INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG HEIDELBERG

EnEff:Wärme - netzgebundene Nutzung industrieller Abwärme (NENIA)

Kombinierte räumlich-zeitliche Modellierung von Wärmebedarf und Abwärmeangebot in Deutschland

Schlussbericht im Auftrag des
Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

Sebastian Blömer, Christian Götz, Dr. Martin Pehnt (ifeu)

Dominik Hering, Susanne Ochse, Sabrina Hespeler, Dr. Stephan Richter (GEF)

Dr. Peter Thomassen, Dr. Gerd Grytsch, Dr. Claus Zopff (Indevo)

Dr. Stefan Jäger, Bernd Huber (geomer)

Heidelberg Januar 2019

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

FKZ 03ET1302A und B.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Zuwendungsempfänger:	**Förderkennzeichen:**
Ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (A) GEF Ingenieur AG (B)	03ET1302A und B
Vorhabenbezeichnung: Netzgebundene Nutzung industrieller Abwärme (NENIA). Kombinierte räumlich-zeitliche Modellierung von Wärmebedarf und Abwärmeangebot in Deutschland.	
Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2015 – 31.07.2018	
Berichtszeitraum: 01.08.2015 – 31.07.2018	

Inhalt

1 Einleitung 1

2 Grundlagen industrieller Abwärmenutzung 2

2.1 Begriffsdefinition 2

2.2 Wärmeanwendungen im verarbeitenden Gewerbe 6

2.3 Forschungsstand & Vernetzung 10

3 GIS-Modell der Wärmebedarfsentwicklung im Wohn- und Nichtwohngebäudebestand 13

3.1 Grundlagen 13

3.1.1 Wärmebedarfsberechnung für Gebäudebestände 13

3.1.2 Gebäudemodell GEMOD 15

3.1.3 Forschungsstand zur räumlichen Erfassung des energetisch relevanten Gebäudebestandes 18

3.1.4 Datengrundlage & Methodik 19

3.2 GIS-Modellierung des Gebäudebestandes 23

3.2.1 Bewertung und Aufbereitung der Ausgangsdaten 24

3.2.2 Energetische Gebäudetypisierung 27

3.3 Wärmebedarfsmodellierung 32

3.4 Zukünftige Entwicklung des Wärmebedarfs 34

3.5 Wärmenetzmodell 36

3.5.1 Fernwärmebestand 37

3.5.2 Potenzialgebiete 38

4 GIS-Modell Endenergieeinsätze und theoretische Abwärmepotenziale im verarbeitenden Gewerbe 41

4.1 Datengrundlage 41

4.1.1 Emissionserklärungen genehmigungspflichtiger Anlagen nach der elften Bundes-Immissionschutzverordnung (11. BImSchV) 41

4.1.2 Emissionsdaten aus dem europäischen Pollutant Release and Transfer Register (E-PRTR) 43

4.1.3 Standorte relevanter thermischer Prozessstromeinsätze 45

4.1.4 BISNODE-Firmendatenbank 47

4.1.5 Referenzdaten 48

4.2 Datenaufbereitung 49

4.2.1 Emissionserklärungen nach 11. BImSchV 49

4.2.2 European Pollutant Release and Transfer Register (E-PRTR) 58

4.2.3 BISNODE-Firmendatenbank 61

4.3 Abgleich der erfassten Endenergieeinsätze für industrielle Prozesswärmeanwendungen 63

Inhalt

5 Unternehmensfallstudien 64

5.1 Unternehmensbefragung 64

5.1.1 Zielsetzung und Methodik 64

5.1.2 Auswertung 65

5.1.2.1 Unternehmensangaben 66

5.1.2.2 Technische Daten bestehender Abwärmeströme 68

5.1.2.3 Potenziale und Hemmnisse externer Abwärmenutzung 70

5.2 Detailanalyse exemplarischer Industrieunternehmen 77

5.2.1 Zielsetzung und Methodik 77

5.2.2 Auswertung 77

6 Analyse netzgebunden technisch-wirtschaftlich nutzbarer Abwärmepotenziale 79

6.1 Methodik 79

6.1.1 Definitionen 79

6.1.2 Bilanzierung des theoretisch netzgebunden nutzbaren Potenzials 81

6.1.3 Technisch netzgebunden nutzbares Potenzial 91

6.1.4 Wirtschaftlich netzgebunden nutzbares Potenzial 92

6.2 Ergebnisse 97

6.2.1 Analyse von Schadstoffmengen 97

6.2.2 Differenzierung nach Temperaturbereichen 98

6.2.3 Theoretisch netzgebunden nutzbares Abwärmepotenzial 99

6.2.4 Technisch netzgebunden nutzbares Abwärmepotenzial 102

6.2.5 Wirtschaftlich netzgebunden nutzbares Abwärmepotenzial 106

7 Handlungsoptionen 111

7.1 Bestehende Instrumente 111

7.1.1 Informations- und Beratungsangebote 112

7.1.2 Förderung 113

7.1.3 Regulierung 115

7.2 Erweiternde Handlungsoptionen 116

7.2.1 Erkenntnisse aus den Praxisfallstudien und der Unternehmensumfrage 116

7.2.2 Ergebnisse Stakeholder-Workshop 117

7.2.3 Zusammenfassung 119

8 Nutzbarkeit der entwickelten GIS-Plattform 122

8.1 Bestehende GIS-Plattformen 122

8.1.1 Abwärmekataster 122

8.1.2 Wärmebedarfskataster Gebäude 123

Inhalt

8.2 Zielgruppen, Anforderungen und Datenschutzbestimmungen 123

8.2.1 Abwärmekataster 123

8.2.2 Wärmebedarfs- und Wärmenetzmodell 126

8.3 Technische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen eines kartengestützten Web-Dienstes 127

8.3.1 Evaluation der technischen Machbarkeit 127

8.4 Betreibermodelle 131

8.4.1 Kostenschätzungen 131

8.4.2 Implementierungsvarianten 133

8.5 Datenschutzaspekte 134

9 Zusammenfassung 135

9.1 Potenzialmodell 135

9.2 Unternehmensfallstudien 137

10 Literatur 139

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Projektablaufs. 1

Abbildung 2: Endenergieeinsatz in der Industrie 2012 nach Anwendungsbereichen und Endenergieträgern, BMWi 2018. 6

Abbildung 3: Endenergieeinsätze zur Prozesswärmeerzeugung nach Temperaturniveau in den Sektoren des verarbeitenden Gewerbes. Eigene Darstellung basierend auf: Anwendungsbilanzen Brennstoffe (inkl. Fernwärme) und Strom für Prozesswärme pro Sektor im Jahr 2014 nach (Rohde 2017), Anteile Temperaturniveaus Prozesswärme pro Sektor nach (Eikmeier et al. 2005). 9

Abbildung 4: Energetische Bilanzgrenzen für die Wärmebedarfsberechnung von Gebäuden (Jochum et al. 2012). 14

Abbildung 5: Schematische Darstellung der Bottom-Up-Simulation in GEMOD. 16

Abbildung 6: Beispiel der Überlagerung von Gebäudedaten (gelbe Punkte) und Hektarrasterinformationen aus dem Zensus. Datenpunkte außerhalb von Rasterzellen repräsentieren Nichtwohngebäude oder Wohngebäude bei n < 4. 21

Abbildung 7: Schematische Darstellung der Datenaufbereitung und -anreicherung bei der Entwicklung eines bundesweiten GIS-Modells zur räumlichen Abbildung der Entwicklung des Nutzwärmebedarfs auf Ebene einzelner energetisch typisierter Wohn- und Nichtwohngebäude. 23

Abbildung 8: Statistische Auswertung der Anreicherung der Nutzungsschlüssel in den Ausgangsdaten LoD1_DE A) durch den Abgleich mit Sekundärdaten B) anhand einer ersten Kategorisierung nach den Energiebedarfsklassen Wohngebäude (WG) und Nichtwohngebäude (NWG) 25

Abbildung 9: Vereinfachtes Ablaufdiagramm der Wohngebäudetypisierung. 26

Abbildung 10: Signifikanter Anteil generischer Objektnutzungsschlüssel bei der Identifikation beheizter Nichtwohngebäude in der räumlichen Datengrundlage. 29

Abbildung 11: Bundesweite Übersicht über Bäder im Gebäudemodell (Stand 31.1.2018). 31

Abbildung 12: Schematische Darstellung der Wärmebedarfsberechnung. 33

Abbildung 13: Gewähltes Wärmesenken-Szenario: Moderate energetische Sanierungstätigkeit im Stichjahr 2030. 34

Abbildung 14: Schematische Darstellung des Wärmenetzmodells. 36

Abbildung 15: Dynamische Ableitung der Gesamtnetzlänge [m] pro Versorgungs(-raster)-zelle aus Straßengeometrien im Wärmenetzmodell. Bilder und Straßengeometrien: © OpenStreetMap 2015. 39

Abbildung 16: Ermittelte zusätzliche Wärmenetzpotenziale nach Raumstrukturellen Stadt- und Gemeindetypen im Szenario moderater energetischer Sanierung 2030. 40

Abbildung 17: Eingabemaske Stoffwerte und Abgasparameter Emissionserklärung 11. BImSchV in BUBE-Online (Bund-/ Länder Kooperation VKoopUIS 2013). 42

Abbildung 18: Schematische Darstellung Datenaufbereitung Emissionserklärungen nach der 11. BImSchV Berichtsjahr 2012 für die räumliche Potenzialanalyse. 49

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 19: Abwärmemenge bei $TRef 35°C$ und fehlende Daten von Emissionsvorgängen auf Grund einer Kennzeichnung als „Betriebsgeheimnis“ in der BUBE-Datenbank nach Wirtschaftszweigen. 55

Abbildung 20: Sensible Abwärmemenge in den Emissionsdaten in Abhängigkeit verschiedener Referenztemperaturen $TRef[°C]$. 56

Abbildung 21: Streuung des Verhältnisses von A) ermittelten Brennstoffeinsätzen und B) theoretischen Abwärmepotenzialen aus den E-PRTR-Daten zu den Daten nach 11. BImSchV im Referenzjahr 2012 auf Standort-Ebene in den vier untersuchten Industriesektoren. 60

Abbildung 22: Bilanzierung Endenergieeinsätze für Prozesswärme nach Sektoren des verarbeitenden Gewerbes im GIS-Modell. 63

Abbildung 23: Verteilung der Umfragteilnehmer nach Wirtschaftszweigen. 66

Abbildung 24: Größenstruktur und eingesetzte Energiemanagementsysteme der befragten Unternehmen. 67

Abbildung 25: Struktur des Endenergieträgereinsatzes in den befragten Betrieben. 68

Abbildung 26: Wärmebilanz der befragten Betriebe und zeitliches Verhalten der Abwärmeströme. 69

Abbildung 27: Einschätzung zur internen Abwärmenutzung in der jeweiligen Branche und Nutzungsgrad vorhandener Abwärme in den befragten Betrieben 70

Abbildung 28: Einschätzung des vorhandenen Potenzials zur Abwärmelieferung. 71

Abbildung 29: Erschwernisse im Rahmen der Vertragsgestaltung zwischen Lieferant und Abnehmer. 72

Abbildung 30: Anteil Teilnehmer, die Erschwernisse im Rahmen der Wärmeparametrierung sehen 73

Abbildung 31: Hindernisse bei der Antragsstellung für Abwärmeprojekte im Allgemeinen. 75

Abbildung 32: Lösungsvorschläge für die Überwindung der Hindernisse in der Antragsstellung 75

Abbildung 33: Anforderungen der Befragten an ein optimales Förderprogramm 76

Abbildung 34: Empfehlungen der Studienteilnehmer für die Nutzung von Abwärme 76

Abbildung 35: Ebenen der Abwärmepotenzialabschichtung. 79

Abbildung 36: Schematische Darstellung der Stoff- bzw. Energieströme über die Systemgrenzen eines Unternehmensstandorts am Beispiel der Kalkherstellung (Leube-Baustoffe 2017). 82

Abbildung 37: Vereinfachtes Systemschaubild zur externen, leitungsgebundenen Nutzung von Abwärme aus Rauchgasen. 84

Abbildung 38: Programmablaufplan zur Ermittlung des technisch nutzbaren Abwärmepotenzials bei passiver (links) bzw. aktiver Wärmenutzung (rechts) 86

Abbildung 39: Schematischer Temperaturverlauf entlang des Gegenstromwärmeübertragers bei passiver Wärmenutzung. 88

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 40: Schematische Temperaturverläufe entlang der Gegenstromwärmeübertrager bei aktiver Wärmenutzung. 88

Abbildung 41: Schematisch dargestellter Gebietsumgriff für die Ermittlung des technischen und wirtschaftlichen Abwärmepotenzials (blau: bestehende Fernwärmeversorgung, orange: potenzielle Nahwärmenetze) 92

Abbildung 42: Schematisches Vorgehensmodell zur Ermittlung des anteiligen wirtschaftlichen Abwärmepotenzials für eine einzelne Abwärmequelle auf Standortebene. 96

Abbildung 43: Mittlere Jahresfrachten ausgewählter Schadstoffe in berichtspflichtigen Emissionsvorgängen (Rauchgasströme) pro Standort aus den aufbereiteten Emissionsdaten der 11. BImSchV differenziert nach Wirtschaftszweigen. 97

Abbildung 44: Betrachtete Szenarien zur Einkopplung von Abwärme: Netzbetriebstemperaturen im Status quo, perspektivisch sowie progressiv. 98

Abbildung 45: Ermitteltes theoretisches Potenzial aus Primär- und Sekundärdatensätzen. 100

Abbildung 46: Räumlich aufgeschlüsseltes theoretisches Potenzial aus Primär- und Sekundärdatensätzen einschließlich des Hochtemperaturbereichs (ohne Raffinerien/Chemieparks). 100

Abbildung 47: Theoretisches Potenzial aus Primär- und Sekundärdatensätzen aufgeschlüsselt nach Branchen bzw. Bundesländern (Auszug) 101

Abbildung 48: Technisches Potenzial bei ausschließlicher Berücksichtigung von Bestandsnetzen aus dem Netzpotenzialmodell. 102

Abbildung 49: Räumlich aufgeschlüsseltes technisches Potenzial (Referenzvariante) einschließlich des Hochtemperaturbereichs bei ausschließlicher Berücksichtigung von Bestandsnetzen aus dem Netzpotenzialmodell (ohne Raffinerien/Chemieparks). 103

Abbildung 50: Technisches Potenzial aufgeschlüsselt nach Branchen bzw. Bundesländern bei ausschließlicher Berücksichtigung von Bestandsnetzen aus dem Netzpotenzialmodell (Referenzvariante, Auszug). 104

Abbildung 51: Technisches Potenzial bei Berücksichtigung von Bestandsnetzen sowie Netzpotenzialen. 105

Abbildung 52: Technisches Potenzial aufgeschlüsselt nach Branchen bzw. Bundesländern bei Berücksichtigung von Bestandsnetzen sowie Netzpotenzialen (Referenzvariante, Auszug). 105

Abbildung 53: Wirtschaftliches Potenzial bei ausschließlicher Berücksichtigung von Bestandsnetzen (Referenzvariante). 106

Abbildung 54: Räumlich aufgeschlüsseltes wirtschaftliches Potenzial (Referenzvariante) einschließlich des Hochtemperaturbereichs bei ausschließlicher Berücksichtigung von Bestandsnetzen aus dem Netzpotenzialmodell (ohne Raffinerien/Chemieparks). 107

Abbildung 55: Wirtschaftliches Potenzial aufgeschlüsselt nach Branchen bzw. Bundesländern bei ausschließlicher Berücksichtigung von

Abbildungsverzeichnis

Bestandsnetzen aus dem Netzpotenzialmodell (Refe-renzvariante, Auszug). 108

Abbildung 56: Wirtschaftliches Potenzial bei Berücksichtigung von Bestandsnetzen sowie Netzpotenzialen (Referenzvariante). 109

Abbildung 57: Wirtschaftliches Potenzial aufgeschlüsselt nach Branchen bzw. Bundesländern bei Berücksichtigung von Bestandsnetzen sowie Netzpotenzialen (Referenzvariante, Auszug). 109

Abbildung 58: Wirtschaftlich erschließbares Potenzial in Abhängigkeit der mittleren Trassenlänge zu jeweils erschlossenen Netzverbünden (Referenzvariante, bei ausschließlicher Berücksichtigung von Bestandsnetzen (oben) sowie bei Berücksichtigung von Bestandsnetzen sowie Netzpotenzialen (unten)). 110

Abbildung 59: Übersicht bestehender Instrumente und Rahmenbedingungen netzgebundener Abwärmenutzung (Stand 10/2018). 111

Abbildung 60: Schema der Prozess-orientierten Aufnahme von Hemmnissen und Lösungsmöglichkeiten von den Workshop-Teilnehmern. 118

Abbildung 61: Elemente zur Förderung netzgebundener Nutzung industrieller Abwärme: Ergebnisse der Unternehmensumfrage, der Praxisfallstudien und des Stakeholder-Workshops im Rahmen des NENIA-Vorhabens. 121

Abbildung 62: Kartendienst Abwärmepotenzial, implementiert in ArcGIS Online. 128

Abbildung 63: Beispielhafte Verwendung des Online-Datensatzes in einem Desktop-GIS (QGIS). 128

Abbildung 64: WebGIS-Tool (Proof-of-Concept) 130

Abbildung 65: Schematischer Ablauf und Ergebnisse der räumlichen Potenzialabschichtung. 136

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Nutzungskaskade Abwärme. Eigene Darstellung nach (ebd.). 4

Tabelle 2: Aufgliederung des Endenergieeinsatzes für Prozesswärme nach Branchen des verarbeitenden Gewerbes und Temperaturniveaus der Produktionsprozesse. Eigene Darstellung nach (Rohde 2017; Eikmeier et al. 2005). 7

Tabelle 3:Energetische Gebäudetypologie und Mengengerüst in GEMOD im Jahr 2016. 17

Tabelle 4: Bezugspunkte der Gebäudehöhenangabe in den LoD1_DE-Daten. 20

Tabelle 5: Bewertung der Datenqualität für das Attribut Gebäudefunktion in den LoD1-Daten 24

Tabelle 6: Übersicht und Anteile Wohngebäudetypen. 27

Tabelle 7: Exemplarische ALKIS-Objektnutzungsschlüssel, zugeordnet zu einem energetischen Gebäudetyp nach GEMOD. 28

Tabelle 8: ALKIS-Objektnutzungsschlüssel zur Identifikation von Gebäudegeometrien mit einer Nutzung als Badegebäude in der aufbereiteten räumlichen Datengrundlage. 30

Tabelle 9: Ergebnisse Bottom-Up-GIS-Modell Nutzenergiebedarf Raumwärme und Warmwasser im Wohn- und Nichtwohngebäudebestand in einem Szenario moderater energetischer Sanierungstätigkeit im Stichjahr 2030. 35

Tabelle 10: Standorte und kumulierte CO_2-Emissionen im berichtspflichtigen verarbeitenden Gewerbe nach E-PRTR im Jahr 2012. 44

Tabelle 11: Untersuchte elektrothermische Verfahren in der energieintensiven Industrie. 45

Tabelle 12: Ermittelte Energieeinsätze und gefasste Abwärmemengen als theoretische Potenziale für eine netzgebundene Nutzung. 47

Tabelle 13: Vergleich Datenpunkte in den aufbereiteten Brennstoffdaten der BUBE-Abfrage „adhoc292“ nach möglichen Aggregationsebenen. Hervorgehoben vollständig fehlende Angaben auf Grund von Datenschutzbedenken der zuständigen Landesstellen. 50

Tabelle 14: Quantifizierung der Aufbereitungsschritte in Bezug auf den Umfang der Daten zum Brennstoffeinsatz auf Bundesebene. 51

Tabelle 15: Aufbereitete Emissionsdaten nach Bundesländern. 54

Tabelle 16: Ergebnisse Standortanalyse Emissionserklärungen 11. BImSchV. 57

Tabelle 17: Faktoren für die Berechnung von Brennstoffeinsätzen und theoretischer Abwärmepotenziale aus CO_2-Emissionen nach Wirtschaftszweigen. 59

Tabelle 18: Ermittelte Endenergieeinsätze Brennstoff und theoretisch nutzbare Abwärmepotenziale aus Standort-spezifischen Jahresfrachten CO_2 im Jahr 2012 nach Sektoren des verarbeitenden Gewerbes. 60

Tabelle 19: Ermittelte zusätzliche Standorte aus den E-PRTR-Daten für die räumliche Potenzialanalyse nach Wirtschaftszweigen. 61

Tabelle 20: Datenübersicht BISNODE-Firmendatenbank in Verbindung mit Mitarbeiter-spezifischen Energiekennzahlen zum Prozesswärmebedarf nach (ebd.). 62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 21: Übersicht der Fallstudienkonzepte und zugehörige Schlüsselkennzahlen. 78

Tabelle 22: Modellrelevante Parameter elektrischer Kompressionswärmepumpen (vgl. (Maaß et al. 2015; Forni et al. 2014; Platt et al. 2010; Braasch et al. 2017) sowie Herstellerangaben) 85

Tabelle 23: Kostenansätze und Wirtschaftlichkeitsparameter 94

Tabelle 24: Kostenschätzung Web-GIS-Anwendung Abwärme- und Wärmebedarfsatlas. 132

Tabelle 25: Überschlägige Kalkulation eines privaten Betreibermodells. 134

Tabelle 26: Ermittelte technisch netzgebunden nutzbare industrielle Abwärmepotenziale. 136

1 Einleitung

Ziel des Verbundvorhabens „NENIA“ war die Entwicklung einer GIS-Plattform mit aufbereiteten Datensätzen zu industriellen Abwärmepotenzialen und Modellen zur räumlich hochauflösenden Analyse netzgebunden nutzbarer Abwärmemengen zur Versorgung des Gebäudebestandes mit Raumwärme und Warmwasser. Dafür wurde an Vorarbeiten der Projektpartner zur räumlichen Modellierung des Wärmebedarfs von Gebäuden (Richter et al. 2014; Blömer 2015) und zur Simulation der Wärmebedarfsentwicklung im Gebäudebestand (Jochum et al. 2015) sowie methodische Ansätze zur Bestimmung von Abwärmepotenzialen (Brückner 2016) angeknüpft. Zusätzlich sollte die Bewertung netzgebunden nutzbarer Abwärmepotenziale durch Erkenntnisse aus einer Unternehmensbefragung und Praxisfallstudien in fünf Industrieunternehmen empirisch fundiert werden. Final sollte die Nutzbarkeit der entwickelten GIS-Plattform als Informationsinstrument im Wärmemarkt bewertet werden und basierend auf den empirischen Erhebungen und einer Einbindung von Stakeholdern, u.a. in Form eines Praxisworkshops, Handlungsoptionen zur Aktivierung netzgebundener Abwärmenutzungspotenziale abgeleitet werden (Abbildung 1).

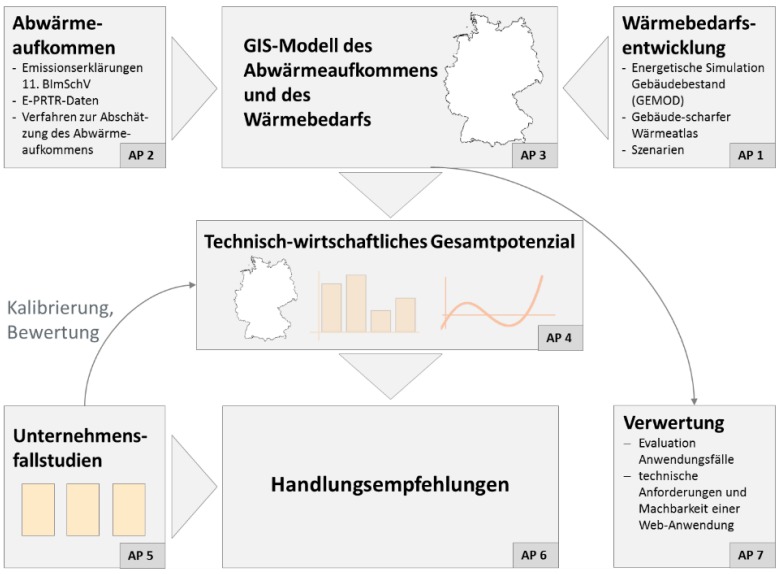


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Projektablaufs.

Die geplanten Arbeitsschritte wurden u.a. durch erweiterte Datengrundlagen zur energetischen Modellierung des Gebäudebestandes in einer GIS-Umgebung in Erweiterung der Vorhabensbeschreibung durchgeführt. Alle wesentlichen Projektziele und Meilensteine wurden durch die Kooperation der Projektpartner erreicht. Im Folgenden werden die Arbeitsschritte und die wissenschaftlichen Grundlagen in Anlehnung an die Struktur der Arbeitspakete in Abbildung 1 im Einzelnen beschrieben.

2 Grundlagen industrieller Abwärmenutzung

2.1 Begriffsdefinition

Unter industrieller Abwärmenutzung wird im Weiteren die Nutzung von Abwärmemengen aus dem verarbeitenden Gewerbe, Abschnitt C, Abteilungen 10 bis 33 nach der Klassifikation der Wirtschaftszweige WZ2008[1] verstanden. Nicht berücksichtigt werden Umwandlungsanlagen (C19 - Kokerei und Mineralölverarbeitung). Abwärme wird in Analogie zu (Pehnt et al. 2010) definiert als

„die eine Anlage verlassende Wärme, ausgenommen die Wärme, dessen Erzeugung der Zweckbestimmung der Anlage entspricht“

Grundsätzlich lassen sich Abwärmepotenziale hinsichtlich ihres (Nutz-)Temperaturniveaus und der jeweils eingesetzten Technologien zur energetischen Nutzung bzw. Transformation der Abwärme unterscheiden. Die Einteilung von Abwärmepotenzialen nach Temperaturniveaus orientiert sich an den Temperaturen, die für die Gewinnung elektrischer und direkter bzw. indirekter, d.h. unter Einsatz von Hilfsenergie nutzbarer thermischer Energie (Wärme und Kälte) gemäß derzeitigem technischem Standard erforderlich sind. In (SAENA 2016; Maaß et al. 2015) werden bspw. die Grenztemperaturen > 500 °C (Hochtemperatur) und < 150 °C (Niedertemperatur) angesetzt. Im Folgenden wird die Einteilung in Analogie zu (Groß & Tänzer 2010) gewählt, wobei im Weiteren ausschließlich Anwendungen zur thermischen Bedarfsdeckung (siehe auch Forni et al. 2014; Hills & Gambhir 2014) im Detail behandelt werden:

- **Hochtemperaturbereich** (> 300 °C):
  - Verstromung mittels Clausius-Rankine- oder Stirling-Prozess
- **Mitteltemperaturbereich** (80-300 °C):
  - Verstromung mittels ORC, Kalina-Prozess
  - Passive Wärmenutzung (intern, lokal/angrenzend oder extern über Einkopplung in Fernwärmenetz bzw. mobilen Transport per Wärmecontainer (LfU-Bayern 2008)[2])
- **Niedertemperaturbereich** (< 80 °C):
  - Anteilige Deckung des internen oder lokalen/angrenzenden Raumheizungs- und Warmwasserbedarfs
  - Vorwärmung von Heizwasser im Wärmenetz (extern)

[1] Beruhend auf der Statistischen Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft (NACE). (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2008; Eurostat 2008)

[2] Hierbei ist zu beachten, dass bei einer Nutzung der Wärme zur Warmwasseraufbereitung eine Mindesttemperatur von ca. 65 °C (60 °C am (Trink-)Warmwasseraustritt, vgl. Arbeitsblatt W 551 des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches) gewährleistet sein muss, um hygienische Probleme (Legionellenbildung) zu vermeiden. Die erforderliche Vorlauftemperatur üblicher Fernwärmekunden im Bestand beträgt aus diesem Grund derzeit ca. 80-95 °C (Allplan-(Hrsg.) 2017). Aufgrund der Wärmeverluste vom Ort der Einbindung bis zum Ort der Nutzung sowie der zwangsläufig auftretenden treibenden Temperaturdifferenzen bei der Wärmeübertragung (s. bspw. (Hills & Gambhir 2014; Hummel et al. 2014)) ist am Einkopplungspunkt der Abwärme in den Vorlauf eines typischen Bestandsnetzes damit eine Mindesttemperatur in der Größenordnung von 100 °C notwendig. Je nach technologieabhängiger Definition der treibenden Temperaturdifferenz können auch deutlich höhere Mindesttemperaturen notwendig sein (Allplan-(Hrsg.) 2017).

- Aktive Wärmenutzung über elektrische/thermische Wärmepumpen oder Wärmedisproportionierung (lokal/angrenzend oder extern (s.o.)):
  Thermische Wärmepumpen werden über auf hohem Temperaturniveau integrierte Prozesswärme oder eine gesonderte Brennstofffeuerung angetrieben (Wärmesynproportionierung). Die aktive Wärmenutzung mittels elektrisch betriebener Wärmepumpen, die Wärmesynproportionierung und Wärmedisproportionierung (auch: Wärmetransformation (Hebecker 1995)) werden hier unter dem Begriff der „Wärmeaufwertung" zusammengefasst.[1]
- Kältebereitstellung (i.A. intern oder lokal/angrenzend)
- Passive Wärmenutzung in kalten (Low-Ex-)Wärmenetzen:
  Zur Erhöhung auf das jeweils notwendige Nutztemperaturniveau werden bspw. in den einzelnen Hausstationen integrierte Wärmepumpen eingesetzt.

Überdies wird zwischen gefassten und diffusen Abwärmeströmen unterschieden. Erstere beschreiben die in Trägermedien gebundene thermische (Ab-)Wärmeenergie (Abluft, Abgas, Brüden, Kühlflüssigkeiten/Abwasser oder allgemeines Prozessgut), letztere die großflächig an die Umgebung abgegebene Wärmemenge (Strahlung/natürliche Konvektion).

Im Einzelnen sind v.a. die folgenden Parameter und Kenngrößen relevant für die Bewertung des Potenzials bzw. der „Qualität" einer Abwärmequelle[2]:

- **Aggregatzustand** des Abwärmeträgermediums
- **Temperaturniveau**
- **Zeitlicher Verlauf der Wärmeleistung** (bezogen auf festzulegende Referenztemperatur des Abwärmestroms nach Wärmeabgabe):
  Falls dieser nicht bekannt ist, kann ggf. auf die verfügbare Wärmemenge/Zeiteinheit sowie minimale und/oder maximale Wärmeleistungen zurückgegriffen werden. Werksferien, Stillstandszeiten infolge von Revision oder Schichtbetrieb usw. sollten bei der Ableitung eines vereinfachten Zeitverlaufs der Abwärmeleistung berücksichtigt werden (4,10).
- **Chemische Zusammensetzung**, **Verunreinigungen**
- **Branche/Prozess**

Die bisher aufgeführten Parameter betreffen ausschließlich die Quellenseite (Abwärmedargebot). Daneben gilt es jedoch auch, potenzielle Wärmesenken auf ihre spezifische Eignung für die Nutzung des Abwärmepotenzials zu untersuchen, wobei Kriterien wie das individuelle Lastprofil, erforderliche Versorgungstemperaturen und Betriebsdrücke, Redundanzanforderungen sowie die Entfernung vom Standort der Abwärmequelle eine wichtige Rolle

[1] Diese kann sich bei geeigneten Randbedingungen (v.a. in Hochtemperaturnetzen) auch an eine passive Wärmenutzung – am abwärmeseitigen Ausgang des Wärmeübertragers – anschließen (ebd.). Eine Reihenschaltung von Abwärmequelle und konventioneller Erzeugungsanlage kann u.U. zu (lokalen) Wirkungsgradeinbußen führen: So kann eine vorgeschaltete Rücklaufvorwärmung bspw. bei (ungeregelten) Anzapfkondensationsturbinen (vgl. (Schellong 2016)) eine ggf. vorhandene Niederdruckanzapfung zur internen Wirkungsgradsteigerung obsolet machen. Weiterhin ist im Fall einer Vorwärmung auf die Betriebs-/Auslegungsgrenzen des betreffenden Leitungsabschnitts sowie des bestehenden Wärmerzeugers (Eintrittstemperaturen) zu achten.

[2] Darüber hinaus gibt es zahlreiche anwendungsspezifische Kriterien, die aus technischen und/oder wirtschaftlichen Gründen zu beachten sind. Als Beispiel sei hier Abwärme aus Abwasserkanalnetzen genannt – für eine tatsächliche Nutzung ist u.a. ein Mindestdurchfluss zu gewährleisten, um die Verschmutzung der Wärmeübertragerflächen durch Schwebstoffe etc. zu verhindern bzw. in Grenzen zu halten. Ebenso können z.B. hochkorrosive Bestandteile in Rauchgasen die Materialauswahl sowie Lebensdauer der Komponenten und damit die Erschließungskosten beeinflussen.

spielen. Neben der Einkopplung der thermischen Energie in ein Fernwärmenetz kann in diesem Zusammenhang auch die Mitversorgung angrenzender oder in der Nähe befindlicher Industriebetriebe (vgl. dazu (Hirzel et al. 2013)) oder der ggf. intern vorhandene Kältebedarf (s.o.), der sich über den Einsatz von thermisch angetriebenen Kältemaschinen decken lässt, von Interesse sein.

Vielfach (u.a. in (ebd.; SAENA 2016; Forni et al. 2014)) wird herausgestellt, dass die Nutzungsmöglichkeiten für Abwärme zugunsten eines möglichst rationellen Energieeinsatzes hinsichtlich der Entfernung zwischen dem Ort des Abwärmeanfalls und dem Ort der Nutzung hierarchisch klassifiziert werden sollten (Pehnt et al. 2010):

Tabelle 1: Nutzungskaskade Abwärme. Eigene Darstellung nach (ebd.).

Ebene	Beschreibung	Vorteile	Hemmnisse
1. Verfahrensoptimierung	Verminderung des Abwärmeanfalls durch Prozess-/Verfahrensoptimierung, Strömungsführung, Wärmedämmung, Einsatz hocheffizienter Antriebe	Geringe Distanzen, keine wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen Anlagen / Prozessen	Prozess-spezifische technische Restriktionen
2. Prozess- / Anlageninterne Nutzung	Anlagen-/prozessinterne Nutzung im Sinne einer Abwärmerückführung (z.B. Verbrennungsluftvorwärmung mittels Rekuperator- oder Regenerator-Brennern, Trocknung oder Vorwärmung der Ausgangsstoffe)	Geringe Distanzen, keine wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen Anlagen / Prozessen	Prozess-spezifische technische Restriktionen
3. Betriebsinterne Nutzung	Wärmeintegration in andere Anlagen/Prozesse auf möglichst hohem Temperaturniveau	Betriebswirtschaftliche Einheit erleichtert Planung	Aufwand im Verhältnis zu Einsparungen
4. Außerbetriebliche Nutzung	Abwärmelieferung an außerbetriebliche Wärmesenken	Hohe Primärenergieeinsparungen möglich, Förderung der Wirtschaftlichkeit von Wärmenetzen	Zusätzliche Infrastruktur notwendig, Höhere Transportverluste, Aufwendige/begrenzte Abstimmung Entstehung/Bedarf
5. Energieumwandlung	Überführung in andere Nutzenergieformen (elektrische Energie, Kälte)	Keine wechselseitigen Abhängigkeiten, Minimierung der betriebseigenen Strombezugskosten	Vergleichsweise geringe Umwandlungseffizienz

Damit wird deutlich, dass eine externe Nutzung z.B. in Wärmenetzen erst in Betracht gezogen werden sollte, wenn Möglichkeiten zur Vermeidung bzw. internen Nutzung der anfallenden Abwärme ausgereizt sind.

Zum Abschluss dieses Kapitels soll kurz auf die Rückgewinnung von in der Industrie häufig ungenutzten Abwärmemengen aus Rauchgas und die damit verbundenen Herausforderungen (s. dazu auch Kapitel 6) eingegangen werden (LfU-Bayern 2008).

Hierbei wird ein Wärmeübertrager geeigneter Bauart, bspw. ein Gegenstrom-Rohrbündelwärmeübertrager[1] mit geeignetem Wärmeträgermedium (Kältemittel) im Sekundärkreislauf, zur Auskopplung der Abwärme zwischen Brennraum (Abgaserzeuger) und Kamin eingesetzt (vgl. Systemschaubild in Kapitel 6, Abbildung 37). Dabei muss bedacht werden, dass sich durch den Einbau des Wärmeübertragers ein zusätzlicher Druckverlust einstellt, der die Stromaufnahme der Abgasventilatoren erhöht. Bei Feststoffpartikeln und anderen Verunreinigungen im Abgasstrom (Ruß, Teer, Fette) sind ggf. Abscheideeinrichtungen oder (Staub-)Filter vorzusehen, da diese andernfalls zu Ablagerungen, Biofilmen usw. führen können (Hirzel et al. 2013). Wie zuvor bereits angesprochen, ist bei der Abkühlung weiterhin darauf zu achten, den Taupunkt korrosiv wirkender Säuren nicht zu unterschreiten[2] bzw. entsprechend korrosionsbeständige Materialien einzusetzen (LfU-Bayern 2008; Hirzel et al. 2013). U.U. werden die bei Austritt aus dem Kamin weiter abkühlenden, mit Wasserdampf gesättigten Rauchgase erneut leicht erwärmt, um Schwadenbildung zu verhindern.

Die auf die Abwärmeleistung bezogenen Investitionen für die (passive) Abwärmenutzung werden in (LfU-Bayern 2008) mit 70-450 €/kW (bezogen auf die Abgaswärmeleistung) beziffert, wobei keine Sekundäreinrichtungen (Umwälz- und Druckhaltungssysteme, Mess-/Steuer- und Regeleinrichtungen, Kosten für die Transportleitungen und Einbindung in Wärmenetz usw.) enthalten sind. Darüber hinaus fallen jährliche Betriebskosten an. Diese umfassen u.a. zusätzliche Brennstoff- bzw. Stromkosten, ggf. Kosten für die Abnahme der Abwärme (abhängig von den beteiligten Akteuren und der einzunehmenden Perspektive), Wartungs- und Instandhaltungskosten, Personalkosten sowie sonstige Kosten (Versicherung etc.).

[1] In Abhängigkeit der Übertragungsleistung sowie des Druck- und Temperaturniveaus werden ggf. andere Bauformen eingesetzt, vgl. dazu (Hirzel et al. 2013; SAENA 2016; Paar et al. 2013; Braasch et al. 2017).

[2] In (Hirzel et al. 2013) wird bspw. die minimale Abgastemperatur bei der Nutzung von Erdgas mit 120 °C beziffert. Für stark schwefelhaltige Öle oder (Braun-)Kohlen wird eine Größenordnung von 150-175 °C genannt, prozessbedingt höhere Anteile an Schwefel etc. führten u.U. zu höheren minimalen Abgastemperaturen.

2.2 Wärmeanwendungen im verarbeitenden Gewerbe

Die Untersuchung von Potenzialen außerbetrieblicher bzw. netzgebunden nutzbarer Abwärme im verarbeitenden Gewerbe konzentriert sich auf Produktionsprozesse, die eine Erwärmung von Materialien und Einsatzstoffen oder Trocknungs- und Reinigungsschritte auf einem Temperaturniveau von 80 °C bis über 1000 °C beinhalten, sowie die ggf. vorgelagerten Energieumwandlungsanlagen – im Wesentlichen Prozessdampferzeuger – an den Betriebsstandorten.[1]

Für die Priorisierung untersuchter Industriesektoren in den Praxisfallstudien und die Bewertung der aufbereiten Emissionsdaten zur Abschätzung theoretischer Abwärmepotenziale an einzelnen Standorten wurden übergeordnete Statistiken zum Endenergieeinsatz für Prozesswärme im verarbeitenden Gewerbe als Referenzdatengrundlage zusammengestellt. Nach (BMWi 2018) entfielen mit 1651 PJ im Referenzjahr 2012 rund zwei Drittel des gesamten Endenergieeinsatzes in der Industrie auf die Erzeugung von Prozesswärme. Als Endenergieträger für die Prozesswärmeerzeugung dominieren mit deutlichem Abstand Gasförmige Brennstoffe (Erdgas) und Kohle. Rund 9% des Prozesswärmeverbrauchs werden durch Fernwärmelieferungen gedeckt, 8% durch Stromeinsätze (Abbildung 2).

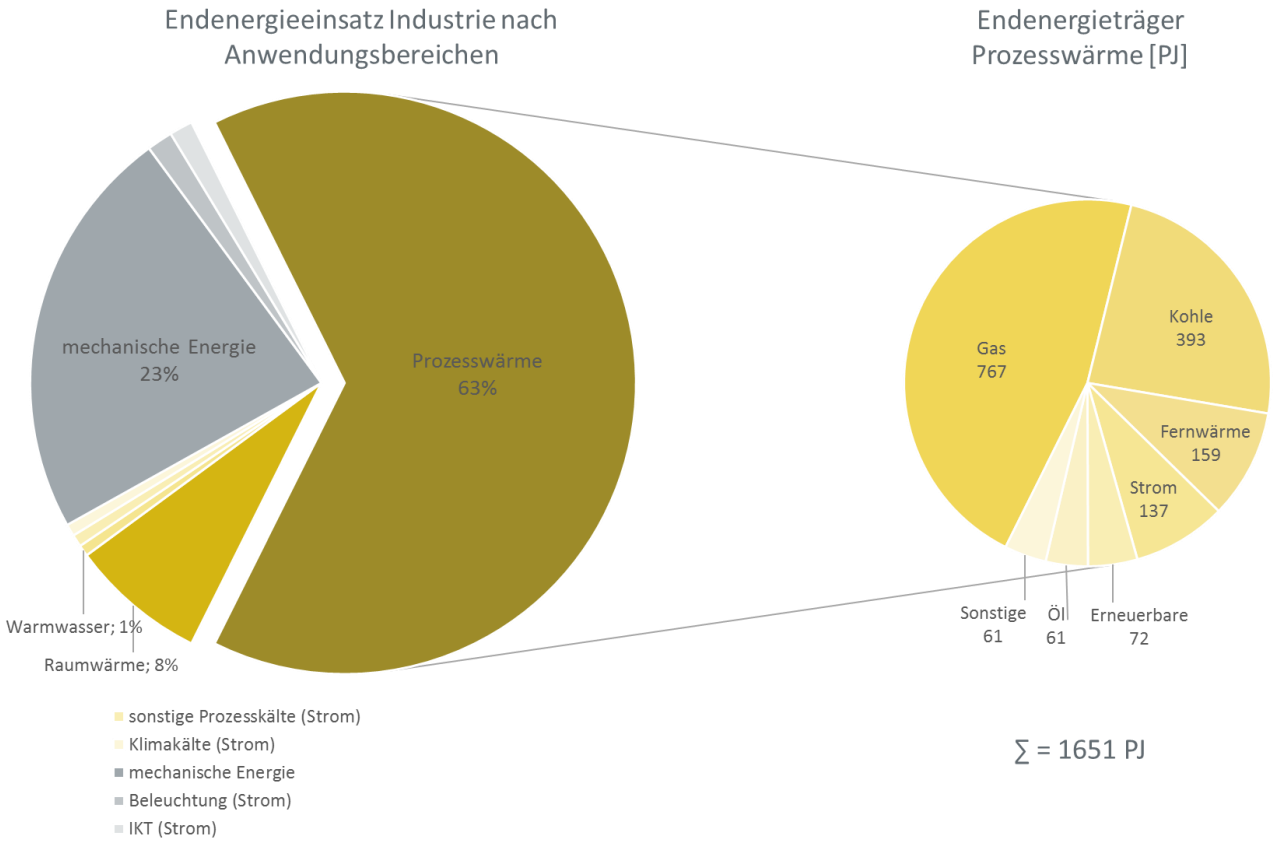


Abbildung 2: Endenergieeinsatz in der Industrie 2012 nach Anwendungsbereichen und Endenergieträgern, BMWi 2018.

[1] Eine Übersicht über die Prozessstruktur einzelner Branchen bieten u.a. [Groß, / Tänzer, 2010 und Schlomann, et al., 2013].

Für eine Priorisierung von Branchen hinsichtlich erwartbarer netzgebunden nutzbarer Abwärmepotenziale wurde eine branchenspezifische Zuordnung der Prozesswärmeanwendungen nach Menge des Endenergieeinsatzes und den Anteilen verschiedener Temperaturniveaus in der Gesamtheit der branchenspezifischen Produktionsprozesse durchgeführt. Eine geeignete Datengrundlage stellen die Anwendungsbilanzen für Prozesswärme im verarbeitenden Gewerbe dar, die im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) modellbasiert anhand von Produktionskennzahlen (statistisch) und prozessspezifischen Energieaufwänden (technisch) für nach energetischen Kriterien zusammengefasste Wirtschaftszweige des verarbeitenden Gewerbes ermittelt werden (Rohde 2017). Die gesamten Endenergieeinsätze für Prozesswärme wurden mit branchenspezifischen Anteilen verschiedener Temperaturniveaus nach (Eikmeier et al. 2005) verschnitten (Tabelle 2).

Tabelle 2: Aufgliederung des Endenergieeinsatzes für Prozesswärme nach Branchen des verarbeitenden Gewerbes und Temperaturniveaus der Produktionsprozesse. Eigene Darstellung nach (Rohde 2017; Eikmeier et al. 2005).

Wirtschaftszweig (WZ08/ NACE 2006)	**Anwendungsbilanz Prozesswärme 2014 nach** (Rohde 2017) **[PJ]**				**Anteile Temperaturniveaus, übertragen nach** (Eikmeier et al. 2005) **[PJ]**			
	Brennstoffe (inkl. Fernwärme)	Strom	Endenergie gesamt	Anteil WZ an Prozesswärme gesamt [%]	< 100°C	100 - 500°C	500 - 1.000°C	> 1.000°C
Eisen- und Stahlerzeugung (C24.1)	447,7	24,7	472,4	29%	2,6	8,0	93,8	368,1
Grundstoffchemie (C20.1)	312,9	44,8	357,7	22%	53,4	83,1	177,4	43,8
Verarbeitung v. Steinen und Erden (C23 ohne C23.1-C23.3)	158,3		158,3	10%	2,2	3,3	49,8	103,0
Papiergewerbe (C17)	150,2		150,2	9%	32,0	118,2	0,0	0,0
Ernährung und Tabak (C10, C11, C12)	125,1	8,7	133,8	8%	69,1	64,7	0,0	0,0
Sonstiges verarbeitendes Gewerbe (C13, C14, C15, C16, C18, C26, C27, C31, C32, C33)	76,3	8,5	84,8	5%	23,6	47,6	3,6	10,0
Nicht-Eisen-Metalle & Gießereien (C24.4, C24.5)	44,5	34,6	79,1	5%	0,4	1,3	15,7	61,6
Glas u. Keramik (C23.1, C23.2, C23.3)	63,7		63,7	4%	0,9	1,3	20,0	41,5
Sonst. chemische Industrie (C20, C21, ohne C 20.1)	57,7	0,2	57,9	3%	8,6	13,4	28,7	7,1
Metallbearbeitung (C24.2, C24.3, C25)	30,8	6,3	37,1	2%	11,4	9,0	4,9	11,7
Fahrzeugbau (C29, C30)	25,9	6,5	32,4	2%	10,3	7,8	3,7	10,6
Gummi- und Kunstoffwaren (C22)	16,9	2,4	19,3	1%	4,0	15,3	0,0	0,0
Maschinenbau (C28)	4,1	3,9	8	0%	2,5	1,9	0,9	2,6
Summe	1514,1	140,6	1654,7		220,9	375,1	398,7	660,0

Die Zusammenstellung verdeutlicht zum einen die ausgeprägte Bedeutung hochtemperierter Prozesse – rund zwei Drittel der Prozesswärmeanwendung ist einem Temperaturniveau von 500°C bis über 1000°C zuzuordnen – als auch die starke Konzentration von Prozesstemperaturen >1000 °C in der Metallerzeugung und –bearbeitung und der Verarbeitung von Steinen und Erden.

Bezogen auf das Volumen der Endenergieeinsätze treten insbesondere die Eisen- und Stahlerzeugung (C24.1) und die Herstellung von Zement und Branntkalk (C23.5) hervor. In der Erzeugung von Nichteisen-Metallen (Aluminium, Kupfer etc.) und in Gießereien (C24.4, C24.5) sind ebenfalls hohe Prozesswärmeanwendungen > 1000 °C zu verzeichnen. Mit einem Anteil von 40% am Endenergieeinsatz für Prozesswärme ist Strom in diesen Sektoren ein relevanter Endenergieträger. Hohe Temperaturniveaus werden ebenfalls bei der Herstellung von Glas und Keramik (C23.1, C23.2, C23.3) benötigt.

Während sich sehr hohe Temperaturniveaus in den Prozessen in den Sektoren C24 und C23 konzentrieren, nehmen in der chemischen Grundstoffindustrie (C20.1) als zweitgrößter Wirtschaftszweig bezogen auf die Endenergieeinsätze für Prozesswärme, Temperaturniveaus zwischen 500 °C und 1000 °C einen hohen Anteil ein. Bei der Herstellung von Papier und Pappe (C17) bewegen sich die Prozesstemperaturen vor allem zwischen 100 °C und 500 °C, in der Nahrungsmittelindustrie (C10) nehmen auch Prozesse unter 100° C einen Anteil von über 50% ein (Abbildung 3).

Unter den 23 untersuchten Sektoren des verarbeitenden Gewerbes (C10 bis C33, exkl. C19) treten deutlich die fünf energieintensiven Industrien Metallerzeugung und Bearbeitung (C24), Herstellung chemischer Erzeugnisse (C20), Verarbeitung von Steinen und Erden (C23), Herstellung von Papier und Pappe (C17) und Herstellung von Nahrungsmitteln (C10) hervor.[1] Diese fünf Sektoren wurden als Zielsektoren für die Praxisfallstudien in AP5 ausgewählt.

[1] Die Anteile der Getränkeherstellung (C11) und der Herstellung von Tabakwaren (C12) sind gegenüber der Nahrungsmittelherstellung (C10) in der zusammengefassten Darstellung in Tabelle 2 und Abbildung 3 vernachlässigbar (Eikmeier et al. 2005; Naegler et al. 2015; Groß & Tänzer 2010).

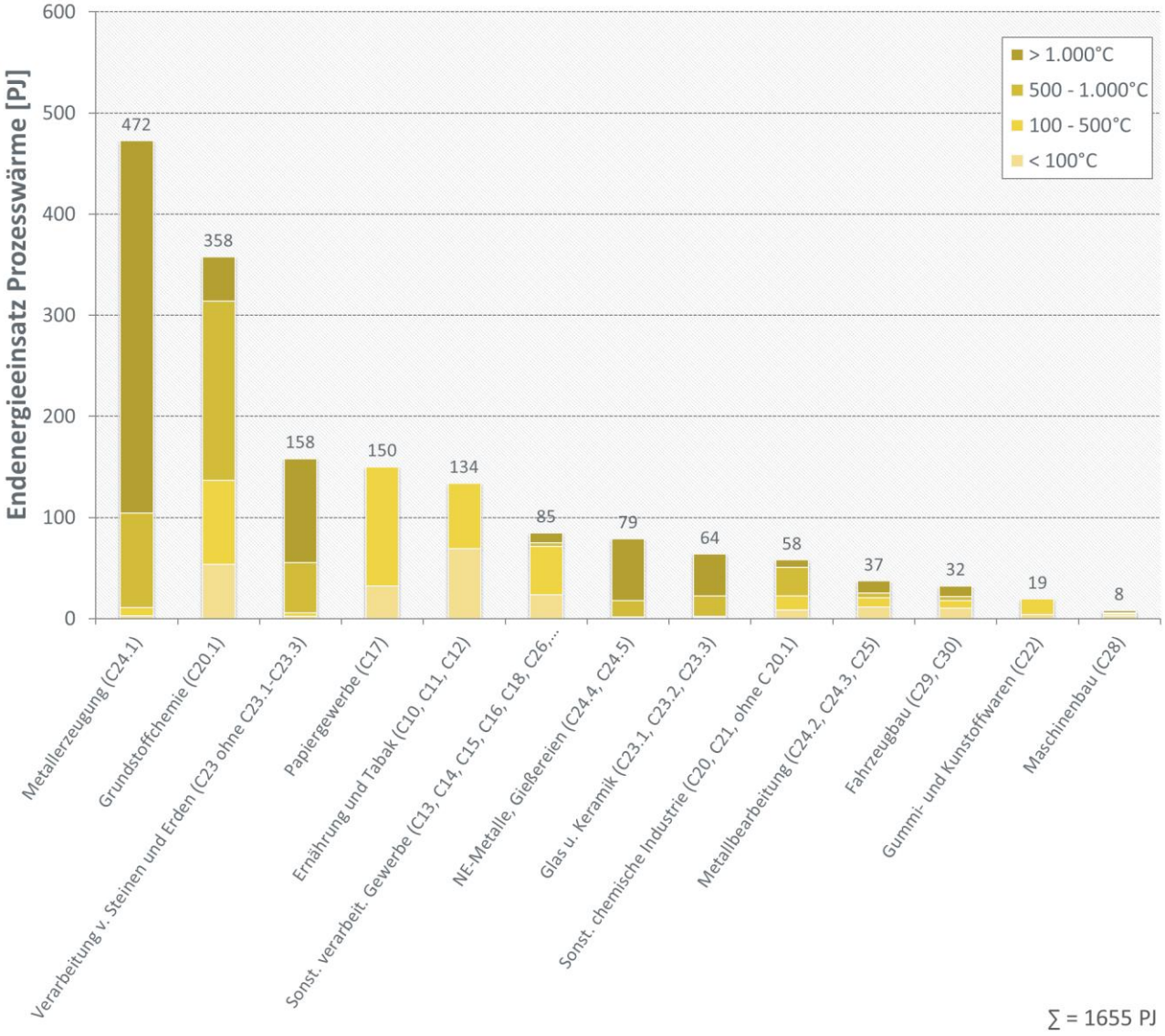


Abbildung 3: Endenergieeinsätze zur Prozesswärmeerzeugung nach Temperaturniveau in den Sektoren des verarbeitenden Gewerbes. Eigene Darstellung basierend auf: Anwendungsbilanzen Brennstoffe (inkl. Fernwärme) und Strom für Prozesswärme pro Sektor im Jahr 2014 nach (Rohde 2017), Anteile Temperaturniveaus Prozesswärme pro Sektor nach (Eikmeier et al. 2005).

2.3 Forschungsstand & Vernetzung

Im AGFW-Hauptbericht für das Jahr 2016 wird eine Einspeisung industrieller Abwärme in Höhe von 5,1 PJ bzw. rund 2% der gesamten erfassten Wärmenetzeinspeisung ausgewiesen (AGFW 2016). In Bezug zu den dargestellten Endenergieeinsätzen zur Prozesswärmeerzeugung im verarbeitenden Gewerbe werden damit rund 0,3% der eingesetzten Endenergie einer an die Produktionsprozesse angeschlossenen Wärmenetzeinspeisung zugeführt. Die Einspeisung von Abwärme in Wärmenetze verteilt sich nach eigenen Recherchen auf aktuell rund 30 Standorte des verarbeitenden Gewerbes in Deutschland (exkl. bilaterale Business-to-Business Lieferungen und Projekte in der Prüfungs- oder Planungsphase). Diese Größenordnungen zeigen auf, dass das theoretische Potenzial für eine externe, leitungsgebundene Nutzung bei Weitem noch nicht ausgeschöpft ist (vgl. (Maaß et al. 2015)).[1]

In Bezug auf die Abschätzung von Potenzialen der Abwärmenutzung bestehen zahlreiche Forschungsarbeiten mit unterschiedlichem Regionalbezug. (Pehnt et al. 2010) ermitteln im Rahmen einer Top-Down-Abschätzung anhand spezifischer Faktoren der verfügbaren Abwärmemengen bezogen auf den Primärenergieeinsatz in verschiedenen Sektoren des verarbeitenden Gewerbes, basierend auf Studien aus Norwegen, Österreich und den USA, theoretische Abwärmepotenziale in den Sektoren C10-C33 exkl. C19 in Deutschland von 316 PJ (88 TWh) auf einem Temperaturniveau von >140 °C und weiteren 160 PJ (44 TWh) zwischen 60 °C und 140 °C. Eine weitere Top-Down-Abschätzung von (Groß & Tänzer 2010) ermittelt ein theoretisches thermisches Abwärmepotenzial in Deutschland anhand temperaturabhängiger Sektor-spezifischer Abwärmenutzungsquoten von 1021 PJ (289 TWh) in ausgewählten Sparten der energieintensiven Industrie-Sektoren C10, C17, C20, C23 und C24 sowie im Bergbau C05, in Raffinerien und Kokereien C19 und der Holzverarbeitung C16.

(McKenna & Norman 2010; McKenna 2009) entwickeln ein Verfahren zur Abschätzung theoretischer Abwärmepotenziale untergliedert nach Temperaturniveas auf Ebene einzelner Industriestandorte primär anhand von CO_2-Emissionen aus nationalen Allokationsplänen Großbritanniens im Rahmen des Emissionshandels und Sektor- bzw. Technologie-spezifischen Umwandlungsfaktoren und identifizieren darüber im Gebiet des Vereinigten Königreichs ein Abwärmepotenzial von 86 PJ (24 TWh).

(Persson et al. 2014) führen eine Verortung theoretischer Abwärmemengen für die EU-27-Staaten basierend auf CO_2-Emissionen aus dem Europäischen Pollutant Release and Transfer Register durch. Über Sektor-Spezifische CO_2-Emissionsfaktoren zur Abschätzung des Primärenergieeinsatzes und nachgelagerte Sektor-spezifische pauschale Abwärmenutzungsquoten von 10%-25% wird ein Gesamtpotenzial von 566 PJ (157 TWh) industrieller Abwärme in Deutschland ausgewiesen. Davon werden 321 PJ (89 TWh) in strategischen „Heat Synergy Regions“ auf NUTS3-Ebene über einen Abgleich mit einer pro Einwohner modellierten Wärmenachfrage für eine außerbetriebliche Nutzung prä-klassifiziert.

Umfassende Zusammenstellungen und Vergleiche methodischer Ansätze zur Abschätzung von Abwärmepotenzialen, inkl. Fallstudien für einzelne Regionen, wurden u.a. von

[1] Angesichts zunehmenden Interesses der etablierten Fernwärmenetzbetreiber an alternativen Wärmequellen mit günstigen Primärenergiefaktoren und zum Ersatz bestehender fossiler Wärmeerzeuger wurde im AGFW ein Projektkreis Abwärme etabliert, der die betreffende Gesetzgebung aus Sicht der Fernwärmewirtschaft begleitet. Zur Vernetzung und Kommunikation der Forschungsergebnisse wurde seitens ifeu im Rahmen an einem Treffen des AGFW-PK-Abwärme teilgenommen und eine Beteiligung von AGFW-Vertretern an einem abschließenden Stakeholder-Workshop initiiert (7.2.2).

(Brückner et al. 2014a; b, Miró et al. 2015, 2016) durchgeführt. Eine Diskussion grundlegender technischer Optionen industrieller Abwärmenutzung bietet (Hirzel et al. 2013), eine ökonomische Analyse technischer Optionen bietet (Brückner et al. 2015).

Grundlegende Arbeiten zur Bewertung von Transformationsstrategien netzgebundener Wärmeversorgungsysteme wurden 2010-2012 durch die Projektpartner ifeu und GEF im Rahmen der TRAFO-Studie durchgeführt (Paar et al. 2013). Im Rahmen der Studie wurde die technisch-wirtschaftliche Kompatibilität einer netzgebundenen Nutzung industrieller Abwärme sowie einer Abwärmenutzung über Großwärmepumpen anhand eines Kriterienkatalogs im Abgleich mit anderen Wärmequellen bewertet und Umsetzungsbeispiele industrieller Abwärmenutzung analysiert. Eine Quantifizierung des Potenzials wurde methodisch in Form eines Bottom-Up-Ansatzes mit einem möglichst individuellen Wärmequellen-Wärmesenken-Abgleich verortet und im Rahmen der Studie nicht durchgeführt.

Arbeiten zur räumlichen Modellierung des Wärmebedarfs von Gebäuden und zur Abschätzung von Wärmenetzpotenzialen wurden für bundesweite Analysen auf Gemeindeebene von (Esch et al. 2011; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt et al. 2006) durchgeführt. Räumlich hochauflösendere, jedoch u.a. auf Grund fehlender Daten und teilweise begrenzter Automatisierbarkeit wurden von (Blesl et al. 2010, 2008; Blesl 2002) erarbeitet. Ein bundesweiter Wärmeatlas für 17,4 Mio. einzelne Wohngebäude wurde durch die Projektpartner GEF Ingenieur AG und Geomer GmbH im Jahr 2013 entwickelt (Richter et al. 2014). Die Datengrundlage wurde von ifeu um Baualtersverteilungen und Sanierungsszenarien im Wohngebäudebestand angereichert und zur GIS-Analyse von EE-Wärme und Wärmenetzpotenzialen angewandt (Jochum et al. 2017) (vgl. Kapitel 3.1.3).

(Waldhoff & Reckzügel 2014) analysieren verschiedene Ansätze und Datengrundlagen zur Abschätzung von Abwärmepotenzialen im Rahmen einer Strategie-Studie für den Landkreis Osnabrück. Zudem wird eine Übersicht der Struktur der Energieeinsätze, möglicher technischer Abwärmenutzungsoptionen für verschiedene Branchen durchgeführt und und das bestehende Abwärmepotenzial mittels eines Top-Down-Ansatzes auf 2,2-3,6 PJ im Landkreis Osnabrück geschätzt und kartographisch für verschiedene Industriestandorte nach Sektoren dargestellt. Aufbauend auf der Studie wurde im Rahmen des PInA-Projektes im Landkreis Osnabrück ein Abwärmekataster erstellt (Witte 2016).

Bezogen auf die Bottom-Up-Erhebung von Abwärmepotenzialen in Deutschland wurde von (Brückner 2016) ein umfassender Ansatz basierend auf den Daten der Emissionserklärungen nach der 11. BImSchV im Berichtsjahr 2008 entwickelt, der im Rahmen des Vorhabens für Aufbereitung theoretischer Abwärmepotenziale in einer Standort-Datenbank anhand der 11. BImschV-Daten des Berichtsjahres 2012 angewandt wurde (Kapitel 4.2.1).

(Forman et al. 2016) stellen ein Top-Down-Verfahren zur Abschätzung globaler Abwärmepotenziale anhand von Primärenergiestatistiken und Sektor-Spezifischer Umwandlungsfaktoren, untergliedert in die Sektoren Verkehr, Industrie, Privathaushalte, Gewerbe/Handel/Dienstleistungen und Stromerzeugung und Temperaturniveaus sowie der exergetischen Qualität („Carnot-Potenzial“) vor und ermitteln in der Industrie ein Gesamtpotenzial von 32 EJ (8,900 TWh) Abwärme, davon rund zwei Drittel im Temperaturbereich >300°C.

Auf Europäischer Ebene wurden in der Laufzeit des Vorhabens weitere Arbeiten zur Abschätzung von Abwärmepotenzialen und zur räumlichen Wärmebedarfsmodellierung durchgeführt. (Miró et al. 2018) entwickelt aufbauend auf (McKenna & Norman 2010) einen Sektor-spezifischen Ansatz zur Abschätzung von Energieeinsätzen und theoretischen Ab-

wärmepotenzialen für den Sektor Verarbeitung von Steinen und Erden (C23) in der gesamten EU anhand von CO_2-Emissionen. Die Arbeiten von Miró und McKenna wurden durch einen direkten Austausch mit der Universität Lleida und dem Karlsruher Institut für Technologie in die Entwicklung einer Standortdatenbank theoretischer Abwärmepotenziale im Zuge des Vorhabens aufgenommen (Kapitel 4.2.2).

Im Rahmen des EU-Projektes „HotMaps“ wurde ein EU-weiter Atlas des Bedarfs an Raumwärme, Brauchwarmwasser und Kälte im Gebäudebestand auf Ebene eines 100m-Rasters erstellt. Dabei wurde auf Einwohnerdichten und Siedlungsflächen als räumliche Datengrundlage zurückgegriffen, die mit pauschalen, auf nationaler Ebene und auf NUTS3-Ebene berechneten spezifischen Flächen [m²/Kopf] und Energiekennzahlen [kWh/m²] verschnitten wurden (Pezzutto et al. 2018). Zusätzlich wurden Arbeiten zur Verbesserung der Abschätzung Standort-spezifischer Abwärmemengen anhand von CO_2-Emissionen und ergänzenden Daten zu Produktionsmengen durchgeführt (Manz et al. 2018).

Weitere aktuelle Arbeiten zur Bottom-Up-Erhebung von Abwärmepotenzialen im verarbeitenden Gewerbe in Deutschland wurden im Rahmen des Verbundvorhabens „Erhebung, Abschätzung und Evaluierung von industrieller Abwärme in Deutschland - Potentiale und Forschungsbedarf“ (Laufzeit 01/2015 bis 06/2018, FKZ03ET1208) vom FraunhoferG Institut für Physikalische Messtechnik durchgeführt. Im Rahmen des Projektes wurden mehr als 7000 Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes schriftlich zu vorhandenen Abwärmepotenzialen befragt und ein Rücklauf von rund 600 Fragebögen erzielt. Mit dem Verbundpartner IZES GmbH wurde im Zuge des NENIA-Vorhabens ein Austausch initiiert und erste Erkenntnisse für die Erstellung der Unternehmensumfrage (Kapitel 0) verwendet. Die Ergebnisse des Vorhabens sind noch nicht publiziert.

Auf Länderebene wurden im Jahr 2017-2018 in Nordrhein-Westfalen im Auftrag des Landesumweltamtes durch die Hochschule Osnabrück Befragungen zu Abwärmepotenzialen in Industrieunternehmen durchgeführt und die Emissionserklärungen der 11. BImSchV als Datenquelle für eine (räumliche) Quantifizierung theoretischer Abwärmepotenziale ausgewertet. Die Ergebnisse des Vorhabens wurden durch einen Austausch mit der Hochschule Osnabrück in einer – erwartbar – vergleichbaren Größenordnung wie im NENIA-Potenzialmodell verortet. Auch vom Land Baden-Württemberg wurde im Jahr 2018 durch FraunhoferG Institut für System- und Innovationsforschung et al. eine Untersuchung der Abwärmepotenziale durchgeführt und Handlungsoptionen für die Landespolitik zur Aktivierung des Potenzials erarbeitet. Durch einen Austausch mit den zuständigen Landesstellen und den Projektbearbeitern wurden die Ansätze zur räumlichen Potenzialabschätzungen und Optionen zur Erstellung eines Abwärmekatasters aus den generierten Datensätzen eruiert (vgl. Kapitel 8.2.1).

Zur Kommunikation der Ergebnisse wurden von den Projektpartnern ifeu und GEF zwei Fachartikel veröffentlicht. In (Blömer et al. 2017) werden die methodischen Grundlagen des Wärmenetzmodells und die Ergebnisse einer Wärmenetz-Potenzialanalyse basierend auf den zu Projektbeginn bestehenden räumlichen Wärmebedarfsmodellen des Wohngebäudebestandes dargestellt. In (Hering et al. 2018) werden die Methodik und die Ergebnisse der Potenzialanalyse netzgebundener Abwärmenutzung in Deutschland beschrieben. Zusätzlich wurde durch ifeu und GEF eine umfassende Darstellung des Vorhabens auf dem Web-Portal „EnergiewendeBauen“ publiziert (Blömer & Hering 2018), eine Teilnahme an den Projektleitertreffen des Netzwerks EnergiewendeBauen und an Treffen des Forschungsnetzwerk Energiesystemanalyse organisiert.

3 GIS-Modell der Wärmebedarfsentwicklung im Wohn- und Nichtwohngebäudebestand

Ein zentrales Arbeitspaket im Vorhaben stellte die Entwicklung eines räumlich hochauflösenden Modells der Wärmebedarfsentwicklung im Gebäudebestand dar, das zur Bewertung der netzgebunden nutzbaren Abwärmemengen in der Potenzialanalyse (räumlicher Wärmequellen-/Wärmesenkenabgleich) genutzt werden sollte. Dafür wurde eine energetische Typisierung bundesweiter 3D-Gebäudemodelle (Wohn- und Nichtwohngebäude) der Landesvermessungsämter durchgeführt und ein Modell zur räumlich differenzierten Abbildung von Energiekennzahlen zum Nutzenergiebedarf für Raumwärme- und Warmwasser aus dem Gebäudesimulationsmodell GEMOD des ifeu entwickelt. Zur Verortung und Quantifizierung bestehender und potenzieller zusätzlicher Wärmeabsätze in Wärmenetzen wurde ein bundesweites Wärmenetzmodell auf Ebene eines 500m-Rasters entwickelt. Die Grundlagen und die durchgeführten Modellentwicklungsarbeiten werden im Folgenden beschrieben.

3.1 Grundlagen

3.1.1 Wärmebedarfsberechnung für Gebäudebestände

Ziel von Wärmebedarfsberechnungen ist es, den realen Wärmeverbrauch von Gebäuden möglichst genau zu erfassen und räumlich zu verorten. Der Wärmeverbrauch ist eine empirische Messgröße und reflektiert das individuelle Heizverhalten der Gebäudenutzer sowie in unbereinigter Form zwischenjährliche Schwankungen der Außentemperatur (Böhme & Hamacher 2013).

Wärmebedarfsberechnungen ermöglichen eine technische Abstraktion des erwartbaren Wärmeverbrauchs anhand energetischer Parameter von Gebäuden. Dafür werden im Energiebilanzverfahren nach der DIN 18599-2 oder der DIN 4108-6 die ein- und ausströmenden Wärmemengen um eine definierte Systemgrenze herum berechnet. Für eine Modellierung der Wärmenachfrage in Abhängigkeit von energetischen Sanierungsmaßnahmen an der Bausubstanz ist der Jahresbedarf an Heizwärme Q_h die Zielgröße. Zusätzlich ist für eine Bewertung von Wärmenetzpotenzialen eine Berechnung des Energiebedarfs zur Versorgung der Gebäude mit Brauchwarmwasser Q_w notwendig. Eine entsprechende Bilanzierung auf Ebene der Nutzenergie berücksichtigt keine Umwandlungsverluste durch Heizungsanlagen und ist damit für eine initiale Bewertung von Absatzpotenzialen in Wärmenetzen geeignet (Abbildung 4).

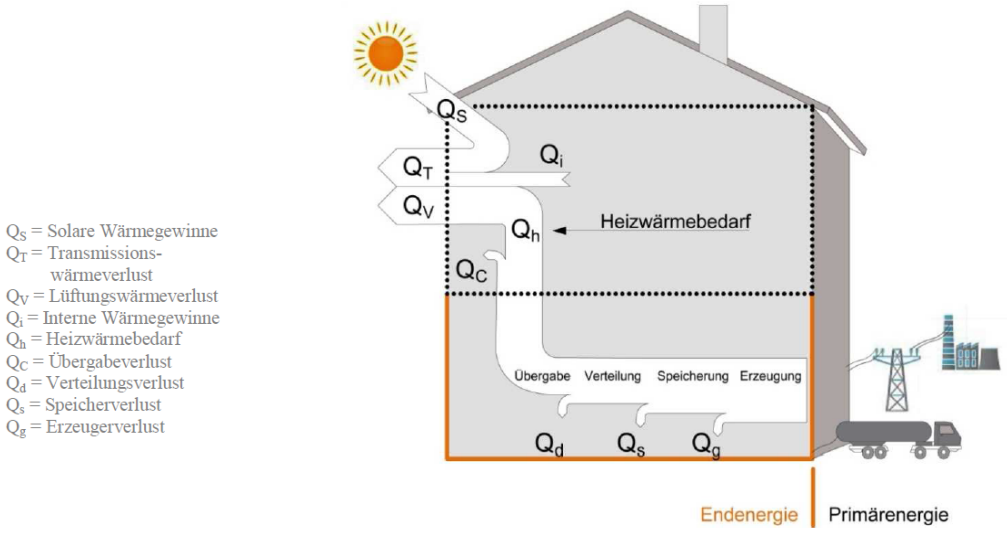


Abbildung 4: Energetische Bilanzgrenzen für die Wärmebedarfsberechnung von Gebäuden (Jochum et al. 2012).

Die Berechnung des Heizwärmebedarfs erfordert Informationen zur Geometrie der Bausubstanz, zu Größe und Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauteilen sowie zu standortabhängigen Außentemperaturverläufen. Zur Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs für größere Bestände, für die diese Daten nicht in ausreichender Granularität vorliegen, stellen energetische Gebäude- und Siedlungstypologien ein wichtiges Instrument dar, die vergleichbare energetischer Merkmale wie U-Werte, Bauteilflächen, Hüllfläche, beheiztes Volumen etc. mit allgemein verfügbaren Daten zur (statistischen) Beschreibung des Gebäudebestandes wie Nutzungsart, Größe und Baualter verknüpfen. Über einen kombinierten Top-Down-Bottom-Up-Ansatz können empirisch referenzierte und modellbasiert simulierte spezifische Energiekennzahlen zum Wärmebedarf [kWh/m²*a] über Datensätze zur Energiebezugsfläche hochskaliert werden.

Das Baualter spielt sowohl bei der Einteilung in Typgebäude anhand energetischer Charakteristika verschiedener bauhistorischer Epochen[1] als auch als zeitliche Referenz für die Modellierung von Sanierungsmaßnahmen mittels Austausch-intervallen von Bauteilen eine zentrale Rolle. Für räumliche Wärmebedarfsanalysen muss das Merkmal „Baualter“ in entsprechender Auflösung in der Datengrundlage zur Verfügung stehen.

Für die Modellierung auf Ebene von Einzelgebäuden liefert die deutsche Wohngebäudetypologie des Instituts für Wohnen und Umwelt eine wichtige Grundlage (Diefenbach 2013; IWU 2015a). Über die Einordnung in eine Matrix aus zehn Baualtersklassen und vier Größenklassen kann jedes Einzelgebäude im Wohngebäudebestand einem von 36 Basistypen mit typischen energetischen Kennwerten zugeordnet werden.

[1] Eine etablierte Einteilung von Baualtersklassen wurde im Rahmen der Entwicklung einer Gebäudetypologie des deutschen Wohngebäudebestandes durch das Institut Wohnen und Umwelt erarbeitet (Loga et al. 2011, 2012). Diese Abgrenzung wird als Grundlage der Simulationen des Wärmebedarfs in GEMOD Eine Darstellung der Baualtersklassenabgrenzung findet sich in Anhang 1.

Aufgrund fehlender statistischer bzw. empirischer Daten und einer deutlich heterogenen Wärmeverbrauchsstruktur durch vielfältige Nutzungsformen existiert bisher kein einheitlicher Ansatz zur Einteilung des deutschen Nichtwohngebäudebestandes in eine energetische Gebäudetypologie (Dirlich et al. 2011; Deilmann et al. 2013; Schlomann et al. 2015).[1]

3.1.2 Gebäudemodell GEMOD

Zur Skalierung der Auswirkungen technischer Dämmrestriktionen auf die langfristige Wärmebedarfsentwicklung im gesamten deutschen Gebäudebestand (Wohn- und Nichtwohngebäude) wurde von ifeu in Kooperation mit der Beuth Hochschule Berlin mit dem GEMOD ein umfassendes Gebäudesimulationsmodell entwickelt (Jochum et al. 2015).

Das GEMOD ermöglicht im Kern eine Bauteil-basierte, an den offiziellen Normen zur Wärmebedarfsberechnung (Monatsbilanzverfahren nach DIN 4108-6) orientierte Simulation der Wärmebedarfsentwicklung für beliebig definierbare Gebäudegeometrien und energetische Ausgangsparameter (Wärmedurchgangskoeffizienten einzelner Bauteile, Luftwechselraten, innere Gewinne, solare Einstrahlung, Norminnen- und Außentemperatur etc.).

