahres 2015 angepasst wurden. Dabei wurden die für Deutschland ermittelten Heizgradtage des Jahres 2015 und ein 6-Jahres-Mittel (2010-2015), das auf Eurostat-Daten basiert, verwendet (Fleiter et al., 2017b, S. 11–12).

Es müssen allerdings die durchschnittlichen Kesselwirkungsgrade, also die Verluste der Wärmespeicher und der Heizungssysteme (nicht aber der Leitungen) in den Gebäuden, berücksichtigt werden (siehe dazu Tabelle 2-3).

Der Endenergieverbrauch von privaten Haushalten und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) betrug laut Angaben des Ministeriums für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein und des Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (2017, S. 36) im Jahr 2015

**29.367 GWh Endenergie** (incl. der Zuschätzung EE Wärme) (siehe Tabelle 4-1). Die Werte sind nicht temperaturbereinigt (vgl. Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein & Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein, 2017, 36-37, 84).

Damit entsprach der Endenergieverbrauch laut der statistischen Daten des Landes Schleswig-Holstein im Jahr 2015 ungefähr der Größenordnung der aggregierten Wärmebedarfsschätzungen von Peta 4.2, wobei Peta 4.2 den Wärmebedarf auf Landesebene mit knapp 4% leicht unterschätzt. Der Wärmebedarf der privaten Haushalt wird allerdings mit gut 3% leicht überschätzt (siehe Tabelle 4-1). Ein Grund mag die statistische Einordnung von Gebäuden mit Mischnutzung sein. Die Peta 4-Methodik ist also grundsätzlich geeignet, um auf Landesebene Aussagen über die Verteilung des Wärmebedarfes zu machen.

Tabelle 4-1: Vergleich in Endenergie auf Landesebene

	Gesamt	Wohngebäude	Service
Statistik (Jahr 2015)	29.367 GWh	20.730 GWh	8.637 GWh
incl. der Zuschätzung EE Wärme			
Peta 4.2 (Jahr 2015)	28.291 GWh	21.399 GWh	7.182 GWh
nicht witterungsbereinigt			

Peta 4.2-Werte in Endenergie umgerechnet, nicht witterungsbereinigt

Quellen: Eigene Aggregation von Daten aus Peta 4.2 und Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein & Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (2017)

#### 4.2 Kreisebene

Auf Kreisebene gibt es keine statischen Daten, die den Wärmebedarf in Gebäuden beschreiben. Allerdings besteht die Möglichkeit, die Modellierungsergebnisse von Peta 4.2 erstens mit den Angaben aus diversen Klimaschutzkonzepten, zweitens mit den aggregierten Werten, die im Zuge der Masterarbeit von Malte Schwanebeck (2016) an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) als Bedarfe von Wohn- und Nicht-Wohngebäuden ermittelt wurden, und drittens mit vorläufigen Ergebnissen aus dem Projekt Hotmaps zu vergleichen. Als geografische Grundlage des Vergleichs dienen die Verwaltungsgrenzen der Kreise und kreisfreien Städte (GeoBasis-DE / BKG, 2016).

Eine erste Schwierigkeit ergibt sich mit der Bestimmung der Wirkungsgrade zwischen verschiedenen Bilanzierungsgrößen. Die Umrechnung der Peta 4.2–Werte, die die Menge der nachgefragten Energie quantifizieren, in Endenergie (Definitionen siehe Abschnitt 2.3.3) erfolgt mit den bundesweiten Wirkungsgrad-Durchschnitten (siehe jeweilige Tabelle und Tabelle 2-3), die sich aus Ergebnissen von Fraunhofer ISI ableiten lassen (Fleiter et al., 2017a). Die Annahme bundesweit durchschnittlicher Wirkungsgrade setzt die gleiche Altersstruktur von Wärmeerzeugern und einen gleichen Technologiemix in der Wärmeversorgung voraus. Die Ermittlung von Wirkungsgraden, die auf die Kreise und kreisfreien Städte abgestimmt sind, hätte allerdings den Rahmen dieser Untersuchung gesprengt.

Als weitere Herausforderung ergab sich die unterschiedliche sektorale Abgrenzung der verglichenen Methoden. Beim Vergleichen der Werten von Peta 4.2 und von Malte Schwanebeck bzw. der Klimaschutzkonzepte ist zu bedenken, dass sie teilweise auch die Wärmebedarfe der Industrie enthalten oder nicht zwischen Industrie und Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD) und öffentlichen Liegenschaften unterscheiden (siehe dazu in die Kommentar-Spalte der Tabelle 4-2 und Tabelle 4-4). Malte Schwanebecks Daten beziehen sich auf die Energiebedarfe zum Heizen von Räumen und für die Aufbereitung von Warmwasser von Wohn- und Nicht-Wohngebäuden. Dabei sind Industriegebäude eingeschlossen, aber industrielle Prozesswärme-Bedarfe nicht (Mail von Malte Schwanebeck, 26.03.2018).

Im Folgenden wird Gewerbe-Handel-Dienstleistung (GHD) mit dem Service-Sektor gleichgesetzt.

Tabelle 4-2. Kreise in Schleswig-Holstein: Vergleich diverser Schätzungen des Gesamt-Wärmebedarfs Die Wärmebedarfe sind hier in GWh Endenergie angegeben.

Kreis bzw. Stadt	Peta 4.2 Haushalte und GHD in GWh	Schwanebeck Wohngebäude und Nichtwohn- gebäude in GWh	Abweichung von Peta 4.2	Wärmebedarf "Klimaschutz- Konzept" in GWh	Jahr	Erläuterung	Quelle	Abweichung von Peta 4.2	Hotmaps beta Wohngebäude u. Nichtwohn- gebäude in GWh	Abweichung von Peta 4.2
Dithmarschen	1.443	1.895	-31%	3.841	2010	incl. Industrie	[1]	-166%	1.282	11%
				1.699	2010	nur Haushalte	[1]	-18%		
Flensburg	1.073	1.090	-2%	769	2009	Haushalte + GHD	[2]	28%	870	19%
Herzogtum Lauenburg	1.815	2.170	-20%						1.612	11%
Kiel	2.379	2.590	-9%	2.708	2014	ohne Industrie	[3]	-14%	2.424	-2%
Lübeck	3.006	2.287	24%	2.620	2010	wahrscheinlich incl. Industrie	[4]	13%	2.004	33%
Neumünster	986	959	3%	1.020	2012	incl. Wirtschaft	[5]	-4%	752	24%
Nordfriesland	1.649	2.543	-54%	2.394		incl. Wirtschaft	[6]	-45%	1.620	2%
				1.589		Haushalte+Kreis ohne GHD	[6]	4%		
Ostholstein	2.005	2.590	-29%	1.700	2013	nur Haushalte ohne GHD	[7]	15%	1.807	10%
Pinneberg	2.787	2.684	4%						2.637	5%
Plön	1.217	1.591	-31%						1.104	9%
Rendsburg- Eckernförde	2.759	3.186	-15%	3.062	2009	incl. Industrie	[8]	-11%	2.512	9%
				2.650	2009	Haushalte+GHD	[8]	4%		
Schleswig- Flensburg	1.885	2.477	-31%						1.798	5%
Segeberg	2.736	3.000	-10%						2.330	15%
Steinburg	1.439	1.664	-16%						1.239	14%
Stormarn	2.398	2.736	-14%						2.111	12%
Summe	29.575	33.461	-13%	30.808	2015		[9]	-2%	26.100	12%

Quellen: Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein & Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (2017, Jahr 2015, witterungsbereinigt) und eigene Aggregation von Daten aus Peta 4.2 (witterungsbereinigt, mit dem Wirkungsgrad von 79% in Endenergie umgerechnet), von Malte Schwanebeck und Pezzutto et al. (2019a, Jahr 2015, witterungsbereinigt), Werte aus "Klimaschutz-Konzepten" (siehe Tabelle 4-5).

Tabelle 4-3: Kreise in Schleswig-Holstein: Vergleich diverser Schätzungen des Wärmebedarfs von Wohngebäuden Die Wärmebedarfe sind hier in GWh Endenergie angegeben.

Kreis bzw. Stadt	Peta 4.2 Haushalte in GWh	Schwanebeck Wohngebäude in GWh	Abweichung von Peta 4.2	Wärmebedarf "Klimaschutz- Konzept" in GWh	Jahr	Erläuterung	Quelle	Abweichung von Peta 4.2	Hotmaps beta Wohngebäude in GWh	Abweichung von Peta 4.2
Dithmarschen	1.148	1.427	-24%	1.699	2010	nur Haushalte	[1]	-48%	957	17%
Flensburg	596	700	-17%	540	2009	nur Haushalte	[2]	9%	583	2%
Herzogtum Lauenburg	1.529	1.718	-12%						1.192	22%
Kiel	1.635	1.708	-4%	1.754	2014	nur Haushalte	[3]	-7%	1.557	5%
Lübeck	1.522	1.663	-9%				[4]		1.357	11%
Neumünster	602	619	-3%	357	2012	nur Haushalte	[5]	41%	510	15%
Nordfriesland	1.419	1.924	-36%	1.578		nur Haushalte	[6]	-11%	1.162	18%
Ostholstein	1.648	2.064	-25%	1.700	2013	nur Haushalte	[7]	-3%	1.324	20%
Pinneberg	2.274	2.032	11%						1.902	16%
Plön	1.071	1.232	-15%						830	22%
Rendsburg- Eckernförde	2.239	2.373	-6%	2.100	2009	nur Haushalte	[8]	6%	1.803	19%
Schleswig- Flensburg	1.683	1.943	-15%						1.331	21%
Segeberg	2.079	2.312	-11%						1.673	20%
Steinburg	1.096	1.247	-14%						903	18%
Stormarn	1.830	2.052	-12%						1.501	18%
Summe	22.371	25.013	-12%	21.671	2015	nur Haushalte	[9]	3%	18.588	17%

Quellen: Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein & Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (2017, Jahr 2015, witterungsbereinigt) und eigene Aggregation von Daten aus Peta 4.2 (witterungsbereinigt, mit dem Wirkungsgrad von 76% in Endenergie umgerechnet), von Malte Schwanebeck und Pezzutto et al. (2019a, Jahr 2015, witterungsbereinigt), Werte aus "Klimaschutz-Konzepten" (siehe Tabelle 4-5)

Tabelle 4-4: Kreise in Schleswig-Holstein: Vergleich diverser Schätzungen des Wärmebedarfs von Nicht-Wohngebäuden Die Wärmebedarfe sind hier in GWh Endenergie angegeben.

Kreis bzw. Stadt	Peta 4.2 Service in GWh	Schwanebeck Nichtwohn-ge- bäude (incl. In- dustrie, aber ohne Prozess- wärme) in GWh	Abweichung von Peta 4.2	Wärmebedarf "Klimaschutz- Konzept" in GWh	Jahr	Erläuterung	Quelle	Abweichung von Peta 4.2	Hotmaps beta in GWh witte- rungs- bereinigt	Abweichung von Peta 4.2
Dithmarschen	315	468	-48%	2.142	2010	incl. Industrie	[1]	-580%	325	-3%
Flensburg	470	391	17%	229	2009	ohne Industrie	[2]	51%	287	39%
Herzogtum Lauenburg	317	451	-42%						419	-32%
Kiel	754	882	-17%	954	2014	incl. Industrie	[3]	-26%	866	-15%
Lübeck	1.452	624	57%				[4]		647	55%
Neumünster	382	340	11%	663	2012	incl. Industrie	[5]	-74%	242	37%
Nordfriesland	261	619	-137%	816		incl. Industrie	[6]	-213%	458	-76%
Ostholstein	389	526	-35%				[7]		483	-24%
Pinneberg	556	652	-17%						735	-32%
Plön	171	359	-110%						274	-60%
Rendsburg- Eckernförde	561	813	-45%	412	2009	incl. Industrie	[8]		708	-26%
Schleswig- Flensburg	242	534	-120%						467	-93%
Segeberg	686	688	0%						656	4%
Steinburg	359	417	-16%						335	6%
Stormarn	594	684	-15%						609	-3%
Summe	7.508	8.448	-13%	9.029	2015	GHD	[9]	-20%	7.513	0%

Quellen: Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein & Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (2017, Jahr 2015, witterungsbereinigt) und eigene Aggregation von Daten aus Peta 4.2 (witterungsbereinigt, mit dem Wirkungsgrad von 83% in Endenergie umgerechnet), von Malte Schwanebeck und Pezzutto et al. (2019a, Jahr 2015, witterungsbereinigt), Werte aus "Klimaschutz-Konzepten" (siehe Tabelle 4-5)

Tabelle 4-5: Quellenangaben für die Werte aus den "Klimaschutz-Konzepten"

Nr.	Quellenangabe
[1]	Thalen Consult & KEEA Klima und Energieeffizienz Agentur (2012, S. 49)
[2]	Universität Flensburg - Zentrum für nachhaltige Energiesysteme (ZNES) (2011, S. 27)
[3]	SCS Hohmeyer   Partner (2017, S. 143, 267, 284, 300)
[4]	K.GREENTECH GmbH (2014, S. 22)
[5]	B.A.U.M. Consult (2015, S. 12) und B.A.U.M. Consult (2016, S. 28)
[6]	Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie & BET Büro für Energiewirtschaft und techni-
	sche Planung (2011, S. 4)
[7]	infas enermetric Consulting (2016, S. 37)
[8]	Kreis Rendsburg-Eckernförde - Fachbereich Planen, Bauen und Umwelt (2012, S. 18–20)
[9]	Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Hol-
	stein & Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (2017)

Im ländlichen Raum unterschätzt Peta 4.2 insgesamt den Wärmebedarf (Dithmarschen, Nordfriesland, Plön, Schleswig-Flensburg). Die Schätzungen von Hotmaps und von Peta 4.2 sind in diesen Gebieten allerdings ähnlich. Die Wärmebedarfe der Städte Kiel, Lübeck und Flensburg werden in den folgenden Abschnitten gesondert betrachtet, um Schätzungen in Städten genauer zu untersuchen. Dabei wird auch mit dem Wirkungsgrad des lokalen Wärmemixes gerechnet, der für die Städte teilweise beträchtliche Fernwärmeanteile enthält. Somit werden einerseits die niedrigen Verluste an Fernwärme-Übergabestationen, die hauptsächlich in innerstädtischen Bereichen vorkommen, und andererseits die Verbreitung von Ölheizungen mit niedrigeren Wirkungsgraden im ländlichen Raum berücksichtigt. Die Betrachtung unterstellt, dass die Ergebnisse von Peta 4.2 diese Differenzierung zwischen Stadt und Land rechtfertigen. Mit anderen Worten: Peta 4.2 zeigt die Wärmebedarfe, die entsprechend der gewählten Technologie - um die damit verbundenen Verluste erhöht werden müssen.

Im Vergleich zu Malte Schwanebecks Schätzungen liegt bei den Wärmebedarfen der Wohngebäude fast immer eine Unterschätzung durch Peta 4.2 vor (Ausnahme: Pinneberg), wobei diese im ländlichen Raum größer als in Städten ist. Diese Schlussfolgerung wird aber nicht immer von den Klimaschutzkonzepten bestätigt wie zum Bespiel in Nordfriesland und Ostholstein. Dort sind die Abweichungen von Peta 4.2 zum Klimaschutzkonzept geringer. Auch der Vergleich mit den Hotmaps-Schätzungen legt keine deutliche Unterschätzung des Wärmebedarfs von Haushalten im ländlichen Raum durch Peta 4.2 nahe, wohl aber eine leichte/moderate Unterschätzung in Städten.

Im ländlichen Raum (Nordfriesland, Plön, Schleswig-Flensburg) unterschätzt Peta 4.2 auch den Wärmebedarf des Service-Sektors, teilweise deutlich. Dies kann an der gewählten Bottom-Up-Methode der Berechnung der Gebäudeflächen liegen, die auf sehr schwacher Korrelation zwischen den abhängigen und unabhängigen Variablen basiert. Auch bestehen große Abweichungen in den anzunehmenden spezifischen Wärmebedarfen z.B. in landwirtschaftlichen Gebäuden, die als große Geschoßflächendichten erkannt werden, auf die der regionale Wärmebedarf dann verteilt wird.

Der Vergleich mit den Werten des Energiewendeministeriums lässt vermuten, dass auch Hotmaps den Wärmebedarf der Nicht-Wohngebäude auf Landesebene unterschätzt. Die Schätzung von Hotmaps lässt aber eine weniger große Unterschätzung vermuten als die Daten von Malte Schwanebeck. Es ist zu bedenken, dass sich diese beiden Schätzungen auf Nicht-Wohngebäude beziehen und

nicht auf den Service-Sektor beschränkt sind. Außerhalb der großen Städte (Kiel, Lübeck und Flensburg), die wie bereits erwähnt in den nächsten Abschnitten genauer untersucht werden, zeigt der Vergleich mit Malte Schwanebecks Schätzung meistens eine moderate Unterschätzung und der Vergleich mit Hotmaps eine moderate Überschätzung (Dithmarschen, Herzogtum Lauenburg, Ostholstein, Pinneberg, etc.). Wegen der schwachen Datenlage ist die Bewertung der Schätzung des Wärmebedarfs im Service-Bereich sehr schwierig. Hier ist also zunächst jegliche Art von Daten über den Wärmebedarf von Gebäuden des Sektors willkommen, solange keine eindeutig besseren Daten verfügbar sind. Insgesamt wird der potentielle Anschluss von Gebäuden des Service-Sektors an neue Wärmenetze eine kritische Rolle einnehmen, einerseits, weil einerseits große Gebäude dieses Sektors willkommene Ankerlasten darstellen, andererseits betriebswirtschaftlich durch kürzere Amortisationsansprüche ein höheres Risiko darstellen können.

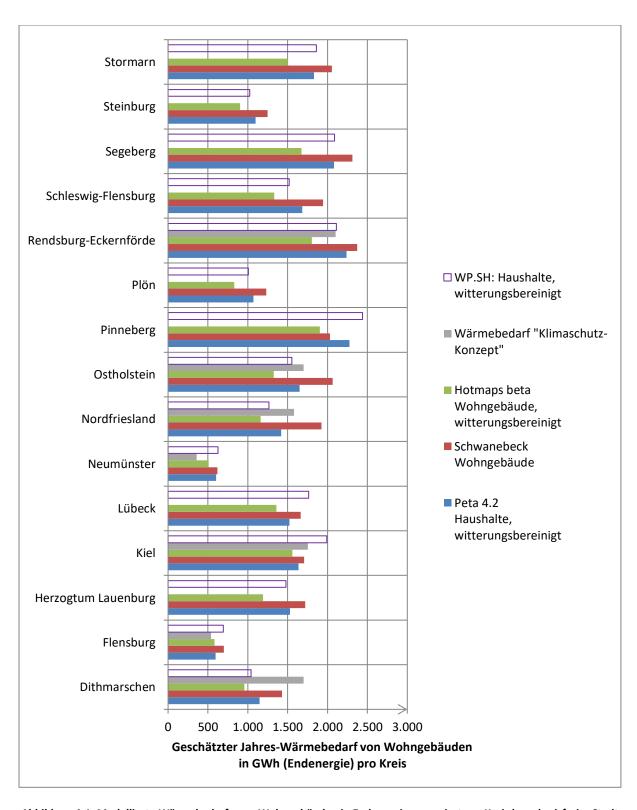


Abbildung 4-1: Modellierte Wärmebedarfe von Wohngebäuden in Endenergie aggregiert pro Kreis bzw. kreisfreier Stadt Quellen: Eigene Darstellung basierend auf Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt), zur Verfügung gestellten Daten von Malte Schwanebeck sowie Pezzutto et al. (2019a, Jahr 2015, witterungsbereinigt) und diversen Klimaschutzkonzepten (siehe Tabelle 4-5)

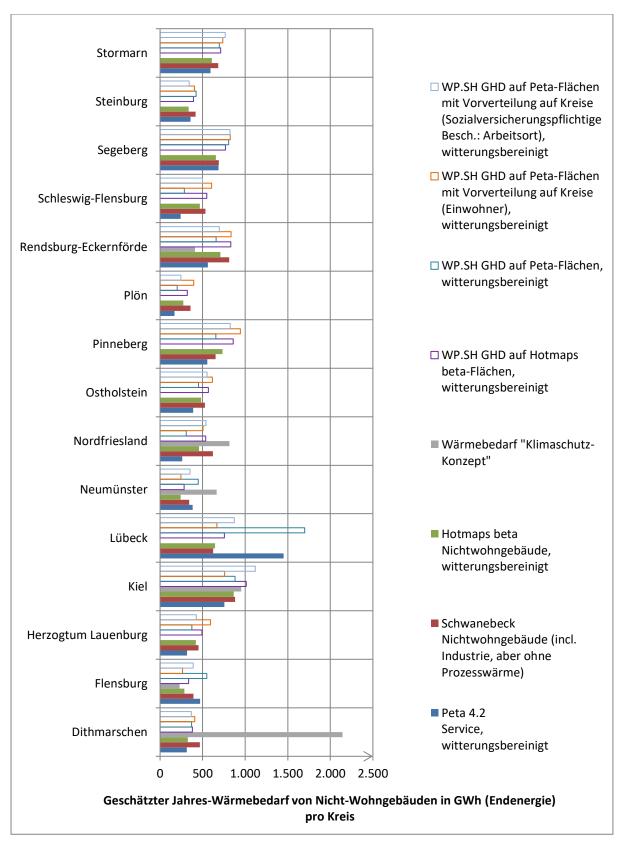


Abbildung 4-2: Modellierte Wärmebedarfe von Nicht-Wohngebäuden in Endenergie aggregiert pro Kreis bzw. kreisfreier

Quellen: Eigene Darstellung basierend auf Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt), zur Verfügung gestellten Daten von Malte Schwanebeck, sowie Pezzutto et al. (2019a, Jahr 2015, witterungsbereinigt) und diversen Klimaschutzkonzepten (siehe Tabelle 4-5)

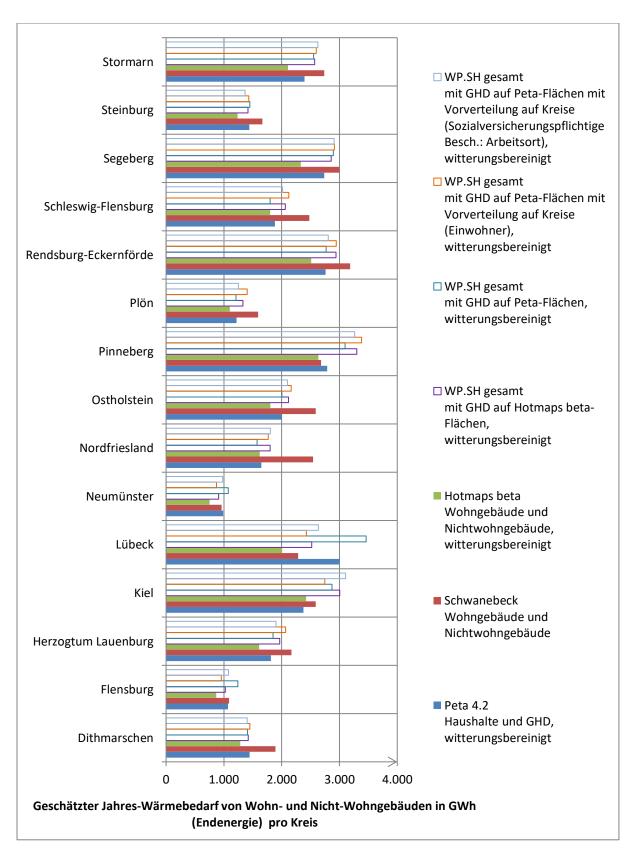


Abbildung 4-3: Modellierte Wärmebedarfe von Wohn- und Nicht-Wohngebäuden in Endenergie aggregiert pro Kreis bzw. kreisfreier Stadt

Quellen: Eigene Darstellung basierend auf Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt), zur Verfügung gestellten Daten von Malte Schwanebeck, sowie Pezzutto et al. (2019a, Jahr 2015, witterungsbereinigt) und diversen Klimaschutzkonzepten (siehe Tabelle 4-5)

#### 4.3 Verbräuche in bestimmten Netzen

In diesem Unterkapitel wird die Verteilung der Wärmebedarfe in den drei größten Städten Schleswig-Holsteins detaillierter untersucht. Hierzu werden die Stadtgebiete mit Hilfe der Postleitzahlen (suche-postleitzahl.org, 2018) in kleinere Gebiete aufgeteilt.

#### 4.3.1 Kiel

Der Wärmeatlas der Stadtwerke Kiel ermöglicht es, die Wärmebedarfe aus Peta 4.2 für Wohngebäude in Kiel zu validieren. Für den Vergleich des Kieler Wärmeatlas mit Peta 4.2 wurden für das Stadtgebiet Kiel die von den Kieler Stadtwerken auf 100x100m-Zellen aggregierten Werte des Kieler Wärmeatlasses und auch die in 100x100m-Zellen abgeschätzten Wärmebedarfe von Peta 4.2 innerhalb der Postleitzahl-Gebiete (PLZ-Gebiete) aufsummiert. Dabei wurden die PLZ-Gebiete (suchepostleitzahl.org, 2018) an den Stadtgrenzen abgeschnitten, weil sich der Kieler Wärmeatlas nur auf das Stadtgebiet bezieht.