Der deutsche Wohngebäudebestand ist auf Grundlage empirischer Daten und Auswertungen von (IWU 2015a; Diefenbach 2013) in Form der vier Basistypen Ein- und Zweifamilienhaus (EFH), Reihenhaus (RH), Mehrfamilienhaus (MFH) und Großes Mehrfamilienhaus (GMH) erfasst. Der Nichtwohngebäudebestand wird in Hinblick auf Anzahl, Geometrie und energetische Parameter der Bausubstanz bisher nicht umfassend in Statistiken abgebildet. Im GEMOD wurde deshalb eine Meta-Typologie von 14 Nichtwohnnutzungen u.a. basierend auf (Dirlich et al. 2011; Deilmann et al. 2013; Schlomann et al. 2015) etabliert (vgl. Tabelle 3).

Die 18 energetischen Gebäudetypen zur Beschreibung des beheizten Gebäudebestandes in Deutschland sind mit einem Mengengerüst (Anzahl und energetische Nutzfläche bzw. Größe einzelner Bauteile [m²]) auf das Basisjahr 2011 kalibriert. Das Mengengerüst kann für beliebige Zeitpunkte nach Neubau- und Abrissraten fortgeschrieben werden. Die Austauschraten einzelner Bauteile werden über Weibull-Verteilungen als Abstraktion von Sanierungs- bzw. Lebenszyklen im Bestand simuliert. Dabei werden verschiedene Kombinationen von Sanierungsständen (Tiefe der Sanierung und Interdependenzen zwischen energetischen Modernisierungsmaßnahmen und Investitionsentscheidungen der Gebäudeeigentümer) berücksichtigt

Die Funktionsweise der Bottom-Up-Simulation in GEMOD ist schematisch in Abbildung 5 dargestellt. Eine Übersicht über das hinterlegte Mengengerüst im Jahr 2016, das zur Kalibrierung des räumlichen Gebäudemodells herangezogen wurde, ist in Tabelle 3 dargestellt.

[1] Im laufenden EnOB-Forschungsprojekt DataNWG (FKZ 03ET1315A,B und C, Laufzeit: 12/2015 – 05/2019) werden erstmals umfassende Primärdaten zur energetischen Charakterisierung des Nichtwohngebäudebestandes in Deutschland erhoben, die u.a. in detailliertere Typologie-Ansätze überführt werden könnten. Bisher stehen noch keine detaillierten Ergebnisse aus diesem Projekt zur Verfügung.

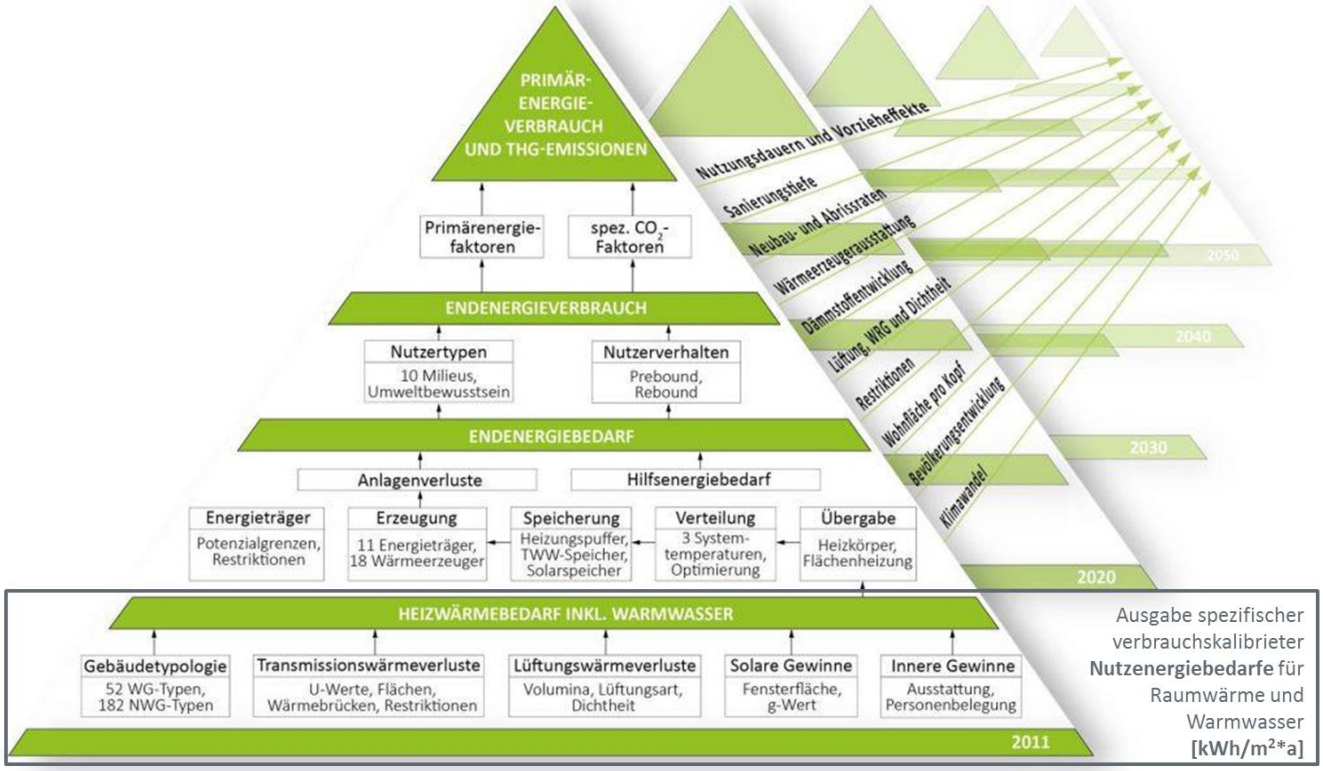


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Bottom-Up-Simulation in GEMOD.

Tabelle 3:Energetische Gebäudetypologie und Mengengerüst in GEMOD im Jahr 2016.

		Werte GEMOD 2016			GEMOD-intern weiter differenziert nach Baualtersklassen	
	Energetischer Gebäudetyp	**Anzahl**	**Energetische Nutzfläche A_N [m²]**	**Nutzenergie RW & WW [GWh]**		
Wohn-gebäude	EFH	10,130,190	1,825,499,917	181,864	A	Bis 1859
	RH	5,217,787	793,408,985	62,214	B	1860-1918
	MFH	3,073,472	1,411,636,860	146,763	C	1919-1948
	GMH	229,450	369,286,154	33,885	D	1949-1957
Nichtwohn-gebäude	Baugewerbe	423,392	112,084,021	3,433	E	1958-1968
	Sport	119,882	63,719,472	8,267	F	1969-1978
	Beherbergung_Gasts._Heime	445,510	274,572,996	38,755	G	1979-1983
	Bildung	116,729	180,731,593	20,929	H	1984-1994
	Büroähnliche_Betriebe	723,852	366,097,329	43,607	I	1995-2001
	Handel	512,455	282,103,479	25,052	J	2002-2011
	Industrie	515,174	808,121,984	55,340	K	2012-2020
	Herstellungsbetriebe	210,643	99,634,083	3,349	L	2021-2035
	Krankenhäuser	17,905	61,402,400	10,659	M	2036-2050
	Kultur	87,602	81,097,509	12,475		
	Landwirtschaft	314,911	293,729,796	15,100		
	Nahrungsmittelgewerbe	14,745	8,109,751	230		
	Textil_Bekleidung_Spedition	198,004	85,731,653	2,844		
	Wäschereien	6,319	1,158,536	51		
	Summe	22,358,021	7,118,126,518	664,815		

3.1.3 Forschungsstand zur räumlichen Erfassung des energetisch relevanten Gebäudebestandes

Die systematische räumliche Erfassung des energetisch relevanten Gebäudebestandes wurde in den letzten Jahren maßgeblich durch Forschungsarbeiten zu zukünftigen Fernwärmepotenzialen vorangetrieben. Ein zentrales Forschungsprojekt stellt in diesem Kontext die Entwicklung eines Verfahrens zur automatischen Erstellung einer digitalen Wärmebedarfskarte aus Laserscanning-Befliegungen und Thermographiebildern dar, das jedoch – u.a. auf Grund der aufwendigen Datenerhebung über Befliegungen – auf eine kleinräumige Anwendung beschränkt blieb (Blesl et al. 2010). Weitere regionale bzw. lokale Ansätze wurden u.a. im Rahmen der Projekte GEWISS und SimStadt entwickelt.[1] Auch einzelne Bundesländer stellen Online-Karten zum Wärmebedarf von Gebäuden zur Verfügung, diese unterscheiden sich jedoch in Hinblick auf die räumliche Aggregationseinheit, die verwendeten Ausgangsdaten und angewandten Berechnungsverfahren (vgl. Kapitel 8.1.2).

Arbeiten zur bundesweiten räumlichen Analyse des Wärmebedarfs wurden u.a. von [Esch, et al., 2011 und Fischedick, et al., 2007] durchgeführt. Kennzahlen zur Beschreibung des energetisch relevanten Gebäudebestandes wurden hier auf Gemeindeebene abgebildet. Der Abgleich von Wärmequellen und Wärmesenken unter technisch-wirtschaftlichen Kriterien für netzgebundene Nutzungskonzepte erfordert indes räumlich höher aufgelöste Modelle, die eine Zuordnung von Wärmebedarfen zu einzelnen Gebäuden oder abstrahierten Versorgungsgebieten (Baublöcke, Rasterzellen bis 1000m Kantenlänge) ermöglichen.

Seit 2012 stehen mit den Hauskoordinaten und Hausumringen der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) offizielle bundesweite Geodatenprodukte zur Verortung der Mittelpunkte (Hauskoordinaten) bzw. Grundflächen (Hausumringe) einzelner Gebäude zur Verfügung zur Verfügung. Basierend auf den Hausumringen wurde durch die Projektpartner GEF Ingenieur AG und Geomer GmbH im Jahr 2013 ein bundesweiter Wärmebedarfsatlas mit 17,4 Mio. energetisch typisierten Einzelgebäuden erstellt (Richter et al. 2014). Die Datengrundlage des Wärmeatlas 1.0 erlaubt die Zuordnung einer Energiebezugsfläche zu einzelnen Gebäudegrundflächen und eine Einteilung in fünf grundlegende Wohngebäudetypen, angelehnt an die deutsche Wohngebäudetypologie nach (IWU 2015a).[2] Daten zum Baualter der Gebäude oder zur weiteren energetischen Typisierung von Nichtwohngebäuden sind nicht enthalten.

Zur Ableitung langfristiger technisch-wirtschaftlicher Potenziale von Wärmenetzinfrastrukturen sowie von Erdwärmesonden-Wärmepumpen und hydrothermaler Tiefengeothermie im Bundesgebiet wurden die Daten aus dem Wärmeatlas 1.0 mit Daten zum Baualter des Wohngebäudebestandes auf Gemeindeebene aus der Gebäude- und Wohnungszählung 2011 zusammengeführt und mit der Wärmebedarfsberechnung für Wohngebäude in GEMOD gekoppelt (Jochum et al. 2017; Blömer et al. 2017). Dieser erweiterte Wärmeatlas ermöglicht eine räumliche Abbildung des Status-Quo und der Entwicklung des Nutzwärmebedarfs bis 2050 im Wohngebäudebestand auf Baublock-Ebene unter Berücksichtigung des Baualters auf Gemeindeebene und der Wohnflächenentwicklung auf Kreisebene.

[1] http://gewiss.haw-hamburg.de/; http://www.simstadt.eu/de/index.jsp (Zugriff: 13.09.2018).

[2] Die Klassifikation von Geodaten zum Gebäudebestand, sprich die Anreicherung primär geometrischer Geodaten (Grundfläche, ggf. Aufriss in Form von 3D-Geometrien) mit energetisch relevanten Attributen (z.B. Wohn-/Nichtwohnnutzung, Bauweise, Baualter oder Anzahl Wohnungen) zur Einordnung der Daten in das Schema einer energetischen Gebäudetypologie bildet den methodischen Kern hochauflösender GIS-Modelle zum Wärmebedarf. Eine Übersicht über verfügbare Datensätze und zum Forschungsstand von Klassifikationsverfahren findet sich in (Blömer 2015).

Bestehende Lücken dieses GIS-Modells sind die fehlende Wärmebedarfsentwicklung von Nichtwohngebäuden, die weiterhin grobe Zuordnung der Energiebezugsfläche ohne Informationen zum Aufriss einzelner Gebäude und die fehlenden Informationen zum Baualter auf Ebene einzelner Gebäude. Diese Defizite sollten im Rahmen des Projektes durch die Aufbereitung und –anreicherung einer neuen Datengrundlage geschlossen werden.

3.1.4 Datengrundlage & Methodik

Als Ziele des Vorhabens wurden drei grundlegende Punkte zur Erweiterung/Verbesserung der Datengrundlage der räumlichen Wärmebedarfsmodellierung, die von den Projektpartnern Geomer GmbH und GEF Ingenieur AG in Form des Produkts „Wärmeatlas der Bundesrepublik Deutschland (WAD)“ (Richter et al. 2014) im Jahr 2013 erarbeitet wurde, definiert:

1. Integration des Merkmals Baualter in die räumliche Datengrundlage,
2. Integration von Nichtwohngebäuden in die räumliche Datengrundlage,
3. Abschätzung Energiebezugsflächen verbessern.

In Erweiterung der ursprünglichen Vorhabensbeschreibung wurden dafür zu Beginn des Vorhabens neue Gebäudedatensätze durch die Geomer akquiriert und aufbereitet.

Seit dem Jahr 2015 stehen die 3D-Gebäudemodelle im Level-of-Detail 1 mit einer kubischen Repräsentation der Gebäudehülle als bundesweites Kosten- und Lizenzpflichtiges Datenprodukt zur Verfügung (LoD1_DE) (Wandinger 2018). Diese ermöglichen die Integration des Merkmals „Aufriss“ bzw. „Höhe“ einzelner Gebäude in die räumliche Datengrundlage und damit eine detailliertere Berücksichtigung der Gebäudegröße, u.a. in Form der Energiebezugsfläche, bei der Modellierung des Wärmebedarfs. Die Geometrie eines Gebäudes bzw. eines Gebäudeteils wird durch Polygone für Grundfläche, Dachfläche und Seitenwände dargestellt. Die Dachform als solche wird nicht abgebildet, die Dächer werden für alle Dach- und Giebelformen als flaches Polygon repräsentiert. Der in den Quelldaten angegebene Bezugspunkt des Daches, der für die Gebäudehöhe maßgeblich ist, ist in den Bundesländern unterschiedlich festgelegt (Tabelle 4).

Tabelle 4: Bezugspunkte der Gebäudehöhenangabe in den LoD1_DE-Daten.

Bundesland	**Bezugspunkt Dach**
Schleswig-Holstein	Median
Hamburg	Arithmetisches Mittel
Niedersachsen	Mittelwert
Bremen	Median
Nordrhein-Westfalen	Median
Hessen	Mittelwert
Rheinland-Pfalz	**TRAUFE**
Baden-Württemberg	**FIRST**
Bayern	Median
Saarland	**TRAUFE**
Berlin	Median
Brandenburg	**GEMISCHT (First, Traufe, Default-Wert)**
Mecklenburg-Vorpommern	Median
Sachsen	Median
Sachsen-Anhalt	Median
Thüringen	**TRAUFE**

Zusätzlich sollen die Daten des LoD1_DE Angaben zur semantischen Beschreibung der Art/Nutzung einzelner Gebäude aufbauend auf dem Objektschlüsselkatalog der amtlichen Liegenschaftskataster (OSKA) enthalten, die eine weiterführende Differenzierung zwischen energetischen Nichtwohngebäudetypen ermöglichen. Im Rahmen des Projektes wurde das Produkt LoD1_DE Stand September 2016 aufbereitet, das die im Bezugssystem ETRS89/UTM, Zone 32 oder 33 georeferenzierten Grundflächen und Aufrisse bis zum Median der Gebäudehöhe von bundesweit 53 Mio. Einzelgebäuden im City-GML-Format enthält.[1]

Weitere Datensätze zur Zuordnung von Nutzungsarten zu einzelnen Gebäudegrundflächen wurden mit Auszügen aus der frei verfügbaren OpenStreetMap-Datenbank und den BEAM-Landnutzungsdaten einbezogen.[2]

Daten zum Baualter von Gebäuden liegen seitens des statistischen Bundesamtes als Ergebnis der Gebäude- und Wohnungszählung im Jahr 2011 nur für Wohngebäude flächendeckend vor. Diese können auf Grund von Datenschutzbestimmungen nicht auf Ebene einzelner Gebäude bzw. nur in aggregierter Form über mindestens drei Gebäude bezogen werden, um keine Rückschlüsse auf Einzelobjekte zu ermöglichen. Aus diesem Grund muss bei der Nutzung der Daten zwischen der räumlichen Ausdehnung der Aggregationsebene und der Verknüpfung mehrerer Merkmale (z.B. Aufgliederung nach Gebäudetyp Ein- und Zweifamilienhaus, Reihenhaus etc. und Baualtersklasse) abgewogen werden. Um eine möglichst kleinräumige Datenebene für die Integration des Merkmals „Baualter“ zu erreichen, wurden im Rahmen des Projektes die Anteile von Baualtersklassen über alle Wohngebäude-Typen (Ein- und Zweifamilienhaus, Reihenhaus, Mehrfamilienhaus, großes Mehrfamilienhaus) auf

[1] Die Nutzung der Daten unterliegt den Lizenzbestimmungen und der Gebührenverordnung der AdV (AdV 2018).

[2] Der BEAM-Datensatz stellt eine Abschätzung von Vermögenswerten pro Flächeneinheit [EUR/m²] für unterschiedliche Flächennutzungsarten dar. Als Ausgangsdaten wurden CORINE-Landcover-Daten, Daten des Urban Atlas der EU sowie Eurostat-Daten verwendet.

einem bundesweiten Hektar-Raster bezogen. Dabei konnte a priori eine Einteilung der Baualtersklassen in der Datengrundlage nach energetischen Kriterien in Anlehnung an die Deutsche Wohngebäudetypologie bzw. die Gebäudetypologie des GEMOD vorgenommen werden.

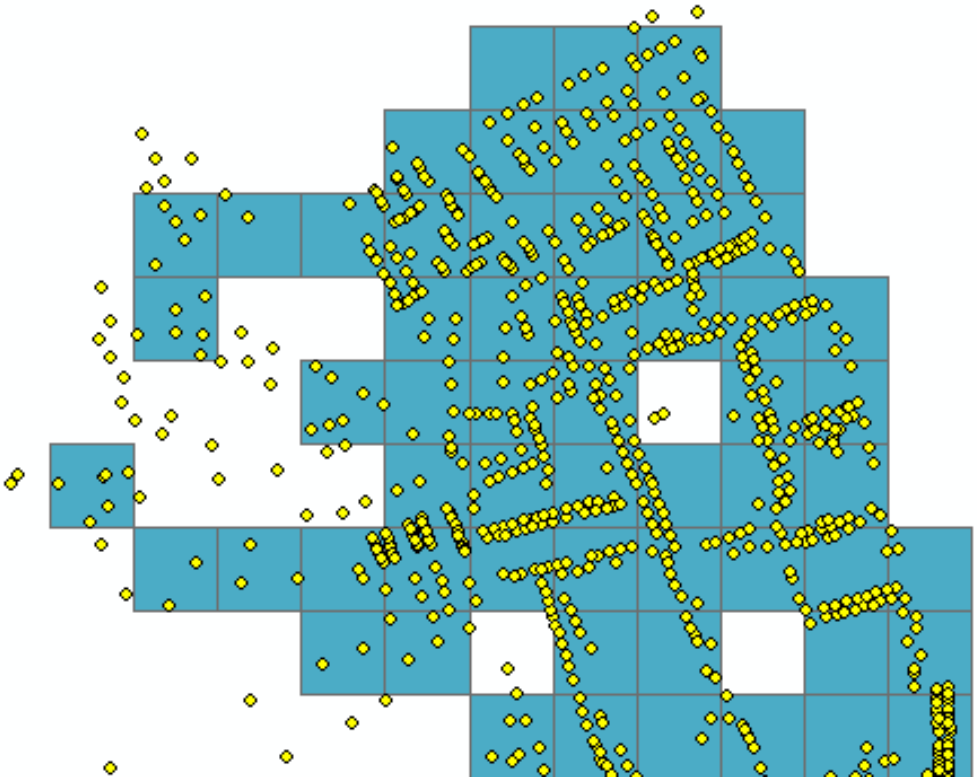


Abbildung 6: Beispiel der Überlagerung von Gebäudedaten (gelbe Punkte) und Hektarrasterinformationen aus dem Zensus. Datenpunkte außerhalb von Rasterzellen repräsentieren Nichtwohngebäude oder Wohngebäude bei n < 4.

Für die Aufbereitung und Anreicherung der Datengrundlagen wurden folgende Ziele definiert:

- Zuordnung einzelner Gebäudegeometrien zu energetischen Wohn- und Nichtwohngebäudetypen
- Anwendung eines einheitlichen Katalogs an Objektnutzungsschlüssel für die Abgrenzung der Gebäudenutzung nach energetischen Kriterien in Anlehnung an die Gebäudetypologie des GEMOD
- Klare Abgrenzung zwischen Wohn- und Nichtwohnnutzung
- Geometrische Auflösung einzelner Gebäude nach den gültigen Berechnungsvorschriften der Energieeinsparverordnung 2014[1]:

Parameter	Einheit	Definition
Brutto-Gebäudevolumen V_b	[m³]	Bilanzgrenze äußere thermische Gebäudehülle inkl. der Bausubstanz.
Beheiztes Netto-Gebäudevolumen V_e	[m³]	Bilanzgrenze temperierte Luftmenge innerhalb der thermischen Gebäudehülle exkl. der Bausubstanz.
energetische Nutzfläche A_N	[m²]	Abgeleitet vom beheizten Netto Gebäudevolumen für Gebäude mit einer Geschosshöhe 2,5 m < h_G < 3,0 m entsprechend $$A_N = 0{,}32\, m^{-1} * V_e\ [m^3]$$ Und für Gebäude mit einer Geschosshöhe h_G < 2,5 m oder h_G > 3 m entsprechend $$A_N = \left(\frac{1}{h_G} - 0{,}04\, m^{-1}\right) * V_e\ [m^3]$$

- Kalibrierung des GIS-Gebäudemodells auf korrekte Wiedergabe von Szenarien der Nutzenergieentwicklung auf Bundesebene aus dem GEMOD als Referenz.

[1] Gemäß DIN 4108-6 (DIN 2003).

3.2 GIS-Modellierung des Gebäudebestandes

Die Aufbereitung der Ausgangsdaten erfolgte im Vorhaben NENIA stufenweise zunächst über eine Ergänzung bzw. Korrektur der Objektnutzungsschlüssel anhand von Sekundärdaten, einer Aufgliederung der Gebäudegeometrien in energetisch relevante Flächen- und Volumenparameter und einer baustrukturellen Typisierung des Wohngebäudebestandes nach Größe und Bauweise. Anschließend erfolgte eine Kategorisierung der Objektnutzungsschlüssel nach energetischen Kriterien als Schlüssel zur Gebäudetypologie des GEMOD und eine Kalibrierung der Anzahl, der kumulierten Energiebezugsfläche und der berechneten Nutzenergiebilanz pro Gebäudetyp zur konsistenten räumlichen Abbildung des gewählten Wärmebedarfsszenarios.

Die Arbeitsschritte zur Aufbereitung der Ausgangsdaten und zur Kalibrierung des GIS-Modells des Gebäudebestandes sind nachfolgend schematisch dargestellt (Abbildung 7).

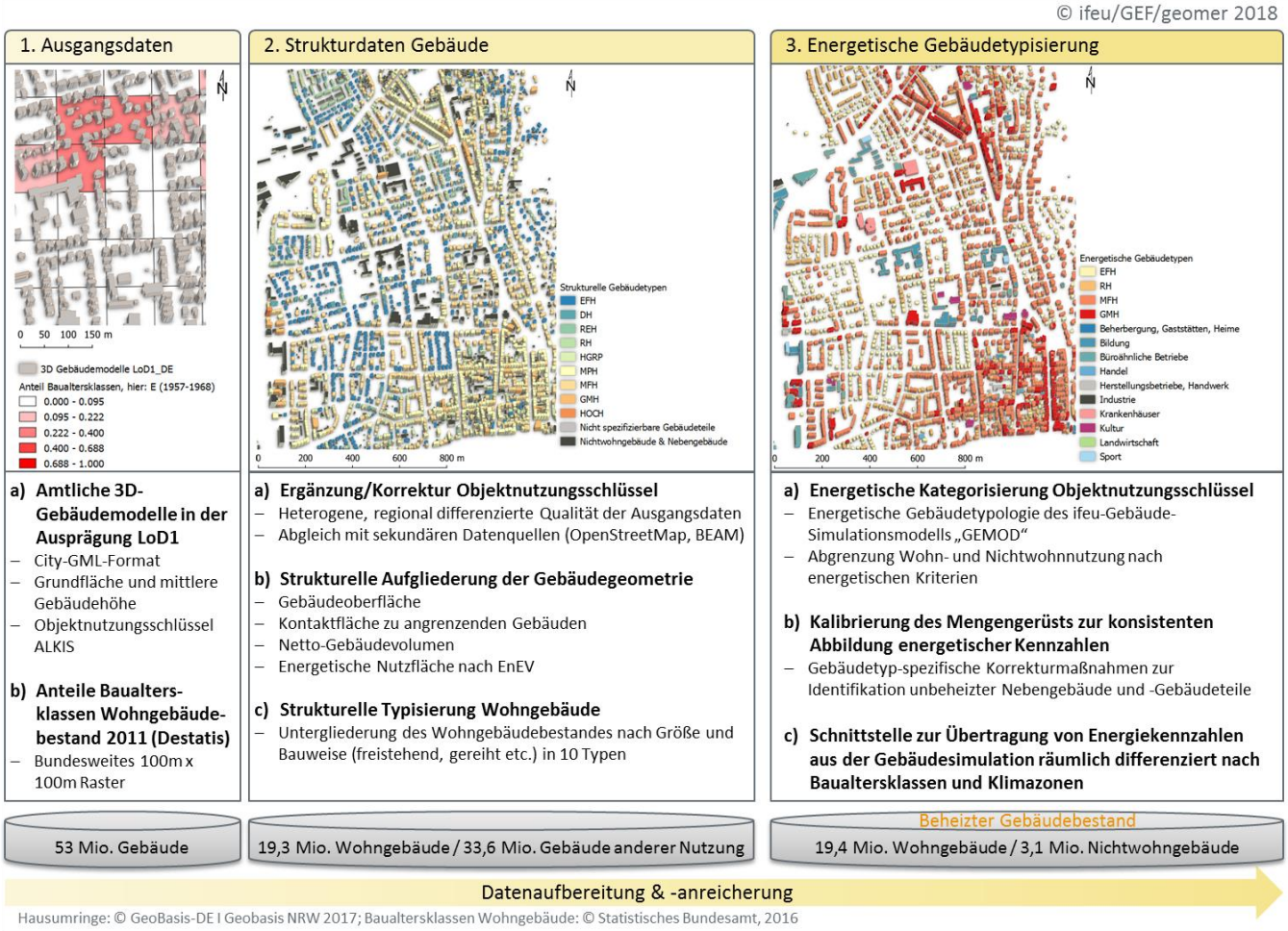


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Datenaufbereitung und -anreicherung bei der Entwicklung eines bundesweiten GIS-Modells zur räumlichen Abbildung der Entwicklung des Nutzwärmebedarfs auf Ebene einzelner energetisch typisierter Wohn- und Nichtwohngebäude.

3.2.1 Bewertung und Aufbereitung der Ausgangsdaten

Die Gebäudegeometrien sind in ihrem Ursprung ein Produkt der Vermessungsverwaltungen der Bundesländer. Diese werden von der AdV zwar zusammengeführt und bereitgestellt, aber nicht homogenisiert. Das führt dazu, dass der Datenbestand in Bezug auf Vollständigkeit und Qualität pro Bundesland und auch innerhalb der Vermessungsbezirke stark variiert. Dies betrifft vor allem die Gebäudehöhen und die hinterlegten Objektnutzungsschlüssel (ALKIS-Schlüssel) zur Kategorisierung der Gebäudefunktion bzw. -nutzung. Beides sind wichtige, den Wärmebedarf maßgeblich beeinflussende Kenngrößen.

A) Gebäudehöhen

Die Gebäudehöhen werden zwar als Attribut in den Daten geführt, allerdings unterscheidet sich der Bezugspunkt in den Bundesländern (vgl. Tabelle 4). Darüber hinaus sind zahlreiche unplausible Gebäudehöhen in den Daten enthalten. Um diese Höhenangaben zu verbessern, mussten daher für jedes Bundesland Korrekturverfahren entwickelt werden. Die Gebäudehöhe fließt dann zusammen mit der Baualtersklassenwahrscheinlichkeit in die Berechnung der Stockwerksanzahl ein.

B) Gebäudefunktion

Auch und gerade das Attribut Gebäudefunktion der LoD1-Daten unterliegt einer deutlichen bundesland-spezifischen Heterogenität, so ist beispielsweise in Sachsen nahezu keine verwertbare Information zur Gebäudefunktion vorhanden. Sogar innerhalb der Bundesländer ist eine Heterogenität zu beobachten. Das erschwert natürlich deren Einsatz für einheitliche Analysen hinsichtlich des Wärmebedarfs erheblich. Daher wurden zunächst die Daten der Bundeländer einer qualitativen Einschätzung hinsichtlich dieses Attributs unterzogen (Tabelle 5). Die Kriterien dieser Einschätzung beziehen sich dabei hauptsächlich auf den Anwendungszweck einer Abgrenzung von Gebäudetypen nach energetischen Kriterien.

Tabelle 5: Bewertung der Datenqualität für das Attribut Gebäudefunktion in den LoD1-Daten

Bundesland	Qualität	Bewertung
Schleswig-Holstein	+	Grundsätzliche gute Qualität, jedoch 11% undefiniert
Hamburg	++	Grundsätzliche gute Qualität
Niedersachsen	+	Grundsätzliche gute Qualität, Gewerbe nicht ausdifferenziert
Bremen	--	Keine Gebäudefunktion vorhanden
Nordrhein-Westfalen	o	z.T. Landkreise mit allgemeinen Schlüsseln („Gebäude allgemein“)
Hessen	o	Wenig differenziert, Gebäude auf Wohngrundstück alle Wohnhaus
Rheinland-Pfalz	++	Grundsätzliche gute Qualität
Baden-Württemberg	++	Grundsätzliche gute Qualität
Bayern	+	Grundsätzliche gute Qualität, Gewerbe nicht differenziert, 4,3% undefiniert
Saarland	++	Grundsätzliche gute Qualität
Berlin	++	Grundsätzliche gute Qualität
Brandenburg	+	Grundsätzliche gute Qualität, jedoch 7% undefiniert

Mecklenburg-Vorpommern	+	Grundsätzliche gute Qualität, hoher Anteil Ferienhaus
Sachsen	--	96,7% undefinierte Nutzung
Sachsen-Anhalt	-	Nutzungen beziehen sich meist auf die Grundstücksfläche
Thüringen	-	43% undefinierte Nutzung (38% Wohnen, 12% Gewerbe)

Um diese Informationen zumindest teilweise zu verbessern, wurden andere, frei zugängliche zugängliche Quellen herangezogen, darunter Zensus, OpenStreetMap, BEAM[1]. Die Anreicherung der Daten erfolgte auf Ebene einzelner Objekte über einen ordinal gestuften Abgleich der Datenqualität verschiedener Quellen und des Detaillierungsgrades der Objektnutzung. Dadurch konnten die in den Ausgangsdaten LoD1_DE hinterlegten Nutzungsschlüssel in vielen Regionen verbessert und in den Bundesländern Bremen, Sachsen und Thüringen fehlende Nutzungsschlüssel ergänzt werden (Abbildung 8). Während über diese Anreicherung im Abgleich mit den Zahlen aus der Gebäude- und Wohnungszählung eine weitgehend vollständige Identifikation des Bestandes von Gebäuden mit Wohnraum erfolgen konnte, zeigen sich bei der räumlichen Differenzierung der Nutzungsschlüssel von potenziell beheizten Gebäuden mit einer Nichtwohnnutzung bestehende Defizite bei der Datenqualität bzw. Detailtiefe der verfügbaren Nutzungsschlüssel, die im Rahmen der energetischen Gebäudetypisierung kalibriert wurden.

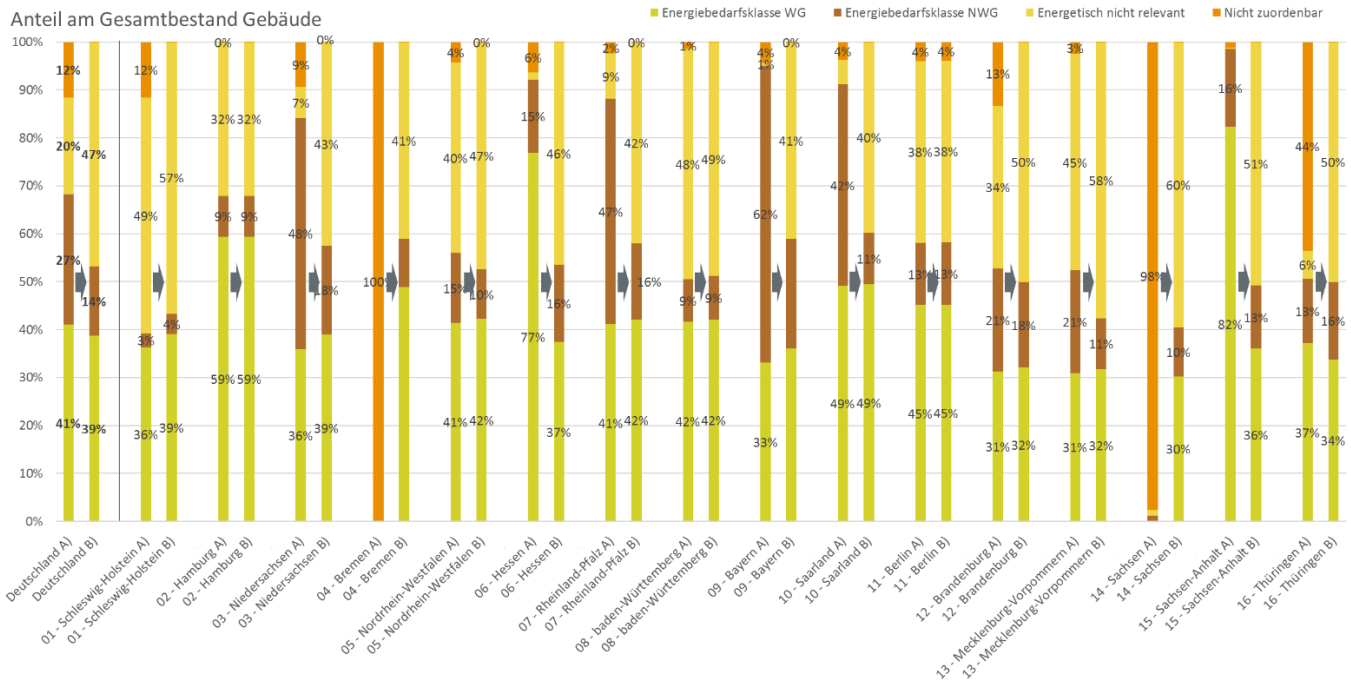


Abbildung 8: Statistische Auswertung der Anreicherung der Nutzungsschlüssel in den Ausgangsdaten LoD1_DE A) durch den Abgleich mit Sekundärdaten B) anhand einer ersten Kategorisierung nach den Energiebedarfsklassen Wohngebäude (WG) und Nichtwohngebäude (NWG)

[1] BEAM: Basic European Assets Map (https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSN024).

Die zugewiesenen Nutzungen wurden in einem Zwischenschritt hinsichtlich der Hauptnutzungsart (Wohnen, Nichtwohnen, Mischnutzung) kategorisiert und mit den Wahrscheinlichkeiten der Baualtersklassen-Zugehörigkeit aus dem Hektarraster zusammengeführt. Auf dieser Grundlage erfolgte die Berechnung Gebäude-spezifischer Parameter Netto-Volumen und Energiebezugsfläche nach der in Kapitel 3.1.4 dargestellten Berechnungsvorschriften. Dabei wurden baualters- und hauptnutzungsabhängige Kennzahlen zur Geschosshöhe und zum Umfang der Konstruktionsflächen (Mauern und Wände) implementiert.

Im Ergebnis wurde jedem Gebäude ein Nutzungsschlüssel aus einer Liste von 578 möglichen Nutzungsschlüsseln nach dem ALKIS-Objektnutzungsschlüsselkatalog zugeordnet. Jedem Gebäude wurden zusätzlich die Anteile der energetischen Baualtersklassen aus dem Hektarraster nach Zensus 2011, das Nettogebäudevolumen und davon abgeleitet die Energiebezugsfläche zugeordnet. Zusätzlich wurden 19,4 Mio. als Wohngebäude klassifizierte Objekte weiter anhand der Grundfläche, der Gebäudehöhe und der Topologie (Nachbarschaftsbeziehungen) in zehn Wohngebäudetypen differenziert (Abbildung 9, Tabelle 6).

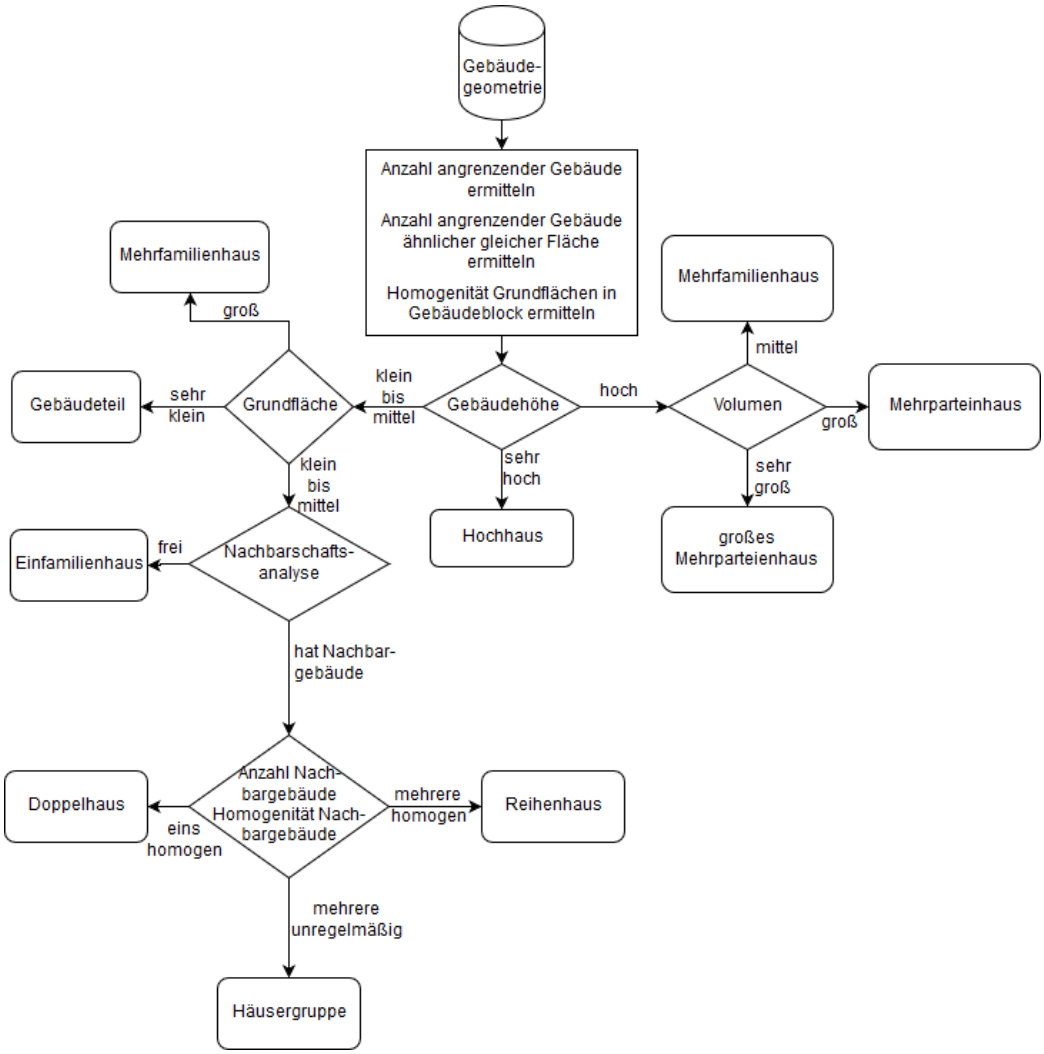


Abbildung 9: Vereinfachtes Ablaufdiagramm der Wohngebäudetypisierung.

Tabelle 6: Übersicht und Anteile Wohngebäudetypen.

Kennung	Bedeutung	Anteil
EFH	Freistehendes Einfamilienhaus (1 – 2 Haushalte)	44,4%
DH	Doppelhaus (1 – 2 Haushalte)	8,0%
RH	Reihenhaus (1 – 2 Haushalte)	3,4%
REH	Reihenendhaus (1 – 2 Haushalte)	2,2%
HGRP	Häusergruppe, nicht-freistehendes Einfamilienhaus (1 – 2 Haushalte)	17,9%
MFH	Mehrfamilienhaus (3 - 6 Haushalte)	11,1%
MPH	Mehrparteienhaus (6 - 12 Haushalte)	4,2%
GMH	Großes Mehrparteienhaus (>12 Haushalte)	1,1%
HOCH	Hochhaus	0,1%
PART	Gebäudeteil eines Wohnhauses	7,6%

3.2.2 Energetische Gebäudetypisierung

Ziel der Gebäudetypisierung war die Zuordnung eines energetischen Gebäudetyps nach der GEMOD-Systematik (Tabelle 3) anhand der verfügbaren, angereicherten ALKIS-Objektnutzungsschlüssel und der weiteren Vor-Einteilung des Wohngebäudebestandes nach Baustrukturellen Parametern. Dabei wurde in Anlehnung an die Berechnungsmethodik des GEMOD eine klare Abgrenzung zwischen Wohn- und Nichtwohnnutzung verfolgt (Jochum et al. 2015). Eine Simulation von Mischnutzungstypen bei der Berechnung von Energiekennzahlen oder eine Aufteilung von Gebäudegeometrien in weitere energetisch typisierte Nutzungszonen wurde nicht durchgeführt.

Da es sich bei der Abgrenzung von Nichtwohnnutzungen in GEMOD um eine Meta-Typologie nach verfügbaren Studien und räumlich begrenzten Datensätzen zum beheizten Nichtwohngebäudebestand in Deutschland handelt, die des weiteren Mischnutzungen innerhalb von Gebäuden statistisch abbildet, und auf der anderen Seite der vorhandene Katalog an Objektnutzungsschlüsseln nach der ALKIS-Systematik nicht für eine Kategorisierung von Gebäudenutzungen nach energetischen Kriterien entwickelt wurde, ist eine vollständige Übereinstimmung von Anzahl und Energiebezugsfläche pro GEMOD-Gebäudetyp im Bezugsjahr 2016 im GIS-Modell nicht möglich. Bei der Kalibrierung des Modells wurde deshalb das Ziel einer möglichst vollständigen Erfassung und räumlichen Verortung der Nutzwärmebedarfe als Bilanzebene aus dem GEMOD verfolgt.

In einem ersten Schritt wurden die verfügbaren Nutzungsschlüssel über einen manuellen Abgleich der Beschreibung der Gebäudenutzung in Textform mit den GEMOD-Gebäudetypen kategorisiert und in Form einer Look-Up-Tabelle mit der räumlichen Datengrundlage verlinkt und Energiekennzahlen zum Nutzwärmebedarf für Raumwärme und Warmwasser aus dem GEMOD im Basisjahr 2011 testweise in das räumliche Bottom-Up-Berechnungsmodell übertragen (Kapitel 3.3). Diese Kategorisierung wurde nach einer Aktualisierung der LoD1-Datengrundlage auf den Stand 09/2016 im Sinne einer noch deutlicheren Abgrenzung von Wohn- und Nichtwohnnutzung und einer erneuten Konsistenzprüfung ähnlicher Nutzungsschlüssel erneut angepasst (Tabelle 7).

Im Zuge einer statistischen Analyse der Nutzungsabgrenzung nach einzelnen Bundesländern und übergeordnet mit den Statistiken auf Bundesebene und den im GEMOD-hinterlegten

bundesweiten Werten zu Anzahl, Energiebezugsfläche und Nutzwärmebedarf pro Gebäudetyp, wurde eine insgesamt hohe Übereinstimmung in Bezug auf die Erfassung des Wohngebäudebestandes erreicht. So werden in Summe 19,4 Mio. beheizte Wohngebäude des Typs Ein- und Zweifamilienhaus (EZFH), Reihenhaus (RH), Mehrfamilienhaus (MFH) und Großes Mehrfamilienhaus (GMH) im GIS abgebildet. Die leicht höhere Anzahl im Vergleich mit den Daten der Gebäude- und Wohnungszählung 2011 (18,9 Mio. Gebäude mit Wohnraum) lässt sich neben dem erfolgten Zubau im Gesamtbestand bis zum Bezugsjahr der LoD1-Daten 09/2016 auf die Zuordnung einiger wohnähnlicher Nutzungsformen und Gebäude mit Mischnutzung („Wohn- und Bürogebäude“ u.a.) zu den vier Wohngebäudetypen erklären.

Tabelle 7: Exemplarische ALKIS-Objektnutzungsschlüssel, zugeordnet zu einem energetischen Gebäudetyp nach GEMOD.

ALKIS-Objektnutzungsschlüssel	Beschreibung	Gebäudetyp-GEMOD
31001_2411	Straßenmeisterei	Baugewerbe
31001_2071	Hotel, Motel, Pension	Beherbergung_Gasts._Heime
31001_3022	Berufsbildende Schule	Bildung
11_1101	Öffentliches Gebäude (allg.)	Büroähnliche_Betriebe
11_1448	Handel (allgemein)	Handel
31001_2000	Gebäude für Wirtschaft oder Gewerbe	Herstellungsbetriebe
31001_2111	Fabrik	Industrie
31001_3051	Krankenhaus	Krankenhäuser
11_1130	Gebäude für Kultur	Kultur
11_2700	Gebäude für Land- und Forstwirtschaft	Landwirtschaft
31001_2113	Brauerei	Nahrungsmittelgewerbe
31001_3211	Sport-, Turnhalle	Sport
31001_3221	Hallenbad	Sonderfall Badegebäude
11_1445	Kiosk	nicht relevant

Im Bereich der Nichtwohnnutzungen konnten die vier GEMOD-Typen „Baugewerbe“, „Nahrungsmittelgewerbe“, „Textil, Bekl., Spedition“ und „Wäschereien“ nicht bzw. nur marginal in einzelnen Bundesländern anhand der vorhandenen Nutzungsschlüssel in der räumlichen Datengrundlage identifiziert werden. Da auf diese Gebäude im Basisjahr in GEMOD nur ein sehr niedriger kumulierter Nutzwärmebedarf von 7 TWh entfällt (rund 1% des gesamten Nutzwärmebedarfs), wurden die Abweichungen für die räumliche Wärmebedarfsmodellierung als vernachlässigbar eingestuft.

Als Gebäudetypen mit einer für die Modellkopplung ausreichenden Übereinstimmung werden die sechs Gebäudetypen „Sport“, „Bildung“, „Büroähnliche_Betriebe“, „Krankenhäuser“, „Kultur“ und „Landwirtschaft“ bewertet. Eine Sonderrolle nehmen Gebäude des GEMOD-Typs „Beherbergung_Gasts._Heime“ ein, deren Mengengerüst und kumulierter Wärmebedarf im Wärmeatlas nur rund einem Viertel der GEMOD-Werte entsprechen. Diese Abweichungen können, zumindest zu einem Teil, der Zuordnung entsprechender Nutzungsschlüssel zum Wohngebäudebereich als Wohn-Ähnliche Nutzung (s.o.) zugeschrieben werden. Eine Anpassung der Abgrenzung dieses Typs wurde nicht durchgeführt, da angenommen wurde, dass entsprechende Gebäude als Wohngebäude energetisch erfasst wurden.

Relevante Überschätzungen ergaben sich bei den GEMOD-Typen „Handel“ und „Herstellungsbetriebe“, die im Folgenden hinsichtlich Gebäudemodellierung im GIS (plausible Identifikation beheizter Einzelgebäude dieser Typen anhand der Nutzungsschlüssel in der Datengrundlage) und typologischer Abgrenzung im GIS (Überprüfung der Zuordnung von Nutzungsschlüsseln in der Look-Up-Tabelle) untersucht wurden.

Dabei wurde in Bezug auf den GEMOD-Typ „Herstellungsbetriebe“ eine deutliche Überrepräsentation des zugeordneten generischen, für die Abgrenzung realer energetischer Nutzungsformen bedingt nutzbaren, Objektnutzungsschlüssels „Gebäude für Wirtschaft oder Gewerbe“ in der Datengrundlage ermittelt (Abbildung 10). Eine räumliche Analyse verdeutlichte eine ausgeprägte Konzentration auf die vier Bundesländer Bayern, Niedersachsen, Hessen und Rheinland-Pfalz, auf die rund 75% der insgesamt 4,5 Mio. Gebäude mit diesem Nutzungsschlüssel entfielen. In diesen Bundesländern, aber auch in anderen Regionen, repräsentiert speziell der Objektnutzungsschlüssel „Gebäude für Wirtschaft oder Gewerbe“ oftmals zusammenhängende Gebiete mit beheizten und zahlreichen unbeheizten Hallen- und Nebengebäuden, die für eine energetische Modellierung gesondert aussortiert werden müssen.

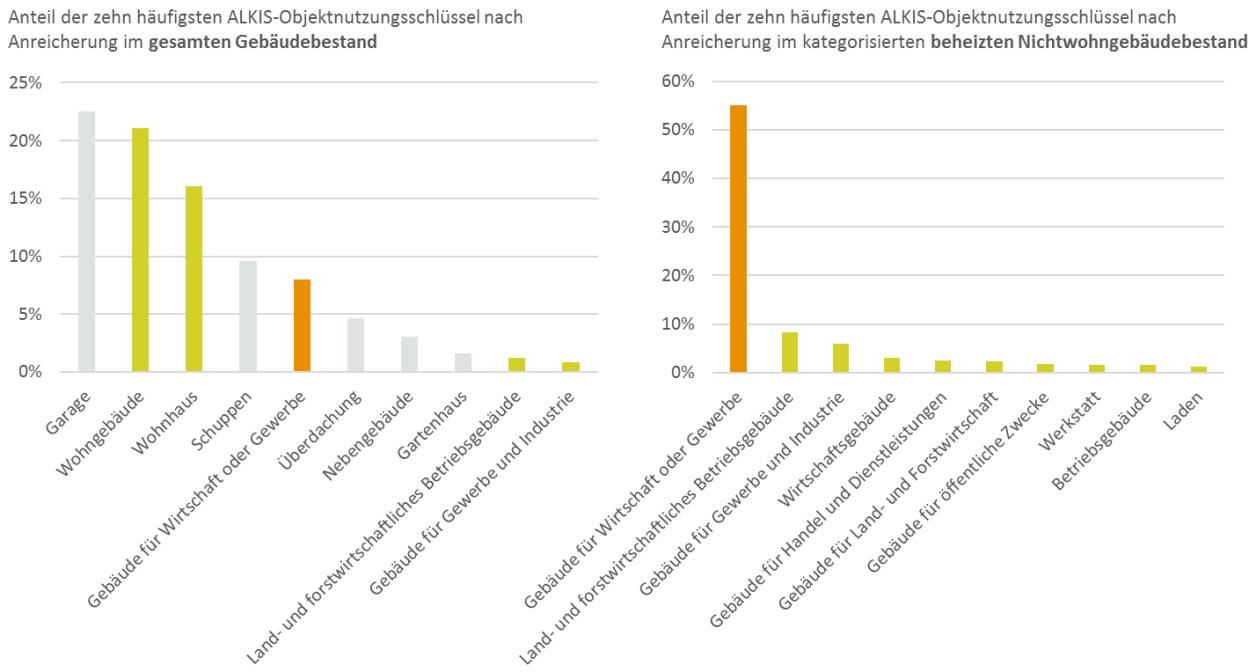


Abbildung 10: Signifikanter Anteil generischer Objektnutzungsschlüssel bei der Identifikation beheizter Nichtwohngebäude in der räumlichen Datengrundlage.

Über eine Analyse der Verteilung von Nutzungsschlüsseln in allen Bundesländern und GIS-basierte, visuelle Fallstudien wurden in der Folge Indikatoren zur Anpassung der energetischen Typisierung und zum Aussortieren real unbeheizter Gebäudegeometrien bzw. Gebäudeteile abgeleitet. Im Ergebnis wurde eine Bundesland-spezifische Neu-Zuordnung von Nutzungsschlüsseln zu dem GEMOD-Typ „Industrie“ als Repräsentant des Nutzwärmebedarfs von Betrieben des verarbeitenden Gewerbes durchgeführt. Zudem wurden basierend auf

den Fallstudien Grenzwerte der Grundfläche zum Aussortieren unbeheizter Gebäude bzw. Gebäudeteile implementiert. Das Verfahren wurde Analog für Gebäude des GEMOD-Typs „Handel“ durchgeführt. Im Ergebnis konnten neben 19,4 Mio. Wohngebäuden 3,1 Mio. beheizte Nichtwohngebäude mit einer kumulierten energetischen Nutzfläche A_N von 2,4 Mrd. [m²] im GIS-Modell identifiziert und für die Wärmebedarfsmodellierung genutzt werden (Tabelle 9).

Exkurs Badegebäude

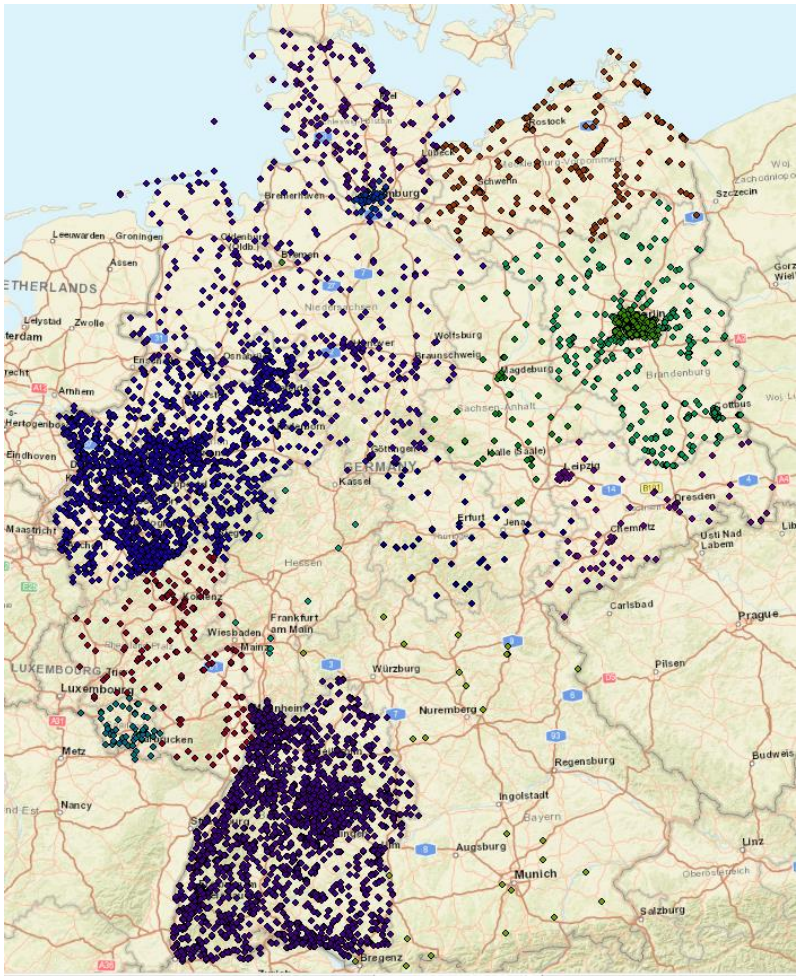
Badegebäude wurden auf Grund eines relevanten Wärmebedarfs außerhalb der üblichen Berechnungslogik für Raumwärme und Brauchwarmwasser für die Ermittlung von Wärmenetzpotenzialen gesondert untersucht. Dabei wurde ein Ansatz zur Ableitung von Energiebedarfen für die Beheizung von Bade-Becken mit spezifischen Kennzahlen [kWh/m²] Wasseroberfläche aufbauend auf (Schlomann et al. 2015) erprobt.

- Zunächst wurden die Ansätze aus (ebd.) mit dem Branchenverband Deutsche Gesellschaft für das Badewesen (DGfdB) diskutiert. Die Bezugsgröße „Beckenoberfläche“ wird vom DGfdB für grundsätzlich sinnvoll gehalten. Der Branchenverband erhebt selbst Daten (aus Energiekennzahlen) von den dem Verband bekannten Bädern. Der Verband unterscheidet dabei verschiedene Bad-Typen (Hallenbad, Freibad, Kombibad (Hallen- und Freibad), Naturbad). Diese Unterscheidung erscheint für die energetische Bewertung plausibel.

- Im zweiten Schritt wurden geprüft, ob die Datenbasis für die Gebäudetypisierung in NENIA eine entsprechende Unterscheidung zulässt. Im Gebäudemodell wurden dafür die in Tabelle 8 gelisteten Objektnutzungsschlüssel zur Identifikation beheizter Badegebäude analysiert.

Tabelle 8: ALKIS-Objektnutzungsschlüssel zur Identifikation von Gebäudegeometrien mit einer Nutzung als Badegebäude in der aufbereiteten räumlichen Datengrundlage.

ALKIS-Objektnutzungsschlüssel	Beschreibung
11_2821	Hallenbad
11_2822	Gebäude der Freibadanlage
11_2828	Badegebäude (allgemein)
11_2829	Badegebäude
11_2841	Badegebäude für medizinische Zwecke
31001_3220	Badegebäude
31001_3221	Hallenbad
31001_3222	Gebäude im Freibad
31001_3241	Badegebäude für medizinische Zwecke



Weltweite Straßenkarte - Quellen: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community

Abbildung 11: Bundesweite Übersicht über Bäder im Gebäudemodell (Stand 31.1.2018).

Es zeigt sich, dass die Qualität der Datenbasis von Bundesland zu Bundesland sehr unterschiedlich ist (s. Abbildung 11) und insgesamt unplausibel erscheint. So werden auch über die angereicherten Nutzungsschlüssel z.B. fast keine Bäder in Hessen und Bayern identifiziert, während in Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen viele private zu Badezwecken genutzte Bauwerke (Swimming-Pools im Garten) erfasst werden.

Im Ergebnis lässt die Datenbasis zur Gebäudenutzung eine sinnvolle Abschätzung eines Wärmebedarfs für ein Standard-Schwimmbad schwierig, im besten Fall nur durch umfassende Nachbarschaftsanalysen möglich erscheinen. Auch die Qualität des Kennwerts aus (ebd.) wird vom Branchenverband aus nachvollziehbaren Gründen hinterfragt.

Mit vertretbaren Aufwand lässt sich aus Sicht der Projektpartner kein Ansatz zur bundesweiten Wärmebedarfsabschätzung für Bäder anhand der verfügbaren Daten entwickeln. Die Verwendung des Ansatzes für Sportgebäude kann eine sinnvolle Alternative sein, wurde jedoch auf Grund der erreichten hohen Übereinstimmung des simulierte Wärmesenken-Szenarios im GIS mit den GEMOD-Werten auf Bundesebene nicht angewandt (Kapitel 3.4, Tabelle 9). Badegebäude werden deshalb im räumlichen Wärmesenkenmodell für die bundesweite Potenzialanalyse nicht berücksichtigt.

3.3 Wärmebedarfsmodellierung

Auf Grundlage der energetischen Gebäudetypisierung wurde ein teil-automatisiertes Verfahren zur Integration spezifischer Energiekennzahlen des Nutzwärmeverbrauchs an Raumwärme und Warmwasser [kWh/m²*a] in Form von Simulationsergebnissen des Gebäudemodells GEMOD, differenziert nach energetischem Gebäudetyp und Baualtersklasse sowie nach den fünfzehn Klimazonen der DIN 18599-10, entwickelt. Die Daten aus dem GEMOD enthalten bereits eine nach Gebäudetypen differenzierte Verbrauchskalibrierung in Anlehnung an (IWU 2015b) und sind auf Statistiken zum Endenergieverbrauch zur Versorgung des Gebäudebestandes mit Raumwärme und Warmwasser kalibriert (Jochum et al. 2015).[1]

Dafür wurden die Energiekennzahlen für ein gewähltes Szenario (vgl. Kapitel 3.4) räumlich differenziert nach den 15 Klimazonen aus dem GEMOD in die GIS-Datenbank übergeben und anschließend pro energetischem Gebäudetyp auf Ebene des 100m-Rasters als kleinste räumliche Aggregationseinheit nach den hinterlegten Anteilen der Baualtersklassen im Wohngebäudebestand aus der Gebäude- und Wohnungszählung (GWZ) 2011 gewichtet gemittelt. Hierbei wurde angenommen, dass die in den Rasterzellen identifizierten beheizten Nichtwohngebäude in Bezug auf die Baualtersklassenverteilung dieselben Anteile wie der Wohngebäudebestand aufweisen. Beheizten Gebäuden in Zellen ohne Informationen zum Baualter (weniger als drei Wohngebäude laut GWZ 2011 enthalten) wurden die Baualtersverteilungen auf Bundesebene aus dem GEMOD als Gewichtungsfaktor der Energiekennzahlen zugeordnet.

Die Simulation von Entwicklungspfaden des Wärmebedarfs beinhaltet in der Regel eine Fortschreibung des Gebäudebestandes über Abriss und Neubauraten. Diese sind in GEMOD für jeden energetischen Gebäudetyp Bestandteil von Szenarienberechnungen und fließen entsprechend in die Ableitung spezifischer Energiekennzahlen mit einem direkten Bezug zur energetischen Nutzfläche ein. Im bundesweiten GIS-Modell, das zunächst auf Ebene einzelner Gebäude aufgesetzt ist, wurde zur Simulation der Zukunftsszenarien auf Grund der Komplexität einer räumlichen Verortung von Neubauten keine Entwicklung der Energiebezugsfläche berücksichtigt.[2] Demgegenüber wurden jedoch die Anteile zukünftiger Baualterklassen als „Ersatz im Bestand“mit identischer Energiebezugsfläche abgebildet (Kapitel 3.4).

Das Bottom-Up-Modell wurde als Zielgröße auf die korrekte Abbildung des verbrauchskalibrierten Nutzenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser im gewählten Wärmesenken-Szenario als Simulationsergebniss des GEMOD kalibriert. Der Ablauf der räumlichen Wärmebedarfsmodellierung ist in Abbildung 12 dargestellt.

[1] Die Verbrauchskalibrierung nach (IWU 2015b), S. 78 wurde in GEMOD anhand eigener Berechnungen leicht abgeändert.

[2] Eine Option zur regional differenzierten Abbildung von Wachstumsszenarien für die Wohnfläche besteht in der Nutzung der Prognose für die Entwicklung der Nachfrage nach Wohnfläche des BBSR auf Kreisebene. Diese wurde bisher bei aggregierter Modellierung der Entwicklung von Wohngebäudebeständen bereits verwendet (Jochum et al. 2017; Blömer et al. 2017). Für Nichtwohngebäude liegen keine gesonderten regional differenzierten Daten bzw. Szenarien vor.

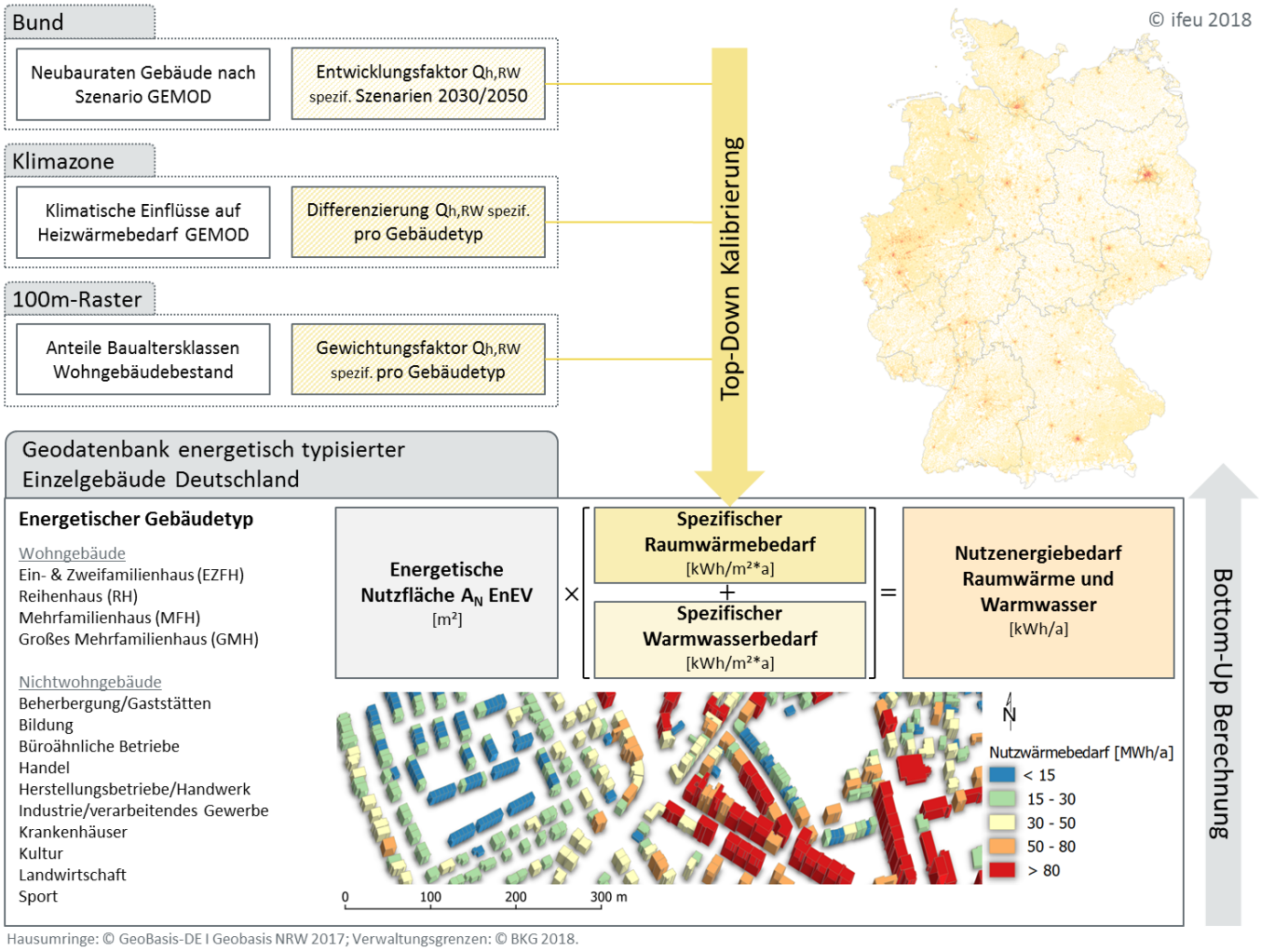


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Wärmebedarfsberechnung.

3.4 Zukünftige Entwicklung des Wärmebedarfs

Bei der Bewertung der mittelfristig netzgebunden nutzbaren Abwärmepotenziale aus der Industrie spielt die Entwicklung des Wärmebedarfs als Kriterium für die technisch-wirtschaftliche Realisierbarkeit von Wärmenetzen und als Bilanzebene für den Wärmequellen-Wärmesenkenabgleich eine wichtige Rolle. Gleichwohl ist die Analyse mehrerer Szenarien zur Entwicklung des Wärmebedarfs in Hinblick auf die Aussagekraft des räumlichen Abgleichs nicht zielführend, wenn die Sensitivität weiterer, teilweise gegenläufiger technischer und wirtschaftlicher Parameter (z.B. verschiedene Netztemperaturen oder Referenz-Wärmepreise) betrachtet werden soll.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen des NENIA-Vorhabens als Repräsentation des Wärmesenkenpotenzials nur ein Szenario moderater energetischer Sanierungstätigkeit im Stichjahr 2030 in die räumliche Datengrundlage gespiegelt. Das Szenario basiert auf einer sukzessiven Umsetzung von Sanierungsmaßnahmen leicht über den Anforderungen der Energieeinsparverordnung 2013, inklusive der Ergänzungen in den Jahren 2014 und 2016, mit einer Sanierungsrate von im Mittel 1,26% p.a. bis zum Jahr 2030. Durch die Umsetzung dieser Maßnahmen verringert sich der Nutzenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser von 673 TWh im Basisjahr 2011 um 15% auf 566 TWh 2030 (Abbildung 13).

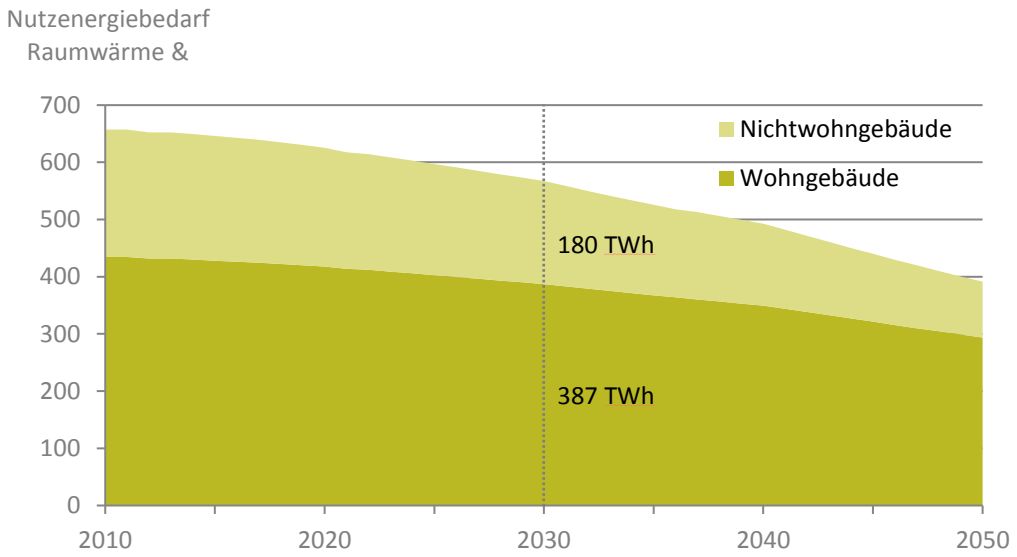


Abbildung 13: Gewähltes Wärmesenken-Szenario: Moderate energetische Sanierungstätigkeit im Stichjahr 2030.

In Hinblick auf die räumliche Abbildung der Szenarienergebnisse wurden auf Grund der Modellierung auf Ebene einzelner Gebäude Änderungen der Energiebezugsfläche oder die der absoluten Anzahl an Gebäuden implementiert. Demgegenüber wurde der Abriss und der Neubau im Bestand („Ersatz im Bestand“) in Form von rund 2 Mio. neuen Gebäuden der Baualtersklasse ‚K‘ (2011-2020) und ‚L‘ (2020-2040) durch eine Minimierung der Anteile der Baualtersklassen D, E & F als prädestinierte Baualtersklassen für eine vollständige Erneuerung der Bausubstanz abgebildet.

Das entwickelte Bottom-Up-GIS-Modell ermöglicht eine räumliche Abbildung der gewählten Szenarienergebnisse aus dem GEMOD im Stichjahr 2030 mit einer Übereinstimmung von 99% bezogen auf den gesamten simulierten verbrauchskalibrierten Nutzwärmebedarf im Gebäudebestand von 567 TWh (Tabelle 9). Der Abgleich mit dem im GEMOD hinterlegten Mengengerüst für das Jahr 2030 zeigt zusätzlich zu der grundlegend höheren Anzahl von Gebäuden, die im GIS-Modell energetisch einer Wohnnutzung zugeordnet werden (vgl. Kapitel 3.2) und einer entsprechend niedrigeren Zahl an Nichtwohngebäuden, größere Abweichungen in Bezug auf die Anzahl und zugeordnete Energiefläche des gesamten Gebäudebestandes durch die fehlende Berücksichtigung des Zubaus im GIS-Modell. So werden im gewählten Szenario 2030 rund 7% weniger beheizte Gebäude abgebildet, als im GEMOD hinterlegt sind.

Tabelle 9: Ergebnisse Bottom-Up-GIS-Modell Nutzenergiebedarf Raumwärme und Warmwasser im Wohn- und Nichtwohngebäudebestand in einem Szenario moderater energetischer Sanierungstätigkeit im Stichjahr 2030.

		Ergebnisse Bottom-Up-GIS-Modell			**Bilanz GIS-Modell/GEMOD Szenario moderate Sanierung 2030**		
	Gebäudetyp GEMOD	Anzahl	Energiefläche [m²]	Nutzenergie RW & WW moderate Sanierung 2030 [GWh]	Nutzenergie RW & WW GIS-Modell [GWh]	Nutzenergie RW & WW GEMOD [GWh]	Verhältnis
Wohn-gebäude	EFH	9,157,215	1,474,709,311	149,366			
	RH	6,396,800	817,455,850	71,934			
	MFH	3,231,963	1,380,439,834	130,390	*Werte Wohngebäude gesamt:*		
	GMH	619,260	676,323,418	60,539	412,229	387,077	106%
Nichtwohn-gebäude	Baugewerbe	763	329,158	5			
	Sport	69,380	71,085,653	6,905			
	Beherbergung_Gasts._Heime	123,791	63,990,416	6,710			
	Bildung	158,760	219,775,175	18,522			
	Büroähnliche_Betriebe	534,713	346,169,669	31,853			
	Handel	135,464	250,910,287	16,011			
	Industrie	589,980	792,874,944	33,342			
	Herstellungsbetriebe	396,834	149,613,907	2,674			
	Krankenhäuser	25,183	70,491,097	10,388			
	Kultur	93,880	89,104,638	10,696			
	Landwirtschaft	1,009,390	275,474,101	10,328			
	Nahrungsmittelgewerbe	68	108,147	2			
	Textil_Bekleidung_Spedition	0	0	0	*Werte Nichtwohngebäude gesamt:*		
	Wäschereien	0	0	0	147,437	180,117	82%
Gesamt		**22,543,444**	**6,678,855,606**	**559,666**	**559,666**	**567,194**	**99%**

3.5 Wärmenetzmodell

Für die Analyse der netzgebundenen Abwärmenutzungspotenziale musste in einem nächsten Bearbeitungsschritt ein Modell zur räumlichen Identifikation bestehender und nach technisch-wirtschaftlichen Kriterien tragfähiger zusätzlicher Wärmenetzgebiete entwickelt werden. Zur Abstraktion zusammenhängender Versorgungsgebiete für eine bundesweite Wärmedichten-Analyse wurden die Nutzenergiebedarfe für das Basisjahr 2011 und für das gewählte Szenario moderater energetischer Sanierung im Stichjahr 2030 aus dem GIS-Modell auf der Ebene von Analyse-Rasterzellen mit einer Kantenlänge von 500m aggregiert. Darauf aufbauend wurden zunächst Zellen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit für bestehende Wärmenetzinfrastrukturen identifiziert und anschließend anhand einer Modellierung realisierbarer Linien-Absatzdichten weitere technisch-wirtschaftliche Wärmenetzpotenzialgebiete in der räumlichen Datengrundlage identifiziert (Abbildung 14).[1]

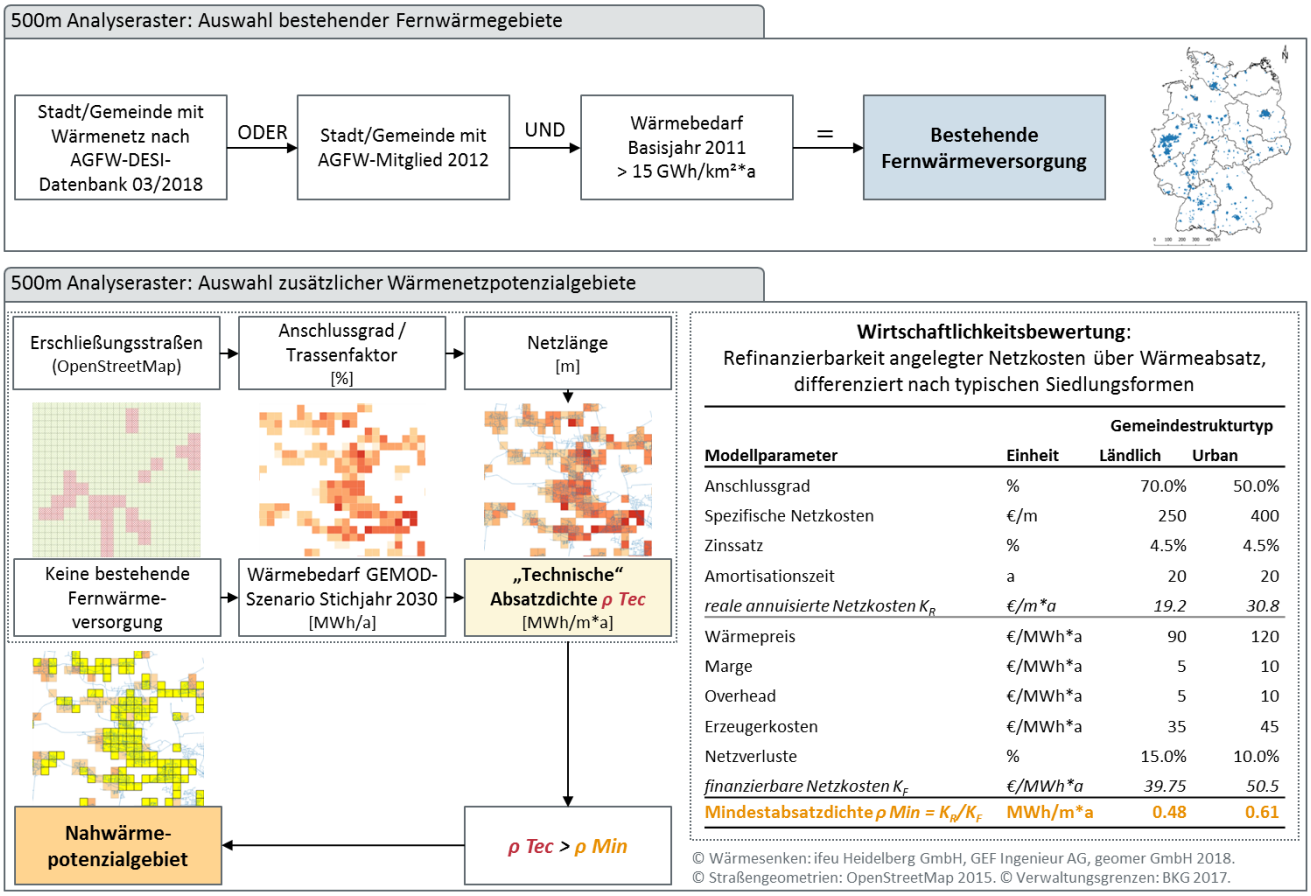


Abbildung 14: Schematische Darstellung des Wärmenetzmodells.

[1] Vgl. auch die im Rahmen des Vorhabens veröffentlichten Beiträge im ET-Journal:
Götz, C.; Blömer, S.; Pehnt, M.: Nahwärmegenossenschaften in Deutschland - ein Wärmeversorgungsmodell der Zukunft? Energiewirtschaftliche Tagesfragen 66 (2016), Nr. 12, S. 46–48.
Blömer, S.; Götz, C.; Mellwig, P.; Pehnt, M.; Jochum, P.: Die Rolle von Wärmenetzen im Wärmemarkt der Zukunft – GIS-Analyse technisch-ökonomischer Potenziale. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 67 (2017), Nr. 7, S. 39-42.

3.5.1 Fernwärmebestand

Zur Differenzierung von Abwärmenutzungspotenzialen zwischen Fernwärmebestand und potenziellen neuen Netzen wurde eine räumliche Datengrundlage zur Verortung bestehender Wärmenetze auf Stadt- bzw. Gemeindeebene erarbeitet. Eine zentrale Datengrundlage dafür stellen die Bescheinigungen für Primärenergiefaktoren nach der FW 309-1 dar, die seitens der Gutachter an den AGFW gemeldet werden und in Form einer Liste der f_P-Bescheinigungen unter Angabe des Netzbetreibers und Ortsnamens online publiziert werden (AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme Kälte und KWK e.V. 2018).

Aufbauend auf den f_P-Bescheinigungen werden seit Ende 2017 Informationen zu Name, Betreiber und Ortsangabe im Textformat zur Verortung einzelner Wärmenetz-versorgungssysteme in der *District Energy Systems*-Datenbank (DESI) des AGFW sukzessive von den Gutachtern eingetragen und publiziert (Rapp 2018). Zur räumlichen Identifikation von Fernwärmebestandsgebieten wurde ein Auszug aus der AGFW-DESI-Datenbank, Stand März 2018, in die räumliche Datenbank des Wärmebedarfsmodells integriert.

In der DESI-Datenbank werden einzelne, thermohydraulisch verbundene Netze gelistet. So können in einer Stadt oder Gemeinde mehrere Netze verortet sein oder Verbundnetze über kommunale Gemarkungen hinweggehen und mehrere Ortsnamen enthalten. Für eine konsistente räumliche Verortung wurden die Gemeindegrenzen aus den frei verfügbaren Verwaltungsgrenzen nach (BKG - Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2018) verwendet. Diese enthalten u.a. Ortsnamen in Textform, die mit den Ortsangaben in der DESI-Datenbank verlinkt wurden. Anschließend wurde eine manuelle Bereinigung fehlerhafter Ortsangaben und eine Aufteilung von Verbundnetzen auf verschiedene Städte/Gemeinden durchgeführt.

Aus den Angaben in der DESI-Datenbank konnten 302 Städten und Gemeinden mit bestehenden Wärmenetzinfrastrukturen identifiziert werden. Da in der DESI-Datenbank sukzessive weitere Netze eingetragen werden, wurde der Gesamtbestand zum Stand des Auszugs nicht vollständig erfasst. Zur Ergänzung wurde deshalb ein Abgleich mit der AGFW-Mitgliederliste aus dem Jahr 2012 nach Gemeinden durchgeführt, über den weitere 62 Städte/Gemeinden mit bestehenden Wärmenetzen identifiziert werden konnten.

Einem pauschalen Ansatz einer Wärmedichten-Priorisierung folgend, wurden darauf aufbauend alle 500m-Analyserasterzellen mit hohen Wärmenachfragedichten von über 15 [GWh/km²*a] im Basisjahr 2011 (Raumwärme und Warmwasser Gebäude, Nutzenergie) innerhalb der identifizierten 364 Städte und Gemeinden als wahrscheinlich bereits mit Wärmenetzinfrastrukturen versorgt betrachtet. Auf diese Gebiete entfällt im Basisjahr 2011 ein kumulierter Wärmeabsatz von 213 TWh – bei einem Anschlussgrad von 100%. Auf Grund fehlender Daten zu Absatz-bezogenen Anschlussgraden auf Ebene einzelner Städte und Gemeinden wurde in allen Rasterzellen ein pauschaler, Absatz-bezogener Anschlussgrad von 30 % unterstellt. Dies entspricht in etwa dem Mittelwert auf Bundesebene und ermöglicht im Modell die Verortung von 64 TWh Wärmeabsatz in bestehenden Fernwärmeversorgungsgebieten.[1] Dieser Wärmeabsatz wird für die Potenzialanalyse durch homogene Nachverdichtung in den einzelnen Zellen bis zum Jahr 2030 als statisch angesehen, sodass auf den Fernwärmebestand ein Anteil von 11% des gesamten Nutzwärmebedarfs entfällt.

[1] Nach den Daten der Arbeitsgemeinschaft Fernwärme, AG Energiebilanzen betrug der Fernwärmeabsatz an Haushalte und an den Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen im Mittel der Jahre 2008-2017 rund 70 TWh. Damit werden im Modell mit 64 TWh bilanziell rund 90 % dieses Fernwärmeabsatzes erfasst und verortet (BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2018).

Der Datensatz mit 22,002 Rasterzellen inkl. der kumulierten Wärmeabsätze an Nutzenergie für Raumwärme und Warmwasser im Gebäudebestand im Basisjahr 2011 [kWh], multipliziert mit dem Faktor 0,3 (30 % Anschlussgrad) wurde anschließend für die Potenzialanalyse verwendet.

3.5.2 Potenzialgebiete

Zur Identifikation weiterer Gebiete mit Potenzialen für Wärmenetzversorgungssysteme wurde ein dynamisches Wärmenetzmodell zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit bei exogen vorgegebenen Kostenparametern entwickelt. Ausschlaggebend für einen langfristig wirtschaftlichen Betrieb neu errichteter Wärmenetzsysteme ist die Refinanzierung der Investitionskosten über einen geplanten Abschreibungszeitraum. Dabei spielen die Investitionen in die Verteilungsinfrastruktur bzw. die Wärmenetztrassen die maßgebliche Rolle. Zur automatisierten Analyse der Rentabilität eignet sich deshalb ein Trassen-bezogener Ansatz, nach dem annuisierte Absatzdichten in [MWh/m*a] als Kriterium der Wirtschaftlichkeit bewertet werden.

In Analogie zur Identifikation bestehender Fernwärmeversorgungsgebiete wurden 500m-Analyserasterzellen ohne bestehende Fernwärmeversorgung als Modellierungsebene gewählt. Auf dieser Ebene wurden als Abstraktion mittlerer jährlicher Wärmeabsätze in einem Investitionszeitraum von 20 Jahren von 2020 bis 2040 die Nutzwärmebedarfe des gewählten Szenarios moderater energetischer Sanierung im Stichjahr 2030 abgebildet. Zusätzlich wurden aufbereitete Straßengeometrien aus der OpenStreetMap-Datenbank zur Abschätzung der Trassenlänge [m] pro Rasterzelle in das Modell integriert (Abbildung 15). Dabei wurde ein anhand empirischer Abschätzungen aus der Fernwärmeplanung der GEF Ingenieur AG interpolierter Trassen-Faktor f_{Trasse}, der den Anteil der genutzten Straßenlänge bei der Verlegung von Wärmenetztrassen in Abhängigkeit des Anschlussgrades an Gebäuden wiedergibt, etabliert.[1] Nach Vorgabe eines Anschlussgrades pro Rasterzelle kann so die „technische“ Absatzdichte ρ_{Tec} [MWh/m*a] in einem potenziellen Wärmenetzgebiet als Referenzgröße modelliert werden.

Über einen Katalog an Kostenparametern zur Beschreibung der realen annuisierten Investitionskosten (K_R) bezogen auf die Gesamtnetzlänge [EUR/m*a] im Verhältnis zu den „real“ durch den Wärmeabsatz finanzierbaren Kosten (K_F) [EUR/MWh*a], die sich als Differenz der Betriebskosten zu den anlegbaren Wärmepreisen frei Wärmeabnehmer ergeben, lässt sich eine minimale Wärmeabsatzdichte [MWh/m*a] beschreiben, ab der der Betrieb eines Wärmenetzes für den Betreiber wirtschaftlich darstellbar ist: $\rho_{Min} = \frac{K_R}{K_F}$.

Angesichts der ausgeprägten Varianz der Kostenstrukturen von Wärmenetzsystemen in der Realität wurde eine zumindest grobe Unterteilung der Parameter nach Netzen im ländlichen Raum und Netzen in eher urban geprägten Gebieten mit tendenziell höheren Kostenstrukturen hinterlegt. Die Parameter basieren u.a. durch empirische Befragungen und wurden durch Angaben in der Sekundärliteratur übertragen (Götz et al. 2016; Blömer et al. 2017). Dabei wurde in Bezug auf die Trassenkosten eine Fortführung der aktuellen Förderung im Rahmen des Marktanreizprogramms und des KWKGs angenommen und damit insgesamt relativ niedrige spezifische Trassenkosten (im Modell definiert als Kosten abzüglich Förderung) hinterlegt. Die Parameter für die Analyse sind in Abbildung 14 dargestellt.

[1] Der Faktor ist im Modell mit der Formel $f_{(x)} = \frac{(8422*x+(-10.15))}{(x^2+5646*x+2874)}$, mit x = Anschlussgrad Gebäude hinterlegt.

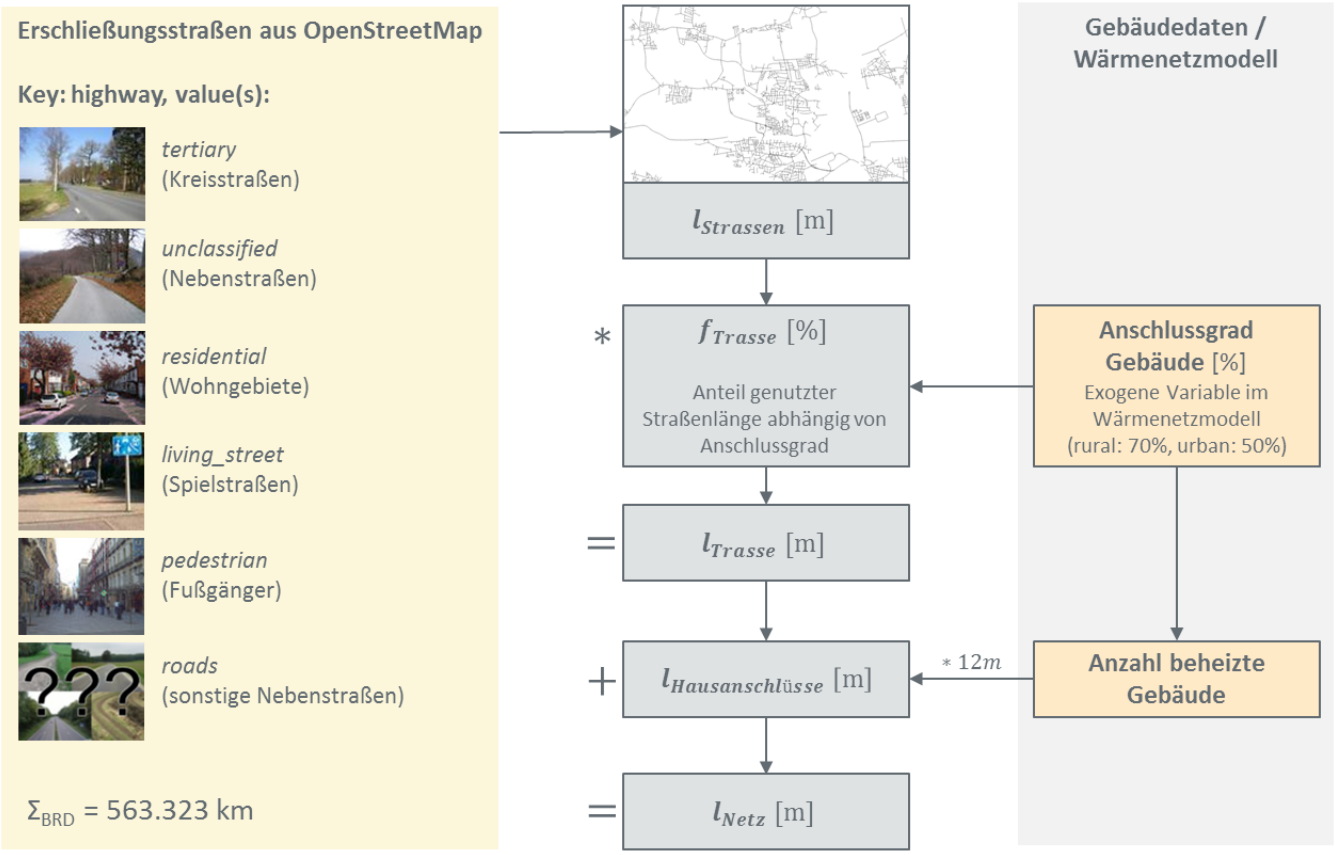


Abbildung 15: Dynamische Ableitung der Gesamtnetzlänge [m] pro Versorgungs(-raster)-zelle aus Straßengeometrien im Wärmenetzmodell. Bilder und Straßengeometrien: © OpenStreetMap 2015.

Über das entwickelte Modell werden die langfristig technisch-wirtschaftlichen Potenziale von Wärmenetzinfrastrukturen zwar mit Referenz-Wärmepreisen frei Endabnehmer von 120 EUR/MWh (urbane Gebiete) bzw. 90 EUR/MWh (ländliche Gebiete) für andere Wärmeversorgungsoptionen, jedoch ohne einen räumlichen Abgleich mit ggf. vorhandenen Gasnetzen als konkurrierende Versorgungsinfrastruktur ermittelt.[1] Dies ist jedoch angesichts der Priorisierung einer Abwärmenutzung im Kontext einer Primärenergieeinsparung bei der Wärmeversorgung von Gebäuden durchaus zielführend.

Im Ergebnis wurden mit der beschriebenen Vorgehensweise weitere langfristige Potenzialgebiete für Wärmenetze mit einem kumulierten Wärmeabsatz (Anschlussgrade bereits inbegriffen) von 130 TWh bzw. 23% des gesamten Nutzenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser im Wohn- und Nichtwohngebäudebestand ermittelt (Abbildung 16). Die ermittelten 102,462 Rasterzellen inkl. der aggregierten Wärmeabsätze [kWh] im Stichjahr 2030 wurden in Analogie zu den Daten des Fernwärmebestandes als weiteres netzgebundenes Wärmesenkenpotenzial in der Potenzialanalyse verwendet. In Summe wurden damit

[1] Geodaten zu vorhandenen Gasverteilnetzen liegen mitunter nicht flächendeckend und nicht in hoher räumlicher Auflösung vor.

64 TWh im Fernwärmebestand und 130 TWh in neuen Wärmenetzen als Wärmesenkenpotenzial im Stichjahr 2030 bei moderater energetischer Sanierung abgebildet.

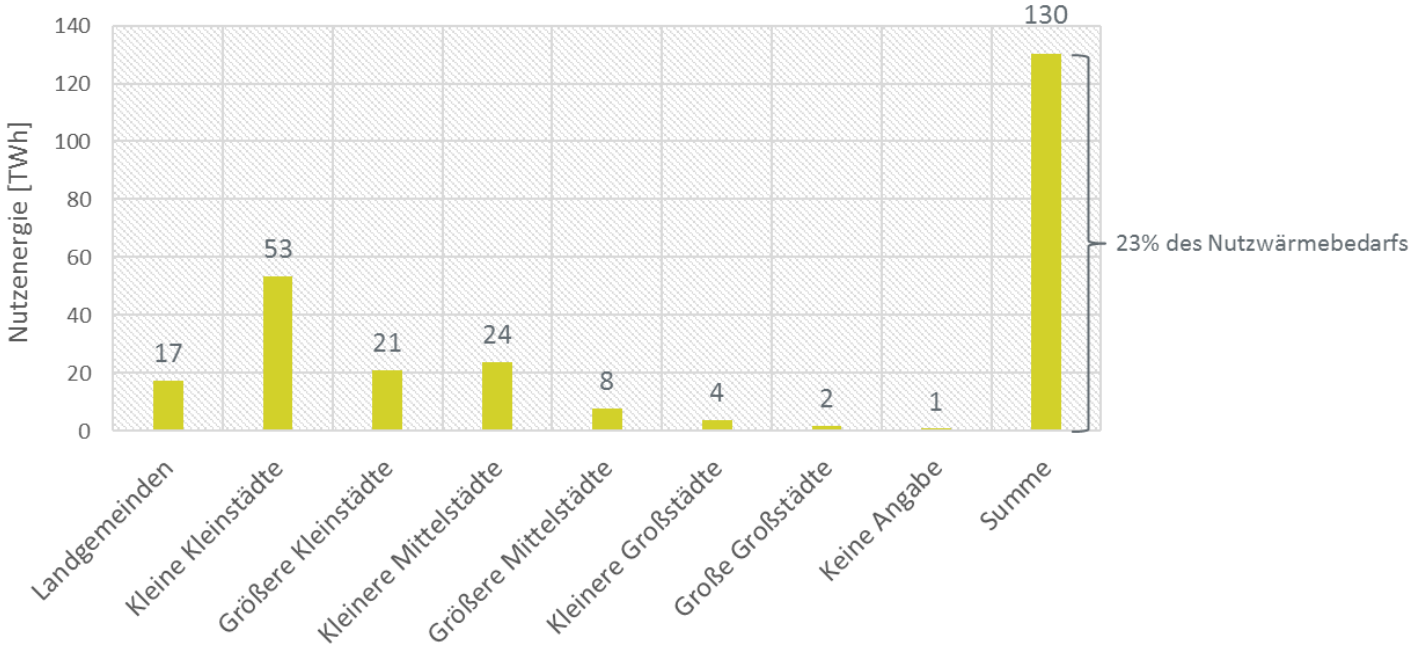


Abbildung 16: Ermittelte zusätzliche Wärmenetzpotenziale nach Raumstrukturellen Stadt- und Gemeindetypen im Szenario moderater energetischer Sanierung 2030.

4 GIS-Modell Endenergieeinsätze und theoretische Abwärmepotenziale im verarbeitenden Gewerbe

Als zweites Element der räumlichen Potenzialanalyse wurde im Rahmen des NENIA-Vorhabens eine Standortdatenbank zur Verortung und Quantifizierung theoretisch für eine netzgebundene Nutzung verfügbarer Abwärmepotenziale im verarbeitenden Gewerbe erarbeitet. Dafür wurden verschiedene verfügbare Datengrundlagen zu Brennstoffeinsätzen, Rauchgas- bzw. CO_2-Emissionen und thermischen Prozessstromanwendungen aufbereitet und zusammengeführt.

4.1 Datengrundlage

4.1.1 Emissionserklärungen genehmigungspflichtiger Anlagen nach der elften Bundes-Immissionschutzverordnung (11. BImSchV)

Mit dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) besteht in der Bundesrepublik Deutschland seit 1974 ein rechtlicher Rahmen zum Schutz von Mensch, Ökosystemen und Sachgütern vor schädlichen Umwelteinwirkungen, der durch zahlreiche Verordnungen spezifiziert wird (BImSchG 2016).

Relevant für die räumliche Erfassung potenziell netzgebunden nutzbarer Abwärmeströme in Abgasen aus Verbrennungsprozessen ist die elfte Bundesimmissionsschutzverordnung, die die Betreiber genehmigungspflichtiger Verbrennungsanlagen ab einer Feuerungswärmeleistung von 1 MW zur Abgabe einer Emissionserklärung an die zuständigen Landesbehörden für Immissionsschutz verpflichtet (11.-BImSchV 2013). Die Angaben der Betreiber werden seit 2008 im Vierjahres-Turnus erhoben und von den Landesbehörden in der vom Umweltbundesamt betreuten BUBE-Datenbank digital vorgehalten (Umweltbundesamt 2017). Mit den Emissionserklärungen steht eine bundesweite, homogene Datengrundlage zur Erfassung von Verbrennungsanlagen größer 1 MW vor, auf die erwartungsgemäß ein Großteil des netzgebunden nutzbaren Abwärmepotenzial in im verarbeitenden Gewerbe entfällt.

Ziel der Emissionserklärungen im Sinne der 11. BImSchV ist es, Informationen über Ort und Umfang bestimmter Schadstoffemissionen in die Atmosphäre zu erhalten. Dazu werden in einem gestuften System Emissions-verursachende Vorgänge (EV) definiert und einer genehmigungspflichtigen Anlage zugeordnet, die mit einem individuellen Schlüssel, mit geographischen Punkt-Koordinaten verortet und mit einer Beschreibung der Anlagenart, Angaben zu Leistung und Einheit und einer Anlagennummer nach der 4. BImSchV in der BUBE-Datenbank hinterlegt wird. Genehmigungspflichtige Anlagen(-betreiber) werden seitens der Genehmigungsbehörde einem Wirtschaftszweig nach WZ 2008/ NACE 2006 Rev. 2 zugeordnet. Dabei wird als Kriterium der primäre Anlageneinsatzzweck aus Sicht des Betreiber-Unternehmens zu Grunde gelegt. Bei einer Untergliederung von Unternehmensstrukturen an einzelnen Standorten können so mitunter energetisch integrierte Anlagen verschiedenen Sektoren zugeordnet werden (z.B. Industrie-KWK). Im Gegenzug werden mitunter bei einer hohen Varianz von Produktionsprozessen/-anlagen innerhalb eines Unternehmens Anlagen

mit originär unterschiedlichem primären Anlagenzweck demselben Wirtschaftszweig zugeordnet (z.B. in Chemieparks). Diese Unschärfe der Sektor-Zuordnung muss bei der Interpretation der Daten berücksichtigt werden.

Emissionsverursachende Vorgänge können verschiedene Betriebszustände einer Anlage abbilden (z.B. „Anfahren“, „Teilllastbetrieb“, „Normalbetrieb“). Den EV werden auf der Eingangsseite Mengen [kg/a] und Heizwerte [kJ/kg] gehandhabter Stoffe zugeordnet. Die Art des Stoffes wird weiter nach einer Liste „Emissionsrelevanter gehandhabter Stoffe“ (z.B. „00090290 – Erdgas“) und nach Art des Einsatzes „Brennstoff“ / „Einsatzsstoff“ u.a. differenziert. Auf der Ausgangsseite werden pro EV zusätzlich zur jährlichen Schadstofffracht bestimmter Stoffe [kg/a] Angaben zu Temperaturniveau [°C], durchschnittlichem Volumenstrom [m³/h] und Gesamtdauer [h/a] abgefragt (Abbildung 17). Die Eingabe dieser Parameter ist für den Anlagenbetreiber nicht verpflichtend und in Bezug auf die Systemgrenze und die Methodik der Erhebung nicht einheitlich definiert (Parameter können berechnet, geschätzt oder gemessen werden) (11.-BImSchV 2013).

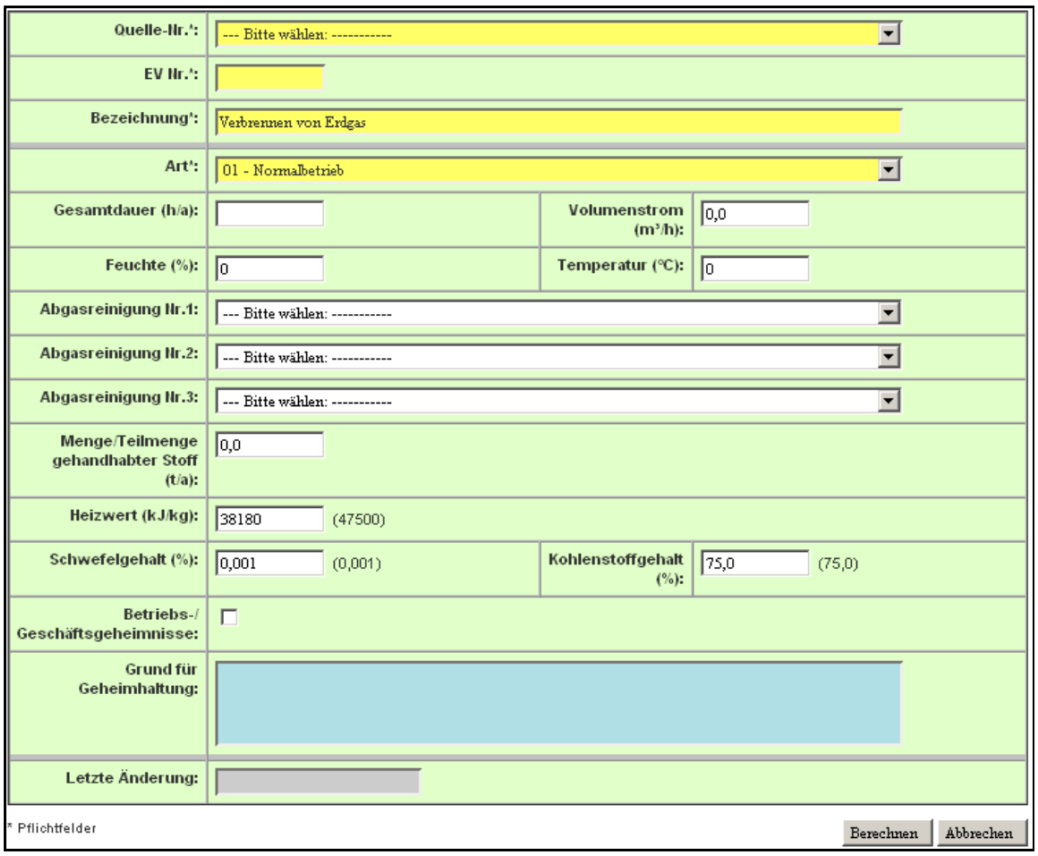


Abbildung 17: Eingabemaske Stoffwerte und Abgasparameter Emissionserklärung 11. BImSchV in BUBE-Online (Bund-/ Länder Kooperation VKoopUIS 2013).

Die Daten zum Stoffeinsatz und zu resultierenden Abgasströmen können für die energetische Bilanzierung thermischer Prozesse an den Betriebsstandorten der genehmigungspflichtigen Anlagen herangezogen werden (Brückner 2016). Dabei sind folgende grundlegenden Beschränkungen zu beachten:

- Die Daten beziehen sich nur auf Rauchgasströme aus genehmigungspflichtigen Anlagen. Prozessabluft oder Abluftströme aus (Kondensations-)kühlanlagen sowie Abwasserströme werden nicht erfasst.
- Die Daten dienen primär der Erfassung von Luftverunreinigungen. Die Ableitung von Energiemengen stellt eine Zweckentfremdung dar, die dafür relevanten Parameter werden nicht verpflichtend und methodisch nicht konsistent erhoben und von den Behörden nicht umfassend auf Plausibilität überprüft.

Im Rahmen des Vorhabens wurden von den zuständigen Stellen aller Bundesländer die Daten für das Berichtsjahr 2012 in Form von zwei Abfragen akquiriert.[1] Dabei wurden in der ersten Abfrage einzelne Brennstoffströme zur Abbildung der Eingangsseite der Energiebilanzen auf Ebene einzelner Industriestandorte und in der zweiten Abfrage die physischen Parameter einzelner Emissionsvorgänge in die Atmosphäre zur Abbildung der Ausgangsseite akquiriert. Grundlegend wurde in Absprache mit den zuständigen Stellen im Land Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen eine Einschränkung auf Emissionsverursachende Vorgänge der Art „Verbrennen von […]“ vorgenommen. Damit werden energetisch schwer zu bilanzierende Vorgänge mit einer Vermischung von Brenn- und Einsatzstoffen (z.B. Zugabe von Steinkohle-Koks in elektrischen Kupol-Öfen) ausgeschlossen.

4.1.2 Emissionsdaten aus dem europäischen Pollutant Release and Transfer Register (E-PRTR)

Zusätzlich zu den Emissionserklärungen nach der 11. BImSchV werden jährlich Standort-bezogene CO_2-Emissionen von Industrieunternehmen auf europäischer Ebene im E-PRTR-Register erfasst. Die Berichtspflicht im Rahmen des E-PRTR ist an die Überschreitung Sektorspezifischer Grenzwerte (in der Regel >100.000 t CO_2/a) gebunden und betrifft den Großteil der Betriebe des verarbeitenden Gewerbes sowie des Energiesektors.

Für die Erfassung der Schadstoffe in Deutschland bildet das deutsche PRTR-Gesetz (SchadRegProtAG) die rechtliche Grundlage. Nach eingehender Prüfung der Angaben der berichtspflichtigen Industriebetriebe werden die Berichte an das Umweltbundesamt weitergeleitet und schlussendlich an die EU für das E-PRTR weitergereicht. Seit 2009 ist das Schadstofffreisetzungs- und –verbringungsregister auch im Internet verfügbar. Das Umweltbundesamt stellt mit dem Portal „Thru.de“ die gesammelten Daten der Öffentlichkeit in Form einer über Punkt-Koordinaten georeferenzierten SQLite-Datenbank zur Verfügung (Umweltbundesamt 2018).

[1] Die Entwicklung und Programmierung der Abfragen mit dem Ziel der Energiebilanzierung erfolgte durch Herrn Steffen Bahn vom Staatlichen Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim, Niedersachsen und von Herrn Friedrich-Wilhelm Schlinkmeier vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, denen an dieser Stelle noch einmal besonderer Dank ausgesprochen werden soll. Durch die Nutzung dieser generischen Abfragen konnte von allen Landesbehörden, für deren Kooperationsbereitschaft ebenfalls noch einmal Dank ausgesprochen werden soll, homogene Datensätze akquiriert werden.

Die Emissionsdaten können genutzt werden, um in einem Top-Down-Verfahren auf jährliche Standort-bezogene Brennstoffeinsätze und daraus resultierende Abwärmemengen zu schließen (vgl. (McKenna 2009; McKenna & Norman 2010; Miró et al. 2016; Manz et al. 2018)). Hierzu werden vereinfachend Emissionsfaktoren auf Basis der Brennstoffeinsätze [GJ] und CO_2-Emissionen [t] über die Gesamtheit der Produktionsprozesse in einzelnen Wirtschaftszweigen aus öffentlichen Statistiken berechnet. Ausgehend von einer Prozessanalyse werden zusätzlich Sektor-typische Anlagenwirkungsgrade, die Effizienz der Brennstoffverbrennung sowie der Anteil der CO_2 –Emissionen, der ausschließlich durch Verbrennungsprozesse verursacht wird, berücksichtigt.

Aus der E-PRTR-Datenbank im SQLite-Format nach (Umweltbundesamt 2018) wurde zunächst ein Auszug beschränkt auf das Emissions-Kompartiment „Luft“ und den Stoff „Kohlenstoffdioxid“ erstellt und in die räumliche Datenbank integriert. Anschließend wurde ein Filter auf das Berichtsjahr 2012 und die untersuchten Sektoren C10-C33, exkl. C19 gesetzt, über den 182 Unternehmensstandorte mit zugeordneten Jahresfrachten an CO_2 [kg] für die Erstellung eines energetischen Modells ausgewählt wurden (Tabelle 10).

Tabelle 10: Standorte und kumulierte CO_2-Emissionen im berichtspflichtigen verarbeitenden Gewerbe nach E-PRTR im Jahr 2012.

	Wirtschaftszweig	**Anzahl Standorte**	**CO_2-Emissionen [kt]**
C10	C10.41 - Herstellung von Ölen und Fetten	1	220
	C10.62 - Herstellung von Stärke und Stärkeerzeugnissen	1	173
	C10.81 - Herstellung von Zucker	10	1,531
C16	C16.21 - Herstellung von Furnier-, Sperrholz-, Holzfaser- und Holzspanplatten	3	889
C17	C17.11 - Herstellung von Holz- und Zellstoff	1	1,830
	C17.12 - Herstellung von Papier, Karton und Pappe	23	5,326
	C17.22 - Herstellung von Haushalts-, Hygiene- und Toilettenartikeln aus Zellstoff etc.	1	272
	C17.23 - Herstellung von Schreibwaren und Bürobedarf aus Papier, Karton und Pappe	1	106
C20	C20.11 - Herstellung von Industriegasen	3	881
	C20.12 - Herstellung von Farbstoffen und Pigmenten	3	711
	C20.13 - Herstellung von sonstigen anorganischen Grundstoffen und Chemikalien	12	5,445
	C20.14 - Herstellung von sonstigen organischen Grundstoffen und Chemikalien	16	14,109
	C20.15 - Herstellung von Düngemitteln und Stickstoffverbindungen	2	3,650
	C20.16 - Herstellung von Kunststoffen in Primärformen	5	3,581
	C20.59 - Herstellung von sonstigen chemischen Erzeugnissen a. n. g.	2	504
	C20.6 - Herstellung von Chemiefasern	1	157
C21	C21.2 - Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen	1	116
C23	C23.11 - Herstellung von Flachglas	6	794
	C23.13 - Herstellung von Hohlglas	1	124
	C23.19 - Herstellung, Veredlung und Bearbeitung von sonstigem Glas	1	109
	C23.51 - Herstellung von Zement	33	19,980
	C23.52 - Herstellung von Kalk und gebranntem Gips	18	6,747
C24	C24.1 - Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen	22	35,903
	C24.2 - Herstellung von Stahlrohren	1	104
	C24.31 - Herstellung von Blankstahl	1	104
	C24.42 - Erzeugung und erste Bearbeitung von Aluminium	5	900
	C24.43 - Erzeugung und erste Bearbeitung von Blei, Zink und Zinn	1	115
	C24.44 - Erzeugung und erste Bearbeitung von Kupfer	2	341
	C24.51 - Eisengießereien	1	213
C25	C25.61 - Oberflächenveredlung und Wärmebehandlung	1	115
C29	C29.1 - Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenmotoren	3	623
	Summe	**182**	**105,673**

4.1.3 Standorte relevanter thermischer Prozessstromeinsätze

Analog zu Verbrennungsprozessen, die in den BImSchV-Daten erfasst sind oder über CO_2-Emissionen aus der E-PRTR-Datenbank räumlich verortet werden können, fällt auch bei einigen strombasierten Verfahren potenziell netzgebunden nutzbare Abwärme an. Zur Abschätzung der theoretischen Potenziale wurde eine umfassende Literaturrecherche zur Bestimmung thermischer Stromeinsätze und resultierender Abwärmemengen durchgeführt.

Unter anderem (Benndorf et al. 2014) und (Schlomann et al. 2013) haben hierzu bereits detaillierte Prozess-spezifische Analysen für die energieintensiven Industriesektoren durchgeführt. Während einige der Prozesse nur auf einem recht niedrigen Temperaturniveau stattfinden und nur ein geringes nutzbares Abwärmepotenzial aufweisen (z.B. Infrarotstrahler in der Lebensmittelindustrie), werden in der Grundstoffindustrie der Sektoren C20, C24 und C23 deutlich energieintensivere elektrothermische Verfahren, die für eine Abschätzung theoretischer netzgebunden nutzbarer Abwärmepotenziale betrachtet werden können. Basierend auf den genannten Studien wurden in diesem Kontext zunächst zehn Verfahren mit hohen Temperaturniveaus und hohen Stromeinsätzen als relevant identifiziert (Tabelle 11).

Tabelle 11: Untersuchte elektrothermische Verfahren in der energieintensiven Industrie.

Direkte elektrothermische Verfahren	Stahlschmelze im Elektrolichtbogenofen (C2410)
	Schmelzen von Eisen und Stahl im Induktionsofen (C2451/ C2452)
	Schmelzen von NE-Metallen in Induktionsofen (C2453/C2454)
	Schmelzen von Glas im Induktionsofen (C2311 bis C2319)
	Herstellung von Calciumcarbid im Elektrolichtbogenofen (C2013)
Elektrolyse	Aluminium-Schmelzflusselektrolyse (NACE Sektor 2442)
	Kupferelektrolyse (NACE Sektor 2444)
	Zinkelektrolyse (NACE Sektor 2443)
	Chloralkalielektrolyse (NACE Sektor 2013)
Weitere Verfahren	Schwefelsäureherstellung im Doppelkontaktverfahren (C2013)[1]

Zur Quantifizierung des theoretischen Abwärmepotenzials wurden für die genannten Verfahren anhand einer umfassenden Literaturrecherche spezifische Kennzahlen zu Stromeinsätzen und Abwärmemengen bezogen auf die Produktionsmenge [GJ/t] zusammengestellt und mit Angaben zu mittleren Temperaturniveaus in den Prozessen und in den verbleibenden Abwärmeströmen sowie zu Trägermedien (Wasser/Luft) und Charakteristika der Abwärme-Emission (gefasst/diffus) verknüpft (ebd., European IPPC Bureau 2014, 2007; Gils 2013; Benndorf et al. 2014).

Die Daten wurden anschließend mit Standort-spezifischen Angaben zu Produktionsmengen und weiteren verfahrenstechnischen Differenzierungen – z.B. Anwendung von Amalgam-,

[1] Die Herstellung von Schwefelsäure bildet unter den aufgelisteten Verfahren eine Ausnahme. Der Stromeinsatz ist relativ gering und bezieht sich primär auf elektrische Energie für Ventilatoren und andere mechanische Antriebe. Da die Herstellung von Schwefelsäure ausgehend von der Verbrennung von Schwefel und schwefelhaltigen Abgasen aus metallurgischen Prozessen (Herstellung von Zink, Kupfer) aber stark exotherm ist und die daraus resultierende Abwärme nicht eindeutig in den BImSchV-Berichten enthalten ist, wurde auch dieses Verfahren bei der Standortanalyse betrachtet.

Diaphragma- oder Membran-Verfahren bei der Chloralkalielektrolyse mit jeweils unterschiedlichen spezifischen Energiekennzahlen – zusammengeführt. Dabei wurden u.a. die Standort-spezifischen Angaben von (Schlomann et al. 2013) aufbereitet und auf Standort-Ebene um Branchen-spezifische Informationen aus Publikationen von Unternehmen und Verbänden ergänzt, um eine möglichst korrekte Abbildung technischer Verfahrensparameter und aktueller Produktionsmengen zu gewährleisten.

Insgesamt konnten so die Abwärmemengen von 116 Anlagen ermittelt und verortet werden. Bezogen auf den Endenergieverbrauch werden an diesen Standorten mit 110 PJ rund drei Viertel des deutschlandweiten Prozessstromverbrauchs für Wärmeanwendungen in der Industrie in Deutschland abgedeckt.[1] Im Abgleich mit der Anwendungsbilanz der Endenergieeinsätze Strom für Prozesswärme im Jahr 2014 werden mit in Summe 44.9 PJ Stromeinsatz in den drei Verfahren Schwefelsäure, Calciumkarbidherstellung und vor allem Chloralkalielektrolyse die Prozessstromeinsätze in der Grundstoffchemie (C20.1) vollständig abgebildet. Gleiches gilt für die verorteten 24.8 PJ Stromeinsatz in Elektrostahlöfen bzw. der Erzeugung von Eisen- und Stahl (C24.1). Die Stromeinsätze in den Sektoren Nicht-Eisen-Metalle und in Gießereien (C24.4, C24.5) werden mit in Summe 40.6 PJ ggü. 36.4 PJ in den Anwendungsbilanzen 2014 leicht überschätzt (vgl. Kapitel 2.2, (Rohde 2017)).

In Bezug auf die außerbetrieblich nutzbaren Abwärmemengen aus den elektrothermischen Verfahren wurden Standort-spezifische Faktoren berücksichtigt. So wurde angesichts der Integration der identifizierten Chloralkali-Anlagen in größere Chemieparks unterstellt, dass die anfallende Abwärme branchen-typisch (umfassende Wärmeintegration) bereits vollständig genutzt wird (Schlomann et al. 2013). Der einzige Hersteller von Calciumcarbid in Deutschland koppelt bereits den Großteil seiner Abwärme aus und vertreibt diese an einen nahegelegenen gewerblichen Kunden. Somit verbleiben 91 Standorte mit potenziell nutzbarer Abwärme aus elektrothermischen Prozessen. Das berechnete Abwärmepotenzial der in Luft und Kühlwasser gefassten Abwärme beträgt für diese Standorte insgesamt rund 22 PJ (Tabelle 12).

[1] Eine weiterführende dezidierte Standortrecherche einzelner strombetriebener Schmelzöfen sowie deren Produktionsparameter für die Bestimmung der Abwärmemengen wurde zunächst über die Lieferantenrecherche des Bundesverbands der Deutschen Gießerei-Industrie e.V. (BDG) begonnen. Dort können über eine Suchmaske verschiedene Schmelzeinrichtungen (Induktionsofen, Lichtbogenofen, widerstandsbeheizter Ofen) in Gießereien abgefragt werden. Diese Art der Datenheuristik ist jedoch angesichts der recht geringen kumulierten Stromeinsätze und Abwärmepotenziale auf Standortebene im Verhältnis zu anderen elektrothermischen Verfahren sehr aufwendig und konnte deshalb nur für rund 50 Gießereibetriebe durchgeführt werden.

Tabelle 12: Ermittelte Energieeinsätze und gefasste Abwärmemengen als theoretische Potenziale für eine netzgebundene Nutzung.

Verfahren	Wirtschafts-zweige	Anzahl Standorte	Produktions-menge [t/a]	Bezugsjahre	Spezif. Stromeinsatz [GJ/t]*	∑ Stromeinsatz [PJ]	Spezif. Abwärmemenge gefasst [GJ/t]	∑ Abwärme-menge gefasst [PJ]	Temperatur Abwärme gefasst [°C]	Träger-medium
Schwefelsäureherstellung	C2012	14	3,525,178	2007	153.0	0.5	2.4 / 3.4*	10.0	120	Luft
	C2013			2011						
	C2014			2015						
	C2443									
	C2444									
Calciumcarbid	C2013	1	130,000	2015	12.0	1.6	0	0.0	0	Luft
Chloralkalielektrolyse	C2013	25	4,357,000	2006	12.1	42.7	0	0.0	0	Luft
				2009	8.75					
				2010	9.54					
				2012	9.79					
Glasschmelze	C2311	3	1,000	2012	0.5	0.0	0	0.0	0	Luft
	C2313				0.7					
	C2319				2.0					
Elektrostahlofen	C2410	18	12,545,000	2013	2.0	24.8	0.61	7.7	250	Luft
				2014						
				2015						
				2016						
Aluminiumelektrolyse	C2442	12	752,000	2012	48.6	36.5	4.91	3.7	100	Luft
Zink-Elektrolyse	C2443	1	130,000	2013	12.2	1.6	0.00	0.0	0	Luft
Kupfer-Elektrolyse	C2444	2	576,000	2011	1.3	0.8	0.00	0.0	0	Luft
Eisenguss	C2451	23	752,000	2012	2.3	1.7	0.46	0.3	80	Wasser
				2016						
Stahlguss	C2452	7	68,000	2012	2.3	0.1	0.46	0.0	80	Wasser
Aluminiumguss	C2453	7	12,000	2012	1.6	0.0	0.46	0.0	80	Wasser
				2016						
Kupferguss	C2454	3	2,000	2012	0.9	0.0	0.46	0.0	80	Wasser
Summe		**116**				**110.3**		**21.7**		

** Varianz durch Standort-spezifische Unterschiede bei der Verfahrenstechnik*

4.1.4 BISNODE-Firmendatenbank

Eine weitere Option zur räumlichen Verortung von Unternehmen in Sektoren des verarbeitenden Gewerbes mit relevanten Endenergieeinsätzen zur Prozesswärmeerzeugung besteht in der Aufbereitung von Firmen-Registern. Diese enthalten neben Angaben zu Wirtschaftszweig, Wirtschaftlichen Kennzahlen (Jahresumsatz etc.) oder Mitarbeiterzahlen auch Adress- und Kontaktinformationen. Firmen-Register werden u.a. von regionalen Industrie- und Handelskammern oder bundesweit von privaten Anbietern wie der BISNODE Deutschland GmbH vermarktet.

Zur Ergänzung von Kontaktinformationen, die als Grundlage der Ansprache von Unternehmensvertretern im Rahmen der durchgeführten Unternehmensumfrage und der Praxisfallstudien benötigt wurden, wurde im Rahmen des Projektes ein Zugang zu Unternehmensdaten von 36,700 Betrieben des verarbeitenden Gewerbes im Jahr 2016/2017 in der BISNODE-Firmendatenbank (ehem. Hoppenstedt-Firmendatenbank) erworben. Diese enthalten ebenfalls Angaben zu Mitarbeiterzahlen und Jahresumsatz auf Ebene einzelner Betriebe. Über hinterlegte Anschriften wurden diese Daten in einem automatisierten Verfahren geocodiert und in die räumliche Datenbank integriert.

4.1.5 Referenzdaten

Für einen Abgleich der aufbereiteten räumlichen Datengrundlagen zur Verortung von Brennstoffeinsätzen und Abwärmemengen wurden die Energiebilanzen der Länder für das Bezugsjahr 2012 als Referenzdatengrundlage aufbereitet (Länderarbeitskreis (LAK) Energiebilanzen 2018). Diese ermöglichen eine Differenzierung von Endenergieeinsätzen nach 18 Sektoren des verarbeitenden Gewerbes und nach Art der eingesetzten Endenergieträger – darunter auch verschiedene Brennstoffe – auf Ebene einzelner Bundesländer.

Die Energiebilanzen der Länder enthalten keine Angaben zum Anwendungsbereich der Endenergieeinsätze und erlauben deshalb keine direkten Rückschlüsse auf die Prozesswärme-Anteile. Sie können jedoch in Analogie zu (Brückner 2016) zur Identifikation von Ausreißern pro Sektor und Bundesland in der räumlichen Datengrundlage verwendet werden.

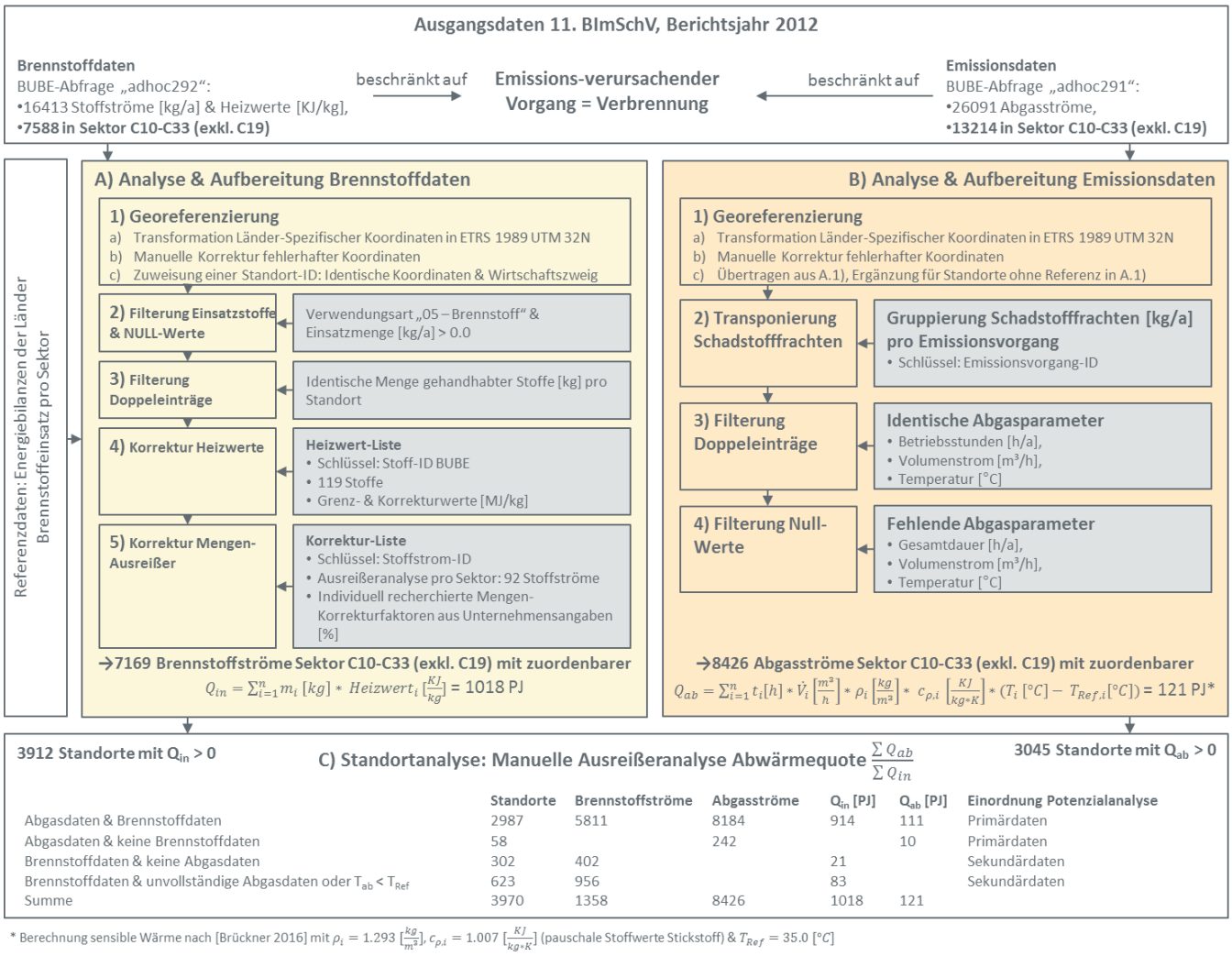
Für einen Abgleich der ermittelten Anzahl an Standorten wurden Publikationen des Bundesamtes für Statistik ausgewertet. Demnach waren im Referenzjahr 2012 22,336 Betriebe des verarbeitenden Gewerbes mit mehr als 50 Mitarbeitern in Deutschland registriert (Destatis 2012). Insgesamt sind für das Jahr 2014 44,118 Betriebe dem verarbeitenden Gewerbe der Sektoren C10-C33, exkl. C19 zugeordnet (Destatis 2015)

4.2 Datenaufbereitung

4.2.1 Emissionserklärungen nach 11. BImSchV

Die Daten aus den Emissionserklärungen wurden zunächst separat für die zwei durchgeführten Abfragen A) der Brennstoffdaten und B) der Emissionsdaten aus der BUBE-Datenbank (Datenschema in Anhang 2) aufbereitet und anschließend auf Ebene einzelner Standorte zur Ableitung einer konsistenten Datengrundlage für die räumliche Potenzialanalyse abgeglichen. Dabei wurde eine grundlegende Einschränkung auf jene Datensätze vorgenommen, die als Emissions-verursachenden Vorgang einem Verbrennungsprozess zugeordnet sind.

Der Ablauf der Analyse und Aufbereitung ist in Abbildung 18 dargestellt, die einzelnen Arbeitsschritte werden nachfolgend ausgeführt.



	Standorte	Brennstoffströme	Abgasströme	Q_{in} [PJ]	Q_{ab} [PJ]	Einordnung Potenzialanalyse
Abgasdaten & Brennstoffdaten	2987	5811	8184	914	111	Primärdaten
Abgasdaten & keine Brennstoffdaten	58		242		10	Primärdaten
Brennstoffdaten & keine Abgasdaten	302	402		21		Sekundärdaten
Brennstoffdaten & unvollständige Abgasdaten oder $T_{ab} < T_{Ref}$	623	956		83		Sekundärdaten
Summe	3970	1358	8426	1018	121	

Abbildung 18: Schematische Darstellung Datenaufbereitung Emissionserklärungen nach der 11. BImSchV Berichtsjahr 2012 für die räumliche Potenzialanalyse.

A) Analyse & Aufbereitung Brennstoffdaten

Den Ausgangspunkt der Aufbereitung bildete die Integration der Daten einzelner Brennstoffeinsätze in eine objektrelationale Postgres-Datenbank mit räumlicher PostGIS-Erweiterung, um eine effiziente Daten-Handhabung und eine direkte Georeferenzierung der Datensätze über angegebene Koordinaten der Anlagenstandorte auf den Betriebsgeländen zu ermöglichen. Die unterschiedlichen Koordinaten-Referenzsysteme (zwischen Bundesländern und teilweise auch innerhalb) wurden einheitlich in das Referenzsystem ETRS 1989, UTM 32N überführt und fehlerhafte Koordinaten-Angaben manuell bereinigt. Im Anschluss wurde ein Auszug der Datensätze in den Zielsektoren über die angegebenen Wirtschaftszweige nach NACE-Systematik C10-C33, exkl. C19 durchgeführt. Mit diesem Schritt wurden explizit nur jene Anlagen ausgewählt, deren primärer Zweck in der Produktion von Wirtschaftsgütern in den entsprechenden Sektoren des verarbeitenden Gewerbes verortet wird.

Aufbauend auf eine Analyse der Varianz und Lagegenauigkeit der Verortung von Anlagenstandorten bzw. Brennstoffeinsätzen und Emissionsströmen wurde eine Aggregation der Daten auf Ebene von Betriebsstandorten über die Zuweisung eines Standort-Schlüssels für identische Koordinaten und bei identischem Wirtschaftszweig durchgeführt. Diese Aggregationsebene wurde gewählt, da in der Datengrundlage bei der Angabe der geographischen Koordinaten in der Regel nicht zwischen den genauen Standorten einzelner Anlagen auf den Betriebsgeländen differenziert wurde, sodass die Koordinaten bei der Bereinigung von Doppeleinträgen in einem automatisierten Verfahren als durchgängige Datenebene genutzt werden können und manuell recherchierte Referenzangaben zum Energieeinsatz seitens der Betreiberunternehmen direkt abgeglichen werden können. An rund 3,200 der bundesweit 3,900 über Koordinaten abgegrenzten Standorte befindet sich nur jeweils eine berichtspflichtige Anlage, rund 450 Standorte repräsentieren zwei zusammengefasste Anlagen und weitere 135 Standorte drei bis vier Anlagen, an 20 Standorten werden fünf bis maximal zehn Anlagen zusammengefasst betrachtet. Durch die zusätzliche Differenzierung nach Wirtschaftszweigen bei identischen Koordinaten werden 21 zusätzliche Standorte ausgewiesen.

Tabelle 13: Vergleich Datenpunkte in den aufbereiteten Brennstoffdaten der BUBE-Abfrage „adhoc292“ nach möglichen Aggregationsebenen. Hervorgehoben vollständig fehlende Angaben auf Grund von Datenschutzbedenken der zuständigen Landesstellen.

	Anzahl													
	Koordinaten		Betreiber		Anlagen-Nummern (AST)		Anlagenbeschreibungen (nach 4. BImschV)*		Anlagenbeschreibungen (offen durch Betreiber)*		Brennstoffströme		**Brennstoffeinsatz Qin [PJ]**	
Bundesland	Rohdaten	Aufbereitet	Rohdaten	Aufbereitet	Rohdaten	Aufbereitet	Rohdaten	Aufbereitet	Rohdaten	Aufbereitet	Rohdaten	Aufbereitet	Rohdaten	Aufbereitet
Schleswig-Holstein	46	45	45	44	46	45	58	56	63	60	95	90	50	24
Hamburg	53	53	1	1	55	55	68	68	79	79	115	113	9	9
Niedersachsen	439	430	424	415	440	431	560	543	623	601	876	807	356	198
Bremen	24	23	0	0	25	24	27	26	30	29	39	37	5	5
Nordrhein-Westfalen	1,034	1,011	1	1	1,063	1,037	1,315	1,271	1,522	1,453	1,990	1,846	271	259
Hessen	229	227	218	216	232	230	269	267	345	338	458	446	41	36
Rheinland-Pfalz	218	213	0	0	222	216	262	253	279	268	378	360	77	47
Baden-Württemberg	491	485	0	0	0	0	587	576	656	639	857	819	74	74
Bayern	661	659	657	655	665	663	802	796	968	955	1,297	1,247	148	139
Saarland	41	41	41	41	41	41	51	51	98	87	120	108	16	10
Berlin	27	25	28	26	28	26	33	31	44	41	56	52	3	3
Brandenburg	111	110	105	104	111	110	130	127	144	141	209	202	33	32
Mecklenburg-Vorpommern	54	53	1	1	54	53	72	68	76	72	106	101	13	9
Sachsen	242	240	239	237	242	240	289	286	332	327	424	408	118	37
Sachsen-Anhalt	135	129	131	125	135	129	176	168	220	208	318	290	124	89
Thüringen	147	145	147	145	151	149	168	165	190	185	250	243	94	47
	3,952	**3,889**	**2,038**	**2,011**	**3,510**	**3,449**	**4,867**	**4,752**	**5,669**	**5,483**	**7,588**	**7,169**	**1,429**	**1,018**

*vorgruppiert auf Ebene identischer Koordinaten

Tabelle 13 zeigt die Entwicklung der Datenpunkte von den Rohdaten zum Brennstoffeinsatz in den Zielsektoren C10 bis C33, exkl. C19 bis zum aufbereiteten Datensatz für die Standortanalyse für die einzelnen Bundesländer. In den Rohdaten waren in sechs Bundesländern Angaben zu Name und Anschrift des Anlagenbetreibers aus Datenschutzgründen nicht enthalten. In Baden-Württemberg fehlte zusätzlich der individuelle Anlagen-Schlüssel.

Die Aufbereitung der Daten erfolgte durch die priorisierte Anwendung generischer Korrekturregeln (Schritte 2 und 3) und einer nachgelagerten Anwendung spezifischer, manuell erstellter Korrekturwerkzeuge für die Heizwertangaben und Ausreißer bei den Angaben von Brennstoffmengen (Schritte 4 und 5). Die Entwicklung des Mengengerüsts der Eingangsdaten auf Bundesebene in Abhängigkeit der angewandten Aufbereitungsschritte ist in Tabelle 14 dargestellt. Bei der Kalibrierung der Einsatzmengen wurden Brennstoffeinsätze nach Bundesländern und Sektoren des verarbeitenden Gewerbes als Referenzdaten verwendet.

Tabelle 14: Quantifizierung der Aufbereitungsschritte in Bezug auf den Umfang der Daten zum Brennstoffeinsatz auf Bundesebene.

Aufbereitungsschritt	Standorte	Brennstoffströme	Brennstoffeinsatz Qin [PJ]
1) Georeferenzierte Rohdaten	3954	7588	1,429
2a) Filter Einsatzmenge > 0 [kg/a]	3930	7473	1,429
2b) Filter Verwendung = '05 - Brennstoff'	3916	7310	1,305
3) Filter Doppeleinträge pro Standort	3916	7216	1,296
4) Korrektur Heizwertangaben [kJ/kg]	3916	7216	1,316
5) Korrektur Ausreißer Einsatzmengen [kg]	3912	7169	1,018

In den Ausgangsdaten wurden zunächst vorhandene Attribute zur Bereinigung genutzt. Diese umfasste eine Filterung aller Stoffeinsätze mit Einsatzmengen = 0 [kg/a] und einer Beschränkung auf Stoffeinsätze mit der Verwendung ‚05 – Brennstoff'. Mit der Filterung von Einsatzmengen=0 [kg/a] werden 114 Stoffströme an 27 Standorten primär der Sektoren C23 und C20 und nachrangig der Sektoren C24, C25 und C28 aussortiert, die in der Datengrundlage als Betriebsgeheimnis seitens der Anlagenbetreiber gekennzeichnet sind. Über die Beschränkung auf Brennstoffe wurden bundesweit 163 Stoffströme mit einem angegebenen kumulierten Heizwert von 124 PJ aussortiert. Die gefilterten Daten enthalten in Bezug auf die Anzahl der Stoffeinsätze überwiegend kleine Mengen an Einsatzstoffen oder unplausible/fehlerhafte Angaben zu Brennstoffeinsätzen, die nicht einer Energiebilanz zu berücksichtigen sind. So entfallen allein 70 PJ auf einen als Einsatzstoff gekennzeichneten Einsatz von Erdgas eines Glasfaser-Herstellers, obwohl in der betreffenden Länderstatistik lediglich 7,5 PJ Erdgaseinsatz im betreffenden Sektor C23 verzeichnet sind.

In einem weiteren Schritt wurden Doppeleinträge, definiert als identische Angabe zur Menge des eingesetzten Stoffes [kg/a] pro Standort, gefiltert. Mehrfach enthaltene Einsatzmengen resultieren u.a. durch die Struktur der Abfrage, die sich auf die Erfassung der Daten einzelner Emissions-verursachender Vorgänge bezieht. So werden verschiedenen EVs an einem Standort auf der Eingangsseite teilweise dieselben Stoffströme zugeordnet. Auf Ebene der Anlagen werden identische Stoffströme teilweise mehreren Anlagen zugeordnet, sind jedoch nur einmal für eine energetische Bilanzierung relevant (z.B. Zuordnung eines Stoffe-

insatzes Steinkohle an einem Standort 1. zu einem Mahlwerk und 2. zu einer Verbrennungsanlage). Zudem sind in den Daten einiger Anlagen, die im Parallelbetrieb arbeiten, einzelne Einsatzmengen zunächst getrennt und noch einmal kumuliert angegeben.

Im Anschluss an diese generischen Korrekturen wurde eine Korrektur der angegebenen Heizwerte über eine externe Heizwertliste durchgeführt, die über die hinterlegte Stoff-ID aus der BUBE-Datenbank verlinkt wurde (Anhang 3). Zur Eliminierung von Ausreißerwerten bzw. Fehlangaben in den Ausgangsdaten wurden für jeden Brennstoff obere und untere Grenzen des Heizwerts von +/- 5 [MJ/kg] definiert, bei deren Unter- bzw. Überschreitung eine Übertragung eines pauschalen Heizwerts aus Sekundärliteraturangaben erfolgte.[1] Durch diese Korrektur wurden rund 10 PJ zusätzlicher Brennstoffeinsätze in der Datengrundlage abgebildet.

Als finale Korrekturmaßnahme erfolgte eine manuelle Ausreißeranalyse sehr hoher Brennstoffeinsätze von mehr als 1 PJ in einzelnen Brennstoffströmen. Dabei wurden zu 23 Standorten aus Publikationen der Unternehmen zu Energieeinsätzen und Produktionsmengen im Abgleich mit durchschnittlichen spezifischen Kennzahlen des Energieeinsatzes pro Produktionseinheit aus der Sekundärliteratur Korrekturfaktoren für die einzelnen Brennstoffströme in einer Liste hinterlegt, die über die Stoffstrom-ID mit der Datengrundlage verlinkt wurde.[2] Über die manuell erstellte Korrekturliste wurden 57 Brennstoffströme in Bezug auf den hinterlegten kumulierten Heizwert [PJ] nach unten korrigiert und weitere 35 Brennstoffströme auf Grund unplausibler Werte oder einer erfolgten Schließung der Betriebsstandorte vollständig gefiltert. Damit wurden weitere rund 300 PJ Brennstoffeinsätze aus der räumlichen Datengrundlage gefiltert.

Mit diesem letzten Schritt der Datenaufbereitung wurde ein finaler Brennstoffeinsatz von 1018 PJ, verteilt auf 7169 Brennstoffströme an 3912 Standorten des verarbeitenden Gewerbes aus den Emissionserklärungen nach der 11. BImSchV im Berichtsjahr 2012 verortet.

B) Analyse und Aufbereitung Emissionsdaten

Die Emissionsdaten enthalten Angaben zu Betriebsstunden [h/a], durchschnittlichem Volumenstrom [m³/h] und zur Temperatur [°C] von Rauchgasströmen, die zur Berechnung sensibler Wärmemengen Q_{ab} im Verhältnis zu einer Referenztemperatur T_{Ref} nach folgender Formel genutzt werden können:

$$Q_{ab} = \sum_{i=1}^{n} t_i[h] * \dot{V}_i \left[\frac{m^3}{h}\right] * \rho_i \left[\frac{kg}{m^3}\right] * c_{\rho,i} \left[\frac{KJ}{kg * K}\right] * (T_i[°C] - T_{Ref,i}[°C])$$

[1] Durch die Toleranzgrenze werden qualitative Differenzen der Brennstoffe berücksichtigt. Einsatzstoffe mit einem Heizwert kleiner 6 MJ/kg wurden von der Korrektur ausgeschlossen. In diesem Bereich liegen Brennstoffe die abhängig von ihrer Zusammensetzung und dem Wassergehalt naturgemäß stark unterschiedliche Heizwerte aufweisen (z.B. Hölzer, Synthese-/Gichtgas, Klärschlamm). Durch eine Korrektur würden die Input-Daten potenziell verfälscht werden.

[2] Spezifische Energiekennzahlen wurden für einzelne Wirtschaftszweige den Best Available Techniques Reference Documents (BREFs) der EU-Kommission entnommen (http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/ , Zugriff: 22.10.2018)

Mit:

$$\rho_i = 1.293\ [\frac{kg}{m^3}]$$

$$c_{\rho,i} = 1.007\ [\frac{KJ}{kg * K}]$$

$$T_{Ref,i} = 35.0\ [°C]$$

Dabei werden für die Parameter ρ_i (Dichte) und $c_{\rho,i}$ (Spezif. Wärmekapazität) pauschale Stoffwerte von Stickstoff verwendet, dessen Volumenanteil bei Verbrennungsvorgängen mit Umgebungsluft mit 75-85% in den Rauchgasströmen dominiert. Als Referenztemperatur zur Abschätzung theoretischer Abwärmepotenziale wird in Anlehnung an Brückner eine Referenztemperatur T_{Ref} von 35°C definiert.

Die abgefragten Emissionsdaten aus der BUBE-Datenbank enthielten zudem Angaben zur Jahresfracht korrosiver oder blockierener Stoffe in den Abgasströmen, die zur Bewertung eventueller zusätzlicher Kosten für eine Abgasaufbereitung oder eine Reinigung von Wärmetauschern mit abgefragt wurden.[1] Neben der Georeferenzierung, die in Analogie zu der unter A) beschriebenen Aufbereitung der Eingangsdaten durchgeführt wurde, erfolgte eine Transponierung der Schadstofffrachten in Attribute einzelner Emissionsvorgänge. Auf dieser Grundlage wurden pro Standort Emissionsvorgänge mit identischen Abgasparametern Betriebsstunden, Volumenstrom und Temperatur gefiltert. Identische Abgasströme resultierten u.a. aus der Struktur der Datenabfrage, die sich auf Emissions-verursachende Vorgänge bezieht. Dadurch werden für verschiedene Betriebszustände einer Anlage (Normalbetrieb, Anfahren, Teillast etc.) mitunter identische Abgasparameter im Mittel des Berichtsjahres zugeordnet.

In einem nächsten Schritt wurden Emissionsvorgänge mit fehlenden Abgasparametern bzw. Nullwerten analysiert und eine Ergänzung anhand mittlerer Sektor-spezifischer Parameter abgeleitet aus vollständigen Datensätzen geprüft. Die a-priori-Korrektur einzelner Abgasparameter für die Bilanzierung sensibler Wärmemengen in Rauchgasströmen wurde jedoch zunächst zu Gunsten einer Standort-spezifischen Analyse von Eingangs- und Ausgangsmengen zurückgestellt, um ggf. vorhandene theoretische Abwärmepotenziale von den aufbereiteten Brennstoffeinsätzen als Referenzgröße mittels Sektor-typischer Abwärmequoten abzuleiten und die erforderlichen Parameter für die Bewertung einer netzgebundenen Nutzungsmöglichkeit Temperatur im Zuge der räumlichen Potenzialanalyse im Nachgang zu ergänzen.

Die Aufgliederung der aufbereiteten Emissionsdaten nach Bundesländern ist in Tabelle 15 dargestellt. Die höchsten Potenziale werden aus den Daten Standorten in Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen und Bayern zugeordnet. Bei der Bewertung der räumlichen Verteilung sind fehlende Datensätze, die als „Betriebsgeheimnisse“ der Anlagenbetreiber klassifiziert sind und nicht ausgegeben werden, zu berücksichtigen (Abbildung 19). Im Abgleich mit den Referenzdaten der Länderstatistiken zeigen sich hier konzentrierte Datenlücken bei der Erfassung von Standorten der Eisen- und Stahlherstellung (C24.1) in Bremen und im Saarland

[1] Abgefragt wurden die Jahresfrachten [kg/a] pro Rauchgasstrom von sieben Stoffen: Staub, Ammoniak (NH_3), Stickstoffdioxid (NO_2), Chlorwasserstoff (HCL), Fluorwasserstoff (HF), Schwefeldioxid (SO_2) und Schwefeloxide (SO_x) angegeben in SO_2-Äquivalent.

sowie der chemischen Industrie (C20) in Rheinland-Pfalz. Auch in Nordrhein-Westfalen werden viele Standorte des Sektors C24 nicht erfasst.

Tabelle 15: Aufbereitete Emissionsdaten nach Bundesländern.

Bundesland	Anzahl Standorte	Anzahl Abgasströme $Q_{ab} > 0$	Abwärmemenge Q_{ab} [PJ]	Fehlende Abgasparameter unter Angabe "Betriebsgeheimnis"	
				Standorte	*Emissionsvorgänge*
Schleswig-Holstein	37	141	2.0	1	1
Hamburg	30	100	3.0	3	11
Niedersachsen	302	950	21.0	6	10
Bremen	17	44	1.3	4	35
Nordrhein-Westfalen	859	2,792	38.3	33	249
Hessen	184	449	3.1	9	81
Rheinland-Pfalz	157	411	4.6	7	611
Baden-Württemberg	358	791	7.0	14	33
Bayern	496	1,195	15.8	12	52
Saarland	25	93	1.5	6	137
Berlin	21	63	0.6	0	0
Brandenburg	94	230	5.0	4	26
Mecklenburg-Vorpommern	45	96	1.4	1	1
Sachsen	180	490	5.0	3	8
Sachsen-Anhalt	117	298	7.4	2	3
Thüringen	123	283	3.6	4	10
	3,045	**8,426**	**120.6**	**109**	**1,268**

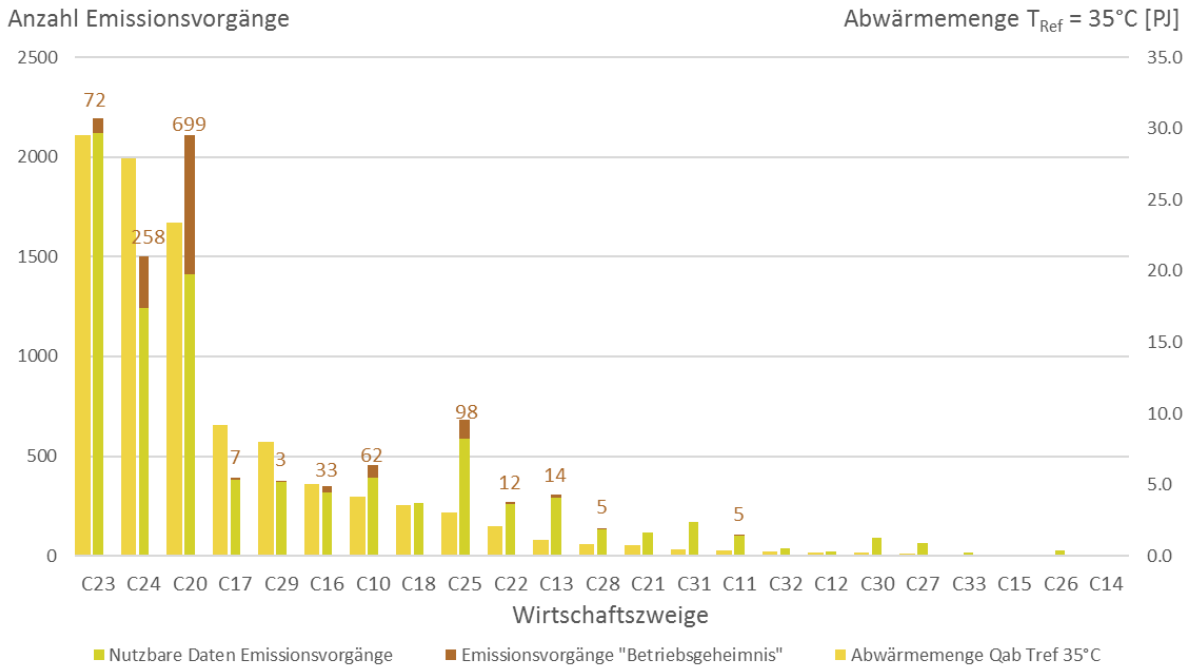


Abbildung 19: Abwärmemenge bei $T_{Ref}35°C$ und fehlende Daten von Emissionsvorgängen auf Grund einer Kennzeichnung als „Betriebsgeheimnis“ in der BUBE-Datenbank nach Wirtschaftszweigen.

Bei der Quantifizierung nutzbarer Abwärmemengen spielt die definierte Wärmesenken- bzw. Referenztemperatur eine zentrale Rolle. Zwar müssen bei der Auswertung der Temperaturangaben als Parameter der Emissionsvorgänge die Unsicherheiten in Bezug auf die angewandte Systemgrenze und die Methode der Erfassung durch den Anlagenbetreiber bedacht werden, dennoch verdeutlicht ein Vergleich unterschiedlicher Referenztemperaturen die starke Sensitivität der Potenzialabschätzung in Abhängigkeit von T_{Ref}. So verringert sich die berechnete sensible Abwärmemenge bei einer Anhebung der Referenztemperatur von 35°C auf 95°C um knapp 50% (Abbildung 20).