Nach Witterungsbereinigung (unter Vernachlässigung der Witterungsunabhängigkeit des Warmwasseranteils) und nach Umrechnung von Peta 4.2 in Endenergie zeigt sich, dass Peta 4.2 den Wärmebedarf der Wohngebäude unterschätzt. In einzelnen Gebieten liegt sogar der Gesamtwärmebedarf von Peta 4.2 (Wohngebäude und Service-Sektor) unter dem Wärmebedarf des Kieler Wärmeatlasses (nur Wohngebäude); insgesamt liegt der Peta 4.2-Gesamtwärmebedarf aber mit 9% Abweichung (2.114.255 vs. 1.927.097 MWh) knapp über der Summe des Kieler Wärmeatlases. (Siehe auch Tabelle 4-7.) Die Karten (siehe Abbildung 4-7) zeigen darüber hinaus auch, dass der Wärmebedarf in Peta 4.2 flächiger verteilt (hellgrüne Flächen) ist als im Kieler Wärmeatlas, wo er im Kern in einem breiten Gebiet hoch ist. Bei den hellgrünen Flächen handelt es sich um Wärmebedarfsdichten von weniger als 70 MWh/ha, welches etwa 3 Einfamilienhäusern entspricht, die unter Annahme einer durchschnittlichen Parzellengröße etwa ¼ eines Hektars beanspruchen. Für die Bestimmung des Potentiales von Nah- oder Fernwärme ist dies nicht relevant.

Im Vergleich mit dem Masterplan (SCS Hohmeyer | Partner, 2017) und der Schätzung von Malte Schwanebeck (CAU) und vom Hotmaps-Projekt (siehe Tabelle 4-6 und Tabelle 4-8) wird die Unterschätzung des Wärmebedarfs von Wohngebäuden in Peta 4.2 bestätigt. In Tabelle 4-6 wird auch deutlich, dass der bundesweit angenommene Kesselwirkungsgrad, der für die Umrechnung von nachgefragter Energie (delivered energy) in Endenergie verwendet wird, eine große Rolle spielt. Bei Städten mit hohen Anteilen von Fernwärme führt dies zu signifikanten Abweichungen vom Bundesdurchschnitt. Die Werte des Kieler Wärmeatlasses und von Hotmaps sind allerdings auch höher als die beiden anderen Schätzungen. In Abbildung 4-4 kann man die Schätzungen visuell vergleichen und feststellen, dass Hotmaps und Malte Schwanebeck oft recht nahe beim Kieler Wärmeatlas liegen.

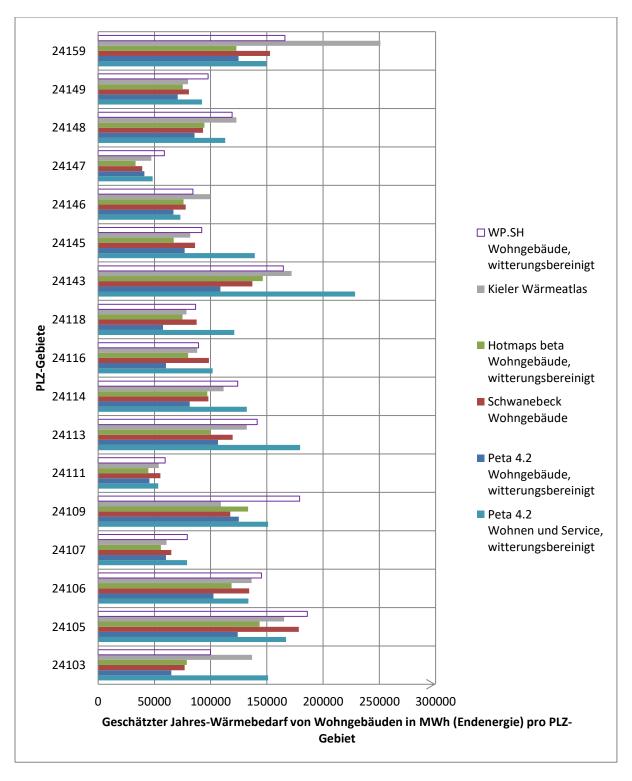


Abbildung 4-4: Geschätzte Wärmebedarfe von Wohngebäuden in Kieler PLZ-Gebieten in Endenergie (nur Kieler Stadtgebiet, nicht zwingend vollständige PLZ-Gebiete)

Quellen: Eigene Darstellung basierend auf Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt), zur Verfügung gestellten Daten des Kieler Wärmeatlas' und von Malte Schwanebeck, Pezzutto et al. (2019a, Jahr 2015, witterungsbereinigt)

Peta 4.2 unterschätzt nicht nur den gesamten Wärmebedarf von Wohngebäuden und dem Service-Sektor auf Landesebene und im ländlichen Raum sondern auch in der Stadt Kiel (Tabelle 4-7) und den meisten ihrer Stadtteile.

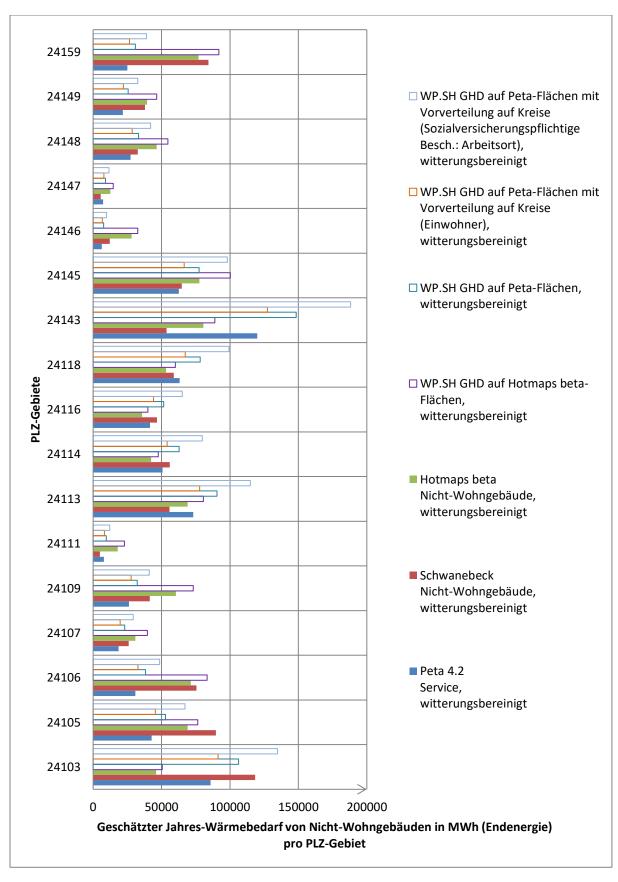


Abbildung 4-5: Abschätzungen der Wärmebedarfe von Nicht-Wohngebäuden in Kieler PLZ-Gebieten in Endenergie (nur Kieler Stadtgebiet, nicht zwingend vollständige PLZ-Gebiete) Quellen: Eigene Darstellung basierend auf Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt), zur Verfügung gestellten Daten von

Malte Schwanebeck, Pezzutto et al. (2019a, Jahr 2015, witterungsbereinigt)

**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die Unterschiede der aggregierten Gesamt-Wärmebedarfe in den einzelnen PLZ-Gebieten und wie die überschätzenden Ausreißer in der Service-Wärmebedarf-Schätzung von Peta 4.2 (Abbildung 4-5) zum Ausgleich der Wohngebäude-Wärmebedarfs-Unterschätzungen führt.

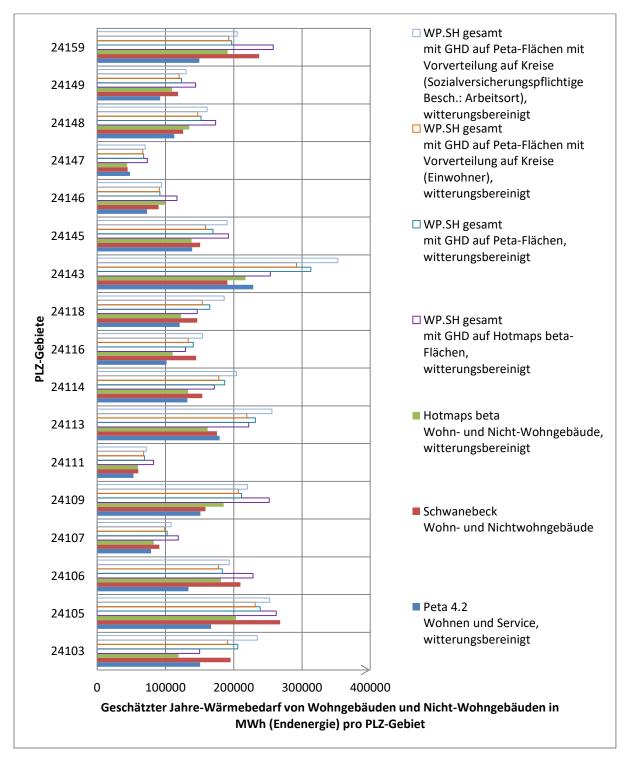


Abbildung 4-6: Aggregierte modellierte Gesamt-Wärmebedarfe in Kieler PLZ-Gebieten in Endenergie
(nur Kieler Stadtgebiet, nicht zwingend vollständige PLZ-Gebiete)

Quellen: Eigene Darstellung basierend auf Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt), zur Verfügung gestellten Daten von Malte Schwanebeck, Pezzutto et al. (2019a, Jahr 2015, witterungsbereinigt)

Tabelle 4-6: Schätzungen des Wärmebedarfs von Wohngebäuden im Stadtgebiet Kiel in GWh Endenergie

Peta 4.2 η = 0,76 (Dtl.)	Peta 4.2 η = 0,88 (Kiel)	Kieler Wär- meatlas	Malte Schwane- beck (Wohnge- bäude)		Hotmaps beta (Wohng- bäude)	WP.SH (Haus- halte)
1.619	1.403	1.927	1.699	1.754	1.922	1.973
100%	87%	119%	105%	108%	119%	122%

Quellen: Eigene Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt), zur Verfügung gestellte Daten des Kieler Wärmeatlases und von Malte Schwanebeck, SCS Hohmeyer | Partner (2017), Pezzutto et al. (2019a, Jahr 2015, witterungsbereinigt)

Tabelle 4-7: Schätzungen des Wärmebedarfs von Wohn- und Service-Gebäuden im Stadtgebiet Kiel in MWh Endenergie

Peta 4.2 η = 0,79 (Dtl.)	Peta 4.2 η = 0,88 (Kiel)	Kieler Wär- meatlas (nur Wohn- gebäude)	Malte Schwa- nebeck (Wohn- u. Nicht-Wohn- gebäude, ohne Prozess- wärme)	Masterplan (Haushalte, GHD, Bundes- und Landes- liegenschaften)	Hotmaps beta (Wohngbäude und Nicht- Wohnge- bäude)
2.437	2.114	1.927	2.563	2.708	2.646
100%	90%	82%	109%	115%	113%

WP.SH v1 Gesamt, witterungsbereinigt	WP.SH v2 Gesamt, witterungsbereinigt	WP.SH v3 Gesamt, witterungsbereinigt	WP.SH v4 Gesamt, witterungsbereinigt
2.977	2.851	2.728	3.087
127%	121%	116%	132%

Quellen: Eigene Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt), zur Verfügung gestellte Daten des Kieler Wärmeatlases und von Malte Schwanebeck, SCS Hohmeyer | Partner (2017), Pezzutto et al. (2019a, Jahr 2015, witterungsbereinigt)

Tabelle 4-8 zeigt auch den Anteil des Wärmebedarf vom Service-Sektor am gesamten Wärmebedarf von Peta 4.2. Die PLZ-Gebiete mit besonders hohen Anteilen liegen zu einen im Kern der Stadt an der Förde (24103, 24143) und zu anderen rund um die Universität (24118) sowie im Süden der Stadt (24145), wo sich das Gewerbegebiet Wellsee und Dörfer wie Rönne, Meimersdorf und Moorsee befinden. Ein hoher Service-Anteil ist daher nicht abwegig.

Zu Abbildung 4-7: Peta und Hotmaps zeichnen durch die gewählte Raster-basierte Methodik die Wohngebiete unscharf, während die adressebasierten Wärmebedarfskarten von Schwanebeck und den Stadtwerken Kiel die Wohngebiete besser abgrenzen können. Alle vier Verfahren zeigen vergleichbare Verteilungen des Wärmebedarfes.

Tabelle 4-8: Schätzungen der Wärmebedarfe von Wohngebäuden in Kieler PLZ-Gebieten in MWh Endenergie

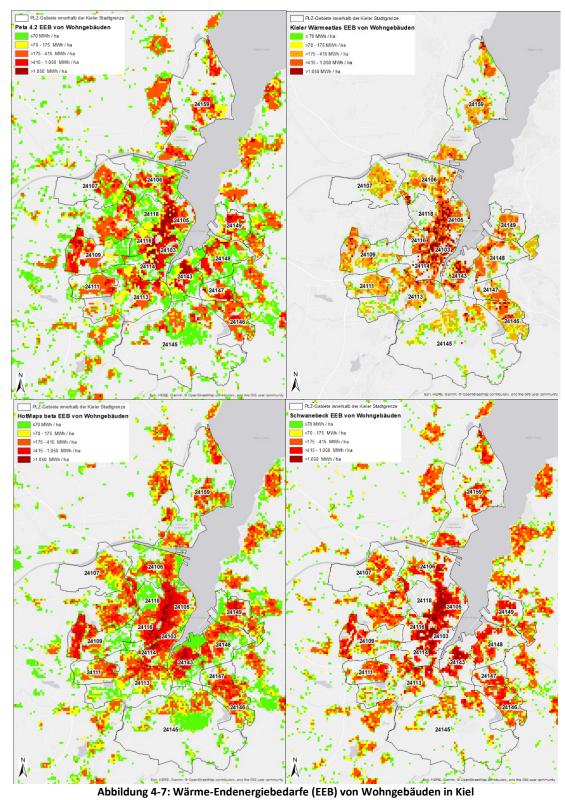
- mit Witterungsbereinigung mit Heizgradtagen für Schleswig-Holstein (Quelle: Eurostat, 2018)

PLZ	Peta 4.2 Wohngebäude in MWh	Peta 4.2 Wohnen und Ser- vice in MWh	Peta 4.2 Anteil des Service- Sektors	Kieler Wär- meatlas in MWh	Abweichung von Peta 4.2 Wohngebäude	Schwanebeck Wohngebäude in MWh	Abweichung von Peta 4.2 Wohngebäude	Hotmaps beta Wohn-ge- bäude in MWh	Abweichung von Peta 4.2 Wohngebäude
24103	65.151	151.068	57%	136.802	-110%	77.015	-18%	78.683	-21%
24105	124.067	166.889	26%	165.291	-33%	178.440	-44%	143.531	-16%
24106	102.624	133.566	23%	136.339	-33%	134.208	-31%	118.512	-15%
24107	60.280	78.953	24%	60.818	-1%	65.027	-8%	55.860	7%
24109	125.113	151.210	17%	109.246	13%	117.560	6%	133.318	-7%
24111	45.552	53.361	15%	53.802	-18%	55.267	-21%	44.757	2%
24113	106.440	179.642	41%	132.253	-24%	119.558	-12%	100.183	6%
24114	81.418	132.239	38%	111.459	-37%	98.019	-20%	97.138	-19%
24116	60.276	101.878	41%	88.123	-46%	98.459	-63%	80.033	-33%
24118	57.793	121.035	52%	78.464	-36%	87.658	-52%	75.016	-30%
24143	108.571	228.504	52%	171.900	-58%	137.172	-26%	146.482	-35%
24145	76.815	139.361	45%	81.899	-7%	86.257	-12%	67.155	13%
24146	66.843	73.120	9%	99.605	-49%	77.959	-17%	75.994	-14%
24147	41.026	48.379	15%	47.199	-15%	39.223	4%	33.305	19%
24148	85.635	113.001	24%	122.834	-43%	93.319	-9%	94.484	-10%
24149	70.641	92.395	24%	80.086	-13%	80.705	-14%	75.238	-7%
24159	124.715	149.653	17%	250.977	-101%	152.852	-23%	123.003	1%
Summe	1.402.960	2.114.255	34%	1.927.097	-37%	1.698.698	-21%	1.542.693	-10%

Quellen: Eigene Peta 4.2-Daten (Jahr 2015, witterungsbereinigt), zur Verfügung gestellte Daten des Kieler Wärmeatlases und von Malte Schwanebeck, Pezzutto et al. (2019a, Jahr 2015, witterungsbereinigt)

<sup>-</sup> nur Kieler Stadtgebiet, nicht zwingend vollständige PLZ-Gebiete

<sup>-</sup> für Kiel abgeschätzter Kesselwirkungsgrad (Endenergie -> Nachgefragte Energie): 88% basierend auf Kieler Wärmemix: 41% Fernwärme, 38% Erdgas, 16% Heizöl, 4% Strom (hauptsächlich) dezentrale Warmwassererzeugung), 1% anderes (SCS Hohmeyer | Partner, 2017, S. 44)



Peta 4.2 Wohngebäude (oben links, witterungsbereinigt), Kieler Wärmeatlas (oben rechts), Hotmaps Wohngebäude (unten links, witterungsbereinigt) und Schwanebeck Wohngebäude (unten links).

Quelle: Eigene Abbildung basierend auf eigenen und zur Verfügung gestellten Daten: Peta4.2, Kieler Wärmeatlases, Pezzutto et al. (2019a) und Malte Schwanebeck

### 4.3.2 Flensburg

Für das Stadtgebiet von Flensburg sowie für Tastrup wurden die von Peta 4.2 geschätzten Wärmebedarfe innerhalb der Postleitzahlgebiete (PLZ-Gebiete) aggregiert und mit den von den Stadtwerken Flensburg innerhalb dieser Gebiete abgerechneten Fernwärmemengen verglichen. Dieser Vergleich ist zulässig, weil der Anschlussgrad der Fernwärme sehr hoch ist (ca. 98%) und die Fernwärme kaum industrielle Prozesswärme liefert. Es bleibt zu bedenken, dass nicht alle Verbraucher das Warmwasser mit Fernwärme erzeugen und beispielsweise Durchlauferhitzer und elektrische Boiler verwenden. Zu deren Verbreitung haben die Stadtwerke keine Angaben gemacht. Das Klimaschutzkonzept geht im Bereich Gewerbe-Handel-Dienstleistung von einem Stromverbrauch von ca. 8,3 GWh (9% des Stromverbrauchs des Sektors) für Raumwärme- und Warmwassererzeugung aus (Universität Flensburg - Zentrum für nachhaltige Energiesysteme (ZNES), 330+337).

Peta 4.2 ist im Großen und Ganzen in der Lage, Gewerbe- und Wohngebiete zu unterscheiden (siehe Abbildung 4-9). So befindet sich der Wärmebedarf des Service-Sektors hauptsächlich im Stadtzentrum, in der Nordstadt und im PLZ-Gebiet 24941, wo sich das Gewerbegebiet Süd, der Förde-Park sowie das Gewerbegebiet rundum den Citti-Park befinden. Der Wärmebedarf der Wohngebäude ist dagegen über die ganze Stadt verteilt. Angesichts der datenarmen Methode, in die keinerlei Daten zur faktischen geografischen und sektoralen Verteilung von Gebäudeflächen einfließen, ist dies ein erfreuliches Ergebnis.

Insgesamt scheint in Flensburg der Wärmebedarf des Service-Sektors von Peta 4.2 überschätzt zu sein. Dafür spricht auch der Vergleich mit dem Klimaschutzkonzept (siehe Abschnitt 4.2: 480GWh vs. 229 GWh). Tabelle 4-11 zeigt ebenfalls, dass die Überschätzung im PLZ-Gebiet 24941 mit den Gewerbegebieten am höchsten ist. Diese Überschätzung tritt aber in allen verglichenen Modellen auf. Die Abweichung kann, den Stadtwerken zur Folge, nicht mit einem verhältnismäßig niedrigen Anschlussgrad begründet werden. Der Wärmebedarf in Nicht-Wohngebäuden wird von Hotmaps deutlich niedriger geschätzt als von Peta 4.2, aber auch als von Malte Schwanebeck. Als mögliche Erklärung kann der potentiell niedrigere spezifische Wärmebedarf pro Flächeneinheit von Speditions- und Lagergebäuden hinzugezogen werden, welche die Flächenmodelle zwar richtig erkennen, aber durch fehlende Differenzierung innerhalb dieser Gebäudekategorie in geheizte und nicht geheizte Gebäude generell überschätzen.

Der Wärmebedarf der privaten Haushalte wird von Peta 4.2 eher unterschätzt. Dafür spricht der Vergleich mit den Schätzungen von Malte Schwanebeck, Hotmaps und des Klimaschutzkonzepts, insbesondere wenn man beim Vergleichen den hohen Wirkungsgrad der Fernwärme-Übergabestationen (hier 99%) ansetzt (siehe Tabelle 4-9). Diese Annahme hieße, dass Peta 4.2 die lokalen Wärmebedarfe der Gebäude ausweise, die dann mit den Wirkungsgraden der lokal verwendeten Technologien (und nicht mit dem bundesdurchschnittlichen Wirkungsgrad) in Endenergie umzurechnen sind. Die Bewertung der Schätzung fällt hier insgesamt schwer, weil der Wärmebedarf der Haushalte im Klimaschutzkonzept deutlich unter der Schätzung von Malte Schwanebeck und von Hotmaps liegt und die Unterscheidung zwischen mit Haushalten und mit GHD-Unternehmen abgerechneter Fernwärme für die Stadtwerke Flensburg nur mit großem Aufwand, der hier vermieden wurde, möglich ist.

Wie alle anderen Daten wurden auch die Verbrauchsdaten mit den entsprechenden Heizgradtagen witterungsbereinigt (Eurostat, 2018), siehe dazu Abschnitt 2.4.

Tabelle 4-9: Schätzungen des Wärmebedarfs von Haushalten in Flensburg in GWh Endenergie

Peta 4.2 η = 0,76 (Dtl.) Wohn-ge- bäude	Peta 4.2 η = 0,99 (FL) Wohn-ge- bäude	Stadtwerke FL (Fern- wärme ge- samt)	Schwane- beck (Wohn-ge- bäude)	Klima- schutz- Konzept (Haushalte)	Hotmaps (Wohn-ge- bäude)	WP.SH (Wohn- gebäude)
595	457	773	700	540	724	691
100%	77%	130%	118%	91%	125%	116%

Quellen: Eigene Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt), zur Verfügung gestellte Daten der Stadtwerke Flensburg (Abgerechnete Fernwärme des Jahres 2016, witterungsbereinigt) und von Malte Schwanebeck, Universität Flensburg - Zentrum für nachhaltige Energiesysteme (ZNES) (2011), Pezzutto et al. (2019a)

Tabelle 4-10: Schätzungen des Wärmebedarfs von Haushalten und Service in Flensburg in GWh Endenergie

Peta 4.2 η = 0,79 (Dtl.) gesamt	Peta 4.2 η = 0,99 (FL) gesamt	Stadtwerke FL (Fern- wärme ge- samt)	Schwanebeck (Wohn- u. Nicht-Wohn- gebäude, ohne Prozess- wärme)	Klimaschutz- Konzept (Haushalte, GHD, Bundes- und Landes- liegen-schaf- ten)	Hotmaps (Wohn- u. Nicht-Wohn- gebäude)
1.066	851	773	1.090	769	867

.,	WP.SH v2 Gesamt, witterungsbereinigt	,	WP.SH v4 Gesamt, witte- rungsbereinigt
1025	1240	955	1079
96%	116%	90%	101%

Quellen: Eigene Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt), zur Verfügung gestellte Daten der Stadtwerke Flensburg (Abgerechnete Fernwärme des Jahres 2016, witterungsbereinigt) und von Malte Schwanebeck, Universität Flensburg - Zentrum für nachhaltige Energiesysteme (ZNES) (2011), Pezzutto et al. (2019a)

Tabelle 4-11 zeigt den detaillierten Vergleich zwischen den Daten der Stadtwerke Flensburg und Peta 4.2, wobei hier bei der Umrechnung in Endenergie von geringen Verlusten (1%) an den Fernwärme-Übergabestationen in den Gebäuden der Kunden ausgegangen wird. Im von Wohngebieten dominierten PLZ-Gebiet 24944 (nördliches Ostufer) liegt eine Unterschätzung vor. Es wurde außerdem festgestellt, dass einige Zellen im nördlichen Mürwik keine Wärmebedarfe haben (obwohl sie auch laut ESM builtup und auch gemäß der OSM-Basemap bebaut sind). Daraus könnte geschlussfolgert werden, dass der Wärmebedarf von Wohngebieten in dünn besiedelten Gebieten Flensburgs und anderswo möglicherweise unterschätzt wird.

Insgesamt gleichen sich die Über- und Unterschätzung aus, allerdings nicht in den PLZ-Gebieten 24944 und 2491 (siehe Tabelle 4-11). Im Vergleich von Verbrauchsdaten (Stadtwerke Flensburg), Klimaschutzkonzept der Stadt Flensburg, Schätzung der von Malte Schwanebeck, Hotmaps und Peta 4.2 entsteht der Eindruck, dass Malte Schwanebeck und Peta 4.2 den Wärmebedarf insgesamt überschätzen.

Bei den Berechnungen in den Tabelle 4-9, Tabelle 4-10 und Tabelle 4-11 wurden die von Peta 4.2 modellierten Wärmebedarfe sowie die Verbrauchswerte der Stadtwerke witterungsbereinigt. Dabei wurde die Witterungsunabhängigkeit von Brauchwasser vernachlässigt.

Im Jahr 2017 wurde mehr Fernwärme verbraucht und die Stadtwerke Flensburg begründen dies mit niedrigeren Temperaturen und höheren Heizgradtagen. Die hier verwendeten Heizgradtage von Eurostat sowie die recherchierten Daten (dregreedays.net und wetter.bohlberg.de) spiegeln das nicht wider. Trotzdem wurden die Verbrauchswerte in Tabelle 4-11 wie sonst auch mit Eurostat-Werten witterungsbereinigt und sind entsprechend vorsichtig zu verwenden.