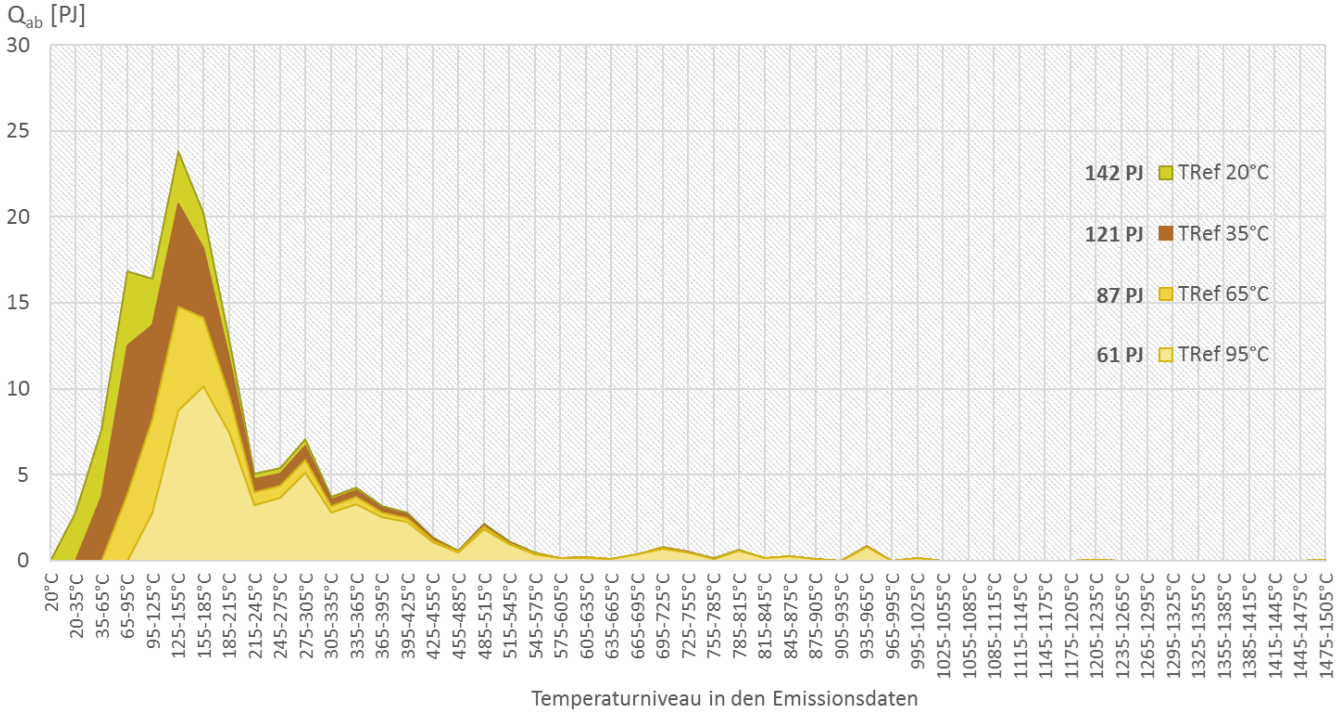


Abbildung 20: Sensible Abwärmemenge in den Emissionsdaten in Abhängigkeit verschiedener Referenztemperaturen $T_{Ref}\,[°C]$.

C) Standortanalyse

Im Rahmen der Standortanalyse wurden die aufbereiteten Brennstoff- und Emissionsdaten aus den Emissionserklärungen nach der 11. BImSchV final in der räumlichen Datenbank auf Standortebene zusammengeführt und in Ausschnitte für die Datenübergabe an die Potenzialanalyse überführt. Dazu wurde pro Standort die Abwärme-Quote als Verhältnis der berechneten sensiblen Abwärmemenge zu dem kumulierten unteren Heizwert der erfassten eingehenden Brennstoffströme berechnet und eine Einordnung von Datensätzen anhand verfügbarer Datenebenen für die Potenzialanalyse vorgenommen (Tabelle 16).

In den erfassten Datensätzen konnten 2987 Standorte mit vorliegenden Brennstoffeinsätzen Q_{in} und vorliegenden Abwärmemengen Q_{ab} identifiziert werden. Angesichts der Unsicherheiten bei der Erfassung der Parameter für eine energetische Bilanzierung über die Emissionserklärungen (Kapitel 4.1.1) wurden keine pauschalen Korrekturregeln anhand der Kenngröße der Awärmequote angewandt, sondern eine manuelle Analyse von Ausreißerwerten durchgeführt. Rund 242 der 2987 Standorte mit vorhandenen Ein- und Ausgangsdaten weisen eine energiebilanziell unplausible Abwärmequote >1.0 auf. An diesen Standorten fällt eine Abwärmemenge von 91 TJ bzw. 0,08% der gesamten Abwärmemenge aus den vorhandenen Emissionsdaten an. Eine manuelle Analyse der betreffenden Datensätze im Abgleich mit anderen Sektor-spezifischen Angaben und eine Stichproben-Analyse besonders hoher Abweichungen im Abgleich mit Angaben der betreffenden Unternehmen ergab keine Hinweise auf unplausible Emissionsdaten. Im Gegenzug könnten an diesen Standorten fehlerhafte bzw. bereinigte Brennstoffdaten vorliegen. Die ermittelten Datensätze nach Tabelle 16, Nr.1 wurden deshalb in ihrer Gesamtheit als Primärdaten für die Potenzialanalyse eingestuft.

Für Standorte mit verorteten Abwärmemengen aus den Emissionsdaten, jedoch fehlenden Angaben zu Brennstoffeinsätzen nach Tabelle 16, Nr. 2 wurde eine manuelle Plausibilitätsprüfung der angegebenen Abgasparameter anhand von Unternehmensangaben zu den 58 betreffenden Standorten durchgeführt. Dabei wurde primär auf eine Vermeidung von Überschätzungen der Abwärmemenge fokussiert. Auch an diesen Standorten wurden keine Hinweise auf unplausible Emissionsdaten ermittelt und die Datensätze deshalb in ihrer Gesamtheit als Primärdaten für die Potenzialanalyse eingestuft.

Zusätzlich wurden 302 Standorte mit Angaben zu Brennstoffeinsätzen, jedoch ohne Referenz in den Emissionsdaten nach Tabelle 16, Nr. 3 identifiziert und als Sekundärdaten eingestuft. Weiteren 623 Standorte mit vorhandenen Brennstoffdaten konnten nur unvollständige Emissionsdaten bzw. Emissionsdaten mit einer Temperaturangabe von $T_i < T_{Ref}$ $(35°C)$ zugeordnet werden. Aufbauend auf der Unsicherheit bezüglich der Temperaturangaben in den Emissionserklärungen wurden auch diese Standorte als Sekundärdaten für die Potenzialanalyse eingestuft. Die Sekundärdatensätze wurden im Zuge der Potenzialanalyse über eine Abschätzung der theoretisch verfügbaren Abwärmemengen über Sektorspezifische Abwärmequoten bezogen auf den Brennstoffeinsatz und mittlere Temperaturniveaus einbezogen (Kapitel 6.1).

Tabelle 16: Ergebnisse Standortanalyse Emissionserklärungen 11. BImSchV.

	Vorhandene Datenebenen	**Standorte**	**Brennstoffströme**	**Abgasströme**	**Q_{in} [PJ]**	**Q_{ab} [PJ]**	**Einordnung Potenzialanalyse**
1.	Emissionsdaten & Brennstoffdaten	2987	5811	8184	914	111	Primärdaten
2.	Emissionsdaten & keine Brennstoffdaten	58		242		10	Primärdaten
3.	Brennstoffdaten & keine Emissionsdaten	302	402		21		Sekundärdaten
4.	Brennstoffdaten & unvollständige Emissionsdaten oder $T_i < T_{Ref}$	623	956		83		Sekundärdaten
	Summe	**3970**	**1358**	**8426**	**1018**	**121**	

4.2.2 European Pollutant Release and Transfer Register (E-PRTR)

Aufbauend auf den Arbeiten von (McKenna & Norman 2010; Miró et al. 2018) zur Abschätzung von Energieeinsätzen und Abwärmepotenzialen in der energieintensiven Industrie Großbritanniens bzw. der Verarbeitung von Steinen und Erden (C23) in Europa wurde folgende Formel zur Ableitung theoretischer, netzgebunden nutzbarer Abwärmepotenziale aus den CO_2-Emissionen einzelner Standorte (Tabelle 10) angewandt:

$$Q_{Ab} = \left(\frac{C_T * F_{c,i} * \eta_{C,i}}{K_T * L_{F,i}}\right) * R_F$$

Mit:
Q_{Ab} = Abwärmepotenzial in [TJ/a]
R_F = Anteil rückgewinnbarer Wärme im Sektor („Recovery Fraction“) [%]
C_T= CO_2-Emissionen am Standort nach PRTR [t/a]
$F_{c,i}$ = Anteil der durch Verbrennungsprozesse verursachten Emissionen im Sektor [%]
$\eta_{c,i}$= Effizienz der Umwandlung von Brennstoff zu Wärme im Sektor [%]
$L_{F,i}$= Nutzungsgrad der Verbrennungsanlagen im Sektor („Load Factor“) [%]
$K_{T,n}$ = Emissionsfaktor für den Sektor [t_{CO_2}/TJ]

Formel (1) ermöglicht die Abschätzung des theoretischen Abwärmepotenzials in einer stationären Betrachtung einzelner Industriesektoren in einem Referenzjahr, in dem anhand von Statistiken zum Brennstoffeinsatz und zu resultierenden CO_2-Emissionen zunächst Sektor-spezifische Emissionsfaktoren [t_{CO2}/TJ] abgeleitet werden. Zusätzlich werden mittlere Umwandlungseffizienzen nach dem Stand der Technik, statistische Angaben zum Anlagennutzungsgrad und Anteile der verbrennungsbedingten Emissionen an den Gesamtemissionen (inkl. prozessbedingte Emissionen, z.B. bei der Herstellung von Zement/Branntkalk) berücksichtigt.

Der Endenergie-bezogene Brennstoff-Mix für die Berechnung der Sektor-spezifischen Emissionsfaktoren K_t kann für Deutschland aus den öffentlich verfügbaren Energiestatistiken der Eurostat Datenbanken ermittelt werden (Eurostat 2018).[1] Zusammen mit Brennstoff-spezifischen Emissionsfaktoren nach (IPCC 2006) wird der Emissionsfaktor auf Zweisteller-Ebene (C10, C17, C20 etc.) gespiegelt, eine weitere Differenzierung des Emissionsfaktors für Subsektoren ist nicht möglich. Weitere Anlagen-spezifische Faktoren, auch weiter differenziert für einzelne Subsektoren, wurden von (McKenna & Norman 2010) aus einer Fallstudie für Großbritannien übernommen. Dabei wurden ein vergleichbares Technologie-Niveau und vergleichbare Produktionsprozesse innerhalb der Sektoren im Vergleich zu Deutschland unterstellt.

Aufgrund der Konzentration des E-PRTR auf CO_2-intensive Unternehmen mit Jahresfrachten von >100,000 t sind in den Daten mit 174 von 182 Standorten im Jahr 2012 vor allem die fünf energieintensiven Industriesektoren C10, C17, C20, C23 und C24 repräsentiert. Anhand der genannten Quellen konnten die erforderlichen Variablen für diese Sektoren, exklusive der chemischen Industrie (C20), und teilweise weiter differenziert nach Subsektoren, ermittelt und für die Ableitung von Brennstoffeinsätzen und der Abschätzung theoretischer netzgebunden nutzbarer Abwärmemengen in der räumlichen Datengrundlage angewandt werden (Tabelle 17). Die Abschätzung von Energiemengen anhand von CO_2-Emissionen in der

[1] URL: ec.europa.eu, Datensätze: nrg110a.

chemischen Industrie (C20) ist auf Grund sehr heterogener Produktionsprozesse sowohl an einzelnen Standorten als auch zwischen verschiedenen Standorten mit dem vorgestellten generischen Ansatz nicht valide durchzuführen. Hier müssten lokale Daten nachgeführt werden (McKenna 2009; McKenna & Norman 2010). Auf Grund der hohen Wärmeintegration speziell an großen Chemiestandorten, die in der E-PRTR-Datengrundlage erfasst sind, wurde der Sektor C20 deshalb im Rahmen des dargestellten Verfahrens nicht berücksichtigt.

Tabelle 17: Faktoren für die Berechnung von Brennstoffeinsätzen und theoretischer Abwärmepotenziale aus CO_2-Emissionen nach Wirtschaftszweigen.

Wirtschaftszweig	K_T [t_{CO2}/TJ]	F_c	n_c	L_F	R_F
C10 - Herstellung von Nahrungsmitteln (exkl. C10.8.1)	51,9	1	0,8	0,8	0,075
C10.8.1 - Herstellung von Zucker	52,6	1	0,8	0,8	0,075
C17 - Herstellung von Zellstoff, Papier, Pappe	70,0	1	0,8	0,9	0,075
C23.1 - Herstellung von Glas	79,0	0,63	0,9	0,8	0,15
C23.3, C.23.4, C.23.5.2, C23.6.2 - Herstellung von keramischen Produkten / Kalk / Gips	79,0	0,44	0,9	0,8	0,15
C23.5.1, C23.6.3, C23.6.4, C23.6.5 - Herstellung von Zement / Beton	79,0	0,38	0,9	0,8	0,15
C24.1 - Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen	84,8	1	0,9	0,84	0,1
C24.4.4 - Erzeugung und erste Bearbeitung von Kupfer	56,1	1	0,9	0,9	0,15

Im Ergebnis konnten aus den E-PRTR-Daten Brennstoffeinsätze im Umfang von rund 755 PJ und resultierende theoretische Abwärmepotenziale von 81 PJ an 123 Standorten des verarbeitenden Gewerbes räumlich verortet werden (Tabelle 18). Über einen räumlichen Abgleich mit einem Suchradius von 500 m um E-PRTR-Standorte und einer Einschränkung auf identische vierstellige Wirtschaftszweige lassen sich aus den aufbereiteten Daten der Emissionserklärungen nach 11. BImSchV 84 Standorte identifizieren, für die die ermittelten Brennstoffeinsätze und theoretischen Abwärmemengen abgeglichen werden können.

Der Vergleich der aufbereiteten Daten zeigt, dass über den dargestellten Ansatz anhand der E-PRTR-Daten in Summe rund 50% höhere Brennstoffeinsätze (403 PJ ggü. 264 PJ) und theoretische Abwärmepotenziale (43 PJ ggü. 28 PJ) an den 84 Standorten verortet werden als in den Emissionserklärungen nach der 11. BImSchV ausgewiesen sind. Zugleich zeigt sich eine hohe Streuung der Werte auf Standortebene (Abbildung 21). Während Ausreißerwerte mit einem Verhältnis von >2 u.a. durch eine mangelhafte Qualität bzw. fehlende Angaben in den 11. BImSchV-Daten zu erklären sind, sind die Abweichungen der E-PRTR-Werte auf Standort-Ebene auch durch die verallgemeinerten Annahmen in Form der angewandten Berechnungsfaktoren und auf Seiten der theoretischen Abwärmepotenziale zusätzlich durch die Beschränkung der BImSchV-Daten auf Rauchgasströme zu erklären.

Tabelle 18: Ermittelte Endenergieeinsätze Brennstoff und theoretisch nutzbare Abwärmepotenziale aus Standort-spezifischen Jahresfrachten CO_2 im Jahr 2012 nach Sektoren des verarbeitenden Gewerbes.

	Wirtschaftszweig	Anzahl Standorte	CO_2-Emissionen [kt]	$Q_{in, Brennstoff}$ [PJ]	$Q_{ab, theoretisch}$ [PJ]
C10	C10.41 - Herstellung von Ölen und Fetten	1	220	4.2	0.3
	C10.62 - Herstellung von Stärke und Stärkeerzeugnissen	1	173	3.3	0.3
	C10.81 - Herstellung von Zucker	10	1,531	29.1	2.2
C17	C17.11 - Herstellung von Holz- und Zellstoff	1	1,830	23.2	1.7
	C17.12 - Herstellung von Papier, Karton und Pappe	23	5,326	67.7	5.1
	C17.22 - Herstellung von Haushalts-, Hygiene- und Toilettenartikeln aus Zellstoff etc.	1	272	3.5	0.3
	C17.23 - Herstellung von Schreibwaren und Bürobedarf aus Papier, Karton und Pappe	1	106	1.3	0.1
C23	C23.11 - Herstellung von Flachglas	6	794	7.1	1.1
	C23.13 - Herstellung von Hohlglas	1	124	1.1	0.2
	C23.19 - Herstellung, Veredlung und Bearbeitung von sonstigem Glas	1	109	1.0	0.1
	C23.51 - Herstellung von Zement	33	19,980	108.2	16.2
	C23.52 - Herstellung von Kalk und gebranntem Gips	18	6,747	42.5	6.4
C24	C24.1 - Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen	22	35,903	453.6	45.4
	C24.2 - Herstellung von Stahlrohren	1	104	1.3	0.1
	C24.31 - Herstellung von Blankstahl	1	104	1.3	0.1
	C24.44 - Erzeugung und erste Bearbeitung von Kupfer	2	341	6.1	0.9
	Summe	**123**	**73,664**	**754.6**	**80.5**

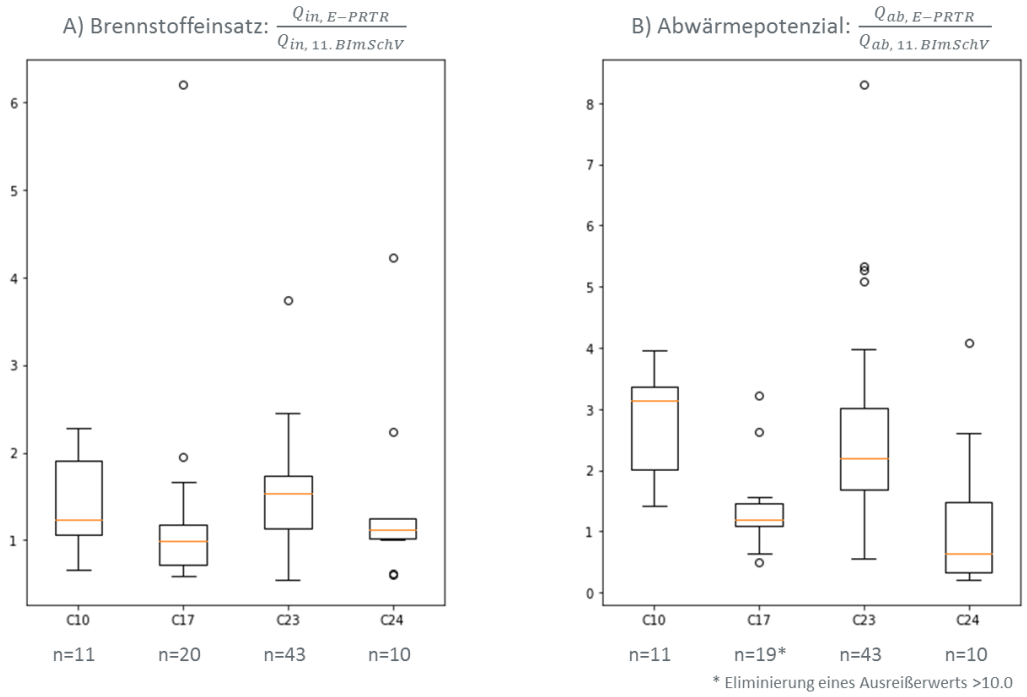


Abbildung 21: Streuung des Verhältnisses von A) ermittelten Brennstoffeinsätzen und B) theoretischen Abwärmepotenzialen aus den E-PRTR-Daten zu den Daten nach 11. BImSchV im Referenzjahr 2012 auf Standort-Ebene in den vier untersuchten Industriesektoren.

Aus den aufbereiteten E-PRTR-Daten mit zugeordneten Brennstoffeinsätzen wurden in der Folge über eine räumliche Verschneidung und identische Wirtschaftszweige mit den aufbereiteten 11. BImSchV-Daten 20 Standorte ausgewählt, an denen entweder keine Daten nach 11. BImSchV vorlagen oder die Abwärmequote unter 10% lag. Über diese Standorte wurden primär große Standorte der Eisen- und Stahlerzeugung im Saarland und in Bremen identifiziert, deren Daten in den Emissionserklärungen nach 11. BImSchV als Betriebsgeheimnis gekennzeichnet waren. Die Daten wurden analog zu den ermittelten Standorten mit Brennstoffdaten ohne nutzbare Emissionsdaten aus den 11. BImSchV-Daten als Sekundärdaten für die Potenzialanalyse eingestuft.

Tabelle 19: Ermittelte zusätzliche Standorte aus den E-PRTR-Daten für die räumliche Potenzialanalyse nach Wirtschaftszweigen.

Wirtschaftszweig	Standorte	Brennstoffeinsatz [PJ]	Abwärmemenge [PJ]
C2311 - Herstellung von Flachglas	1	1	0
C2351 - Herstellung von Zement	3	9	1
C2352 - Herstellung von Kalk und gebranntem Gips	2	13	2
C2410 - Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen	12	249	25
C2444 - Erzeugung und erste Bearbeitung von Kupfer	2	6	1
	20	**279**	**29**

4.2.3 BISNODE-Firmendatenbank

Mit knapp 37,000 Unternehmen werden in dem Auszug des Firmenregisters potenziell eine deutlich höhere Zahl auch kleinerer Standorte des verarbeitenden Gewerbes erfasst, denen über Top-Down übertragene spezifische Energiekennzahlen zunächst Wärmebedarfe zugeordnet und ggf. auch Abwärmemengen abgeschätzt werden können. Aufbauend auf (Blesl et al. 2008) wurden Mitarbeiter-spezifische Wärmebedarfe auf Ebene vierstelliger Wirtschaftszweige in die Datengrundlage gespiegelt.

Die Ergebnisse zeigen jedoch neben einer zwar prinzipiell höheren Zahl an erfassten Standorten eine deutliche Verzerrung der zugeordneten Wärmebedarfe in den einzelnen Sektoren[1] und eine angesichts fehlender Kennzahlen für einige Sektoren auch insgesamt zu hohe Prozesswärmebedarfe (Tabelle 20). Die weiterführende Ableitung möglicher Abwärmemengen inklusive einer Kalibrierung des Kennzahlen-Modells wurde deshalb nicht im Rahmen des Vorhabens durchgeführt. Aus der Daten des Firmenregisters wurden keine Datensätze an die räumliche Potenzialanalyse übergeben.

[1] Signifikant sind vor allem die Überschätzung in Sektor C22 – Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren und die Unterschätzung in Sektor C24 – Metallerzeugung und –bearbeitung sowie insbesondere im Sektor C20 – Herstellung von chemischen Erzeugnissen. Hier müssten weiterführende Analysen zur Aufbereitung des Daten- und Kennzahlenmodells durchgeführt werden, um eine Ableitung valider Abwärmemengen zu gewährleisten.

Tabelle 20: Datenübersicht BISNODE-Firmendatenbank in Verbindung mit Mitarbeiter-spezifischen Energiekennzahlen zum Prozesswärmebedarf nach (ebd.).

Wirtschaftszweig	Anzahl Standorte	Mitarbeiter 2016	Prozesswärmebedarf [PJ]
C22	3,225	265,896	868
C24	779	112,561	361
C17	675	62,004	154
C23	797	76,256	151
C10	621	85,641	107
C20	2,113	209,268	60
C29	2,064	280,806	13
C11	396	28,567	11
C18	1,567	86,029	11
C31	1,786	159,532	1
C30	94	8,497	0
C16	775	45,201	0
	14,892	**1,420,258**	**1,736**

4.3 Abgleich der erfassten Endenergieeinsätze für industrielle Prozesswärmeanwendungen

Über die Ergänzung der Daten aus den Emissionserklärungen nach 11. BImSchV mit abgeschätzten zusätzlichen Brennstoffeinsätzen und Abwärmemengen anhand Standort-spezifischer CO_2-Jahresfrachten aus der E-PRTR-Datenbank und Prozess-spezifisch recherchierten thermisch relevanten Stromeinsätzen konnten Endenergieeinsätze in den untersuchten Sektoren des verarbeitenden Gewerbes im Umfang von 1407 PJ auf Ebene von 3966 einzelnen, über Punkt-Koordinaten georeferenzierten Betriebsstandorten verortet werden. Mit 1297 PJ werden im Abgleich mit (BMWi 2018) 96% des Brennstoffeinsatzes, und mit 110 PJ 76% des Stromeinsatzes für Prozesswärme in der Industrie abgebildet.

Im Abgleich mit den Angaben der Länderstatistiken zum Brennstoffeinsatz in der Industrie im Referenzjahr 2012 auf der Ebene zweistelliger Wirtschaftszweig-Schlüssel zeigen sich bei einer insgesamt hohen Übereinstimmung von 88% deutlich größere Abweichungen in den einzelnen Sektoren (Abbildung 22). Eine mögliche Ursache für die Abweichungen stellt, zusätzlich zu abweichenden Brennstoffangaben der Anlagenbetreiber in den Emissionserklärungen, die Zuordnung zu Wirtschaftszweigen in den Referenzdaten dar, die zum Zeitpunkt der Zusammenstellung der Länderstatistiken in einigen Ländern keine detaillierte Aufgliederung der Endenergieeinsätze nach Brennstoffen und anderen Energieträgern auf Ebene aller einzelnen 23 untersuchten Sektoren erlaubte. Tendenziell wurden jedoch in den energieintensiven Sektoren C24 und C20 etwas zu niedrige Brennstoffeinsätze im Modell abgebildet, während die thermisch relevanten Stromeinsätze in diesen Sektoren umfassend abgebildet werden konnten (vgl. Kapitel 2.2).[1]

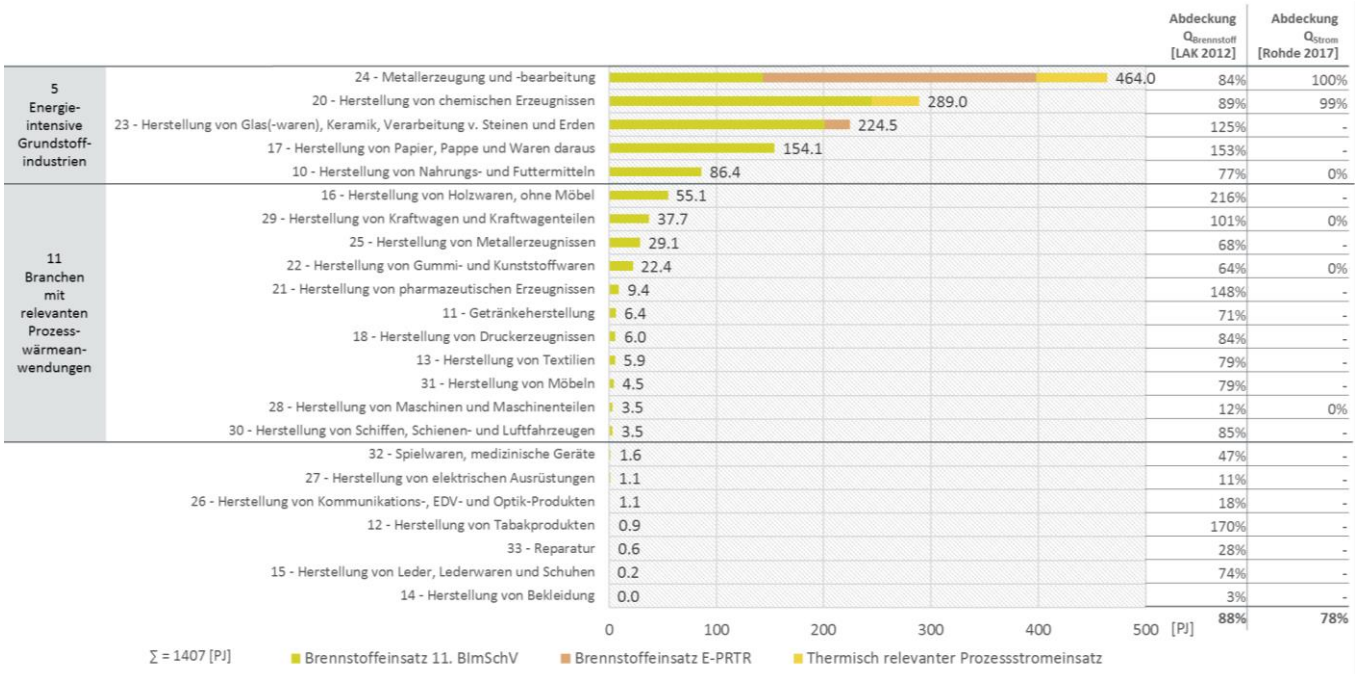


Abbildung 22: Bilanzierung Endenergieeinsätze für Prozesswärme nach Sektoren des verarbeitenden Gewerbes im GIS-Modell.

[1] Eine Bewertung der erfassten Abwärmemengen wurde in der Potenzialanalyse durchgeführt (Kap. 6.2).

5 Unternehmensfallstudien

Parallel zu den Arbeiten an der Datenaufbereitung und Modellentwicklung zur Erstellung der GIS-Plattform wurden im Rahmen des NENIA-Vorhabens empirische Erhebungen in Industrieunternehmen durchgeführt. Diese umfassten eine Fragebogen-gestützte Befragung von Industrieunternehmen aus verschiedenen Branchen zu Wärmebedarf, vorhandenen Abwärmeströmen und Hemmnissen bei der Initiierung und Umsetzung netzgebundener Nutzungskonzepte. Zusätzlich wurden in sechs Industrieunternehmen im Rahmen von mindestens zwei vor-Ort-Terminen und einem Datenaustausch real verfügbare Abwärmemengen erhoben und GIS-unterstützte lokale Nutzungskonzepte inklusive einer groben Dimensionierung der Betriebsmittel und einer Abschätzung der Wärmegestehungskosten entwickelt. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden für die Ableitung erweiternder Handlungsoptionen zur Förderung netzgebundener Abwärmenutzung verwendet (vgl. Kapitel 7.2).

5.1 Unternehmensbefragung

5.1.1 Zielsetzung und Methodik

Um einen empirischen Einblick in die real verfügbaren technischen Potenzialen für eine außerbetriebliche Abwärmenutzung insbesondere im Abgleich mit den 11. BImSchV-Daten zu gewinnen und die bestehenden Hemmnisse bzw. Anforderungen der Unternehmen an außerbetriebliche Abwärmelieferungen herauszuarbeiten, wurde ein umfassender Fragebogen, untergliedert nach

1. Unternehmensangaben (Stammdaten, bilanzieller Energieeinsatz, Wärmeerzeugung)
2. Technische Daten bestehender Abwärmeströme (Abgase/Rauchgase, Prozessabluft, Prozessabwasser/Kühlwasser, Anlagenübersicht)
3. Potenziale & Hemmnisse externer Abwärmenutzung (Abwärmequellen, Abwärmesenken, Hemmnisse Vertragsgestaltung, Hemmnisse hinsichtlich Parametrierung von Wärmelieferungen, sonstige Hemmnisse, Förderprogramme)

erstellt (Anhang 4). Als Richtwert wurde ein Rücklauf von 50 vollständig ausgefüllten Fragebögen anvisiert.

Der Fragebogen wurde an 616 Unternehmen aus den fünf energieintensiven Industriesektoren und weiteren 11 Branchen mit relevanten Endenergieeinsätzen zur Prozesswärmeerzeugung versandt, die in den aufbereiteten Primärdaten als Betreiber Emissionserklärungspflichtiger Anlagen im Berichtsjahr 2012 gelistet waren (Abbildung 22). Dabei wurden Betriebsstandorte zunächst in einem einfachen räumlichen Abgleich vorhandener theoretischer Abwärmepotenziale >35°C mit dem zu Projektbeginn bestehenden räumlichen Wärmebedarfsmodell des Wohngebäudebestandes verschnitten und nach dem verfügbaren Wärmesenkenpotenzial in sukzessive erweiterten Radien von 500m, 1000m, 2000m und 3000m um die Betriebsstandorte priorisiert. Dabei wurden in der ersten Auswahl Betriebe mit einem theoretischen Abwärmepotenzial von mehr als 2 [TJ/a] und einem Wärmesenkenpotenzial im Wohngebäudebestand in einem 500m-Radius von mehr als 10 [TJ/a] gewählt. In einer zweiten Auswahl zur Erhöhung des Adressatenkreises auf Grund fehlenden Rücklaufs bzw. fehlender Teilnahmebereitschaft wurden weitere Unternehmen über eine

Absenkung des Grenzwertes für Wärmesenkenpotenziale auf 2 [TJ/a] im 500m-Radius und eine Erhöhung der Radien an Standorten mit hohen theoretischen Abwärmepotenzialen auf bis zu 3000m ausgewählt.

Für die ermittelten Standorte wurden Kontaktinformation (Ansprechpartner, E-Mail-Adresse, Telefonnummer) aus der BISNODE-Firmendatenbank ergänzt, über die neben der initialen Kontaktaufnahme und dem Versand des Fragebogens eine telefonische Nachfassung erfolgen konnten. Die Qualifizierung der Adressaten wurde in einigen Fällen manuell (Internet-Recherche) ergänzt bzw. überprüft. Die Fragebögen wurden initial auf elektronischem Weg im Pdf-Format per E-Mail, gemeinsam mit einem Anschreiben zur Erläuterung der Umfrage und einem Bestätigungsschreiben des Auftraggebers Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Projektträger Jülich an die Unternehmen versandt. Anschließend wurde primär telefonisch der Status der Beantwortung abgefragt und Unterstützung beim Ausfüllen des Fragebogens geleistet.

5.1.2 Auswertung

Die Beantwortung wurde in einem Großteil der Fälle telefonisch nachgeführt. 38 Unternehmen schickten vollständig ausgefüllte Fragebögen zurück, was einer Rücklaufquote von 6% entspricht. Diese eher geringe Quote ist insbesondere auf ein paralleles Forschungsprojekt[1] zurückzuführen, in dem eine sehr ähnlich gelagerte Befragung zu theoretischen Abwärmepotenzialen ca. sechs Monate zuvor an einen nahezu identischen Adressatenkreis gerichtet wurde, sodass der Adressatenkreis mehrfach auf final mehr als 600 Unternehmen erweitert werden musste.

Aufgrund der trotzdem vergleichsweise geringen Grundgesamtheit an vollständig ausgefüllten Fragebögen, sind die Ergebnisse als eher qualitative Auswertung und Interpretation von Tendenzen und Schlüsselerkenntnissen im Bereich der Nutzung industrieller Abwärme zu verstehen. Eine quantitative Auswertung würde zudem voraussetzen, dass die Befragten eine weitestgehende Transparenz über die bestehende Abwärmeleistung und deren zeitlichen Verlauf haben. Die Ergebnisse der Studie haben jedoch gezeigt, dass diese Voraussetzung in der Regel nicht gegeben ist. Daher wurde auch keine Ableitung Sektor-spezifischer quantitativer Korrekturfaktoren, Stationaritäts-Faktoren o.ä. in der bundesweiten Potenzialanalyse ermöglicht.

[1] »Abwärmeatlas: Erhebung, Abschätzung und Evaluierung von industrieller Abwärme in Deutschland – Potentiale und Forschungsbedarf« Konsortium: Fraunhofer IPM, Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme, Institut für Demoskopie Allensbach (vgl. Kapitel 2.3).

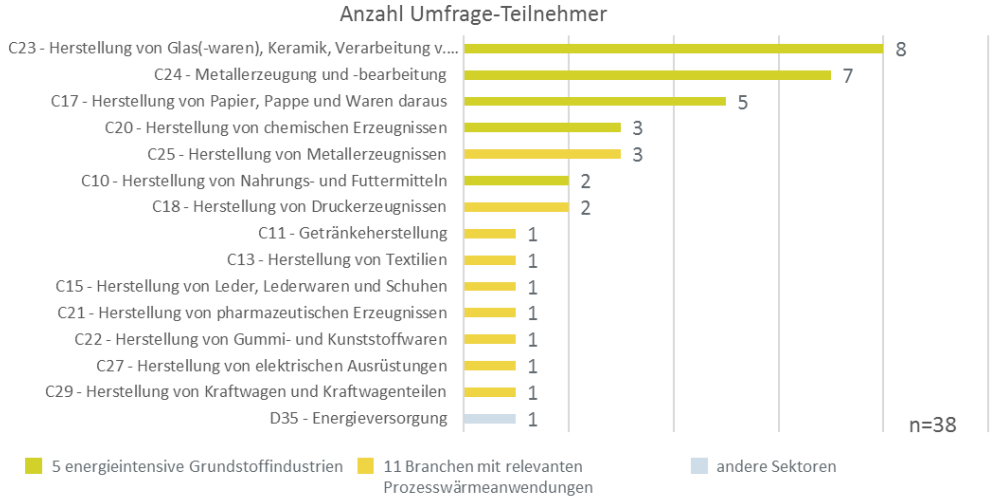


Abbildung 23: Verteilung der Umfragteilnehmer nach Wirtschaftszweigen.

5.1.2.1 Unternehmensangaben

Um die Ergebnisse der Erhebung genauer einordnen zu können, wurde neben der Branchenzugehörigkeit die Größe der teilnehmenden Unternehmen mit Hilfe der beiden Indikatoren Mitarbeiterzahl sowie Umsatz abgefragt. Die Durchführung der Befragung hat gezeigt, dass Energieeffizienz grundsätzlich Unternehmen jeder Größenordnung beschäftigt, kleine Unternehmen aber oft über unzureichende Kapazitäten verfügen, um das Thema strategisch zu bearbeiten. Dieser Eindruck hat sich insbesondere durch die zahlreichen Telefonate mit Energiemanagern ergeben, um die Thematik der Befragung näher zu bringen. Er spiegelt sich auch in der Teilnehmerstruktur der Studie wider: so gehört lediglich eine Minderheit der Teilnehmer den kleinen und mittleren Unternehmen (KMU, < 250 Mitarbeiter und Umsatz < 50 Mio. €) an, während der Großteil eigenständige rechtliche Einheiten bzw. Standorte von größeren Unternehmen repräsentiert (Abbildung 24 A).

Ein systematisches Energiemanagement ist ein Instrument zur kontinuierlichen Steigerung der Energieeffizienz in Unternehmen und Organisationen und damit implizit auch ein Indikator für den Kenntnisstand des Unternehmens zu vorhandenen Abwärmepotenzialen. Für eine erste Abschätzung des Reifegrads der befragten Unternehmen in Bezug auf das Thema Energiemanagement wurde daher die Frage gestellt, inwiefern Energiemanagementsysteme zum Einsatz kommen. Hier zeigt sich ein klares Bild: 35 von 38 Studienteilnehmern sind gemäß der internationale Energiemanagementnorm ISO 50001 zertifiziert, was einem Anteil von 92% entspricht. In einem teilnehmenden Unternehmen kommt ergänzend EMAS zum Einsatz, das Gemeinschaftssystem für das freiwillige Umweltmanagement und die Umweltbetriebsprüfung (Eco-Management and Audit Scheme). Damit haben auch die meisten befragten kleinen und mittleren Unternehmen, die gesetzlich nicht verpflichtet sind ein Energieaudit durchzuführen, ein systematisches Energiemanagement angestoßen (Abbildung 24 B).

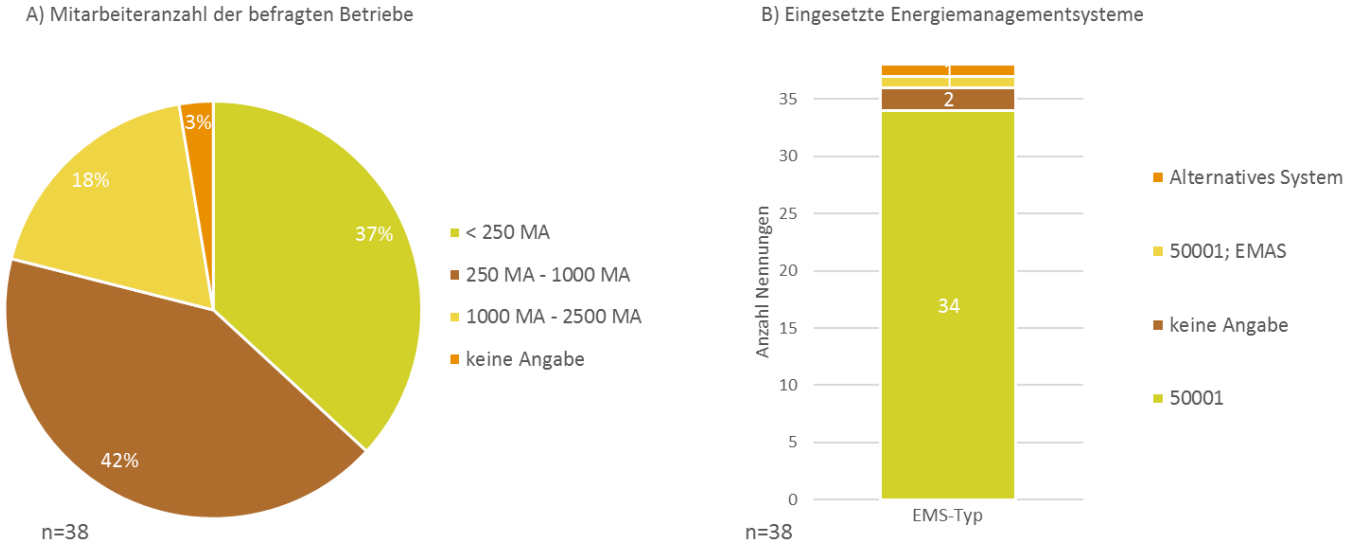


Abbildung 24: Größenstruktur und eingesetzte Energiemanagementsysteme der befragten Unternehmen.

Im Rahmen einer energetischen Betrachtung stellt die Ermittlung der eingesetzten Energieträger einen aufschlussreichen Schritt dar. Im Hinblick auf die Einsatzmengen der verschiedenen Endenergieträger stellen Erdgas und Strom die wesentlichen Energieträger dar. Fernwärme (Anteil 2,8%) und Heizöl (0,8%) stellen Ausnahmen in der Energieversorgung dar (Abbildung 25).

Im Kontext von Wärmenetzen und der Reduktion von Treibhausgasemissionen kommt der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) eine besondere Bedeutung zu. Daher wurde auch im Rahmen der vorliegenden Erhebung abgefragt, ob und inwieweit KWK-Anlagen bei den Unternehmen zum Einsatz kommen. 54% der Teilnehmer verfügen über eigene KWK Anlagen, die im Regelfall wärmegeführt betrieben werden. Dabei generierte der Wärmespitzenproduzent der Studie im Bezugsjahr 2015 2,4 Mio. MWh/a Wärme, der Spitzenproduzent im Bereich Strom 420.000 MWh/a. KWK-Anlagen kommen dabei weitgehend unabhängig von der Unternehmens- bzw. Betriebsgröße zum Einsatz. Von den 20 Befragten, die KWK-Anlagen nutzen, entfallen 45% auf Unternehmen oder Betriebe mit bis zu 250 Mitarbeitern.

Betrachtet man die aktuelle Situation im Hinblick auf einen bestehenden Wärmenetzanschluss der Unternehmen, so zeigt sich, dass nur rund jedes fünfte Unternehmen derzeit an ein Wärmenetz angeschlossen ist. Von den 8 teilnehmenden Unternehmen, die über einen Nah- oder Fernwärmenetzanschluss verfügen, sind 4 Unternehmen reine Bezieher von Wärme, während 2 Unternehmen ausschließlich Abwärme liefern. Die übrigen 2 Unternehmen sind in einer Doppelrolle, in der sie sowohl Abwärme liefern als auch selbst Wärme beziehen.

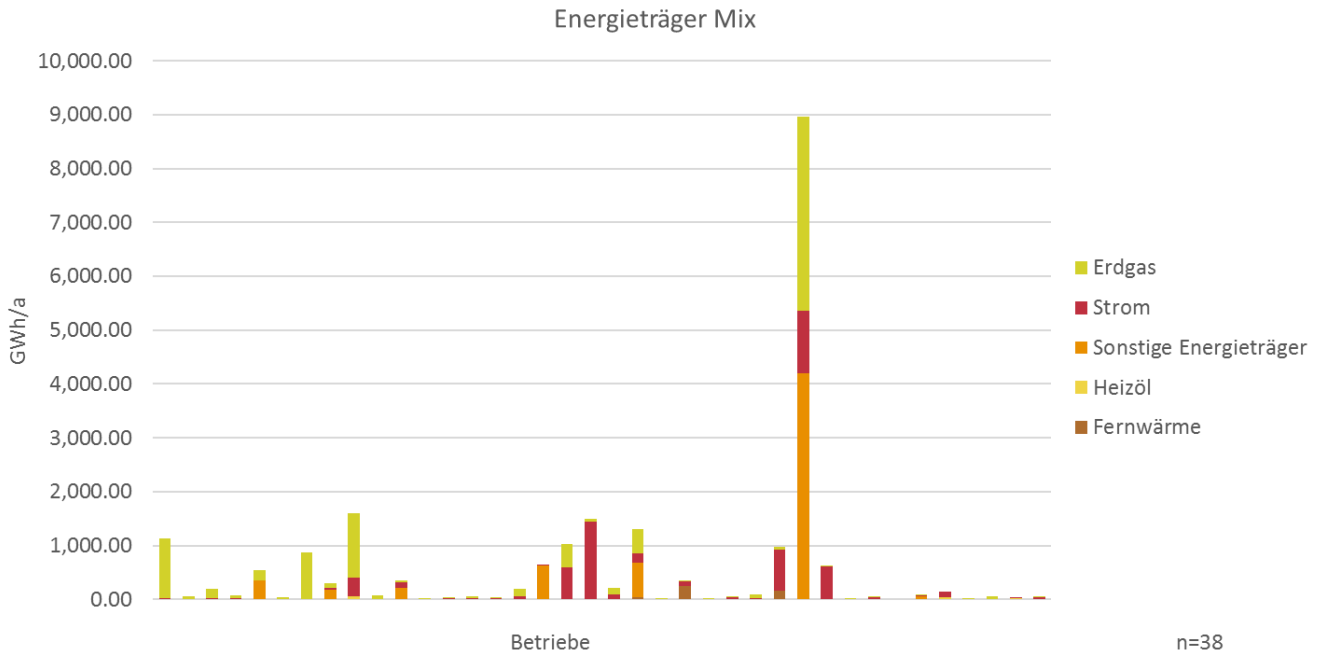


Abbildung 25: Struktur des Endenergieträgereinsatzes in den befragten Betrieben.

5.1.2.2 Technische Daten bestehender Abwärmeströme

Um das bestehende Potenzial an Überschussabwärme zu erfassen, die damit theoretisch für eine externe Auskopplung zur Verfügung stünde, wurden Abwärmeströme im Rahmen der Studie nach Ihrem Trägermedium unterschieden und die jeweiligen Charakteristika dieser Ströme strukturiert abgefragt. Als Abwärmequellen möglicher außerbetrieblicher Abwärmenutzung wurde für die Erhebung unterschieden in Abgase / Rauchgase, Prozessabluft sowie Prozessabwasser /-kühlwasser. Abgase / Rauchgase sind dabei gefasste Ströme von Verbrennungsgasen, z.B. aus Schornsteinen. Prozessabluft beinhaltet konvektive Abwärmeströme, etwa aus der passiven Abkühlung von Prozessmedien oder Produkten sowie auch aus aktiven Kühlprozessen, die ggf. über Lüftungsanlagen abgeführt werden. Prozessabwasser / Kühlwasser beschreibt geführte Abwärmeströme mit fluidem Trägermedium. Die Darstellung der Ergebnisse in Abschnitt zwei erfolgt aggregiert für alle drei Arten von Abgasströmen.

Betrachtet man die Wärmebilanz der befragten Unternehmen bzw. Standorte, so zeigt sich, dass 87% über einen Abwärmeüberschuss mit einem Temperarturniveau von mind. 65° C verfügen, der für eine mögliche externe Nutzung an Abwärme genutzt werden könnte (Abbildung 26 A). Die dafür infrage kommenden Abwärmeströme entfallen zu 45% auf Abgase / Rauchgase, zu 28% auf Prozessabluft /-kühlwasser sowie zu 27% auf Prozessabwasser. Vor einer externen Nutzung von Abwärme sollte jedoch zunächst eine interne Nutzung der Abwärme bzw. idealerweise eine Vermeidung oder Reduzierung der Abwärme geprüft werden.

In Bezug auf das zeitliche Verhalten der Wärmeemission liegt in 63% der Fälle ein für die externe Auskopplung von Abwärme sehr gut geeigneter, kontinuierlicher Verlauf über das

Jahr vor. In weiteren 11% der Fälle liegt ein grundsätzlich kontinuierlicher Verlauf vor, der aber über eine Emissionsspitze im Sommer oder im Winter verfügt (Abbildung 26 B).

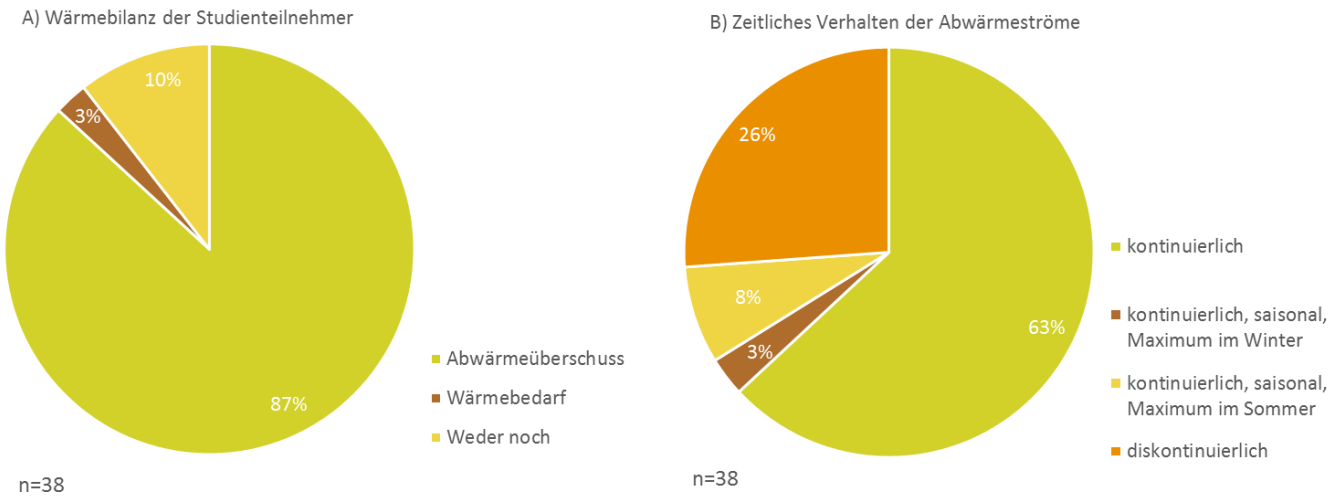


Abbildung 26: Wärmebilanz der befragten Betriebe und zeitliches Verhalten der Abwärmeströme.

Gefragt nach der ihrer Einschätzung, inwieweit die Nutzung von Überschussabwärme innerhalb der eigenen Branche verbreitet ist, glauben 36% der Teilnehmer, dass dies nur selten oder gar nicht der Fall ist. Weitere 36% geben an, dass sie dazu keine Einschätzung treffen können. In der Summe sind 60% sind jedoch der Meinung, dass viele oder zumindest einige Branchenbegleiter Abwärme nutzen (Abbildung 27 A).

In Bezug auf den Nutzungsgrad des vorhandenen Abwärmepotenzials in der eigenen Betriebsstätte geben 14% der Teilnehmer an, das vorhandene Potenziale bereits vollständig zu nutzen, während 28% die vorhandene Abwärme aktuell gar nicht nutzen. 58% der Teilnehmer nutzen dagegen einen Teilbereich des verfügbaren Abwärmepotenzials. In der Summe nutzen also 72% der Befragten das vorhandene Potenzial in Gänze oder teilweise (Abbildung 27 B).

Neben der Abfrage des vorhandenen Abwärmepotenzials wurde im Rahmen der Studie ebenfalls erhoben, wie Unternehmen die vorhandenen Abwärmeströme aktuell nutzen. Hierbei zeigt sich ein klarer Schwerpunkt auf der betriebsinternen Wärmeintegration: in insgesamt 82% der Nennungen wird die Abwärme für Heizung, Prozesswärme oder die Erwärmung von Brauchwasser verwendet. Die Übrigen 18% der Nennungen verteilen sich über verschiedene Nutzungsarten wie die externe Einspeisung von Abwärme oder die Stromerzeugung.

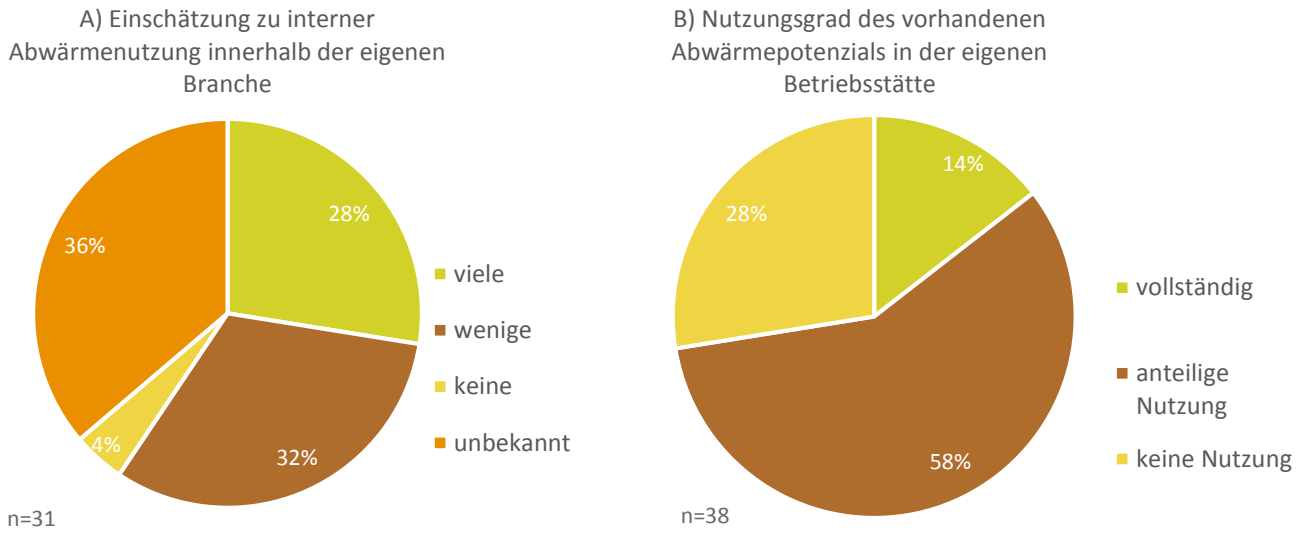


Abbildung 27: Einschätzung zur internen Abwärmenutzung in der jeweiligen Branche und Nutzungsgrad vorhandener Abwärme in den befragten Betrieben

Gefragt nach ihrer Bereitschaft, den bestehenden Abwärmeüberschuss in ein externes Wärmenetz einzuspeisen, können sich die Studienteilnehmer dies in zwei Drittel der abgefragten Fälle vorstellen. Unter Berücksichtigung der zuvor dargestellten Ergebnisse lässt sich hieraus der Rückschluss ziehen, dass das Potenzial für eine stärkere außerbetriebliche Nutzung von Abwärme grundsätzlich vorhanden zu sein scheint. Die teilnehmenden Unternehmen verfügen überwiegend über einen Überschuss an Abwärme, der kontinuierlich über das Jahr anfällt und sind auch überwiegend bereit, diesen in ein externes Wärmenetz einzuspeisen. Im nachfolgenden Abschnitt wird daher ein detaillierterer Blick auf die vorhandenen Potenziale und insbesondere auf vorliegende Hemmnisse auf dem Weg hin zu einer externen Auskopplung von Abwärme geworfen.

5.1.2.3 Potenziale und Hemmnisse externer Abwärmenutzung

Abbildung 28 richtet den Fokus auf das Thema Einspeisung von Abwärme. Zum einen wurde die persönliche Einschätzung der Studienteilnehmer abgefragt, inwiefern der vorhandene Abwärmeüberschuss für die externe Einspeisung geeignet ist. Hier zeigt sich, dass immerhin 37% der Befragten das Potenzial als sehr hoch oder hoch einschätzen. Von diesen haben wiederum 64% auch bereits tatsächlich konkrete Szenarien zur Abwärmelieferung geprüft. Betrachtet man nun die Ist-Situation in Bezug darauf, wie viele Teilnehmer aktuell bereits tatsächlich Abwärme in externe Wärmenetze einspeisen, so tritt hier eine Diskrepanz zutage: lediglich 16% der Befragten speisen derzeit Abwärme in Wärmenetze ein. Wie die Auswertung der technischen Daten von Abwärmeströmen im vorangehenden Kapitel, deuten auch diese Zahlen darauf hin, dass in der energieintensiven Industrie ein signifikantes Potenzial zur Lieferung von Abwärme vorhanden zu sein scheint. Wie bereits erwähnt, sollten zunächst jedoch interne Nutzungsmöglichkeiten sowie Wege zur Vermeidung oder Reduktion des Abwärmeaufkommens geprüft werden.

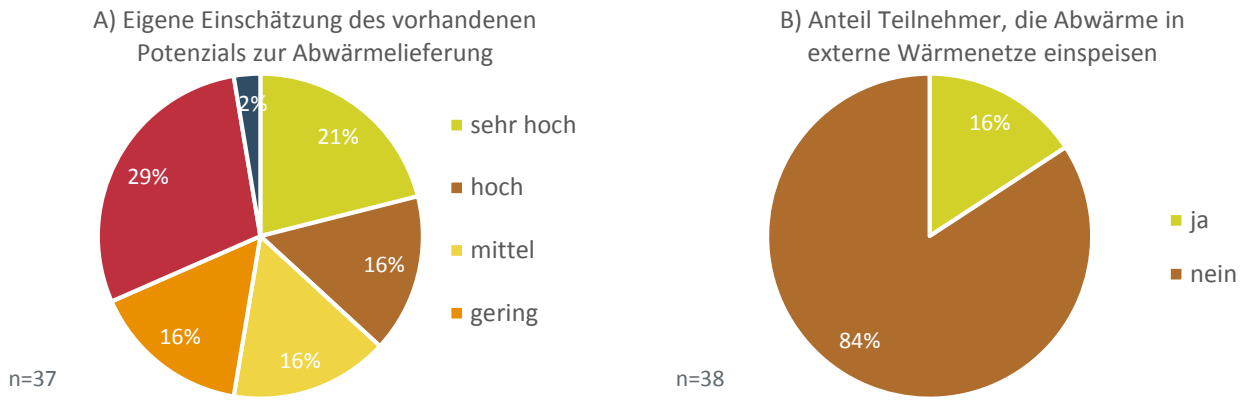


Abbildung 28: Einschätzung des vorhandenen Potenzials zur Abwärmelieferung.

Darüber hinaus wurden diejenigen befragten Unternehmen bzw. an der Umfrage teilnehmenden Standorte näher beleuchtet, die über bestehende Wärmelieferverträge verfügen (Einspeisung oder Bezug von Abwärme). Gefragt nach der Zufriedenheit mit diesen Verträgen, geben in der Summe 55% der Teilnehmer an, dass sie zufrieden oder zumindest mittelmäßig zufrieden sind. Demgegenüber stehen 44%, die unzufrieden oder sehr unzufrieden sind. Aufgrund der geringen Stichprobe von neun antwortenden Unternehmen lassen sich aus diesem unausgewogenen Bild nur sehr eingeschränkt Rückschlüsse ziehen. Die Ergebnisse deuten jedoch an, dass in Bezug auf die Gestaltung und Abwicklung von Wärmelieferungsverträgen noch Verbesserungspotenziale zu bestehen scheinen.

Wie diese Studie bereits gezeigt hat, speisen lediglich 16% der Teilnehmer aktuell bereits tatsächlich Abwärme in externe Wärmenetze ein, obwohl – gemessen an den qualitativ erhobenen Daten - zeitgleich ein grundsätzlich hohes Potenzial für eine solche Einspeisung zu bestehen scheint. Insofern kommt der Frage eine besondere Bedeutung zu, was die Unternehmen offenbar daran hindert, den vorhandenen Abwärmeüberschuss tatsächlich auch extern einzuspeisen. Neben expliziten Hemmnissen, die im Rahmen der Studie abgefragt wurden und die in den folgenden Kapiteln dargestellt werden, spielt hier auch die Frage eine Rolle, inwiefern die Unternehmen bereits unternehmensinterne Szenarien zur Einspeisung von Abwärme geprüft haben, also z.B. eine technisch-wirtschaftliche Auslegung für eine Abwärmeauskopplung durchgeführt bzw. extern in Auftrag gegeben haben. Diese Frage haben lediglich 37% der Studienteilnehmer mit „Ja“ beantwortet, während 53% angaben, noch keine Szenarien geprüft zu haben.

Im Hinblick auf die Anbahnung von Wärmelieferungsverträgen stellt die Kontinuität der Wärmelieferung ein regelmäßig ein wichtiges Kriterium für die Wärmenachfrager dar. Die Ergebnisse der durchgeführten Befragung zeigen, dass sich nur rund jedes vierte Unternehmen in der Lage sieht, gesicherte Leistungszusagen zu tätigen, während 50% dies verneinen. Dieser Umstand führt dazu, dass gegenüber den Abwärmesenken „atmende Lösungen“ gefunden werden müssten, die durch Flexibilität und Dynamik eine kontinuierliche Versorgung der Senken mit Wärme sicherstellen.

Konkrete Ansätze hierzu bieten z.B. Wärmesammelschienen oder die Einbindung eines Intermediärs. In Wärmesammelschienen speisen mehrere Abwärmequellen (ggf. unternehmensübergreifend) in ein gemeinsames Wärmenetz und reduzieren durch die damit erreichte Diversifizierung das Lieferausfallrisiko gegenüber der Wärmesenke erheblich. Im Fall

der Wärmelieferung über einen Intermediär übernimmt dieser (z.B. ein Energieversorgungsunternehmen) durch die ihm gegebenen Möglichkeiten die Besicherung der Lieferung.

Hemmnis Vertragsgestaltung

Im Hinblick auf konkrete Hemmnisse bei der Gestaltung von Wärmelieferverträgen sehen 42% der Befragten grundsätzliche Erschwernisse (Abbildung 29). Geht man hier in die Detailauswertung, so zeigt sich, dass die beiden wesentlichen Nennungen mit einem Anteil von zusammen 52% die Absicherung der Wärmebereitstellung sowie lange Vertragslaufzeiten betreffen, die oftmals mit der Lieferung von Abwärme einhergehen.

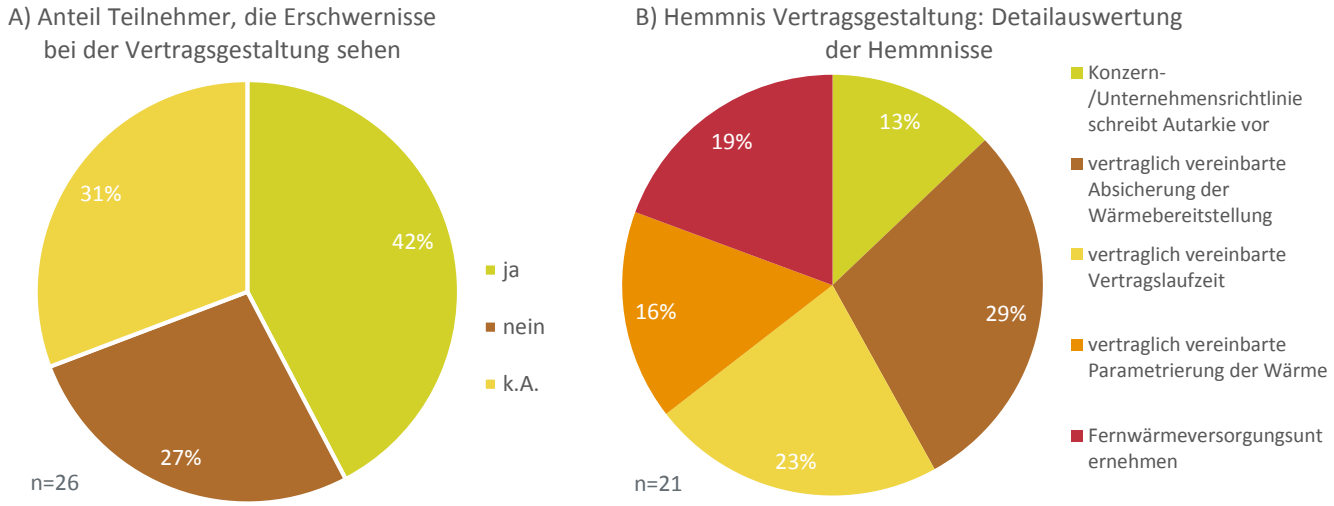


Abbildung 29: Erschwernisse im Rahmen der Vertragsgestaltung zwischen Lieferant und Abnehmer.

Hemmnis Parametrierung

Eine abgestimmte Parametrierung im Sinne einer passenden Menge, Leistung und Temperatur der Abwärme bezogen auf Wärmenetz und Wärmesenke ist Grundvoraussetzung für das Zustandekommen eines Wärmeliefervertrags. Abbildung 30: zeigt die Einschätzung der Studienteilnehmer im Hinblick darauf, ob sie die Parametrierung der Wärme als eine Erschwernis betrachten. Nahezu vier von fünf Befragten beantworten diese Frage mit einem ja.

Die Detailauswertung zeigt, dass die Ursachen hierfür zu in etwa gleichen Anteilen in der Parametrierung von Menge, Leistung und Temperatur der Abwärme liegen sowie in der Entfernung zur Abwärmesenke. Wichtig hierbei: die Hauptschwierigkeit liegt in den jeweiligen Punkten weniger in nicht passenden Parametern, sondern stets in der Unkenntnis über die Anforderungen der Senkenseite. So sind sich z.B. 11 von 15 Befragten, welche die Wärmeleistung als Hemmnis sehen, im Unklaren darüber, welche Wärmeleistung für die Versorgung einer externen Wärmesenke notwendig wäre.

Hier zeigt sich, das für die Quellenseite Transparenz über das Vorhandensein von Wärmesenken und deren jeweiligen spezifischen Anforderungen an eine Wärmelieferung wichtige Voraussetzungen sind, um einen konkreten Ansatzpunkt für die Lieferung von Abwärme zu entwickeln.

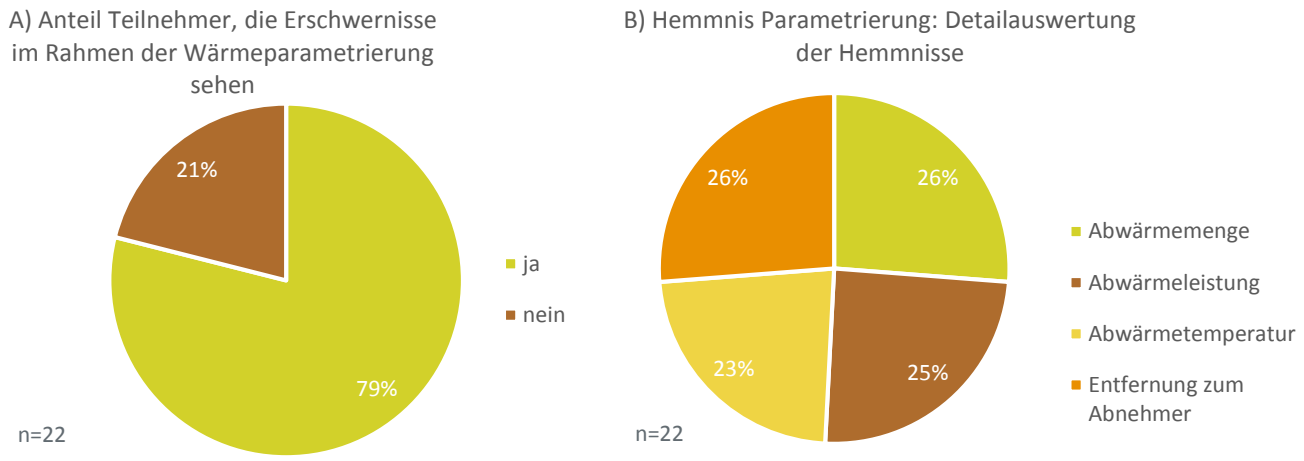


Abbildung 30: Anteil Teilnehmer, die Erschwernisse im Rahmen der Wärmeparametrierung sehen

Sonstige Hemmnisse

Neben den konkreten Hemmnissen der Vertragsgestaltung sowie der Parametrierung im Rahmen von Abwärmelieferungen wurden die Studienteilnehmer nach weiteren Gründen befragt, die ihrer Einschätzung nach ein Hemmnis bei der Lieferung von Abwärme darstellen. Wie sich zeigt, entfallen über 50% der Nennungen (Mehrfachnennungen möglich) auf die Punkte „fehlende Wirtschaftlichkeit“, „externe Wärmesenken unzureichend bekannt“ und „Gelände / bauliche Gegebenheiten / Entfernung zur Quelle“.

Besonders ins Auge fällt, dass 20 von 38 und damit 53% der an der Befragung teilnehmenden Unternehmen fehlende Wirtschaftlichkeit als Hemmnis betrachten. Verglichen mit der weiter oben dargestellten Anzahl an Teilnehmern, die bereits konkrete Abwärmelieferszenarien geprüft haben (37%), fällt diese Zahl also noch höher aus und deutet eine gewisse grundsätzliche Skepsis gegenüber der Lieferung von Abwärme an. Betrachtet man ausschließlich das Antwortverhalten der Teilnehmer, die bereits Szenarien geprüft haben, so geben hier 8 von 15 Befragten und damit rund 57% fehlende Wirtschaftlichkeit als Hemmnis an. Zusätzlich scheinen Informationsdefizite hinsichtlich der verfügbaren Wärmesenken eine wichtige Rolle zu spielen.

Interessant sind diese Ergebnisse auch vor dem Hintergrund der ergänzend zur Umfrage durchgeführten Unternehmensfallstudien, deren Bestandteil eine konkrete Machbarkeitsstudie für die externe Einspeisung von Abwärme war. Hier hat sich gezeigt, dass eine grundsätzliche Wirtschaftlichkeit in 4 von 6 bzw. eingeschränkt in 5 von 6 untersuchten Fällen gegeben war. Diese Sachlage kann als Indiz dafür betrachtet werden, dass die Durchführung einer Machbarkeitsstudie eine wesentliche Grundlage für die Einschätzung der Wirtschaftlichkeit eines Abwärmeprojekts darstellt.

Förderprogramme

Über die Inanspruchnahme von Förderprogrammen haben Unternehmen die Möglichkeit, Zuschüsse oder günstige Darlehen in der Phase der technischen Konzeption und der Wirtschaftlichkeitsprüfung wie auch der Umsetzung von Abwärmeprojekten zu erhalten. In der Folge lassen sich Wärmegestehungskosten bzw. Abwärmebezugspreise reduzieren. Ein umfassender Überblick über die relevante Förderlandschaft befindet sich im öffentlich zugänglichen Abschlussbericht des Projekts NENIA, in dessen Rahmen diese Studie entstanden ist. Für nähere Informationen kontaktieren Sie gerne die Autoren dieser Studie.

Gefragt nach dem Bekanntheitsgrad von Fördermöglichkeiten zeigt sich, dass 55% der befragten Unternehmen keine passenden Fördermöglichkeiten zur Nutzung von Abwärme kennen. Diese Ergebnisse lassen zwei Rückschlüsse zu:

1. unter den Studienteilnehmern besteht ein Informationsdefizit über grundsätzliche Möglichkeiten der Förderung

   und / oder

2. die existierenden Fördermöglichkeiten entsprechen nur unzureichend dem tatsächlichen Bedarf der Unternehmen

Beide genannten Aspekte sollten daher von den Bundesministerien als Träger der entsprechenden Förderprogramme überprüft werden und gegebenenfalls korrigierende Maßnahmen umgesetzt werden.

Neben der Kenntnis über Förderprogramme wurde im Rahmen der Studie ebenfalls erhoben, inwiefern mögliche Szenarien zur Lieferung von Abwärme wirtschaftlich darstellbar sind. Lediglich 23% der antwortenden Unternehmen sehen die Wirtschaftlichkeit explizit als gegeben an. Der weiter oben untersuchte Aspekt von „sonstigen Hemmnissen bei der Abwärmeeinspeisung“ liefert eine mögliche Erklärung für den hohen Anteil an Teilnehmern, die keine Angaben gemacht haben: hier haben 14 von 30 und damit knapp 47% der Unternehmen angegeben, über eine unzureichende Kenntnis von externen Wärmesenken zu verfügen. Diese ist jedoch eine wesentliche Voraussetzung, um eine Wirtschaftlichkeitsprüfung vornehmen zu können.

Gefragt nach der tatsächlichen Nutzung von Förderprogrammen zeigt sich, dass lediglich 34% der Studienteilnehmer Förderprogramme in Anspruch genommen haben. Der Blick auf die konkrete Art und Weise der Förderung zeigt ein uneinheitliches Bild: so wird am häufigsten das BAFA Querschnittstechnologienprogramm genannt (3 Nennungen), gefolgt vom KfW-Energieeffizienzprogramm – Abwärme (2 Nennungen) und Förderungen gemäß Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (2 Nennungen).

Im Rahmen der durchgeführten Befragung wurden auch offene Fragen ohne vorgegebene Antwortmöglichkeiten gestellt, die aufgrund der Heterogenität der gegebenen Antworten ungeeignet für eine statistische Aufbereitung sind. Da die erhaltenen Antworten dennoch einen hohen Informationsgehalt aufweisen, wird eine Auswahl der Antworten im Folgenden qualitativ in Form von Zitaten wiedergegeben.

Abbildung 31 stellt die Hindernisse dar, welche die Befragten im Zuge der Beantragung von Fördermitteln für Abwärmeprojekte sehen. Die gegebenen Antworten zeigen, dass es offenbar häufig gar nicht erst zur Beantragung von Fördergeldern kommt. Dementgegen stehen

zum einem fehlende wirtschaftliche Anreize, da durch den Einsatz von Kühltürmen vorhandene Abwärme kostengünstig auf ein Temperaturniveau abgesenkt werden kann, das dann bspw. die Wiedereinleitung in Gewässer ermöglicht. Ein anderer interessanter Aspekt sind fehlende Ressourcen und Know-how, welche die Entwicklung konkreter Projektansätze zur Abwärmelieferung verhindern. Diese Einschätzungen decken sich gut mit der weiter oben dargestellten geringen Anzahl an Befragten, die bereits Szenarien zur Abwärmelieferung geprüft haben.

„Fehlende Anreize: Primärenergie billiger als Nahwärme, Abwärmevernichtung sehr billig“
„Ressourcen, Know-how, Konzepterstellung“
„fehlende Ressourcen, Antragstellung, unbekannte Technik“
„fehlendes Know how und Ressourcen zur Konzepterarbeitung“

Abbildung 31: Hindernisse bei der Antragsstellung für Abwärmeprojekte im Allgemeinen.

Im Hinblick auf Lösungsansätze zur Überwindung von Hindernissen in der Beantragung von Abwärmeprojekten gibt es seitens der Studienteilnehmer Vorschläge, die sich auf eine grundsätzlich stärkere Nutzung von Abwärme beziehen wie auch Vorschläge, die speziell auf Förderprogramme fokussieren (Abbildung 32). Zu ersteren gehört der Vorschlag eines Abwärmenutzungsgebots, also der für Unternehmen verpflichtenden Weiterverwendung produzierter Abwärme. Die auf Förderprogramme gerichteten Vorschläge stellen das Schaffen einer höheren Informationstransparenz in den Mittelpunkt, z.B. im Hinblick auf Möglichkeiten der Förderung oder wie weiter oben bereits beschrieben eine bessere Kenntnis über die Verfügbarkeit und Standorte von Wärmesenken und Wärmenetzen.

„Abwärmenutzungsgebot einführen“
„preisliche Förderung von Industriewärme“
„Informationsplattform bieten“
„Informationen und Förderung bereitstellen“

Abbildung 32: Lösungsvorschläge für die Überwindung der Hindernisse in der Antragsstellung

Abbildung 33 zeigt die Anforderungen der Studienteilnehmer an Förderprogramme im Bereich der Abwärmenutzung. Die Lieferung von Abwärme erfolgt stets unter der Prämisse, dass die Produktion das Kerngeschäft energieintensiver Unternehmen darstellt und als solche die Verfügbarkeit von Abwärme vorgibt. Dies hat zum einen zur Folge, dass Unternehmen i.d.R. nicht als Netzbetreiber auftreten möchten, sondern sich auf ihr Kerngeschäft konzentrieren möchten. Zum anderen wird eine Rückfallebene bei Produktionsstillstand notwendig (z.B. durch EVU als Intermediär). Darüber hinaus gibt es offenbar einen Bedarf im

Bereich Know-how und Ressourcen-Unterstützung. Wie die Ergebnisse der Befragung gezeigt haben, erscheint es zielführend, dass Förderprogramme bereits in der Phase der initialen technisch-wirtschaftlichen Bewertung potenzieller Abwärmeprojekte ansetzen und die Einbeziehung externer Dienstleister ermöglichen.

„Kein Zwang für Abwärmelieferanten - Netzförderung soweit, dass Primärenergienutzung vermieden wird“
„es sollte sichergestellt werden, dass die Abwärmelieferanten nicht als Netzbetreiber auftreten müssen“
„transparente, einfache und fixe Fördersätze für langfristige Planungssicherheit“
„Beratung, Unterstützung, Förderung“

Abbildung 33: Anforderungen der Befragten an ein optimales Förderprogramm

Gefragt nach ihren eigenen Empfehlungen für Unternehmen, die Projekte zur Abwärmelieferung planen, sind insbesondere zwei Aspekte interessant (Abbildung 34): Zum einen wird empfohlen, die Konzepte einfach in der Handhabung halten. Dies kann z.B. über einen zuvor bereits erwähnten Intermediär geschehen, der als Vertragspartner gegenüber den Endkunden auftritt und z.B. Wärmereservekapazitäten vorhält, um die Besicherung im Fall eines Produktionsstillstands zu übernehmen. Zum anderen wird empfohlen, potenzielle Projekte vorab eingehend auf ihre Wirtschaftlichkeit zu prüfen, ggf. unter Einbindung externer Dienstleister mit Know-how im Bereich Wärmenetze.

„Einen geeigneten Intermediär zwischen Abwärmeanbieter und -nachfrager finden und einbinden“
„fachliche Expertise einholen“
„Sinnhaftigkeit prüfen“
„Potenzialanalyse durchführen“

Abbildung 34: Empfehlungen der Studienteilnehmer für die Nutzung von Abwärme

5.2 Detailanalyse exemplarischer Industrieunternehmen

5.2.1 Zielsetzung und Methodik

Neben der Unternehmensbefragung wurden im Rahmen von AP5 vertiefende Fallstudien bei sechs Studienteilnehmern mit jeweils mindestens zwei Terminen vor Ort durchgeführt. Zielsetzung der Fallstudien war neben einer Überprüfung der Validität der Emissionsdaten nach der 11. BImSchV zur Abschätzung theoretischer Abwärmepotenziale und einer empirischen Referenzierung der in der Potenzialanalyse getroffenen Aussagen zur technisch-wirtschaftlichen Nutzbarkeit der Abwärmepotenziale über Wärmenetze die Erarbeitung unternehmensspezifischer Grobkonzepte zur netzgebundenen Nutzung der Abwärme für den jeweiligen Praxispartner. Im Rahmen dieser durch lokale GIS-Analysen unterstützten Fallstudien wurden ebenso gegebenenfalls vorliegende Hemmnisse für die Einspeisung von Abwärme in Nah- oder Fernwärmenetze näher untersucht.

Mögliche Praxispartner wurden parallel zur Auswahl von Teilnehmern der Unternehmensbefragung nach der Zugehörigkeit zu den fünf energieintensiven Industriesektoren ausgewählt. Die Teilnahmebereitschaft an einer weiterführenden Fallstudie wurde nach Absprache mit den Betrieben in Form eines *Letter of Intent* festgehalten.

5.2.2 Auswertung

Die sechs Fallstudienpartner entstammen den Wirtschaftszweigen C10, C17, C20, C23 und C24 und decken damit sämtliche Zielsektoren des Projekts ab. In Bezug auf die Unternehmensgröße repräsentieren die Partner mit Unternehmensumsätzen von 40 Mio. € (Eisengießerei) bis rund 80 Mrd. $ (Grundstoffchemie) die relevante Bandbreite energieintensiver Industriebetriebe mit signifikantem Abwärmeanfall bei den Produktionsprozessen. Die detaillierten Fallstudien im Umfang von rund 20 Seiten pro Standort sind als geschlossene Projektergebnisse gesondert an den Auftraggeber übergeben worden. Eine Übersicht der Fallstudienkonzepte ist in Tabelle 21 abgebildet.

Die Validierung der theoretischen Potenziale aus den Emissionserklärungen nach der 11. BImSchV zeigte bei vier der sechs Betriebe sehr geringe Abweichungen um maximal 6% bezogen auf die Energie. [MWh_{th}]. Bei einem Betrieb wurden signifikant höhere theoretische Abwärmepotenziale um +60% ermittelt, die in einem separaten Kühlkreislauf (Thermo-Öl) abgegriffen werden könnten und entsprechend nicht in den Emissionsdaten von Rauchgasströmen enthalten sind. An einem weiteren Standort wurden auf Grund fehlerhafter Abgasdaten und einer Unternehmensteilung seit dem Berichtsjahr der 11. BImSchV-Daten 2012 nur noch ein sehr geringes theoretisches Abwärmepotenzial ermittelt. Im Zuge der Konzepterstellung für eine außerbetriebliche Abwärmenutzung wurden bei den vor-Ort-Terminen und der nachgelagerten Datenanalyse priorisiert erschließbare technische Potenziale – oftmals keine Rauchgasströme sondern Abluft, Überschussdampf oder andere Kühlstoffströme – ermittelt. Diese schwanken in ihrem absoluten Umfang und im Verhältnis zu den validierten theoretischen Potenzialen je nach Betrieb auf Grund der ausgeprägten Selektion, die implizite Nutzungsrestriktionen (z.B. Vorgabe keinerlei Eingriffe in Abkühlprozesse) in Absprache mit den Verantwortlichen sehr stark und sind nicht repräsentativ für einen quantitativen Abgleich. Als zentrales Ergebnis der Praxisfallstudien ist hingegen das niedrige Niveau der anhand einer groben Trassen- und Anlagenplanung ermittelten Wärmegestehungskosten von 20 bis 50 EUR/MWh in fünf der sechs Fallstudien festzuhalten.

Tabelle 21: Übersicht der Fallstudienkonzepte und zugehörige Schlüsselkennzahlen.

Betrieb	Branche	Theoretisches Potenzial >35°C nach 11. BImSchV [MWh_{th} /a]	Validiertes theoretisches Potenzial [MWh_{th}/a]	Priorisiert erschließbares technisches Potenzial [MWh_{th}/a][1]	Kurzbeschreibung des entwickelten Konzepts	Investitionskosten	Wärmegestehungskosten [€/MWh_{th}]
Cargill Deutschland GmbH	Futtermittel	59.300	59.200	45.000	Einspeisung von Abwärme aus Wasserdampf in EVU-Bestandsnetz	5,0 Mio. €	20
Ineos Manufacturing Deutschland GmbH	Petrochemie	784.000	784.000	25.000	Einspeisung von Abwärme aus Wasserdampf in EVU-Bestandsnetz	4,7 Mio. €	25
KÄMMERER Spezialpapiere GmbH	Papiere	40.000	37.500	< 4.000	Einspeisung von Abwärme aus Abluft in EVU-Bestandsnetz	2,5 Mio. €	50 / 140[2]
Heinrich Meier Eisengießerei GmbH & Co. KG	Gießerei	9.900	15.900	2.000	Versorgung eines Nachbarbetriebs mit Abwärme aus Thermalölkreislauf	0,3 Mio. €	25
Pfeifer & Langen GmbH & Co. KG	Zucker	32.500	30.400	4.500	Versorgung eines Freizeitbads mit Abwärme aus gereinigtem Rauchgas	1,3 Mio. €	45
SGL Carbon GmbH	Carbonprodukte	56.000	2.200	3.200	Versorgung eines Neubauwohngebiets mit Abwärme aus Kühlwasser	2,6 Mio. €	165

[1] Im Rahmen der Fallstudien konnten technisch nutzbare Abwärmepotenziale lediglich ausschnittsweise untersucht werden. Hierauf aufbauend wurden exemplarische Nutzungskonzepte für Abwärme erarbeitet. Die Priorisierung der betrachteten Potenziale erfolgte dabei im Hinblick auf eine möglichst aufwandsarme und gleichzeitig ertragsreiche Umsetzung.

[2] Höhere Wärmegestehungskosten bei ggf. notwendiger aktiver Abwärmenutzung bzw. Aufwertung der Abwärme durch eine Wärmepumpe in Abhängigkeit der Anforderungen des Wärmenetzbetriebs. Dieser konnte auf Grund fehlender Daten nicht modelliert werden.

6 Analyse netzgebunden technisch-wirtschaftlich nutzbarer Abwärmepotenziale

Zur Verortung und Quantifizierung netzgebunden unter technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten nutzbarer Abwärmepotenzialen wurde im Rahmen des hier beschriebenen Arbeitspakets ein geeignetes Verfahren zur Abschichtung der im GIS-Modell (Abwärmeatlas, s. Kapitel 4) ausgewiesenen Potenziale entwickelt. Neben der Datenbank zu industriellen Abwärmequellen stellen die räumlich hochaufgelösten Wärmebedarfe des Wärmeatlas (Kapitel 3) hierfür einen zentralen Baustein dar.[1] Im Folgenden wird zunächst die dem Abschichtungsverfahren zugrundeliegende Methodik im Detail erläutert, bevor im Anschluss die wesentlichen Ergebnisse diskutiert werden.

6.1 Methodik

6.1.1 Definitionen

Grundsätzlich kann eine Abschichtung von Abwärmepotenzialen gemäß folgender Grafik vorgenommen werden[2]:

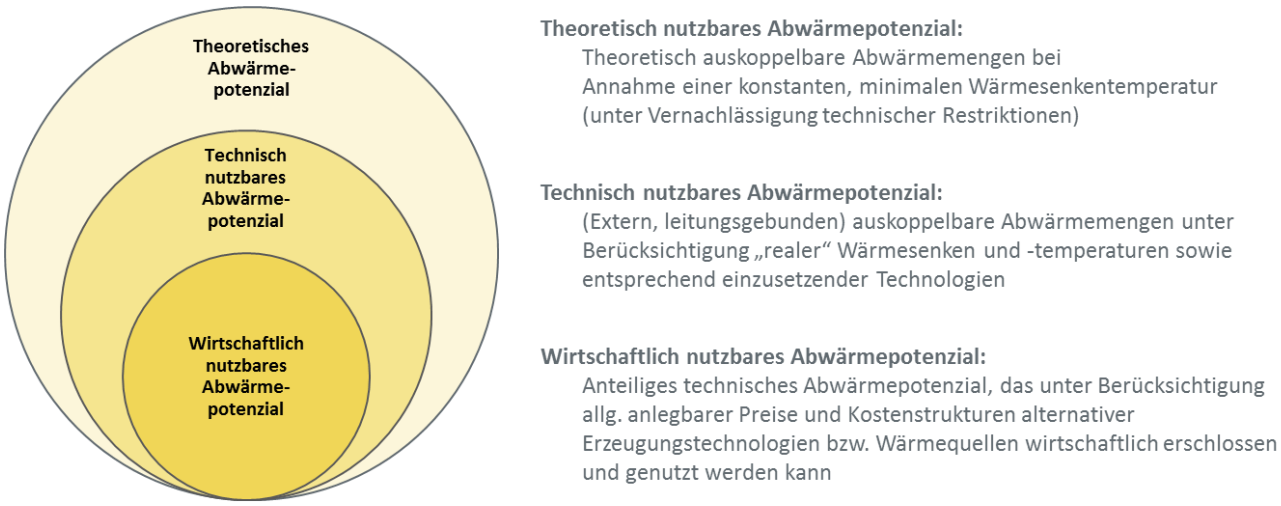


Abbildung 35: Ebenen der Abwärmepotenzialabschichtung.

[1] Vgl. auch den im Rahmen des Vorhabens veröffentlichten Beitrag im EH&P-Journal:
Hering, D.; Blömer, S.; Richter, S; Pehnt, M.: Industrielle Abwärmenutzung in Deutschland – Potenziale zur externen Nutzung in Wärmenetzen. EuroHeat & Power 47 (2018), Nr. 10, S. 14-19.

[2] Bei einer Abschichtung von Energiepotenzialen ist darüber hinaus die Einbeziehung der langfristigen Verfügbarkeit und der ökologischen Qualität der Abwärmenutzung, insbesondere in Hinblick auf übergeordnete Ziele zur Minimierung von Treibhausgasemissionen, im Vergleich mit anderen Versorgungslösungen denkbar (Sandrock et al. 2016). Bei einer Bewertung von ohnehin brachliegenden Abwärmepotenzialen könnte dabei jedoch allenfalls auf die zu erwartenden Zeitskalen der Abwärmeverfügbarkeit sowie die im Falle der Einbindung längerfristig ggf. nicht betrachteten Versorgungsalternativen abgestellt werden.

Unter theoretischem Abwärmepotenzial werden im Folgenden die bei Annahme einer konstanten, minimalen Wärmesenkentemperatur T_{env} (hier 20 °C) auskoppelbaren Abwärmemengen unter Vernachlässigung technischer Restriktionen verstanden. Das technisch nutzbare Potenzial charakterisiert die auskoppelbaren Abwärmemengen unter Berücksichtigung „realer“ Wärmesenken und -temperaturen sowie entsprechend einzusetzender Technologien. Das wirtschaftlich nutzbare Potenzial beschreibt den Anteil des technischen Potenzials, der unter Berücksichtigung allgemein anlegbarer Preise und Kostenstrukturen alternativer Erzeugungstechnologien bzw. Wärmequellen wirtschaftlich erschlossen und genutzt werden kann.

Zur prinzipiellen Abschätzung nutzbarer Abwärmepotenziale existiert eine Reihe von Ansätzen in der Literatur, darunter u.a. (Groß & Tänzer 2010; Eikmeier et al. 2011; Pehnt et al. 2010; Brueckner et al. 2016):

A) **Branchen-/größenspezifisch gemittelte Abschätzung** nutzbarer Abwärmepotenziale (Top-Down-Ansatz):
   a. Ermittlung der jeweiligen Prozesswärmeanteile an Endenergiebedarfen
   b. Abschätzung spezifischer Wirkungs- bzw. Nutzungsgrade für Wärme- und Stromerzeugung
   c. Ableitung der nutzbaren Anteile der jeweils verfügbaren Abwärmemengen
B) **Branchen-/größenspezifisch, temperaturabhängig gemittelte Abschätzung** nutzbarer Abwärmepotenziale (Top-Down-Ansatz):
   a. Ermittlung der jeweiligen Prozesswärmeanteile an Endenergiebedarfen
   b. Abschätzung zugehöriger Temperaturniveaus (vgl. (Eikmeier et al. 2011)) sowie spezifischer Wirkungs- bzw. Nutzungsgrade für Wärme- und Stromerzeugung
   c. Ableitung der nutzbaren Anteile der jeweils verfügbaren Abwärmemengen
C) **Erhebung unternehmensspezifischer Daten** mittels Fragebögen oder auch direkter Betriebsmessungen durch Fachpersonal (Bottom-Up-Ansatz):
   Hiermit sind i.A. ein höherer Aufwand und zusätzliche Hürden (Vertraulichkeitsanforderungen, individuelle Methoden zur Datenerhebung und -auswertung usw.) verbunden. Eine branchen-/größenspezifische Auswertung punktueller (repräsentativer) Daten ermöglicht ggf. die Kalibrierung oder zumindest Plausibilisierung einer Top-Down-Abschätzung.

Vereinfachend lassen sich pauschale Anforderungen an eine Abwärmequelle stellen, bei dessen Erfüllung die Erschließung des zugehörigen Potenzials als technisch-wirtschaftlich möglich angesehen wird. Anschließend kann für die so eingegrenzten Potenziale eine detailliertere Untersuchung der Wirtschaftlichkeit und des Einbindungskonzepts durchgeführt werden. Diese Vorgehensweise ist in der Regel jedoch nur bei konkreten Untersuchungen kleinerer Gebiete und in Abstimmung mit vor Ort befindlichen Einrichtungen (Stadtwerke etc.) sinnvoll. In (Allplan-(Hrsg.) 2017) bspw. wurden folgende temperaturabhängige Mindestleistungen sowie Mindestbetriebsstundenzahlen festgelegt:

- Wärmeleistung größer 300 kW bei Temperaturen größer 80 °C, Jahresbetriebsstunden größer als 4000 h/a
- Wärmeleistung größer 1000 kW bei Temperaturen größer 45 °C, Jahresbetriebsstunden größer als 4000 h/a

Häufig – so auch hier – wird der Untersuchungsraum vereinfachend auf den bzgl. des in gewerblichen Unternehmen anfallenden Abwärmepotenzials wesentlichsten industriellen Sektor bzw. dessen energieintensivste Branchen beschränkt (vgl. (Groß & Tänzer 2010; Pehnt et al. 2010), Kapitel 2).

6.1.2 Bilanzierung des theoretisch netzgebunden nutzbaren Potenzials

Als primäre Datengrundlage werden aufbereitete Emissionserklärungen des verarbeitenden Gewerbes (C10-C18, C20-C33) nach 11. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) herangezogen. In Verbindung mit sekundären Datensätzen (CO_2-Emissionen aus dem European Pollutant Release and Transfer Register (E-PRTR, C23-C24) sowie Recherchen zu industriellem Prozessstromeinsatz) wird die Entwicklung eines Bottom-Up-Modells in Anlehnung an (30) ermöglicht. Bzgl. detaillierter Ausführungen zum Umfang der Datengrundlagen wird auf den nachfolgenden Abschnitt sowie Kapitel 4 verwiesen (vgl. dazu auch (Brückner 2016)).

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass das aus den verfügbaren Datengrundlagen abgeleitete, technisch-wirtschaftliche Potenzial lediglich als Indikation bzw. erster Richtwert für das tatsächlich verfügbare, industrielle Abwärmepotenzial aufgefasst werden kann. Zum einen werden die oben benannten Bereiche des industriellen Sektors bzw. des produzierenden Gewerbes über die Datengrundlagen nicht (B05-B09, C19, D35, F41-F43) bzw. nicht vollständig (verarbeitendes Gewerbe, C10-C18, C20-C33) erfasst (s. Kapitel 4), zum anderen werden – bis auf die ergänzend zusammengetragenen Informationen zu Prozessstromeinsätzen und den damit einhergehenden Abwärmemengen – ausschließlich in Rauchgasströmen gebundene Abwärmemengen aus den Emissionserklärungen betrachtet. Häufig können im Rahmen einer spezifischen vor Ort-Analyse weitere, zunächst nicht erfasste Abwärmepotenziale (Kühlwasser, Brüden usw.) vorgefunden werden, die eine im Vergleich zur Abwärmenutzung aus den im Vorfeld berücksichtigten Rauchgasströmen weniger aufwändige bzw. kostenintensive Erschließung ermöglichen.

Abbildung 36 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen den über die Datengrundlagen größtenteils abbildbaren und den sonstigen Stoff- bzw. Energieströmen über die Systemgrenzen eines erfassten Unternehmensstandorts am Beispiel der Kalkherstellung: Das insgesamt anfallende Abwärmepotenzial (vgl. dazu auch die anfänglich eingeführte, hierzu konsistente Definition von Abwärme) setzt sich hier im Wesentlichen zusammen aus dem Potenzial infolge des freigesetzten CO_2 aus Kohleverbrennung bzw. Branntkalkgewinnung, den nicht weiter quantifizierbaren Verlusten durch Konvektion und Strahlung sowie dem Potenzial aus an die Umgebung abgegebenem Wasserdampf, wobei aus den verfügbaren Datengrundlagen keine Aussagen zu letzteren möglich sind. Die Bereitstellung der Prozesswärme kann durch Verbrennung fossiler Energieträger, aber bspw. auch durch die thermische Nutzung von – extern bezogenem oder innerhalb des Betriebsgeländes erzeugtem – Strom erfolgen. Auf den Einsatz von Prozessstrom zurückzuführende Abwärmemengen werden zumindest anteilig im Zuge der Integration der sekundären Datengrundlagen in das Potenzialmodell berücksichtigt (s.u.).

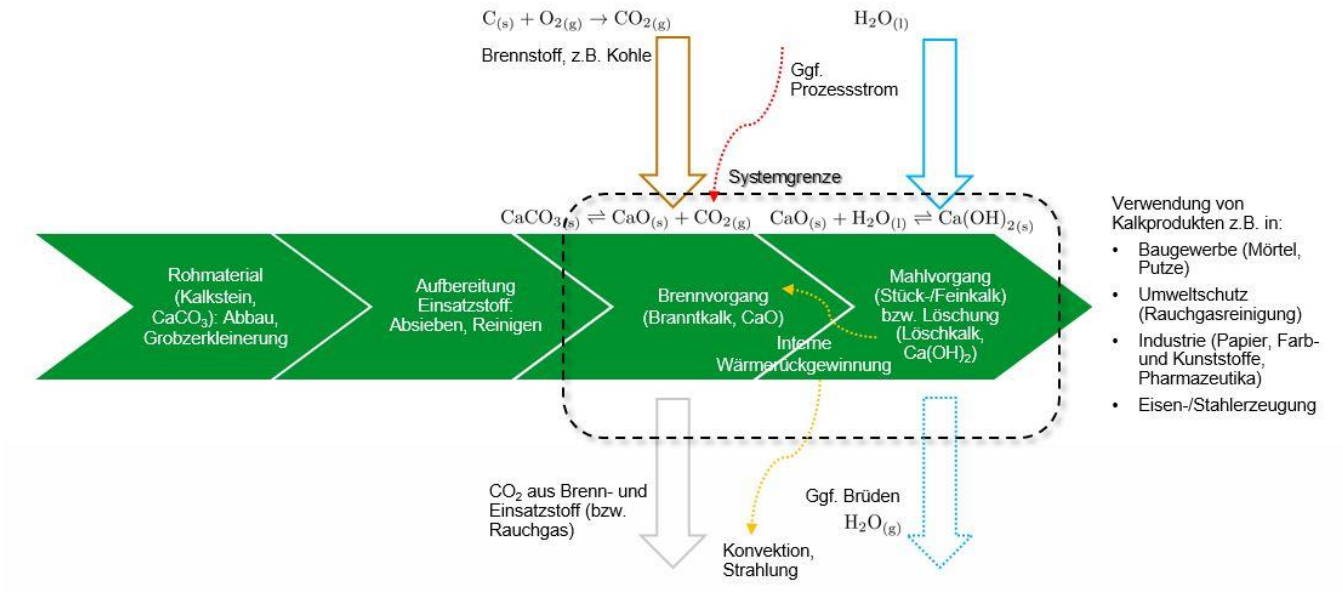


Abbildung 36: Schematische Darstellung der Stoff- bzw. Energieströme über die Systemgrenzen eines Unternehmensstandorts am Beispiel der Kalkherstellung (Leube-Baustoffe 2017).

Die primären Datensätze (Informationen zu Rauchgasströmen aus den aufbereiteten Emissionserklärungen nach 11. BImSchV, vgl. Kapitel 4) beinhalten u.a.:

- Georeferenzierte Raumkoordinaten
- Eindeutige Standort-ID
- Wirtschaftszweig-Code nach WZ2008 bzw. NACE-Systematik (C10-C18, C20-C33)
- Regionalschlüssel des Bundeslands (01-16)
- Durchschnittlicher Volumenstrom in m^3/h unter jeweils vorliegenden Betriebsbedingungen je Emissionsvorgang
- Betriebsstunden in h/a je Emissionsvorgang
- Durchschnittliche Temperatur des Volumenstroms in °C je Emissionsvorgang
- Durchschnittliche Feuchte des Volumenstroms in kg H_2O/kg H_2O_{max} je Emissionsvorgang[1]
- Mengen spezifischer Schadstoffe etc. (Staub, NH_3, NO_2, HCl, HF, SO_2, SO_x) je Emissionsvorgang in kg/a (nach erfolgter Rauchgasreinigung)

Die Stoffwerte werden in Analogie zu (Brückner 2016) mit c_p = 1,007 kJ/(kg K) (mittl. spez. Wärmekapazität) sowie ρ = 1,293 kg/m^3 (mittl. Dichte) angenähert. Die im Mittel- und Hochtemperaturbereich mögliche (Teil-)Verstromung (s.o.) wird nicht abgebildet, es wird von einer thermischen Nutzung des verfügbaren Abwärmepotenzials ausgegangen. Über die Vorgabe einer Grenztemperatur T_{max} für die thermische Nutzung (bspw. 300 °C) kann jedoch

[1] Prinzipiell kann der Feuchtegehalt Informationen zur Abschätzung des zusätzlich verfügbaren, latenten Abwärmepotenzials aus der Kondensation des Wasserdampfs liefern. Angesichts der eingeschränkten Datenqualität bzw. der fehlenden Angaben zu Druck und Zusammensetzung des Abgases wird dieser hier jedoch nicht ausgewertet.

zumindest überschlägig abgeschätzt werden, inwiefern sich die Berücksichtigung einer vorrangigen (Teil-)Verstromung auf die zur Verfügung stehenden technisch-wirtschaftlichen Abwärmemengen auswirkt (s.u.).

Auf Grundlage der vorigen Ausführungen (vgl. auch Kapitel 2) wird die vereinfachte Verschaltung zur externen, leitungsgebundenen Nutzung des jeweiligen Abwärmepotenzials gemäß Abbildung 37 angesetzt[1]: Die Wärmeübertrager sind vereinfachend über den gesamten Abkühlvorgang hinweg eingezeichnet. Im Regelfall werden für die sensible Abkühlung und den Bereich der u.U. auftretenden Rauchgaskondensation mehrstufige Systeme eingesetzt, vgl. dazu auch (Forni et al. 2014). Des Weiteren sind u.a. aufgrund möglicher Degradation der Wärmeträgerfluide bzw. Kältemittel, die eine direkte Wärmeabgabe der Rauchgase bei schwankenden Betriebsbedingungen erschweren, je nach Anwendungsfall vorhandene Zwischenkreise in Abbildung 37 nicht dargestellt.

Wie in Kapitel 2 bereits angemerkt, werden Systeme zur Auskopplung von Abwärme aus Rauchgasen in der Praxis häufig derart ausgelegt, dass eine Auskondensation korrosiver Bestandteile weitestgehend vermieden werden kann. Alternativ müssen Systeme zur vorgeschalteten Abgasreinigung und/oder entsprechend korrosionsbeständige, regelmäßig zu reinigende Wärmeübertrager vorgesehen werden.

Auf eine separate Umwälzpumpe im Heizwasserkreislauf kann bei serieller Verschaltung mit einem bestehenden Wärmeerzeuger u.U. verzichtet werden. Im Falle einer Nutzung der Abwärme zur Vorwärmung des Heizwassers sind dabei die in Kapitel 2.1 benannten Einschränkungen zu beachten.

Zur Wärmeaufwertung von Abwärmeströmen, deren Temperatur für eine direkte Nutzung nicht ausreicht, kommen z.B. elektrisch angetriebene Kompressionswärmepumpen zum Einsatz. Dabei wird die erforderliche Nutztemperatur $T_{WP,out} = T_{2,el}$ über die direkte – d.h. zwischen unterem und oberen Temperaturniveau stattfindende – Verdichtung des gesättigten Kältemitteldampfs der Temperatur $T_{WP,in}$ realisiert (Abbildung 37, linker, grün hinterlegter Teil).

Zur alternativen thermischen Verdichtung bzw. Wärmesynproportionierung von niedrigem/hohem Temperaturniveau T_1 bzw. T_3 auf ein mittleres Temperaturniveau T_2 ist in Abbildung 37 beispielhaft die vergleichsweise ausgereifte und effiziente Absorptionswärmepumpe dargestellt (Brückner et al. 2015).[2] Obgleich die Abbildung der elektrisch angetriebenen Kompressionswärmepumpe im Modell für die hiesigen Zwecke ausreichend ist, soll das Funktionsprinzip der Absorptionswärmepumpe der Vollständigkeit halber ebenfalls kurz

[1] Das in Abbildung 37 dargestellte Schema zur externen, leitungsgebundenen Nutzung von Abwärme aus Rauchgasen ist prinzipiell auch bei der Nutzung gebundener Abwärme aus anderen Quellen (Abluft, Brüden, Abwasser usw.) anwendbar. Unterschiede beschränken sich im Wesentlichen auf den quellenseitigen Strang zur Auskopplung (Typ, Bauform des Wärmeübertragers, Notwendigkeit vor- bzw. nachgeschalteter Komponenten z.B. zur Reinigung oder Druckerhöhung), die eingesetzten Kälte-/Lösungsmittel sowie die detaillierte technische Ausführung.

[2] Diskontinuierlich arbeitende adsorptive Verfahren, die i.A. geringere Arbeitstemperaturen aufweisen, weitere (offene) Kreisprozesse zur thermischen Verdichtung (Brückner et al. 2015; Allplan-(Hrsg.) 2017), neuartige Hybridlösungen (Forni et al. 2014) sowie Disproportionierung von Abwärme werden zunächst nicht betrachtet (Hebecker 1995).

erläutert werden (ΔT steht für eine minimale, konstante Temperaturdifferenz bei der Wärmeübertragung[1]):

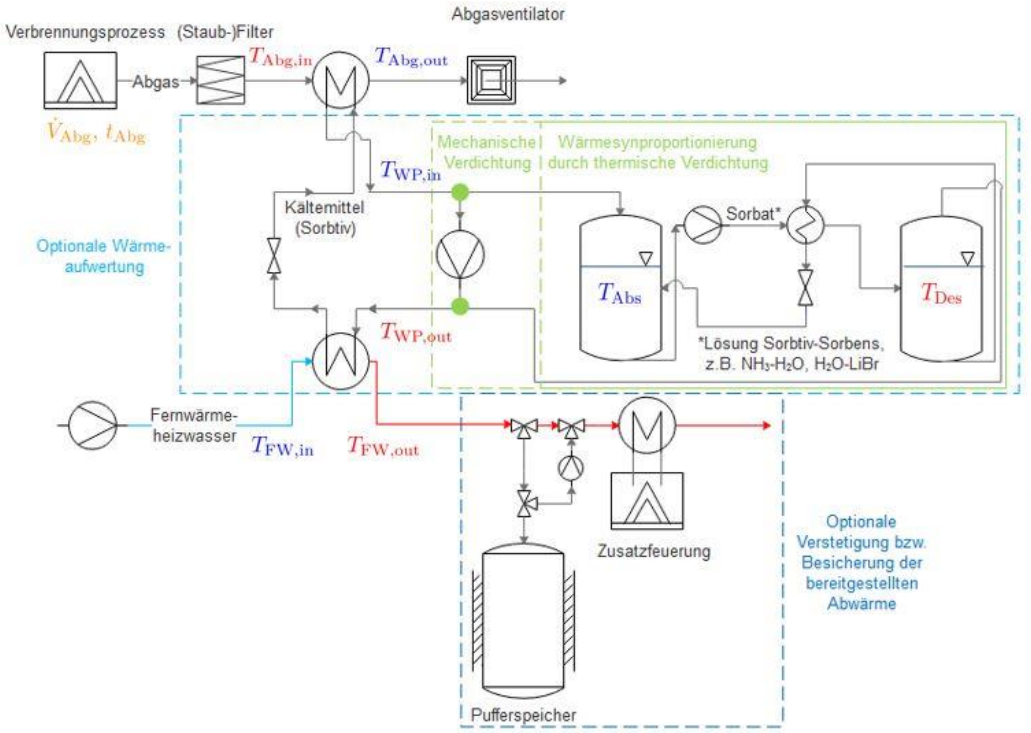


Abbildung 37: Vereinfachtes Systemschaubild zur externen, leitungsgebundenen Nutzung von Abwärme aus Rauchgasen.

Der durch die Rückgewinnung von Wärme aus dem Rauchgas erzeugte Kältemitteldampfstrom, dessen – aus einer Energiebilanz abgeleitete und über den Strömungsquerschnitt gemittelte – Temperatur $T_{WP,in}$ (unteres Temperaturniveau T_1) im Modell aus der Temperatur des Rauchgases $T_{Abg,in}$ am Eintritt in den Wärmeübertrager abgeschätzt wird, wird dem Absorber bei der Temperatur T_{Abs} zugeführt (s. Abbildung 37, rechter, grün hinterlegter Teil). Durch kontinuierliche Abfuhr der im Absorber freiwerdenden Kondensationsenthalpie bei $T_{WP,out} = T_{Abs} - \Delta T_0$ (mittleres (Nutz-)Temperaturniveau $T_{2,th}$) und Zirkulation der Sorbtiv-Sorbens-Lösung zwischen Absorber und Desorber bleiben die Temperatur- und Partialdruckverhältnisse im Absorber näherungsweise konstant. Die zur Austreibung des Kältemittels aus der Lösung im Desorber bei höherem Druckniveau und hoher Temperatur T_3 benötigte Wärmemenge (s. Abbildung 37, näherungsweise $T_{Des} + \Delta T_0$) wird entweder über zusätzlich zur Abwärme aus Rauchgasen am jeweiligen Standort verfügbare Prozesswärme oder z.B. durch einen Erdgasbrenner bereitgestellt. Über die kontinuierliche Abfuhr, Kondensation und Rezirkulation des ausgetriebenen Kältemittels kann erneut Wärme auf dem Temperaturniveau $T_{2,th}$ gewonnen werden.

[1] Die reale – über die Übertragungsstrecke i.A. veränderliche – treibende Temperaturdifferenz hängt v.a. von der erforderlichen, zu übertragenden Wärmeleistung ab und variiert z.B. bauartbedingt infolge unterschiedlicher spezifischer Übertragungsflächen sowie Wärmedurchgangskoeffizienten (vgl. Ausführungen in (Allplan-(Hrsg.) 2017)).

Die theoretisch möglichen Leistungs- bzw. Heizzahlen für eine vollständig reversible Wärmeaufwertung lauten für einen beliebigen Arbeitspunkt einer elektrischen bzw. thermischen Wärmepumpe wie folgt (ebd.):

$$COP_{el,ideal} = \frac{T_{WP,out}}{T_{WP,out} - T_{WP,in}} = \left|\frac{\dot{Q}_{Nutz,ideal}}{P_{el}}\right| > COP_{el,real}$$

$$COP_{th,ideal} = \frac{T_{WP,out}}{T_{WP,out} - T_{WP,in}} \cdot \frac{T_{Des} - T_{WP,in}}{T_{Des}} = \left|\frac{\dot{Q}_{Nutz,ideal}}{\dot{Q}_{zu}}\right| > COP_{th,real}$$

Hierin bezeichnet $\dot{Q}_{Nutz,ideal}$ den maximalen, theoretisch nutzbaren Wärmestrom bei zugeführter elektrischer Leistung P_{el} bzw. zugeführtem Wärmestrom $\dot{Q}_{zu}$ zur Austreibung des Kältemittels im Desorber (s. Abbildung 37). Die Temperaturen sind in der Einheit K einzusetzen.

Die sich letztlich ergebende, an das Heizwasser übertragbare Wärmemenge $\left|\dot{Q}_{FW}\right| = \dot{m}_{FW}\, c_{p,FW}\left(T_{FW,out} - T_{FW,in}\right)$ mit $c_{p,FW} = 4{,}185$ kJ/(kg K) (Wischnewski 2018a) wird abhängig von einer ggf. erforderlichen, zusätzlichen Wärmeaufwertung (aktive Wärmenutzung) gemäß Abbildung 38 ermittelt.

Tabelle 22: Modellrelevante Parameter elektrischer Kompressionswärmepumpen (vgl. (Maaß et al. 2015; Forni et al. 2014; Platt et al. 2010; Braasch et al. 2017) sowie Herstellerangaben)[1]

Leistungsklasse [kW]	**Bezeichnung/Typ**	**Temperaturniveau primärseitig in °C ($T_{WP,in}$)**	**Temperaturniveau sekundärseitig in °C ($T_{WP,out}$)**	**Mittlere Leistungszahlen**
< 1.000	Johnson Controls HeatPAC HPX	30 °C	< 95 °C	4.0
	Mayekawa HeatCO$_2$m	< 40 °C	< 95 °C	2.3-4.3
	Ochsner Energietechnik ISW(W)HS(S) ER3, R2R3	Ca. 55 °C	< 100 °C	2.5-4.6

[1] Es wird nicht detaillierter zwischen unterschiedlichen technischen Ausführungen und bspw. in Abhängigkeit des jeweils vorliegenden temperaturabhängigen Dampfdrucks eingesetzten Kälte- bzw. Lösungsmittels unterschieden.

	thermea HHR/HHS	40 °C	110 °C	k. A.
	Viessmann VITOCAL 350-HAT Pro	< 45 °C	< 95 °C	3.3.-3.4
< 10.000	Bosch HHR	k. A.	Max. 110 °C	k. A.
	Combitherm Wärmetrans	Ca. 30-35° C	Ca. 75 °C	3
	GEA RedAst-rum	Ca. 35-40 °C	Ca. 75 °C	< 6.1
> 10.000	Friotherm Uni-top 50FY	k. A.	< 95 °C	k. A.
	Star Refrigera-tion Neatpump	k. A.	Max. 95 °C	> 3

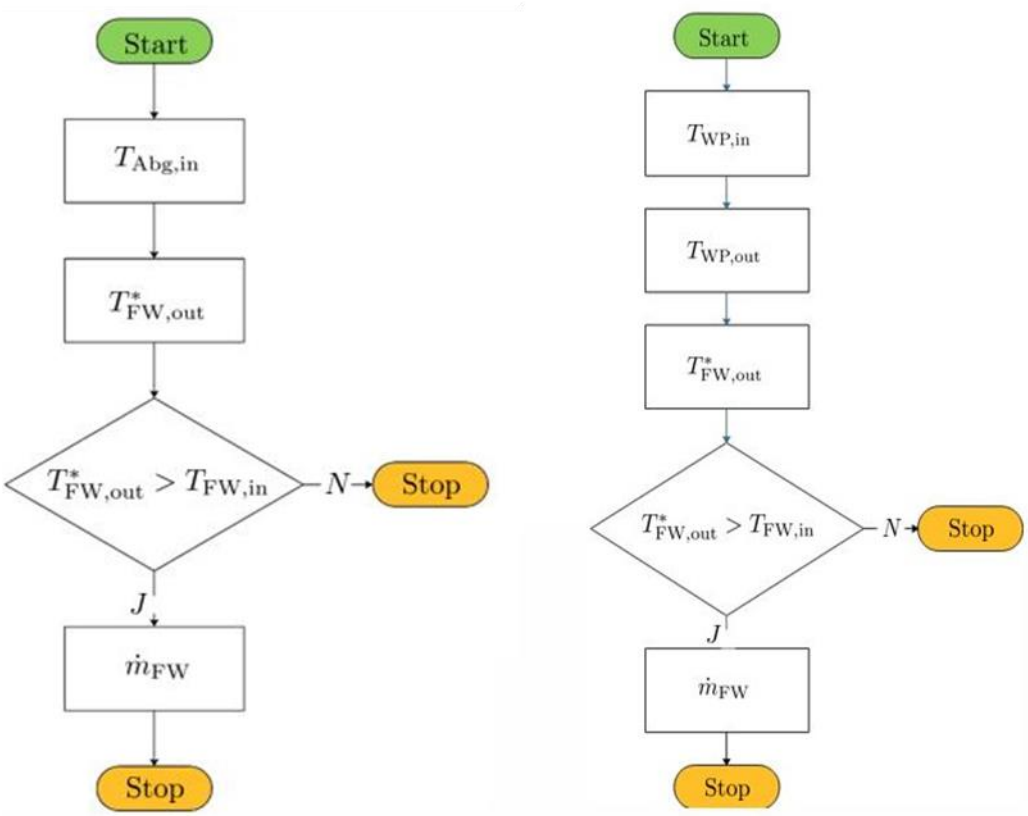


Abbildung 38: Programmablaufplan zur Ermittlung des technisch nutzbaren Abwärmepotenzials bei passiver (links) bzw. aktiver Wärmenutzung (rechts)

Für die passive Wärmenutzung (Abbildung 38 links) zwischen der beliebig festzusetzenden Übergangstemperatur T_{trans} (z.B. 100 °C) und T_{max} wird die auskoppelbare Wärmeleistung aus der Temperatur der Rauchgase $T_{Abg,in}$ abgeschätzt. Die vorläufige Austrittstemperatur des Heizwassers nach Wärmeauskopplung ergibt sich mit der treibenden Temperaturdifferenz am Rauchgaseintritt ΔT_{in} (Abbildung 39, hier 10 °C) in erster Näherung zu

$$T^*_{FW,out} = T_{Abg,in} - \Delta T_{in}$$ [1]

Da die real stattfindenden Wärmetransportvorgänge und -restriktionen im Rahmen dieser Betrachtung nicht modelliert werden können (dazu z.B. (Hills & Gambhir 2014)), wird nachfolgend eine Prüfbedingung ergänzt: Sollte die Temperatur des Heizwassers am Austritt des Wärmeübertragers kleiner als die zugehörige Eintrittstemperatur des Heizwassers (angenommene Rücklauftemperatur aus dem Fernwärmenetz, z.B. 60 °C) sein, so ist aufgrund der zu geringen Temperaturunterschiede zwischen Wärmequelle (Temperaturniveau der Rauchgase) und -senke (Temperaturniveau des Heizwasser-Rücklaufs), die im Bereich bzw. unterhalb der mindestens benötigten treibenden Temperaturdifferenzen zur Wärmeübertragung liegen, kein technisches Potenzial zur passiven Wärmenutzung vorhanden. Andernfalls kann der vorläufige Massenstrom $\dot{m}^*_{FW}$ des Heizwassers unter Annahme einer minimal erforderlichen Temperaturdifferenz am Austritt des Rauchgases bzw. Eintritt des Heizwassers ΔT_{out} (Abbildung 39, hier grob abgeschätzt mit 5 °C, vgl. (Incropera et al. 2007)) ohne Modellierung der Wärmetransportvorgänge sowie unter Vernachlässigung auftretender Druckverluste und -restriktionen angenähert werden zu

$$\dot{m}^*_{FW} = \frac{\dot{m}_{Abg}\, c_{p,Abg} \left(\left(T_{FW,in} + \Delta T_{out}\right) - T_{Abg,in}\right)}{c_{p,FW} \left(T_{FW,in} - T^*_{FW,out}\right)}$$

Falls die Austrittstemperatur oberhalb der anzusetzenden, maximalen Betriebstemperatur des Fernwärmesystems $T_{FW,max}$ (z.B. 150 °C im Bestand) liegt, wird der Massenstrom $\dot{m}^*_{FW}$ durch Beimischung von Kaltwasser der Temperatur T_{env} auf $T_{FW,out} = T_{FW,max}$ heruntergekühlt und es ergibt sich

$$\dot{m}_{FW} = \dot{m}^*_{FW} \frac{T^*_{FW,out} - T_{env}}{T_{FW,max} - T_{env}}$$

Andernfalls gilt $T_{FW,out} = T^*_{FW,out}$ bzw. $\dot{m}_{FW} = \dot{m}^*_{FW}$.

[1] Wärmerückgewinnung ist ein typischer Anwendungsfall eines Gegenstromwärmeübertragers, da infolge der im Gegenstrom geführten Medien eine höhere Austrittstemperatur als bei Gleichstrom erzielt werden kann. Details zu den unterschiedlichen Wirkprinzipien, Grädigkeiten etc. finden sich bspw. in (Incropera et al. 2007).

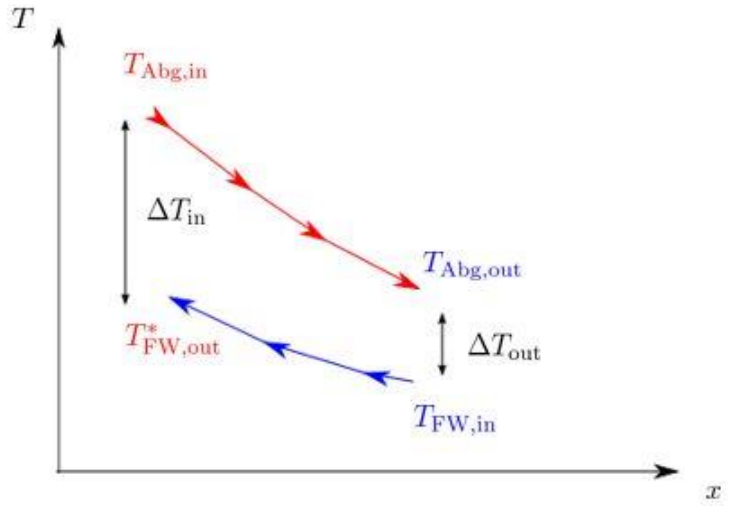


Abbildung 39: Schematischer Temperaturverlauf entlang des Gegenstromwärmeübertragers bei passiver Wärmenutzung.

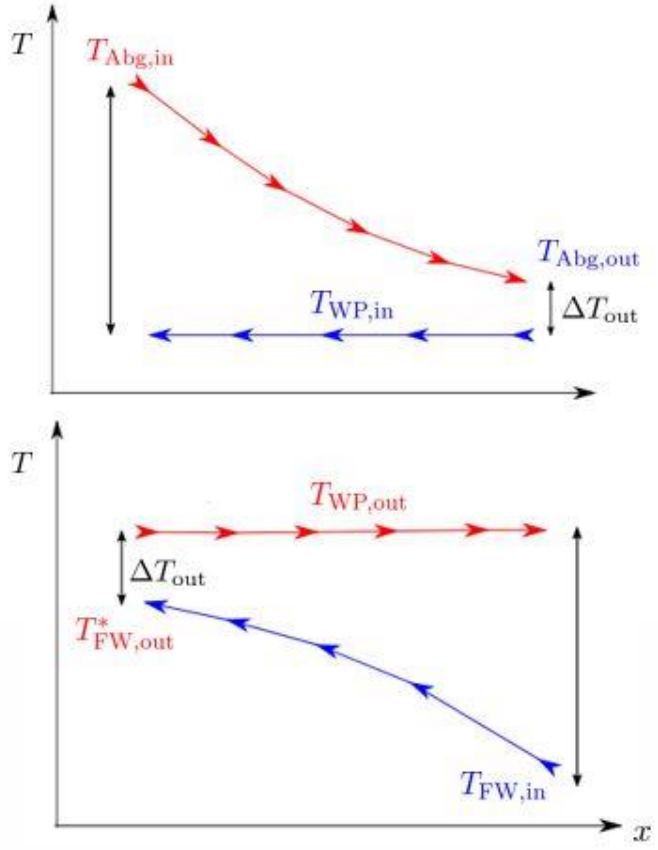


Abbildung 40: Schematische Temperaturverläufe entlang der Gegenstromwärmeübertrager bei aktiver Wärmenutzung.

Bei aktiver Wärmenutzung (Abbildung 38 rechts, Abbildung 40) zwischen $T_1 + \Delta T_{out}$ ($T_{WP,in} + \Delta T_{out}$) und der Übergangstemperatur T_{trans} wird das untere Temperaturniveau

T_1 ($T_{WP,in}$), bei dem das Kältemittel verdampft wird, gemäß Tabelle 22, d.h. in Abhängigkeit des ausgewählten Wärmepumpentyps festgesetzt.

Unter Zuhilfenahme der entsprechenden Angaben zum möglichen Temperaturhub der ausgewählten (elektrischen) Wärmepumpe kann das mittlere (Nutz-)Temperaturniveau T_2 ($T_{WP,out}$) abgeschätzt werden. Daraus wiederum wird mit ΔT_{out} (s.o., 5 °C) die vorläufige Austrittstemperatur des Heizwassers abgeleitet:

$$T^*_{FW,out} = T_{WP,out} - \Delta T_{out}$$

Nachfolgend wird das Prüfkriterium $T^*_{FW,out} > T_{FW,in}$ herangezogen, bei dessen Nichterfüllung kein technisches Potenzial zur aktiven Abwärmenutzung vorhanden ist. Andernfalls kann der vorläufige Massenstrom $\dot{m}^*_{FW}$ des Heizwassers unter Annahme einer minimal erforderlichen Temperaturdifferenz am Austritt des Rauchgases bzw. Eintritt des flüssigen Kältemittels in den Verdampfer (ΔT_{out}) angenähert werden zu[1]

$$\dot{m}^*_{FW} = \frac{\dot{m}_{Abg}\, c_{p,Abg} \left(\left(T_{WP,in} + \Delta T_{out}\right) - T_{Abg,in}\right) COP_{el}}{c_{p,FW} \left(T_{FW,in} - T^*_{FW,out}\right)(COP_{el} - 1)}$$

Für Fälle, in denen die maximale Betriebstemperatur $T_{FW,max}$ des Systems bzw. die Übergangstemperatur T_{trans} überschritten wird, wird der Massenstrom durch Beimischung von Kaltwasser entsprechend heruntergekühlt.

Zusammenfassend kann anhand der Programmablaufpläne nach Abbildung 38 der je Emissionsstrom (Abgasstrom) auskoppelbare Wärmestrom $\dot{Q}_{FW}$ bzw. der zugehörige Massenstrom $\dot{m}_{FW}$ der Temperatur $T_{FW,out}$ bestimmt werden. Abwärmeströme zwischen der Übergangstemperatur T_{trans} und T_{max} eignen sich dabei i.A. für eine passive Wärmenutzung, während Abwärmeströme zwischen $T_1 + \Delta T_{out}$ ($T_{WP,in} + \Delta T_{out}$) und T_{trans} für die aktive Wärmenutzung in Betracht gezogen werden können.

Anhand der eindeutigen Standort-ID werden die Datensätze anschließend auf Standortebene aggregiert, d.h. die jeweilige mittlere Heizwassertemperatur $\overline{T}_{FW,out}$ sowie der mittlere Massen- bzw. Wärmestrom ($\dot{m}_{FW,agg}$ bzw. $\dot{Q}_{FW,agg}$) werden ermittelt und dem ersten der im Regelfall in relativer Nähe zueinander liegenden und zu aggregierenden Datenpunkte zugeschrieben. Hierbei wird eine Vergleichmäßigung der Beiträge einzelner Abwärmequellen entsprechend der maximalen auftretenden Betriebsstundenzahl unterstellt. Damit wird der mittlere Massenstrom wie folgt berechnet:

$$\dot{m}_{FW,agg} = \frac{\sum_i \dot{m}_{Abg,i} t_{Abg,i}}{\max\left(t_{Abg,i}\right)}$$

Die mittlere Heizwassertemperatur wird aus einer Gewichtung mit den jeweiligen Heizwassermengen pro Jahr abgeleitet:

[1] Mögliche – auslegungsabhängige – Restriktionen in Bezug auf die zur Gewährleistung eines ausreichenden Wärmeübergangs erforderlichen Massenströme, die die maximal zulässigen Temperaturspreizungen des Rauchgases bzw. des Heizwassers verringern, werden hierbei vernachlässigt.

$$\overline{T}_{FW,out} = \frac{\sum_i \dot{m}_{Abg,i} t_{Abg,i} T_{FW,out,i}}{\sum_i \dot{m}_{Abg,i} t_{Abg,i}}$$

Die Wärmemenge je Standort $Q_{FW,agg}$ ergibt sich damit zu

$$Q_{FW,agg} = \sum_i \dot{Q}_{FW_i} t_{Abg,i}$$

An dieser Stelle können die neben den Informationen zu Abgasströmen weiterhin aufbereiteten, sekundären Datengrundlagen integriert werden. Diese umfassen zunächst Angaben zu standortspezifischen Brennstoffeinsätzen gemäß den aufbereiteten Emissionserklärungen nach 11. BImSchV (Kapitel 4.2.1), für die keine bzw. unvollständige Angaben zu Abgasströmen vorliegen oder aus CO_2-Emissionen nach E-PRTR abgeschätzte Brennstoffeinsätze (Kapitel 4.2.2), so dass die zuvor beschriebene Methodik zur detaillierteren Quantifizierung des Potenzials an sensibler Wärme aus Rauchgasdaten nicht herangezogen werden kann. Die entsprechenden sekundären Datensätze enthalten u.a.:

- Georeferenzierte Raumkoordinaten
- Eindeutige Standort-ID
- Wirtschaftszweig-Code nach WZ2008 bzw. NACE-Systematik (C10-C18, C20-C33)
- Regionalschlüssel des Bundeslands (01-16)
- Freiwerdende Wärmemenge bei vollständigem Umsatz des Brennstoffs bezogen auf den Heizwert unter Standardbedingungen in TJ/a

Anhand des branchenspezifischen Verhältnisses aus den für die primären Datensätze durchschnittlich ermittelten Wärmemengen $\bar{Q}_{FW,agg}$ zu den brennstoffseitig zugeführten Wärmemengen, das über den Wirtschaftszweig-Code (NACE-Code) und alle zugehörigen Datensätze ausgewertet wird, ist eine überschlägige Abschätzung der im Mittel nutzbaren Abwärmemengen $\bar{Q}^{+}_{FW,agg}$ aus dem aggregierten Brennstoffeinsatz pro Standort möglich. Werden die mittlere(n) Heizwassertemperatur $\bar{T}^{+}_{FW,out}$ sowie Betriebsstundenzahlen $\bar{t}^{+}_{Abg}$ ebenfalls anhand der branchenspezifisch ausgewerteten primären Datensätze angenähert, ergibt sich der standortspezifische Massenstrom $\dot{m}^{+}_{FW,agg}$ wie folgt:

$$\dot{m}^{+}_{FW,agg} = \frac{\bar{Q}^{+}_{FW,agg}}{\bar{t}^{+}_{Abg}\, c_{p,FW} \left(\bar{T}^{+}_{FW,out} - T_{FW,in}\right)}$$

Da die bisher erfassten Abwärmemengen ausschließlich auf Emissionen aus der industriellen Nutzung von Brennstoffen zurückzuführen sind, wurde abschließend eine Recherche zu Abwärmemengen, die aus dem Einsatz von Prozessstrom resultieren, durchgeführt (Kapitel 4.1.3). Zur technisch-wirtschaftlichen Abschichtung der hierbei verorteten und quantifizierten, auf gefasste Abwärmeströme zurückgehende Potenziale werden die folgenden Attribute herangezogen:

- Georeferenzierte Raumkoordinaten
- Eindeutige Standort-ID
- Wirtschaftszweig-Code nach WZ2008 bzw. NACE-Systematik (C10-C18, C20-C33)
- Regionalschlüssel des Bundeslands (01-16)
- Theoretisch verfügbare Abwärmemenge in gefasster Form in TJ/a

- Temperaturniveau der gefassten Abwärme in °C
- Trägermedium der Abwärme (Luft bzw. (Kühl-)Wasser)

Im Gegensatz zu den übrigen sekundären Datensätzen können hier anhand einer branchenspezifischen Auswertung der für den primären Datensatz abgeleiteten Größen nur bedingt Rückschlüsse auf die entsprechenden Kenngrößen der prozessstrombedingten Abwärmeströme gezogen werden. Insbesondere eine unmittelbare Ableitung der nutzbaren Abwärmemenge $Q^{+}_{FW,agg}$ aus dem jeweiligen branchenspezifischen Verhältnis von $\bar{Q}_{FW,agg}$ zur theoretisch verfügbaren Abwärmemenge erscheint aufgrund der grundsätzlich anderen Charakteristik der Abwärmequellen (Trägermedium, Prozess und damit einhergehende Parameter) nicht zweckmäßig. Insofern werden die ergänzenden Datensätze, die teilweise bereits im Vorfeld erfassten Standorten zuzuordnen sind, in den primären Datensatz integriert.

Die Stoffwerte der Trägermedien vorhandener (Ab-)Wärmeströme werden mit ρ_{Wasser}= 998 kg/m³, $c_{p,Wasser} = 4{,}185$ kJ/(kg K) (Wischnewski 2018a) bzw. ρ_{Luft}= 1,168 kg/m³, $c_{p,Luft} = 1{,}007$ kJ/(kg K) (Wischnewski 2018b) angesetzt. Wird die mittlere Betriebsstundenzahl $\bar{t}^{+}_{Abw}$ wie zuvor anhand der branchenspezifisch ausgewerteten primären Datensätze abgeschätzt, kann der Volumenstrom des Trägermediums ermittelt werden:

$$\dot{V}^{+}_{Abw} = \frac{Q_{Abw,th}}{\bar{t}^{+}_{Abw}\, \rho_{Abw}\, c_{p,Abw}\, \left(T_{Abw,in} - T_{env}\right)}$$

6.1.3 Technisch netzgebunden nutzbares Potenzial

Zur Zusammenführung der in der beschriebenen Weise angereicherten Abwärmedatensätze und der Wärmesenken wird ein (quadratischer) Gebietsumgriff (Abbildung 41, hier 10x10 km) definiert, innerhalb dessen das Abwärmepotenzial der jeweiligen Quelle(n) technisch sinnvoll eingekoppelt werden kann.

Allgemein können innerhalb des gewählten Gebietsumgriffs n für die Einbindung in Frage kommende Abwärmeströme berücksichtigt werden, die hierfür auf Standortebene mit der Anzahl der Standorte je Gebietsumgriff $m \leq n$ aggregiert werden. Abbildung 41 stellt bspw. zwei Standorte ($m = 2$) mit einer jeweils nicht weiter spezifizierten Anzahl von Abwärmequellen (Anzahl n) dar.

Der Gebietsumgriff enthält einzelne Rasterzellen, die kumulierte Wärmebedarfe und Informationen über bestehende Fernwärmeversorgung (blau in Abbildung 41) bzw. potenziell mögliche (wirtschaftliche) Nahwärmepotenziale (orange) beinhalten (Netzpotenzialmodell, vgl. Kapitel 3.5).

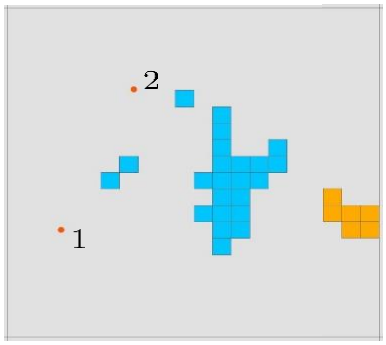


Abbildung 41: Schematisch dargestellter Gebietsumgriff für die Ermittlung des technischen und wirtschaftlichen Abwärmepotenzials (blau: bestehende Fernwärmeversorgung, orange: potenzielle Nahwärmenetze)

Das sich unter Berücksichtigung des rasterzellenspezifischen Anschlussgrads im Referenzjahr 2030 ergebende Wärmesenkenpotenzial Q^*_{Senke} in den (potenziell) fernwärmeversorgten Rasterzellen wird auf die nach Aggregation auf Standortebene individuell betrachteten m Abwärmeströme wie folgt mit dem Faktor g_m gewichtet aufgeteilt:

$$Q_{Senke,m} = Q^*_{Senke} g_m, \qquad g_m = \frac{Q_{FW,agg,m}}{\sum_m Q_{FW,agg,m}}$$

Ohne weitergehende Berücksichtigung der Gleichzeitigkeit ergibt sich das technische Abwärmepotenzial je Standort $Q^{techn.}_{FW,nutz,m}$ dann zu $Q_{FW,agg,m}$, sofern $Q_{Senke,m} \geq Q_{FW,agg,m}$. Andernfalls wird das technisch nutzbare Abwärmepotenzial $Q^{techn.}_{FW,nutz,m}$ auf $Q_{Senke,m}$ beschränkt.

6.1.4 Wirtschaftlich netzgebunden nutzbares Potenzial

Für die Ermittlung des anteiligen wirtschaftlich nutzbaren Abwärmepotenzials sind im Folgenden die wesentlichen Kostenbestandteile eines Systems zur Abwärmenutzung aus Rauchgasen aufgeführt (s. auch Kapitel 2):

Investitionen

- Erzeugung: Wärmeübertrager primärseitig bzw. „Wärmeaufwertungssystem quellenseitig“ (vgl. Abbildung 37), Abscheideeinrichtung, Staubfilter, ggf. Pufferspeicher, Zusatzbrenner[1]
- Verteilung: Wärmeübertrager sekundärseitig bzw. „Wärmeaufwertungssystem senkenseitig“[2], Transport-/Verteilleitungen, Armaturen, sekundärseitige Umwälzeinrichtungen/ggf. Druckhaltung, ggf. Beimisch-/Übergabestationen

[1] Diese Kostenbestandteile definieren im Wesentlichen den Abwärmebezugspreis.
[2] Der sekundärseitig durch das aufzuheizende Fernwärmeheizwasser durchströmte Wärmeübertrager (vgl. Abbildung 37) kann je nach Festlegung ausschließlich zur Erzeugung oder Verteilung oder auch beiden Bilanzkreisen zu gleichen Teilen hinzugerechnet werden.

Betriebskosten

- Zusätzliche Brennstoff-/(Pump-)Stromkosten (z.B. durch Desorption/elektr. Kompression, ggf. Stromaufnahme durch abgasseitig installierte Ventilatoren)[1]
- Wartungs- und Instandhaltungskosten
- Personalkosten
- Sonstige Kosten (Versicherung usw.)

Marge/Overhead

Diese sowie weitere Parameter (u.a. Zinsfaktor, Betrachtungszeitraum) werden nach Tabelle 23 angesetzt. Die überschlägig angegebenen, spezifischen Investitionen für die Abwärmeauskopplung setzen sich im Wesentlichen aus den spezifischen Kosten für Wärmeübertrager, (Kompressions-)Wärmepumpe (bei aktiver Wärmenutzung) sowie sonstigen Kosten (Staubfilter, Abgasventilator, Verrohrung etc.) zusammen (vgl. Abbildung 37). Für passive Systeme werden diese in (LfU-Bayern 2008) mit 70-450 €/kW (bezogen auf die Abgaswärmeleistung) angegeben, wobei mit steigender Leistung generell geringere spezifische Kosten zu erwarten sind. Die anteiligen spezifischen Kosten für Wärmeübertrager wurden dabei anhand der in (SAENA 2016) veranschlagten Größenordnung von 10-150 €/kW für – aufgrund des komplexen Aufbaus ggü. anderen Bauformen meist teurere – Rohrbündelwärmeübertrager sowie einer Auswertung von in der Vergangenheit durch die GEF eingeholten Richtpreisangeboten zu Wärmeübertragern verschiedener Bautypen und Leistungsklassen abgeschätzt.

Die spezifischen Kosten für (Kompressions-)Wärmepumpen wurden aus (ebd.; Wolf et al. 2014; Lambauer et al. 2008) abgeleitet und mit durch die GEF vorgenommenen Kostenschätzungen abgeglichen, wobei ggü. Systemen im ein- bis zweistelligen kW-Bereich tendenziell niedrigere spezifische Investitionen von demnach etwa 200-250 €/kW[1] (bezogen auf die Heizleistung, zzgl. Kosten für die Einbindung und Inbetriebnahme in ähnlicher Größenordnung) zu erwarten sind (Platt et al. 2010; Wunderlich et al. 2016; Kaltschmitt et al. 2013; DIHK-(Hrsg.) 2017).

Die im Weiteren angesetzten Kosten für netzseitige Betriebsmittel (Leitungen, Netzpumpen, Druckhaltung, Armaturen etc.) wurden auf Grundlage von Richtpreisangeboten sowie allg. Erfahrungswerten angesetzt.

Generell ist anzumerken, dass die tatsächlich anfallenden, spezifischen Investitionen bei der Erschließung von Abwärmepotenzialen im Einzelfall erheblich von den angesetzten Kosten nach Tabelle 23 abweichen können. Insbesondere Wärmeübertrager und -pumpen sind häufig individuelle Einzellösungen, die in hohem Maße von den jeweils vorliegenden Randbedingungen wie Temperaturniveau, Menge, Art und Zusammensetzung des Wärmeträgers, baulichen Einschränkungen usw. abhängig sind.

[1] Zur Einordnung sei ergänzend auf die Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt verwiesen. Demnach werden Wärmepumpen mit mehr als 100 kW_{th} Wärmeleistung über das KfW-Programm Erneuerbare Energien, Programmteil Premium mit bis zu 80 €/kW_{th} Tilgungszuschuss im Nennbetrieb (max. 50.000 € je Einzelanlage) gefördert, sofern die im Einzelnen relevanten Fördervoraussetzungen erfüllt sind.

Tabelle 23: Kostenansätze und Wirtschaftlichkeitsparameter

Bezeichnung Betriebsmittel bzw. Komponente	**Wert**	**Einheit**
Abwärmeauskopplung, passiv (Wärmeübertrager primär-/sekundärseitig inkl. Abscheideeinrichtung, Staubfilter)	100	€/kW_{th} (bezogen auf die jeweils genutzte Abwärmeleistung)
Abwärmeauskopplung, aktiv (Wärmeaufwertungssystem quellen-/senkenseitig inkl. Abscheideeinrichtung, Staubfilter)	500	€/kW_{th} (bezogen auf die jeweils genutzte Abwärmeleistung)
Transportleitung inkl. Tiefbaukosten	350-1.950[1]	€/m (bezogen auf Trassenmeter)
Sekundärseitige Umwälzeinrichtungen (Netzpumpen)	150	€/(m^3/h) (bezogen auf die Fördermenge im Nennbetrieb)[2]
Druckhaltung, Armaturen	200.000	€ (pauschal)
Beimisch-/Übergabestation	100.000	€ (pauschal)
Bezeichnung Parameter	Wert	Einheit
Pumpstromanteil	2	% (bezogen auf abgesetzte Wärmemenge)
Stromkosten[3]	150	€/MWh_{el}
Wartungs- und Instandhaltungskosten	2	% (bezogen auf Investitionssumme)
Personalkosten	2	% (bezogen auf Investitionssumme)
Sonstige Kosten (Versicherung usw.)	1	% (bezogen auf Investitionssumme)
Wärmeverluste	$\min\left(15,15 \cdot \left(\frac{\overline{T}_{FW,out} - T_{env}}{90 - T_{env}}\right)\right)$	%
Betrachtungszeitraum	20	a
Zinsfaktor	4,5	%

Anhand der Differenz zwischen den auf dieser Grundlage abgeleiteten, standortspezifischen Wärmegestehungskosten w_{th}^{*} und den in Anlehnung an üblicherweise anlegbare Fernwärmepreise, d.h. unter Berücksichtigung alternativer (konventioneller) Erzeugungstechnologien angesetzten Referenzkosten w_{th} je Endenergieenergieeinheit können die jeweiligen

[1] In Abhängigkeit der zur Begrenzung des Druckverlusts auf max. 150 Pa/m erforderlichen Nennweite.
[2] Je nach Fördermenge würden in der Praxis mehrere kleinere Pumpenaggregate parallel verschaltet. Der hier veranschlagte spezifische Preis beinhaltet im Übrigen bereits die Kosten, die für die Installation eines im Falle einer Betriebsstörung eingesetzten redundanten Aggregats anfallen ((n-1)-Prinzip).
[3] Annahme auf Grundlage der durchschnittl. Strompreise der Industrie im Jahr 2016 (DIHK-(Hrsg.) 2017).

Potenziale zum einen als wirtschaftlich oder unwirtschaftlich klassifiziert und zum anderen Kosten-Potenzial-Kurven abgeleitet werden. Etwaige Fördermittel werden in diesem Zusammenhang nicht spezifisch berücksichtigt (vgl. hierzu Kapitel 7).

Zunächst wird eine schrittweise Aufteilung des je Standort ermittelten technisch nutzbaren Abwärmepotenzials $Q_{FW,nutz,m}^{techn.}$ auf die nächstgelegensten[1] Rasterzellen, die (potenziell) fernwärmeversorgt sind, vorgenommen. Die Aufteilung erfolgt in Reihenfolge des jeweils verfügbaren technischen Abwärmepotenzials $Q_{FW,nutz,m}^{techn.}$. Je zusammenhängendem Rasterzellenumgriff werden die sich insgesamt ergebenden standortspezifischen Wärmegestehungskosten w_{th}^{*} nach Tabelle 23 abgeschätzt. Dabei wird unterstellt, dass die durch Fernwärme wirtschaftlich erschließbaren Rasterzellen bereits fernwärmeversorgt sind, so dass keine weiteren Erschließungskosten zu berücksichtigen sind[2]. Sofern die Differenz zwischen den Referenzkosten w_{th} und w_{th}^{*} positiv ist, wird das entsprechende Abwärmepotenzial des jeweils untersuchten Standorts als wirtschaftlich nutzbares Abwärmepotenzial $Q_{FW,nutz,m}^{wirtschaftl.}$ ausgewiesen.

Ist das technisch nutzbare Potenzial $Q_{FW,nutz,m}^{techn.}$ des Standorts noch nicht ausgeschöpft, werden weitere Rasterzellenumgriffe (anteilig) zugeordnet und in gleicher Weise wirtschaftlich bewertet. Bereits abschließend zugeordnete Rasterzellen werden für nachfolgend zu analysierende Abwärmequellen im jeweiligen Gebietsumgriff nicht weiter berücksichtigt.

Abbildung 42 veranschaulicht das Vorgehen am Beispiel einer einzelnen, auf Standortebene aggregierten Abwärmequelle. Die dort benannten, im Vorfeld zu initialisierenden Zellmatrizen beinhalten zeilenweise die im Grundraster (Gebietsumgriff) enthaltenen, fernwärmeversorgten Rasterzellen einschließlich aufsteigender Entfernung zur jeweiligen Quelle, die zugehörigen, im Zuge des Algorithmus anteilig aufgeschlüsselten Wärmebedarfe sowie Informationen über eine bereits abschließend erfolgte Zuordnung der jeweiligen Rasterzellen.

Der Einfluss der Ausrichtung bzw. Positionierung des zunächst beliebig verorteten, übergeordneten Grundrasters auf das ermittelte, technische bzw. wirtschaftliche Potenzial wird durch eine axiale Verschiebung in horizontaler bzw. vertikaler Richtung und die Mittelung der Kenngrößen der jeweils erfolgenden Auswertung eliminiert.

[1] Dieser Ansatz zur Aufteilung des technisch nutzbaren Abwärmepotenzials der entsprechenden Quellen kann nicht den Anspruch haben, ein wirtschaftliches Optimum im mathematischen Sinne zu finden, sondern unterstellt zunächst, dass die möglicherweise höhere Wärmedichte weiter entfernter Zellen bzw. Zellverbünde durch die entsprechend steigenden Kosten für die Transportleitungen weitestgehend kompensiert wird (im Sinne einer kumulativen – jedenfalls nicht erschöpfend kombinatorischen – Erschließung). Darüber hinaus wird die Anbindung der Zellverbünde aus pragmatischen Gründen jeweils unabhängig voneinander vorgenommen.

[2] Die Erschließungskosten wurden bereits implizit im Rahmen der Nahwärmepotenzialermittlung (vgl. Kapitel 3.5) berücksichtigt.

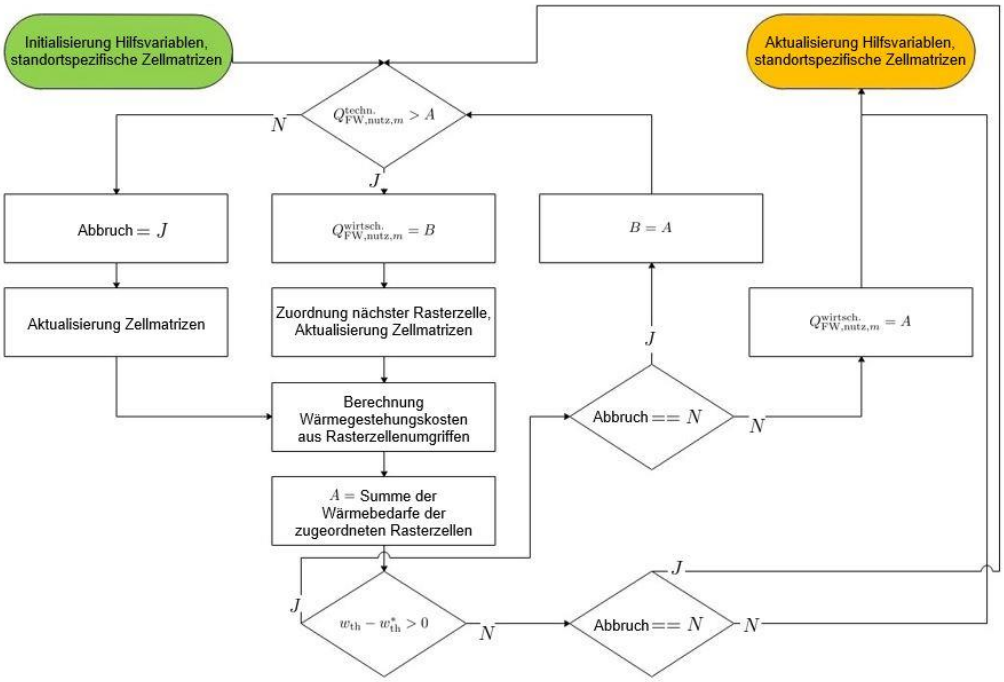


Abbildung 42: Schematisches Vorgehensmodell zur Ermittlung des anteiligen wirtschaftlichen Abwärmepotenzials für eine einzelne Abwärmequelle auf Standortebene.

6.2 Ergebnisse

6.2.1 Analyse von Schadstoffmengen

Den detaillierten Auswertungen der Abwärmepotenziale gemäß vorbeschriebener Methodik vorangestellt wird eine Auswertung der im primären Datensatz angegebenen Schadstoffmengen. Wie zuvor erwähnt, erfolgt im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen keine detaillierte Berücksichtigung schadstoffbedingter Temperaturrestriktionen. Die in den Emissionserklärungen quellenspezifisch ausgewiesenen Schadstoffmengen erlauben jedoch zumindest eine grobe, qualitative Beurteilung der grundsätzlichen Relevanz dieser Thematik im Hinblick auf schwerpunktmäßig betroffene Branchen. Dabei ist zu beachten, dass insbesondere bei kleinen Grundgesamtheiten fehlerhafte Eingangsdaten (häufig falsche oder ungenaue Angaben) zu einer deutlichen Über- oder Unterschätzung der Schadstoffmengen führen können.

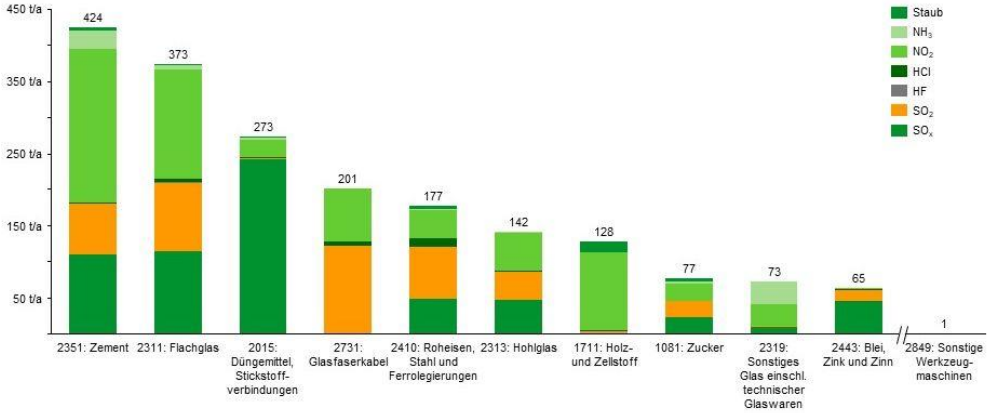


Abbildung 43: Mittlere Jahresfrachten ausgewählter Schadstoffe in berichtspflichtigen Emissionsvorgängen (Rauchgasströme) pro Standort aus den aufbereiteten Emissionsdaten der 11. BImSchV differenziert nach Wirtschaftszweigen.