Ideal wäre eine Aufsummierung innerhalb von Stadtteilen oder Ablesebezirken. Da jedoch für die Grenzen dieser Gebiete keine georeferenzierten Daten zur Verfügung standen, konnte ein direkter Vergleich in Versorgungsgebieten nicht geschehen.

Der Vergleich mit der Schätzung von Malte Schwanebecks Wärmebedarfskartierung zeigt, dass Wärmebedarfe in Peta 4.2 eher weiträumiger verteilt sind. Die Ursache hierfür liegt darin, dass geostatische Größen wie die Flächenversiegelung einem geografischen Tiefpassfilter in der raster-basierten Modellierung unterzogen werden, der ein unschärferes Bild der Verteilung von Geschoßflächen hinterlässt als die gebäudescharfe Modellierung mittels LiDAR-Daten.

Insgesamt liefern die Wärmebedarfskarten der Wohngebäude von Peta, HotMaps und Schwanebeck ein ähnliches Bild, auch wenn Peta und HotMaps den Wärmebedarf in Randbereichen überschätzen. Während HotMaps keine Zellen in der höchsten Wärmebedarfsdichteklasse über 1050 MWh/ha identifiziert, liegen Peta und Schwanebeck hier ganz ähnlich, trotz unterschiedlicher Methoden. Die drei Methoden zeigen, dass relativ datenarme Verfahren vergleichbare und konsistente Ergebnisse bei der geografischen Verteilung des Wärmebedarfes liefern, solange man in der Lage ist, eine gemeinsame Vergleichsgrundlage zu schaffen. Die absolute Bestimmung der Wärmebedarfsdichten erfordert ein robustes Benchmarking lokaler Wärmebedarfe.

In Abbildung 4-8 zeichnet sich ein ähnliches Bild wie bereits für Kiel ermittelt. Raster-basierte Methoden liefern ein unschärferes Bild als die gebäudebezogene Methode von Schwanebeck, aber alle Methoden kommen zu vergleichbaren Ergebnissen bei der Kartierung des Wärmebedarfes in Wohngebäuden. Abbildung 4-9 zeigt, dass während Peta im Vergleich zu Hotmaps und Schwanebeck zu hohen Wärmebedarfsdichten auf geringerer Fläche kommt, ist der Wärmebedarf bei Hotmaps auf die gesamte bebaute Fläche verteilt, wenn auch mit erkennbarem Schwerpunkt auf die durch die anderen Methoden ausgewiesenen Flächen.

Wie in Abbildung 4-10 zu sehen ist, kommen Peta und Schwanebeck zu vergleichbaren Wärmebedarfsdichten in den zentralen Stadtteilen, während Hotmaps insgesamt geringere Wärmebedarfsdichten ausweist. Peta und Hotmaps zeigen eine höhere Unschärfe in gering bebaute Gebiete hinein. Lage und der ungefähre Umfang des Wärmebedarfes werden von allen drei Methoden ähnlich erkannt.

Abbildung 4-11 macht anschaulich, dass die deutliche Unterschätzung des Wohngebäudebedarfes von Peta durch die vorgenommenen Anpassungen im WP.SH aufgehoben wird.

In Abbildung 4-12 ist zu sehen, dass die Überschätzung des Wärmebedarfes in Service-Sektorgebäuden durch Peta durch Anpassung an regionale Daten reduziert wird, allerdings funktioniert dies am besten mit aus Peta gewonnenen Flächendaten.

Wie Abbildung 4-13 zeigt, liefert die Anpassung der Peta-Methode insgesamt höhere, je nach Verfahren mehr oder weniger konsistente Ergebnisse für den gesamten Wärmebedarf der Stadt Flensburg.

Der Vergleich der Wärmebedarfe von Service-Sektorgebäuden spiegelt die größere Unsicherheit bei der Abschätzung von Gebäudeflächen dieses Sektors wieder. In nationalen und regionalen Statistiken gibt es keine verlässlichen Zahlen für die Geschossflächen dieses Sektors. Eine auf Klassifizierung einzelner kartierter Gebäude aufbauende Methode wie die von Schwanebeck liefert hier bessere Ergebnisse als die HotMaps-Methode. Peta mag Flächen absolut überschätzen, lokalisiert Gebäude des GHD-Sektors aber zuverlässiger.

Überlappt man Wärmebedarfskarten von Wohn- und Servicegebäuden (wie in Abbildung 4-10), so gleichen sich die Fehler bei Peta teilweise aus, wie auch die tabellarischen Vergleiche verdeutlichen. Dies kann einerseits Zufall sein, andererseits liegt der Grund teils in einer anzunehmenden Unschärfe bei Gebäuden mit Mischnutzung, wie sie es häufig gibt. Andererseits sind die geostatistischen Methoden nicht immer geeignet, hinreichend zu differenzieren. Für die weitere Arbeit soll daher nicht weiter differenziert werden und der Wärmebedarf sämtlicher Gebäude wird zusammengefasst.

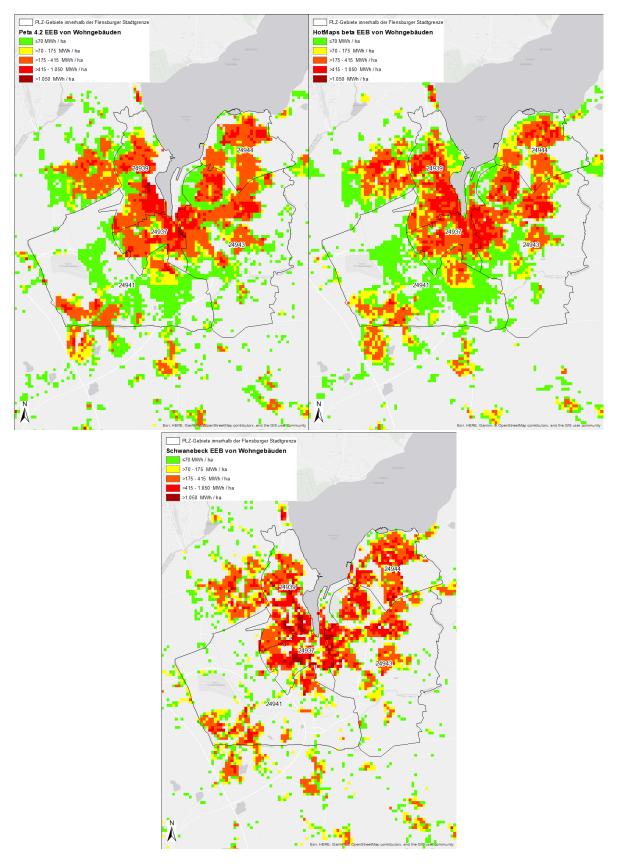


Abbildung 4-8: Wärme-Endenergiebedarfe (EEB) von Wohngebäuden in Flensburg
Peta 4.2 Wohngebäude-Wärmebedarfe (oben links, witterungsbereinigt), Hotmaps Wohngebäude (oben rechts, witterungsbereinigt) und Schwanebeck Wohngebäude (unten)

Quelle: Eigene Abbildung basierend auf eigenen und zur Verfügung gestellten Daten: Peta 4.2, Pezzutto et al. (2019a) und Schwanebeck

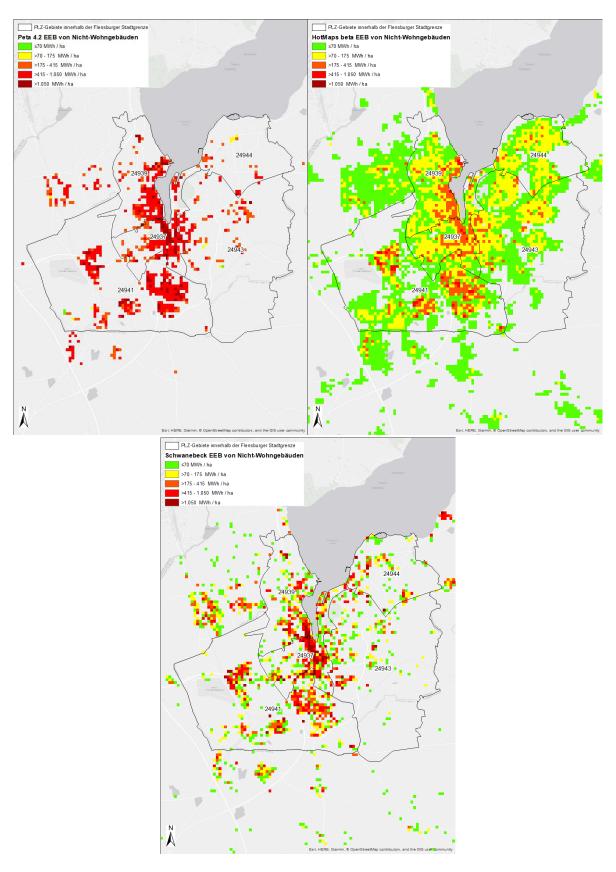


Abbildung 4-9: Wärme-Endenergiebedarfe vom Service-Sektor (GHD) bzw. von Nicht-Wohngebäuden in Flensburg Peta 4.2 Service-Sektor (oben links, witterungsbereinigt), Hotmaps Nicht-Wohngebäude (oben rechts, witterungsbereinigt) und Schwanebeck Nicht-Wohngebäude (unten)

Quelle: Eigene Abbildung basierend auf eigenen und zur Verfügung gestellten Daten: Peta 4.2, Pezzutto et al. (2019a) und Malte Schwanebeck

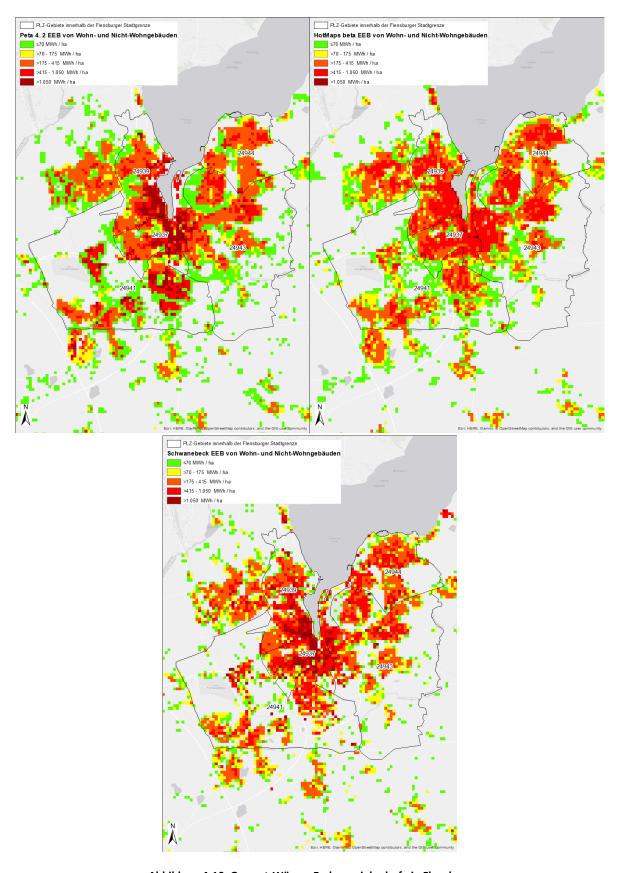


Abbildung 4-10: Gesamt-Wärme-Endenergiebedarfe in Flensburg
Peta 4.2 Wohnen und GHD (oben links, witterungsbereinigt), Hotmaps Wohn- und Nicht-Wohngebäude (oben rechts, witterungsbereinigt) und Schwanebeck Wohn- und Nicht-Wohngebäude (unten)
Quelle: Eigene Abbildung basierend auf eigenen und zur Verfügung gestellten Daten: Peta 4.2, Pezzutto et al. (2019a) und Malte Schwanebeck

Tabelle 4-11: Schätzungen der Wärmebedarfe von Wohngebäuden und GDH in Flensburger PLZ-Gebieten in MWh Endenergie

Witterungsbereinigung mit Heizgradtage für Schleswig-Holstein (Quelle: Eurostat. 2018)

- Witterungsbereinigung mit Heizgradtage für Schleswig-Holstein (Quelle: Eurostat, 2	018)

	-		Verbräuche von 2016		-		2015	
PLZ	Peta 4.2, in MWh Endenergie (η = 0,99), witte- rungsbereinigt	Peta 4.2 Anteil Service-Sektor	Abgerechnete Menge Fernwärme, in MWh - witte- rungsbereinigt	Abweichung von Peta 4.2	Schwanebeck,	Abweichung von Peta 4.2	Hotmaps beta, in MW	Abweichung von Peta 4.2
24937	167.516	58%	161.438	4%	232.349	-36%	141.645	15%
24939	189.268	44%	199.499	-5%	247.668	-28%	189.723	0%
24941	221.677	74%	119.928	46%	222.200	2%	167.600	24%
24943	191.186	21%	185.172	3%	247.418	-26%	250.142	-31%
24944	81.167	12%	107.097	-32%	135.962	-64%	118.083	-45%
Summe	850.813		773.134	9%	1.085.597	-25%	867.194	-2%

	-		Verbräuche von 2017		
PLZ	Peta 4.2, in MWh Endenergie (η = 0,99), witte- rungsbereinigt	Peta 4.2 Anteil Service-Sektor	Abgerechnete Menge Fernwärme, in MWh - witte- rungsbereinigt	Abweichung von Peta 4.2	
24937	167.516	58%	188.437	-12%	
24939	189.268	44%	210.648	-11%	
24941	221.677	74%	127.374	43%	
24943	191.186	21%	195.279	-2%	
24944	81.167	12%	112.345	-38%	
Summe	167.516		834.083	2%	

Quellen: Eigene Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt), zur Verfügung gestellte Daten der Flensburger Stadtwerke (Abgerechnete Fernwärme des Jahres 2016 und 2017, witterungsbereinigt) und von Malte Schwanebeck, Pezzutto et al. (2019a, Jahr 2015, witterungsbereinigt)

Nimmt man die Werte des im vorliegenden Projekt entwickelten Wärmeplans.SH mit in den Vergleich hinein, zeigt sich für Flensburg (siehe Abbildung 4-11), dass die vorgenommenen Anpassungen die Unterschätzung von Peta 4.2 ausgleichen und zu Ergebnissen führen, die insgesamt näher an denen von Malte Schwanebeck liegen. Aus Abbildung 4-12 geht hervor, wie Anpassungen des Modells zur Berechnung des Wärmebedarfes der Service-Sektorgebäude das Ergebnis beeinflussen. In Abbildung 4-13 erfolgt schließlich der Vergleich aller Methoden mit den faktisch abgerechneten Wärmebedarfen Flensburgs. Es zeigt sich, dass die durch das Peta-Modell mittels multilinearer Regression mit niedrigem Bestimmtheitsmaß gewonnenen Werte für die Verteilung von Geschoßflächen besser funktionieren als die in Hotmaps durch die Verwendung von Gebäudegrundrissen ermittelten.

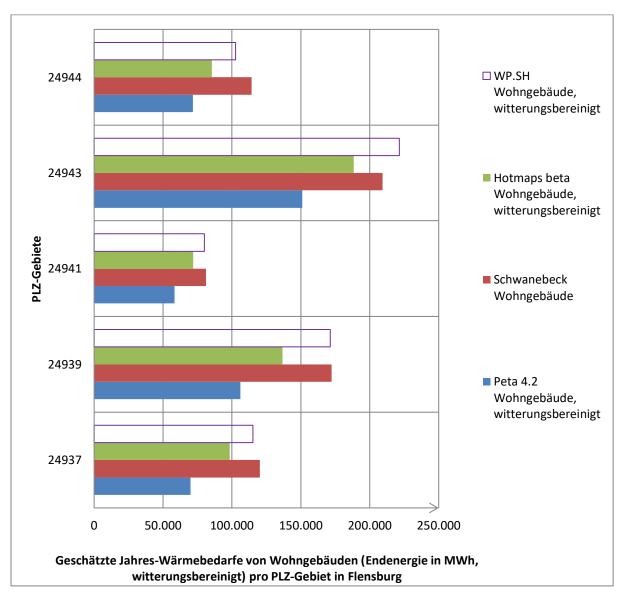


Abbildung 4-11: Schätzungen der Wärmebedarfe von Wohngebäuden in Flensburger PLZ-Gebieten in Endenergie Quellen: Eigene Darstellung basierend auf Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt), zur Verfügung gestellten Daten von Malte Schwanebeck und Pezzutto et al. (2019a, Jahr 2015, witterungsbereinigt)

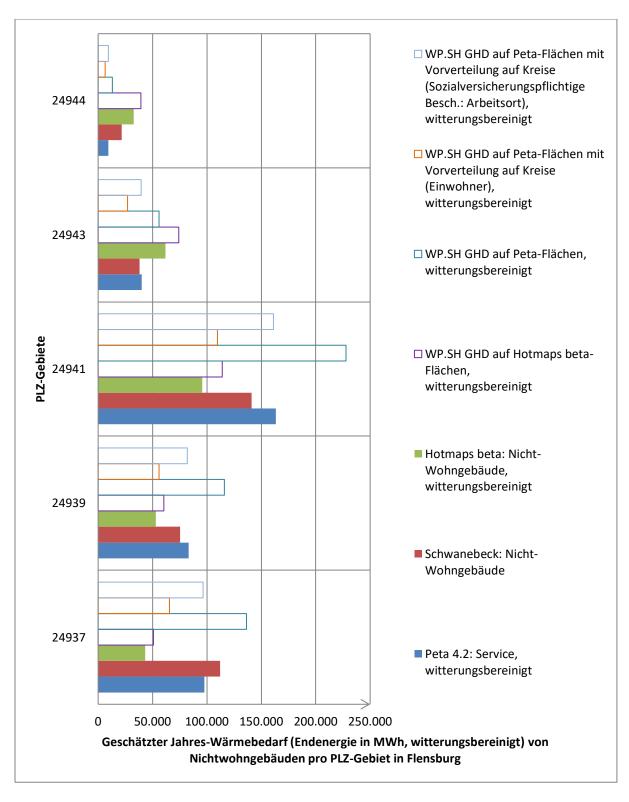


Abbildung 4-12: Schätzungen der Wärmebedarfe von Nicht-Wohngebäuden in Flensburger PLZ-Gebieten in Endenergie Quellen: Eigene Darstellung basierend auf Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt), zur Verfügung gestellten Daten von Malte Schwanebeck und Pezzutto et al. (2019a, Jahr 2015, witterungsbereinigt)

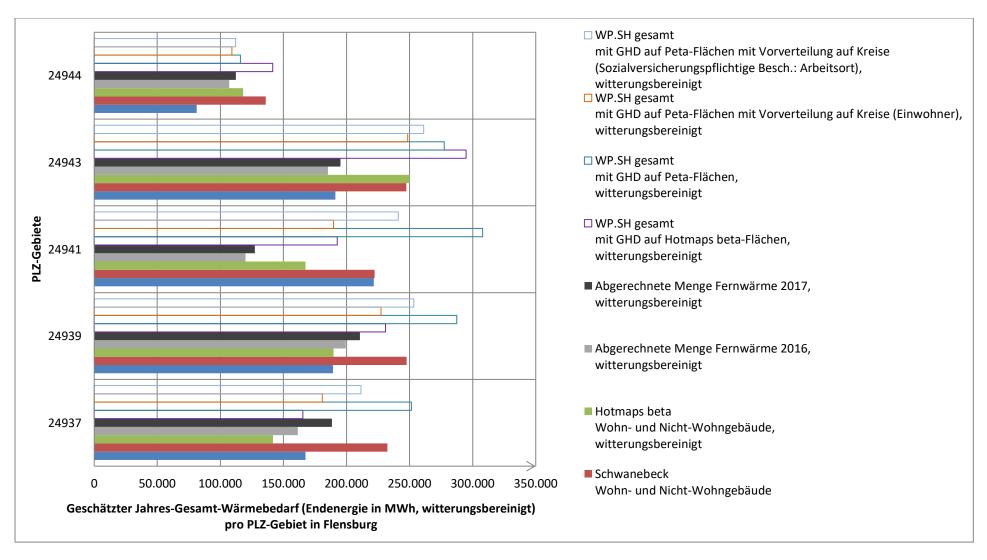


Abbildung 4-13: Schätzungen der Gesamt-Wärmebedarfe in Flensburger PLZ-Gebieten in Endenergie Quellen: Eigene Darstellung basierend auf Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt), zur Verfügung gestellten Daten der Stadtwerke Flensburg (Jahr 2016, witterungsbereinigt) und von Malte Schwanebeck, Pezzutto et al. (2019a, Jahr 2015, witterungsbereinigt)

#### 4.3.3 Lübeck

Für die Hansestadt Lübeck gibt es ein Klimaschutzteilkonzept Wärme (K.GREENTECH GmbH, 2014) mit Informationen zum Wärmebedarf. Außerdem wurde durch die Kooperation mit Malte Schwanebeck (Schwanebeck, 2016) an der CAU und durch die Veröffentlichung der Hotmaps-Schätzung (Pezzutto et al., 2019a) auch für Lübeck der Vergleich mit den von anderen geschätzten Wärmebedarfen von Wohn- und Nicht-Wohngebäuden möglich.

Laut des Klimaschutzteilkonzepts Wärme (K.GREENTECH GmbH, 2014, S. 7 und 22) betrug der gesamte Wärmebedarf der Hansestadt im Jahr 2010 **ca. 2.620 GWh**. Diese Aussage wird so verstanden, dass auch der Wärmebedarf von Gewerbe- und Industriebetrieben enthalten ist. Eine Differenzierung des Wärmebedarfs wurde in diesem Bericht nicht vorgenommen.

Im Vergleich dazu überschätzt Peta 4.2 den Wärmebedarf (**2.907 GWh** Endenergie (Kesselwirkungsgrad 81%), siehe Tabelle 4-13), der keine industriellen Wärmebedarfe enthält. Es ist festzustellen, dass Peta 4.2 insgesamt in Lübeck einen extrem hohen Anteil des Service-Sektors (51%) abschätzt. Das geht einher mit der Überschätzung des Wärmebedarfs des Service-Sektors und der **leichten/moderaten** Unterschätzung des Wärmebedarfs der Haushalte. Der extrem hohe Service-Wärmebedarf von Peta 4.2 befindet sich vor allem in Stadtzentrum (siehe Tabelle 4-14 und Abbildung 4-18). Auch der Vergleich mit dem Lübecker Wärmeatlas (K.GREENTECH GmbH, 2014), zeigt die Überschätzung im Innenstadt-Bereich (siehe Abbildung 4-20).

Es stellt sich die Frage, warum Peta 4.2 extrem viel Service-Wärmebedarf verortet. Das ginge über einen Vergleich der Parameter, die den Input für Service plot ratio bilden, zwischen den Städten. Da hier allerdings konkrete Geodaten als Vergleichsgrundlage fehlen, etwa in Form eines Gebäudeflächenkatasters, konnte das Peta zu Grunde liegende geostatistische Modell nicht für Lübeck aufgeschlüsselt werden.

Bei der Untersuchung der Ursache für das Ausreißen der Service-Wärmebedarfe in Lübeck wurde zunächst festgestellt, dass bereits die Service-Flächen in Lübeck überschätzt werden. Ihre Summe ist nicht nur höher als in der Schätzung von Hotmaps, sondern auch fast doppelt so hoch wie die Peta 4.2-Schätzung für Kiel. Das wird als unrealistisch eingeschätzt, auch wenn die Stadt Lübeck fast doppelt so viel Landfläche hat wie Kiel. Bei der Untersuchung der Inputs für das Serviceflächen-Modell war besonders der Parameter ESM³ auffällig.

Schon die Abbildung von ESM zeigt, dass die Stadt Lübeck laut ESM verglichen mit Kiel und Flensburg auf einer relativ größeren Fläche hohe Werte hat. Die Gründe dafür sind in der Bereitstellung der European Settlement Map zu finden. Es handelt sich hierbei wahrscheinlich um einen Deutungsfehler der zu Grunde liegenden Satellitenbilder. Nur in Lübeck wird von Peta 4.2 im Vergleich zu Hotmaps die Service-Fläche überschätzt. Entsprechend stark wirkt sich das Potenzieren von ESM aus. Die starke Überschätzung des Wärmebedarfs findet in den nördlichen bzw. nordwestlichen PLZ-Gebieten statt, die an den Kern der Stadt Lübeck grenzen.

Die Witterungsbereinigung wurde wie beim Vergleich mit dem Kieler Wärmeatlas mithilfe der schleswig-holsteinischen Heizgradtage von 2015 sowie des Durchschnitts der letzten 10 Jahre unter Vernachlässigung der Witterungsunabhängigkeit von Brauchwasser vorgenommen. Die Werte von der Malte Schwanebeck basieren auf witterungsbereinigten Kennwerten (siehe Schwanebeck, 2016, S. 21), so dass eine Witterungsbereinigung nicht notwendig ist.