Aus Abbildung 43 kann – unter Berücksichtigung der vorgenannten Einschränkungen – abgeleitet werden, dass u.a. in den folgenden Branchen mit größeren Schadstoffmengen und dementsprechend ggf. erschwerter Nutzbarkeit der in Form von Rauchgasen anfallenden Abwärme zu rechnen ist:

- NACE 2351: Herstellung von Zement – v.a. NO_2 sowie SO_2 bzw. SO_x
- NACE 2311: Herstellung von Flachglas – v.a. NO_2 sowie SO_2 bzw. SO_x
- NACE 2015: Herstellung von Düngemitteln und Stickstoffverbindungen – v.a. SO_x

6.2.2 Differenzierung nach Temperaturbereichen

Für die im Weiteren erfolgende Auswertung (Verortung, Quantifizierung) der theoretischen bzw. technisch-wirtschaftlichen Abwärmepotenziale wird grundsätzlich zwischen den im Nieder- und Mitteltemperatur- (bis 300 °C) sowie Hochtemperaturbereich (> 300 °C) vorliegenden Mengen differenziert. Gleichermaßen werden die technisch-wirtschaftlichen Potenziale sowohl bei einer ausschließlichen Berücksichtigung von Bestandsnetzen aus dem Netzpotenzialmodell als auch bei einer weitergehenden Mitnahme von als potenziell nahwärmeversorgt ausgewiesenen Rasterzellen ermittelt.

Darüber hinaus werden die folgenden Szenarien, die sich hinsichtlich der durchschnittlichen Netzbetriebstemperaturen und den damit einhergehenden Temperaturbändern für die passive bzw. aktive Wärmenutzung unterscheiden, betrachtet:

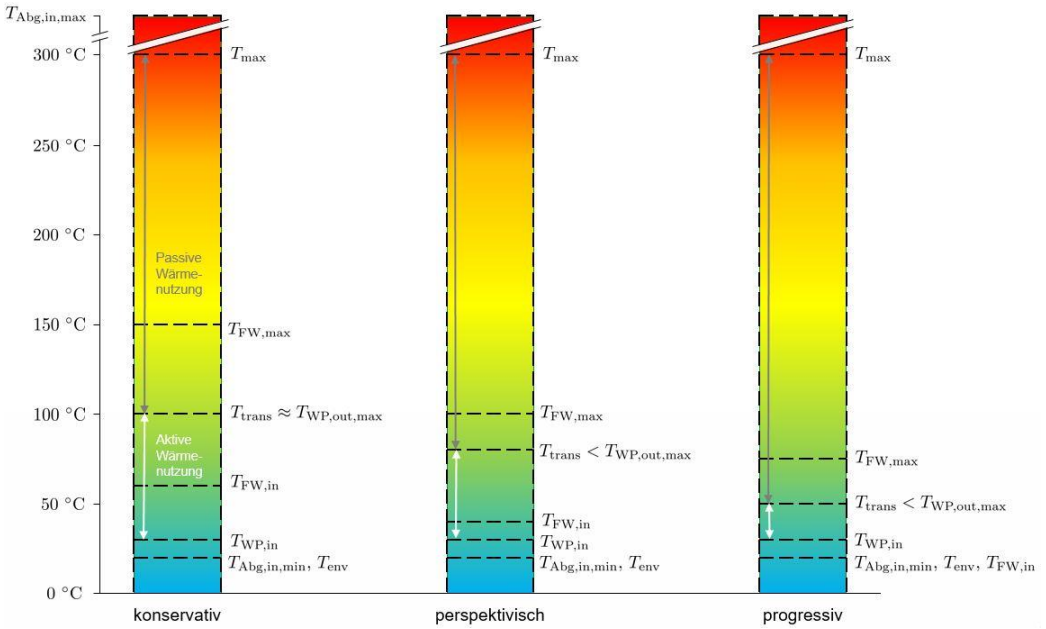


Abbildung 44: Betrachtete Szenarien zur Einkopplung von Abwärme: Netzbetriebstemperaturen im Status quo, perspektivisch sowie progressiv.[1]

In allen drei Fällen werden dabei stellvertretend die Betriebsparameter der „Johnson Controls HeatPAC HPX“ (Tabelle 22), welche eine auch im konservativen Szenario ausreichende Temperaturerhöhung ermöglicht, angesetzt.

[1] Hierbei wird angenommen, dass die kundenseitig erforderlichen Mindesttemperaturen v.a. zur Bereitstellung von Trinkwarmwasser über in den betroffenen Kundenstationen vorgehaltene Wärmepumpen, Nachheizkessel o.Ä. realisiert werden.

6.2.3 Theoretisch netzgebunden nutzbares Abwärmepotenzial

Das für eine externe, leitungsgebundene Nutzung zur Verfügung stehende, theoretische Potenzial aus Primär- und Sekundärdatensätzen (s. Abbildung 45 sowie Abbildung 46 für eine räumliche Aufschlüsselung einschließlich des Hochtemperaturbereichs) beläuft sich auf insgesamt etwa 63 TWh_{th}/a bzw. 52 TWh_{th}/a im Nieder- und Mitteltemperaturbereich bis 300 °C. Ggü. der vorausgehenden, erstmaligen Bottom-Up-Untersuchung nach (Brückner 2016), in der ausschließlich basierend auf Daten der Emissionserklärungen im verarbeitenden Gewerbe nach 11. BImSchV[1] ein Abwärmepotenzial von etwa 35 TWh_{th}/a als „unterer Grenzwert“ abgeschätzt wurde[2], konnte damit eine deutliche Annäherung an auf Primärenergieeinsätzen basierenden Top-Down-Schätzungen aus der Literatur[3] erzielt werden:

- In (Groß & Tänzer 2010) wird anhand einer überschlägigen Abschätzung der nutzbaren Abwärmemengen aus dem Primärenergiebedarf ausgewählter energieintensiver Branchen des verarbeitenden Gewerbes[4] eine Größenordnung von etwa 250 TWh_{th}/a ausgewiesen. Obgleich die im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen herangezogenen Datengrundlagen wie bereits erläutert nur eine erste Indikation bzgl. des tatsächlich verfügbaren Abwärmepotenzials erlauben und der in (ebd.) gewählte Top-Down-Ansatz für eine erste Grobbewertung prinzipiell geeignet erscheint, dürfte dies etwas hoch gegriffen sein. Sieht man von nur bedingt quantifizierbaren, nicht an ein Trägermedium gebundenen Abwärmeströmen (Strahlung, Konvektion) ab, so sind v.a. die nicht in Form von Rauchgas freiwerdenden Wärmemengen (z.B. in Form von Kondensat) häufig zur betriebsinternen Nutzung/Effizienzsteigerung geeignet, was das tatsächlich vorliegende theoretische Abwärmepotenzial ebenfalls verringert (vgl. dazu auch die entsprechende, einschränkende Anmerkung in (ebd.)).
- In (Allplan-(Hrsg.) 2017) werden anhand einer überschlägigen Hochrechnung basierend auf Vorläuferstudien sowie ergänzenden Pauschalansätzen (3 % Anteil Abwärme am Endenergiebedarf) für nicht modellierte Branchen des verarbeitenden Gewerbes 316 PJ_{th}/a (ca. 90 TWh_{th}/a) im Bereich über 140 °C sowie 160 PJ_{th}/a (ca. 45 TWh_{th}/a) unterhalb von 140 °C angegeben. Trotz der stark vereinfachten Ansätze erweisen sich diese Größenordnungen als durchaus plausibel.

Gleichzeitig wird deutlich, dass der Großteil der ermittelten, theoretisch nutzbaren Abwärme (über 80 %) im Temperaturbereich unterhalb von 300 °C anfällt und sich damit nur eingeschränkt für die Stromerzeugung eignet.

[1] Mit dem Stand aus 2008, vgl. Kapitel 4 bzgl. der Methodik zur Datenplausibilisierung und -auswertung, die zur Erzeugung des primären Datensatzes angewandt und verfeinert wurde.
[2] Bezogen auf eine Wärmesenkentemperatur T_{env} von 35 °C. Das anhand einer regionalen bzw. sektoralen Extrapolation bezifferte Gesamtpotenzial beläuft sich auf etwa 60-70 TWh_{th}/a.
[3] Vgl. u.a. (30) für weitere, aufgrund ihrer unzureichend dargelegten Methodik bzw. abweichenden Untersuchungsräumen jedoch nicht aufgeführte Studien.
[4] U.a. Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln (C10), Holzwaren (C16), Papier/Pappe (C17), chemischen Erzeugnissen (C20) und Glaswaren (C23) sowie Metallerzeugung/-bearbeitung (C24). Die in (1) ebenfalls einbezogenen Bereiche Kohlenbergbau (B05) sowie Kokerei/Mineralölverarbeitung (C19) wurden herausgerechnet, da diese im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt wurden (s.o. sowie Kapitel 4).

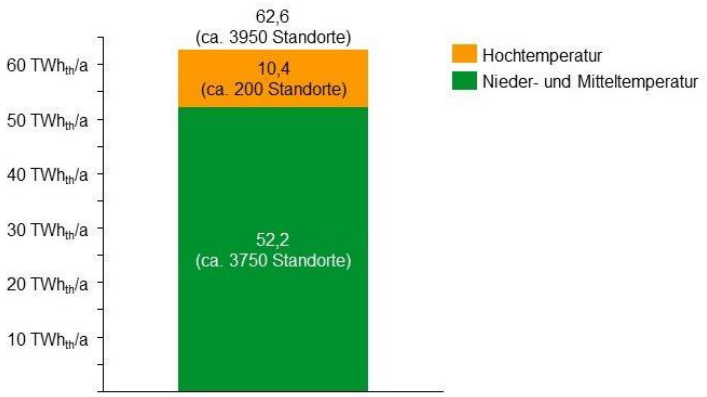


Abbildung 45: Ermitteltes theoretisches Potenzial aus Primär- und Sekundärdatensätzen.

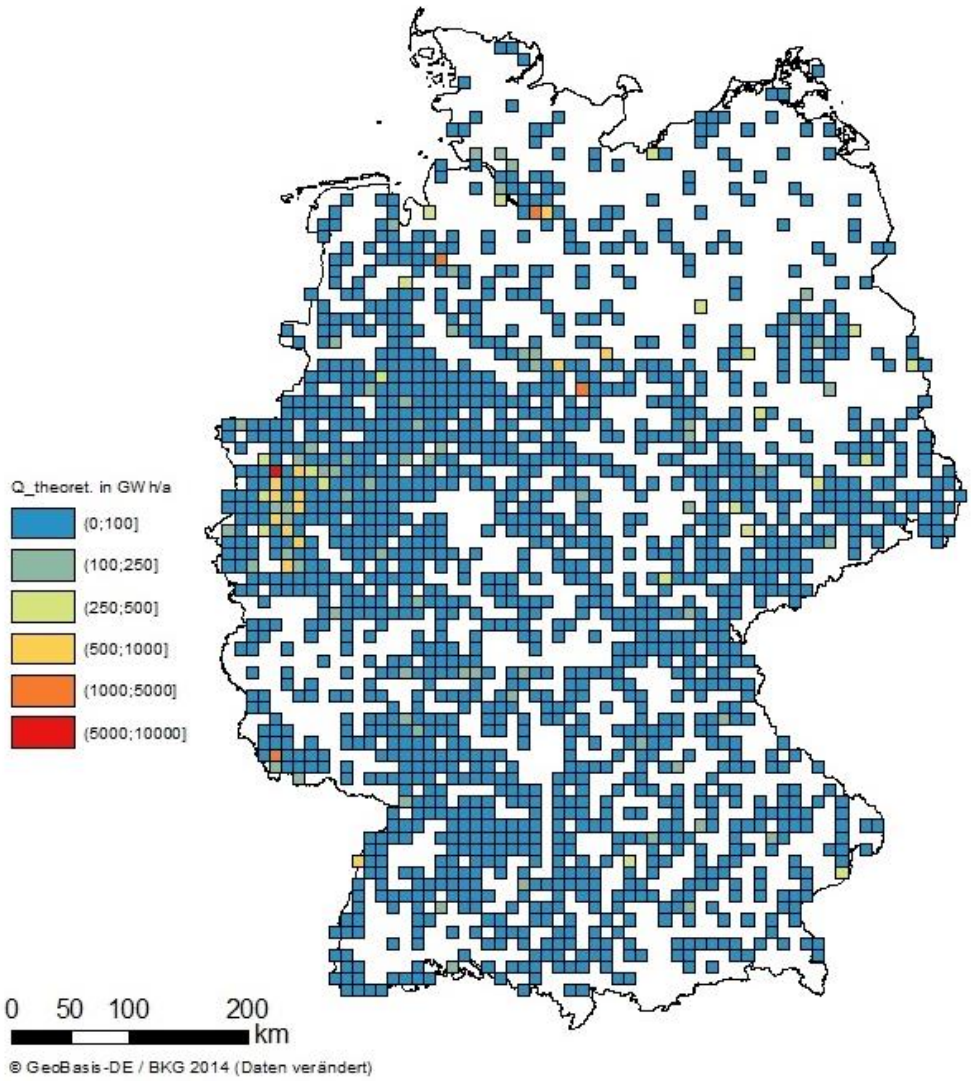


Abbildung 46: Räumlich aufgeschlüsseltes theoretisches Potenzial aus Primär- und Sekundärdatensätzen einschließlich des Hochtemperaturbereichs (ohne Raffinerien/Chemieparks).

Eine Aufschlüsselung des ermittelten theoretischen Potenzials nach Branchen bzw. Bundesländern ist in Abbildung 47 dargestellt. Nennenswerte Mengen im Hochtemperaturbereich fallen v.a. bei der Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen (C24.1.0), im Fahrzeugbereich (C29.1.0) sowie der Herstellung von Kalk/gebr. Gips (C23.5.2) und organischen Grundstoffen/Chemikalien (C20.1.3, C20.1.4) an. Insgesamt verteilt sich das theoretisch nutzbare Potenzial verhältnismäßig gleichmäßig auf die aufgeführten Branchen, einzig die Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen (C24.1.0) trägt mit 22 TWh_{th}/a einen überproportionalen Anteil von 35 % des Gesamtpotenzials bei.

Anhand der Aufschlüsselung nach Bundesländern zeigt sich, dass der Großteil des ermittelten theoretischen Potenzials auf Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen sowie Bayern entfällt. Nordrhein-Westfalen allein zeichnet aufgrund seiner großen Anzahl an Unternehmen energieintensiver Branchen und einem dementsprechend hohen Energieeinsatz bereits für knapp 40 % der anfallenden Abwärme verantwortlich (vgl. auch (Brückner 2016)).

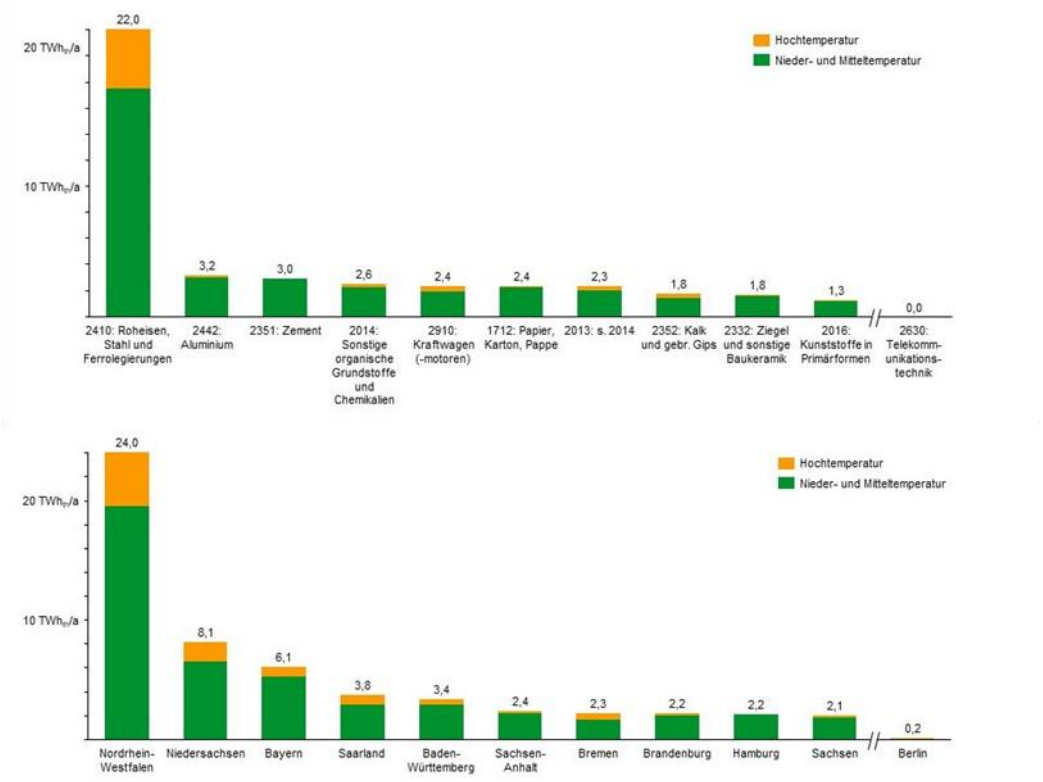


Abbildung 47: Theoretisches Potenzial aus Primär- und Sekundärdatensätzen aufgeschlüsselt nach Branchen bzw. Bundesländern (Auszug)

6.2.4 Technisch netzgebunden nutzbares Abwärmepotenzial

Abbildung 48 zeigt das sich ergebende technische Potenzial bei einer Einkopplung in im Netzpotenzialmodell ausgewiesene Bestandsnetze in Abhängigkeit repräsentativer Netzbetriebstemperaturen (s. Abbildung 44) auf. Im Referenzfall (konservatives Szenario) können 11 TWh_{th}/a an etwa 1.750 von knapp 4.000 erfassten Standorten genutzt werden, dies entspricht einem Anteil von ca. 17 % des ermittelten, theoretisch verfügbaren Potenzials. Geht man von einer Absenkung der Netztemperaturen bis hin zum progressiven Szenario aus, so lassen sich weitere gut 2 TWh_{th}/a erschließen. Damit wird auf der einen Seite zwar die Bedeutung einer Temperaturabsenkung für die Einkopplung von Abwärme ersichtlich, auf der anderen Seite zeigt diese – im Hinblick auf die Betriebsweise von Bestandsnetzen ohnehin nur theoretische – Betrachtung, dass auch bei Annahme von verhältnismäßig hohen Betriebstemperaturen beträchtliche Anteile der theoretisch zur Verfügung stehenden Abwärme nutzbar sind.

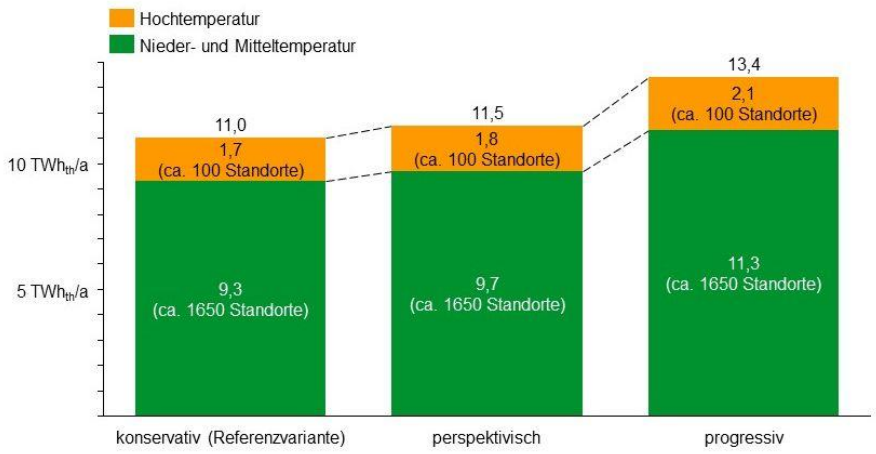


Abbildung 48: Technisches Potenzial bei ausschließlicher Berücksichtigung von Bestandsnetzen aus dem Netzpotenzialmodell.

Neben der unvermeidlichen Verringerung des theoretisch verfügbaren Potenzials infolge des Temperaturniveaus der Wärmesenken zeigt Abbildung 49 für die Referenzvariante (konservatives Szenario) anschaulich auf, dass v.a. infolge nicht gegebener räumlicher Zusammenhänge zwischen Abwärmequellen und -senken beträchtliche, theoretisch nutzbare Wärmemengen für die Einkopplung in Wärmenetze wegfallen. Als „Hot-Spots“ können in Analogie zu Abbildung 47 die Bundesländer Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen sowie Bayern ausgemacht werden (vgl. Abbildung 50).

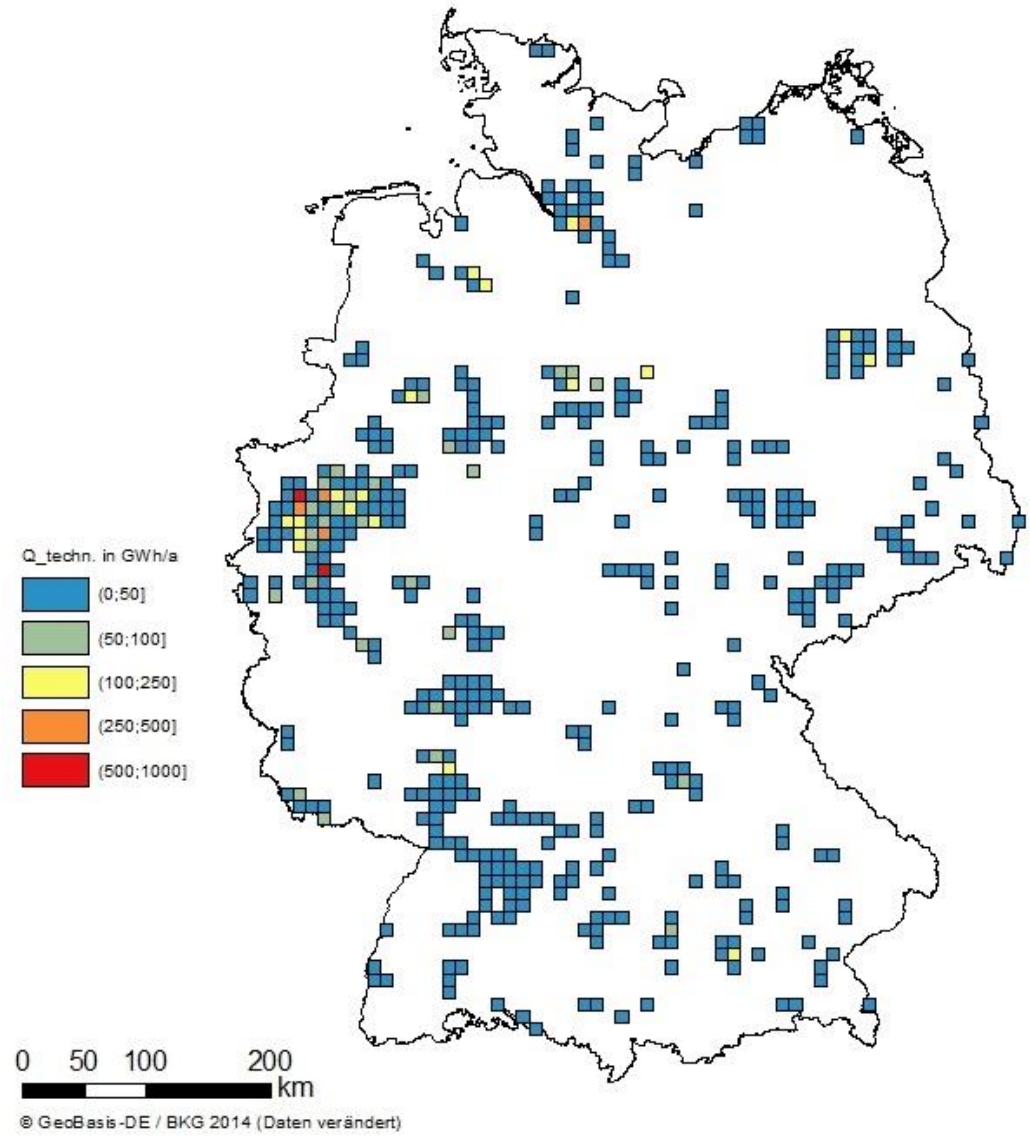


Abbildung 49: Räumlich aufgeschlüsseltes technisches Potenzial (Referenzvariante) einschließlich des Hochtemperaturbereichs bei ausschließlicher Berücksichtigung von Bestandsnetzen aus dem Netzpotenzialmodell (ohne Raffinerien/Chemieparks).

Im Vergleich mit der Aufgliederung des theoretischen Potenzials nach Branchen Abbildung 47) fällt auf, dass sich neben der bereits erwähnten, mit einem Anteil von über 20 % auch zum technisch nutzbaren Potenzial überproportional beitragenden Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen (C24.1.0) die Bereiche C29.1.0 (Kraftwagen) sowie C.24.4.2 (Herstellung von Aluminium) abheben (Abbildung 50). Dies ist damit weniger auf quellenspezifische Parameter, sondern vielmehr auf die im Vergleich zu anderen Branchen augenscheinlich höhere Korrelation zwischen den Standorten entsprechender Unternehmen und den über Wärmenetze verorteten Arealen zurückzuführen.

Das vergleichsweise hohe Potenzial der Branchen C24.1.0 sowie C29.1.0 führt in Verbindung mit der eingeschränkten Verfügbarkeit von Wärmesenken im Übrigen zu einer teilweisen

„Verdrängung“ von Abwärme aus in der Nähe befindlichen Betrieben, so dass die Hinzunahme der Hochtemperaturabwärme sogar zu einem insgesamt niedrigeren nutzbaren Potenzial aus der Aluminiumherstellung führt.

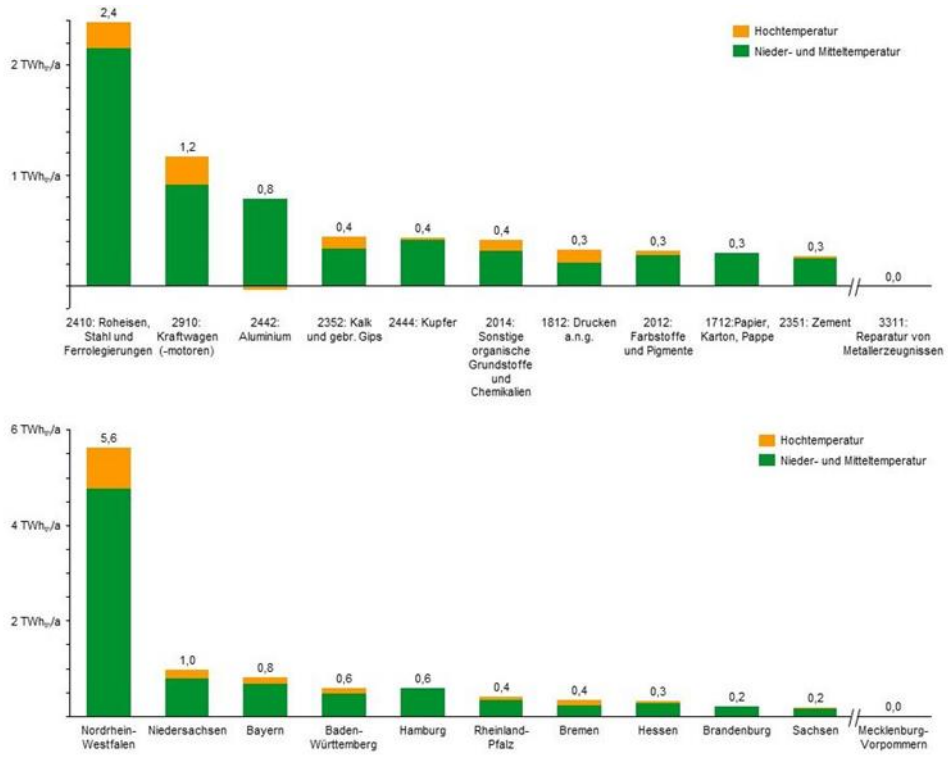


Abbildung 50: Technisches Potenzial aufgeschlüsselt nach Branchen bzw. Bundesländern bei ausschließlicher Berücksichtigung von Bestandsnetzen aus dem Netzpotenzialmodell (Referenzvariante, Auszug).

Abbildung 51 sowie Abbildung 52 stellen die entsprechenden, technisch nutzbaren Abwärmemengen bei einer zusätzlichen Berücksichtigung der im Netzpotenzialmodell ausgewiesenen Wärmenetzpotenziale insgesamt sowie aufgeschlüsselt nach Branchen bzw. Bundesländern (Referenzvariante) dar. Im Falle eines entsprechenden Zubaus von Nahwärmenetzen könnten die auskoppelbaren Abwärmemengen bis auf knapp 29 TWh$_{th}$/a mehr als verdoppelt werden. Den höchsten, branchenspezifischen Zuwachs erfährt die Papier- und Pappeherstellung. Dies könnte u.U. mit den im Vergleich zu den in Abbildung 50 noch vor dieser eingeordneten Branchen (v.a. C29.1.0 (Fahrzeugbau) sowie C24.4.2 (Herstellung von Aluminium)) eher in weniger dicht besiedelten Gebieten anzutreffenden Standorten von Papierbetrieben zusammenhängen.

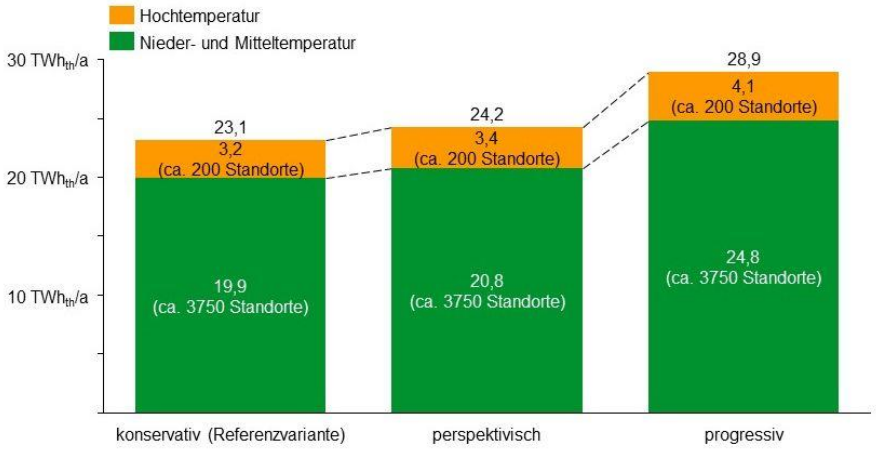


Abbildung 51: Technisches Potenzial bei Berücksichtigung von Bestandsnetzen sowie Netzpotenzialen.

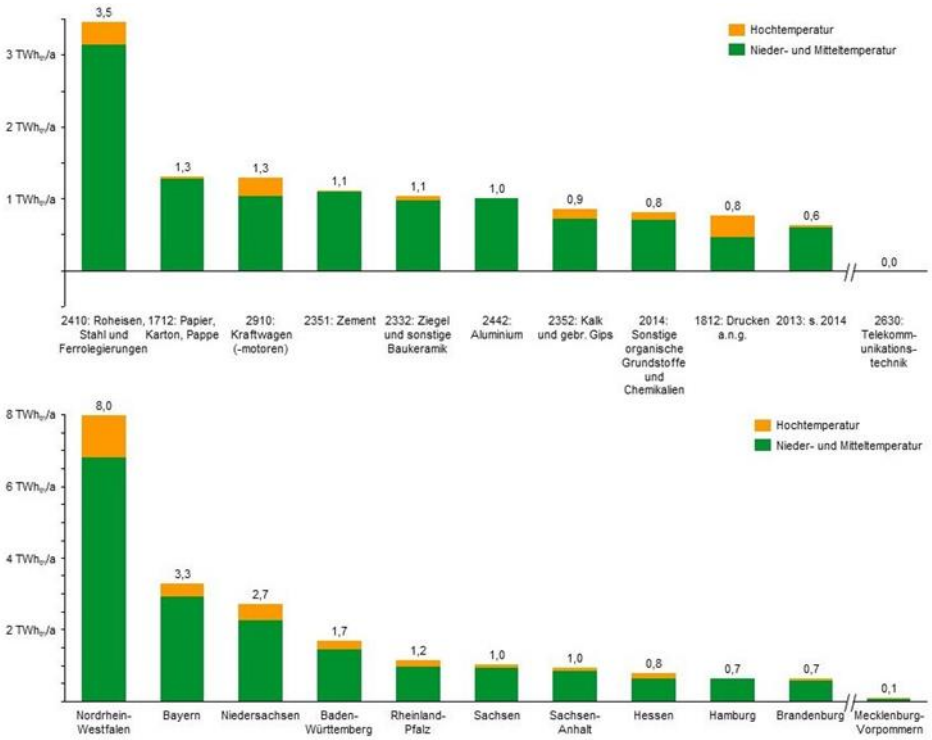


Abbildung 52: Technisches Potenzial aufgeschlüsselt nach Branchen bzw. Bundesländern bei Berücksichtigung von Bestandsnetzen sowie Netzpotenzialen (Referenzvariante, Auszug).

6.2.5 Wirtschaftlich netzgebunden nutzbares Abwärmepotenzial

Abbildung 53 beinhaltet die sich aus der weiteren Abschichtung ergebenden, technisch nutzbaren sowie wirtschaftlich erschließbaren Abwärmepotenziale (Referenzszenario, zunächst ausschließliche Berücksichtigung des Netzbestands) bei unterstellten Referenzkosten w_{th} je Endenergieenergieeinheit von 80-120 €/MWh$_{th}$. Insbesondere das im Hochtemperaturbereich verfügbare Potenzial ist unter den angesetzten Randbedingungen (vgl. Tabelle 23) selbst im Fall $w_{th} = 80$ €/MWh$_{th}$ zum Großteil wirtschaftlich erschließbar.

Dies hängt mit der Nähe der entsprechenden Industriestandorte zu bestehenden Wärmesenken/-netzen und der v.a. im Hochtemperaturbereich gegebenen Wertigkeit der Abwärme zusammen, ist aber auch auf die grundsätzliche Lastcharakteristik industrieller Abwärmequellen, die zu einer verbesserten Ausschöpfung der Betriebsmittelkapazitäten führt und damit geringere spezifische Investitionen bezogen auf die abgesetzte Wärmemenge zur Folge hat, zurückzuführen.

Das im Nieder- und Mitteltemperaturbereich ermittelte technische Potenzial ist ebenfalls zu einem beträchtlichen Anteil von bis zu 90 % wirtschaftlich erschließbar. Eine Verringerung der Referenzkosten auf 80 €/MWh$_{th}$ mindert das wirtschaftliche Potenzial jedoch um weitere 10 %.

Auch in Anbetracht der in der Praxis bei der Einkopplung von Abwärme in Bestandsnetze erforderlichen Kosten zur Vorhaltung von Reserve- sowie ggf. Spitzenlastkapazitäten, die die max. anzusetzenden Referenzkosten für den Bezug der Abwärme reduzieren, sind die hier ausgewiesenen wirtschaftlich erschließbaren Anteile des technischen Potenzials als durchaus realistisch einzuordnen und unterstreichen damit die Relevanz leitungsgebundener Abwärmenutzung im Kontext der Dekarbonisierung des Energie- und Wärmesektors[1].

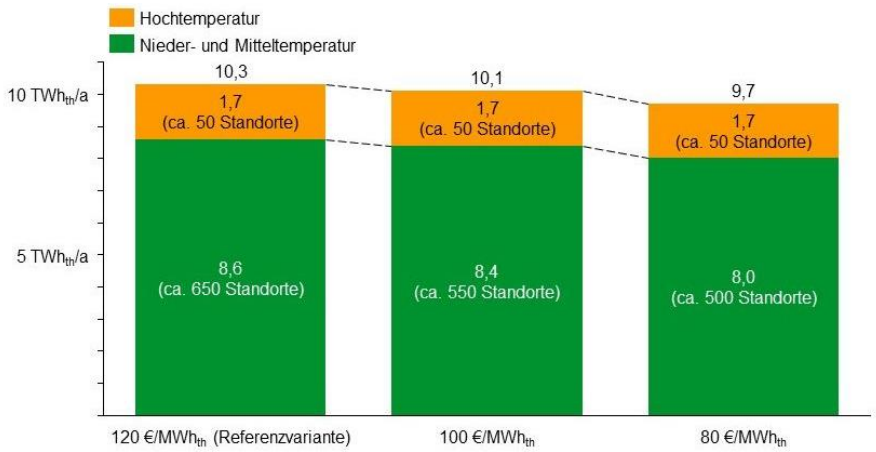


Abbildung 53: Wirtschaftliches Potenzial bei ausschließlicher Berücksichtigung von Bestandsnetzen (Referenzvariante).

[1] Im Übrigen ergibt sich durch die mögliche, hier nicht berücksichtigte Inanspruchnahme von Fördermitteln ein nicht unwesentlicher Kompensationseffekt (vgl. Kapitel 7).

Die räumliche Verortung sowie Aufschlüsselung des wirtschaftlichen Abwärmepotenzials nach Branchen bzw. Bundesländern ist in den Abbildung 54 sowie Abbildung 55 dargestellt. Aufgrund der sich gegnüber den entsprechenden Ausführungen zum technischen Potenzial (Abbildung 49 und Abbildung 50) nur geringfügigen Unterschiede wird an dieser Stelle auf weitere Erläuterungen verzichtet.

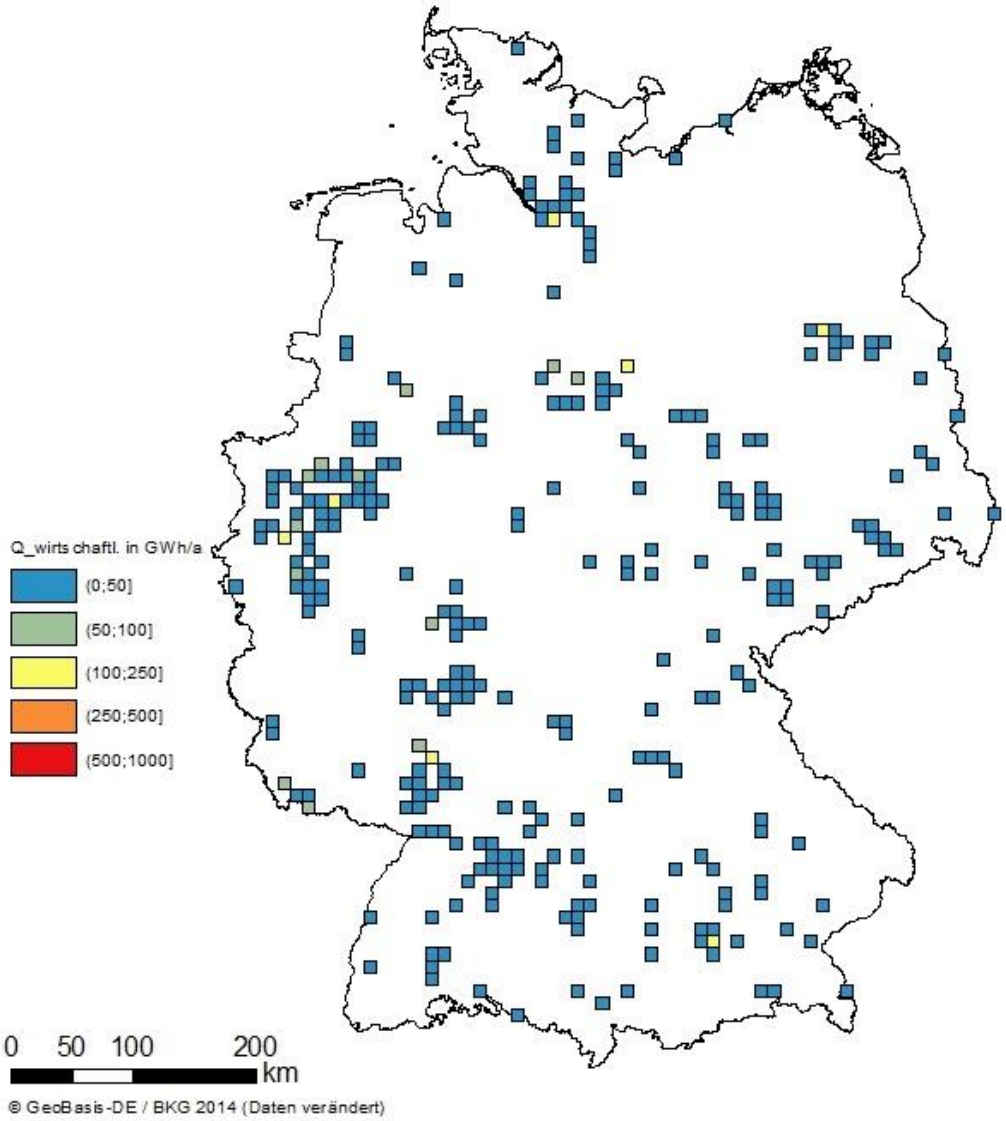


Abbildung 54: Räumlich aufgeschlüsseltes wirtschaftliches Potenzial (Referenzvariante) einschließlich des Hochtemperaturbereichs bei ausschließlicher Berücksichtigung von Bestandsnetzen aus dem Netzpotenzialmodell (ohne Raffinerien/Chemieparks).

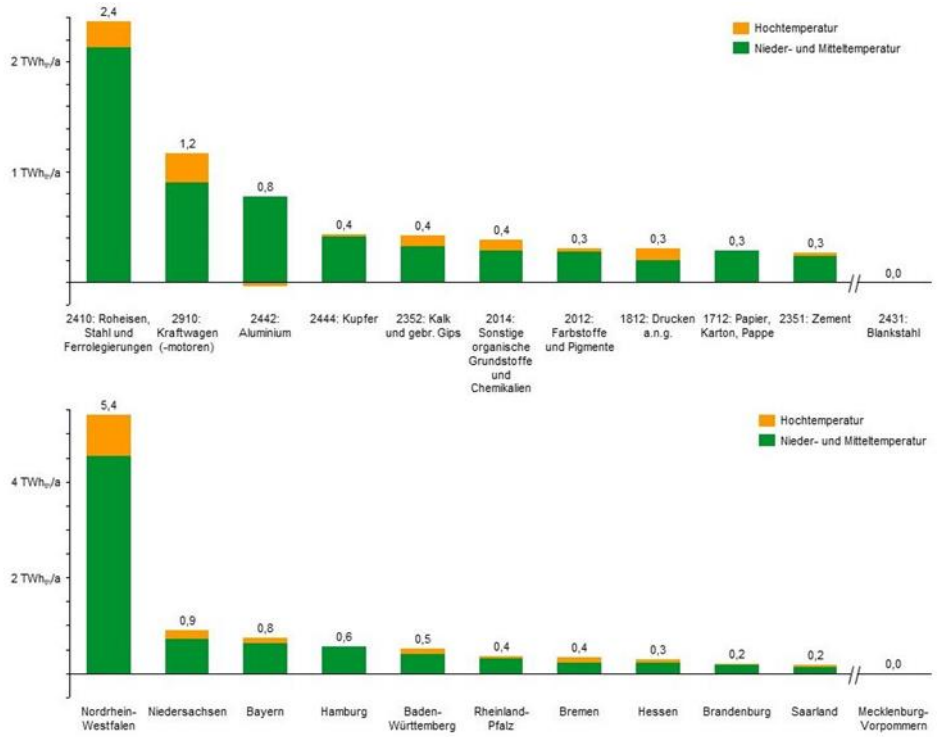


Abbildung 55: Wirtschaftliches Potenzial aufgeschlüsselt nach Branchen bzw. Bundesländern bei ausschließlicher Berücksichtigung von Bestandsnetzen aus dem Netzpotenzialmodell (Refe-renzvariante, Auszug).

In Abbildung 56 sowie Abbildung 57 sind die Ergebnisse der wirtschaftlichen Abschichtung bei Berücksichtigung der Netzpotenziale dargestellt. Diese führt wie zu erwarten zu einer Erhöhung des wirtschaftlichen erschließbaren Potenzials (in Abhängigkeit der angesetzten Referenzkosten auf 19-21 TWh$_{th}$/a). Eine Verringerung der Referenzkosten von 120 €/MWh$_{th}$ auf 80 €/MWh$_{th}$ führt in Analogie zu Abbildung 53 zu einer überwiegenden Reduktion des wirtschaftlichen Potenzials im Nieder- und Mitteltemperaturbereich von ca. 10 %.

Die jeweiligen Verhältnisse aus wirtschaftlich erschließbarem zu technisch nutzbarem Potenzial sind grundsätzlich um einige Prozentpunkte kleiner als die sich bei einer ausschließlichen Berücksichtigung von Bestandsnetzen ergebenden Werte, was v.a. auf die durch die Hinzunahme der Netzpotenziale im Mittel geringere Wärmedichte zurückzuführen ist: Die zusätzlich als wirtschaftlich ausgewiesenen Standorte weisen größere Entfernungen zu den jeweils einbezogenen Wärmesenken sowie eine häufig geringere Wertigkeit auf, was durch die kostengünstigere Erschließung der zuvor bereits mitgenommenen Abwärmequellen nicht kompensiert werden kann.

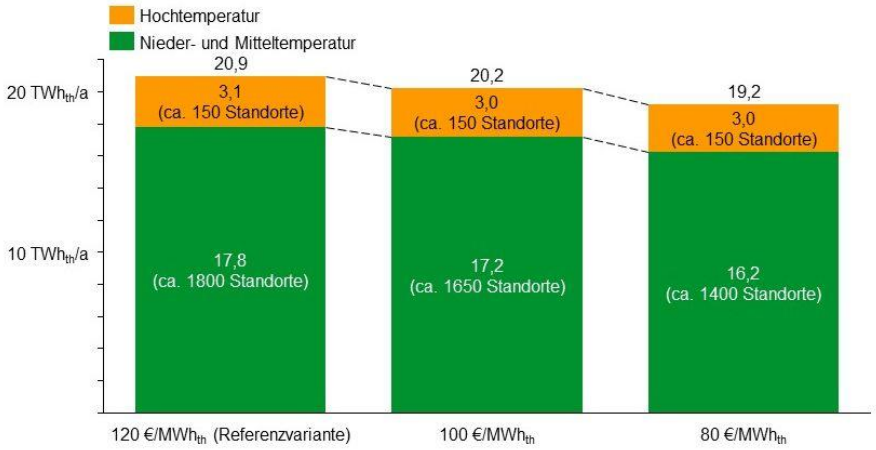


Abbildung 56: Wirtschaftliches Potenzial bei Berücksichtigung von Bestandsnetzen sowie Netzpotenzialen (Referenzvariante).

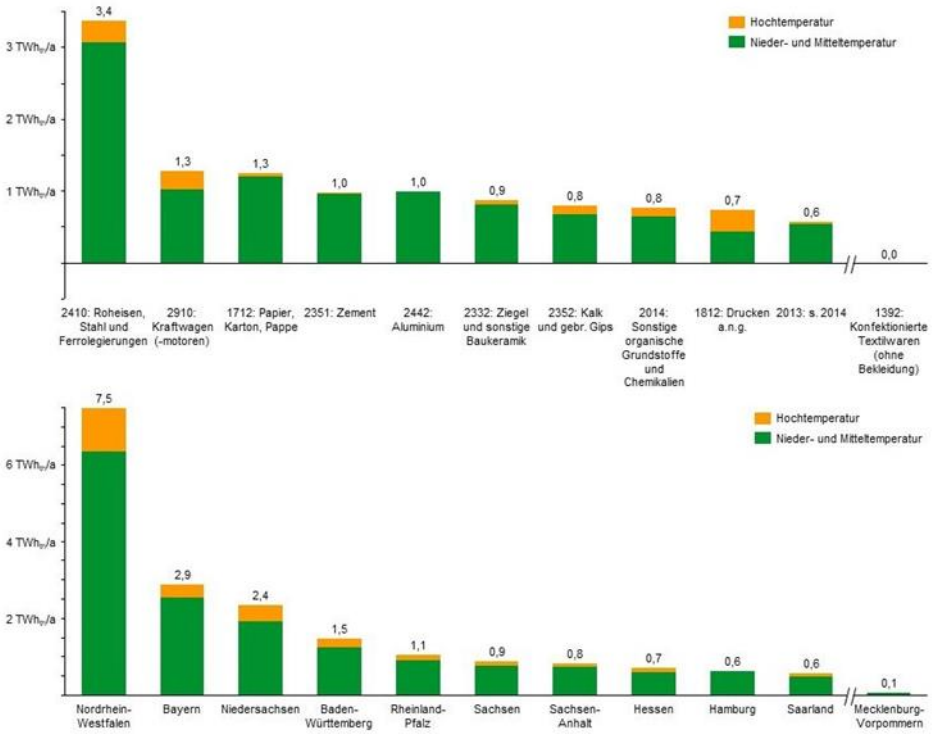


Abbildung 57: Wirtschaftliches Potenzial aufgeschlüsselt nach Branchen bzw. Bundesländern bei Berücksichtigung von Bestandsnetzen sowie Netzpotenzialen (Referenzvariante, Auszug).

In Abbildung 58 ist das ermittelte wirtschaftliche Potenzial in Abhängigkeit der mittleren Entfernung bzw. Trassenlänge zu den jeweils erschlossenen Netzverbünden exemplarisch dargestellt (konservatives Szenario, Referenzkosten 120 €/MWh_{th}). Ein Großteil des wirtschaftlich erschließbaren Potenzials weist demnach mittlere Entfernungen zwischen Quellen und Senken von deutlich unter 2.000 m auf, Quellen mit Trassenlängen über 4.000 m tragen nur einen geringen Anteil zum Gesamtpotenzial bei. Ein wesentlicher Einflussfaktor im Fall größerer Entfernungen zwischen Quelle und Senke sind die damit einhergehenden Trassenkosten, die sich maßgeblich auf die Gesamtgestehungskosten und damit die in Abbildung 58 dargestellte diskrete Verteilung des wirtschaftlich erschließbaren Potenzials auswirken (vgl. Tabelle 23). [1]

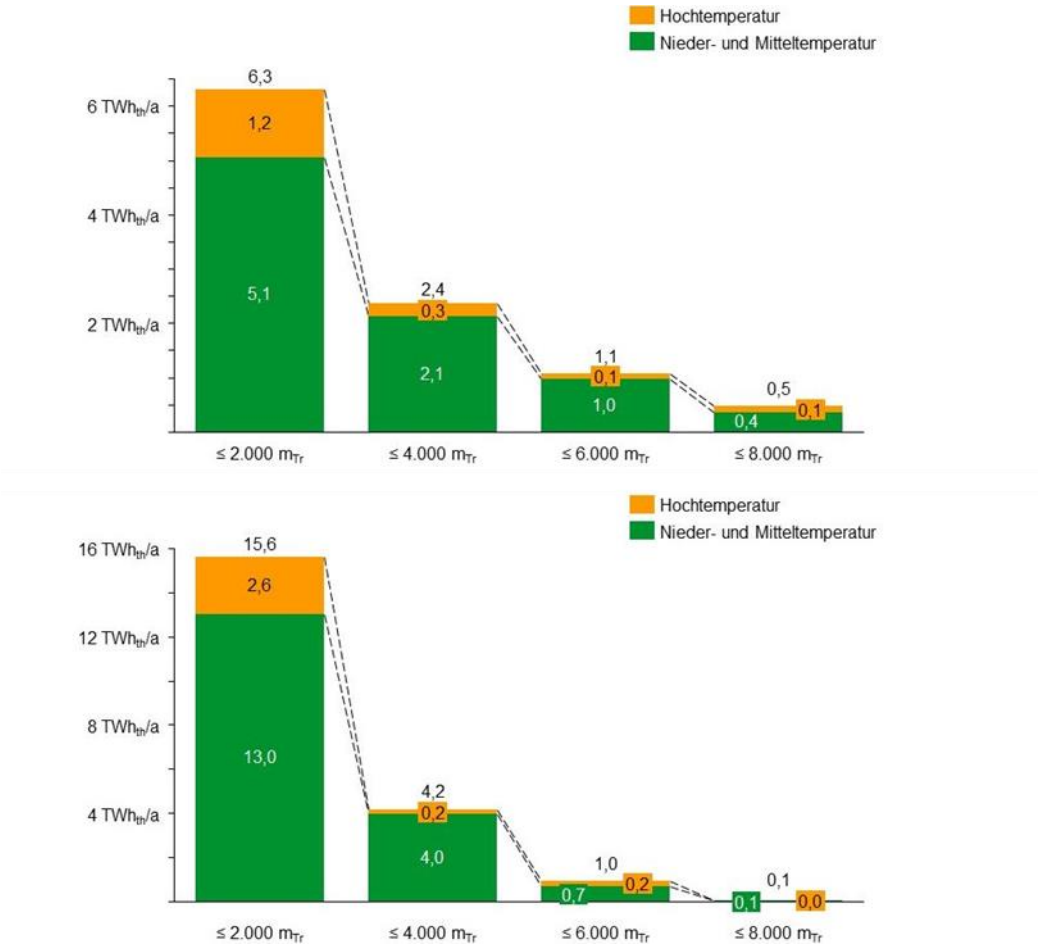


Abbildung 58: Wirtschaftlich erschließbares Potenzial in Abhängigkeit der mittleren Trassenlänge zu jeweils erschlossenen Netzverbünden (Referenzvariante, bei ausschließlicher Berücksichtigung von Bestandsnetzen (oben) sowie bei Berücksichtigung von Bestandsnetzen sowie Netzpotenzialen (unten)).

[1] Diese ist neben den spezifischen Trassenkosten von einer Vielzahl weiterer Einflussgrößen (Anzahl und Wertigkeiten der den diskreten Entfernungsklassen zuzuordnenden Abwärmequellen, sonstige Kostenparameter, Annahmen und Vereinfachungen bzgl. der Integration der Rasterzellen des Netzpotenzialmodells usw.) abhängig, so dass keine pauschale Aussage über die funktionale Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit der Erschließung einer Abwärmequelle von der jeweiligen Entfernung zur Wärmesenke getroffen werden kann. Hierzu sind die individuellen Gegebenheiten im jeweiligen Einzelfall zu prüfen und im Rahmen einer detaillierteren Analyse zu berücksichtigen.

7 Handlungsoptionen

Aufbauend auf der Quantifizierung der netzgebunden nutzbaren Abwärmepotenziale und den durchgeführten empirischen Erhebungen war die Ableitung von Handlungsoptionen zur spezifischen Adressierung der ermittelten Hemmnisse netzgebundener Abwärmenutzung ein Ziel des Vorhabens. Dafür wurden als Ausgangspunkt die bestehenden politischen Instrumente in den Bereichen Information, finanzielle Förderung und rechtliche Rahmenbedingungen zusammengestellt (Abbildung 59). Anschließend wurden aus den Forschungsergebnissen erweiternde Handlungsoptionen abgeleitet. Dabei wurden insbesondere die Rückmeldungen der Industrieunternehmen als mögliche Abwärmelieferanten berücksichtigt und die Sicht der Fernwärmebranche über die Beteiligung von Fernwärmebetreibern mit umfassender Erfahrung bei der Realisierung von Abwärmenutzungsprojekten an einem Stakeholder-Workshop einbezogen.

7.1 Bestehende Instrumente

Information

- **Dena Leuchtturmprojekte** Abwärmenutzung
- **Energieatlas Bayern:** Abwärmebörse, Verortung von Wärmenetzen und Wärme-senken, Abwärmerechner
- **Energieatlas Sachsen, Thüringen, NRW, Baden-Württemberg** […]
- **Regionale Kataster** Bodensee-Region, LK Osnabrück, Frankfurt a.M. […]
- **AGFW-Leitfaden Abwärmenutzung**
- **Dena-Leitfaden Energieliefer-Contracting**

Finanzielle Förderung

- **KWKG:** bis 40% der Investitionskosten für Neu- und Ausbau von Wärmenetzen ab 50% KWK-Wärme & Abwärme über 3a
- **KfW 271/281:** 60€/m Tilgungszuschuss bei >50% Abwärme oder Abwärme & EE-Wärme im Netz
- **KfW 294/494:** 40% Tilgungs-zuschuss bzw. Investitions-zuschuss förderfähige Investitionskosten, inkl. Konzepterstellung, Auskopplung und Stichleitung
- **Wärmenetze 4.0:** 60% der Kosten für Machbarkeitsstudie, 50% der Investition bei >50% Abwärme & EE im Netz über 10a

Rechtliche Rahmenbedingungen

- **BImSchG**: „Effiziente Verwendung von Energie“
- **EDL-G**: Verpflichtende Energieaudits für Großunternehmen
- **EEWärmeG**: Abwärmenutzung als Erfüllungsoption EE-Quote im Neubau
- **EnEV / AGFW 309-1**: Günstiger Primärenergiefaktor Abwärme

Energiepreise, Emissionshandel, Selbstverpflichtung

Abbildung 59: Übersicht bestehender Instrumente und Rahmenbedingungen netzgebundener Abwärmenutzung (Stand 10/2018)[1].

[1] Die Direkt- bzw. Tilgungszuschüsse und zinsgünstige Darlehen zu Investitionskosten in Abwärmenutzungsmaßnahmen (für außerbetriebliche Abwärmenutzung vormals KfW 294/494) sind seit 01.01.2019 im KfW-Energieeffizienzprogramm 295 integriert (KfW 2019).

7.1.1 Informations- und Beratungsangebote

Es bestehen einige allgemeine Informationsinstrumente zur Abwärmenutzung in Deutschland, die bisher jedoch primär auf Landesinitiativen beruhen. Eine besonders umfangreiche Informationsplattform zur Abwärmenutzung wurde durch das bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) im Energieatlas Bayern etabliert. Neben einer allgemeinen Einführung in die physikalischen, technischen und wirtschaftlichen Hintergründe der Abwärmenutzung u.a. im „Leitfaden zur Abwärmenutzung in Kommunen“, enthält das Informationsangebot dezidierte Informationsmaterialien zur Abwärmenutzung aus Abwasser, aus kommunalen Liegenschaften, aus Biogasanlagen und zur Abwärmenutzung in Gewerbebetrieben (LfU-Bayern 2018a; Jackl 2012). Als Informationswerkzeuge werden ein Abwärme-Potenzialrechner für Unternehmen, eine Datenbank georeferenzierter Praxisprojekte sowie ein Abwärmekataster in Form einer WebGIS-Anwendung mit freiwilligen Einträgen von Abwärmequellen in Gewerbebetrieben und kommunalen Liegenschaften und eine interaktive Anwendnung „Wärmemischpult“ zur Gestaltung kommunaler Wärmeversorgungslösungen (vgl. Kapitel 8.1). Weitere Informationsangebote zur Abwärmenutzung bestehen mit dem Abwärmekataster und einer Abwärmestrategie der Thüringischen Energieagentur ThEGA und der Abwärmebörse sowie dem 2016 aktualisierten Leitfaden „Technologien der Abwärmenutzung“ der sächsischen Energieagentur SAENA (ThEGA 2018, 2017, SAENA 2018, 2016).

Auf Bundesebene besteht mit dem Projekt „Leuchttürme energieeffiziente Abwärmenutzung“, das durch die deutsche Energieagentur geleitet wird eine Informations- und Vernetzungsplattform, die Best-Practice-Beispiele auch netzgebundener Abwärmenutzung bietet (dena 2018).

Beratungsinstrumente können an verschiedenen Stellen des Entscheidungsvorgangs (Initial-, Detailberatung, Planungsleistung), in verschiedener Tiefe der Beratung (Orientierung, Basis, Gutachten) und für verschiedene Aggregationsstufen (kleiner Gewerbebetrieb, KMU, größeres Unternehmen, Unternehmensnetzwerke, Gewerbepark, ...) angeboten werden. Verschiedene Beratungsinstrumente existieren bereits:

Die Bundesregierung hat im Rahmen der Umsetzung des NAPE mit den betroffenen Verbänden eine Vereinbarung zur Einrichtung von 500 Energieeffizienznetzwerken bis 2020 abgeschlossen. Bisher wurden rund 200 Netzwerke etabliert. Im Rahmen der Initiative werden vornehmlich Querschnittstechnologien als Effizienzmaßnahmen adressiert. Es werden sowohl Maßnahmen im Bereich der internen Abwärmenutzung, als auch der überbetrieblichen Wärmeintegration angestoßen. Durch den kooperativen und kommunikativen Ansatz der Netzwerke sollen Praxis-Erfahrungen weitergegeben werden.

Im Rahmen des von der Bundesregierung bezuschussten Förderprogramms „Energieberatung Mittelstand“ wird die Durchführung von qualifizierten und unabhängigen Energieberatungen in kleinen und mittleren Unternehmen gefördert. Durch die Beratungen sollen Energieeinsparpotenziale identifiziert und Informationsdefizite in KMU, die tendenziell über weniger Ressourcen zur energetischen Optimierung verfügen, abgebaut werden. Der Zuschuss beträgt derzeit bis zu 80% der förderfähigen Kosten für die Energieberatung, in deren Rahmen bei gegebener technischer und wirtschaftlicher Sinnhaftigkeit auch ein Konzept zur Abwärmenutzung erstellt werden sollte. Bisher liegt der Fokus bei den Beratungen auf der innerbetrieblichen Nutzung von Abwärme, bzw. der Verstromung und weniger auf der Untersuchung externen Abwärmenutzungsoptionen (BAFA 2018a).

Das Kompetenzzentrum Wärmenetze der Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg bietet seit Anfang Juni 2016 Informationsmaterial und bezuschusste Beratung bei

der Planung von Wärmenetzen und der Inanspruchnahme von Förderprogrammen. Ein zentraler Aspekt ist auch die Effizienzsteigerung durch die Nutzung von Abwärme aus Gewerbe, Industrie und Abwasseranlagen. In einem Wissensportal werden u.a. Best-Practice-Beispiele zur netzgebundenen Abwärmenutzung präsentiert (KEA 2018).

7.1.2 Förderung

Die finanzielle Förderung von Abwärmevermeidung/Prozessoptimierung, betriebsinterner Abwärmenutzung und speziell netzgebundener Abwärmenutzung wurde in den letzten Jahren auf Bundesebene deutlich intensiviert. Maßgeblich zum Zeitpunkt der Berichtserstellung 10/2018 sind folgende Gesetze und Richtlinien:

- Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz, Stand vom 17.07.2017:
  Investitionszuschüsse für den Neu- oder Ausbau von Wärmenetzen
- Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt, Stand vom 11.03.2015:
  Investitionszuschüsse bei der Errichtung oder Erweiterung von Wärmenetzen
- Richtlinie zur Förderung der beschleunigten Modernisierung von Heizungsanlagen bei Nutzung erneuerbarer Energien – Anreizprogramm Energieeffizienz (APEE): Heizungspaket, erneuerbare Energien, Stand vom 16.12.2015:
  Investitionszuschüsse bei der Errichtung oder Erweiterung von Wärmenetzen (v.a. bei Bestand)
- Richtlinie für die Förderung der Abwärmevermeidung und Abwärmenutzung in gewerblichen Unternehmen, Stand vom 25.08.2017:
  Investitionszuschüsse u.a. bei Maßnahmen zur außerbetrieblichen Nutzung von Abwärme (Maßnahmen zur Auskopplung, Verbindungsleitungen) sowie bei der Erstellung eines Abwärmekonzepts einschließlich Umsetzungsbegleitung/Controlling
- Förderbekanntmachung zu den Modellvorhaben Wärmenetzsysteme 4.0 („Wärmenetze 4.0“), Stand vom 27.06.2017:
  Investitionszuschüsse sowohl bei der Erstellung vorbereitender Machbarkeitsstudien zur Prüfung der Umsetzbarkeit als auch bei der Realisierung eines Wärmenetzes der vierten Generation, das überwiegend aus erneuerbaren Energien und/oder Abwärme gespeist wird

Die Förderung im Rahmen des KfW-Energieeffizienzprogramms (294/494 für netzgebundnene Abwärmenutzung) wird zum 31.12.2018 eingestellt und ab 1.1.2019 in einem neuen Förderprogramm „Energieeffizienz und Prozesswärme aus Erneuerbaren Energien in der Wirtschaft“ integriert. Dabei werden Kredite bis zu 25 Mio. EUR pro Vorhaben und Tilgungszuschüsse bis 55% u.a. für die Umsetzung jeglicher Art von Abwärmenutzungskonzepten im Rahmen einer energiebezogenen Optimierung von Anlagen und Prozessen gewährt (KfW 2019).

Der Neu- und Ausbau von Wärmenetzen kann weiterhin durch das KWKG vom 21.12.2015, letzte Novellierung 07.07.2017, gefördert werden. Voraussetzungen für eine Förderung sind, dass die Inbetriebnahme des Wärmenetzes spätestens bis zum 31.12.2022 erfolgt, der Anteil der Wärme aus KWK-Anlagen bei der Versorgung der Abnehmenden innerhalb 36 Monaten ab Inbetriebnahme mindestens 75 % beträgt, bzw. mindestens 50 % wenn die Wärme mit einer Kombination aus Wärme aus KWK-Anlagen, Wärme aus erneuerbaren Energien oder industrieller Abwärme, die ohne zusätzlichen Brennstoffeinsatz bereitgestellt

wird, erzeugt wird und der Anteil der Wärme aus KWK-Anlagen mindestens 25 % beträgt. Die Höhe der Förderung ist abhängig vom mittleren Nenndurchmesser (DN) der neu verlegten Wärmeleitungen. Für Wärmeleitungen mit DN bis 100 mm beträgt der Zuschlag 100 € je laufenden Meter, höchstens aber 40 % der ansatzfähigen Investitionskosten. Für neu verlegte Wärmeleitungen mit einem mittleren Nenndurchmesser > DN 100 beträgt der Zuschlag pauschal 30 % der ansatzfähigen Investitionskosten. Der mittlere Durchmesser wird auf Grundlage der Leitungslänge des Projekts bestimmt. Der Zuschlag darf pro Projekt 20 Mio. € nicht überschreiten. Zu den ansatzfähigen Investitionskosten zählen nicht Gebühren, interne Kosten für Konstruktion und Planung, kalkulatorische Kosten sowie Grundstücks-, Versicherungs- und Finanzierungskosten. Zuständig für die Auszahlung des Zuschlags ist der Übertragungsnetzbetreiber, zu dessen Regelzone das Netz gehört, an das die KWK-Anlage, die in das Wärmenetz einspeist, angeschlossen ist (KWKG 2018).

Durch das Marktanreizprogramm (MAP) des BMWi besteht zusätzlich eine Förderung in Form eines Tilgungszuschusses bei der Errichtung von Nahwärmenetzen. Dieser beträgt bis zu 60 € je errichtetem Trassenmeter sowohl bei der Errichtung als auch bei der Erweiterung von Nahwärmenetzen, die zu mindestens 50 %, bzw. bei Neubauten zu 60 %, aus Anlagen zur Nutzung von Abwärme versorgt werden. Die Förderung beträgt höchstens 1 Mio. €, bzw. 1,5 Mio. €, sofern Wärme aus Tiefengeothermieanlagen in das Wärmenetz eingespeist wird. Für den Zuschuss berechtigt sind Wärmenetze mit einem Mindestwärmeabsatz von 500 kWh/m*a. Zusätzlich sind auch die nötigen Hausübergabestationen mit einem Tilgungszuschuss von bis zu 1.800 € förderfähig (ausgenommen sind Neubauten). Nicht möglich ist eine Kombination mit der Förderung nach KWKG (BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2015). Durch das Anreizprogramm Energieeffizienz wird ergänzend die Optimierung von Heizungssystemen bis zum Austausch bestehender Anlagen (relevant v.a. für bestehende Wärmenetze) gefördert.

Das Programm IKK – Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung bietet die Möglichkeit einer Förderung in Form eines Tilgungszuschusses von Wärmeversorgungsstrukturen auf Quartiersebene. Es werden explizit Anlagen zur Nutzung von industrieller Abwärme sowie Wärmenetze genannt. Der Tilgungszuschuss durch die KfW beträgt maximal 5 %, bzw. 2.5 Mio. €. Gefördert werden ausschließlich kommunale Gebietskörperschaften und deren rechtlich unselbstständige Eigenbetreibe sowie Gemeindeverbände (z.B. kommunale Zweckverbände) (KfW 2018).

Eine gezielte Förderung innovativer Wärmenetzsysteme, die u.a. industrielle Abwärme als Energieträger nutzen können, wurde zum 1.7.2017 durch das Förderprogramm „Modellvorhaben Wärmenetzsysteme 4.0“ eingeführt. Gefördert werden insbesondere Gesamtsysteme im Bereich der Wärmeinfrastruktur, die einen hohen Anteil erneuerbarer Energien aufweisen, Abwärme nutzen und ein deutlich geringeres Temperaturniveau als klassische Wärmenetze aufweisen. Verpflichtend ist zunächst eine Machbarkeitsstudie durchzuführen, die mit bis zu 60 % (max. 600.000 €) der förderfähigen Kosten förderfähig ist. Im zweiten Schritt kann die Realisierung eines Wärmenetzsystems 4.0 mit bis zu 50 % (max. 15 Mio. €) der förderfähigen Kosten bezuschusst werden. Darüber hinaus können Maßnahmen zu Kundeninformation zur Erhöhung der Anschlussquote sowie projektbezogene wissenschaftliche Kooperationen zur Unterstützung, Planung, Realisierung, Optimierung und Evaluierung gefördert werden. Die Grundförderung für die Realisierung eines Wärmenetzsystems 4.0 beträgt 20 %. Wenn ein besonders hoher Anteil an erneuerbaren Energien oder Abwärme eingesetzt wird, das Wärmenetz besonders Kosteneffizient ist oder besonders innovative Technologien eingesetzt werden, kann sich die Förderquote auf 65 % erhöhen. KMU erhalten einen Bonus von zusätzlich 10 % (BAFA 2018b).

Die bestehende finanzielle Förderung der Investitionskosten netzgebundener Abwärmenutzungsprojekte liegt in Summe nahe der nach den EU-Vorgaben (AGVO) zulässigen maximalen Beihilfe-Intensität und ist damit sehr positiv zu bewerten. Eine erste Auswertung der Förderstatistiken zeigt einen deutlichen Anstieg der Anträge & Bewilligungen im Rahmen der KfW294/494-Programme, über die seit der Initiierung 2017 mehr als zehn netzgebundene Abwärmenutzungsprojekte gefördert wurden. Über Wärmenetze 4.0 wurden Stand 10/2018 59 Anträge zur Konzepterstellung positiv beschieden und fünf Anträge zur Umsetzung bzw. Investitionsförderung eingereicht.

7.1.3 Regulierung

Die Nutzung von Abwärme zur Wärmeversorgung von Gebäuden wird durch die EnEV und das EEWärmeG reguliert. Im EEWärmeG gilt Abwärme als die Wärme, die aus technischen Prozessen und baulichen Anlagen stammenden Abluft- und Abwasserströmen entnommen wird und wird nicht den erneuerbaren Energien zugeordnet. Die Nutzungspflicht von erneuerbaren Energien zur Steigerung des Anteils am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte auf 14 % bis 2020 gilt nach §7 unter anderem auch dann als erfüllt, wenn der Wärme- und Kälteenergiebedarf zu mindestens 50 % aus dem aktuellen Stand entsprechenden Anlagen zur Nutzung von Abwärme gedeckt wird. Möglich ist auch eine Kombination von erneuerbaren Energien (Solarthermie, Wärmepumpen, etc.) und Ersatzmaßnahmen (KWK-Anlagen, Fernwärme, Abwärme), wenn diese zusammen 50 % der Wärme bereitstellen (EEWärmeG 2015).

In der EnEV wird Abwärme nicht direkt als Wärmequelle genannt. Stattdessen werden für Wohn- und Nichtwohngebäude (§§ 3 Abs. 1, 4 Abs. 1 EnEV) und optional auch für bestimmte Sanierungsvorhaben (§ 9 Abs. 1 S. 2 EnEV) bestimmte Mindestanforderungen gestellt. So darf der Jahres-Primärenergiebedarf eines Vorhabens den Vergleichswert eines sogenannten Referenzgebäudes nicht überschreiten. Der Primärenergiebedarf wird auf Basis des Endenergiebedarfs unter Verwendung von Primärenergiefaktoren berechnet. Für die Nutzung von Nah- oder Fernwärme ergibt sich dadurch in Abhängigkeit der Wärmequellen („Brennstoffmix“) im Wärmenetz immer ein anderer Primärenergiefaktor. Gemäß dem AGFW.Arbeitsblatt FW 309-1 wird der prozessbedingte Anteil der Primärenergie dem Prozess zugeordnet und somit in der Bewertung der Nah- oder Fernwärme vernachlässigt. Der Standardwert für Abwärme in Wärmenetzen liegt, falls nicht genauer bekannt, bei 0.4 (EnEV 2015; AGFW 2014).

Im Bundes-Immissionsschutzgesetz ist unter dem Grundsatz eines möglichst hohen Schutzniveaus für die Umwelt in §5 die Pflicht einer energiesparenden und energieeffizienten Betriebsführung für genehmigungsbedürftige Großfeuerungsanlagen festgelegt. Nach § 5 Abs. 1 Nr. 4 BImSchG ist die Abwärmenutzung keine Pflicht und auch keine Genehmigungsvoraussetzung nach § 6 Abs. 1 BImSchG. Vorgeschrieben ist jedoch gemäß § 12 der 13. BImSchV eine Pflicht zur Durchführung von Maßnahmen zur Kraft-Wärme-Kopplung bei der Errichtung oder wesentlichen Änderung genehmigungspflichtiger Anlagen, sofern diese technisch möglich und nicht unverhältnismäßig sind (BImSchG 2016).

Im Energiedienstleistungsgesetz sind als nationale Umsetzung der EU-Energieeffizienzrichtlinie aus dem Jahr 2012 verpflichtende Energieaudits nach der ISO 50001 für Großunternehmen vorgeschrieben. Im Rahmen der Energieaudits werden systematisch Energiekennzahlen als Datengrundlage für die Identifikation von Optimierungspotenzialen zusammengestellt, eine Umsetzung von Effizienzmaßnahmen ist jedoch nicht verpflichtend.

7.2 Erweiternde Handlungsoptionen

Für die Erarbeitung und Bewertung weiterer Handlungsoptionen zur Aktivierung netzgebunden nutzbarer Abwärmepotenziale wurden spezifische Fragen zu Hemmnissen und möglichen Lösungsansätzen aus Sicht der Industrieunternehmen als Abwärmelieferanten in die Unternehmensumfrage integriert (Anhang 4, Abschnitt 3).

Zusätzlich wurde nach dem Abschluss der Potenzialanalyse, der Unternehmensumfrage und der Praxisfallstudien ein Stakeholder-Workshop zur Erarbeitung von Handlungsoptionen im Dialog mit relevanten Akteuren auf dem Wärmemarkt durchgeführt.

7.2.1 Erkenntnisse aus den Praxisfallstudien und der Unternehmensumfrage

Auf Basis der Unternehmensbefragung, die speziell die Sicht möglicher Abwärmelieferanten aus der Industrie wiederspiegelt, wie auch der durchgeführten Fallstudien konnten drei wesentliche Erkenntnisse gewonnen werden, die Relevanz in Bezug auf die Gestaltung des Themenfelds Abwärmenutzung seitens der Politik besitzen:[1]

1. **Fallstudien decken das tatsächliche Abwärmepotenzial in Unternehmen auf**
   Die durchgeführten Fallstudien haben gezeigt, dass das über die aufbereiteten Daten auf Standort-Ebene ermittelte, theoretische Abwärmepotenzial einen groben Indikator für das real technisch nutzbare Abwärmepotenzial darstellt. Gründe hierfür sind neben der Systemgrenze der Datengrundlage (nur luftgetragene Rauchgasströme) und unvollständige, fehlerhafte oder veraltete Emissionsdaten auch prozesstechnische Restriktionen auf Unternehmensseite, die eine Auskopplung von Abwärme teils unmöglich machen, teils nur mit hohen Kosten ermöglichen. Diese Prozess-abhängigen Restriktionen lassen sich nur vor Ort erfassen und bewerten.