Tabelle 4-12: Schätzungen des Wärmebedarfs von Wohngebäuden im Lübecker Stadtgebiet in GWh Endenergie

Peta 4.2 η = 0.76 (Dtl.)	Peta 4.2 η = 0.81 (Lübeck)	GREENTECH (incl. Indus- trie und Ser- vice)	Schwanebeck (Wohn-ge- bäude)	Hotmaps (Wohn-ge- bäude)	WP.SH (Wohn-ge- bäude)
1.557	1.423	2.620	1.661	1.356	1.760
100%	91%	168%	107%	87%	124%

Quellen: Eigene Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt), K.GREENTECH GmbH (2014), zur Verfügung gestellte Daten von Malte Schwanebeck, Pezzutto et al. (2019a)

Tabelle 4-13: Schätzungen des Gesamtwärmebedarfs von Wohngebäuden und Nicht-Wohngebäuden im Lübecker Stadtgebiet in GWh Endenergie

SCOICE III G VVIII I	-macher Bre			
Peta 4.2 η = 0.79 (Dtl.)	Peta 4.2 η = 0.81 (Lübeck)	GREENTECH (incl. Industrie und Service)	Schwanebeck (Wohn- u. Nicht- Wohngebäude, ohne Prozess- wärme)	Hotmaps (Wohn- und Nicht- Wohngebäude, FEC)
3.076	2.907	2.620	2.283	2.363
100%	95%	85%	74%	77%

WP.SH v1 (Wohn- und Nicht-Wohngebäude) witterungsbereinigt	WP.SH v2 (Wohn- und Nicht- Wohngebäude) witterungsbereinigt	WP SH.v3 (Wohn- und Nicht- Wohngebäude) witterungsbereinigt	WP SH.v4 (Wohn- und Nicht- Wohngebäude) witterungsbereinigt
4.760	2 457	2.427	2.422
1.760	3.457	2.427	2.130

Quellen: Eigene Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt), K.GREENTECH GmbH (2014), zur Verfügung gestellte Daten von Malte Schwanebeck, Pezzutto et al. (2019a)

Auf der kartografischen Abbildung des Wärmebedarfes in Wohngebäuden (siehe Abbildung 4-17) zeigt sich ein ähnliches Bild wie schon für Kiel und Flensburg. Hotmaps resultiert in weniger hohen Wärmebedarfsdichten, Schwanebecks Wärmeatlas hat im Vergleich zu Peta 4.2 und Hotmaps weniger Wärmebedarf in Randgebieten. Schwanebecks Atlas zeigt zudem sehr hohe Wärmebedarfsdichten für den historischen Stadtkern. Für die meisten Bebauungen mittlerer Wärmebedarfsdichte sind die drei Methoden unmittelbar vergleichbar.

Wie schon aus der tabellarischen Darstellung ersichtlich ist und wie schon für Flensburg und Kiel dokumentiert, zeigt auch der kartografische Vergleich der drei Methoden beim Service-Sektor (siehe Abbildung 4-18) die größten Abweichungen. Peta 4.2 verteilt unrealistisch hohe Wärmebedarfsdichten auf recht große Gebiete. Hotmaps zeigt eine breite Verteilung des Wärmebedarfes und kann die erwartete Bebauung mit Gebäuden des GHD-Sektors nicht korrekt abbilden. Schwanebecks Modell sieht am realistischsten aus.

In Abbildung 4-14 ist zu sehen, dass die drei Methoden Peta, Hotmaps und Schwanebeck bis auf PLZ 23552 recht ähnliche Wärmebedarfe schätzen. Doch resultiert die Witterungsbereinigung in WP.SH in insgesamt höheren Wärmebedarfen.

Nicht-Wohngebäude, siehe Abbildung 4-15, haben in Peta durchweg wesentlich höhere Wärmebedarfe, der Grund ist der insgesamt höhere Bebauungsgrad in der geografischen Datengrundlage, der ESM. Eine Anpassung durch Vorverteilung des Wärmebedarfes in diesem Sektor durch die Anzahl der Sozialversicherungspflichtigen oder der Einwohner korrigiert dies.

Die Überschätzung des Wärmebedarfes im Service-Sektor in Peta, vergleiche Abbildung 4-16, hat großen Einfluss auf die Verteilung des Gesamtwärmebedarfes. Die Anpassung durch Vorverteilung reduziert die Wärmebedarfe in Richtung der Werte der anderen Methoden.

Wie auch in Kiel und Flensburg liefern alle drei Verfahren konsistente Kartierungen von Flächen mit Wärmebedarfen in Lübeck, siehe Abbildung 4-17. Die durch Rasteranalysen bedingte Unschärfe ist auch hier erkennbar, während die gebäudescharfe Modellierung durch Schwanebeck in hohen Wärmebedarfsdichten im historischen Stadtkern führt. Die Überschätzung von Peta ist auch ohne Vergleich deutlich zu erkennen, siehe Abbildung 4-18. Für Hotmaps und Schwanebeck ergibt sich ein Bild wie schon für Kiel und Flensburg.

Der Vergleich mit dem Wärmeatlas von Greentech, siehe Abbildung 4-20, bei dem kein direkter Zugang zu dessen Geodaten bestand, ist wegen der unterschiedlichen Intervalle der Legende sowie der größeren Gitterzellen von 500m nicht möglich. Es zeigt sich jedoch ein recht ähnliches Bild wie in den anderen Wärmebedarfskarten.

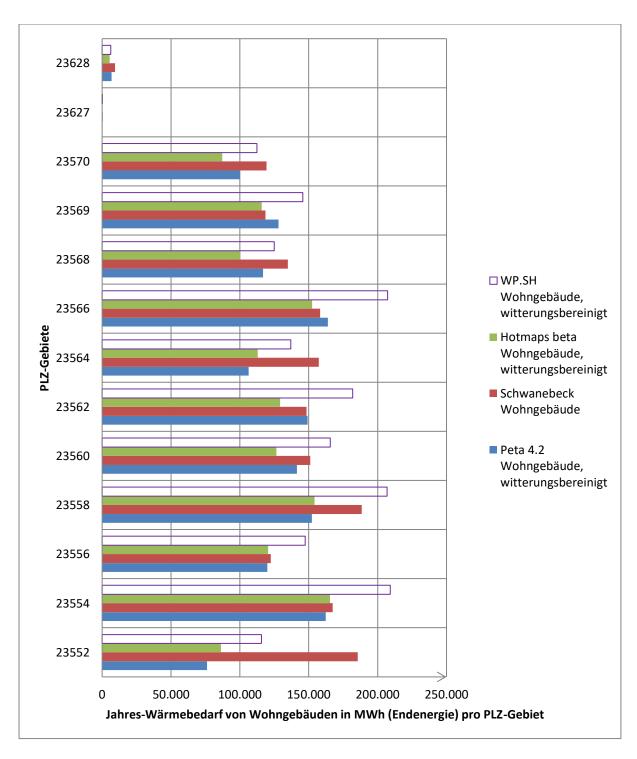


Abbildung 4-14: Schätzungen der Wärmebedarfe von Wohngebäuden in Lübecker PLZ-Gebieten in Endenergie Quellen: Eigene Darstellung basierend auf Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt) sowie auf zur Verfügung gestellten Daten von Malte Schwanebeck und Pezzutto et al. (2019a)

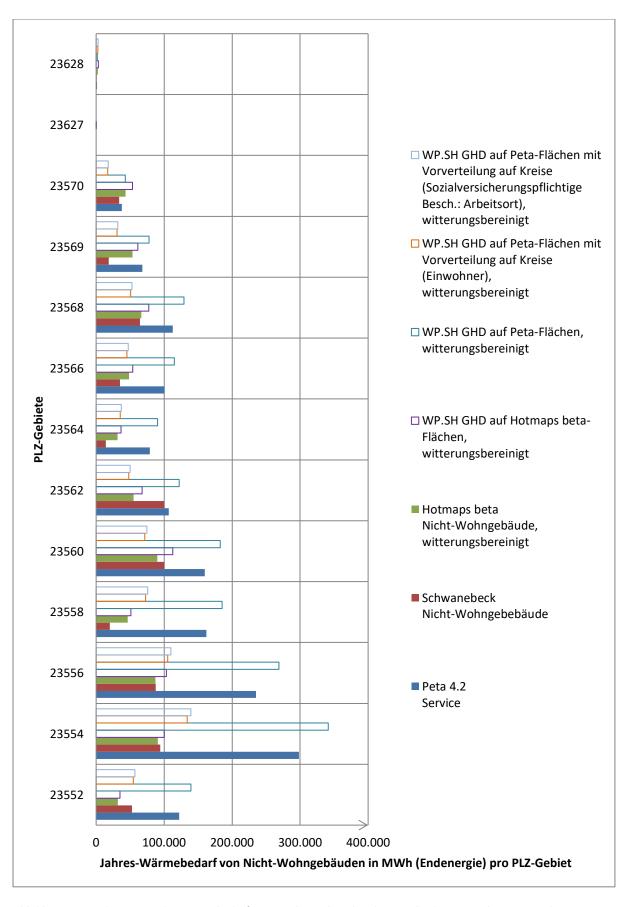


Abbildung 4-15: Schätzungen der Wärmebedarfe von Nicht-Wohngebäuden in Lübecker PLZ-Gebieten in Endenergie Quellen: Eigene Darstellung basierend auf Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt) sowie auf zur Verfügung gestellten Daten von Malte Schwanebeck und Pezzutto et al. (2019a)

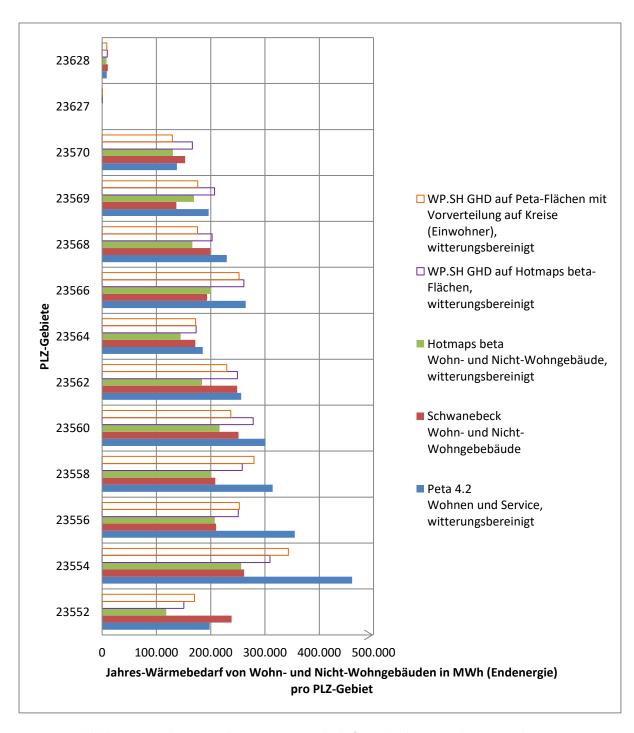


Abbildung 4-16: Schätzungen der Gesamt-Wärmebedarfe in Lübecker PLZ-Gebieten in Endenergie Quellen: Eigene Darstellung basierend auf Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt) sowie auf zur Verfügung gestellten Daten von Malte Schwanebeck und Pezzutto et al. (2019a)

Tabelle 4-14: Schätzungen des Wärmebedarfs von Wohn- und Nicht-Wohngebäuden in Lübecker PLZ-Gebieten in MWh Endenergie

- für Lübeck abgeschätzter Kesselwirkungsgrad: 81% basierend auf Lübecker Wärmemix: 10% Fernwärme, 67% Erdgas, 12.5% Heizöl, 1% Strom, 1% Kohle
- Witterungsbereinigung mit Heizgradtagen für Schleswig-Holstein (Quelle: Eurostat, 2018)

PLZ	Peta 4.2 Wohnen und Service, in MWh	Peta 4.2 Anteil des Service-Sek- tors	Schwanebeck Wohn- und Nicht-Wohn- gebebäude, in MWh	Schwanebeck Anteil Nicht- Wohngebäude	Abweichung von Peta 4.2: Wohnen und Ser- vice	Hotmaps beta Wohn- und Nicht-Wohnge- bäude, in MWh	Hotmaps Anteil Nicht- Wohngebäude	Abweichung von Peta 4.2: Wohnen und Service
23552	198.161	62%	238.446	22%	-20%	118.073	27%	40%
23554	460.637	65%	261.714	36%	43%	256.007	35%	44%
23556	354.893	66%	209.938	42%	41%	207.532	42%	42%
23558	314.140	52%	208.411	10%	34%	200.578	23%	36%
23560	300.991	53%	251.199	40%	17%	216.298	42%	28%
23562	255.937	42%	248.631	40%	3%	184.003	30%	28%
23564	185.386	43%	171.576	8%	7%	144.683	22%	22%
23566	264.585	38%	193.291	18%	27%	200.868	24%	24%
23568	229.742	49%	199.123	32%	13%	166.429	40%	28%
23569	196.288	35%	136.853	13%	30%	169.315	32%	14%
23570	137.708	27%	153.045	22%	-11%	130.326	33%	5%
23627	350	0%	596	8%	-71%	269	41%	23%
23628	8.299	18%	10.257	9%	-24%	8.111	31%	2%
Summe	2.907.116	51%	2.283.079	27%	21%	2.002.490	32%	31%

Quellen: Eigene Peta 4.2-Daten (Jahr 2015, witterungsbereinigt), zur Verfügung gestellte Daten von Malte Schwanebeck, Pezzutto et al. (2019a, Jahr 2015, witterungsbereinigt)

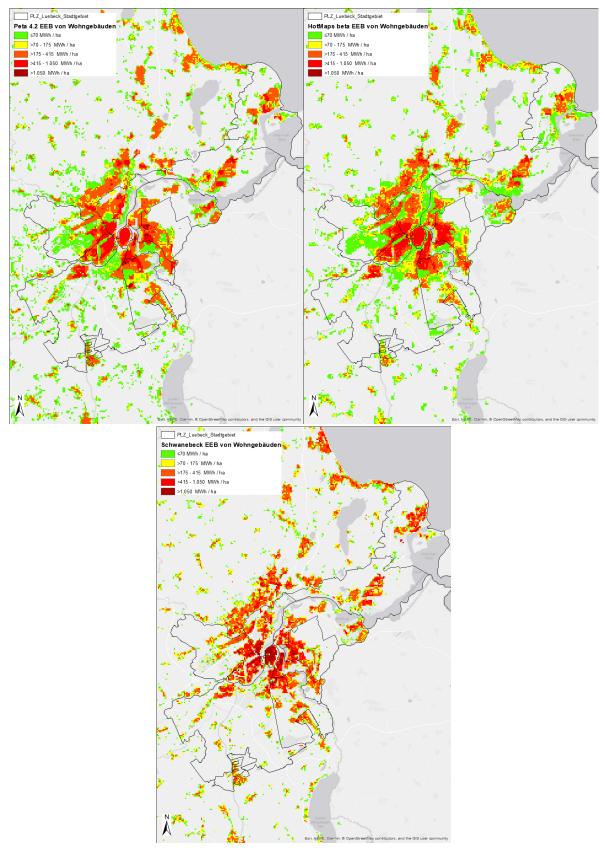


Abbildung 4-17: Wärme-Endenergiebedarfe von Wohngebäuden in Lübeck Peta 4.2 Wohngebäude (links oben, witterungsbereinigt), Hotmaps Wohngebäude (rechts oben, witterungsbereinigt), Schwanebeck Wohngebäude (unten)

Quelle: Eigene Abbildung basierend auf eigenen und zur Verfügung gestellten Daten: Peta 4.2, Pezzutto et al. (2019a) und Malte Schwanebeck

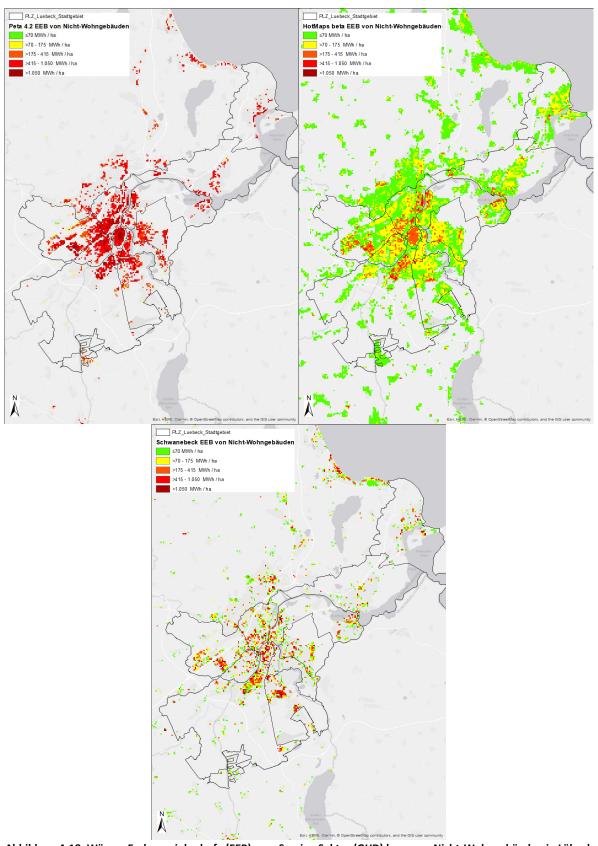


Abbildung 4-18: Wärme-Endenergiebedarfe (EEB) vom Service-Sektor (GHD) bzw. von Nicht-Wohngebäuden in Lübeck Peta 4.2 Service-Sektor (links oben, witterungsbereinigt), Hotmaps Nicht-Wohngebäude (rechts oben, witterungsbereinigt) und Schwanebeck Nicht-Wohngebäude (unten)

Quelle: Eigene Abbildung basierend auf eigenen und zur Verfügung gestellten Daten: Peta 4.2, Pezzutto et al. (2019a) und Malte Schwanebeck

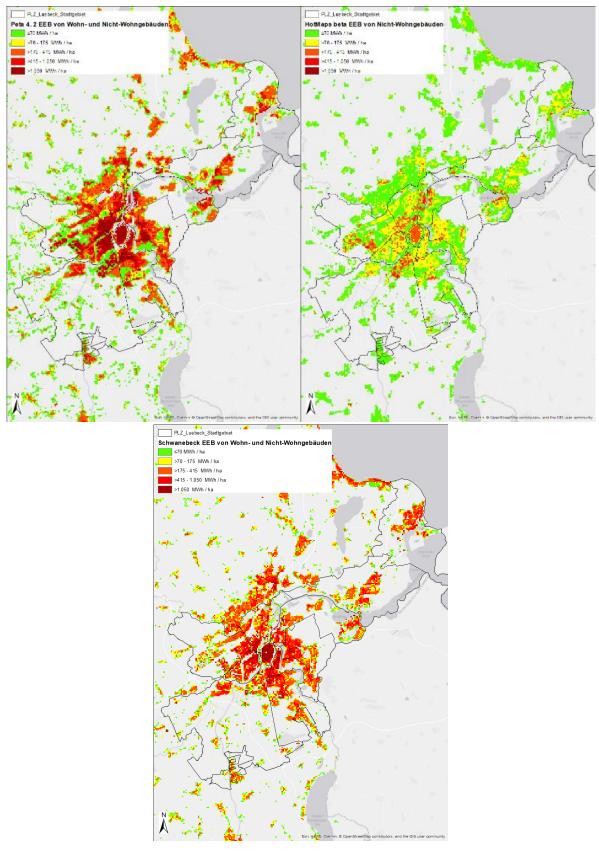


Abbildung 4-19: Gesamt-Wärme-Endenergiebedarfe in Lübeck
Peta 4.2 (oben links, witterungsbereinigt), Hotmaps (oben rechts, witterungsbereinigt) und Schwanebeck (unten)
Quelle: Eigene Abbildung basierend auf eigenen und zur Verfügung gestellten Daten: Peta 4.2, Pezzutto et al. (2019a)
und Malte Schwanebeck

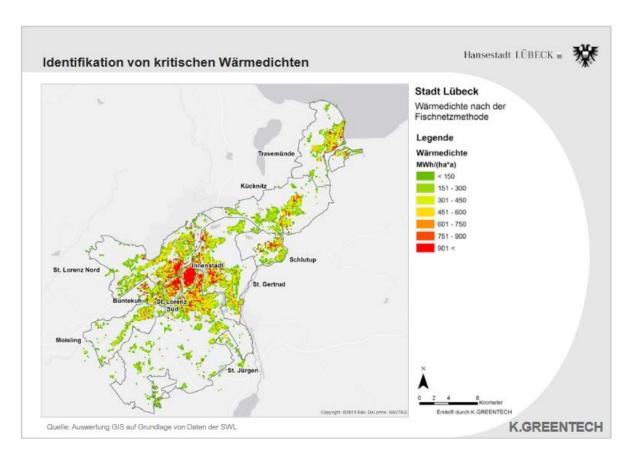


Abbildung 4-20: Wärmeatlas - Darstellung der Wärmedichten aus dem Klimaschutzteilkonzept Wärme der Stadt Lübeck Quelle: K.GREENTECH GmbH (2014, S. 26)

### 4.3.4 Ausgewählte Nahwärmenetze

Während der Vergleich der Ergebnisse von Peta 4.2, Hotmaps und Malte Schwanebeck untereinander für die größten Städte im Land einen guten Überblick über die Leistungsfähigkeit und die Schwachpunkte der verschiedenen Modelle ergab, ist die Situation in kleineren Siedlungen in ländlichen Regionen noch abhängiger von einer geografisch hochaufgelösten Modellierung. Während Städte mit ihrer größeren Ausdehnung und der damit höheren Anzahl Gitterzellen geringere Fehlerquoten haben, sind kleinere Nahwärmenetze mit wenigen Hektar-Zellen Ausbreitung sehr viel anfälliger für die fehlerhafte Verortung von Siedlungsstrukturen und deren Intensität, gemessen in Geschoßflächen. Daher ist hier große Vorsicht geboten und es wird generell davon abgeraten, Wärmebedarfe einzelner, kleinerer Siedlungsbereiche aus dem Wärmeatlas ablesen zu wollen.

Im Folgenden werden beispielhaft die Jahreswärmeverbräuche von 26 Nahwärmenetzen näher untersucht. Für den Vergleich wurden von Hendrik Ostermann (2018) mithilfe von CAD-Netzkarten über die faktische Ausbreitung bestehender Nahwärmenetze diejenigen 100m-Rasterzellen identifiziert, in denen sich die Netze und die angeschlossenen Häuser befinden. Im Gegensatz zu der in Peta verwendeten Methode stellen die daraus entwickelten 100m-Gitternetzrepräsentationen bestehender Nahwärmenetze die maximal mögliche Flächenausdehnung von Wärmenetzen dar. Es wird darauf hingewiesen, dass diese Flächen keine Löcher haben, also im Inneren keine Rasterzellen ausgespart wurden.

Tabelle 4-15 und Abbildung 4-22 zeigen die Summen der Gesamt-Wärmebedarfe, die für die in Absprache mit der Firma Gottburg anonymisierten Netzgebiete geschätzt bzw. bei der Wärmenetzplanung zugrunde gelegt wurden. Dabei ist zu bedenken, dass die erzielten Anschlussgrade bei der Planung/Realisierung zwischen 30% und 60% des Wärmebedarfes liegen. Das heißt, dass nicht alle Haushalte und Unternehmen im Netzgebiet ans Netz angeschlossen wurden und folglich auch nicht ihren Wärmedarf mit Nahwärme decken. Der Anschlussgrad ist schwierig zu ermitteln, weil die Wärmebedarfe der nicht angeschlossenen Gebäude nicht von Gottburg untersucht worden sind.

Nicht für alle Netze liegen Daten für die im Jahr 2017 abgerechnete Nahwärmemenge vor. Auffallend ist, dass in den meisten vorliegenden Fällen die abgesetzte Nahwärmemenge (hier nicht detailliert aufgeführt) trotz Witterungsbereinigung deutlich unter der geplanten Menge liegt. Die Angaben der geplanten Wärmemenge basieren auf den Bedarfs-/Verbrauchsschätzungen der anzuschließenden Verbraucher und erscheinen in vielen Fällen optimistisch. In zwei Fällen war die abgerechnete Menge allerdings deutlich höher als die geplante. Der Grund hierfür ist, dass sich in mehreren Fällen nach Projektbeginn weitere Verbraucher entschließen, sich an ein Nahwärmenetz anzuschließen. Dieses Verhalten ist problematisch für die Auslegung und die Finanzierung von solchen Projekten, wie aus der Masterarbeit von Steffen Dammann (2019) hervorgeht. Ein Vergleich der ex-ante berechneten Wärmebedarfe mit den ex-post abgerechneten Wärmelieferungen sowie mit dem globalen Peta-Modell ist daher mit hohen Unsicherheiten verbunden und oft nicht sinnvoll.

Betrachtet man die unterschiedlichen Schätzungen, so zeigt sich, dass die Wärmemengen aus den Netzplanungen trotz der Anschlussgrad von deutlich unter 100% nicht immer niedriger sind als die Schätzungen, die alle Wärmebedarfe erfassen. Die abgesetzte Wärmemenge ist aber wie bereits erwähnt oft niedriger als die Planung. Am höchsten sind in den meisten Fällen die Schätzungen von Malte Schwanebeck; die Schätzungen von Hotmaps und Peta 4.2 liegen meist darunter.

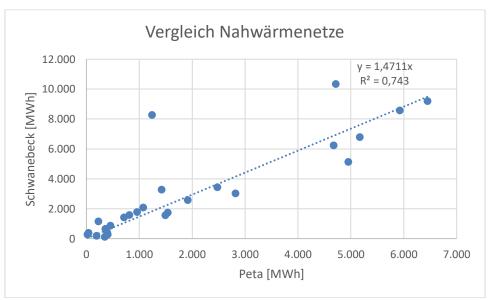


Abbildung 4-21: Vergleich Nahwärmebedarf modelliert von Malte Schwarnebeck und Peta Quelle: Eigene Abbildung basierend auf Tabelle 4-15

Der direkte Vergleich(siehe Abbildung 4-21) zwischen den jährlichen Wärmebedarfen in den 26 Nahwärmenetzen zwischen Peta 4.2 und Malte Schwanebecks Ergebnis zeigt die in den meisten Fällen

hohe Übereinstimmung der Resultate, allerdings bestätigt die Regressionslinie die insgesamt höheren Wärmebedarfe bei Schwanebeck. Bis auf 2-3 Ausnahmen korrelieren die beiden Methoden recht gut, zeigen aber einen um einen Faktor 1,47 höheren Wärmebedarf für Schwanebeck verglichen mit Peta 4.2. Die Umrechnung von Peta 4.2 in Endenergie erfolgte mit einem Wirkungsgrad von 0.79, auch wenn Fernwärme eigentlich effizienter ist. Bei Annahme eines Wirkungsgrads von 0.99, wären die Werte von Peta 4.2 niedriger, weil weniger Verluste eingerechnet würden und die Abstände zu Malte Schwanebecks Schätzung wären noch größer.