2. **Unternehmen benötigen externe Unterstützung im Themengebiet Wärmenetze**
   Ein Kernergebnis der durchgeführten Unternehmensbefragung ist, dass lediglich 16% der Teilnehmer ihre Abwärme bereits in Wärmenetze einspeisen. 69% der Teilnehmer haben jedoch die prinzipielle Bereitschaft zur Einspeisung von Abwärme signalisiert. Demgegenüber sehen 61% vertragliche Schwierigkeiten für die Bereitstellung von Abwärme, 79% sehen die Parametrierung der Abwärme als Hemmnis.

   Diese Zahlen verdeutlichen eine scheinbar eher skeptische Grundeinstellung der Industrie gegenüber der Rentabilität von Projekten zur Lieferung von Abwärme. Die im Rahmen der Fallstudien geführten Diskussionen haben darüber hinaus gezeigt, dass das in den Unternehmen verankerte Wissen im Gebiet der internen Nutzung von Abwärme vergleichsweise hoch ist, während das Wissen über externe Wärmenetze (z.B. Betriebsparameter, Anforderungen von Netzbetreibern) weniger stark ausgeprägt ist. Extern eingebrachtes Expertenwissen wäre hier in der Lage, kurzfristig zu einer verbesserten Informationstransparenz bei den Unternehmen zu führen

[1] Erweiternd wurden aus den Ergebnissen der Praxiserhebungen zehn Schlüsselbotschaften zur außerbetrieblichen Abwärmenutzung abgeleitet (Anhang 5).

und damit ggf. bestehende Vorbehalte gegenüber der Lieferung von Abwärme abzubauen.

Darüber hinaus hat sich in Bezug auf Förderprogramme gezeigt, dass die bestehenden Programme den Unternehmen nur unzureichend bekannt sind.

3. **Externe Abwärmenutzung ist in den Unternehmen kein Thema mit Priorität**
   Wie die Ergebnisse der Befragung zeigen, ist in der energieintensiven Industrie ein grundsätzliches Potenzial zur externen Einspeisung von Abwärme vorhanden. 87% der Teilnehmer verfügen über einen Überschuss an Abwärme. 63% der vorhandenen Abwärmeströme liegen kontinuierlich über den Jahresverlauf vor und erfüllen damit ein Kriterium, das die Lieferung von Abwärme erleichtert. Konkrete Szenarien zur Lieferung von Abwärme geprüft haben den gemachten Angaben zufolge jedoch lediglich 37% der Teilnehmer.

   Anhand dieser Zahlen lässt sich eine gewisse Passivität der Unternehmen in Bezug auf Projekte zur externen Abwärmenutzung feststellen. Gefestigt wird diese Vermutung durch die im Rahmen der Fallstudien gesammelten Eindrücke: das Management in den Unternehmen ist darauf fokussiert, das Kerngeschäft – die Produktion von Gütern – profitabel zu gestalten. In Bezug auf das Energiemanagement gilt die Aufmerksamkeit im Besonderen der Reduktion des Energieverbrauchs, zu der die interne Nutzung von Abwärme beiträgt. Die externe Nutzung von Abwärme spielt i.d.R. im Energiecontrolling bislang keine Rolle, so dass die Anreizwirkung für die Planung solcher Projekte nur gering ist. In der Folge lässt sich ein gering ausgeprägtes Know-how in Bezug auf eine Einbindung der betrieblichen Wärmeströme in externe Wärmenetze sowie eine passive Haltung bei der Anbahnung möglicher Projekte feststellen. Unternehmen müssen folglich stärker angereizt werden, externe Abwärmenutzung in das Energiecontrolling innerhalb ihrer Bilanzgrenzen einzubeziehen (z.B. durch Emissionsgutschriften) und von externer Seite müssen netzgebundene Abwärmenutzungsprojekte stärker angebahnt und mit Know-How begleitet werden (z.B. durch einen „Abwärme-Inkubator“ ähnlich der Startup-Inkubatoren).

7.2.2 Ergebnisse Stakeholder-Workshop

Nach dem Abschluss der räumlichen Potenzialanalyse (Kapitel 6), dem Abschluss der Praxisfallstudien in sechs Industrieunternehmen (Kapitel 5.2) und der Auswertung der Unternehmensumfrage wurde im Rahmen des Vorhabens am 24.10.2018 ein Stakeholder-Workshop „Netzgebundene Nutzung industrieller Abwärme in der Praxis – Potenziale, Hemmnisse und Chancen“ bei der Fernwärme Niederrhein GmbH in Dinslaken durchgeführt.

Teilnehmer des Workshops waren fünf Vertreter von Fernwärme Versorgungsunternehmen bzw. Wärmenetzbetreibern, drei Vertreter von Industrieunternehmen, die als Praxispartner in das Vorhaben eingebunden waren und ein Vertreter des AGFW e.V. als Interessenvertretung der Fernwärmewirtschaft. Im Rahmen des Treffens wurde neben einer Vorstellung der Fallstudien zu netzgebunden nutzbaren Abwärmepotenzialen in drei Industriebetrieben und der Vorstellung von Praxisbeispielen durch die Fernwärmeschiende Niederrhein und die Stadtwerke Karlsruhe eine Prozess-bezogene Diskussion von Hemmnissen und Lösungsoptionen bei der Realisierung von Abwärmelieferungen geführt und Ideen der Teilnehmer gesammelt (Abbildung 60).

Abbildung 60: Schema der Prozess-orientierten Aufnahme von Hemmnissen und Lösungsmöglichkeiten von den Workshop-Teilnehmern.

Auf dem Arbeitstreffen wurden folgende wesentliche Aspekte beschränkt auf die beiden ersten Abschnitte Initiierung und Vertrag für die Aktivierung netzgebunden nutzbarer Abwärmepotenziale identifiziert:

1. Initiierung

1.a) Fehlende Transparenz / fehlendes Verständnis Wärmequellen / Wärmesenken

- *130°C Abwärme wäre in der FW gut integrierbar, wird aber in der Industrie teilweise als wertlos gesehen*
- *Sensible Daten / Produktionsdaten werden sehr restriktiv weitergegeben, Berichtspflicht wird seitens Industrie sehr negativ bewertet*

1.b) Verantwortlichkeit für die Initiierung

- *Industrie sieht Fernwärme-Unternehmen in der Pflicht, Fernwärme wünscht sich Meldung bei verfügbaren Abwärmeströmen*
- *Wärmelieferverpflichtung wird seitens Industrie (aber auch der Fernwärme-Branche) sehr negativ bewertet: Zwang würde zu Ausweichverhalten führen*

2. Vertrag: Risiko-Handling als zentrales Element

2.a) Industrieunternehmen sehen sich nicht als haftende Investoren in Anlagen/Infrastrukturen für außerbetriebliche Abwärmenutzung.

- *Größere Fernwärme-Betreiber bzw. Energiedienstleister übernehmen diese Rolle relativ selbstverständlich und führen entsprechende technische (verfügbare Redundanz) und wirtschaftliche Risiko-Einschätzungen (z.B. Rest-Barwert-Bewertung und Absicherung über private Versicherung) durch. Lock-In-Effekte sind insofern als gering anzusehen.*

2.b) Speziell größere Industrieunternehmen ohne lokale Eigentümer legen sich maximal für 4 Jahre vertraglich auf Lieferungen fest.

- *Lösungsansatz v.a. bei kurzen Vertragslaufzeiten: Staatliche (günstige) Bürgschaft in Form eines Risiko-Absicherungs-Fonds über den Abschreibungszeitraum der getätigten Investitionen*

2.c) Konsequenzen bei Wegfall einer zentralen Abwärmequelle: Primärenergiefaktor im Wärmenetz steigt ggf. bei Nutzung alternativer (fossiler) Wärmeerzeuger

- *Lösungsansatz: Ausnahmeregelung in der betreffenden Gesetzgebung zur Wärmeversorgung von Gebäuden (Entwurf zum Gebäudeenergiegesetz).*

In Bezug auf die finanziellen Rahmenbedingungen wurde der bestehende Förderrahmen den Teilnehmern vorgestellt. Die bestehenden Investitionszuschüsse für netzgebundene Abwärmenutzungsprojekte im Rahmen des KfW-Energieeffizienzprogramms, des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetztes, des Marktanreizprogramms und des Förderprogramms Wärmenetzsysteme 4.0 wurden von den Teilnehmern als sehr positiv und angesichts der in vielen Fällen nahezu erreichten Grenzen der zulässigen Beihilfehöchstintensität als ausgereizt bewertet. Die von Vertretern des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie angekündigte Zusammenführung und Verstetigung der Investitionskostenförderung für Abwärmenutzungsprojekte wurde als positiv bewertet.

7.2.3 Zusammenfassung

Im Zuge der Potenzialanalyse wurde ein technisch-wirtschaftliches Potenzial netzgebundener Abwärmenutzung von rund 20 TWh/a ermittelt (Kapitel 6.2). Weiterhin ergab die Entwicklung konkreter Nutzungskonzepte im Abgleich mit lokalen Daten an vier von sechs Industriestandorten konkurrenzfähige Wärmegestehungskosten einer Abwärmeeinspeisung von 25-35 EUR/MWh. Auch zeigten die Beiträge von Vertretern der Fernwärmeschiene Niederrhein GmbH und der Stadtwerke Karlsruhe mit jeweils hohen Anteilen industrieller Abwärme in den Wärmenetzsystemen, dass beide Seiten von einer Lieferbeziehung profitieren können.

Im Kontrast zu diesen positiven Kennzahlen wurde von vielen Teilnehmern der Unternehmensumfrage speziell eine fehlende Wirtschaftlichkeit als Hemmnis einer netzgebundenen Abwärmenutzung wahrgenommen, obwohl zwei Drittel der Befragten gleichzeitig prinzipiell bereit wären Abwärmemengen über ein Wärmenetz an externe Abnehmer zu liefern. Ein zentrales Hemmnis auf übergeordneter Ebene stellen die geringen finanziellen Anreize für Unternehmen zur Vermeidung von Primärenergieeinsätzen durch eine nachgelagerte, organisatorisch komplexere Abwärmelieferung an externe Abnehmer dar. Steigende Kosten für Brennstoffe bzw. eine stärkere CO_2-Bepreisung würden hier auf allen Ebenen der Abwärmenutzungskaskade Anreize setzen. Zusätzlich sind Lösungen zur Aufteilung möglicher Gutschriften in Bezug auf das CO_2-Budget im Emissionshandelssystem zwischen Abwärmelieferant und Wärmeabnehmer zu entwickeln.

Für die Initiierung von Abwärmelieferungen stellen fehlende Kapazitäten und fehlendes Know-How in den Industrieunternehmen und die geringe Transparenz zwischen Wärmequelle- und Wärmesenke ein zentrales Hemmnis dar. Dieses Hemmnis könnte durch ein Abwärmenutzungsgebot im Sinne einer verpflichtenden Prüfung der technisch-wirtschaftlichen Realisierbarkeit externer Abwärmenutzungsoptionen bei genehmigungspflichtigen Anlagen und eine parallele explizite Förderung der Prüfung durch externe Sachverständige adressiert werden. Dieses Instrument zum Abbau der Informationsdefizite könnte auf lokaler Ebene in eine systematisierte kommunale Wärmeplanung integriert werden, in deren Rahmen auch die Datengrundlage zu verfügbaren Wärmesenken, Gas- und Wärmenetzgebieten verbessert und eine Schnittstelle zur Bauleitplanung als kommunales Steuerungsinstrument geschaffen würde. Eine derartige verpflichtende Wärmeplanung auf kommunaler Ebene soll erstmals im Rahmen des Klimaschutzgesetztes des Landes Baden-Württemberg formell verankert werden.

Teil einer lokalen Handlungsstrategie wäre weiterhin die systematische Stärkung kommunaler Energieversorger als Intermediäre bei der Wärmeversorgung bzw. bei der Einbindung externer Lieferanten und der technischen Prüfung notwendiger Redundanzen und mögli-

cher Wärmeverbünde bzw. Sammelschienen zur Minimierung des Ausfallrisikos. Eine weitere Option wäre die explizite Förderung eines „Abwärme-Inkubators“ durch die/ inder öffentlichen Hand, ähnlich der Startup-Inkubatoren, der auf lokaler Ebene außerbetriebliche Abwärmenutzungsprojekte identifiziert, anbahnt und die lokalen Protagonisten mit technischer und wirtschaftlicher Expertise bei der Planung und der Akquise von Fördermitteln unterstützt. Die Kernaufgaben eines Abwärme-Inkubator können folgendermaßen ausgeführt werden:

1. **Informieren**
   Erläuterung möglicher Geschäftsmodelle (Direktbelieferung, Contracting-Lösungen), technische Anforderungen (Wärmeübertragung, Anforderungen Wärmesenken, Lastprofile), Best-Practice-Beispiele, aktuelle Fördermöglichkeiten, analog Kontaktaufnahme mit Vertretern der „Wärmesenkenseite“ (EVUs, Gebäudebesitzer/Bauträger, mögliche Wärmenetzbetreiber).
2. **Anbahnen**
   Einnahme einer Mittlerrolle mit unterstützenden Informationsinstrumenten wie Wärmeatlanten zur proaktiven Identifizierung von Wärmequellen & geeigneten Wärmesenken und gezielter Ansprache der relevanten Akteure.
3. **Fördern**
   Ansprechpartner zur Vermittlung von Förderungen, die auch die initiale Erstellung außerbetrieblicher Abwärmenutzungskonzepte abdecken sollten.[1] Als Vorlage könnten die im Rahmen des Vorhabens erstellten Fallstudien dienen.

In Bezug auf die Vertragsgestaltung netzgebundener Abwärmenutzung stellt das Risiko-Handling ein zentrales Hemmnis dar. Dieser Punkt wurde sowohl in der Unternehmensumfrage und den Praxisfallstudien, mit dem oft erfolgten Hinweis auf die Problematik der rechtlichen Verbindlichkeit bei der Gestaltung von Lieferverträgen und der Fokussierung auf das Kerngeschäft aus Sicht der Industrieunternehmen, als auch auf dem Stakeholder-Workshop durch die Positionierung der Unternehmensvertreter nicht als haftenden Investoren/Betreiber von Anlagen und Infrastrukturen für eine externe Abwärmenutzung auftreten zu wollen, deutlich. Speziell größere Unternehmen mit internationalen Eigentümerstrukturen orientieren sich an Zeiträumen von maximal vier Jahren in Bezug auf die finanzielle Amortisation von Investitionen in Energieeffizienzsysteme, längere Festlegungen werden zu Gunsten unternehmerischer Flexibilität oftmals nicht in Betracht gezogen.

Demgegenüber treten etablierte Wärmenetzbetreiber relativ selbstverständlich in der Rolle von Investoren in die notwendigen Anlagen und Infrastrukturen auf, erwarten jedoch ebenfalls eine Absicherung der Wärmelieferungen über die notwendigen Abschreibungszeiträume von mindestens zehn Jahren. Auch wenn durchaus Optionen zum Ausgleich der Unterschiedlichen Erwartungen an eine vertragliche Bindung bestehen, könnte ein öffentlicher Risiko-Absicherungsfonds dieses bestehende Hemmnis deutlich abschwächen. Hier könnte über eine a priori festgelegte Investitionssumme der Rest-Barwert bei unvorhersehbarem Lieferausfall für den Investor, sprich i.d.R. den Wärmenetzbetreiber, durch eine günstige (staatliche) Ausfallversicherung z.B. über die Kreditanstalt für Wiederaufbau auf Bundesebene, abgegolten werden. Zusätzlich wäre im Fall eines Lieferausfalls von Abwärme und

[1] Die Kosten für die Erstellung eines (Energie-)Einsparkonzepts werden im Rahmen des Förderprogramms „Energieeffizienz und Prozesswärme aus Erneuerbaren Energien in der Wirtschaft“ ab 1.1.2019 (KfW 295, Kredit, auch als Investitionskostenzuschuss zu gleichen Konditionen durch das BAFA vorhanden) gefördert (ebd.).

einer notwendigen fossilen Redundanz auf ordnungsrechtlicher Ebene ggf. eine Ausnahmeregelung bei der Bestimmung von Primärenergiefaktoren von Wärmenetzen anzudenken (Abbildung 61).

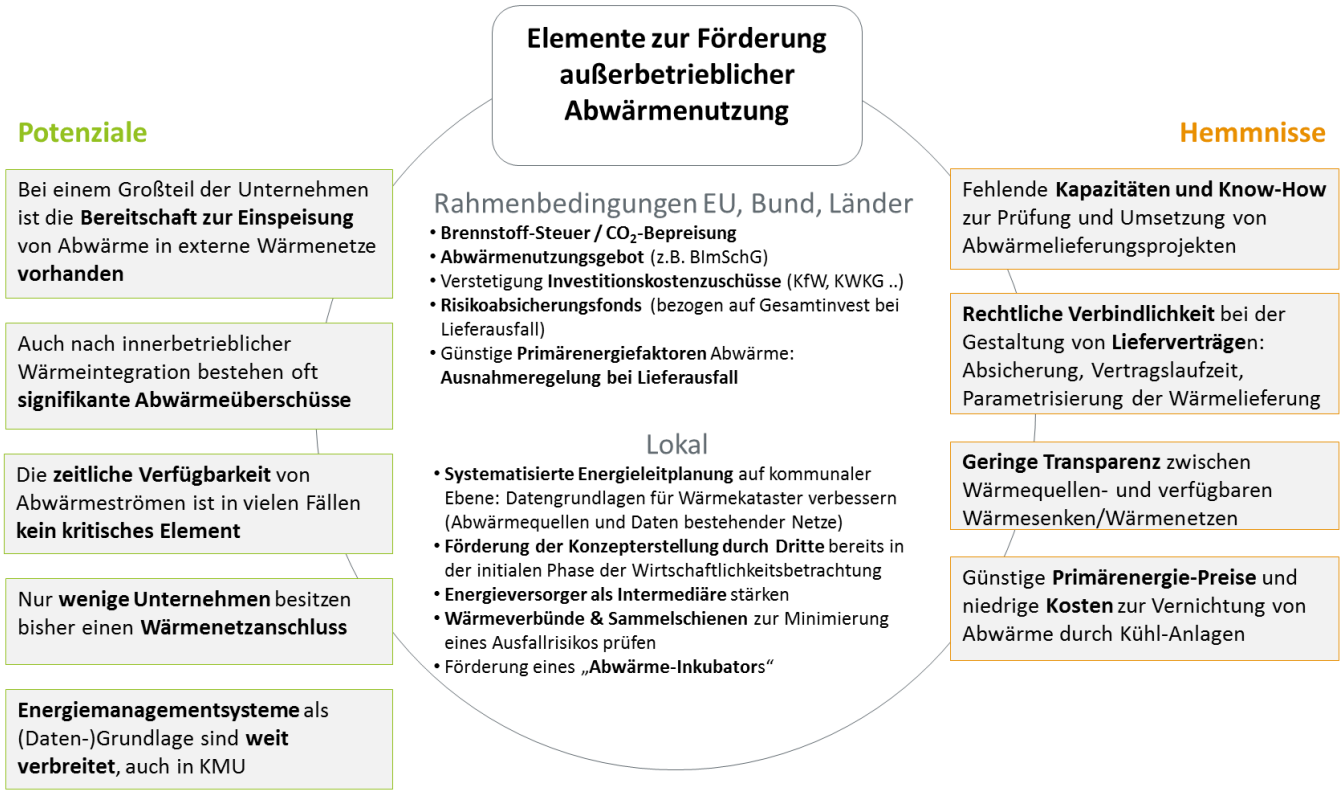


Abbildung 61: Elemente zur Förderung netzgebundener Nutzung industrieller Abwärme: Ergebnisse der Unternehmensumfrage, der Praxisfallstudien und des Stakeholder-Workshops im Rahmen des NENIA-Vorhabens.

8 Nutzbarkeit der entwickelten GIS-Plattform

8.1 Bestehende GIS-Plattformen

Bei der Zusammenstellung bestehender GIS-Plattformen als Informationsinstrumente im Wärmemarkt muss zunächst zwischen der räumlichen Darstellung von Abwärmequellen und Wärmesenken im Gebäudebestand unterschieden werden. Darüber hinaus stellen die räumliche Ausdehnung (EU, Bundesländer, Regionen), die verwendeten Datengrundlagen (Emissionsdaten, empirische Erhebungen, freiwillige Einträge), der Detailgrad der Darstellung (einzelne Industriestandorte, Baublöcke, Analyseraster verschiedener Größe) und der Umfang der Darstellung in Abhängigkeit der verwendeten Datengrundlage und der angewandten Methodik der Datenaufbereitung (z.B. Wärmebedarf nur von Wohngebäuden, Differenzierung nach Sanierungsstand etc.) Bewertungskriterien dar.

Im Folgenden werden die vorhandenen GIS-Plattformen Stand 10/2018 getrennt nach den Bereichen Abwärmekataster und Wärmebedarfskataster Gebäude mit einem Fokus auf das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland dargestellt.

8.1.1 Abwärmekataster

Zum Zeitpunkt der Erstellung der Vorhabensbeschreibung bestanden mit der Abwärmebörse im Energieatlas des Freistaats Bayern und der Abwärmebörse des Freistaats Sachsen zwei Länder-spezifische Web-GIS-Anwendungen als Informationsportale zur räumlichen Verfügbarkeit von Abwärme aus Industrieprozessen und weiteren Quellen. Die Daten zu Menge, Temperatur und zeitlicher Verfügbarkeit wurden und werden auf freiwilliger Basis eingetragen und in beiden Portalen durch umfassende Informationsmaterialien bzw. Leitfäden zur technisch-wirtschaftlichen Bewertung verschiedener Abwärmenutzungsoptionen und zu verfügbaren Förderprogrammen ergänzt (LfU-Bayern 2018b; SAENA 2018). Zusätzlich wurde im Jahr 2016 von der thüringischen Energieagentur ThEGA ein Abwärmekataster basierend den Daten der 11. BImSchV nach einem Austausch mit ifeu etabliert und eine Landesweite Abwärmestrategie erstellt (ThEGA 2018). Auf EU-Ebene wurde im Rahmen des Projektes „HotMaps“ eine Verortung industrieller Abwärmepotenziale basierend auf Daten des Emissionsregisters E-PRTR durchgeführt, die im Jahr 2019 veröffentlicht werden soll (Pezzutto et al. 2018).

Weitere aktuelle Initiativen zur räumlichen Erfassung von Abwärmepotenzialen bestehen in Form einer Abwärme-Studie des Landes Nordrhein-Westfalen und des Landes Baden-Württemberg sowie eines Forschungsprojektes zur Wärmeplanung in Hamburg, in dessen Folge sukzessive ein Wärmekataster als Web-GIS-Anwendung aufgebaut werden soll (Freie und Hansestadt Hamburg 2018). Auch im Land Brandenburg soll nach Informationen des Landesamtes für Umwelt ein Abwärmekataster, u.a. basierend auf den Daten der 11. BImSchV entstehen. Die Ergebnisse der laufenden Abwärmestudien in Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen sollen ebenfalls in die bereits vorhandenen Energieatlanten eingepflegt werden, wobei Umfang und räumliche Auflösung noch nicht geklärt sind. Zusätzlich zu den Aktivitäten auf Landesebene bestehen mit dem Portal PInA im Landkreis Osnabrück, dem Energieatlas Bodenseeregion im Landkreis Konstanz, dem Abwärmekataster der Stadt

Frankfurt und der Region Münsterland regionale bzw. kommunale GIS-Portale bzw. Kartenmaterialien zur Verortung von Abwärmepotenzialen (Osnabrück 2018; Energieagentur-Kreis-Konstanz 2018; Stadt-Frankfurt-am-Main 2018; FH-Münster 2017).

8.1.2 Wärmebedarfskataster Gebäude

Zur räumlichen Abbildung des Wärmebedarfs von Gebäuden bestehen auf EU-Ebene Vorarbeiten im Rahmen der Forschungsprojekte HeatRoadmapEurope und HotMaps, deren Modelle in Form kartengestützter Web-Dienste zur Verfügung stehen bzw. im Jahr 2019 stehen werden. Die entwickelten Modelle basieren auf flächendeckend verfügbaren Daten (v.a. Bevölkerungsverteilung und Siedlungsflächen) und bilden den Wärmebedarf auf Ebene eines 1km-Rasters bzw. eines 100m-Rasters anhand von Energiekennzahlen, die aus nationalen und regionalen Energie- und Gebäudestatistiken abgeleitet wurden, ab.

In Deutschland geht die Initiative zur Erstellung von Web-GIS-Anwendungen zum Wärmebedarf von Gebäuden bisher von einzelnen Ländern, Regionen und Kommunen aus.[1] Auf Landesebene wurden im Energieatlas des Landes Baden-Württemberg wurde basierend auf statistischen Daten zur Wohnfläche und zum Baualter und typischen Energiekennzahlen in Anlehnung an die IWU-Wohngebäudetypologie ein Wärmebedarfsatlas des Wohngebäudebestandes mit einer maximalen Auflösung auf Baublock-Ebene eingerichtet. Die Anwendung bietet ebenfalls räumlich aufgelöste Infos zu vorhandenen Wärmenetzen aus dem Zensus 2011 und Steckbriefe einzelner Netze (LUBW 2018). Eine vergleichbare Anwendung „Planungskarte Wärme“ mit einer maximalen Auflösung eines 100m x 100m-Rasters wurde vom Land Nordrhein-Westfalen etabliert und im Jahr 2017 zusätzlich um den Wärmebedarf ausgewählter Nichtwohngebäude anhand von Daten aus dem amtlichen Liegenschaftskataster-Informationssystem ergänzt (LANUV-NRW 2018). Auch im Saarland wurde ein Landesweites Wärmebedarfskataster erstellt (Land-Saarland 2018; IZES 2017). Im Energieatlas des Freistaats Bayern wurde 2018 ein Wärmemischpult zur Simulation möglicher Wärmeversorgungspfade entwickelt. Dabei werden auch bestehende Wärmenetze auf Gemeindeebene verortet, eine kleinräumige Modellierung der Wärmebedarfe ist nicht möglich (LfU-Bayern 2018c).

Auf regionaler Ebene enthalten u.a. das PInA-Portal und das Kataster im Münsterland eine Modellierung des Wärmesenkenpotenzials auf Grundlage von Gebäudedaten (Osnabrück 2018; FH-Münster 2017).

8.2 Zielgruppen, Anforderungen und Datenschutzbestimmungen

8.2.1 Abwärmekataster

Zur Erfassung der Zielgruppen, deren Anforderungen und relevanter Datenschutzbestimmungen wurden seitens ifeu Informationen über eine Beteiligung an der Stakeholder-Konsultation bei der Entwicklung des Klimaschutzgesetzes Baden-Württemberg, Arbeitstreffen des Landesumweltamtes Baden-Württemberg zur Weiterentwicklung des Energieatlas und

[1] Nach der EU-Energieeffizienzrichtlinie 2012 ist die Bundesregierung jedoch verpflichtet eine nationale Wärmebedarfskarte vorzulegen. Diese Anforderung wurde bisher noch nicht erfüllt.

einen Austausch mit Vertretern der Fachhochschule Osnabrück und des Landkreises Osnabrück als Initiatoren des PInA-Portals, der thüringischen Energieagentur ThEGA als Betreiber des Abwärmekatasters Thüringen sowie des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen als Initiator einer geplanten Einbindung räumlicher Informationen zu Abwärmepotenzialen in den Landes-Energieatlas NRW recherchiert. Zusätzlich wurde in Bezug auf die Nutzbarkeit Standort-spezifischer Abwärmepotenziale, abgeleitet aus den Daten der 11. BImSchV als primäre Datenquelle eine Recherche der rechtlichen Rahmenbedingungen und eine Befragung der zuständigen Stellen für die Abfrage der BUBE-Daten in den 16 Bundesländern durchgeführt.

Auf Grund der beschränkten Datenqualität für technische Planungen von Abwärmenutzungen und der Beschränkung auf größere Anlagen eignet sich die erarbeitete Datengrundlage zu Abwärmepotenzialen an rund 4000 Industriestandorten primär als Informationsinstrument für eine initiale Bewertung netzgebundener Abwärmenutzung auf Ebene einer strategischen Planung. Als Zielgruppe für eine umfassende Veröffentlichung im Rahmen einer Web-GIS-Anwendung können lokale Inkubatoren mit gewissen technischen Grundkenntnissen, darunter speziell politische Entscheidungsträger und Vertreter von Energieversorgern identifiziert werden. Als zentrale Parameter wurde die verfügbare Abwärmemenge, angegeben in Form von Größenordnungen [GWh] auf Ebene einzelner Betriebsstandorte identifiziert. Abgeleitete Angaben zu Temperatur oder Leistung der Abwärmeströme sind auf Grund der Unsicherheit in Bezug auf die Datenqualität und ggf. mögliche Nutzungen anderer, nicht erfasster Abwärmeströme gesondert für einzelne Standorte zu validieren. Zusätzlich sollte der Wirtschaftszweig des Unternehmens zur Kontextualisierung und Ergänzung weiterer Sektor-spezifischer Informationen möglicher Abwärmenutzungsoptionen enthalten sein.

In Bezug auf die erarbeiteten Datensätze zu theoretischen Abwärmepotenzialen basierend auf den Daten der 11. BImSchV wurde die Rechtsunsicherheit als bestimmender Faktor für eine nachgelagerte Nutzung, die die Weitergabe an Dritte z.B. in einer Web-GIS-Anwendung umfassen würde, identifiziert.[1] Die Gesetzliche Grundlage einer Nutzung der BImSchV-Daten konzentriert sich auf folgende wesentliche Punkte:

- §27, Abs. 3 BImSchG: Der Inhalt der Emissionserklärung ist Dritten auf Antrag bekannt zu geben – Ausnahme: Einzelangaben, anhand derer Rückschlüsse auf Betriebs- oder Geschäftsgeheimnisse gezogen werden können. Diese Ausnahme muss von Unternehmensseite beantragt und begründet werden. Die betreffenden Datenpunkte wurden auch in der für das Vorhaben angewandten Datenabfrage nicht mit ausgeliefert (vgl. Abbildung 19, S.55).

- §9, Abs. 1, Satz 2 UIG: Umweltinformationen, die private Dritte an eine informationspflichtige Stelle übermittelt haben, dürfen nicht ohne deren Einwilligung offenbart werden, wenn dies nachteilige Auswirkungen auf die Interessen der Dritten hätte.

- Keine zusätzlichen rechtlichen Grundlagen / Bestimmungen auf Landesebene.

Darauf aufbauend ist die juristische Interpretation, wann Rückschlüsse auf einzelne Betriebe mit nachteiligen Auswirkungen vorliegen nicht geklärt. Einige Landesvertreter sehen durch die Ausklammerung jener Datenpunkte, die von den Betreibern in der BUBE-Datenbank als

[1] Von den zuständigen Stellen des Landes Hessen und des Freistaats Bayern wurde bei der Abfrage der Emissionsdaten für das Vorhaben die Unterzeichnung einer Nutzungsbeschränkung auf die Inhalte des Projektes gefordert, die eine nachgelagerte Nutzung ausschließt.

Betriebsgeheimnis gekennzeichnet wurden und einen Verzicht auf die Nennung von Unternehmensnamen die Datenschutzanforderungen gewährt und bewerten eine Publikation abgeschätzter theoretischer Abwärmepotenziale auf Ebene einzelner Standorte (unter Nutzung der vorhandenen Koordinatenangaben) als rechtskonform. In den meisten Länderverwaltungen besteht jedoch Informations- und Abstimmungsbedarf zur Klärung der Nutzbarkeit von 11. BImSchV-Daten zur räumlichen Analyse von Abwärmenutzungspotenzialen. Zusammengefasst wurde durch eine Befragung der zuständigen Landesstellen für die BUBE-Datenbank sowie in einigen Ländern ergänzend der Rechtsabteilungen folgende Bewertungen erfasst:

A)	Aufbereitete und aggregierte Ströme dürfen auf Standort-Ebene publiziert werden, wenn keine Firmennamen angegeben werden. Eine Angabe des Industriezweigs ist möglich.
	Hamburg, Niedersachsen, Bremen, Saarland, Berlin, Sachsen, Thüringen
B)	Aggregierte Werte auf höherer räumlicher Ebene können publiziert werden, wenn keine Rückschlüsse auf einzelne Unternehmen gezogen werden können. Industriezweige als zusätzliches Abgrenzungselement müssen in die Anonymisierung mit einbezogen werden (z.B. erst ab drei Unternehmen derselben Branche)
	Rheinland-Pfalz
C)	Keine Aussage bzw. erst wenn genaue Art einer geplanten Publikation feststeht.
	Schleswig-Holstein, Nordrhein-Westfalen, Hessen, Baden-Württemberg, Bayern, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt.

Die unterschiedliche Einschätzung der Nutzbarkeit der BImSchV-Daten in den Bundesländern verdeutlicht die Notwendigkeit einer rechtlichen Klärung der Optionen. Hier könnte angesichts der bestehenden Länder-Initiativen zur Verbesserung der Datengrundlage für eine übergeordnete strategische Wärmplanung bzw. eine Verbesserung der Wärmeintegration ein Austausch der Landesdatenschutzbeauftragten hilfreich sein. Dabei beschränkt sich das Anwendungsgebiet dieser Daten, wie oben dargestellt, ohnehin primär auf die Darstellung möglicher Potenziale in Form von Abwärmemengen für die Initiierung strategischer Untersuchungen vor Ort.

Eine zusätzliche Option zur Nutzbarkeit der Daten für einen beschränkten Kreis interessierter „Abwärme-Inkubatoren“ wäre die Einrichtung eines Web-Portals mit geschlossenem Zugang. Dieser könnte durch die Landesämter verwaltet und ggf. technisch als rechtskonforme Einzelabfrage der BUBE-Daten eingerichtet werden, indem eine automatisierte Abschätzung theoretischer Abwärmemengen nach der angewandten Methodik ergänzt würde. Durch die Verbundpartner ifeu und GEF wird auf Grund der Datenschutzbestimmungen keine Weitergabe der Daten auf Ebene einzelner Standorte erfolgen. Die aufbereiteten Datensätze zu theoretischen Abwärmepotenzialen werden den jeweiligen Landesstellen für eine weitere Verwendung unentgeltlich angeboten.

8.2.2 Wärmebedarfs- und Wärmenetzmodell

Das erarbeitete Wärmebedarfsmodell basiert auf den bundesweiten 3D-Gebäudemodellen im LoD1. Es ermöglicht damit eine räumlich hochauflösende Modellierung des Wärmebedarfs auf Ebene einzelner Gebäude(-geometrien), darunter auch eine Prä-Klassifizierung energetisch relevanter Nichtwohnnutzungsformen. Zudem ermöglicht die Kopplung mit den Simulationen energetischer Sanierungstätigkeit im Gebäudemodell GEMOD eine Bottom-Up-Modellierung der Wärmebedarfsentwicklung, wobei das Modell für weitere Szenarien um Bestandsentwicklungsmodule (Zubau) erweitert und neu kalibriert werden müsste.

Perspektivisch könnte das Modell um lokal erhobene, Gebäude-spezifische Parameter (U-Werte, Heizungsanlagen) erweitert und damit für eine lokale Energieleitplanung auf Ebene einzelner Quartiere nutzbar sein. Gleichzeitig bietet das bestehende Modell einer Top-Down-Übertragung von Energiekennzahlen Potenzial zur Entscheidungsfindung auf strategischer Ebene, sprich im Rahmen einer kommunalen Wärmeplanung. Auf dieser Ebene kann zudem eine Abschätzung technisch-wirtschaftlicher Potenziale speziell leitungsgebundener Wärmeversorgungslösungen mit dem entwickelten Wärmenetzmodell erfolgen. Allerdings steht speziell für kleinräumige Analysen eine Validierung anhand empirischer Verbrauchsdaten aus. Entsprechende Referenzdaten sind auf Grund von Datenschutzbestimmungen schwer zugänglich.

Als mögliche Zielgruppe für die Nutzung der Daten kommen die Bundesländer mit bestehenden oder geplanten Energieatlanten in Frage, die für aggregierte Gebäudebestände – z.B. Baublöcke – aktuelle Wärmedichten mit mittleren Sanierungsständen im Wohngebäudebestand und die Nutzwärmebedarfe von Nichtwohngebäuden sowie zukünftige Entwicklungspfade in ihre Informationsportale integrieren können. Demgegenüber besteht auf kommunaler Ebene eine Option in der Nutzung der Daten auf Ebene einzelner Objekte zur Wärmeplanung in Bestandsquartieren.

Das entwickelte Wärmebedarfsmodell des Gebäudebestandes kann u.a. aufgrund geltender Lizenzbestimmungen der zugrundeliegenden 3D-Gebäudemodelle LoD1_DE der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen des Bundes und der Länder (AdV) nicht uneingeschränkt sowie kostenfrei an Dritte weitergegeben werden. Da die Verwertung durch Dritte jedoch im Sinne vorstehender Ausführungen wünschenswert wäre, wird die mittelfristige Weitergabe in Form eines lizensierten, zu Innovationen zu nutzenden Geodatenprodukts[1] derzeit noch geprüft. U.U. müssen hierzu weitere Arbeitsleistungen durch den ZE bspw. zur Modellierung und Kalibrierung des aktuellen Wärmebedarfs im Jahr 2016 (Stand der Daten LoD1_DE) erbracht werden.

[1] „Wärmeatlas Deutschland 2.0“: Eine interne Nutzung dieses definierten Geodatendatenprodukts durch die Verbundpartner wird unter Berücksichtigung etwaiger Einschränkungen durch zu berücksichtigende Schutzrechte, Schutzrechtsanmeldungen sowie sonstige Bestimmungen mittelfristig angestrebt.

8.3 Technische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen eines kartengestützten Web-Dienstes

Dieser Abschnitt analysiert die Nutzungsmöglichkeiten eines aus den Gebäudedaten abgeleiteten Wärmeatlas. Der Schwerpunkt dieser Analyse liegt auf den Möglichkeiten einer internetbasierten Präsentation und Abfrage der Daten.

8.3.1 Evaluation der technischen Machbarkeit

Diese Analyse erfolgt zunächst auf einer rein technischen Ebene, d.h. es geht darum, die Einbindung der Daten in (Geo-)-Portale zu analysieren und zu bewerten. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die Daten sich gut für die Verwendung in Geoportalen eignen, sie verfügen über ein klar strukturiertes und vollständiges georäumliches Datenmodell, welches eine Integration in eine Geodateninfrastruktur (GDI) zulässt. Innerhalb einer GDI, die die Daten nutzt wären dann zahlreiche Dienste implementierbar, die sowohl die Gebäude als auch die Wärmenetze und Abwärmepotenziale.

- **Darstellungsdienste**
  Darunter sind Visualisierungsdienste zu verstehen, die eine kartographische Repräsentanz der Dateninhalte bereitstellen. In der Regel basiert dies auf Standards des OGC (Open Geospatial Consortium). Dieser Standard wird mittlerweile von nahezu allen Softwareherstellen unterstützt, die Geoinformationssysteme anbieten, sei es im Open-Source-Bereich oder im proprietären Umfeld.

  Die Standardisierung bedeutet zum einen, dass sowohl die Bereitstellung der Dienste als auch deren Einbindung in so genannte Clients, also bspw. in Desktop-GIS-Anwendungen, möglich ist.

  Die Daten ermöglichen aber auch die Visualisierung in nicht-standardkonformen Systemen. So ist bspw. die Erstellung von Kartendiensten innerhalb eines ArcGIS-Server basierten Systems der Firma ESRI ohne Probleme umsetzbar. Auch das kaskadieren von Diensten ist eine praktikable Option, so könnte bspw. die Webpräsenz „Energieatlas“ eines Bundeslandes einen weiteren Dienst „Abwärmepotenziale“ einbinden und anzeigen, der tatsächlich aber von einem anderen Ort bereitgestellt wird. Die Daten würden, eine entsprechende Attributierung mit Regionalschlüsseln vorausgesetzt, auch die Möglichkeit bieten, regional angepasste Darstellungsvarianten umzusetzen. So können aus einem einzigen Datenbestand zahlreiche Darstellungen generiert werden.

  In Abbildung 62 sind die ermittelten Abwärmemengen (rote Kreise) zusammen mit der Anzahl der Betriebsstunden (farblich abgestufte Kreismittelpunkte) dargestellt.

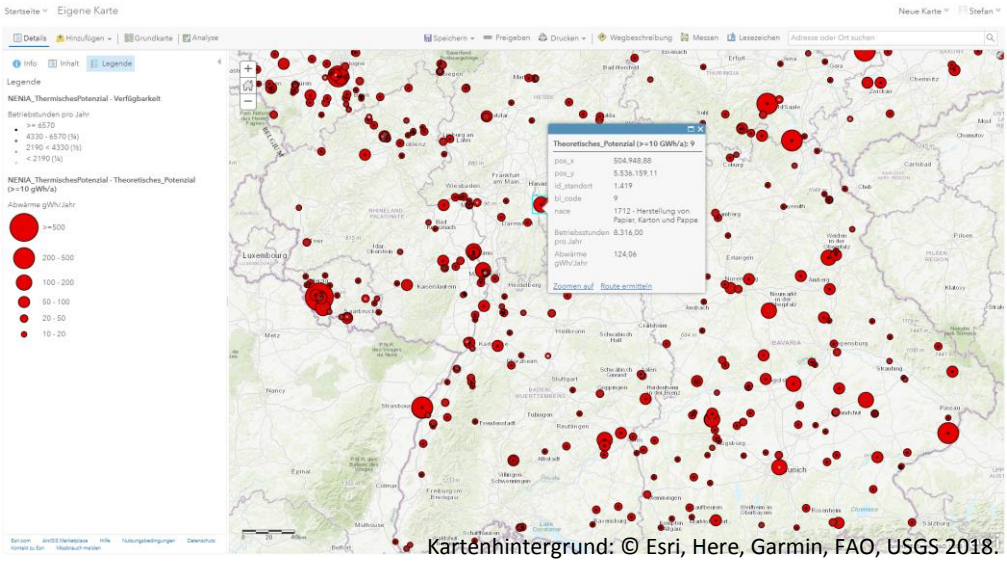


Abbildung 62: Kartendienst Abwärmepotenzial, implementiert in ArcGIS Online.

Die Daten können über OGC-kompatible Dienste in jede Umgebung integriert werden, bspw. auch in Desktop-GIS. Dort können die Daten dann auch in beliebiger Art und Weise für eigene Zwecke analysiert und dargestellt werden (Abbildung 63).

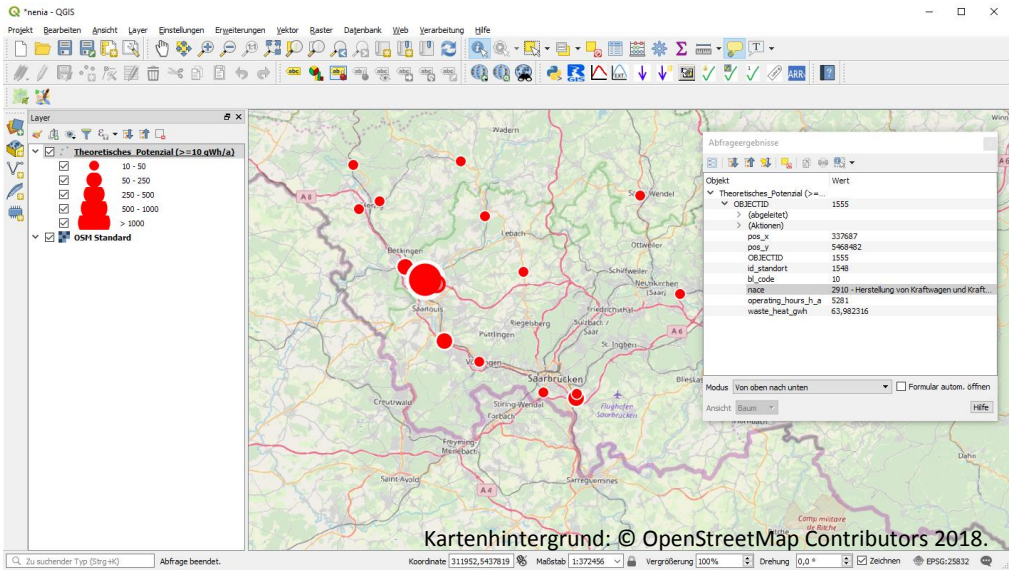


Abbildung 63: Beispielhafte Verwendung des Online-Datensatzes in einem Desktop-GIS (QGIS).

- **Downloaddienste**

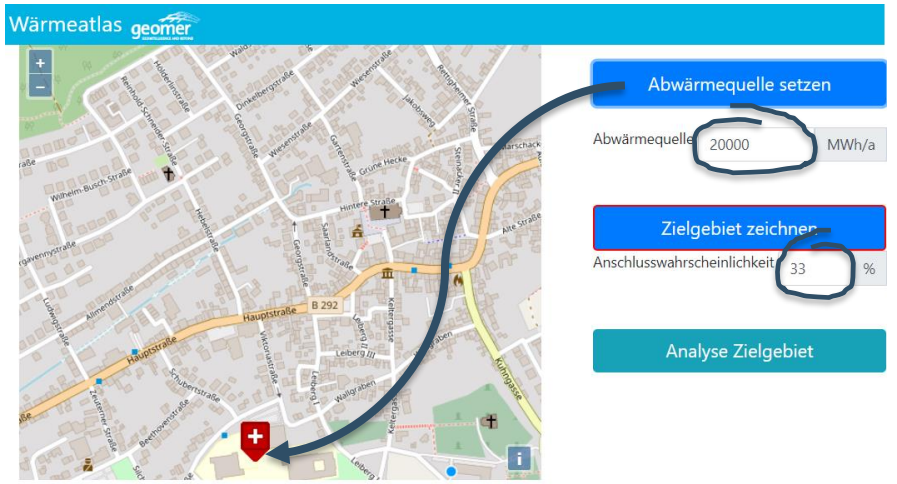
  Eine weitere Möglichkeit der Nutzbarmachung der Daten besteht darin, diese Endkunden komplett oder ausschnittsweise als Downloadoption anzubieten. In zahlreichen GDI-Systemen gibt es hierzu vorgefertigte Werkzeuge. Diese werden entweder als synchrone oder asynchrone Varianten realisiert- erstere bedeutet, Daten stehen unmittelbar zur Verfügung, bei letzterer werden die Daten nach einer Aufbereitung per Link zum Download

angeboten., was hauptsächlich dann erforderlich ist, wenn die Aufbereitung lange dauert.

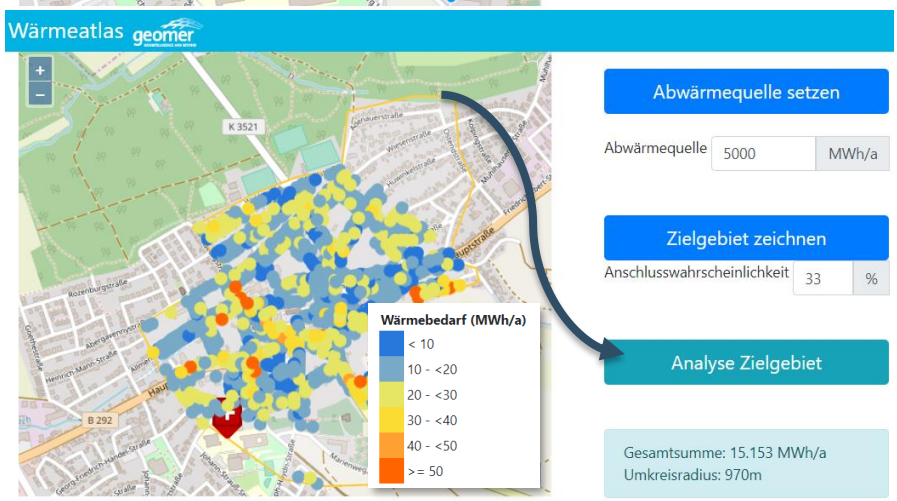
- **Analysedienste**

  Diese Art Services geht über die reine Darstellung und Bereitstellung von Daten hinaus. Analysedienste ermöglichen es Anwendern bestimmte, durch den Dienst vordefinierte Auswertungen vorzunehmen. Technische Basis hierfür sind GIS-Funktionen, die von den Softwarekomponenten bereitgestellt werden. Auch diese Dienste können in standardisierter Form als so genannte Web-Processing-Services (WPS) angeboten werden uns können so von kompatiblen Endpunkten genutzt und eingebunden werden. Ein Anwender muss so nicht über die Daten verfügen, sondern benötigt lediglich den Zugriff auf den Dienst.

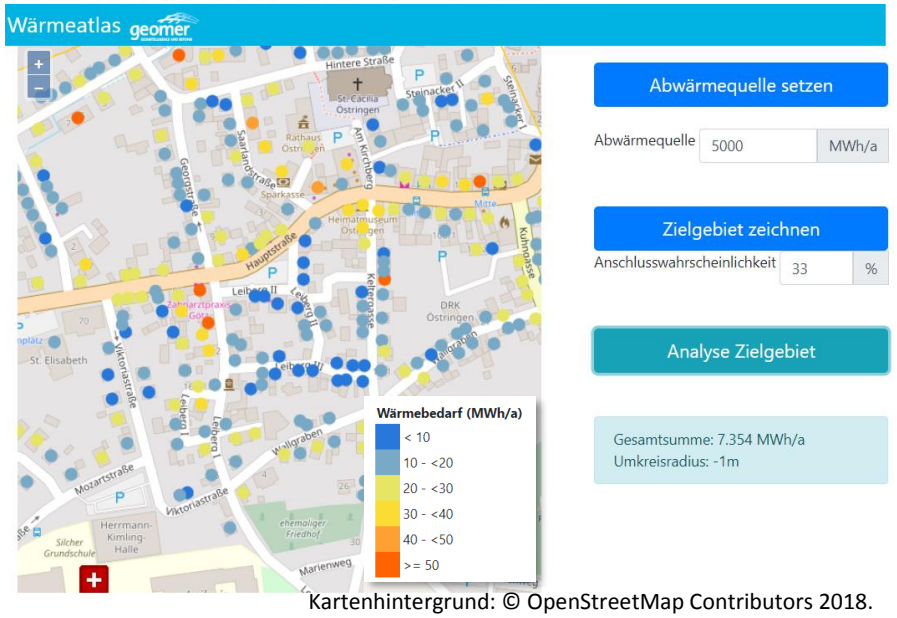
  In einem Proof-of-Concept wurde beispielhaft ein Analysedienst in Form eines interaktiven, kartenbasierten Tools zur Abwärmenutzung definiert und entwickelt. Auf Basis des Wärmebedarfs der Einzelgebäude und einer interaktiv in der Karte platzierbaren, fiktiven Abwärmequelle und eines ebenfalls interaktiv in der Karte abgrenzbares Versorgungsgebiets können unter Angabe des Anschlussgrades die in Frage kommenden Gebäude ermittelt werden, welche als Anschlusspunkte infrage kommen. Die Funktionsweise kann folgendermaßen skizziert werden. Ein Anwender wählt zunächst in der Karte interaktiv einen Standort für eine Abwärmequelle aus und setzt die Parameter „Wärmemenge (MWh/a)“ und „Anschlusswahrscheinlichkeit“ (Abbildung 64, oben). Im nächsten Schritt kann der Anwender ein potenziell zu versorgendes Zielgebiet zeichnen und analysieren. Als Ergebnis wird in der Karte zum einen angezeigt, welche Wohngebäude innerhalb des Gebietes versorgt werden können (Abbildung 64, Mitte). Haushalte, die weiter entfernt von der Quelle sind, können dabei u.U. nicht berücksichtigt werden, wenn die Wärmemenge durch näherliegende Gebäude bereits erschöpft ist.



Schritt 1: Auswahl einer Abwärmequelle und Angabe der Wärmemenge sowie des Anschlussgrades



Schritt 2: Zeichnen eines Zielgebietes (gelbes Polygon) und Analyse der infrage kommenden Gebäude



Detailansicht

Kartenhintergrund: © OpenStreetMap Contributors 2018.

Abbildung 64: WebGIS-Tool (Proof-of-Concept)

8.4 Betreibermodelle

Neben der technischen Umsetzbarkeit, die wie oben beschrieben, in jeder Hinsicht gegeben ist, stellt sich die Frage nach möglichen Betreibermodellen und damit auch nach den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, die berücksichtigt werden müssen.

8.4.1 Kostenschätzungen

In der nachfolgenden Tabelle wird zunächst der Versuch unternommen, die Kosten zusammenzustellen, die für die Implementierung einer Web-basierten Verwendung bzw. Präsentation der Abwärmepotenziale und Wärmebedarfe anfallen würden. Dies erfolgt zunächst unabhängig davon, wer diese betreibt. Der Funktionsumfang einer solchen Anwendung ist naturgemäß derzeit nicht abschließend definierbar, dennoch kann aus Erfahrungswerten ein Minimalumfang abgeschätzt werden.

Dazu wurden zum einen verschiedene Geo-Portallösungen proprietärer oder OpenSource-Varianten geprüft. OpenSource-Lösungen zeigen hierbei auf längere Sicht einen Vorteil sowohl hinsichtlich der einmaligen als auch wiederkehrend anfallender Kosten. Nicht zuletzt bieten sie auch hinsichtlich der Flexibilität einen deutlichen Vorteil. Nicht-existierende Funktionalitäten können auch selbst entwickelt werden. Lediglich für die Situation, dass bspw. in einer Landesbehörde bereits eine entsprechende Geodateninfrastruktur (GDI) vorhanden ist, kann auch eine auf proprietärer Software aufbauende Lösung kostengünstig betrieben werden, allerdings nur dann, wenn sich die Funktionalität auf Darstellungs- und Downloaddienste beschränkt.

Tabelle 24: Kostenschätzung Web-GIS-Anwendung Abwärme- und Wärmebedarfsatlas.

	Einmalige Kosten bzw. Gebühren	Jährliche Kosten	Anmerkungen
Daten			
Gebäudedaten der AdV	ca. 25 000 €	ca. 25 000 € (falls Updates erwünscht sind)	Die Kosten der AdV-Daten sind schwer abschätzbar und abhängig davon, ob eine interne oder externe Nutzung vorliegt
BImSchV-Daten	keine	keine	Datenschutzbestimmungen unklar (Kapitel 8.2.1)
Kartenhintergrund	keine (wenn OSM)	Keine (wenn OSM)	OSM: OpenStreetMap
Software/Entwicklung			
Option ArcGIS Server Online - nur Darstellung	32 000 € (Basissoftware) 50 000 € (Anpassung)	8 000 € (Lizenz- bzw. Wartungskosten)	Unter Umständen kann dieser Aufwand entfallen, wenn beim Betreiber eine entsprechende Infrastruktur bereits vorliegt
Option ArcGIS Server/ArcGIS Online – angepasste Funktionalität	32 000 € (Basissoftware) 75 000 € (Anpassung)	8 000 € (Wartungskosten)	Der Kostenrahmen ist eher als Untergrenze zu betrachten
Option OpenSource – reine Darstellung	15 000 € (einmalige Einrichtung)	keine	Hier bieten sich Lösungen wie bspw. GeoNode
Option OpenSource – angepasste Funktionalität	keine 100 000 €	keine	Geschätzt sind hier 6-7 Personenmonate für die Entwicklung angesetzt
Hosting und Betrieb			
Hosting mit Ausfallsicherheit, SSL-Zertifikate (Backup-Space)	5 000 €	12 000 €	
Wartungspersonal		15 000 €	

8.4.2 Implementierungsvarianten

Mögliche Implementierungsvarianten können an dieser Stelle lediglich skizziert werden:

- **Wärmeatlas-Webpräsenzen in öffentlicher Hand**

  Die Mehrheit der Bundesländer verfügen über Portale zum Themenbereich Energie, die teilweise auch den Bereich Wärmebedarf und Wärmepotenziale thematisieren (Baden-Württemberg, Bayern, Hamburg, Nordrhein-Westfalen, Saarland, Sachsen, Thüringen, vgl. Kapitel 8.1). Die Integration in diese bestehenden Strukturen bietet zahlreich Vorteile. Diese liegen zwar auch im Kostenbereich, vielmehr jedoch werden sie in der Möglichkeit gesehen, bestehende Netzwerke, Strukturen und den Bekanntheitswert nutzen zu können.

  Insgesamt zeichnet sich zu diesem Themenbereich allerdings ein sehr heterogenes Bild. Den föderalen Strukturen geschuldet, entwickeln die Bundeländer hier unterschiedliche Herangehensweisen. Eine bundesweite Option ist nicht vorhanden. Perspektivisch wäre die Einrichtung eines bundesweiten Web-Portals – wie es u.a. im Rahmen der EU-Energieeffizienzrichtlinie angeregt wird – zu prüfen, in das Teile der aufbereiteten Daten und entwickelten Modelle zur Abbildung des Wärmebedarfs von Wohn- und Nichtwohngebäuden und Endenergieeinsätzen für Prozesswärme im verarbeitenden Gewerbe integriert werden könnten.

- **Privater Betrieb eines (Ab-)wärmeportals**

  Dieses Modell würde bedeuten, dass ein privates Unternehmen die Implementierung und den Betrieb eines Portals auf eigenes Risiko betreibt. Die o.a. Kostenübersicht dient hierbei als Rahmen, wenn auch sehr grob. Es wird ersichtlich, dass selbst bei einer Minimalvariante auf einen privaten Betreiber Kosten zukommen würden, die mit einmalig nicht unter 100 000 € anzusetzen sind- Im Laufe eines Betriebes von zehn Jahren würden, grob geschätzt, Kosten von rund 40 000 € pro Jahr anfallen (Tabelle 25). Hierbei sind noch keine Kapitalkosten oder Gewinnanteile berücksichtigt. Unklar ist, wie die Einnahmenseite für einen privaten Betreiber gestaltet werden kann. Denkbar sind Lizensierungen, etwa durch Energieagenturen. Eine Teilfinanzierung durch themenspezifische Werbeinhalte muss kritisch gesehen, da sie unter Umständen die Akzeptanz gefährdet.

- **Öffentlich-Private-Partnerschaft (ÖPP)**

  In einer Zusammenarbeit zwischen einem privaten Dienstleister und einer öffentlichen Institution wäre das oben skizzierte Kostenschema dann realisierbar, wenn sich eine oder mehrere öffentliche Träger (bspw. Landesenergieagenturen o.ä.) dazu entscheiden könnten, eine solche Web-Präsenz zu realisieren, aber nicht selbst betreiben zu wollen.

Tabelle 25: Überschlägige Kalkulation eines privaten Betreibermodells.

Kostenschätzung privates Betreibermodell	
1. Jahr	2.-10 Jahr
Daten: 25 000 € Einrichtung: 100 000 €	Daten-Update*: 2 500 € Hosting/Wartung: 27 000 €
Summe: 125 000 €	Summe/Jahr: 29 500 €
	Summe in 9 Jahren: 265 500 €
	Summe i. 1. Jahr: 125 000 €
	Summe i. 10 Jahren: 390 500 €
* (1mal Update zu 25 000, 2 500/Jahr)	Kosten/Jahr (über 10 Jahre): 39 050 €

8.5 Datenschutzaspekte

Dem Datenschutz kommt im Themenkomplex Energie eine besondere Bedeutung zu. Die Europäische Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO, EU 2016/679) regelt den Umgang mit und die Verarbeitung von personenbezogenen Daten. Insofern muss zunächst geprüft werden, an welcher Stelle überhaupt einen Personenbezug entstehen kann. Die juristische Beurteilung dieser Thematik war nicht Gegenstand dieses Projektes, insofern können an dieser Stelle nur Einschätzungen gemacht werden. Die geschieht an den potenziell eingesetzten Datenquellen.

- **Gebäudegeometriedaten**

  Diese Datenquelle entstammt der öffentlichen Verwaltung. Die Verwendung ist in eigenen Lizenzbestimmungen geregelt. Grundsätzlich ist nicht davon auszugehen, dass aus den Daten ein Personenbezug herstellbar ist. Daten zur energetischen Typisierung oder zum Wärmebedarf, die von den bundesweiten 3D-Gebäudemodellen der Vermessungsverwaltungen abgeleitet wurden, können jedoch nur als lizenz- und kostenpflichtiges Produkt an Dritte weitergeben werden (Kapitel 8.2.2).

- **Abwärmequellen**

  Anlagen, die gemäß BImSchG registriert sind, werden teilweise von den Bundesländern frei in Form von Geodiensten zugänglich gemacht, eine Einheitlichkeit ist allerdings nicht erkennbar (Kapitel 8.2.1). Auch ist nicht klar bzw. länderübergreifend geregelt, welchen Nutzungseinschränkungen diese Datendienste unterliegen. Die Daten können u.U. auch postalische Adressen des Anlagenbetreibers enthalten, über die potenziell ein Personenbezug zu Eigentümern o.ä. hergestellt werden kann. Eine Integration in öffentliche und/oder private Betreiberkonzepte bedarf auf jeden Fall einer vorherigen datenschutzrechtlichen Absicherung durch spezialisierte Juristen.

9 Zusammenfassung

9.1 Potenzialmodell

Im Rahmen des Verbundvorhabens wurde eine umfassende GIS-Plattform mit aufbereiteten Datensätzen zu industriellen Abwärmepotenzialen und mit Modellen bzw. automatisierten Programmabläufen zur Bestimmung netzgebunden nutzbarer Abwärmemengen zur Versorgung des Gebäudebestandes mit Raumwärme und Warmwasser entwickelt. Zu diesem Zweck wurden Daten zum Brennstoffeinsatz und zu Abgasströmen aus den Emissionserklärungen berichtspflichtiger Anlagen nach der 11. BImSchV mit weiteren räumlich aufgelösten Datensätzen zusammengeführt. Im Ergebnis konnten rund 360 TWh Brennstoffeinsätze und 30 TWh thermisch relevanter Prozessstromeinsätze und theoretische Abwärmepotenziale von 63 TWh an rund 4000 Standorten des verarbeitenden Gewerbes der Wirtschaftszweige C10 bis C33, exkl. C19 in einer Standortdatenbank verortet werden.

Parallel wurde auf Grundlage der bundesweiten 3D-Gebäudemodelle der Landesvermessungsämter (LoD1_DE) Daten zur Verteilung von Baualtersklassen im Wohngebäudebestand auf Ebene eines 100m-Rasters aus der Gebäude und Wohnungszählung 2011 und ergänzenden Datensätzen zur Gebäudenutzung eine Datenbank mit 19,4 Mio. energetisch typisierten Wohn- und 3,1 Mio. beheizten Nichtwohngebäuden entwickelt. Über eine Schnittstelle zum Gebäudemodell GEMOD des ifeu können neben dem Status-Quo des verbrauchskalibrieten Nutzenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser auch Simulationsergebnisse zur zukünftigen Wärmebedarfsentwicklung in Abhängigkeit verschiedener Pfade energetischer Sanierungstätigkeit abgebildet werden. Zur Bestimmung und Verortung verfügbarer Wärmesenken in Form von Wärmenetzen wurde ein bundesweites Wärmenetzmodell, das bestehende Fernwärmegebiete und potenzielle zusätzliche Versorgungsgebiete anhand einer Liniendichte [MWh/m*a] auf Ebene eines bundesweiten 500 m-Analyserasters abbildet, entwickelt. Einem Szenario moderater energetischer Sanierungstätigkeit folgend, wurde für das Stichjahr 2030 ein Wärmeabsatz von 64 TWh in bestehenden und weiteren 130 TWh in potenziellen Wärmenetzgebieten als Grundlage der Potenzialanalyse modelliert.

Für die räumliche Potenzialanalyse wurde ein automatischer Programmablauf zur Verschneidung der aufbereiteten Abwärmepotenziale pro Industriestandort und der identifizierten Wärmenetzsenken in einer GIS-Umgebung entwickelt. Basierend auf einer räumlichen Allokation der Abwärmepotenziale auf Wärmesenken in einem Analyse-Raster mit 10km-Kantenlänge als maximale Distanz zwischen Wärmequelle- und Wärmesenke wurden drei Szenarien mit unterschiedlichen Grenztemperaturen $T_{Trans}[^{\circ}C]$ für eine passive (Wärmetauscher) oder aktive (Wärmepumpe) Einkopplung der theoretischen Abwärmepotenziale in Wärmenetzsysteme modelliert. Über die Analyse wurden technische Potenziale netzgebundener Abwärmenutzung von 11-13 TWh (bestehende Netze) bzw. 23-29 TWh (inkl. Netzpotenziale) ermittelt (Tabelle 26).

Tabelle 26: Ermittelte technisch netzgebunden nutzbare industrielle Abwärmepotenziale.

Temperatur-Szenario	Übergangs-temperatur T_{trans}	Technisches nutzbares Abwärmepotenzial [TWh]	
		Fernwärmebestand	inkl. Netzpotenziale
Konservativ (Referenzvariante)	100 °C	11	23,1
Perspektivisch	80 °C	11,5	24,2
Progressiv	50 °C	13,4	28,9

Die anschließend unter Berücksichtigung der individuellen Entfernungen zwischen Quellen und Senken durchgeführte wirtschaftliche Abschichtung ergab, dass bei Vollkosten frei Hausanschluss von 80 bis 120 €/MWh 80-95 % der Abwärmeströme wirtschaftlich erschließbar sind (Abbildung 65). Ein wesentlicher Grund für diese hohen Werte ist die überwiegend positive räumliche Korrelation zwischen Abwärmequellen und Wärmesenken/Wärmenetzgebieten: Die zu überbrückende Distanz beträgt mehrheitlich unter 1000 m.

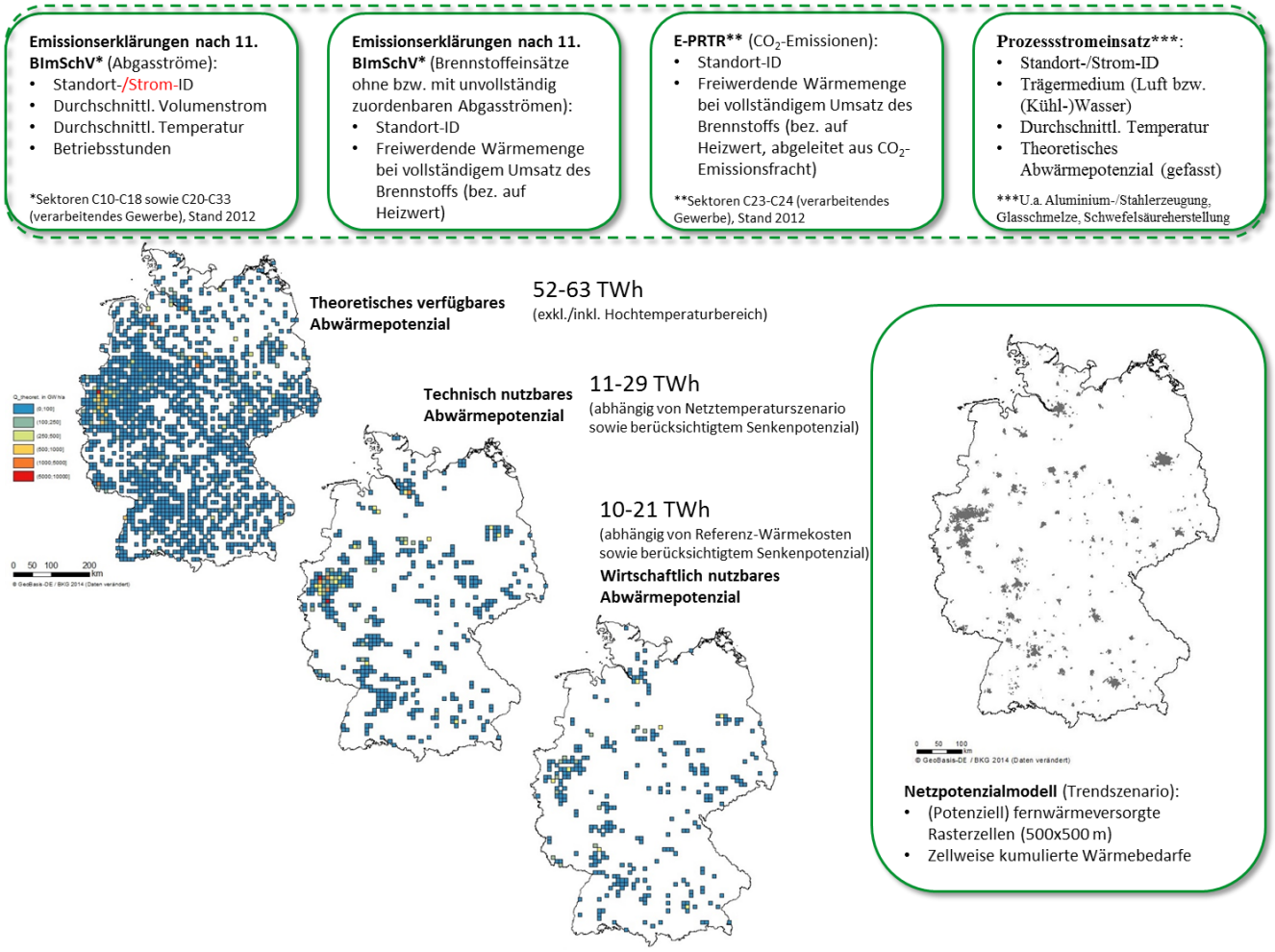


Abbildung 65: Schematischer Ablauf und Ergebnisse der räumlichen Potenzialabschichtung.

9.2 Unternehmensfallstudien

Im Rahmen des Vorhabens wurde eine quantitative, schriftliche Befragung von 38 Industrieunternehmen zum Thema außerbetriebliche Nutzung von Abwärme durchgeführt.

87%
der Teilnehmer verfügen über einen Überschuss an Abwärme

16%
der Teilnehmer speisen Abwärme in externe Netze ein

37%
der Teilnehmer haben Szenarien zur Einspeisung von Abwärme geprüft

53%
der Teilnehmer sehen Wirtschaftlichkeit als Hindernis zur Einspeisung von Abwärme

Alle Unternehmen gehören Industriezweigen mit hohen Endenergieeinsätzen für Prozesswärmeanwendungen an, über 50% der Befragten stammen dabei aus den drei Branchen C23 - Glas / Keramik / Steine & Erden, C24 - Metallerzeugung und -bearbeitung sowie C17 - Herstellung von Papier & Pappe. In Bezug auf die Unternehmensgröße gehört eine Minderheit den kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) an, während der Großteil eigenständige rechtliche Einheiten bzw. Standorte von größeren Unternehmen repräsentiert.

Die Ergebnisse der Befragung zeigen, dass 87% der Unternehmen über einen Überschuss an Abwärme mit einem Temperarturniveau von mindestens 65 C verfügen, der ungenutzt bleibt und damit grundsätzlich für eine externe Nutzung in Frage kommt. Dieses Potenzial heben jedoch nur die wenigsten Unternehmen. Gerade einmal 16% speisen aktuell ihre Überschussabwärme in externe Wärmenetze ein. Die Untersuchung der Ursachen für diese geringe Einspeisequote hat zwei wesentliche Aspekte zum Vorschein gebracht: zum einen haben sich erst 37% der Studienteilnehmer konkret mit einer möglichen Einspeisung von Überschussabwärme in externe Nah- oder Fernwärmenetze beschäftigt. Zum anderen halten 53% der Befragten die mangelnde Wirtschaftlichkeit solcher Projekte für ein wesentliches Hindernis auf dem Weg zu einer stärkeren externen Abwärmeeinspeisung.

Parallel zur Unternehmensumfrage wurden vertiefende Fallstudien in sechs Industrieunternehmen, inklusive einer Analyse technisch priorisiert zu nutzender Abwärmeströme und der Erstellung netzgebundener Nutzungskonzepte, durchgeführt. In Bezug auf die Validierung theoretischer Abwärmepotenziale aus der in der Potenzialanalyse genutzten primären Daten aus Emissionserklärungen nach der 11. BImschV, konnten Abwärmemengen in einer ähnlichen Größenordnung festgestellt werden, wobei es sich bei den technisch nutzbaren Potenzialen oftmals nicht um Rauchgasströme (wie in den Emissionserklärungen erfasst), sondern um Abluft, Überschussdampf oder andere Kühlstoffströme handelt. Die genauen, nutzungskritischen Parameter dieser Ströme (Temperatur, zeitliche Verfügbarkeit, Schadstoffbelastung) konnten nur im Rahmen der vor-Ort-Studien erfasst und auf Grund der geringen Grundgesamtheit nicht in die quantitative Potenzialanalyse überführt werden.

Weiterhin ergab die Entwicklung konkreter Nutzungskonzepte im Abgleich mit lokalen Daten an vier von sechs Industriestandorten konkurrenzfähige Wärmegestehungskosten einer Abwärmeeinspeisung von 25-35 EUR/MWh ohne Berücksichtigung der aktuell möglichen hohen finanziellen Förderung von Investitionskosten auch für außerbetriebliche Abwärmenutzungsmaßnahmen. Diese Zahlen unterstreichen die möglichen positiven wirtschaftlichen

Effekte für Abwärmelieferanten wie für Wärmenetzbetreiber, die ebenfalls auf einem im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Stakeholder-Workshops von Fernwärmebetreibern mit hohen Anteilen von Abwärme im Netz bestätigt wurden.

Zentraler Punkt aus Sicht der (potenziellen) Vertragspartner ist das Risiko-Handling. Bereits in der Initiierungsphase möglicher Abwärmenutzungsprojekte wirken laut den Angaben der Workshop-Teilnehmer und der Befragten Industrieunternehmen Informationsdefizite und fehlende personelle Kapazitäten als Hemmnis. Diese könnten auf lokaler Ebene neben einer systematisierten Energieleitplanung, durch öffentlich geförderte „Abwärme-Inkubatoren“ und eine fortlaufende systemisch-technische Beratung, inkl. der Beschaffung und Aufbereitung von Planungsdaten und der Entwicklung von Wärmenutzungskonzepten adressiert werden, um eine valide Entscheidungsgrundlage für die beteiligten Akteure, auch in der Phase der Vertragsgestaltung, zu schaffen.

Industrieunternehmen sehen sich i.d.R. nicht in der Rolle als haftende Investoren in Anlagen und Infrastrukturen, diese Rolle kommt eher den Energieversorgungsunternehmen oder –dienstleistern zu. Dabei wirkt insbesondere bei größeren Industrieunternehmen zusätzlich die Fokussierung auf unternehmerische Flexibilität und Zeiträume von maximal vier Jahren für vertragliche Festlegungen für die Initiierung außerbetrieblicher Wärmelieferbeziehungen, die auf Grund der hohen Investitionskosten über längere Zeiträume abgeschrieben werden müssen, als Hemmnis. Aus Sicht der Fernwärmebetreiber als Wärmeabnehmer bzw. Investoren in eine Erschließungsinfrastruktur ist deshalb in jedem Fall eine Risikoabsicherung sowohl durch fundierte technisch-wirtschaftliche Informationen zur möglichen Netzintegration von Abwärmequellen und einer Besicherung bzw. redundanten Erzeugung als auch durch flankierende finanzielle Instrumente wie einen staatlichen Risikoabsicherungsfonds ein zentraler Hebel für die Aktivierung netzgebunden nutzbarer Abwärmepotenziale (Kapitel 7.2).

10 Literatur

11.-BImSchV (2013): Elfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Emissionserklärungen) (11. BImSchV). Federal Republic of Germany. S. 1–5.

AdV (2018): ATKIS-Objektartenkatalog Basis-DLM. Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens. Online unter: http://www.adv-online.de/icc/extdeu/nav/a63/binarywriterservlet?imgUid=9201016e-7efa-8461-e336-b6951fa2e0c9&uBasVariant=11111111-1111-1111-1111-111111111111.

AGFW (2014): Arbeitsblatt AGFW FW 309 Teil 1. Frankfurt am Main.

AGFW (2016): AGFW – Hauptbericht 2016. Frankfurt a.M.

AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme Kälte und KWK e.V. (2018): Liste der fP-Bescheinigungen nach FW-309-1 nach Städten sortiert. Frankfurt am Main. Online unter: https://www.agfw.de/fileadmin/user_upload/Technik_u_Normung/Erzeugung/Energetische_Bewertung/Liste_der_fP-Bescheinigungen_nach_FW_309-1.pdf.

Allplan-(Hrsg.) (2017): Abwärmepotenziale im Zentralraum Hallein-Salzburg. Wien.