Der Vergleich (siehe Tabelle 4-15) zwischen den Ergebnissen der drei Methoden von Peta 4.2, Hotmaps und Schwanebeck zeigt ein uneinheitliches Bild. Aus den Vergleichen lässt sich nicht erklären, warum solche teils signifikanten Abweichungen bestehen. Ein schwacher Trend zu höheren Abweichungen bei geringeren Jahreswärmemengen ist erkennbar. Dies ist durch die zu erwartende höhere statistische Abweichung bei kleinere Probennahme zu erklären. Ein bedeutenderer Einfluss wird allerdings der geografischen Darstellung von Siedlungsbereichen insbesondere im ländlichen Bereich zugemessen. Hier kann die gitternetzbasierte Kartierung nicht die konkreten Grenzen von Siedlungen abbilden. Auch ergibt sich durch die Rasterung eine Unterrepräsentation von Rändern der Siedlungsbereiche, welches bei kleineren und bei geografisch gestreckten Siedlungen zu größeren Fehlern führt. Hier ist das Verhältnis von Perimeter zu Fläche generell größer. Schließlich sind Abweichungen durch die vorhergehenden Methoden der Herstellung der zugrundeliegenden Geodaten zu erwarten, hier insbesondere das Bevölkerungsraster, welches aus Interpretationen weiterer Geodaten aufbaut.

Durch die hohen Abweichungen zwischen projektierter und realisierter Wärmemenge ist ein direkter Vergleich zu den von Gottburg gelieferten Daten leider nicht für die Validierung mittels statistischer Methoden möglich.

Die Anteile des Wärmebedarfs des GHD-Sektors fallen bei Peta 4.2 am niedrigsten aus, oft sind sie sogar gleich null. Einige vorhandene und an die bestehenden Netze angeschlossene GHD-Gebäude sowie z.B. ein Baumarkt und eine Schule wurden von Peta 4.2 nicht erkannt. Die Schätzungen von Hotmaps und Malte Schwanebeck weisen höhere Service-Anteile auf.

Werden die in Peta 4.2 prognostizierten Wärmenetze mit den realen Wärmenetzen verglichen (Abbildung 4-23), kann man Folgendes sagen: Es wurden einige Wärmenetze realisiert, die von Peta 4.2 nicht identifiziert wurden. In anderen Gemeinden wurden Potentiale für Wärmenetze identifiziert, die Form dieser ist allerdings eher kompakt. Von einem direkten Vergleich dieser Wärmebedarfe wurde daher abgesehen. Abbildung 4-24 ist eine grafische Gegenüberstellung der unterschiedlichen Wärmebedarfskartierungen in einem Teil von Nordfriesland. Dabei werden keine markanten Unterschiede deutlich.

Tabelle 4-15: Vergleich von geplantem und geschätztem Wärmebedarf in Nahwärme-Netzen

- Witterungsbereinigung mit Heizgradtage für Schleswig-Holstein (Quelle: Eurostat, 2018)

- Verwendung des bundesdurchschnittlichen Kesselwirkungsgrads von 79% (siehe Abschnitt 2.3.3)

Netz-Nr.	Peta 4.2	Schwanebeck	Schwanebeck: Ab-	Hotmaps beta	Hotmaps beta: Ab-	Wärmemenge Pla-	"modellierter An-
	Wohngebäuden und	Wohn- und Nicht-	weichung von	Wohn- und Nicht-	weichung von Peta	nung	schlussgrad"
	GHD,	Wohngebäude	Peta 4.2	Wohngebäude,	4.2	in MWh Endenergie	= Planung / (Peta 4.2)
	witterungsbereinigt			witterungsbereinigt			
Netz 1	6.450	9.193	-43%	8.092	-25%	3.786	59%
Netz 2	1.492	1.554	-4%	1.596	-7%	1.742	117%
Netz 3	1.918	2.561	-34%	2.571	-34%	1.383	72%
Netz 4	5.168	6.781	-31%	4.526	12%	4.016	78%
Netz 5	229	1.141	-398%	266	-16%	987	430%
Netz 6	1.073	2.063	-92%	1.060	1%	1.667	155%
Netz 7	4.713	10.323	-119%	4.984	-6%	4.554	97%
Netz 8	4.675	6.218	-33%	5.305	-13%	4.642	99%
Netz 9	393	390	1%	0	100%	390	99%
Netz 10	358	639	-78%	199	45%	785	219%
Netz 11	2.477	3.423	-38%	2.444	1%	1.498	60%
Netz 12	1.424	3.259	-129%	1.545	-8%	1.802	127%
Netz 13	1.539	1.724	-12%	1.901	-24%	1.190	77%
Netz 14	5.925	8.563	-45%	5.470	8%	2.459	41%
Netz 15	404	265	34%	303	25%	378	94%
Netz 16	193	170	12%	136	29%	200	104%
Netz 17	42	372	-794%	0	100%	301	725%
Netz 18	1.240	8.255	-566%	1.716	-38%	4.552	367%
Netz 19	18	263	-1331%	208	-1034%	414	2254%
Netz 20	814	1.563	-92%	1.111	-36%	688	85%
Netz 21	2.817	3.006	-7%	2.412	14%	4.634	165%
Netz 22	959	1.764	-84%	1.082	-13%	978	102%
Netz 23	713	1.398	-96%	207	71%	1.517	213%
Netz 24	454	855	-88%	267	41%	527	116%
Netz 25	350	95	73%	298	15%	139	40%
Netz 26	4.954	5.111	-3%	5.322	-7%	2.356	48%

Quellen: Angaben basieren auf eigenen Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt) und zur Verfügung gestellten Daten von Malte Schwanebeck, Pezzutto et al. (2019a, Jahr 2015, witterungsbereinigt) und Firma Gottburg (witterungsbereinigt)

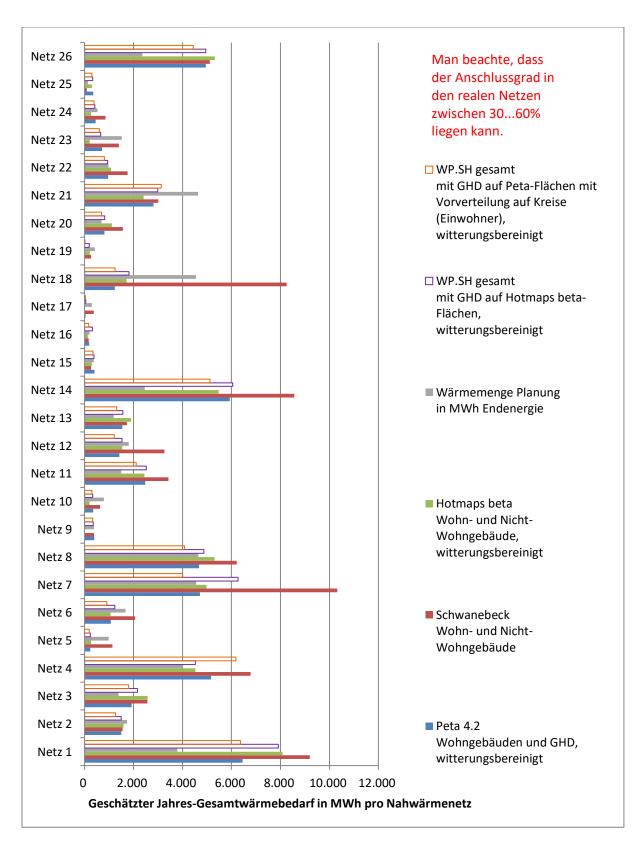


Abbildung 4-22: Geplante und geschätzte Wärmebedarf von Nahwärme-Netzen Quellen: Eigene Abbildung basierend auf Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt) und zur Verfügung gestellten Daten von Malte Schwanebeck, Pezzutto et al. (2019a, Jahr 2015, witterungsbereinigt) und Firma Gottburg (witterungsbereinigt)

Tabelle 4-16: Anteile des Service-Sektors am Wärmebedarf in Nahwärme-Netz-Gebieten

Netz-Nr.	Peta 4.2: Anteil der Nicht-Wohn- gebäude am Wärmebedarf	Schwanebeck: Anteil der Nicht- Wohngebäude am Wärmebedarf	Hotmaps: Anteil der Nicht-Wohnge- bäude am Wärme- bedarf	v1	v2	v3	v4
Netz 1	0%	13%	22%	20%	0%	0%	0%
Netz 2	0%	11%	16%	15%	0%	0%	0%
Netz 3	0%	10%	15%	17%	0%	0%	0%
Netz 4	28%	60%	23%	21%	31%	43%	44%
Netz 5	0%	12%	15%	19%	0%	0%	0%
Netz 6	0%	12%	26%	26%	0%	0%	0%
Netz 7	0%	5%	37%	36%	0%	0%	0%
Netz 8	0%	15%	17%	16%	0%	0%	0%
Netz 9	0%	6%	0%	5%	0%	0%	0%
Netz 10	0%	16%	18%	9%	0%	0%	0%
Netz 11	0%	3%	18%	17%	0%	0%	0%
Netz 12	0%	8%	22%	21%	0%	0%	0%
Netz 13	0%	18%	15%	16%	0%	0%	0%
Netz 14	0%	14%	15%	15%	0%	0%	0%
Netz 15	0%	87%	15%	10%	0%	0%	0%
Netz 16	0%	0%	90%	49%	0%	0%	0%
Netz 17	0%	8%	0%	20%	0%	0%	0%
Netz 18	0%	96%	28%	31%	0%	0%	0%
Netz 19	0%	0%	92%	92%	0%	0%	0%
Netz 20	0%	9%	12%	16%	0%	0%	0%
Netz 21	17%	25%	29%	34%	22%	37%	33%
Netz 22	0%	25%	15%	14%	0%	0%	0%
Netz 23	0%	16%	7%	8%	0%	0%	0%
Netz 24	0%	7%	13%	8%	0%	0%	0%
Netz 25	0%	36%	12%	10%	0%	0%	0%
Netz 26	9%	6%	22%	23%	11%	14%	12%

Quellen: Angaben basieren auf eigenen Peta 4.2-Daten (witterungsbereinigt) und zur Verfügung gestellten Daten von Malte Schwanebeck und Pezzutto et al. (2019a, Jahr 2015, witterungsbereinigt)

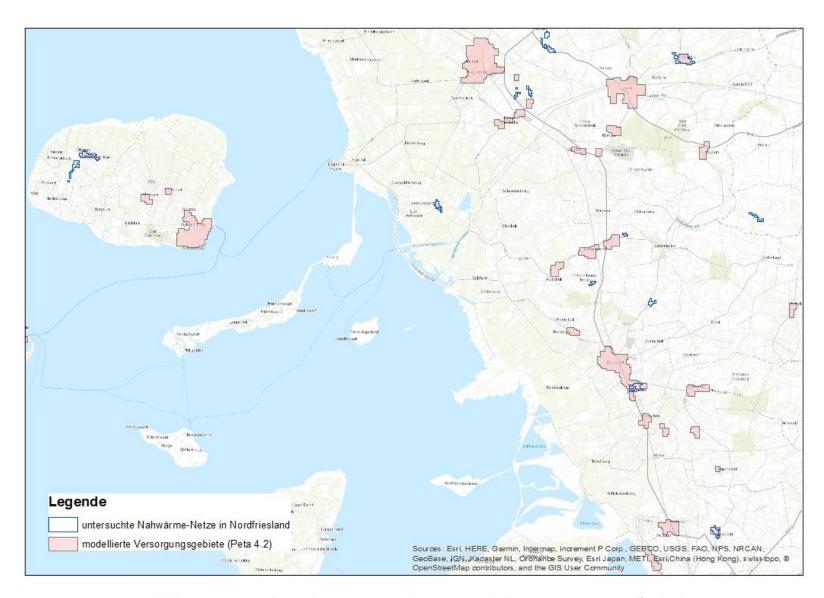


Abbildung 4-23: Untersuchte, reale Wärmenetze und von Peta4.2 modellierte Wärmenetze in Nordfriesland Quelle: Eigene Abbildung

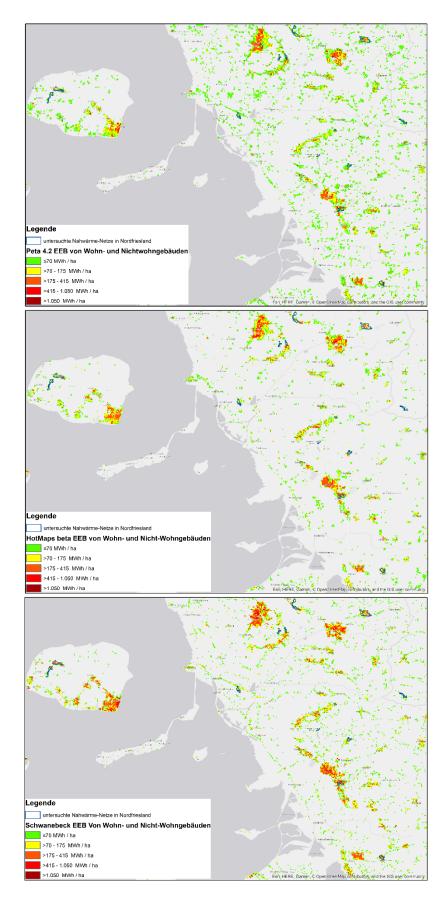


Abbildung 4-24: Gesamt-Wärme-Endenergiebedarfe in einem Ausschnitt von Nordfriesland Peta 4.2 (oben, witterungsbereinigt) und Hotmaps (Mitte, witterungsbereinigt), Schwanebeck (unten) Quelle: Eigene Abbildung basierend auf Peta 4.2, Pezzutto et al. (2019a) und Malte Schwanebeck

# 5 Festlegung des Wärmebedarfsmodells für Schleswig-Holstein

## 5.1 Anpassung des Modells der Wärmebedarfskartierung

In Kapitel 3 wurden bereits mögliche Anpassungen der Wärmebedarfskartierung und die untersuchten Varianten vorgestellt. Die Ergebnisse diese Varianten wurden in Kapitel 4 zusammen mit den Ergebnissen der anderen Kartierungen auf verschieden Ebenen aggregiert und mit den verfügbaren Daten zu Validierungszwecken verglichen. In diesem Kapitel werden die vorgenommen Anpassungen detaillierter erläutert.

### 5.1.1 Wärmebedarf der Wohngebäude

Analog zur europaweit angewendeten Methodik von Peta 4.2, nutzt das WP.SH-Modell die durchschnittliche Wohnfläche pro Person in Ein- und Mehrfamilienhäusern ( $a_{SFH}$  bzw.  $a_{MFH}$ ; mit der Einheit m²/Kopf) in den Kreisen Schleswig-Holsteins (anstelle der EU-Mitgliedsstaaten). Diese Durchschnitte wurden mithilfe von Zensus-Daten (Eurostat Census Hub 2, 2011a) ermittelt (siehe Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1: Durchschnittliche Wohnfläche pro Person differenziert nach Gebäudetyp

Tabelle 3-1. But chischinitelle ile Wolffmache pro i crison uniferenz		<i>a</i>
Region	$a_{SFH}$ in m $^2$ /Person	$a_{MFH}$ in m²/Person
Flensburg	60	49
Kiel	53	45
Lübeck	54	45
Neumünster	56	46
Dithmarschen	60	52
Herzogtum Lauenburg	57	49
Nordfriesland	60	51
Ostholstein	58	50
Pinneberg	57	48
Plön	58	51
Rendsburg-Eckernförde	58	51
Schleswig-Flensburg	59	54
Segeberg	57	49
Steinburg	58	50
Stormarn	57	50
Deutschland	58	49

Quelle: Eigene Berechnung basierend auf Eurostat Census Hub 2 (2011a)

Diese Informationen ermöglichen es, die von Peta 4.2 mithilfe der europaweit einheitlichen Regressionsgleichung geschätzten Wohnflächen pro Hektarzelle ( $A_{floor, ha,SFH}$  bzw.  $A_{floor, ha,SFH}$ ;  $m^2/ha$ ) von Einund Mehrfamilienhäusern (SFH und MFH) in Einwohner pro 100x100m Zelle, differenziert nach Gebäudetyp, umzurechnen ( $P_{ha,SFH}$  und  $P_{ha,MFH}$ ; Personen/ha).

$$P_{ha,SFH} = \frac{A_{floor,ha,SFH}}{a_{SFH}} \text{ und } P_{ha,MFH} = \frac{A_{floor,ha,MFH}}{a_{MFH}}$$
 (5.1)

Das eröffnet die Möglichkeit, die geschätzte Fläche für die Berechnung des Wärmebedarfs mithilfe eines Bevölkerungsrasters ( $P_{ha,GHS}$ ) zu korrigieren. Zur Korrektur wurde hier das Global-Human-Settlement-Bevölkerungsraster (kurz: GHS vom Joint Research Center (JRC, 2017) verwendet. Die korrigierten Einwohnerzahlen ( $P_{ha,SFH,corr}$  bzw.  $P_{ha,MFH,corr}$ ; in der Einheit Personen/ha) werden wie folgt berechnet:

$$P_{ha,SFH,corr} = \frac{P_{ha,SFH}}{P_{ha,SFH} + P_{ha,MFH}} \cdot P_{ha,GHS}$$
und
$$P_{ha,MFH,corr} = \frac{P_{ha,MFH}}{P_{ha,SFH} + P_{ha,MFH}} \cdot P_{ha,GHS}$$
(5.2)

Für die später erfolgende Verteilung des schleswig-holsteinischen Wärmebedarfs (siehe Gleichung (5.6)) werden die soeben geschätzten Einwohnerzahlen pro Gebäudetyp (Gleichung (5.3)) aufsummiert.

$$P_{SH,SFH} = \sum_{i=1}^{n} P_{ha,SFH,corr}$$
 und (5.3) 
$$P_{SH,MFH} = \sum_{i=1}^{n} P_{ha,MFH,corr}$$

Im HRE4-Projekt lagen für die beiden Gebäudetypen nationale Wärmebedarfe vor (Ergebnis der Modellierung von Fleiter et al. (2017a) innerhalb eines anderen Arbeitspakets von HRE4). Die für eine analoge Methodik erforderlichen Werte liegen für Schleswig-Holstein nicht vor.

Tabelle 5-2: Spezifischer Wärmebedarf und Nutzfläche differenziert nach Gebäudetyp in SH

	Einfamilienhäuser (SFH)	Mehrfamilienhäuser (MFH)
q <sub>Dtl,res,SFH bzw. MFH</sub> in kWh Endenergie / m²	179.9	132.7
Nutzfläche <sub>SH,SFH bzw</sub> . <sub>MFH</sub> in m²	70.554.685	66.279.040

Quellen: Berechnung basierend auf Fleiter et al. (2017a) und 2011b (Eurostat Census Hub 2, 2011b)

Deshalb wurde mithilfe der deutschen, spezifischen Wärmebedarfe (Endenergie pro Quadratmeter,  $q_{Dtl,res,SFH}$  und  $q_{Dtl,res,MFH}$ ) von Ein- und Mehrfamilienhäusern (Fleiter et al., 2017a) und der aus

den Zensus-Daten (Eurostat Census Hub 2, 2011b) abgeschätzten Nutzflächen von Ein- und Mehrfamilienhäusern ( $Nutzfläche_{SH,SFH}$  und  $Nutzfläche_{SH,MFH}$ ) die Wärmebedarfe in Schleswig-Holstein ( $Q_{res,SFH,temp}$  und  $Q_{res,MFH,temp}$ ) modelliert (siehe Gleichung (5.4) und für Input-Daten siehe Tabelle 5-2). Für die Aufteilung (Gleichung (5.5)) des Wärmebedarfs aller schleswig-holsteinischen Haushalte  $Q_{SH,res}$  auf Ein- und Mehrfamilienhäuser war vor allem das Verhältnis der beiden theoretisch ermittelten Bedarfe interessant.

$$Q_{res,SFH,temp} = Nutzfläche_{SH,SFH} \cdot q_{Dtl,res,SFH}$$
 und 
$$Q_{res,MFH,temp} = Nutzfläche_{SH,MFH} \cdot q_{Dtl,res,MFH}$$
 (5.4)

$$Q_{res,SFH} = \frac{Q_{res,SFH,temp}}{(Q_{res,SFH,temp} + Q_{res,MFH,temp})} \cdot Q_{SH,res}$$
und
$$Q_{res,MFH} = \frac{Q_{res,MFH,temp}}{(Q_{res,SFH,temp} + Q_{res,MFH,temp})} \cdot Q_{SH,res}$$
(5.5)

Abschließend wurde der Wärmebedarf pro Hektarzelle ( $q_{L,res}$ ; in MWh/ha bzw. GJ/ha, siehe Gleichung (5.6)) mithilfe des korrigierten Bevölkerungsrasters, beruhend auf dem JRC-Bevölkerungsraster und auf der Wohnflächenschätzung (siehe Gleichung (5.2)), sowie mithilfe des auf Ein- und Mehrfamilienhäuser aufgeteilte, schleswig-holsteinischen Wärmbedarfes ermittelt.

$$q_{L,res} = \left(\frac{P_{ha,SFH,corr} \cdot Q_{res,SFH}}{P_{SH,SFH}} + \frac{P_{ha,MFH,corr} \cdot Q_{res,MFH}}{P_{SH,MFH}}\right) \cdot \eta \tag{5.6}$$

Die WP.SH-Wohngebäude-Wärmebedarfskartierung basiert auf der Verteilung von schleswig-holsteinischen Wärmebedarfen  $Q_{SH,res}$  des Jahres 2016 (siehe Tabelle 3-1), veröffentlich im Monitoring-Bericht (Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein & Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein, 2018). Damit stellt das Raster zunächst Endenergiebedarfe dar, die mit einem Wirkungsgrad  $\eta$  von 0.8 in Nachgefragte Wärme (GJ/ha) umgerechnet wurden.

#### 5.1.2 Wärmebedarfe von Gewerbe, Handel, Dienstleistung

Um Unterschied zum Hotmaps-Ergebnis zeigen die Peta 4.2-Karten fast keinen Service-Wärmebedarf im ländlichen Raum. Ein solcher könnte etwa durch die fehlerhafte Interpretation großer landwirtschaftlicher Gebäude als solcher zum Servicesektor gehörender verursacht werden. Da landwirtschaftliche Gebäude, mit Ausnahme von z.B. Schweineställen, selten einen Wärmebedarf haben, könnte Peta 4.2 durch den Einbezug etwa der Nachbarschaftsdichte der Flächenversiegelung im Vorteil gegenüber anderen Methoden sein.

Wie die Vergleiche in Kapitel 4 zeigen ist die Kartierung des Wärmebedarfs der Service-Gebäude in einigen PLZ-Gebieten eine Herausforderung. Es wurde der Wärmebedarf des Service-Sektors versuchsweise auf unterschiedlichen Wegen verteilt. Folgende Methoden wurden erwogen:

- Verwendung des Wärmebedarfes von Servicesektor-Gebäuden direkt aus Hotmaps. Diese Variante wurde wegen der oben beschriebenen flächenmäßigen Ausbreitung des Wärmebedarfes in Gebäuden des Servicesektors verworfen.
- Verteilung des GHD-Wärmebedarfes direkt ohne vorherige Verteilung auf Kreise auf Peta 4-Geschossflächen von Servicesektor-Gebäuden.
- Verteilung des GHD-Wärmebedarfes auf Geschossflächen aus dem Hotmaps-Modell, direkt und ohne Vorverteilung auf Kreise
- Verteilung des GHD-Wärmebedarfes mit Vorverteilung auf Kreise und kreisfreie Städte über Bevölkerungszahlen.
- Verteilung des GHD-Wärmebedarfes mit Vorverteilung auf Kreise und kreisfreie Städte über die Anzahl sozialversicherungspflichtiger Arbeitnehmer.

Der Blick auf die Resultate der Modellierungsvarianten (siehe Kapitel 4) zeigt, dass kein Modellierungsansatz durchweg gute Ergebnisse zeigt. Außerdem ist zu beachten, dass die Werte mit denen verglichen wird auch modelliert und nicht gesichert sind. Die Entscheidung für die Vorverteilung auf Kreise und kreisfreie Städte erfolgte, weil sie den geringsten Datenaufwand darstellt und weil sie am transparentesten ist. Zu bedenken ist, dass ein solches Modell niemals überall richtig treffen kann und es für den möglichen Anwendungsfall optimiert werden muss. In diesem Fall wäre das ein Screening in Stadt und Land. Der im Projekt entwickelte WP.SH ist kein Wärmekataster, sondern ein unter der Prämisse der Datenarmut entwickeltes weitgehend realistisches Modell. Was jedoch realistisch ist, sollte immer im Kontext des Aufwandes der Modellierung und Fehlertoleranz sehen. Eine Abweichung von 20% kann toleriert werden, entsprechend einer Praxis der Sensitivitätsanalyse. Die ausführliche Diskussion der Herausforderungen bei der Modellierung des Wärmebedarfes erfolgt Kapitel 10.

Wie bei der Wärmebedarfsverteilung der Wohngebäude wurde auch der Wärmebedarf des Service-Sektors ausgehend von der schleswig-holsteinischen Verbrauchsstatistik des Jahres 2016 (siehe Tabelle 3-2) aus dem Monitoringbericht 2018 (Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein & Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein, 2018) verteilt. Der Wärmebedarf wurde zunächst mithilfe der Einwohnerzahlen (*P*) (Einwohnerzahlen von GeoBasis-DE / BKG, 2016) auf die Kreise verteilt (Gleichung (5.7)). Anschließend wurde innerhalb der Kreise der Wärmebedarf auf die Hektar-Zellen verteilt (Gleichung (5.8)).

$$Q_{KRS,ser} = \left(\frac{Q_{SH,ser} \cdot P_{KRS}}{P_{SH}}\right) \tag{5.7}$$

$$q_{L,ser} = \left(\frac{Q_{KRS,ser} \cdot A_{floor,ha,ser}}{A_{floor,KRS,ser}}\right) \cdot \eta \tag{5.8}$$

Auch diese Wärmebedarfe wurden mit dem Wirkungsgrad von 0.8 in nachgefragte Energie (MWh/ha bzw. GJ/ha) umgerechnet.

## 5.2 Darstellung der WP.SH-Wärmebedarfskartierung

Wie in Abschnitt 5.1 erläutert wird der Wärmebedarf in GJ/ha, also in G/J pro Rasterzelle, modelliert, so dass das Problem ungleicher Flächeneinheiten umgangen wird. Die Darstellung des Wärmebedarfes erfolgt ebenfalls im 100m-Raster, welches eine hohe Auflösung für lokale und regionale Studien erlaubt. Zur Wahrung der Vergleichbarkeit mit Kenngrößen in TJ/km² bzw. MWh/ha wird der Wärmebedarf allerdings in der Einheit TJ/km² angegeben. Dabei wird die Klassifizierung aus Tabelle 2-4 auf Basis der Angaben der dänischen Energieagentur (Danish Energy Agency, 2013) verwendet. Die Intervalle können grob gleichsetzt werden mit der Machbarkeit von Wärmeversorgungsnetzen in Dänemark. 50-120 TJ/km² entsprechen hier üblichen Wärmeversorgungsdichten für den Bestand.

Die Kartierung des Wärmebedarfes mittels des verwendeten Modells ist in der Lage, einzelne Siedlungsräume zu trennen. Die hochaufgelösten Raster lassen mehr oder wenig homogene Bebauungen in Bezug auf deren Wärmebedarfsdichten erkennen. Eindeutig sind dichte Siedlungsbereiche mit überwiegend mehrgeschossiger Bauweise von Siedlungsbereichen geringerer Dichte und niedriger Bauweise unterscheidbar. Exemplarisch wird in Abbildung 5-1 die WP.SH-Wärmebedarfskartierung der nachgefragten Wärme von Wohn- und GHD-Gebäuden für die Region Kiel und dessen Umland gezeigt.

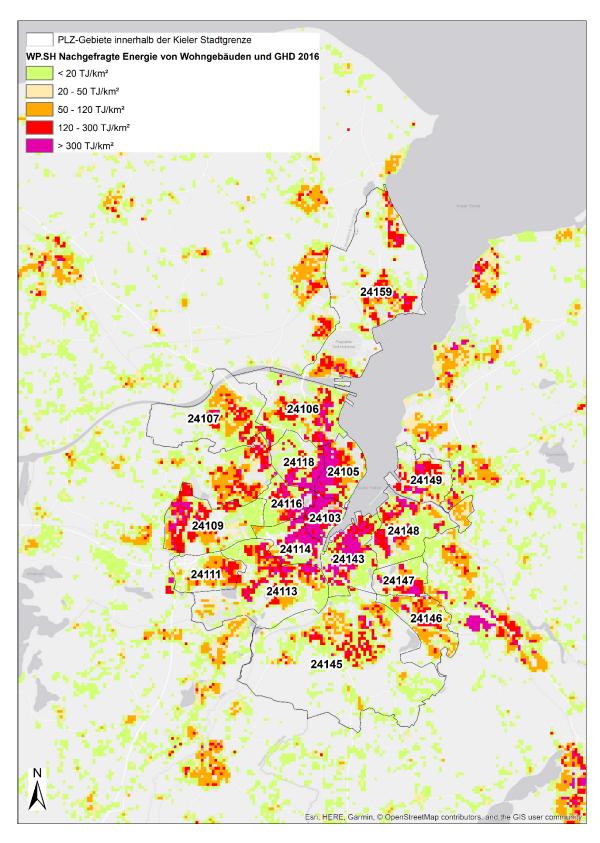


Abbildung 5-1: Exemplarischer Auszug aus der Wärmebedarfskartierung von WP.SH für Kiel Quelle: Eigene Abbildung basierend auf WP.SH-Untersuchungen

## 6 Modellierte Wärmenetz-Gebiete

Als Grundlage für die Einschätzungen zur potentiellen Deckung der Wärmebedarfe mithilfe von Nahoder Fernwärmenetzen wurden zusammenhängende Gebiete mit einem bestimmten Mindestwärmebedarf identifiziert. Diese potentiellen Wärmenetzgebiete nähern sich einer Abgrenzung von Gebieten, in denen das Potential für gemeinsame Wärmeversorgungsinfrastrukturen weiter untersucht werden könnte. Entscheidend für die Planung der Wärmeversorgung ist, dass solche Gebiete konkret und in ihrer Gesamtheit abgebildet werden können, damit das Potential quantifiziert und verortet werden kann. Es ist bei der Modellierung potentieller Wärmenetzgebiete wichtig zu unterstreichen, dass durch die Abgrenzung solcher Gebiete keine vorschreibende Flächenplanung verstanden wird. Die Gebiete sollen als notwendige Bilanzräume dienen, für die im Zuge der Kartierung bzw. Modellierung entschieden werden muss, wie viel Wärmebedarf zu welchen Netzausbaukosten gedeckt werden kann, und aus welchen Quellen.

Tabelle 6-1: Mindest-Wärmebedarf für Wärmenetze

Peta 4 und WP.SH	Lübecker Klimaschutzteilkonzept (K.GREENTECH GmbH, 2014, S. 26)	Grenzwert, der in SH disku- tiert / genutzt wird
200 GJ / (ha a) nachgefragte Wärme =	500 MWh / (ha a) Endenergie	150 MWh / (ha a) Endener- gie
70 MWh / (ha a) Endenergie als absolutes Minimum unter Annahme bestmöglicher wirtschaftlicher Bedingungen (siehe auch Tabelle 2-4).	Dieser Schwellenwert wird als sehr hoch angesehen. Er repräsentiert eine konservative Annahme für die Anlage von Netzen in bestehenden Siedlungsbereichen.	Dieser Schwellenwert ent- spricht etwa dem doppelten des von der dänischen Ener- giebehörde angenommenen Wertes für Bestandsgebiete in Dänemark.

**Quelle: Eigene Tabelle** 

Bei der Peta 4-Methode zur Bestimmung der potentiellen Wärmenetzgebiete ("Prospective Supply Areas", kurz PSDs) werden mit einer Funktion Rasterzellen, die einen Wärmebedarf von mehr als 20 TJ/km² haben, identifiziert und zu zusammenhängenden Regionen gruppiert. Um nahe beieinanderliegende Potentiale als zusammenhängende Gebiete zu beschreiben, wurde ein maximaler Abstand von 200m zwischen benachbarten, aber zusammenhängenden Gebieten zugelassen. Die resultierenden Flächen wurden mit administrativen Informationen (Ortsname, Gemeinde) versehen und als Basis für die Aufsummierung potentieller Wärmemarktzahlen und die ressourcenökonomischen Angebotskurven verwendet (siehe dazu Abschnitt 7.3 und Kapitel 9).

Peta 4 wurde zur Anwendung auf europäischer Ebene mit einer Säuberungsfunktion zur Reduktion komplexer Geometrien versehen. Durch sogenanntes Boundary Cleaning werden die Geometrien von potentieller Wärmenetzgebiete vereinfacht. Anders als beim europäischen Atlas wurde im Projekt WP.SH kein Boundary Cleaning durchgeführt, so dass sich die Wärmenetzgebiete in ihrer Form enger an den geschätzten Bedarfen und weniger an den Bedarfen in der näheren Umgebung orientieren (siehe Abbildung 6-1). Wegen des geringeren geografischen Maßstabes sind komplexere Geometrien mit der Benutzerfreundlichkeit vereinbar. Für die Modellierung von Netzgebieten macht dies keinen großen Unterschied, denn das Boundary Cleaning betrifft ausschließlich Randbereiche. Die potentiellen Wärmenetze von WP.SH wurden nicht an den Grenzen der Kreise und kreisfreien Städte zerschnitten (siehe Abbildung 6-1).

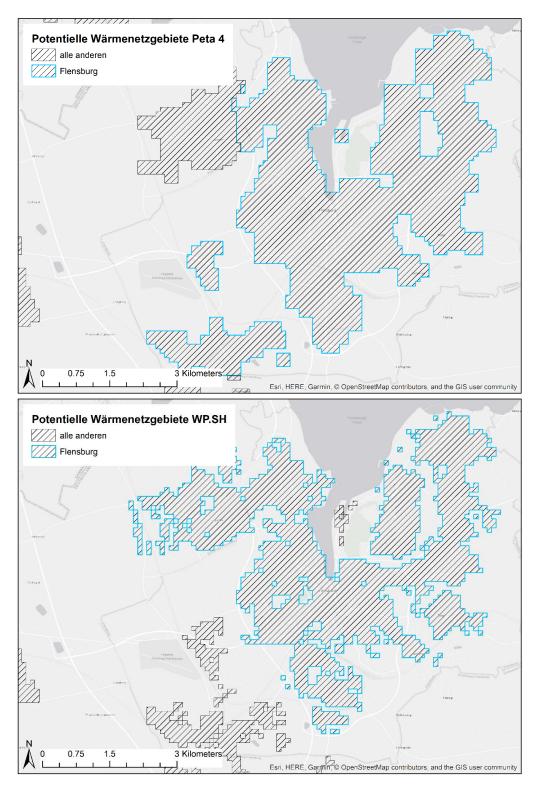


Abbildung 6-1: Vergleich der modellierten potentiellen Wärmenetzgebiete am Beispiel von Flensburg
Peta 4 (oben) und WP.SH (unten). Zu sehen ist, dass die potentiellen Wärmenetzgebiete in Peta 4 eine vereinfachte Geometrie aufweisen, aber größere Gebiete in administrative Einheiten (NUTS3) aufgeteilt sind.

Quelle: Eigene Abbildung

# 7 Untersuchung und Anpassung des Kostenmodells

# 7.1 Validierung der Peta4.2 -Kosten(-Methodik) mithilfe von Daten bestehender Netze

Durch die räumliche, Rasterzellen-bezogene Erfassung einiger realisierter Nahwärmenetze (siehe 4.3.4) und von der Firma Gottburg zur Verfügung gestellter Angaben zur Höhe der Investitionskosten ist auch eine Untersuchung der Wärmenetz-Investitionskosten-Methodik von Peta 4 (distribution capital costs) möglich. Diese Kosten beinhalten weder die Kosten für die Wärmeerzeugung noch die Kosten der dafür erforderlichen Anlagen. Ziel ist es, mithilfe der abgeschätzten Wärmebedarfsdichte die Wärmenetz-Investitionskosten in den unterschiedlichen Rasterzellen zu schätzen. Daraus ergeben sich dann die kumulativen Ausbaukosten für konkrete Wärmeversorgungsnetze, die ein wichtiges Kriterium für die Abschätzung des wirtschaftlichen Potentials für Fernwärme sind.

In seiner Bachelor-Arbeit hat Hendrik Ostermann (2018) die Schritte der Kostenberechnung mit den vorliegenden Wärmenetz-Daten durchgeführt und mit den Daten und Zwischenergebnissen der Modellentwicklung durch die Wissenschaftler der Universität Halmstad in Schweden (siehe vor allem: Persson et al. (2017) und Persson & Werner (2011)) verglichen. Die zentrale Kosten-Gleichung ermittelt mithilfe der Kosten-Konstante  $C_1$  und des Kosten-Koeffizienten  $C_2$  die annualisierten Investitionskosten  $C_d$  (siehe Gleichung (7.1)). Dabei ist  $\alpha$  der Annuitätenfaktor basierend auf dem Zinssatz und der Nutzungsdauer der Investition.  $C_1$  und  $C_2$  basieren auf dem Zusammenhang zwischen den empirischen Investitionskosten pro Meter Trassenlänge in Abhängigkeit vom durchschnittlich verbauten Leitungsdurchmesser  $d_a$  (siehe dazu Abbildung 7-1). Der Vergleich zwischen den ursprünglichen Daten und den ergänzenden Daten von schleswig-holsteinischen Nahwärme-Netzen (hier in blau) zeigt, dass der Kurvenverlauf bestätigt wird.

$$C_d = a \cdot \frac{I}{Q_s} = a \cdot \frac{\frac{I}{L}}{\frac{Q_s}{L}} = a \cdot \frac{(C_1 + C_2 \cdot d_a)}{q_L \cdot w}$$
 (7.1)

Tabelle 7-1: Formelzeichen-Erläuterungen

Zeichen	Bedeutung [Einheit]	
а	Annuitätenfaktor [-]	
I	Gesamtinvestitionskosten des Wärmenetzes [EUR]	
$Q_{S}$	Abgesetzte Wärme pro Jahr [GJ/a]	
$\frac{Q_s}{L}$	Lineare Wärmedichte [GJ/m]	
L	Gesamt-Netz-Länge [m]	
C <sub>1</sub>	Kosten-Konstante [EUR/m]	
C <sub>2</sub>	Kosten-Koeffizient [EUR/m²]	
d <sub>a</sub>	durchschnittlicher Leitungsdurchmesser [m]	
DN	Leitungsdurchmesser [m]	
$q_{L}$	Wärmebedarfsdichte auf Hektar-Level [GJ/ha]	
W	Effektive width oder "effektive Breite" [m]	
е	Plot ratio [-]	

Die Methodik setzt einen Anschlussgrad von nahe bei 100% voraus. In der Realität werden in Skandinavien Anschlussgrade von 80-100% erreicht, je nach Gebäudebestand, Planungsvorgaben und wirtschaftlicher Attraktivität. Bei den hier betrachteten Nahwärmenetzen wird anfangs selten ein solch hoher Anschlussgrad erreicht. Oft ist allerdings eine Nachverdichtung wirtschaftlich attraktiv, weshalb unter den richtigen Rahmenbedingungen auch für Schleswig-Holstein nichts gegen ähnlich hohe Anschlussgrade spricht, auch wenn diese erst mittel- und langfristig erreicht werden. Das Modell arbeitet daher mit hohen Zielanschlussgraden, welche unter guten Bedingungen erreicht werden können, insofern die generelle, auf Wärmebedarfs- und Besiedelungsdichten basierende Kostenschätzung gilt. Die Abweichungen zwischen den im Projekt HRE4 verwendeten Netzkosten und den empirisch für Schleswig-Holstein ermittelten Kosten, die ja für geringere Anschlussgrade gelten, müssen weiter diskutiert werden (siehe dazu Kapitel 10).

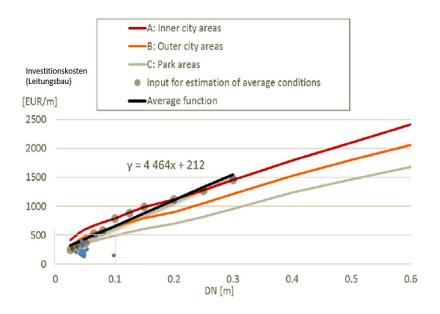


Abbildung 7-1: Investitionskosten-Funktion nach Persson und Werner
Die in der Legende fehlenden blauen Punkte repräsentieren die untersuchten schleswig-holsteinischen Nahwärmenetze.

Quelle: Ostermann (2018, S. 29)

Für die Anwendung der zentralen Kosten-Gleichung müssen außerdem der Rohrdurchmesser  $d_a$  und die lineare Wärmedichte ( $\frac{Q_S}{L} = q_L \cdot w$ ), die den Nenner bildet (siehe Gleichung (7.1)), bestimmt werden. Der Rohrdurchmesser selbst wird ebenfalls von der linearen Wärmedichte abhängig gemacht (siehe Gleichung (7.2). Diesen Zusammenhang zeigt Abbildung 7-2, die damit den Kurvenverlauf und die abgeleitete Gleichung für den Durchmesser  $d_a$  bestätigt.

$$\frac{Q_s}{L} < 1.5 \frac{GJ}{m}$$

$$d_a = 0.02 \text{ Meter}$$

$$\frac{Q_s}{L} \ge 1.5 \frac{GJ}{m}$$

$$d_a = (0.0486 \cdot ln(q_L \cdot w) + 0.0007) \text{ Meter}$$
(7.2)

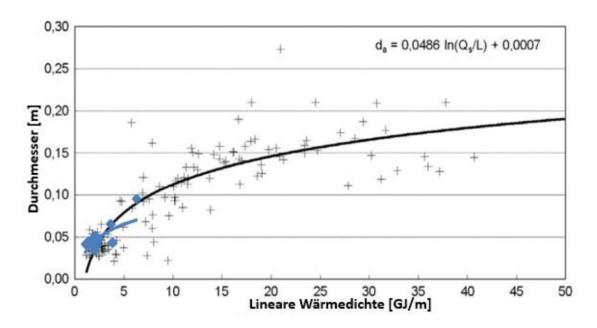


Abbildung 7-2: Leitungsdurchmesser in Abhängigkeit von der linearen Wärmedichte Die blauen Punkte repräsentieren die untersuchten Wärmenetze in Schleswig-Holstein.

Quelle: Ostermann (2018, S. 31)

Um die lineare Wärmedichte für Gebiete bzw. Rasterzellen ohne Wärmenetz-Planung (d.h. ohne Angaben zu Trassenlänge, Investitionskosten, Wärmeabsatz) abzuschätzen, wird die in Kapitel 5 definierte Wärmebedarfsdichte q<sub>L</sub> und die sogenannte "effektive Breite" (w) verwendet. Die "effektive Breite" w wurde empirisch aus dem Verhältnis von Geschossfläche zu Landfläche bestimmt. Dieses Verhältnis wird Plot Ratio genannt und mit e gekennzeichnet. Bisher wurde angenommen, dass die "effektive Breite" bei einem Plot Ratio über 0,4 konstant bei 60m liegt und bei niedrigeren Werten in Form einer Kurve verläuft (siehe Gleichung (7.3)). Der Kurvenverlauf ist aufgrund der Datenlage das schwächste Punkt in der hier vorgestellten Kosten-Methodik. Gleichzeitig ist dieser Bereich der Funktion derjenige, der für Wärmenetze im ländlichen Raum relevant ist. Die durch die Firma Gottburg realisierten Netze etwa liegen im Bereich von Plot Ratios von < 0,1. Siehe hierzu auch Abbildung 7-3.

0 < e ≤ 0,4	w = (137,5 · e) Meter	(7.0)
e > 0,4	w = 60 Meter	(7.3)

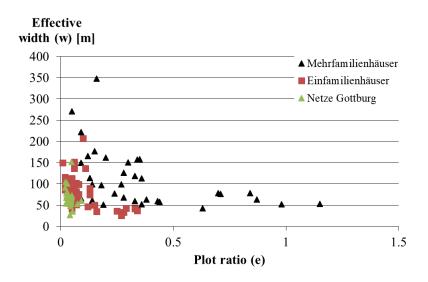


Abbildung 7-3: Effektive Breite
Quelle: Eigene Abbildung unter Nutzung der Daten von Persson & Werner (2010)

Von einem direkten Vergleich der realen Investitionskosten bestehender Netze und der modellierten annualisierten, spezifischen Investitionskosten wird abgesehen, weil die geplanten bzw. realisierten Anschlussgrade unbekannt sind. Diese haben einen sehr starken Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Wärmenetzen. Obwohl detaillierte technische Daten von 26 bestehenden Netzen vorlagen und im Rahmen der Bachelorarbeit untersucht wurden, konnte eine 1:1-Validierung konkreter Netze nicht vorgenommen werden.

# 7.2 Anpassung des Kosten-Modells und dessen Ergebnis

Die Untersuchung des Kosten-Modells (siehe Abschnitt 7.1) im Rahmen der Bachelorarbeit (Ostermann, 2018) und darüber hinaus zeigte die Anwendbarkeit des Peta 4-Ansatzes auch für Nahwärmenetze, wie sie im ländlichen Raum in Schleswig-Holsteins typisch sind. Nur die Gleichung zur Bestimmung der effektiven Breite w stand zur Diskussion. Es wurden verschiedene stetige und unstetige / zweiteilige Gleichungen mit und ohne Abhängigkeit vom Plot Ratio e erwogen. Hierbei lag der Fokus vor allem auf Netzen mit niedrigen Flächendichten (Plot Ratio = Heizfläche / Landfläche).

## 7.2.1 Implementierte Anpassung der Kosten-Methodik

Die Datenlagen, die sich wie in Abbildung 7-3 abgebildet darstellte, ließ keine eindeutige Interpretation und Ableitung der ein Gleichung zur Berechnung der effektiven Breite zu. Aus diesem Grund wurde im WP.SP-Projekt die effektive Breite unabhängig vom Plot Ratio in Höhe von 60m angesetzt. Diese Annahme hat den Effekt, dass die Kosten im dünner besiedelten Raum niedriger ausfallen als bei Peta 4.

## 7.2.2 Ergebnis der Modellanpassung

Die Berechnung der Kosten für Investitionen in Wärmeverteilungsnetze ergibt ein flächendeckendes, landesweites Rasterbild der annualisierten Investitionskosten pro GJ Jahresenergiebedarf, siehe Abbildung 7-4. Die Einheit der Kosten ist €/GJ, wobei die Investitionskosten mit einer Lebensdauer von 30 Jahren und einem Zins von 3% annualisiert werden. Die angenommene effektive Weite der Netze beträgt konstant 60m. Die Kosten entsprechen daher einem Minimum; in realen Projekten ist die

Verzinsung einschließlich wirtschaftlichem Gewinn meist höher und es werden Anteile der Investitionskosten innerhalb der Lebensdauer reinvestiert. Der Wärmebedarf ist die jährliche, durch die lokalen Wärmenetze gelieferte Wärmemenge an Verbraucher. Eventuelle Wärmeverluste müssen aufgeschlagen werden<sup>1</sup>. Die Investitionskosten in die Wärmeverteilungsnetze spiegeln nur einen Teil der gesamten Wärmeversorgungskosten wieder, es fehlen Wärmegestehungskosten und die Investitionen in Hausinstallationen, Transmissionsleitungen und Wärmeproduzenten.

Die Verteilung der Investitionskosten in Wärmenetze folgt der Wärmebedarfsdichte. Die innerstädtischen Bereiche weisen Investitionskosten pro Energieeinheit auf, die um einen Faktor 10 niedriger sind als die Kosten in Siedlungsbereichen mit sehr geringer Dichte. Es wird deutlich, dass in städtischen Randbereichen und in dichter bebauten Siedlungsbereichen noch Potentiale bestehen, in denen die marginalen Kosten für einen Netzausbau zwar höher sind als in den Kernbereichen, sich der Ausbau aber noch lohnen könnte, insofern bestehende Anlagen abgeschrieben sind, sich neue Wärmelieferanten aufzeigen, oder bei der Nachverdichtung bestehender Netze. Die Praxis des Ausbaus in Siedlungsbereiche geringerer Dichte ist insbesondere rund um etablierte Fernwärmesysteme zu erkennen, etwa in Flensburg, wo die Erweiterung in umliegende Bebauungen hinein den Wärmeabsatz trotz sinkender Wärmebedarfe durch die kontinuierliche Verbesserung des Wärmestandards in der Gebäudemasse sichert.

Die Karte der Investitionskosten allein erlaubt wie schon die Wärmebedarfsdichtekarte (siehe Abbildung 5-1) einen guten Überblick über die generelle Eignung von Gebieten zur Planung von Wärmenetzen. Für diesen Zweck wurde die Online-Karte in drei Kostenintervalle eingeteilt, siehe Kapitel 9. Die konkrete Bewertung des wirtschaftlichen Potentials möglicher Wärmenetze ergibt sich jedoch erst aus der Kombination mit dem Wärmenetzpotential, bzw. dem zu erwartenden Wärmeabsatz. Für diesen Zweck wurden Angebotskurven für individuelle potentielle Wärmenetzgebiete berechnet, siehe Kapitel 7.3.

Für Flensburg wurden jährliche Kosten für das ungefähre Versorgungsgebiet der Stadtwerke für verschiedene kumulative Anschlussgrade berechnet. Kumulative Anschlussgrade beschreiben die prozentualen Anteile am gesamten Wärmemarkt, die ausgehend von den attraktivsten Lagen das Wärmelieferungspotential sowie die erforderlichen Investitionen in sekundäre Wärmenetze kumulativ quantifizieren, siehe Tabelle 7-1.

Tabelle 7-2: Investitionsbeispiel für den kumulativen Ausbau der Fernwärme in Flensburg.

Kumulativer Anschluss- grad	Jahreswärmebe- darf	Annualisierte Investitio- nen in Wärmenetze	Summe der annualisierten Investitionen in Wärmenetze
40%	1.078 TJ	2,10 €/GJ	2.263.000 €
80%	2.030 TJ	3,00 €/GJ	6.084.000 €
100%	2.703 TJ	3,86 €/GJ	10.429.000 €

**Quelle: Eigene Berechnung** 

-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Ein empirisches Modell zur Berechnung von möglichen Wärmenetzverlusten wurde in Möller et al. (2019) veröffentlicht, ist aber für Schleswig-Holstein noch nicht validiert worden.

Es ist zu erkennen, dass mit steigenden kumulativen Anschlussgraden die notwendigen spezifischen Investitionen steigen. Während die ersten 40% des Wärmemarktes mit annualisierten Wärmenetzinvestitionskosten von weniger als 2,10 €/GJ zu realisieren sind, steigen die Kosten für Wärmenetze an. Bei 100% Deckungsrate wie in Flensburg annähernd erreicht, betragen die jährlichen Kosten über 10 Millionen €. Ähnliche Untersuchungen können mit dem Wärmeatlas für alle potentiellen Wärmenetzgebiete des Landes durchgeführt werden.