BAFA (2018a): Energieberatung Mittelstand. Online unter: http://www.bafa.de/DE/Energie/Energieberatung/Energieberatung_Mittelstand/energieberatung_mittelstand_node.html (zugegriffen 22.10.2018).

BAFA (2018b): Wärmenetze 4.0. Online unter: http://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Waermenetze/waermenetze_node.html (zugegriffen 22.10.2018).

Benndorf, R., M. Bernicke, A. Bertram, W. Butz, F. Dettling, J. Drotleff, C. Elsner, E. Fee, C. Gabler, Christine Galander, Y. Hargita, R. Herbener, T. Hermann, F. Jäger, J. Kanthak, H. Kessler, Y. Koch, D. Kuntze, M. Lambrecht, C. Lehmann, H. Lehmann, S. Leuthold, B. Lünenbürger, I. Lütkehus, K. Martens, F. Müller, K. Müschen, D. Nissler, S. Plickert, K. Purr, A. Reichart, J. Reichel, H. Salecker, S. Schneider, J. Schuberth, D. Schul, M. Sieck, U. Strenge, B. Westermann, K. Werner, C. Winde, D. Wunderlich und B. Zietlow (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

BImSchG (2016): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG). In: Bundesgesetzblatt. Federal Republic of Germany. S. 1–48.

BKG - Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2018): Verwaltungsgebiete 1:250 000 - Stand 31.12.2017. Online unter: http://www.geodatenzentrum.de/geodaten/gdz_rahmen.gdz_div?gdz_spr=deu&gdz_akt_zeile=5&gdz_anz_zeile=1&gdz_unt_zeile=13&gdz_user_id=0.

Blesl, M. (2002): Räumlich hoch aufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungs- systeme zur Deckung des Niedertemperatur- wärmebedarfs. S. 280.

Blesl, M., S. Kempe, M. Ohl, U. Fahl, A. König, T. Jenssen und L. Eltrop (2008): Wärmeatlas Baden-Württemberg Erstellung eines Leitfadens und Umsetzung für Modellregionen. S. 122 ff.

Blesl, M., S. Kempe und H. Huther (2010): Verfahren zur Entwicklung einer digitalen Wärmebedarfskarte. AGFW.

Blömer, S. (2015): Vorstellung eines siedlungstrukturellen Verfahrens zur Integration des Merkmals „Baualter“ in die GIS-basierte Wärmebedarfsmodellierung. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.

Blömer, S., C. Götz, P. Mellwig, M. Pehnt und P. Jochum (2017): Die Rolle von Wärmenetzen im Wärmemarkt der Zukunft – GIS-Analyse technisch-ökonomischer Potenziale. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 67, S. 39–42.

Blömer, S. und D. Hering (2018): Abwärmekataster - Potenziale industrieller Abwärme in Wärmenetzen ermitteln. Online unter: https://projektinfos.energiewendebauen.de/projekt/potenziale-industrieller-abwaerme-in-waermenetzen-ermitteln/ (zugegriffen 16.10.2018).

BMWi (2018): Energiedaten Gesamtausgabe. Berlin: BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015): Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt. Online unter: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Foerderbekanntmachungen/marktanreizprogramm-erneuerbare-energien.pdf?__blob=publicationFile&v=9.

BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2018): Aufkommen und Verwendung von Fernwärme. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Online unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/Energiedaten/Energietraeger/energiedaten-energietraeger-32.html.

Böhme, P. und T. Hamacher (2013): Verbesserte Aussagekraft kommunaler Wärmebedarfs- und Wärmeverbrauchsanalysen. In: Koch, Andreas/Bill, Ralf/Donaubauer, Andreas (Hg.): Geoinformationssysteme 2013. Beiträge zum 18. Münchner Fortbildungsseminar. Berlin: Wichmann.

Braasch, C., W. Nieratschker, S. Döring und M. Muscheid (2017): Integration von Hochtemperaturwärmepumpen in KWK-Anlagen. In: BWK, S. 58–63.

Brückner, S., H. Schäfers, I. Peters und E. Lävemann (2014a): Using industrial and commercial waste heat for residential heat supply: A case study from Hamburg, Germany. In: Sustainable Cities and Society 13, S. 139–142.

Brückner, S., L. Miró, L.F. Cabeza, M. Pehnt und E. Laevemann (2014b): Methods to estimate the industrial waste heat potential of regions – A categorization and literature review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 38, S. 164–171.

Brückner, S., S. Liu, L. Miró, M. Radspieler, L.F. Cabeza und E. Lävemann (2015): Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies. In: Applied Energy 151, S. 157–167.

Brückner, S. (2016): Industrielle Abwärme in Deutschland. Technische Universität München. Online unter: https://mediatum.ub.tum.de/doc/1310042/1310042.pdf.

Brueckner, S., R. Arbter, M. Pehnt und E. Laevemann (2016): Industrial waste heat potential in Germany a bottom-up analysis. In: Energy Efficiency, S. 1–13.

Bund-/ Länder Kooperation VKoopUIS (2013): Fachhilfe für BUBE-Online Betriebliche Umweltdatenberichterstattung Emissionsspektren und Emissionsfaktoren für die Berechnung von Emissionen 11. BImSchV - Version 1.5. Online unter: https://wiki.prtr.bund.de/images/f/fe/BUBE_Fachhilfe_Emissionsberechnung_11bv_1_5.pdf.

Deilmann, C., M. Behnisch, S. Dirlich, K. Gruhler, U. Hagemann, R. Petreit, C. Kunz und K. Petereit (2013): Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude – Erfassung und Quantifizierung von Energieeinspar- und CO2-Minderungspotenzialen. In: BMVBS-Online-Publikation. Dresden und Göldenitz: BMVBS. S. 121.

dena (2018): Leuchttürme energieeffiziente Abwärmenutzung. Online unter: https://www.dena.de/themen-projekte/projekte/energiesysteme/leuchtturm-abwaerme/ (zugegriffen 21.10.2018).

Destatis (2012): Produzierendes Gewerbe Beschäftigung und Umsatz der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden. Wiesbaden. Online unter: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Strukturdaten/Kostenstruktur2040430107004.pdf?__blob=publicationFile.

Destatis (2015): Verarbeitendes Gewerbe. In: Statistisches Jahrbuch.

Diefenbach, N. (2013): Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU. S. 2–3.

DIHK-(Hrsg.) (2017): Faktenpapier Strompreise in Deutschland 2017 – Bestandteile, Entwicklungen, Strategien. Berlin.

DIN (2003): DIN 4108-6 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden.

Dirlich, S., K. Gruhler, C. Deilmann, R. Petereit, C. Kunz und K. Petereit (2011): Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland. In: BMVBS-Online-Publikation. Dresden und Göldenitz: BMVBS. S. 144.

EEWärmeG (2015): Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz - EEWärmeG). Berlin: Deutscher Bundestag. Online unter: https://www.gesetze-im-internet.de/eew_rmeg/EEWärmeG.pdf.

Eikmeier, B., J. Gabriel, W. Schulz, W. Krewitt und M. Nast (2005): Analyse des nationalen Potenzials für den Einsatz hocheffizienter KWK, einschließlich hocheffizienter Kleinst-KWK, unter Berücksichtigung der sich aus der EU-KWK-RL ergebenden Askpekte.

Eikmeier, B., M. Klobasa, F. Toro und N.V.L. Nordrhein-westfalen (2011): Potenzialerhebung von Kraft- Kraft - Wärme- Wärme - Kopplung in Nordrhein- Nordrhein - Westfalen.

Energieagentur-Kreis-Konstanz (2018): Abwärme-Kataster Landkreis Konstanz. Online unter: http://www.energieagentur-kreis-konstanz.de/industrie-gewerbe/abwaerme-kataster/ (zugegriffen 10.10.2018).

EnEV (2015): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV). Berlin. Online unter: https://www.gesetze-im-internet.de/enev_2007/EnEV.pdf.

Esch, T., H. Taubenböck, C. Geiß, C. Schillings, M. Nacht, A. Metz, W. Heldens und M. Keil (2011): Potenzialanalyse zum Aufbau von Wärmenetzen unter Auswertung siedlungsstruktureller Merkmale. In: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundeamt für Bauwesen und Raumordnung.

European IPPC Bureau (2007): Reference Document on Best Available Techniques for the Production of Speciality Inorganic Chemicals. Online unter: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/sic_bref_0907.pdf.

European IPPC Bureau (2014): Reference Document for the Production of Chlor-alkali. Online unter: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/.

Eurostat (2008): NACE Rev. 2. Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft. Luxemburg.

Eurostat (2018): Energie, Daten, Datenbank. Online unter: https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/database.

FH-Münster (2017): Hot-Spot Analyse. Online unter: http://www.wiefm.eu/startseite/ergebnisse/hotspot-analyse/ (zugegriffen 10.10.2018).

Fischedick, M., D. Schüwer, J. Venjakob, F. Merten, D. Mitze, M. Nast, C. Schillings, W. Krewitt, W. Bohnenschläfer und K. Lindner (2007): Potenziale von Nah- und Fernwärmenetzen für den Klimaschutz. In: Climate Change.

Forman, C., I.K. Muritala, R. Pardemann und B. Meyer (2016): Estimating the global waste heat potential. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 57, S. 1568–1579.

Forni, D., D. Di Santo und F. Campana (2014): Innovative system for electricity generation from waste heat recovery. In: ECEEE 2014 Industrial Summer Study Proceedings, S. 393–403.

Freie und Hansestadt Hamburg (2018): Wärmekataster. Online unter: https://www.hamburg.de/energiewende/waermekataster/ (zugegriffen 10.12.2018).

Gils, H.C. (2013): Abschätzung des möglichen Lastmanagementeinsatzes in Europa. In: Internationale Energiewirtschaftstagung (IEWT) 2013, S. 1–18.

Götz, C., S. Blömer und M. Pehnt (2016): Nahwärmegenossenschaften in Deutschland - ein Wärmeversorgungsmodell der Zukunft? In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 66, S. 46–48.

Groß, B. und G. Tänzer (2010): Industrielle Abwärme. Eine Potentialstudie für Deutschland. Saarbrücken: IZES gGmbH.

Hebecker, D. (1995): Wärmetransformation. In: Abfallenergienutzung – technische, wirtschaftliche und soziale Aspekte. Berlin: Fratzscher, W.

Hering, D., S. Richter, S. Blömer und M. Pehnt (2018): Industrielle Abwärmenutzung in Deutschland. Potenziale zur externen Nutzung in Wärmenetzen. In: EuroHeat&Power 47, S. 14–18.

Hills, T. und A. Gambhir (2014): The suitability of different types of industry for inter-site heat integration. In: ECEEE 2014 Industrial Summer Study Proceedings, S. 423–434.

Hirzel, K.S., B. Sontag und C. Rohde (2013): Industrielle Abwärmenutzung. Karlsruhe.

Hummel, M., C. Villotti und L. Kranzl (2014): Assessment of the economic viability of the integration of industrial waste heat into existing district heating grids. In: ECEEE 2014 Industrial Summer Study Proceedings, S. 537–545.

Incropera, F.P., D.P. DeWitt, T.L. Bergman und A.S. Lavine (2007): Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons. (= Dekker Mechanical Engineering).

IPCC (2006): IPCC Guidelines for Energy and Carbon Emissions. Volume 2 - Energy. IPCC.

IWU (2015a): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden.

IWU (2015b): Deutsche Wohngebäudetypologie - Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebauden.

IZES (2017): Wärmekataster Saarland. Saarbrücken: Ministerium für Wirtschaft, Arbeit, Energie und Verkehr Saarland.

Jackl, S. (2012): Abwärmenutzing im Betrieb. S. 6ff.

Jochum, P., P. Mellwig, F. Bülbül, M. Pehnt, L. Brischke, M. Jarling und M. Kelavic (2012): Technische Restriktionen bei der energetischen Modernisierung von Bestandsgebäuden. Berlin, Heidelberg.

Jochum, P., P. Mellwig, A. von Oehsen, M. Pehnt, J. Fehr, A. Fortuniak, J. Lempik, M. Kulka, T. Blachut und T. Wallstab (2015): Dämmbarkeit des deutschen Gebäudebestands.

Jochum, P., P. Mellwig, J. Lempik, M. Pehnt, S. Böttcher, A. von Oehsen, D. Stelter, S. Blömer, J. Fehr, T. Krenz und H. Hertle (2017): Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich - Anlagenpotenzial. Berlin, Heidelberg.

Kaltschmitt, M., W. Streicher und A. Wiese (2013): Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte.

KEA (2018): Abwärmenutzung. Online unter: https://www.energiekompetenz-bw.de/waermenetze/angebote/initialberatung/abwaermenutzung/ (zugegriffen 21.10.2018).

KfW (2018): IKK – Energetische Stadt-sanierung – Quartiers-versorgung (201, Kredit). Online unter: https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Öffentliche-Einrichtungen/Energetische-Stadtsanierung/Finanzierungsangebote/Energieeffiziente-Quartiersversorgung-Kommunen-(201)/ (zugegriffen 21.10.2018).

KfW (2019): Energieeffizienz und Prozesswärme aus Erneuerbaren Energien in der Wirtschaft (295, Kredit). Online unter: https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/Förderprodukte/Energieeffizienz-und-Prozesswärme-aus-Erneuerbaren-Energien-(295)/ (zugegriffen 03.01.2019).

KWKG (2018): Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz - KWKG). Berlin: Deutscher Bundestag. Online unter: https://www.gesetze-im-internet.de/kwkg_2016/KWKG.pdf.

Lambauer, J., U. Fahl, M. Blesl, A. Voß und R. Jakobs (2008): Industrielle Großwärmepumpen – Potenziale, Hemmnisse und Best-Practice-Beispiele. Stuttgart.

Land-Saarland (2018): Wärmekataster Saarland. Online unter: http://geoportal.saarland.de/portal/de/fachanwendungen/waermekataster-saarland.html (zugegriffen 10.10.2018).

Länderarbeitskreis (LAK) Energiebilanzen (2018): Energiebilanzen der Länder. Online unter: http://www.lak-energiebilanzen.de/laenderbilanzen/.

LANUV-NRW (2018): Planungskarte Wärme. Online unter: http://www.energieatlas.nrw.de/site/planungskarte_waerme (zugegriffen 10.10.2018).

Leube-Baustoffe (2017): Kalkproduktion. Online unter: https://www.leube.at/wp-content/uploads/sites/62/2014/06/Kalkproduktion_A4_mit_Text.pdf.

LfU-Bayern (2008): Leitfaden zur Abwärmenutzung in Kommunen. Augsburg. Online unter: https://www.gfm-ingenieure.de/fileadmin/Daten/Aktuelles/leitfaden_abwaermenutzung.pdf.

LfU-Bayern (2018a): Abwärme. Online unter: https://www.energieatlas.bayern.de/thema_abwaerme.html (zugegriffen 19.10.2018).

LfU-Bayern (2018b): Abwärmeinformationsbörse. Online unter: https://www.energieatlas.bayern.de/thema_abwaerme/abwaermeinformationsboerse.html (zugegriffen 19.10.2018).

LfU-Bayern (2018c): Wärmewende. Online unter: https://www.energieatlas.bayern.de/energieatlas/neu/194.html (zugegriffen 10.10.2018).

Loga, T., N. Diefenbach, B. Stein und R. Born (2012): TABULA Scientific Report Germany. S. 146.

Loga, T., N. Born und R. Diefenbach (2011): Deutsche Gebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Online unter: http://episcope.eu/fileadmin/tabula/public/docs/brochure/DE_TABULA_TypologyBrochure_IWU.pdf.

LUBW (2018): Wärmebedarf von Wohngebäuden. Online unter: https://www.energieatlas-bw.de/waerme/waermebedarf_wohnen (zugegriffen 10.10.2018).

Maaß, C., M. Sandrock und R. Schaeffer (2015): Fernwärme 3.0. Strategien für eine

zukunftsorientierte Fernwärmepolitik. Hamburg. Online unter: https://www.gruene-bundestag.de/fileadmin/media/gruenebundestag_de/themen_az/energie/150310_HHI-Studie-Fernwaerme.pdf.

Manz, P., T. Fleiter und A. Aydemir (2018): Developing a georeferenced database of energy-intensive industry plants for estimation of excess heat potentials. In: Eceee Industrial Summer Study Proceedings 2018–June, S. 239–247.

McKenna, R. (2009): Industrial energy efficiency. University of Bath.

McKenna, R.C. und J.B. Norman (2010): Spatial modelling of industrial heat loads and recovery potentials in the UK. In: Energy Policy 38, S. 5878–5891.

Miró, L., S. Brueckner, R. McKenna und L.F. Cabeza (2016): Methodologies to estimate industrial waste heat potential by transferring key figures: A case study for Spain. In: Applied Energy 169, S. 866–873.

Miró, L., R. McKenna, T. Jäger und L.F. Cabeza (2018): Estimating the industrial waste heat recovery potential based on CO2emissions in the European non-metallic mineral industry. In: Energy Efficiency 11, S. 427–443.

Miró, L., S. Brückner und L.F. Cabeza (2015): Mapping and discussing Industrial Waste Heat (IWH) potentials for different countries. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 51, S. 847–855.

Naegler, T., S. Simon, M. Klein und H.C. Gils (2015): Quantification of the European industrial heat demand by branch and temperature level. In: International journal of energy research 39.

Osnabrück, L. (2018): PInA - Planungsportal industrielle Abwärme. Online unter: https://www.landkreis-osnabrueck.de/bauen-umwelt/klima-energie/so-profitiere-ich/projekt-pina (zugegriffen 10.10.2018).

Paar, A., F. Herbert, M. Pehnt, S. Ochse, S. Richter, S. Maier und M. Kley (2013): Transformationsstrategien von fossiler zentraler Fernwärmeversorgung zu Netzen mit höheren Anteilen erneuerbarer Energien.

Pehnt, M., J. Bödeker, M. Arens, E. Jochem und F. Idrissova (2010): Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potentiale und energiepolitische Umsetzung. Heidelberg. Online unter: https://www.ifeu.de/energie/pdf/Nutzung_industrieller_Abwaerme.pdf.

Persson, U., B. Möller und S. Werner (2014): Heat Roadmap Europe: Identifying strategic heat synergy regions. In: Energy Policy 74, S. 663–681.

Pezzutto, S., S. Zambotti, S. Croce, P. Zambelli, C. Scaramuzzino, R.P. Pascuas, A. Zubaryeva, D.E. Eurac, A. Müller, M.H. Tuw, A.L. Klingler, M. Kühnbach, P. Manz, S. Marwitz, J. Steinbach, E. Popovski, F. Isi, L. Kranzl und S.F. Tuw (2018): HotMaps. D2 . 3 WP2 Report – Open Data Set for the EU28.

Platt, M., S. Exner und R. Bracke (2010): Studie Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes Bestandsaufnahme und Trends. Bochum. Online unter: http://www.geothermie-zentrum.de/fileadmin/media/geothermiezentrum/Projekte/WP-Studie/Abschlussbericht_WP-Marktstudie_Mar2010.pdf.

Rapp, H. (2018): AGFW District Energy Systems. Online unter: https://www.district-energy-systems.info/ (zugegriffen 10.12.2018).

Richter, S., S. Hespeler, H. Gündra und W. Kiehn (2014): Digitaler Wärmeatlas für 17,4 Millionen Wohngebäude in Deutschland. In: Euroheat and Power/Fernwarme International 43, S. 18–22.

Rohde, C. (2017): Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2013 bis 2016. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer.

SAENA (2016): Technologien der Abwärmenutzung. S. 56.

SAENA (2018): Abwärmenutzung. Online unter: http://www.saena.de/projekte/waermeatlas.html (zugegriffen 19.10.2018).

Sandrock, M., C. Maaß, S. Weisleder, C. Kaufmann, G. Fuß, P. Sorensen, L. Jensen und K. Radmann (2016): Erneuerbare Energien im Fernwärmenetz Hamburg – Teil 1: Handlungsoptionen für einen kurzfristigen Ersatz des Kraftwerks Wedel. Hamburg.

Schellong, W. (2016): Analyse und Optimierung von Energieverbundsystemen. Berlin, Heidelberg.

Schlomann, B., T. Fleiter, S. Hirzel, W. Eichhammer, A. Hassan, M. Arens, C. Rohde, F. Cebulla, D. Fehrenbach, F. Reitze, E. Jochem, F. Toro und F. Idrissova (2013): Energieverbrauch und CO2 -Emissionen industrieller Prozesstechnologien – Einsparpotenziale , Hemmnisse und Instrumente. Karlruhe: Fraunhofer Verlag.

Schlomann, B., K. Wolfarth, H. Kleeberger, L. Hardi, B. Geiger, A. Pich, E. Gruber, A. Gerspacher, E. Holländer und A. Roser (2015): Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013. Karlsruhe, München, Nürnberg.

Stadt-Frankfurt-am-Main (2018): Neues Abwärme-Kataster für Frankfurt am Main. Online unter: https://www.frankfurt.de/sixcms/detail.php?id=3076&_ffmpar[_id_inhalt]=3355 7962 (zugegriffen 10.10.2018).

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2008): Klassifikation der Wirtschaftszweige. S. 828.

ThEGA (2017): Abwärmekataster Thüringen. Online unter: http://www.thega.de/bereiche/abwaerme/abwaermekataster/ (zugegriffen 25.09.2017).

ThEGA (2018): Abwärme. Online unter: https://www.thega.de/abwaerme/ (zugegriffen 10.10.2018).

Umweltbundesamt (2017): BUBE-Online. Betriebliche Umweltdatenberichterstattung. Online unter: https://www.bube.bund.de/ (zugegriffen 01.02.2017).

Umweltbundesamt (2018): Thru - Downloads - Daten und Datenbanken. Online unter: https://www.thru.de/thrude/downloads/.

Waldhoff, C. und M. Reckzügel (2014): ReWIn. Osnabrück.

Wandinger, M. (2018): Die amtlichen 3D-Gebäudemodelle in der Ausprägung LoD1 (LoD1-DE). Online unter: http://www.adv-online.de/AdV-Produkte/Weitere-Produkte/3D-Gebaeudemodelle-LoD/.

Wischnewski, B. (2018a): CalcDampf. Online unter: http://www.peacesoftware.de/einigewerte/wasser_dampf.html (zugegriffen 18.01.2018).

Wischnewski, B. (2018b): CalcLuft. Online unter: http://www.peacesoftware.de/einigewerte/luft.html (zugegriffen 18.01.2018).

Witte, A. (2016): PInA PInA Planungsportal Industrielle Abwärme. Osnabrück: Landkreis Osnabrück. Online unter: https://www.landkreis-osnabrueck.de/sites/default/files/downloads/projektsteckbrief_pina_02.03.2015_1.pdf.

Wolf, S., U. Fahl, M. Blesl, A. Voß und R. Jakobs (2014): Analyse des Potenzials von Industriewärmepumpen in Deutschland.

Wunderlich, C., S. Fiedler und C. Kunz (2016): Metaanalyse: Investitionskosten von Energiewende-Technologien. Berlin.

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, E.G., I. für T.T. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt und L. Institut für Energetik und Umwelt (2006): Anforderungen an Nah- und Fernwärmenetze sowie Strate- gien für Marktakteure in Hinblick auf die Erreichung der Klimaschutzziele der Bundesregierung bis zum Jahr 2020 Endbericht , Dezember 2006. In: Energetik 121, S. 233.

Anhang

Anhang 1: Baualtersklasseneinteilung des deutschen Wohngebäudebestandes anhand energetischer Charakteristika nach der IWU-Wohngebäudetypologie (Loga et al. 2011).

Baualtersklasse	Energetische Charakteristika
A Bis 1859	Vor-industrielle Phase, handwerklich geprägte Bautechniken, aufbauend auf Erfahrungen, kaum gesetzliche Regelungen; Verwendung von lokal verfügbaren Materialien der Region. Dominante Bauweisen: Fachwerk mit Strohlehm-Ausfachung, monolithische Wände aus unbehauenen oder behauenen Natursteinen oder Voll-Ziegeln, Holzbalkendecken.
B 1860-1918	Gründerzeit: Ausdehnung der Städte und einsetzende Industrialisierung, Standardisierung und Normung der Bauweisen; jedoch noch regional geprägt. Dominanz von Mauwerksbauten, im ländlichen Bereich auch Fachwerk mit Mauerwerksausfachung, häufig erhaltenswerte Gestaltung der Straßenfassaden (Stuck, Sandstein, Klinker), Holzbalkendecken, häufig massive Kellerdecken.
C 1919-1948	Zunehmende Industrialisierung der Baustoffherstellung, Verwendung kostengünstiger und einfacher Materialien sowie materialsparender Konstruktionen, nationale Standardisierung und Normung. Dominanz von ein- und zweischaligen Mauerwerksbauten, massive Kellerdecken, etwas verbesserter Wärmeschutz durch verstärkten Einsatz von Bauelementen mit Luftkammern (zweischalige Bauweise, Hohlkörper-Decken).
D 1949-1957	Einfache Bauweise der Nachkriegszeit, häufig mit Trümmer-Materialien, Weiterentwicklung der Normen, Einführung von Anforderungen für den sozialen Wohnungsbau. Überwiegend Mauerwerksbauweise, Holzbalkendecken nur noch bei Einfamilienhäusern, im Geschosswohnungsbau der DDR ab Anfang der 50er Jahre auch Bauten in vorgefertigter Block- oder Streifenbauweise.
E 1958-1968	Wärmeschutz-Norm (DIN 4108 - Wärmeschutz im Hochbau) wird wirksam. im Geschosswohnungsbau erste Hochhaussiedlungen; statisch wird Stahlbeton in vielen Variationen bestimmend, Zunahme konstruktiver Wärmebrücken (inbes. auskragende Betonbauteile); in der DDR Plattenbauten in Großserien.
F 1969-1978	Neue industrielle Bauweisen (Sandwich-Konstruktionen), Fertighaus-Konzept im Einfamilienhaus-Bereich. Ausgelöst durch 1. Ölkrise erhält der Wärmeschutz größere Bedeutung.
G 1979-1983	1. Wärmeschutzverordnung als Folge der Ölkrise; auch in der DDR verbesserte wärmetechnische Anforderungen (Rationalisierungsstufe II). Bei monolithischen Wänden immer kleinere Luftkammern bzw. porosierte Materialien; aber auch von außen gedämmte Mauerwerksbauten (Wärmedämmverbundsystem) stärker im Markt vertreten.
H 1984-1994	2. Wärmeschutzverordnung (WSchV 84); in der DDR weiter verbesserter Wärmeschutz (Rationalisierungsstufe III). Erste Niedrigenergiehäuser im Markt vertreten, teilweise gefördert durch regionale / Landesprogramme.
I 1995-2001	3. Wärmeschutzverordnung (WSchV 95).
J Ab 2002	Energieeinsparverordnung EnEV 2002. Förderung für KFW-Energiesparhäuser 60 und 40.

Anhang 2: Struktur der aufbereiteten Daten aus der Abfrage der Emissionserklärungen aus der BUBE-Datenbank.

Datenebene	Abfrage 1: eingehende Brennstoffströme Parameter	Abfrage 2: ausgehende Abgasströme Parameter	Beschreibung
Eindeutige ID	Stoffstrom-ID	EV-ID	ID in Datenbank
Georeferenzierung	Rechts-/Ost-Wert [m] Hoch-/Nord-Wert [m] Geodät. Referenzsystem	Rechts-/Ost-Wert [m] Hoch-/Nord-Wert [m] Geodät. Referenzsystem	Geograph. Koordinaten Geograph. Koordinaten Referenzsystem Koordinaten
BUBE-Datenbank	Berichtsjahr Behörde AST-Nr (BUBE)	Berichtsjahr Behörde AST-Nr	Bezugsjahr (2012) Zuständige Landesbehörde Anlagennummer BUBE
Anlagenbetreiber	NACE Betreibername PLZ/Betriebsort Strasse/Nr	NACE	Vierstelliger Wirtschaftszeig-Code nach NACE-Systematik Name Unternehmen Postleitzahl und Ort Straße und Hausnummer
Anlage	Anlage Nr Anlage/AN Bezeichnung 4. BImSchV Leist/Kap Maßzahl Leist/Kap Einheit Leist/Kap Bezug Feuerungsart Feuerungswärmeklasse	 Anlage/AN Bezeichnung 4. BImSchV	Unternehmensinterne Anlagennummer Anlagenbezeichnung seitens Betreiber (z.B. „Eisengießerei“) Anlagenbezeichnung nach Liste in 4. BImSchV Numerischer Wert der Anlagenleistung Physikalische Einheit Leistung (kW, MW, t/d, t/a m³/h u.a.) Offene Bezeichnung Leistungsbezug (z.B. „Produktionsleistung“) Motoren, sonstige Feuerungen, Gasturbinen Leistungsklassen 1-10 MW, 10-20 MW etc.
Energiebilanz Input	Brennstoffart Gehandhabter Stoff Verwendungsart Anzahl Brennstoff Heizwert (unterer) [kJ/kg] Einsatzmenge [t/a] Anzahl EV		Grobe Einteilung (z.B. „01 – Erdgas“) Detailliertere Einteilung nach BUBE-Stoff-Code (z.B. „00090290 – Erdgas“) Brennstoff / Einsatzstoff Anzahl der verschiedenen Stoffe im gleichen Verbrennungsprozess Unterer Heizwert in [kJ/kg] Eingesetzte Menge des Stoffes in [t/a] Anzahl resultierender Emissionsvorgänge in die Atmosphäre
Energiebilanz Output		Betriebsstunden [h] Volumenstrom [m³/h] Temperatur [°C] Feuchte [%] Staubfracht [kg/a] Fracht NH_3 [kg/a] Fracht NO_2 [kg/a] Fracht [HCL] [kg/a] Fracht HF [kg/a] Fracht SO_2 [kg/a] Fracht SO_x [kg/a]	Laufzeit des Emissionsvorganges im Berichtsjahr in [h/a] Volumenstrom des Abgases im Berichtsjahr in [m³/h] Durchschnittliche Temperatur des Abgases im Berichtsjahr in [°C] Durchschnittliche Feuchte des Abgasstroms im Berichtsjahr in [%] Menge Staub im Abgasstrom in [kg/a] Menge Ammoniak im Abgasstrom in [kg/a] Menge Stickstoffdioxid im Abgasstrom in [kg/a] Menge Chlorwasserstoff im Abgasstrom in [kg/a] Menge Fluorwasserstoff im Abgasstrom in [kg/a] Menge Schwefeldioxid im Abgasstrom in [kg/a] Menge Schwefeloxide, angeben in SO_2-Äq, im Abgasstrom in [kg/a]

Anhang 3: Heizwert-Liste als Stoff-spezifisches Korrekturwerkzeug für die Aufbereitung der Eingangsdaten.

Stoff-ID BUBE	Korrektur-Heiz-wert [kJ/kg]	Unterer Grenzwert [kJ/kg]	Oberer Grenz-wert [kJ/kg]
00000010 - Wasserstoff in Verbindungen	119,920	114,920	124,920
00000060 - Kohlenstoff in Verbindungen	0	1,000	100,000
00000080 - Sauerstoff in Verbindungen	0	1,000	100,000
00000950 - Wasserstoff, molekular	119,972	114,972	124,972
00000960 - Stickstoff, molekular	0	1,000	100,000
00001040 - Fluorwasserstoff	0	1,000	100,000
00001100 - Ammoniak	21,000	16,000	26,000
00001110 - Kohlenmonoxid	10,100	5,100	15,100
00004340 - Aktivkohle	32,000	27,000	37,000
00010000 - Methan	48,900	43,900	53,900
00010010 - Ethan	46,400	41,400	51,400
00010020 - Propan	47,200	42,200	52,200
00010030 - Butan (Isomere)	47,300	42,300	52,300
00010040 - Pentan	45,000	40,000	50,000
00010070 - Toluol	40,940	35,940	45,940
00010100 - Propen	47,300	42,300	52,300
00010420 - Ethanol	26,800	21,800	31,800
00011190 - 2-Propanol	30,240	25,240	35,240
00011240 - Methanol	19,900	14,900	24,900
00012040 - Ethylacetat	24,000	19,000	29,000
00012710 - Ethen	46,400	41,400	51,400
00012720 - Vinylacetat	24,190	19,190	29,190
00013330 - 2-Butanon	33,000	28,000	38,000
00013570 - Acetylen	48,246	43,246	53,246
00014330 - Acrylsaeureamid	25,303	20,303	30,303
00014610 - Polyethylen	0	1,000	100,000
00015510 - Naphthalin	39,460	34,460	44,460
00037340 - n-Butan	47,300	42,300	52,300
00042840 - Solvent Naphtha 100	0	1,000	100,000
00079920 - Organ. Gase u. Daempfe (ohne Methan)	0	1,000	100,000
00080020 - Koks (aus Steinkohle)	28,200	23,200	33,200
00080030 - Rohbraunkohle (allgemein)	11,900	6,900	16,900
00080031 - Rohbraunkohle Rheinland	8,900	3,900	13,900
00080032 - Rohbraunkohle Lausitz	21,600	16,600	26,600
00080033 - Rohbraunkohle Mitteldeutschland	10,700	5,700	15,700
00080038 - Wirbelschicht-Braunkohle Rheinland	21,600	16,600	26,600
00080050 - Steinkohle	31,000	26,000	36,000
00080080 - Holz	15,000	5,000	20,000
00080081 - Holz (ohne Eiche/Buche)	15,000	10,000	20,000
00080330 - Petrolkoks	32,500	27,500	37,500
00080620 - Kokskohle	28,200	23,200	33,200
00081120 - Klaerschlamm	3,500	1,000	8,500
00081430 - Braunkohlenstaub (allgemein)	22,100	17,100	27,100
00081431 - Braunkohlenstaub Lausitz	21,600	16,600	26,600
00081432 - Braunkohlenstaub Mitteldeutschland	19,100	14,100	24,100
00081433 - Braunkohlenstaub Rheinland	22,000	17,000	27,000
00081630 - organ. und anorgan. Verbindungen	0	1,000	100,000
00082000 - Abgas, chlorhaltig	0	1,000	100,000
00083300 - Oelschiefer	8,900	3,900	13,900
00090000 - organische Verbindungen	0	1,000	100,000
00090090 - organische Verbindung mit O-Anteil	0	1,000	100,000
00090110 - Benzin, leicht (ab 35 Grad)	43,000	38,000	48,000
00090160 - Petroleum (ab 200 Grad)	43,000	38,000	48,000
00090210 - Heizoel S	41,000	36,000	46,000
00090220 - Heizoel EL/ Dieselkraftstoff	42,700	37,700	47,700

00090221 - Heizoel EL	42,700	37,700	47,700
00090222 - Dieselkraftstoff	43,000	38,000	48,000
00090230 - Bitumen	33,500	28,500	38,500
00090290 - Erdgas	47,500	42,500	52,500
00090310 - Melasseschnitzel	0	1,000	100,000
00090330 - Braunkohlenbrikett (allgemein)	11,900	6,900	16,900
00090331 - Braunkohlenbrikett Lausitz	19,000	14,000	24,000
00090332 - Braunkohlenbrikett Rheinland	19,700	14,700	24,700
00090430 - Koksofengas	28,200	23,200	33,200
00090690 - Muell	10,000	5,000	15,000
00090840 - Raffineriegas	49,500	44,500	54,500
00090890 - Kohlenwasserstoffe C4	0	1,000	100,000
00091070 - Fette und Oele, tier.+pflanzlich	37,230	32,230	42,230
00091360 - Ottokraftstoff, Super	43,200	38,200	48,200
00091450 - Papier	15,000	10,000	20,000
00091460 - Torf	9,760	4,760	14,760
00091620 - Lignin-sulfons. (Sulfit-Laugen)	7,282	5,000	10,000
00091780 - aliphatische Kohlenwasserstoffe	0	1,000	100,000
00092010 - Krackgas	0	1,000	100,000
00092040 - Kohlenwasserstoffe, C1..C6	0	1,000	100,000
00092080 - Kohlenwasserstoffe, C9..C27	0	1,000	100,000
00092200 - Amine (allgemein)	0	1,000	100,000
00092250 - Acrylverbindungen	0	1,000	100,000
00092430 - Loesungsmittel	0	1,000	100,000
00092660 - Synthesegas	0	1,000	100,000
00092900 - Kaffeebohnen	21,935	16,935	26,935
00092970 - Gichtgas	2,470	1,000	7,470
00093420 - chlorierte Kohlenwasserstoffe	0	1,000	100,000
00093630 - Kohlenwasserstoffe C3+C4 (zb.Fluessiggas)	47,300	42,300	52,300
00093700 - Kohlenwasserstoffe C6 (ohne Benzol)	0	1,000	100,000
00093790 - Autoreifen	34,000	29,000	39,000
00094410 - Abfaelle v. Loesungsm.,Lacken u.aehnl	0	1,000	100,000
00094420 - Destillationsrueckstaende	0	1,000	100,000
00094430 - Abfaelle v. Kunststoffen u.Gummi	10,000	5,000	15,000
00094560 - Altoel	40,200	35,200	45,200
00094600 - Flugbenzin JP1	44,300	39,300	49,300
00095330 - Mineraloele	40,200	35,200	45,200
00096030 - Buchenholz	15,000	10,000	20,000
00096210 - Ottokraftstoff, Super bleifrei	42,700	37,700	47,700
00097010 - Klaergas	16,000	11,000	21,000
00097020 - Deponiegas	16,505	11,505	21,505
00097040 - Biogas	25,000	20,000	30,000
00097070 - Biomasse	11,600	6,600	16,600
00097080 - Tiermehl	0	1,000	100,000
00099990 - keine Angabe zum Stoff	0	1,000	100,000
07228520 - Spanplatten	16,776	11,776	21,776
07230500 - Lösemittel Klasse I TA Luft 2002	15,000	10,000	20,000
07233310 - Abgas zur Verbrennung	0	1,000	100,000
07233980 - Staub aus Klärschlammverbrennung	3,500	1,000	8,500
07234200 - Abfälle zur Verbrennung	10,000	5,000	15,000
08094390 - Abfaelle aus Zellulose, Papier, Pappe	15,000	10,000	20,000
08151580 - Kunststoffe	0	1,000	100,000
08300020 - Abfall, nicht gefährlich i.S. §41 KrW/AbfG	10,000	5,000	15,000
08300100 - Fluff (Ersatzbrennstoff aus geschredderten Siedlungsabfaellen)	16,288	11,288	21,288

Anhang 4: Fragebogen Unternehmensbefragung netzgebunden nutzbare Abwärmepotenziale.

1. Unternehmensangaben

1.1 Stammdatensatz

Zunächst würden wir gerne einige Angaben zu Ihrem Unternehmen erfassen.

Firmenname:	
Ansprechpartner:	
Telefonnummer / Durchwahl Ansprechpartner:	
Email Ansprechpartner:	
PLZ, Ort v. Produktionsstandort:	
Straße, Hausnummer des Produktionsstandortes:	
Wirtschaftszweigklassifikation nach NACE 2008:	
Mitarbeiterzahl 2015 (geschätzt):	
Umsatz 2015 in Mio. €:	
Bitte geben Sie ihre gesamten Produktionsmengen 2015 an:	Hauptprodukt 1: ..... [t, l, m, Stk] Hauptprodukt 2: ..... [t, l, m, Stk] Sonstige Produkte: ..... [t, l, m, Stk]
Sind Sie Betreiber einer Genehmigungspflichtigen Anlage nach 11. BImSchV?	☐ ja ☐ nein ☐ k. A.
Anlagenbeschreibung nach 11. BImSchV:	
Anlagennummer nach 4. BImSchV:	
Welches Energiemanagementsystem führen Sie an Ihrem Standort?	☐ ISO 50001 ☐ EN DIN 16247-1 ☐ EMAS ☐ Alternatives System (SpaEfV Anlage 2) ☐ ....
Erstattung / Vergütung nach:	☐ SpaEfV ☐ EEG §§ 63 ff. ☐ KWK-Vergütung ☐ .....

1.2 Bilanzieller Energieeinsatz

Bitte tragen Sie 100% Ihrer Energieeinsätze für das Bezugsjahr 2015 ein.

Hinweis: Nutzen Sie bitte die Daten im Rahmen der SpaEfV-Nachweise = Tabelle 1.

Energieträger 2015	Einsatzmenge in [**MWh/a**]	Bitte Einsatzmenge mit Einheit angeben **[m³/a, l/a, t/a]**	Energiekosten **[€/a]**
Erdgas			
Heizöl			
Strom			
Fernwärme			
Sonstige bezogene Energieträger (*z.B. Flüssiggas, Kohle, Dampf usw.*) ……			

1.3 Wärmebedarf und -bereitstellung

Im folgenden Abschnitt erfassen wir ihren benötigten Wärmebedarf und die Art der Wärmebereitstellung um den Bedarf zu decken.

a.	Haben Sie KWK-Anlagen zur Eigenerzeugung von Strom bzw. Wärme im Einsatz?	☐ ja ☐ nein *(falls nein weiter mit Frage d)*
b.	Bitte geben Sie die produzierte Strom- & Wärmemenge der KWK-Anlagen [MWh/a] an:	KWK-Strom: .....[MWh/a] KWK-Wärme: .....[MWh/a]
c.	Wieviel selbsterzeugte(n) Strom bzw. Wärme [MWh/a] aus KWK-Anlagen verwenden Sie für interne Zwecke?	KWK-Strom: .....[MWh/a] KWK-Wärme: .....[MWh/a]
d.	Wie wird Überschuss-Wärme genutzt?	
e.	Ist Ihre Betriebsstätte derzeit an ein Nahwärme- bzw. Fernwärmenetz angeschlossen?	☐ ja ☐ nein *(falls ja weiter mit Frage g)*
f.	Bitte schätzen Sie, wie weit [m] ihr Standort vom (nächsten) Wärmenetz entfernt ist?	

g.	Wird für die Produktion in Ihrer Produktionsstätte Prozesswärme > 100°C benötigt?	☐ ja ☐ nein *(falls nein weiter mit Frage l)*
h.	Benötigte Prozesswärmemenge in der Produktion [MWh/a]?	
i.	Benötigte Temperatur der Prozesswärme [°C] in der Produktion?	
j.	Träger-Medium der Prozesswärme?	☐ Dampf ☐ Wasser ☐ Heißluft ☐ Sonstige: _____
k.	Welche Wärmequelle nutzen Sie für die benötigte Prozesswärme?	
l.	Wird für die Produktion Niedertemperaturwärme < 100 C° für Raumwärme & Warmwasser benötigt?	☐ ja ☐ nein *(falls nein weiter mit Abschnitt 2)*
m.	Benötigte Niedertemperaturwärme [MWh/a]:	
n.	Benötigte Temperatur der Niedertemperaturwärme [°C] in der Produktion?	
o.	Träger-Medium der Niedertemperaturwärme?	
p.	Welche Wärmequelle nutzen Sie für die benötigte Niedertemperaturwärme?	

2. Technische Daten bestehender Abwärmeströme

Gewisse Abwärmemengen aus Produktionsprozessen lassen sich theoretisch für eine außerbetriebliche Nutzung erschließen. Im folgenden Abschnitt möchten wir Informationen zu den möglichen Abwärmepotentialen aus Ihrer überschüssigen Prozesswärme / Abwärmequelle erfassen. Definition: Als **(Ab-)Wärmequellen** möglicher **außerbetrieblicher Abwärmenutzung** unterscheiden wir Abgase/Rauchgase, Prozessabluft sowie Prozessabwasser /-kühlwasser wie folgt:

Abgase/ Rauchgase	gefasste Abwärmeströme von Verbrennungsgasen, z.B. aus Schornsteinen (11. BImSchV)
Prozessabluft	konvektive Abwärmeströme, auch aus Kühlprozessen, die ggf. über Lüftungsanlagen abgeführt werden
Prozessabwasser / Kühlwasser	geführte Abwärmeströme mit fluidem Trägermedium

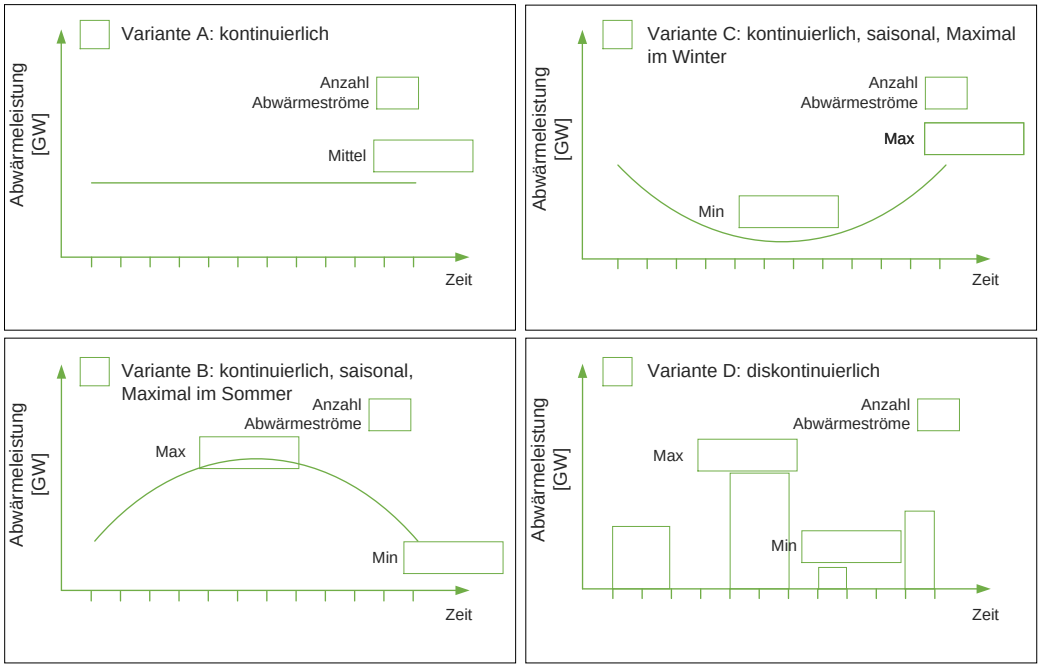
Besteht bei Ihnen ein **Abwärmeüberschuss (Potential)** oder ein **Wärmebedarf** durch **extern** bereitgestellter Abwärme? *Hinweis: Als Potential werden hier überschüssige Abwärmeströme mit einer Temperatur > 65°C bezeichnet.*	☐ **Abwärmeüberschuss** für externe Nutzung ☐ **Wärmebedarf** an extern bezogener Abwärme (weiter mit 0) ☐ Weder noch (weiter mit 3.2)
In welcher Form entstehen in Ihrem Betrieb aus der Erzeugung von Prozesswärme (vor einer möglichen internen Nutzung!) signifikante Wärmeströme?	☐ **Abgas** (weiter mit 2.1) ☐ **Prozessabluft** (weiter mit 0)

	☐ **Ab-/ Kühlwasser** (weiter mit 0)

2.1 Abgase/Rauchgase

a.	Erzeugt Ihre Betriebsstätte durch Produktion oder Energieumwandlungsprozesse **Abgase / Rauch-gase** mit einer Emissionstemperatur >65°C?	☐ ja ☐ nein (weiter mit 0)

b. Welche der folgenden Varianten entspricht dem zeitlichen Verhalten der emittierten Abgase? Bitte kreuzen Sie für ihre Abwärmeströme die zutreffende(n) Variante(n) an. Ergänzen Sie im angekreuzten Quadranten die Max / Min-Werte und die Anzahl der vorhandenen Abwärmeströme, für die zutreffende(n) Variante(n) unter der pauschalen Annahme der Abkühlung der Rauchgase auf 35 °C. Hinweis: Sofern Sie detaillierte Lastgänge zur Verfügung haben, beachten Sie bitte Frage 3.f).



c.	Wie ist Ihr Eindruck? Nutzen in Ihrer Branche bereits viele Betriebe Technologien zur **internen Abwärmenutzung aus Abgase/Rauchgase**, oder sind das einige oder nur wenige?	☐ viele ☐ wenige ☐ keine ☐ unbekannt
d.	Nutzen Sie in Ihrer Betriebsstätte das vorhandene Abwärmepotential aus **Abgasen/Rauchgasen** durch **interne Wärmerückgewinnung** vollständig aus?	☐ ja ☐ anteilige Nutzung ☐ keine Nutzung (weiter mit 0)
e.	Welchen Anteil / Menge an der gesamten Abwärmemenge nutzen Sie bereits intern aus Ihren **Abgasen/Rauchgasen**?	…… [MWh/a] ……. [%] ☐ unbekannt ☐ k. A.
f.	Welche Art der Abwärmenutzung ist bei Ihnen im Einsatz?	☐ Brauchwassererwärmung ☐ Heizung/Heizungsunterstützung ☐ Prozesswärme ☐ Absorptionskälteerzeugung ☐ Stromerzeugung durch ORC-Prozess ☐ Stromerzeugung durch Dampfkraftprozess ☐ Außerbetriebliche Nutzung durch Dritte

		☐ Sonstiges: ……
g.	Können Sie sich prinzipiell vorstellen, Ihren internen Abwärmeüberschuss aus Abgasen in ein Nah-/Fernwärmeanschluss einzuspeisen?	☐ ja ☐ nein

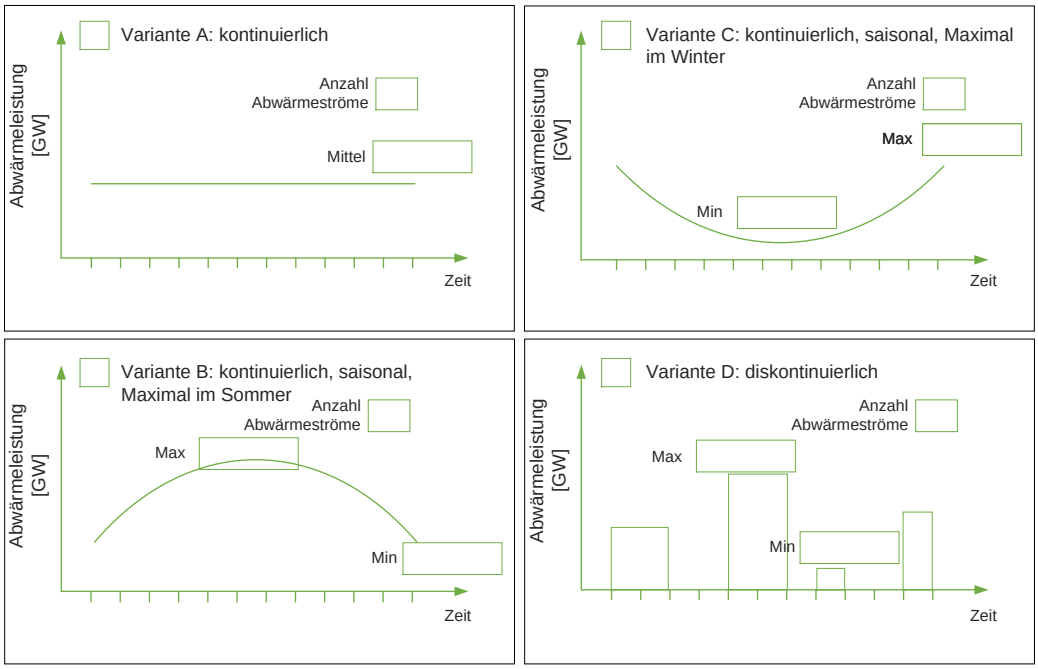
Bitte geben Sie die Anlagen mit **Abgas-/Rauchgasströmen** in der Anlagenübersicht ***unter Abschnitt 0 ein.***

2.2 Prozessabluft

Entspricht Abluftvolumenströmen & -temperatur OHNE die emissionsrelevanten Wärmeströme aus Schornsteinen (11. BImSchV).

a.	Erzeugt Ihre Betriebsstätte durch Produktion oder Energieumwandlungsprozesse **Prozessabluft** mit Abwärmepotential[1]?	☐ ja ☐ nein (weiter mit 0)

b. Welche der folgenden Varianten entspricht dem zeitlichen Verhalten der emittierten Abgase? Bitte kreuzen Sie für ihre Abwärmeströme die zutreffende(n) Variante(n) an. Ergänzen Sie im angekreuzten Quadranten die Max / Min-Werte und die Anzahl der vorhandenen Abwärmeströme, für die zutreffende(n) Variante(n) unter der pauschalen Annahme der Abkühlung der Rauchgase auf 35 °C. Hinweis: Sofern Sie detaillierte Lastgänge zur Verfügung haben, beachten Sie bitte Frage 3.f).



c.	Wie ist Ihr Eindruck? Nutzen in Ihrer Branche bereits viele Betriebe Technologien zur **internen Abwärmenutzung aus Prozessabluft**, oder sind das einige oder nur wenige?	☐ viele ☐ wenige ☐ keine ☐ unbekannt
d.	Nutzen Sie in Ihrer Betriebsstätte das vorhandene Abwärmepotential aus **Prozessabluft** durch **interne Wärmerückgewinnung** vollständig aus?	☐ ja ☐ anteilige Nutzung ☐ keine Nutzung (weiter mit 0)
e.	Welchen Anteil / Menge an der gesamten	

[1] *Hinweis: Als Potential werden hier überschüssige Abwärmeströme mit einer Temperatur > 65°C bezeichnet.*

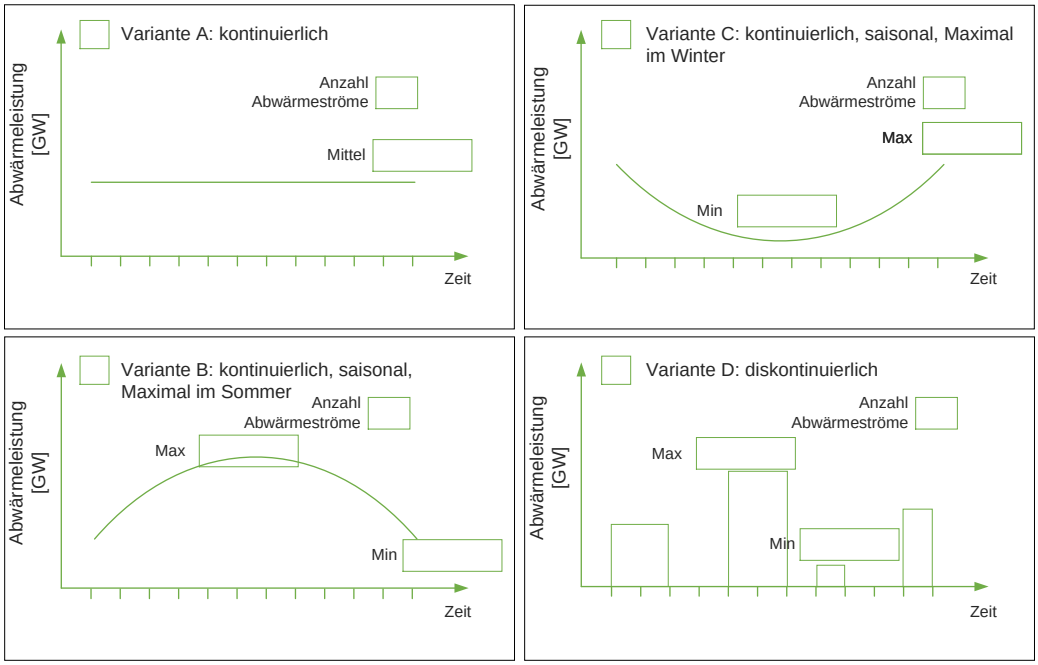
	Abwärmemenge nutzen Sie bereits intern aus Ihren **Prozessabluft**?	..... [MWh/a] ..... [%] ☐ unbekannt ☐ k. A.
f.	Welche Art der Abwärmenutzung ist bei Ihnen im Einsatz?	☐ Lüftungsanlage - Frischlufterwärmung ☐ Brauchwassererwärmung ☐ Heizung/Heizungsunterstützung ☐ Prozesswärme ☐ Absorptionskälteerzeugung ☐ Stromerzeugung durch ORC-Prozess ☐ Stromerzeugung durch Dampfkraftprozess ☐ Außerbetriebliche Nutzung durch Dritte ☐ Sonstiges: .....
g.	Können Sie sich prinzipiell vorstellen Ihren internen Abwärmeüberschuss aus Prozessabluft in ein Nah-/Fernwärmeanschluss einzuspeisen?	☐ ja ☐ nein ☐ k. A.

Bitte geben Sie die Anlagen mit **Prozessabluft**strömen in der Anlagenübersicht ***unter Abschnitt 0 ein.***

2.3 Prozessabwasser / -kühlwasser

a.	Erzeugt Ihre Betriebsstätte durch Produktion oder Energieumwandlungsprozesse **Prozessabwasser / -kühlwasser** mit Abwärmepotential?[1]	☐ ja ☐ nein (weiter mit 0)

b. Welche der folgenden Varianten entspricht dem zeitlichen Verhalten der emittierten Abgase? Bitte kreuzen Sie für ihre Abwärmeströme die zutreffende(n) Variante(n) an. Ergänzen Sie im angekreuzten Quadranten die Max / Min-Werte und die Anzahl der vorhandenen Abwärmeströme, für die zutreffende(n) Variante(n) unter der pauschalen Annahme der Abkühlung der Rauchgase auf 35 °C. Hinweis: Sofern Sie detaillierte Lastgänge zur Verfügung haben, beachten Sie bitte Frage 3.f).



[1] *Hinweis: Als Potential werden hier überschüssige Abwärmeströme mit einer Temperatur > 65°C bezeichnet.*

c.	Wie ist Ihr Eindruck? Nutzen in Ihrer Branche bereits viele Betriebe Technologien zur **internen Abwärmenutzung aus Prozessabwasser / -kühlwasser**, oder sind das einige oder nur wenige?	☐ viele ☐ wenige ☐ kein ☐ unbekannt
d.	Nutzen Sie in Ihrer Betriebsstätte das vorhandene Abwärmepotential aus **Prozessabwasser / -kühlwasser** durch **interne Wärmerückgewinnung** vollständig aus?	☐ ja ☐ anteilige Nutzung ☐ keine Nutzung (weiter mit 0)
e.	Welchen Anteil / Menge an der gesamten Abwärmemenge nutzen Sie bereits intern aus Ihrem **Prozessabwasser / -kühlwasser**?	…… [MWh/a] ……. [%] ☐ unbekannt ☐ k. A.
f.	Welche Art der Abwärmenutzung ist bei Ihnen im Einsatz?	☐ Lüftungsanlage - Frischlufterwärmung ☐ Brauchwassererwärmung ☐ Heizung/Heizungsunterstützung ☐ Prozesswärme ☐ Absorptionskälteerzeugung ☐ Stromerzeugung durch ORC-Prozess ☐ Stromerzeugung durch Dampfkraftprozess ☐ Außerbetriebliche Nutzung durch Dritte ☐ Sonstiges: ……
g.	Können Sie sich prinzipiell vorstellen Ihren internen Abwärmeüberschuss aus Prozessabwasser / -kühlwasser in ein Nah-/Fernwärmeanschluss einzuspeisen?	☐ ja ☐ nein ☐ k. A.

Bitte geben Sie die Anlagen mit **Prozessabwasser / -kühlwasser**strömen in der Anlagenübersicht ***unter Abschnitt 0 ein.***

2.4 Anlagenübersicht

Bezeichnung Wärmequelle / -erzeuger / Abgasstrom	**Energieträger** Hinweis: Siehe eingesetzte Energieträger	**Energieverbrauch [MWh/a] 2015:** Bitte mit angeben: [m]=Messung [s]=Schätzung	**Trägermedium der Abwärme** [Abgas, Abluft, Abwasser, Kühlwasser, Dampf etc.]	**Volumenstrom Trägermedium** [nm³/h bzw. nm³/a] Einheiten bitte angeben!) (nm³ = Normkubikmeter)	**Ø Temperatur [°C]:** [Trägermedium vor Abkühlung]	**Betriebsstunden der Anlage [h/a]:**	**Nennwärmeleistung der Anlage [kW]:**	**Abwärmeverluste im Prozess [%]:**	**Anzahl gleicher Anlagen / Wärmequellen:**
Bsp. 1: Industrie-Backofen	**Erdgas**	**1800 [s]**	**Abluft**	**800 Mio. nm³/a**	**120**	**6000**	**300**	**10%**	**2**
Bsp. 2: Industrie-Waschmaschine	**Strom**	**350 [m]**	**Abwasser**	**200 nm³/h**	**80**	**3000**	**150**	**20%**	**5**

Hinweis: Falls der Platz nicht ausreicht, drucken Sie diese Seite bitte mehrfach aus

3. Potenziale & Hemmnisse externer Abwärmenutzung

Abschließend bitten wir um Ihre Bewertung, inwiefern Ihr Abwärmeüberschuss für Wärmelieferungsverträge geeignet ist und welche Probleme bzw. Hemmnisse bei der Realisierung auftraten / zu erwarten sind.

3.1 Abwärmequellen

a. Wie schätzen Sie das vorhandene Potential am Produktionsstandort zur Lieferung von Abwärme an einen externen Abnehmer ein?

☐ sehr gering ☐ gering ☐ mittel ☐ hoch ☐ sehr hoch

b.	Haben Sie bereits Verträge zur Abwärmeeinspeisung, in denen Sie Abwärme an Dritte verkaufen?	☐ ja ☐ nein *(weiter mit 3.1.e)* ☐ k. A.
c.	Wie zufrieden sind Sie mit dem Gesamtergebnis Ihrer Wärmelieferungsverträge am Produktionsstandort? ☐ sehr unzufrieden ☐ unzufrieden ☐ mittel ☐ zufrieden ☐ sehr zufrieden	
d.	Wieviel (Rest-)Abwärmemenge [MWh/a] könnten Sie theoretisch darüber hinaus noch einspeisen?	
e.	Haben Sie bereits **Szenarien** zur (weiteren) Abwärmelieferung überprüft?	☐ ja ☐ nein *(weiter mit 0)* ☐ k. A.
f.	Liegen bei Ihnen **Lastgangdaten** für die Abwärmeleistung vor?	☐ ja ☐ nein
g.	Falls ja, würden Sie diese Lastgangdaten zur Analyse zur Verfügung stellen? (Die Daten werden vertraulich behandelt)	☐ ja ☐ nein
h.	Können Sie gesicherte Leistungszusagen für die Abwärmeeinspeisung geben?	☐ ja ☐ nein
i.	Falls ja, in welcher Höhe [kW] können Sie gesicherte Leistungszusagen geben?	
j.	In welchen Intervallen müsste eine Abwärmeeinspeisung für die Anlagenrevision/Betriebsruhezeiten etc. unterbrochen werden?	☐ monatlich ☐ quartalsweise ☐ halbjährlich ☐ jährlich
k.	Wie lange [Tage/Jahr] wäre eine Abwärmeeinspeisung infolge Anlagenrevision/Betriebsruhezeiten etc. unterbrochen?	
l.	Ist die Anlagenrevision zeitlich flexibel durchführbar?	☐ ja ☐ nein ☐ eingeschränkt

3.2 Abwärmesenken (nur für teilnehmende Unternehmen mit Wärmebedarf auszufüllen)

a.	Haben Sie bereits **Szenarien** zur externen Abwärmenutzung überprüft?	☐ ja	☐ nein (*weiter mit 0.d)*
b.	Liegen bei Ihnen **Lastgangdaten (Bedarfskurven)** für die benötigte Abwärmeleistung vor?	☐ ja	☐ nein
c.	Würden Sie die Bedarfskurven zur Analyse zur Verfügung stellen? (Die Daten werden vertraulich behandelt)	☐ ja	☐ nein
d.	Welche Abnahmeleistung [kW] benötigen Sie mindestens?		

3.3 Hemmnis Vertragsgestaltung

a.	Sehen Sie in Ihren Szenarien Erschwernisse im Rahmen der Vertragsgestaltung zwischen Lieferant und Abnehmer?	☐ ja ☐ k. A.	☐ nein	
b.	Die **Konzern-/Unternehmensrichtlinie** schreibt Autarkie vor und verhindert(e) bzw. erschwert(e) eine (mögliche) Anbahnung von Abwärmelieferverträgen am Produktionsstandort?	☐ zutreffend ☐ unbekannt	☐ teils zutreffend ☐ k. A.	☐ unzutreffend
c.	Die vertraglich vereinbarte **Absicherung der Wärmebereitstellung** hinsichtlich Kontinuität und Kapazität als "Versorger" verhindert(e) ein Vertragsverhältnis.	☐ zutreffend ☐ unbekannt	☐ teils zutreffend ☐ k. A.	☐ unzutreffend
d.	Die vertraglich vereinbarte **Vertragslaufzeit** und damit **Standortbindung** für ein NICHT-Kerngeschäft "Abwärme" verhindert ein Vertragsverhältnis.	☐ zutreffend ☐ unbekannt	☐ teils zutreffend ☐ k. A.	☐ unzutreffend
e.	Die vertraglich vereinbarte **Parametrierung der Wärme** (Menge, Leistung, Temperatur, Lieferzeiten, Vorankündigungen, ...) legen dem Unternehmen (Abwärme-Lieferant) scheinbar Fesseln an.	☐ zutreffend ☐ unbekannt	☐ teils zutreffend ☐ k. A.	☐ unzutreffend
f.	Das **Fernwärmeversorgungsunternehmen** = FVU als Wärmesenke hat Sorge, dass die Wärme nicht zuverlässig bereitgestellt wird (stranded Investment; Vorhalten Reservekessel & Bevorraten Brennstoff).	☐ zutreffend ☐ unbekannt	☐ teils zutreffend ☐ k. A.	☐ unzutreffend
g.	Welche der **vertraglichen Nebenbedingungen** in der Lieferanbahnung verhindern bislang bzw. erschwerten den Vertragsabschluss?	☐ Take-or-Pay-Vertrag (ToP) ☐ Pönale bei Lieferungsausfall ☐ Preisgleitklausel ☐ Änderung der Eigentumsverhältnisse ☐ Wechsel des juristischen Vertragspartners ☐ Sonstige: _____		

3.4 Hemmnis Parametrierung

Eine abgestimmte Parametrierung ist Grundvoraussetzung für das Zustandekommen von Wärmelieferverträgen. Die nachfolgenden Aussagen beziehen sich sowohl auf bereits abgeschlossene, in Planung befindliche oder theoretisch mögliche Szenarien und sind unabhängig vom Vertragspartner (Abwärmequelle / Abwärmesenke) gleichermaßen zu beantworten.

a.	Die zur Verfügung stehende bzw. benötigte Abwärme**menge** war / ist für eine vertragliche Wärmelieferung:	☐ zu gering ☐ unbekannt	☐ passend ☐ k. A.	☐ zu groß
b.	Die zur Verfügung stehende bzw. benötigte Abwärme**leistung** war / ist für eine vertragliche Wärmelieferung:	☐ zu gering ☐ unbekannt	☐ passend ☐ k. A.	☐ zu groß
c.	Die zur Verfügung stehende bzw. benötigte Abwärme**temperatur** war / ist für eine vertragliche Wärmelieferung:	☐ zu gering ☐ unbekannt	☐ passend ☐ k. A.	☐ zu groß
d.	Die **Entfernung(en)** zwischen unserer(n) Abwärmequelle(n) und potentiellen Abnehmern (Vertragspartner) war / ist:	☐ zu gering ☐ unbekannt	☐ passend ☐ k. A.	☐ zu groß

3.5 Sonstige Hemmnisse

a.	Welche Gründe erschwer(t)en bzw. verhinder(te)n eine **Wärmelieferung** der überschüssigen Wärme bzw. **Abnahme von Abwärme**?	☐ Gefährdung Anlagenverfügbarkeit ☐ Einschränkungen im Produktionsprozess ☐ Sicherheitsanforderungen ☐ externe Wärme**senken** unzureichend bekannt ☐ externe Wärme**quellen** unzureichend bekannt ☐ Finanzielle Mittel ☐ fehlende Wirtschaftlichkeit ☐ interne Ressourcen / Know-how ☐ Gelände / bauliche Gegebenheiten / Entfernung ☐ Raum-/ Platzmangel
b.	**Sonstige** Erschwernisse / Herausforderungen für eine externe bzw. interne Nutzung von überschüssiger industrieller Abwärme?	

3.6 Förderprogramme

a.	Kennen Sie passende Fördermöglichkeiten zur Förderung von Projekten zur Abwärmenutzung?	☐ ja ☐ nein
b.	Sind - sofern vorhanden – Ihre möglichen Szenarien wirtschaftlich darstellbar?	☐ ja ☐ nein ☐ k. A.
c.	Ab welcher Förderquote /-höhe wäre ein Wärmeliefervertrag wirtschaftlich?	……[€] .....[%]
d.	Welche Förderprogramme haben Sie bereits in Projekten genutzt bzw. nutzen Sie aktuell in ihren Szenarien?	
e.	In welchem Status befinden sich die Projekte / Szenarien?	☐ Antragstellung Fördermittel ☐ Einholen Genehmigungsbescheid ☐ in der Umsetzungsplanung ☐ in Bearbeitung ☐ abgeschlossen ☐ verworfen
f.	Worin lagen Schwierigkeiten bzw. woran scheiterten Antragstellungen zur Abwärme? (z.B. fehlende Ressourcen / Know-how, Antragstellung / Antragsplattform, abgelehntes Abwärmenutzungskonzept etc.)	
g.	Wie kann man diese aus Ihrer Sicht beseitigen/umgehen?	
h.	Wie sollte aus Ihrer Sicht ein optimales Förderprogramm zur netzgebundenen Nutzung industrieller Abwärme aussehen?	
i.	Was können Sie anderen Unternehmen empfehlen, die Überlegungen zur Abwärmenutzung anstellen?	
j.	Wie können aus Ihrer Sicht die politischen Rahmenbedingungen verändert werden, um eine außerbetriebliche Nutzung von Abwärme in Wärmenetzen an technisch geeigneten Standorten attraktiv zu gestalten?	

Herzlichen Dank für Ihre Unterstützung.

Anhang 5: Zehn Schlüsselbotschaften zur Nutzung von Abwärme.

1. Es gibt große, ungenutzte Potenziale im Bereich externer Abwärmeeinspeisung

87% der Unternehmen verfügen über einen Überschuss an Abwärme mit einem Temperarturniveau von mind. 65 °C, der ungenutzt bleibt und damit grundsätzlich für eine externe Nutzung in Frage kommt. In Bezug auf das zeitliche Verhalten der Wärmeemission liegt in 63% der Fälle ein für die externe Auskopplung von Abwärme sehr gut geeigneter, kontinuierlicher Verlauf über das Jahr vor.

2. Unternehmensseitig ist die Bereitschaft zu externen Abwärmeeinspeisung vorhanden

Zwei Drittel der befragten Unternehmen können sich vorstellen, den bestehenden Abwärmeüberschuss in ein externes Wärmenetz einzuspeisen. Die dafür infrage kommenden Abwärmeströme entfallen zu 45% auf Abgase / Rauchgase, zu 28% auf Prozessabluft /-kühlwasser sowie zu 27% auf Prozessabwasser.

3. Abwärmenutzung ist insbesondere bei Nicht-KMU ein Handlungsfeld

Energieeffizienz beschäftigt grundsätzlich energieintensive Unternehmen jeglicher Größenordnung. Für die durchgeführte Befragung haben jedoch insbesondere größere Unternehmen ihr Interesse zur Teilnahme bekundet. So gehört lediglich eine Minderheit der Teilnehmer den kleinen und mittleren Unternehmen (KMU, < 250 Mitarbeiter und Umsatz < 50 Mio. €) an, während der Großteil eigenständige rechtliche Einheiten bzw. Standorte von größeren Unternehmen repräsentiert.

4. Je höher der Energieverbrauch im Unternehmen, desto größere Aufmerksamkeit erhält das Thema Abwärmenutzung

Betrachtet man die fünf Unternehmen mit dem höchsten Energieeinsatz, so fällt auf, dass diese im Vergleich zum Gesamtergebnis der Studie weit überdurchschnittlich oft bereits Abwärme außerbetriebliche Wärmenetze einspeisen (60% vs. 16%). Darüber hinaus haben vier der fünf Unternehmen bereits Szenarien zur Einspeisung geprüft, 3 von 5 Unternehmen kennen die bestehenden Fördermöglichkeiten für außerbetriebliche Wärmenetze.

5. Der RoI als wichtige Steuerungskennzahl steht Abwärmeprojekten häufig im Weg

Der Return on Investment (RoI) gibt die prozentuale Relation zwischen Investition und Gewinn an und ist eine in Unternehmen weit verbreitete Kennzahl zur Beurteilung der Rentabilität von Investitionen. Bei den befragten Unternehmen bzw. zur Studienteilnahme angefragten Unternehmen wird im Regelfall seitens der Unternehmensführung ein RoI zwischen 1 und 5 Jahren gefordert, wobei der Schwerpunkt bei einem RoI zwischen 1 und 2 Jahren liegt.

Vor diesem Hintergrund haben Abwärmeprojekte mit ihrem typischen Charakter (hohe Anfangsinvestition, geringe Marge, dafür jedoch lange Nutzungsdauer) einen schweren Stand im unternehmensinternen Wettbewerb mit anderen Investitionsprojekten. In der Konsequenz erhalten entsprechende Projekte häufig nicht die Freigabe zur Umsetzung.

6. Mangelnde Kapazitäten & Know-how zur Prüfung und Umsetzung von Projekten

Der überwiegende Anteil der Befragten Unternehmen ist grundsätzlich bereit, Abwärme in Wärmenetze einzuspeisen. Konkrete Szenarien hierfür haben jedoch lediglich 37% der Unternehmen geprüft. Eine häufig genannte Ursache liegt in dem Mangel an Bearbeitungskapazitäten für entsprechende Projekte bzw. auch dem fehlenden Know-how, Projekte zur externen Nutzung von Abwärme erfolgreich zu bearbeiten.

7. Unternehmen machen derzeit kaum Gebrauch von der externen Abwärmeeinspeisung

Gerade einmal 16% der befragten Unternehmen speisen ihre Überschussabwärme aktuell in externe Wärmenetze ein. Die Untersuchung der Ursachen für diese geringe Einspeisequote hat zwei wesentliche Aspekte zum Vorschein gebracht: zum einen haben sich erst 37% der Studienteilnehmer konkret mit einer möglichen Einspeisung von Überschussabwärme in externe Nah- oder Fernwärmenetze beschäftigt. Zum anderen halten 53% der Befragten die mangelnde Wirtschaftlichkeit solcher Projekte für ein wesentliches Hindernis auf dem Weg zu einer stärkeren externen Abwärmeeinspeisung.

8. Förderprogramme sollten bereits in der Phase der Wirtschaftlichkeitsprüfung ansetzen

Über die Hälfte der befragten Unternehmen kennt keine passenden Fördermöglichkeiten zur Nutzung von Abwärme. Dabei existieren verschiedenste Programme, auch solche zur Entwicklung von Machbarkeitsstudien in der Planungsphase potenzieller Projekte. Solche Förderungen erscheinen besonders geeignet, um stärkere Anreize zur Überprüfung konkreter Szenarien zur außerbetrieblichen Abwärmenutzung zu schaffen.

9. Es herrscht eine geringe Transparenz zwischen Wärmequellen und Senken

Über die Hälfte der Befragten Unternehmen kann nicht abschätzen, wie weit das nächste Wärmenetz entfernt ist. Darüber hinaus haben die im Rahmen der durchgeführten Unternehmensfallstudien stattfindenden Diskussionen gezeigt, dass die Unternehmen im Regelfall nur eine geringe Transparenz darüber haben, wo in der näheren Umgebung sich Wärmesenken befinden und wie groß deren Wärmebedarf ist.

10. Unternehmen benötigen mehr Transparenz über die Anforderungen an einen Abwärmelieferanten

Auch in Bezug auf bestehende Hemmnisse zur Einspeisung zeigt sich, dass die Unklarheit über die Anforderungen der Senkenseite eine wichtige Rolle spielt. So sind sich z.B. 11 von 15 Befragten, welche die vorhandene Wärmeleistung als Hemmnis sehen, im Unklaren darüber, welche Wärmeleistung für die Versorgung einer externen Wärmesenke notwendig wäre.

Übersicht: Schlüsselbotschaften zur außerbetrieblichen Abwärmenutzung.