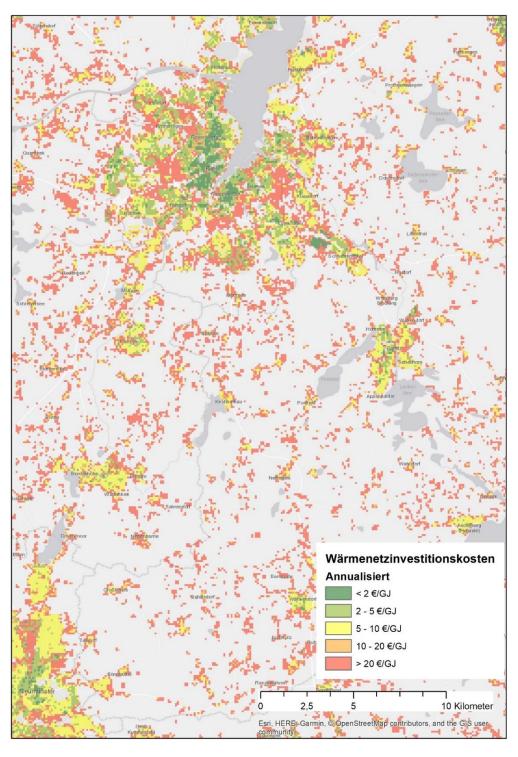


Abbildung 7-4: Berechnete Investitionskosten von Wärmeverteilungsnetzen (WP.SH)

Quelle: Eigene Abbildung

# 7.3 Resultierende Angebotskurven

Angebotskurven stellen eine mathematische Beziehung zwischen einem kumulativ wachsenden Potential und den resultierenden Kosten der Ausnutzung dieses Potentiales dar. Sie dienen der Ermittlung von Kosten abhängig vom Nutzungs- oder Ausbreitungsgrad einer Technologie. Sie sind überall dort relevant, wo Kosten einer Technologie nicht konstant oder allein proportional zur Menge sind. Bei Wärmeversorgungsnetzen ergibt sich eine hohe Abhängigkeit der Kosten von der Wärmebedarfsdichte.

Die Wirtschaftlichkeit von Wärmenetzen ist abhängig von einer positiven Skalenökonomie der Anlagengröße einerseits, welche für größere Wärmeerzeuger und Nebenanlagen niedrigere spezifische Kosten ergibt. Andererseits steigen spezifische Ausbaukosten mit dem Ausbaugrad überproportional an, denn von Kernen mit hohen Wärmedichten hin zu weniger dicht besiedelten Bereichen steigen die Netzausbaukosten an. Erfahrungen mit dem Ausbau von Nahwärmenetzen zeigen, dass viele Projekte auf attraktivere Nahwärmeinseln innerhalb zusammenhängender Siedlungsbereiche begrenzt sind, in denen hohe Wärmebedarfsdichten zu finden sind. Durch die Verwendung der marginalen oder Grenzkosten des Ausbaus als Entscheidungskriterium fällt dann das realisierte Wärmenetzpotential hinter dem möglichen Potential zurück, siehe Abbildung 7-5.

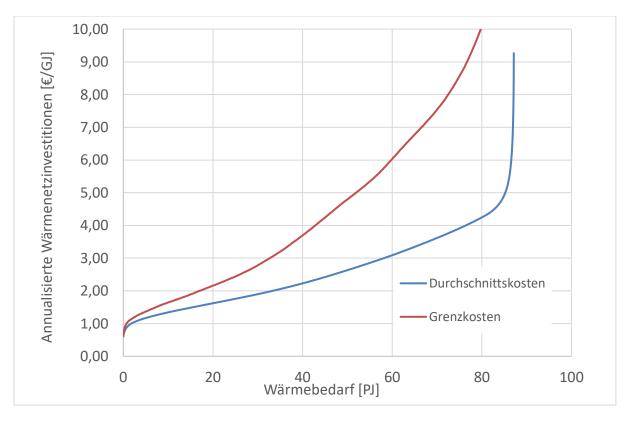


Abbildung 7-5: Grenzkosten und durchschnittliche Kosten und kumulativer Wärmebedarf Quelle: Eigene Abbildung

Wenn jedoch die durchschnittlichen Ausbaukosten kumulativer Wärmenetzpotentiale zugrunde gelegt werden, erreicht man generell höhere Ausbreitungen von Wärmenetzen. Die Betrachtung durchschnittlicher Ausbaukosten kumulativ wachsender Realisierungspotentiale schließt durch die geografisch explizite Betrachtung von Wärmenetzen innerhalb der potentiellen Wärmenetzgebiete

solche Gebiete mit ein, die bei einer auf Grenzkosten beruhenden Betrachtung hinausfallen. Eventuelle, durch Skalenökonomien von Wärmenetzen bestehende Vorteile bei den Gesamtkosten sind in diesem Fall nicht sichtbar. In Abbildung 7-5 ist dieses deutlich durch die unterschiedlichen Potentiale bei gleichen Grenz- bzw. Durchschnittskosten. So ist bei 3 €/GJ Netzausbaukosten das Potential fast doppelt so hoch, wenn Durchschnittskosten angenommen werden, im Vergleich zu Grenzkosten.

Im vorliegenden Wärmeplan.SH werden für individuelle potentielle Wärmenetzgebiete die jeweiligen Angebotskurven gezeichnet, welche die lokalen, ökonomischen Potentiale des Wärmenetzausbaus vorbehaltlich der Wärmegestehungskosten beschreiben. Die lokalen Angebotskurven dienen dazu, die lokalen wirtschaftlichen Potentiale für Nah- und Fernwärmenetze zunächst unabhängig von den von Lokalität zu Lokalität unterschiedlichen Wärmegestehungskosten zu bestimmen.

## 8 Praxistest

Im Rahmen des Projektes war ein Praxistest vorgesehen. Die Erwartungen der Firma Gottburg waren, dass im Rahmen der Projektierung von Wärmenetzen auf den Wärmeatlas zurückgegriffen werden konnte und Erfahrungen in der Anwendung an die Europa-Universität Flensburg zurückfließen sollten. In den laufenden Gesprächen mit der Firma Gottburg wurde diese Idee weiterverfolgt und konkretisiert. Die erste online-Version des Wärmeatlases wurde im Herbst 2018 vorgestellt und mit Erfahrungen aus konkreten Projekten verglichen. Dabei flossen wertvolle Erfahrungen aus der Praxis in die Weiterentwicklung des Wärmeatlas'.

Zu einem Praxisworkshop wurden im Frühjahr 2019 die Investitionsbank Schleswig-Holstein, die Vertreter der Stadtwerke Kiel und Flensburg, Malte Schwanebeck von der CAU, sowie Herr Gottburg eingeladen. Leider war die Firma Gottburg zu diesem Zeitpunkt schon insolvent und Herr Gottburg nahm die Einladung nicht an. Beim Workshop am 19.03.2019 waren nur Herr Tom Trittin von den Stadtwerken Flensburg und Herr Schwanebeck anwesend. Allerdings konnten die Ergebnisse des Projektes präsentiert und kritisch diskutiert werden. Als Diskussionsgrundlage dienten vor allem die Modellierungsmethoden von Peta 4 und Malte Schwanebeck (siehe Abschnitt 2.3) sowie die im Kapitel 4 beschriebenen Vergleiche der unterschiedlichen Wärmebedarfskartierungen für die Kreise und kreisfreien Städte Schleswig-Holsteins, für die Stadt Flensburg und für die betrachteten Nahwärmenetze. Auch die Anwendbarkeit der Ergebnisse für die Planung zukünftiger Netze durch Akteure der Wärmewende wurde beim Workshop analysiert. Dabei kamen die Teilnehmer zu dem Ergebnis, dass die verschiedenen Methoden recht robuste Ergebnisse liefern und primär in den urbanen Bereichen, mit Einschränkungen auch im ländlichen Raum, für die übergeordnete Planung von Wärmeversorgungsnetzen verwendbar sind.

Es wurde darüber hinaus auch der Unterschied zwischen dem Ergebnis der Modellierung der potentiellen Wärmenetzgebiete mit Peta 4 und mit der Wärmeplan.SH-Alternative aufgezeigt. Ferner wurde das Wärmenetz-Kostenmodell vorgestellt und auch die Datengrundlage für die "effective width" diskutiert. Außerdem wurde über die Ableitung von empirischen Daten aus den Investitionen der Stadtwerke zur Modell-Validierung gesprochen.

Der Workshop war bewusst nicht als Test der Anwenderfreundlichkeit etwa des Online-Atlas' oder der verwendeten Methoden angelegt, da dies nicht der Fokus der zu bearbeitenden Fragestellung war. Schwerpunkt waren der fachliche Austausch, wie schon bei den Treffen mit der Firma Gottburg und den Stadtwerken Kiel und Flensburg zu Beginn bzw. im Laufe des Projekts, sowie die Auslotung von potentiellen Anwendungsmöglichkeiten eines datenarmen Ansatzes, der flächendeckenden Potentialanalyse, sowie des Online-Atlas'. Die Erkenntnisse des Workshops konnten hiernach noch umgesetzt werden.

## 9 Online-Atlas und seine Bestandteile

## 9.1 Einleitung

Ein Online-Atlas stellt ausgewählte Inhalte primär in kartografischer Form innerhalb einer Webanwendung dar. Anwender\*Innen können thematische Layers wählen, in der Karte navigieren, Sachdaten abfragen und Kartenausschnitte teilen und drucken.

Als Technologie für die Entwicklung des Online-Wärmeatlasses Schleswig-Holsteins wurde die ArcGIS Online Plattform der Firma ESRI gewählt. Nach Bereitstellung der GIS-Daten wurden diese als sogenannte Feature-Services bzw. Tile (Kachel) Services auf einen ESRI-Server geladen, auf dem sie dann gehostet werden. Die verschiedenen Layers werden zu einer Online-Karte zusammengestellt, in der neben der Anordnung, Visualisierung und anderen Einstellungen auch die Rechte für Besucher angegeben werden können, z.B für den Download, Analysen usw. Auf Basis der Online-Karte wird eine App erstellt, welche neben den zuvor angelegten Kartenelementen auch weitere Werkzeuge zum Beispiel zur Dokumentation, Navigation und Visualisierung enthält. Die Karte ist so über einen Internet-Browser interaktiv nutzbar.

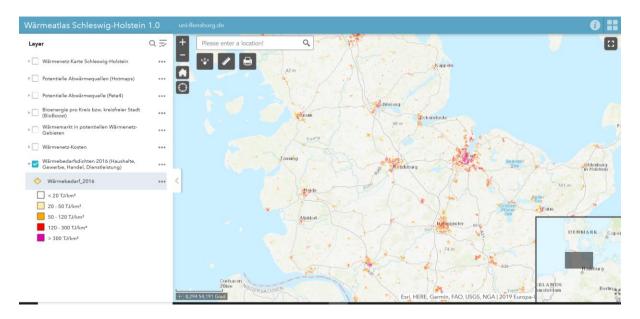


Abbildung 9-1: Übersicht: Wärmeatlas Schleswig-Holstein 1.0 (online)

Quelle: Eigene Abbildung

## 9.2 Inhalt des Online-Atlas'

In diesem Abschnitt werden die unterschiedlichen Komponenten des Online-Atlas' kurz vorgestellt und erläutert.

#### 9.2.1 Willkommen-Fenster

Nach dem Aufrufen der Webadresse <a href="https://tinyurl.com/WPSH-EUF">https://tinyurl.com/WPSH-EUF</a> erscheint ein Fenster mit wichtigen Informationen für Nutzer\*Innen des Wärmeatlas', darunter wesentliche Quellenangaben, die Nennung von Kooperationspartnern und Förderung, ein Haftungsausschluss sowie eine Erklärung zum Datenschutz. Nutzer quittieren diese mit dem Klicken auf "OK", siehe Abbildung 9-2.



Abbildung 9-2: Willkommen-Fenster vom Wärmeatlas Schleswig-Holstein 1.0 Quelle: Eigene Abbildung

#### 9.2.2 Wärmebedarfsdichte

Der Online-Atlas hat anfangs nur einen aktiven Layer, welcher die Gesamt-Wärmebedarfsdichten von Gebäuden der beiden Sektoren "Haushalte" und "Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)" für das Jahr 2016 einschließlich Raumwärme- und Warmwasserbedarf enthält, siehe Abbildung 9-3. Die Modellierungsmethodik ist in Kapitel 3 und 5 beschrieben. Die Einheit des Wärmebedarfes ist TJ/km² (siehe dazu Abschnitt 5.2). Der Layer ist ein Raster, welches mit 100m Auflösung in Kacheln zur Verfügung gestellt wird. Der Datensatz kann nicht heruntergeladen werden. Informationen zum Layer können mittels Pop-Ups aufgerufen werden, welches nach Klicken auf den Layer erscheint.

Die Legende enthält drei graue Punkte, die Zugriff auf ein Menü geben. Dieses erlaubt das Zoomen auf den gesamten Umfang des Layers, die Anpassung der Transparenz, die Änderung der Anordnung des Layers im Inhaltsverzeichnis und auf der Karte, sowie die Deaktivierung des Pop-Ups.

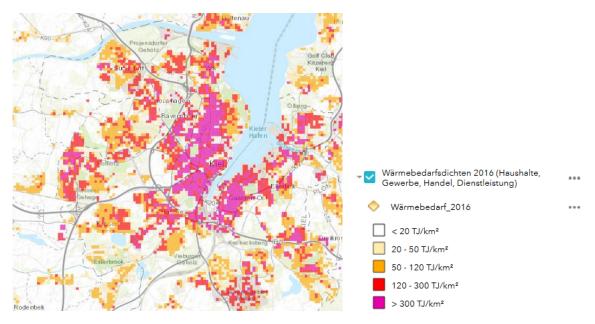


Abbildung 9-3: Wärmebedarfs-Layer des Online-Atlas' Quelle: Eigene Abbildung

#### 9.2.3 Wärmenetz-Kosten

Die Investitionskosten von lokalen Wärmeverteilungsnetzen werden als annualisierte Kosten im 100m-Raster visualisiert. Auch dieser Layer bedient sich Kacheln mit der gleichen Auflösung wie das Wärmebedarfs-Raster. Die Einheit der Kostenwerte ist € pro GJ Jahreswärmebedarf, annualisiert mit 30 Jahren Lebensdauer und 3% Diskontierung. Der Layer zeigt die mit der in Kapitel 7 beschriebenen Methode geschätzten Kosten in drei Intervallen, siehe Abbildung 9-4.

Auch hier können Layer-Informationen durch ein Pop-up-Fenster aufgerufen werden und auch dieser Datensatz lässt sich nicht herunterladen. Gleichfalls finden sich weitere Einstellungen für den Layer im Menü.

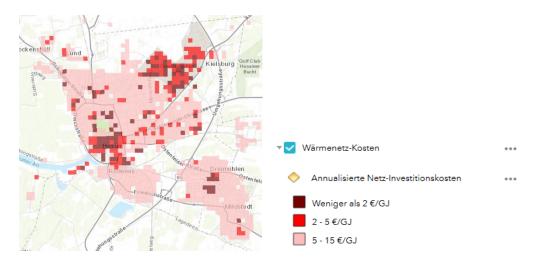


Abbildung 9-4: Wärmenetz-Investitionskosten-Layer des Online-Atlas'
Quelle: Eigene Abbildung

#### 9.2.4 Wärmemarkt in potentiellen Wärmenetzgebieten

Potentielle Wärmenetzgebiete, die als zusammenhängende Flächen mit Mindestanforderungen an die Wärmebedarfsdichte modelliert werden, dienen als Bilanzierungsraum für mögliche lokale Wärmemärkte. In diesen Gebieten kann das technische und ökonomische Potential für Wärmenetze über die Fläche bestimmt werden. Abbildung 9-5 zeigt potentielle Wärmenetzgebiete in und um Rendsburg herum.

Ein Pop-Up erlaubt es, zweierlei Informationen über einzelne potentielle Wärmenetzgebiete aufzurufen, siehe Abbildung 9-6. Zunächst wird der Wärmebedarf nach Wärmedichteklassen aufsummiert wiedergegeben, um eine grobe Schätzung des Potentials vornehmen zu können. Jedes potentielle Wärmenetzgebiet ist mit einer Nummer zu Identifikation, einem Ortsnamen aus OpenStreetMap sowie der Angabe seiner Gesamtfläche versehen. Der untere Teil des Pop-Ups enthält eine lokale Angebotskurve, in der die annualisierten durchschnittlichen Wärmenetz-Investitionskosten für das kumulative Potential wiedergegeben werden. Zur Zeit gibt es noch technische Begrenzungen, die es nicht erlauben, die x-Achse des Diagrammes mit Zahlen zu zeigen. Mit der Maus können Kostenwerte in 10%-Schritten des Potentials aufgerufen werden.

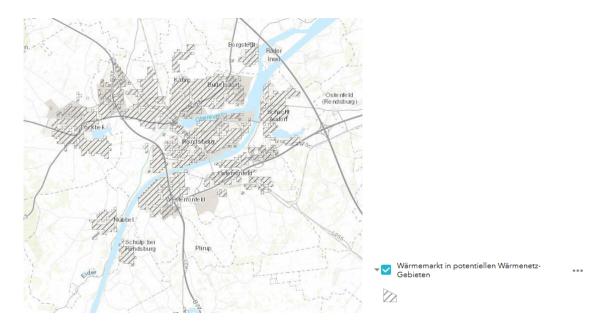


Abbildung 9-5: Layer: Potentielle Wärmenetzgebiete Quelle: Eigene Abbildung

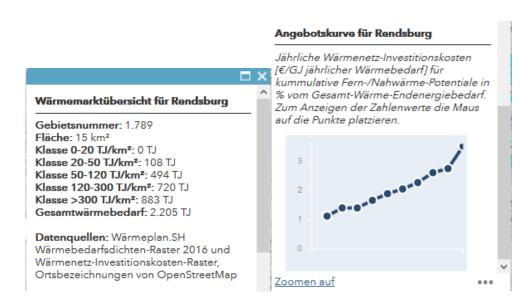


Abbildung 9-6: Wärmemarktübersicht und Angebotskurve im Pop-up-Fenster des "Potentielle Wärmenetze"-Layers Quelle: Eigene Abbildung

## 9.2.5 Bioenergie-Potentiale

Eine Schätzung des technisch-wirtschaftlichen Potentials für residuale Bioenergiepotentiale wurde im EU-Bioboost-Projekt auf dem Niveau der NUTS3-Gebiete vorgenommen. Bioenergiepotentiale sind hier ausschließlich Reststoffe aus der Forstwirtschaft und dem Ackerbau, sowie die Fraktion organischen Abfalls aus Haushalten. Die vektoren-basierten Daten des Layers, siehe Abbildung 9-7, wurden über Flächennutzung (Corine Land Cover) disaggregiert, zu Kreisen und kreisfreien Städten aufsummiert und enthält die drei Fraktionen Stroh, Forstwirtschaft und organischer Hausmüll. Er dient gewissermaßen als Platzhalter für zukünftige Layers, die diesen Sektor besser beschreiben.

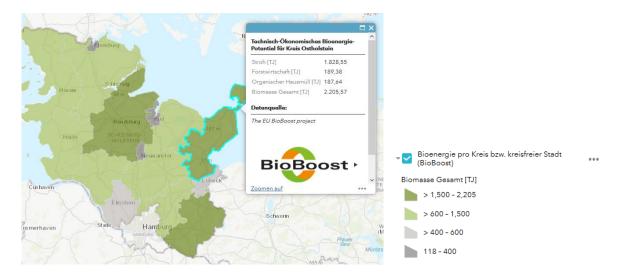


Abbildung 9-7: BioBoost-Bioenergie-Layer Quelle: Eigene Abbildung

## 9.2.6 Potentielle Abwärmequellen (Peta)

Potentielle Abwärmequellen für die Nutzung in Fernwärmewerken wurden im Projekt Heat Roadmap Europe aus Daten des europäischen E-PRTR-Datensatzes (European Pollutant Release and Transfer Register, Version 9) mit Emissionsdaten aus den Jahren 2012-2014 abgeschätzt, siehe Abbildung 9-8. Der Layer enthält theoretisch mögliche Abwärmepotentiale aus Anlagen mit einer Feuerungsleistung von mehr als 50MW, gruppiert nach Anlagen der Industrie, Müllverbrennungsanlagen sowie Kraftwerken. Das Pop-Up enthält wesentliche Informationen zur Abwärmequelle. Wichtig zu wissen ist, dass die Daten für ganz Europa ausschließlich auf Basis der CO<sub>2</sub>-Emissionen und der sektoralen Eingruppierung der Emittenten geschätzt wurden, unter Annahme üblicher Energieträger und Prozesse. Konkrete Angaben über die wirklich verfügbaren Mengen von nutzbarer Abwärme nach Menge, zeitlicher Verteilung und Temperaturniveau kann dieser Layer nicht liefern.

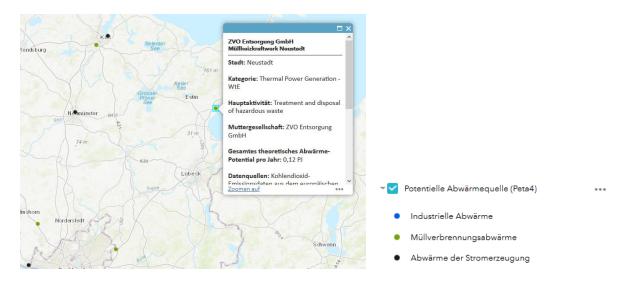


Abbildung 9-8: Layer mit Abwärme-Potentialen (Peta)

Quelle: Eigene Abbildung

#### 9.2.7 Potentielle Abwärmequellen (Hotmaps)

Für das EU-Hotmaps-Projekt hat das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI das Abwärmepotential speziell für industrielle Anlagen ermittelt. Dabei wurden auch sektorspezifische Prozesse und Temperaturniveaus berücksichtigt. Weitere Informationen zu den Daten, die offen verfügbar sind (Pezzutto et al., 2018b, siehe), finden sich im D2.3 WP2 Report des Hotmaps-Projektes (Pezzutto et al., 2018a).

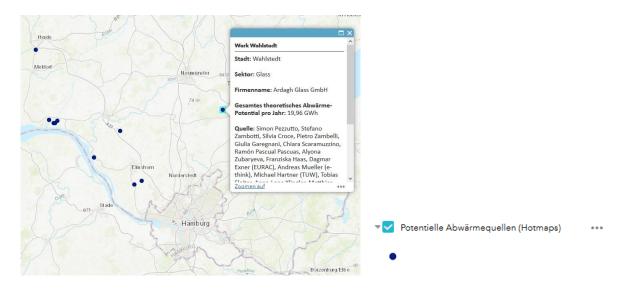


Abbildung 9-9: Layer mit Abwärme-Potentialen (Hotmaps)

Quelle: Eigene Abbildung

# 9.2.8 Wärmenetzkarte Schleswig-Holstein

Die von der Investitionsbank Schleswig-Holstein mit freundlicher Erlaubnis für die Darstellung im Wärmeatlas SH des Projekts Wärmeplan.SH zur Verfügung gestellten Daten der Wärmenetzkarte SH des Digitalen Atlas Nord (siehe Landesportal Schleswig-Holstein, 2017) wurden in ein Feature-Layer überführt und in der Online-Karte eingebaut, siehe Abbildung 9-10. Auf diese Weise lassen sich Daten vorhandener Wärmenetze annäherungsweise mit den im Projekt Wärmeplan.SH modellierten potentiellen Wärmenetzen vergleichen. Da die Wärmenetzkarte SH keine Informationen zur konkreten Lage und Ausbreitung bestehender Netze enthält, ist es schwierig, die theoretischen technischen und wirtschaftlichen Potentiale großangelegter Wärmenetze mit den oft punktuell implementierten Wärmenetzen im Land zu vergleichen. Auch sind nicht immer alle Sachdaten der bestehenden Netze vorhanden. Allerdings ist es erstens sinnvoll, diese Daten "arbeiten zu lassen", um durch Anwendung die Vervollständigung und Aktualisierung durch die verantwortlichen Institutionen zu bewirken, und zweitens ist diese parallele Darstellung der bestehenden und modellierten potentiellen Wärmenetzgebiete ein wichtiger Schritt für die landesweite Wärmeplanung.

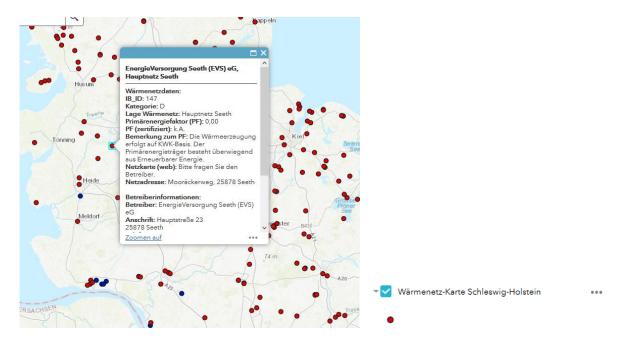


Abbildung 9-10: Informationen der Wärmenetz-Karte Schleswig-Holstein Quelle: Eigene Abbildung

## 10 Diskussion

## 10.1 Wärmebedarfsmodellierung

Die Modellierung des Wärmebedarfes erfolgte im Projekt WP.SH durch die räumliche Verteilung des schleswig-holsteinischen Wärmebedarfs auf geostatistisch ermittelte Gebäudeflächen. Ein datenarmer Ansatz reduziert den Aufwand der Datensammlung, des Datenmanagements und des Datenschutzes beträchtlich. Er führt aber auch zu inhärent höheren Unsicherheiten bei der Bestimmung des Wärmebedarfes. Die Voraussetzung zu einer akzeptablen Modellierung des Wärmebedarfes ist daher die Validierung. Im vorliegenden Projekt wurden die Ergebnisse der existierenden Modelle miteinander und, soweit möglich, mit Erhebungen vor Ort bzw. Angaben zu gelieferten Wärmemengen verglichen.

Der Pan-Europäische Wärmeatlas Peta, Version 4.2, verteilt den deutschlandweiten Wärmebedarf von Gebäuden des Sektors Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) derart, dass er in Schleswig-Holstein (7.509 GWh Endenergie, witterungsbereinigt) deutlich niedriger ist als der Bedarf, der für die Wärmeplan SH-Modellierung aus dem Monitoringbericht entnommen wurde (8.801 GWh Endenergie, witterungsbereinigt). Das macht sich anschließend in den vorgestellten Varianten des Peta-Ansatzes für Schleswig-Holstein bemerkbar. Auch der Wärmebedarf der Wohngebäude des Jahres 2016, der die Grundlage für den Wärmeatlas SH bildet, ist höher als bei Peta 4.2 und auch höher als der Wärmebedarf des Jahrs 2015 (trotz Witterungsbereinigung). Im Wesentlichen konnte die Peta-Methodik jedoch beibehalten werden. Es haben sich aber Anzeichen ergeben, dass das Peta-Modell für den Service-Sektor fehlerbehaftet ist. Der Service-Wärmebedarf in Peta 4.2 und in der Variante 3 des WP.SH sind mit gleicher Methodik, nur mit unterschiedlichen Wärmebedarfen berechnet. Es müsste sich der Wärmebedarf in allen Gebieten um den gleichen Faktor von WP.SH unterschieden, dies ist jedoch nicht der Fall. Die Autoren haben dies zum Anlass genommen, die Peta-Methode im Rahmen des laufenden EU-Projektes sEEnergies zu überprüfen.

Einleitende vergleichende Analysen zwischen den drei vorherrschenden Methoden Peta, dem Wärmeatlas des EU Hotmaps-Projektes und der von Malte Schwanebeck an der CAU entwickelten Methode hatten gezeigt, dass prinzipiell keine großen Unterschiede in den resultierenden Wärmebedarfsdichten und deren geografischer Verteilung bestehen. Während Hotmaps teilweise auf die Peta-Methode aufbaut und daher ähnliche Ergebnisse erwarten lässt, ist das Wärmebedarfsmodell von Schwanebeck grundsätzlich anders aufgebaut. Vergleichbare übergeordnete Ergebnisse waren daher sehr erfreulich. Die absoluten Werte des lokalen Wärmebedarfes hängen jedoch von einer Vielzahl von Faktoren ab, die je nach Methodik unterschiedlich sind, etwa das gewählte Referenzjahr, die Witterungsbereinigung und die Systemgrenzen der Bilanzierung. Systematische Unterschiede bestehen in der Art und Weise der Darstellung geheizter Gebäudeflächen, wo es im Wesentlichen eine Frage der verwendeten Geodaten ist, wie das Ergebnis ausschaut.

Das vorliegende Projekt hat verdeutlicht, dass nicht alle Faktoren unter einen Hut gebracht werden können. Der Wärmebedarf des WP.SH wurde mit dem Ziel der Vergleichbarkeit mit anderen Methoden und des im Monitoringbericht angegebenen Wärmebedarfs an regionale Gegebenheiten angepasst. Als Resultat bildet der Wärmebedarf des WP.SH, bilanziert für Kreise und kreisfreie Städte, aber auch für die Postleitzahlendistrikte der drei großen Städte, jedoch nicht immer den Konsens zwischen den beiden Methoden von Schwanebeck und von Hotmaps wie es mit Peta 4.2 der Fall ist. WP.SH ist also ein Kompromiss, der auch zu Ausreißern führt, wie etwa in Pinneberg.

Inwiefern die Validierung und Regionalisierung der Wärmebedarfskartierung abgeschlossen ist, bleibt der Anwendung überlassen. In jedem Fall sind die Unsicherheiten bei der weiteren Verwendung der Daten zu berücksichtigen.

#### 10.2 Kostenmodell

Das empirische Modell für die Schätzung von Investitionskosten von Wärmeverteilungsnetzen, welches ursprünglich von Persson und Werner für europäische Städte entwickelt wurde und auf Erfahrungswerten aus Schweden aufbaut, ist innovativ, denn es kommt mit wenigen Daten aus, die aus der Raster-basierten Wärmebedarfsmodellierung heraus gewonnen werden können. Damit werden Berechnungen sehr vereinfacht, und flächendeckende Analysen des wirtschaftlichen Ausbaupotentiales werden ermöglicht. Diese wiederum können die Basis für Systemanalysen einer Integration des Wärmesektors über Fern- und Nahwärme bilden, die es in dieser Form für Schleswig-Holstein nicht gibt.

Die große Herausforderung der Überführung eines empirischen Modells aus Skandinavien ist die Frage der Anschlussdichte und im Allgemeinen die Art und Weise, wie Wärmenetze geplant und realisiert werden. Während Schweden und Dänemark insbesondere mittlerweile den Weg des großflächigen Ausbaus mit der signifikanten Besteuerung fossiler Energieträger, der strukturellen Einbindung des Wärmesektors ins Energiesystem, und der kommunalen Raumordnung und Flächenplanung erfolgreich vorantreiben, bestehen diese Möglichkeiten in Deutschland nicht. Statt hoher Anschlussgrade in Siedlungsbereichen entstehen Nahwärmeinseln, welche weder energiepolitisch noch gesamtwirtschaftlich optimal sind. Für das vorliegende Projekt waren geringe Anschlussgrade ein Problem, da sich wirtschaftliche Kenngrößen aus realisierten Nahwärmenetzen nicht in ein flächendeckendes Kostenmodell übertragen lassen.

Ein wesentliches Konzept der Kostenmodellierung ist der Faktor "effective width", welche eine statistische Größe ist, die sich aus der Landfläche eines Wärmeversorgungsnetzes dividiert mit der Trassenlänge ergibt. Die "effective width" ist nach Persson und Werner abhängig von der Geschossflächendichte pro Landfläche, der sogenannten Plot Ratio. In der vorliegenden Studie wurde nach Analyse von 26 bestehenden Nahwärmenetzen, errichtet durch die Firma Gottburg, keine Abhängigkeit der "effective width" von der Plot Ratio erkennbar. Es sollte aber in der weiteren Arbeit ein Korrekturfaktor für das unterschiedliche Verhalten der Kostenkurve für ländliche und städtische Bereiche eingeführt werden.

Ein Teil der Schwierigkeiten, auch im ländlichen Bereich zu besseren Kostenabschätzungen zu gelangen, ist das Fehlen von Daten zu Wärmenetzen in Mehrfamilienhaus-Gebieten im Bereich zwischen Großstadt und Land. Hier wäre es erstrebenswert, in den Städten Flensburg und Kiel, aber auch in mittelgroßen Städten wie Schleswig und Rendsburg Daten für die Bestimmung der Funktion der "effective width", in Abhängigkeit von der Plot Ratio, einholen.

Hendrik Ostermanns Bachelorarbeit, die während des Projekts an der Hochschule Flensburg in Zusammenarbeit mit der Firma Gottburg geschrieben wurde, hat bestätigt, dass die vielen Unsicherheiten in der Abschätzung von Wärmebedarf und Kosten für Wärmenetze einer Berücksichtigung von Sensitivitäten erfordern. Das sind primär die Annahmen der räumlichen Verteilung des Wärmebedarfes, des Anschlussgrades und der räumlichen Ausbreitung von Wärmenetzen. Der Zugriff auf wesentliche Kenngrößen und Projektdaten hat es erlaubt, das empirische, schwedische Kostenmodell

im Wesentlichen zu bestätigen. Jedoch ist die Datengrundlage weiterhin begrenzt, so dass mehr Erfahrungswerte in die Weiterentwicklung des Modells einfließen sollten, um es zu verbessern.

#### 10.3 Abschließende Diskussion

Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Entwicklung des Wärmeatlases für Schleswig-Holstein, der Online-Applikation und dem Austausch mit Experten können wie folgt zusammengefasst werden:

- 1. Der resultierende Wärmeatlas SH ist ein innovatives Element in der Entwicklung zusammenhängender und konsistenter Informationen über den schleswig-holsteinischen Wärmesektor. Der Online-Atlas hilft, einen Überblick über die räumliche Verteilung des Wärmebedarfes zu schaffen. Potentielle Wärmenetzgebiete werden gezeichnet, Kosten für den Ausbau von Wärmenetzen werden abgeschätzt, und die Möglichkeiten der Nutzung von Abwärme und Biomasse, sowie Informationen zu bestehenden Wärmenetzen werden erstmals in einer Plattform zusammengefasst.
- 2. Der Wärmeatlas SH ist als Online-Atlas konzipiert, in dem sämtliche geografische Daten zum Wärmesektor Schleswig-Holsteins zusammengeführt werden können, vorausgesetzt, diese Daten sind verfügbar bzw. durch Modelle abbildbar.
- 3. Der Wärmeatlas SH kann helfen, die Sichtbarkeit des Wärmesektors zu verbessern, in dem potentielle Lösungen und Komponenten einer Wärmewende im Land sichtbar gemacht werden. Dies soll Auslöser für weitere Studien und für lokale Initiativen sein, den Wärmesektor zu dekarbonisieren.
- 4. WP.SH baut auf einer robusten Mapping-Technologie auf. Mit ArcGIS Online wurde zwar eine zugängliche kommerzielle Online-Plattform genutzt, die Technologie lässt sich jedoch auf Open-Source-Technologien übertragen, etwa wie es das Projekt open\_eGo für den Stromsektor gezeigt hat, und wie es Hotmaps für den europäischen Wärmesektor deutlich macht.
- 5. Die Datenbasis von WP.SH kann dazu verwendet werden, Input für Wärmeversorgungsstrategien landesweit, für Kreise und Städte, sowie für den ländlichen Raum zu liefern. Die hochaufgelöste quantitative Abbildung des Wärmebedarfes und möglicher Wärmenetze samt einer Abschätzung des ökonomischen Potentiales kann durch das Karten-Interface vereinfacht werden.
- 6. WP.SH ist eine Navigationshilfe für den Wärmesektor. Die vielen unabhängigen Akteure, die oft unbekannten Wechselwirkungen zwischen Technologien und örtlichen Potentialen, und die gemeinsame Darstellung auf digitalen Karten ist ein Schritt zur noch ausstehenden Digitalisierung des Wärmesektors. Er kann weitere Akteure motivieren, Daten zur Verfügung zu stellen und eine Motivation für die weitere Digitalisierung sein.
- 7. Eine Weiterentwicklung des Tools sollte in Richtung stärkerer Interaktivität gehen. Der Wärmesektor hat einen Bedarf des Austausches von Potentialen einerseits möglicher Wärmenetze, andererseits potentieller Wärmelieferanten. Auch die Einbindung alternativer Methoden wie der Wärmebedarfskarte von Malte Schwanebeck, lokalen Daten und, sofern möglich, bestehenden Wärmenetzgebieten sollte erkundet werden.

Wärmenetze können einen wichtigen Beitrag zur Transformation der Energiesysteme darstellen. Unter den richtigen Rahmenbedingungen können bis zu 70% des jetzigen Wärmebedarfes mit Nah- und

Fernwärme gedeckt werden, die zunehmend aus CO<sub>2</sub>-freien Quellen erzeugt werden können. Energieeffizienz in Neubauten und im Gebäudebestand sind weiterhin wichtig, und synergetische Effekte mit dem Wärmenetzausbau müssen gefunden werden. Eine der Voraussetzungen ist eine auf den Wärmesektor zielende öffentliche Planung, die einerseits Perspektiven aufzeigt, andererseits Signale an Kommunen, Betriebe und Haushalte sendet, wie, wo und wann ein Wärmenetzausbau geschehen kann.

Hindernisse für den Ausbau der Wärmenetze nicht nur technisch-ökonomischer Natur. Es muss das Risiko der Abhängigkeit von einem Anbieter abgewogen werden können. Der derzeitige starke Fokus auf Wirtschaftlichkeit in Wärmenetzen, welche in ökonomisch prekären Lagen sind, darf nicht das Allgemeinwohl beschädigen. Es ist letztendlich eine Frage der Organisation und der Eigentümerverhältnisse. Voraussetzung für eine erfolgreiche Diskussion der Optionen und Alternativen setzt Transparenz und Zugang zu Informationen voraus. Die Autoren hoffen, mit dem WP.SH einen Beitrag hierzu geleistet zu haben.

## 11 Literatur

- B.A.U.M. Consult (2015). *Anlage zum Integrierten Klimaschutzkonzept für die Stadt Neumünster*. Zugriff am 2.2.2018 http://www.neumuenster.de/cms/files/klimaschutzkonzept\_nms\_anlage\_finale\_fassung\_150226.pdf.
- B.A.U.M. Consult (2016). *Integriertes Klimaschutzkonzept für die Stadt Neumünster Überarbeitete Fassung*. Zugriff am 2.2.2018 http://www.neumuenster.de/cms/files/160322\_klimaschutzkonzept\_160322\_2.pdf.
- Bundesagentur für Arbeit (2016). Gemeindedaten der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten nach Wohn- und Arbeitsort Deutschland, Länder, Kreise und Gemeinden (Jahreszahlen) Juni 2016. Zugriff am 3.3.2019 https://statistik.arbeitsagentur.de/nn\_31966/SiteGlo-bals/Forms/Rubrikensuche/Rubrikensuche\_Form.html?view=processForm&resourceId=210368&input\_=&pageLocale=de&topi-cld=746732&year\_month=201606&year\_month.GROUP=1&search=Suchen.
- Christensen, B. A. & Jensen-Butler, C. (1982). Energy and urban structure: Heat planning in Denmark. *Progress in Planning*, *18* (2), 57–132.
- Dammann, S. (2019). Ermittlung von Erfolgsfaktoren für die Projektierung und Finanzierung von Nahwärmenetzen im ländlichen Raum. Masterthesis, Europa-Universität Flensburg.
- Danish Energy Agency (2013). Technology data for energy plants. Individual Heating Plants and Energy Transport.
- Deutscher Wetterdienst (ohne Jahr). Klimafaktoren (KF) für Energieverbrauchsausweise. Zugriff am 6.8.2018 https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimafaktoren/klimafaktoren.html.
- Europäische Union (2012). Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG. Zugriff am 30.5.2019 https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUri-Serv.do?uri=OJ:L:2012:315:0001:0056:DE:PDF.
- Europa-Universität Flensburg, Halmstad University & Aalborg University (2018). Pan-European Thermal Atlas (Peta) 4. Zugriff am 29.5.2019 https://heatroadmap.eu/peta4/.
- Eurostat (2018). Cooling and heating degree days by NUTS 2 regions annual data. Zugriff am 19.4.2018 http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg\_chddr2\_a&lang=en.
- Eurostat Census Hub 2 (2011a). *Dwellings by Density standard und Type of building*. Zugriff am 29.8.2018 https://ec.europa.eu/CensusHub2/query.do?step=selectHyperCube&qhc=false.
- Eurostat Census Hub 2 (2011b). *Dwellings by Useful floor area und Type of building*. Zugriff am 19.9.2018 https://ec.europa.eu/CensusHub2/query.do?step=selectHyperCube&qhc=false.
- Fleiter, T., Elsland, R., Rehfeldt, M., Steinbach, J., Reiter, U., Catenazzi, G., Jakob, M., Rutten, C., Harmsen, R., Dittmann, F., Rivière, P. & Stabat, P. (2017a). *Deliverable 3.1: Profile of heating and cooling demand in 2015, Data annex*. Zugriff am 3.5.2018 heatroadmap.eu/re-sources/HRE4%20Exchange%20Template%20WP3\_v22b\_website.xlsx.
- Fleiter, T., Elsland, R., Rehfeldt, M., Steinbach, J., Reiter, U., Catenazzi, G., Jakob, M., Rutten, C., Harmsen, R., Dittmann, F., Rivière, P. & Stabat, P. (2017b). *Profile of heating and cooling demand in 2015:* Fraunhofer ISI, TEP Energy GmbH, University Utrecht, ARMINES. Zugriff am 12.12.2017 http://heatroadmap.eu/resources/3.1 Profile of the heating and cooling demand in the base year in the 14 MSs in the EU28.pdf.
- GeoBasis-DE / BKG (2016). Verwaltungsgebiete 1: 250 000 VG250 und VG250-EW. Zugriff am 19.12.2017 https://www.geodatenzentrum.de/auftrag1/archiv/vektor/vg2500/2015/.

- geomer (kein Jahr). Wärmeatlas 2.0: Gebäudescharfe Wärmebedarfsinformationen für Wärmeplanungen, Quatierskonzepte und Szenarioanalysen. Zugriff am 30.5.2019 https://www.geomer.de/produkte/geodaten/waermebedarfsdaten-waermeatlas-20/index.html.
- infas enermetric Consulting (2016). *Kreis Ostholstein Integriertes Klimaschutzkonzept*. Zugriff am 2.2.2018 https://www.kreis-oh.de/media/custom/2454\_522\_1.PDF?1464859576.
- JRC (2017). Joint Research Centre Data Catalogue: GHS population grid, derived from EUROSTAT census data (2011) and ESM 2016. Brüssel: Joint Research Centre / European Commission. Zugriff am 13.7.2017 http://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/jrc-ghsl-ghs\_pop\_eurostat\_europe\_r2016a.
- K.GREENTECH GmbH (2014). Ergebnisbericht zum Integrierten Klimaschutzteilkonzept integrierte Wärmenutzung in Lübeck http://www.luebeck.de/lvw\_docs/forms/3/3\_390\_2/Waermenutzungskonzept\_Endbericht2014\_05\_12.pdf.
- Kreis Rendsburg-Eckernförde Fachbereich Planen, Bauen und Umwelt (2012). Klimaschutzkonzept Kreis Rendsburg-Eckernförde. Zugriff am 2.2.2018 https://www.kreis-rendsburg-eckernfoerde.de/fileadmin/download internet/Klimaschutz/Klimaschutzkonzept-Rd-Eck-2012.pdf.
- Landesportal Schleswig-Holstein (2017). Wärmenetzkarte Schleswig-Holstein. Zugriff am 31.5.2019 https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/W/wohnen/waermenetzkarte.html.
- Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein & Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (2017). Tabellen und Abbildungen zum Bericht der Landesregierung (Drucksache 18/5427). Energiewende und Klimaschutz. Zugriff am 5.12.2017 http://www.schleswig-holstein.de/DE/Schwerpunkte/Energiewende/Daten/\_documents/monitoring.html.
- Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein & Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (2018). Tabellen und Abbildungen zum Energiewende- und Klimaschutzbericht der Landesregierung (Drucksache 19/818). Energiewende und Klimaschutz in Schleswig-Holstein -Ziele, Maßnahmen und Monitoring 2018. Zugriff am 30.8.2018 https://schleswig-holstein.de/DE/Schwerpunkte/Energiewende/Daten/documents/monitoring.html.
- Möller, B., Wiechers, E., Persson, U., Grundahl, L. & Connolly, D. (2018). Heat Roadmap Europe: Identifying local heat demand and supply areas with a European thermal atlas. *Energy*, *158*, 281–292. Zugriff am 17.8.2018 https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.025.
- Möller, B., Wiechers, E., Persson, U., Grundahl, L., Lund, R. S. & Mathiesen, B. V. (2019). Heat Roadmap Europe: Towards EU-Wide, local heat supply strategies. *Energy*, *177*, 554–564. Zugriff am 30.5.2019 https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.098.
- Ostermann, H. (2018). Untersuchung bestehender Nahwärmenetze und Ermittlung eines Kostenmodells für die Weiterentwicklung eines europäischen Wärmeatlasses zu einem regionalen Screening-Tool für Schleswig-Holstein. Bachelorthesis, Hochschule Flensburg.
- Persson, U., Möller, B. & Wiechers, E. (2017). Methodologies and assumptions used in the mapping. Deliverable 2.3: A final report outlining the methodology and assumptions used in the mapping. Zugriff am 27.5.2019 https://heatroadmap.eu/wp-content/uploads/2018/11/D2.3\_Revised-version\_180928.pdf.
- Persson, U. & Werner, S. (2010). Effective width the relative demand for district heating pipe lengths in city areas. The 12th International Symposium on District Heating and Cooling, September 5th to September 7th , 2010, Tallinn, Estonia. Zugriff am 25.9.2018 http://energy-pathways.org/pdf/Persson\_Werner\_Effective\_width.pdf.

- Persson, U. & Werner, S. (2011). Heat distribution and the future competitiveness of district heating. *Applied Energy*, 88 (3), 568–576. Zugriff am 13.3.2018 https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.09.020.
- Pezzutto, S., Zambotti, S., Croce, S., Zambelli, P., Garegnani, G., Scaramuzzino, C., Pascuas, R. P., Zubaryeva, A., Haas, F., Exner, D., Müller, A., Hartner, M., Fleiter, T., Klingler, A.-L., Kühnbach, M., Manz, P., Marwitz, S., Rehfeldt, M., Steinbach, J. & Popovski, E. (2018a). D2.3 WP2 Report Open Data Set for the EU28 02.07.2018.
- Pezzutto, S., Zambotti, S., Croce, S., Zambelli, P., Garegnani, G., Scaramuzzino, C., Pascuas, R. P., Zubaryeva, A., Haas, F., Exner, D., Müller, A., Hartner, M., Fleiter, T., Klingler, A.-L., Kühnbach, M., Manz, P., Marwitz, S., Rehfeldt, M., Steinbach, J. & Popovski, E. (2018b). Industrial Sites: Industrial Database for EU28 + Norway. Siehe auch: D2.3 WP2 Report Open Data Set for the EU28. Zugriff am 13.8.2018 https://gitlab.com/hotmaps/industrial\_sites/industrial\_sites\_Industrial\_Database/tree/master/data.
- Pezzutto, S., Zambotti, S., Croce, S., Zambelli, P., Garegnani, G., Scaramuzzino, C., Pascuas, R. P., Zubaryeva, A., Haas, F., Exner, D., Müller, A., Hartner, M., Fleiter, T., Klingler, A.-L., Kühnbach, M., Manz, P., Marwitz, S., Rehfeldt, M., Steinbach, J. & Popovski, E. (2019a). Heat Density Maps beta version. Siehe auch: D2.3 WP2 Report Open Data Set for the EU28. Zugriff am 27.5.2019 https://gitlab.com/hotmaps/heat.
- Pezzutto, S., Zambotti, S., Croce, S., Zambelli, P., Garegnani, G., Scaramuzzino, C., Pascuas, R. P., Zubaryeva, A., Haas, F., Exner, D., Müller, A., Hartner, M., Fleiter, T., Klingler, A.-L., Kühnbach, M., Manz, P., Marwitz, S., Rehfeldt, M., Steinbach, J. & Popovski, E. (2019b). Heated gross floor area density map of non-residential buildings beta version. Siehe auch: D2.3 WP2 Report Open Data Set for the EU28. Zugriff am 27.5.2019 https://gitlab.com/hotmaps/gfa\_non-res\_curr\_density/.
- Schleswig-Holsteinischer Landtag (2018). Bericht der Landesregierung: Energiewende und Klimaschutz in Schleswig-Holstein Ziele, Maßnahmen und Monitoring 2018. Drucksache 19/818. Zugriff am 30.5.2019 http://www.landtag.ltsh.de/infothek/wahl19/drucks/00800/drucksache-19-00818.pdf.
- Schwanebeck, M. (2016). GIS-basierte Abschätzung der regional differenzierten Wärmebedarfe in Schleswig-Holstein Überlegungen zur Berücksichtigung von Wärmebedarfsanalysen in der Raumplanung. Masterarbeit, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- SCS Hohmeyer | Partner (2017). *Masterplan 100 % Klimaschutz für die Landeshauptstadt Kiel* https://www.kiel.de/de/umwelt\_verkehr/klimaschutz/masterplan100prozentklimaschutz/\_do-kumente masterplan/Endbericht Masterplan 100 Prozent Klimaschutz Kiel.pdf.
- suche-postleitzahl.org (2018). plz-gebiete. Zugriff am 27.2.2018 https://www.suche-postleitzahl.org/downloads.
- Thalen Consult & KEEA Klima und Energieeffizienz Agentur (2012). *Integriertes Klimaschutzkonzept für den Kreis Dithmarschen*. Zugriff am 2.2.2018 http://www.dithmarschen.de/PDF/Integriertes\_Klimaschutzkon
  - zept IKK.PDF?ObjSvrID=647&ObjID=8081&ObjLa=1&Ext=PDF&WTR=1& ts=.
- Universität Flensburg Zentrum für nachhaltige Energiesysteme (ZNES) (2011). *Integriertes Klimaschutzkonzept Flensburg Der Kurs zur CO2-Neutralität 2050*. Zugriff am 15.3.2018 https://www.uni-flensburg.de/fileadmin/content/abteilungen/industrial/dokumente/downloads/veroeffentlichungen/diskussionsbeitraege/diskussionsbeitraege-002.pdf.

- Werner, S. (2006). The New European Heating Index. 10th International Symposium on District Heating and Cooling. Zugriff am 27.5.2019 https://www.lsta.lt/files/events/14\_werner.pdf.
- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie & BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung (2011). *Kurzfassung Klimaschutzkonzept für den Kreis Nordfriesland*. Zugriff am 15.3.2018 https://www.nordfriesland.de/PDF/Kurzfassung\_Klimaschutzkonzept\_Nordfriesland.PDF?ObjSvrID=2271&ObjID=2777&ObjLa=1&Ext=PDF&WTR=1&\_ts=1520938962.